



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**JOSEMAIRON PRADO PEREIRA**

**Comparação dos métodos de análise de deslocamento por escaneamento a *laser* e por  
elementos finitos de perfis de aço estrutural soldados**

BAURU

2024

**Josemairon Prado Pereira**

**Comparação dos métodos de análise de deslocamento por escaneamento a *laser* e por elementos finitos de perfis de aço estrutural soldados**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. Capello Sousa  
Coorientador: Prof. Dr. Gilberto M. B. Gonçalves

BAURU - SP

2024

P436c

Pereira, Josemairon Prado

Comparação dos métodos de análise de deslocamento por escaneamento a laser e elementos finitos de perfis de aço estrutural soldados / Josemairon Prado Pereira. -- , 2024

259 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Engenharia, Bauru,

Orientador: Edson Antonio Capello Sousa

Coorientador: Gilberto M. B. Gonçalves

1. MEF. Soldagem MAG. 2. Ciclo térmico. 3. Distorção. 4. Tensão Residual. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE JOSÉMAIRON PRADO PEREIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 12 dias do mês de janeiro do ano de 2024, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de JOSÉMAIRON PRADO PEREIRA, intitulada **COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE DESLOCAMENTO POR ESCANEAMENTO A LASER E ELEMENTOS FINITOS DE PERFIS DE AÇO ESTRUTURAL SOLDADO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. VOLODYMYR PONOMAROV (Participação Virtual) do(a) Faculdade de Engenharia Mecânica / UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, Prof. Dr. RAUL GOHR JÚNIOR (Participação Virtual) do(a) IMC-ENGENHARIA DE SOLDAGEM I. A. LTDA. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final:       APROVADO       . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA

Documento assinado digitalmente  
 gov.br EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA  
Data: 12/01/2024 18:06:53-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dedico este trabalho a Deus, autor da minha vida:

*“Porque d’Ele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém.”*

(Romanos 11:36)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, razão da minha existência, que me concedeu força, ânimo e sabedoria, em todos os momentos, para conseguir chegar ao final desta etapa da minha vida.

À minha família, pelas orações, apoio e por compreender minhas ausências e momentos de reclusão, em decorrência do compromisso com os estudos e com a pesquisa. Especialmente, ao meu pai (em memória) e a minha mãe, que sempre me incentivaram a estudar e inculcaram valores que permeiam e norteiam minha vida: este é o maior legado que poderiam deixar.

À minha querida esposa, Lilian, que, com amor, carinho e muita paciência, me acompanhou e apoiou, neste percurso.

Aos meus preciosos filhos, Jônatas, Jéssica e Letícia, pelo amor incondicional, orações, ideias e abraços, os quais me impulsionaram a seguir em frente.

Ao meu orientador, Professor Dr. Edson Antônio Capello Sousa, pelo exemplo e por acreditar em mim. Sou-lhe grato por me apresentar direções, assegurando minha autonomia, e por ter-me dado esta oportunidade de ampliar os conhecimentos.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Gilberto M. B. Gonçalves, também pela orientação e pelo encorajamento, exemplo, disponibilidade e atenção, nas etapas da pesquisa científica.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por compartilharem seus conhecimentos e, sobretudo, por proporcionarem discussões e reflexões produtivas sobre a soldagem.

Aos Professores que aceitaram gentilmente compor a banca do Exame Geral de Qualificação e Defesa, Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon e Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, pelo tempo e atenção dedicados à leitura, análise criteriosa e pelas importantes sugestões e contribuições feitas ao trabalho.

Ao Cristiano, do Laboratório de Soldagem, por sempre auxiliar no preparo dos corpos de prova e do robô de solda, no SENAI de Pederneiras, e acompanhamento constante, durante os processos de soldagem no Laboratório.

Ao instrutor Rodrigo e ao diretor Rodolfo, do SENAI de Pederneiras, o qual disponibilizou o Laboratório de Soldagem, para a realização dos testes com o robô Motoman UP6, documentando formalmente a parceria com a UNESP – Bauru.

À CADEP, pelo desenvolvimento dos escaneamentos no Laboratório de Processamento de Imagens.

À Vas Tecnologia, especialmente aos professores Flávio e Leandro, pela dedicação de seu tempo no Laboratório de Tensão Residual por XRD.

Ao Laboratório de Física da UNESP-Bauru, que executou prontamente os testes de análise química dos CPs.

Ao Laboratório de Espectrometria da Jacto de Quintana - SP, que prontamente atendeu à solicitação de parceria com a UNESP, no desenvolvimento deste trabalho, realizando os testes dos CPs.

Ao Prof. Dr. Rony Farto Pereira, por aceitar o desafio de revisar e contribuir, com sabedoria, para o aperfeiçoamento da escrita do texto desta Tese.

A nossa prima, Eliane Martins, que ajudou na formatação das páginas.

Aos colegas e amigos de turma, pois, durante esses anos de caminhada, desenvolvemos relacionamentos, aprendemos e crescemos juntos e celebramos a conquista de cada um como se fosse nossa.

Finalmente, a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização desta pesquisa.

A todos vocês, declaro minha profunda e sincera gratidão.

PEREIRA, Josemairon P. **Comparação dos métodos de análise de deslocamento por escaneamento a *laser* e por elementos finitos de perfis de aço estrutural soldados**. 2024. 286 f. Tese (Tese Acadêmica em Engenharia Mecânica) - UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2024.

## RESUMO

Dentre os fatores inerentes ao processo fabril, duas variáveis significativas influenciam a qualidade do cordão de solda, na fabricação e montagem das estruturas metálicas e precisam manter baixa variabilidade com limites confiáveis: a distorção e a tensão residual. Assim, este trabalho focaliza o mapeamento dessas distorções e as tensões residuais oriundas do processo de soldagem MAG e causadas pela fonte de calor. Para isso, é importante ter um método de escaneamento a *laser*, para analisar o comportamento do aço estrutural, mediante a aplicação da soldagem, este método foi validado através do método de elementos finitos, simulando a situação real, isso permitirá assegurar a qualidade fabril necessária. Diante disso, os perfis de aço ASTM A36 na chapa dobrada tipo U 100 x 50 x 3,04 mm e U 100 x 50 x 2,65 mm, conformados no aço ARBL CSN Civil 300, foram submetidos ao processo de soldagem e o sistema acoplado ao braço robótico Motoman UP6, usando quatro tipos de juntas experimentais com e sem ponteamientos, dois tipos de arame-eletrodos, AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6, proteção gasosa de 75% Ar - 25% CO<sub>2</sub> e parâmetros de soldagem que mantêm a mesma corrente. A metodologia apresentada baseia-se no escaneamento a *laser* instantâneo das peças a serem unidas com sobreposição de nuvem de pontos, no mesmo referencial, assessorado pelo método de elementos finitos, com o *software* ANSYS 2021.R2, realizando a análise matemática tridimensional. O método de escaneamento a *laser* avaliou diretamente a distorção no perfil dobrado e a modelagem da fonte de calor em movimento, validado pelo método de elementos finitos, considerando a dupla elipsoide de Goldak, mapeando a distribuição térmica e, consequentemente, as tensões residuais e distorções provenientes da ação do calor. Na sequência, com o auxílio de termopares, verificaram-se as temperaturas alcançadas na soldagem, as quais serviram de base para o método de elementos finitos e conferência do aporte térmico, que promovem as tensões residuais. Essas tensões devido à soldagem MAG foram medidas por equipamento de difração de raio-X, para validação do modelo por elementos finitos. Contudo, a fim de nortear as respostas do escaneamento a *laser*, os corpos de prova foram analisados quanto à macroestrutura, microdureza, aos resultados de teste a tração e da análise química. Os resultados obtidos com a validação do modelo numérico, através do procedimento experimental por XRD, permitiram visualizar o comportamento dessas tensões e sua origem próxima ao cordão de solda, em função da conformação sofrida. Com o processo de soldagem robotizado bem-sucedido, o escaneamento a *laser* foi eficaz na determinação da distorção apresentada pelos corpos de prova e validado pelo método dos elementos finitos, com alto grau de assertividade, resultando em um procedimento que pode prever as distorções também em outras condições, ou mesmo em novo procedimento de soldagem de maior penetração, assim como propiciar melhorias nas especificações de soldagem e na automação do processo de soldagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** MEF. Soldagem MAG. Ciclo térmico. Distorção. Tensão Residual.

PEREIRA, Josemairon P. **Comparison of welded structural steel profiles displacement analysis methods by laser scan and by finite elements**. 2024. 286 f. Thesis (Academic Thesis in Mechanical Engineering) - UNESP, Faculty of Engineering, Bauru, 2024.

## ABSTRACT

Among the inherent factors in the manufacturing process, two significant variables influence the quality of the weld bead in the fabrication and assembly of metal structures and need to maintain low variability with reliable limits: distortion and residual stress. Thus, this work focuses on mapping these distortions and residual stresses resulting from the MAG welding process caused by the heat source. For this purpose, it is important to have a laser scanning method to analyze the behavior of structural steel upon welding; this method was validated through the finite element method, simulating the real situation, which will ensure the necessary manufacturing quality. In this context, ASTM A36 steel profiles in U-shaped bent plates 100 x 50 x 3.04 mm and 100 x 50 x 2.65 mm, formed in ARBL CSN Civil 300 steel, were subjected to the welding process with the system coupled to the Motoman UP6 robotic arm, using four types of experimental joints with and without tack welds, two types of wire-electrodes, AWS ER70S-3 and AWS ER70S-6, gas shield of 75% Ar - 25% CO<sub>2</sub>, and welding parameters maintaining the same current. The methodology presented is based on instantaneous laser scanning of the parts to be joined with point cloud overlay, in the same frame of reference, assisted by the finite element method, using ANSYS 2021.R2 software, performing three-dimensional mathematical analysis. The laser scanning method directly assessed the distortion in the bent profile and the modeling of the moving heat source, validated by the finite element method, considering the Goldak double ellipsoid, mapping the temperature distribution and consequently, the residual stresses and distortions resulting from heat action. Subsequently, with the aid of thermocouples, the temperatures reached in welding were verified, which served as a basis for the finite element method and confirmation of the thermal input, which promote residual stresses. These welding-induced stresses were measured by X-ray diffraction equipment for finite element model validation. However, in order to guide the responses of laser scanning, the test specimens were analyzed for macrostructure, microhardness, tensile test results, and chemical analysis. The results obtained with the validation of the numerical model, through the experimental XRD procedure, allowed visualizing the behavior of these stresses and their origin near the weld bead, due to the undergone conformation. With the successful robotic welding process, laser scanning was effective in determining the distortion presented by the test specimens and validated by the finite element method, with a high degree of accuracy, resulting in a procedure that can predict distortions also under other conditions, or even in a new welding procedure with greater penetration, as well as provide improvements in welding specifications and automation of the welding process.

**KEYWORDS:** FEM. MAG welding. Thermal cycle. Distortion. Residual Stress.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 - Microestrutura do aço ASTM A36 nas regiões conformadas a frio .....                  | 9  |
| Figura 3.2 - Processo de dobramento .....                                                         | 10 |
| Figura 3.3 - Deslocamentos locais do processo de conformação da chapa dobrada .....               | 10 |
| Figura 3.4 - Alteração do módulo de elasticidade entre os metais em função da temperatura .....   | 11 |
| Figura 3.5 - Revenimento do aço carbono variando temperatura e peso de carbono .....              | 12 |
| Figura 3.6 - Tensão de escoamento x temperatura de transição para os aços ARBL .....              | 12 |
| Figura 3.7 - Esquema de resistência elétrica do arco voltaico .....                               | 14 |
| Figura 3.8 - Processo de soldagem GMAW .....                                                      | 15 |
| Figura 3.9 - Processo de soldagem MIG/MAG, na transferência por curto-circuito .....              | 16 |
| Figura 3.10 - Ilustração das regiões de junta soldada .....                                       | 17 |
| Figura 3.11 - Particularidades do cordão de solda .....                                           | 18 |
| Figura 3.12 - Esquema do crescimento competitivo de grãos na zona fundida .....                   | 19 |
| Figura 3.13 - Modos de solidificação da poça de fusão, ampliado 67 x. ....                        | 20 |
| Figura 3.14 - Processo de solidificação na junta soldada de topo .....                            | 20 |
| Figura 3.15 - Diagrama de fases ternário Mo, Cr e Ni .....                                        | 21 |
| Figura 3.16 - Tabela de Schaeffler: expectativa da constituição da solda a partir das ligas ..... | 22 |
| Figura 3.17 - Regiões do cordão de solda por fusão e suas microestruturas .....                   | 22 |
| Figura 3.18 - Influência do pré-aquecimento na largura e na dureza da ZAC .....                   | 23 |
| Figura 3.19 - Posicionamento da junta diante da vazão do gás de proteção .....                    | 24 |
| Figura 3.20 - Efeito da posição e sentido da tocha de soldagem sobre o cordão de solda .....      | 25 |
| Figura 3.21 - Sequência de soldagem de topo em chapa plana .....                                  | 26 |
| Figura 3.22 - Poças de fusão no processo de soldagem MIG/MAG .....                                | 27 |
| Figura 3.23 - Diagrama CCT do aço microligado ao Nióbio e curvas de resfriamento .....            | 31 |
| Figura 3.24 - Esquema de um ciclo térmico de soldagem .....                                       | 31 |
| Figura 3.25 - Corrente x tensão elétrica típico do ciclo por curto-circuito .....                 | 34 |
| Figura 3.26 - Formas de trajeto das fontes de calor na soldagem .....                             | 37 |
| Figura 3.27 - Fluxo de calor e as curvas isotérmicas na chapa grossa .....                        | 39 |
| Figura 3.28 - Fluxo de calor e as curvas isotérmicas na chapa fina .....                          | 39 |
| Figura 3.29 - Distribuição térmica em torno da poça de fusão, na espessura da chapa .....         | 41 |
| Figura 3.30 - Fluxograma dos diferentes campos e suas iterações na simulação de soldagem .....    | 42 |
| Figura 3.31 - Resumo das equações no campo de temperatura e sua aplicação na soldagem .....       | 45 |
| Figura 3.32 - Modelo de fonte superficial de Gauss .....                                          | 46 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.33 - Esquema de fonte elipsoidal .....                                             | 47 |
| Figura 3.34 - Modelo de fonte de calor de soldagem de Goldak .....                          | 48 |
| Figura 3.35 - Tensão residual devido ao processo de soldagem .....                          | 54 |
| Figura 3.36 - Esquema do deslocamento pontual promovido pelas tensões internas .....        | 56 |
| Figura 3.37 - Ilustração da relação da temperatura com a tensão residual na soldagem.....   | 57 |
| Figura 3.38 - Esquema dos componentes do equipamento de difração de raio-X .....            | 59 |
| Figura 4.1 - Robô com a tocha de soldagem acoplada .....                                    | 61 |
| Figura 4.2 - Preparação e posicionamento-padrão das juntas .....                            | 62 |
| Figura 4.3 - Preparo da Peça de teste para o procedimento de soldagem na posição 2G.....    | 63 |
| Figura 4.4 - Projeto da mesa para gabarito e referenciamento da Peça de teste.....          | 63 |
| Figura 4.5 - Algoritmo da programação do robô para executar o processo de soldagem .....    | 64 |
| Figura 4.6 - Preparação das juntas para o procedimento de soldagem.....                     | 65 |
| Figura 4.7 - Seccionamento das Peças de teste, conforme sua finalidade.....                 | 67 |
| Figura 4.8 - Captura tridimensional da nuvem de pontos do escaneamento a <i>laser</i> ..... | 68 |
| Figura 4.9 - CP usinado para ensaio de tração .....                                         | 69 |
| Figura 4.10 - Equipamento de difração de raio-X .....                                       | 70 |
| Figura 4.11 - Regiões de análise da tensão residual .....                                   | 70 |
| Figura 4.12 - Deformação por dobramento .....                                               | 72 |
| Figura 4.13 - CP com a situação dos pontos das medidas de microdureza dos aços .....        | 73 |
| Figura 4.14 - Espectrômetro .....                                                           | 74 |
| Figura 4.15 - Execução da soldagem MAG, norma ASME seção IX (ASME, 1998) .....              | 75 |
| Figura 4.16 - Aquisitor de temperatura: TC-08 <i>Data Logger</i> .....                      | 76 |
| Figura 4.17 - Distribuição dos pontos de fixação dos termopares.....                        | 77 |
| Figura 4.18 - Termopar tipo K.....                                                          | 77 |
| Figura 4.19 - Fluxograma metodológico .....                                                 | 78 |
| Figura 4.20 - Modelo sólido tridimensional da Peça de teste.....                            | 79 |
| Figura 4.21 - Fluxo elipsoide.....                                                          | 80 |
| Figura 4.22 - Dimensões do Fluxo elipsoide baseado nos experimentos.....                    | 81 |
| Figura 4.23 - Elemento finito do tipo SOLID70 .....                                         | 83 |
| Figura 4.24 - Malha de elementos finitos .....                                              | 84 |
| Figura 4.25 - Fluxo de energia na soldagem GMAW-MAG.....                                    | 87 |
| Figura 4.26 - Medidas da junta soldada do aço ASTM A36, ampliadas 13 x.....                 | 88 |
| Figura 4.27 - Medidas da junta soldada do aço CSN Civil 300, ampliadas 13 x .....           | 88 |
| Figura 4.28 - Condição de fixação da Peça de teste .....                                    | 90 |

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.1 - Procedimento de soldagem elaborado no conjunto de Peças de teste A2 .....                                                                     | 91  |
| Figura 5.2 - Padrão de onda do processo de soldagem.....                                                                                                   | 92  |
| Figura 5.3 - Distorção da Peça de teste A133 .....                                                                                                         | 92  |
| Figura 5.4 - Distorção da Peça de teste A233 .....                                                                                                         | 93  |
| Figura 5.5 - Distorção do corpo da Peça de teste B133.....                                                                                                 | 93  |
| Figura 5.6 - Distorção da Peça de teste B233.....                                                                                                          | 93  |
| Figura 5.7 - Distorção longitudinal no centro do perfil.....                                                                                               | 94  |
| Figura 5.8 - Flexão na Peça de teste .....                                                                                                                 | 95  |
| Figura 5.9 - Ilustração baseada nos dados das figuras 10.46 - 10.54 do apêndice. ....                                                                      | 95  |
| Figura 5.10 - Rompimento das Peças de teste: a) ARBL CSN Civil 300 e b) ASTM A36 .....                                                                     | 96  |
| Figura 5.11 - Tensão residual avaliada pelo equipamento $\mu$ -X360s, no ponto inicial transversal da Peça de teste A244, ao lado do cordão de solda ..... | 97  |
| Figura 5.12 - Tensão residual média situada nas Peças de teste A, próxima ao cordão de solda ....                                                          | 98  |
| Figura 5.13 - Tensão residual média encontrada no metal de base das Peças de teste A.....                                                                  | 98  |
| Figura 5.14 - Tensão residual no percurso da dobra.....                                                                                                    | 99  |
| Figura 5.15 - Tensão residual média na dobra do perfil metálico ASTM A36 .....                                                                             | 99  |
| Figura 5.16 - Representação dos planos de corte na Peça de teste.....                                                                                      | 100 |
| Figura 5.17 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço ASTM A36 .....                                                                    | 100 |
| Figura 5.18 - Gráfico da tensão residual longitudinal nas amostras do aço ASTM A36 .....                                                                   | 101 |
| Figura 5.19 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço ASTM A36 .....                                                                    | 101 |
| Figura 5.20 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço CSN Civil 300 .....                                                               | 101 |
| Figura 5.21 - Gráfico da tensão residual longitudinal nas amostras do aço CSN Civil 300 .....                                                              | 102 |
| Figura 5.22 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço CSN Civil 300 .....                                                               | 102 |
| Figura 5.23 - Curvas de dureza para os conjuntos A1, A2, B1 e B2.....                                                                                      | 103 |
| Figura 5.24 - Análise macrográfica do corpo de prova A123 .....                                                                                            | 104 |
| Figura 5.25 - Análise macrográfica do corpo de prova A221 .....                                                                                            | 104 |
| Figura 5.26 - Análise macrográfica do corpo de prova B121 .....                                                                                            | 105 |
| Figura 5.27 - Análise macrográfica do corpo de prova B224 .....                                                                                            | 105 |
| Figura 5.28 - Fotomacrografias das juntas soldadas.....                                                                                                    | 106 |
| Figura 5.29 - Áreas para cálculo da diluição da solda.....                                                                                                 | 106 |
| Figura 5.30 - Repartição térmica de soldagem experimental .....                                                                                            | 107 |
| Figura 5.31 - Distribuição térmica corrido 66 mm pela tocha de soldagem no perfil.....                                                                     | 108 |
| Figura 5.32 - Ciclo térmico de soldagem .....                                                                                                              | 109 |
| Figura 5.33 - Distribuição térmica na abertura do arco elétrico .....                                                                                      | 110 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.34 - Distribuição térmica na formação da ZAC.....                                                                                                                     | 110 |
| Figura 5.35 - Ciclos térmicos pelos MEF e experimentais registrados pelos canais nas distâncias de 0 mm, 8 mm, 11 mm, 17 mm e 22 mm a partir do centro do cordão de solda..... | 111 |
| Figura 5.36 - Distribuição térmica na junta soldada dos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, nos instantes de 1, 5, 10, 20 e 38 segundos .....                                  | 112 |
| Figura 5.37 - Distribuição térmica na seção transversal da junta soldada dos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, nos instantes de 1, 5, 10, 20 e 35 segundos.....              | 113 |
| Figura 5.38 - Distribuição térmica da junta soldada da Peça de teste nos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, para os instantes de 5, 10, 20 e 38 segundos.....                 | 115 |
| Figura 5.39 - Distribuição de tensões residuais instaladas na Peça de teste em $[N \cdot m^{-2}]$ .....                                                                        | 116 |
| Figura 5.40 - Distribuição de deformação instalada na Peça de teste em $[m]$ .....                                                                                             | 117 |
| Figura 6.1 - Rompimento dos corpos de prova ao teste de tração do grupo A.....                                                                                                 | 123 |
| Figura 6.2 - Rompimento dos corpos de prova ao teste de tração do grupo B.....                                                                                                 | 123 |
| Figura 6.3 - Dureza pelo diagrama CCT do aço ao carbono .....                                                                                                                  | 126 |
| Figura 6.4 - Energia interna da poça de fusão do aço ASTM A36 com o arame ER70S-6 .....                                                                                        | 135 |
| Figura 6.5 - Formato do cordão de solda do aço ASTM A36 com o consumível ER70S-6 .....                                                                                         | 137 |
| Figura 6.6 - Formato do cordão de solda do aço ASTM A36 com o consumível ER70S-3 .....                                                                                         | 138 |
| Figura 6.7 - Forma do cordão de solda no aço ARBL CSN Civil 300 e arame ER70S-6.....                                                                                           | 138 |
| Figura 6.8 - Forma do cordão de solda no aço ARBL CSN Civil 300 e arame ER70S-3.....                                                                                           | 139 |
| Figura 6.9 - Energia interna de soldagem.....                                                                                                                                  | 140 |
| Figura 6.10 - Transferência de calor na poça de fusão.....                                                                                                                     | 140 |
| Figura 6.11 - Transferência de calor distante da poça de fusão .....                                                                                                           | 141 |
| Figura 10.1 - Grão analisado por espectrometria no grupo A com o consumível ER70S-6. ....                                                                                      | 180 |
| Figura 10.2 - Grão analisado por espectrometria no grupo A com o consumível ER70S-3. ....                                                                                      | 181 |
| Figura 10.3 - Grão analisado por espectrometria no grupo B com o consumível ER70S-6. ....                                                                                      | 181 |
| Figura 10.4 - Grão analisado por espectrometria no grupo B com o consumível ER70S-3 .....                                                                                      | 182 |
| Figura 10.5 - Espectrometria do arame-eletrodo AWS ER70S-3 .....                                                                                                               | 183 |
| Figura 10.6 - Espectrometria do arame-eletrodo AWS ER70S-6 .....                                                                                                               | 183 |
| Figura 10.7 - Fluxograma do grupo ASTM A36 usando arame-eletrodo AWS ER70S-6.....                                                                                              | 184 |
| Figura 10.8 - Diluição dos elementos químicos no metal de solda .....                                                                                                          | 185 |
| Figura 10.9 - Macrografia do CP B222. ....                                                                                                                                     | 185 |
| Figura 10.10 - Macrografia do CP B111 .....                                                                                                                                    | 186 |
| Figura 10.11 - Macrografia do CP A114.....                                                                                                                                     | 186 |
| Figura 10.12 - Macrografia do CP A123.....                                                                                                                                     | 186 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 10.13 - Macrografia do CP A134.....                                                 | 186 |
| Figura 10.14 - Macrografia do CP A143.....                                                 | 186 |
| Figura 10.15 - Macrografia do CP A211.....                                                 | 186 |
| Figura 10.16 - Macrografia do CP A221.....                                                 | 187 |
| Figura 10.17 - Macrografia do CP A235.....                                                 | 187 |
| Figura 10.18 - Macrografia do CP A245.....                                                 | 187 |
| Figura 10.19 - Macrografia do CP B121.....                                                 | 187 |
| Figura 10.20 - Macrografia do CP B133.....                                                 | 187 |
| Figura 10.21 - Macrografia do CP B145.....                                                 | 187 |
| Figura 10.22 - Macrografia do CP B214.....                                                 | 188 |
| Figura 10.23 - Macrografia do CP B232.....                                                 | 188 |
| Figura 10.24 - Macrografia do CP B224.....                                                 | 188 |
| Figura 10.25 - Macrografia do CP B243.....                                                 | 188 |
| Figura 10.26 - Macrografia do CP B125.....                                                 | 188 |
| Figura 10.27 - Macrografia do CP A222.....                                                 | 188 |
| Figura 10.28 - Macrografia do CP B141.....                                                 | 188 |
| Figura 10.30 - Macrografia do CP B221.....                                                 | 188 |
| Figura 10.29 - Macrografia do CP B225.....                                                 | 189 |
| Figura 10.31 - Macrografia do CP B113.....                                                 | 189 |
| Figura 10.32 - Macrografia do CP B115.....                                                 | 189 |
| Figura 10.33 - Macrografia do CP B122.....                                                 | 189 |
| Figura 10.34 - Macrografia do CP B215.....                                                 | 189 |
| Figura 10.35 - Macrografia do CP B223.....                                                 | 189 |
| Figura 10.36 - Micrografia do CP A111 MS.....                                              | 189 |
| Figura 10.37 - Micrografia do CP A115 MS.....                                              | 190 |
| Figura 10.38 - Micrografia do CP A122 MS.....                                              | 190 |
| Figura 10.39 - Micrografia do CP A131 MS.....                                              | 191 |
| Figura 10.40 - Micrografia do CP A213 MS.....                                              | 191 |
| Figura 10.41 - Viscosidades da poça de fusão com aço ASTM A36 e AWS ER70S-6.....           | 192 |
| Figura 10.42 - Tensão superficial e energia interna da poça ASTM A36 e AWS ER70S-6.....    | 192 |
| Figura 10.43 - Energia interna e fração das fases da poça ASTM A36 e AWS ER70S-6.....      | 193 |
| Figura 10.44 - Densidade e energia interna da poça no aço CSN Civil 300 e AWS ER70S-3..... | 194 |
| Figura 10.45 - Disposição dos pontos principais de deslocamentos da Peça de teste.....     | 194 |
| Figura 10.46 - Distorção da Peça de teste A133.....                                        | 197 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 10.47 - Distorção da Peça de teste B133.....                         | 197 |
| Figura 10.48 - Distorção da Peça de teste A233.....                         | 198 |
| Figura 10.49 - Distorção da Peça de teste B233.....                         | 198 |
| Figura 10.50 - Distorção da Peça de teste B221.....                         | 199 |
| Figura 10.51 - Distorção da Peça de teste B241.....                         | 199 |
| Figura 10.52 - Distorção da Peça de teste B343.....                         | 200 |
| Figura 10.53 - Distorção da Peça de teste B331.....                         | 200 |
| Figura 10.54 - Distorção da Peça de teste A325.....                         | 201 |
| Figura 10.55 - Tensões na Peça de teste A144.....                           | 201 |
| Figura 10.56 - Tensões na Peça de teste A144.....                           | 202 |
| Figura 10.57 - Tensões na Peça de teste A244.....                           | 202 |
| Figura 10.58 - Tensões na Peça de teste A244.....                           | 203 |
| Figura 10.59 - Tensões na Peça de teste A223.....                           | 203 |
| Figura 10.60 - Tensões na Peça de teste A223.....                           | 204 |
| Figura 10.61 - Tensões na Peça de teste B123.....                           | 204 |
| Figura 10.62 - Tensões na Peça de teste B123.....                           | 205 |
| Figura 10.63 - Tensões na Peça de teste B144.....                           | 205 |
| Figura 10.64 - Tensões na Peça de teste B144.....                           | 206 |
| Figura 10.65 - Tensões na Peça de teste B245.....                           | 206 |
| Figura 10.66 - Tensões na Peça de teste B245.....                           | 207 |
| Figura 10.67 - Tensões no MS.....                                           | 207 |
| Figura 10.68 - Tensões no MB.....                                           | 208 |
| Figura 10.69 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A111, A114 e A115..... | 209 |
| Figura 10.70 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A121, A122 e A123..... | 210 |
| Figura 10.71 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A131, A134 e A135..... | 211 |
| Figura 10.72 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A142, A143 e A145..... | 212 |
| Figura 10.73 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A211, A213 e A214..... | 213 |
| Figura 10.74 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A221, A222 e A225..... | 214 |
| Figura 10.75 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A231 e A234.....       | 215 |
| Figura 10.76 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A241 e A242.....       | 216 |
| Figura 10.77 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B111, B113 e B115..... | 217 |
| Figura 10.78 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B121 e B123.....       | 218 |
| Figura 10.79 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B131, B132 e B133..... | 219 |
| Figura 10.80 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B141 e B145.....       | 220 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 10.81 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B213, B214 e B215.....             | 221 |
| Figura 10.82 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B221, B222, B223, B224 e B225..... | 222 |
| Figura 10.83 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B234 e B235.....                   | 223 |
| Figura 10.84 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B241, B242, B243 e B245. ....      | 224 |
| Figura 10.85 - Ensaio de tração nos corpos de prova: A1 e A2 (Metal base). ....         | 225 |
| Figura 10.86 - Ensaio de tração nos corpos de prova: B1, B2 e B3 (Metal base). ....     | 226 |
| Figura 10.87 - Ensaio de tração nos corpos de prova A122 (dobra isolada). ....          | 227 |
| Figura 10.88 - Ensaio de tração nos corpos de prova B145 (dobra isolada). ....          | 228 |
| Figura 11.1 - ASTM A36. ....                                                            | 231 |
| Figura 11.2 - CSN Civil 300.....                                                        | 232 |
| Figura 11.3 - Síntese analítica do processo de soldagem. ....                           | 233 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 – Trabalhos em cada base de dados.....                                                                                                                    | 5   |
| Tabela 3.2 – Trabalhos disponíveis para o acesso.....                                                                                                                | 6   |
| Tabela 3.3 – Trabalhos selecionados para estudo.....                                                                                                                 | 7   |
| Tabela 3.4 - Resistência mecânica dos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36.....                                                                                        | 8   |
| Tabela 3.5 - Composição química dos aços estruturais.....                                                                                                            | 9   |
| Tabela 3.6 - Distribuição térmica na soldagem por fusão .....                                                                                                        | 35  |
| Tabela 3.7 - Interação entre diferentes campos físicos.....                                                                                                          | 43  |
| Tabela 3.8 - Situações conhecidas no processo de soldagem.....                                                                                                       | 44  |
| Tabela 3.9 - Condições iniciais e de contorno no processo de soldagem.....                                                                                           | 45  |
| Tabela 3.10 - Emissividade de alguns materiais a 0 °C (~273 °K).....                                                                                                 | 51  |
| Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos metais de base e de adição.....                                                                                              | 60  |
| Tabela 4.2 - Codificação e quantificação dos corpos de prova para soldagem .....                                                                                     | 65  |
| Tabela 4.3 - Valores médios dos parâmetros de soldagem .....                                                                                                         | 66  |
| Tabela 4.4 - Parâmetros de soldagem experimentais para a modelagem matemática.....                                                                                   | 80  |
| Tabela 4.5 - Coeficientes termofísicos .....                                                                                                                         | 82  |
| Tabela 4.6 - Parâmetros geométricos para os aços ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300.....                                                                                  | 89  |
| Tabela 5.1 - Valores médios da flexão no perfil devido à distorção .....                                                                                             | 95  |
| Tabela 5.2 - Dados de resistência mecânica dos aços ASTM A36 e CSN Civil 300 obtidos dos fornecedores e medidos nos ensaios de tração (peças de teste soldadas)..... | 96  |
| Tabela 5.3 - Valores médios das medidas de microdureza Vickers (HV).....                                                                                             | 103 |
| Tabela 5.4 - Larguras médias do cordão, da ZAC e da elipse de Gauss [mm] .....                                                                                       | 106 |
| Tabela 6.1 - Teores dos principais elementos químicos presentes nos aços (% em peso) ....                                                                            | 127 |
| Tabela 6.2 - Carbono equivalente médio (CE) no metal de base .....                                                                                                   | 129 |
| Tabela 6.3 - Confrontação entre picos de temperatura e os medidos pelos termopares.....                                                                              | 134 |
| Tabela 6.4 - Rendimento de soldagem .....                                                                                                                            | 136 |
| Tabela 10.1 - Espectrometria no grão do grupa A (AWS ER70S-6) - Aumento 1000 x .....                                                                                 | 180 |
| Tabela 10.2 - Espectrometria no grão do grupa A (AWS ER70S-3) - Aumento 1000 x .....                                                                                 | 180 |
| Tabela 10.3 - Espectrometria no grão do grupa B (AWS ER70S-6) - Aumento 1000 x. ....                                                                                 | 181 |
| Tabela 10.4 - Espectrometria no grão do grupa B (AWS ER70S-3) - Aumento 1000 x .....                                                                                 | 182 |
| Tabela 10.5 - Espectrometria do grão do consumível AWS ER70S-3.....                                                                                                  | 182 |
| Tabela 10.6 - Espectrometria do grão do consumível AWS ER70S-6.....                                                                                                  | 183 |
| Tabela 10.7 - Deslocamentos pontuais devido a distorção.....                                                                                                         | 195 |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 11.1 - Propriedades termofísicas dos materiais ..... | 229 |
| Tabela 11.2 - Propriedades termofísicas dos aços .....      | 229 |
| Tabela 11.3 - Propriedades termofísicas.....                | 230 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Equação 3.1 - Carbono Equivalente do aço ASTM A36.....                       | 13 |
| Equação 3.2 - Carbono equivalente do aço ARBL CSN Civil 300.....             | 13 |
| Equação 3.3 - Temperatura de fusão do material pela composição química ..... | 21 |
| Equação 3.4 - Taxa de resfriamento para chapas finas.....                    | 29 |
| Equação 3.5 - Taxa de resfriamento para chapas grossas.....                  | 30 |
| Equação 3.6 - Energia de soldagem.....                                       | 32 |
| Equação 3.7 - Balanço geral de energia térmica .....                         | 36 |
| Equação 3.8 - Condutividade térmica do aço .....                             | 36 |
| Equação 3.9 - Difusividade térmica do aço .....                              | 36 |
| Equação 3.10 – Calor tridimensional de Fourier .....                         | 37 |
| Equação 3.11 - Calor no regime quase estacionário.....                       | 38 |
| Equação 3.12 - Distribuição térmica para chapas grossas.....                 | 38 |
| Equação 3.13 - Ponto a partir do centro da poça de fusão.....                | 38 |
| Equação 3.14 - Ponto superficial a partir do cordão.....                     | 38 |
| Equação 3.15 - Ponto qualquer superficial.....                               | 38 |
| Equação 3.16 - Fonte de calor bidirecional para perfil dobrado .....         | 40 |
| Equação 3.17 - Fluxo de calor na distribuição superficial de Gauss .....     | 40 |
| Equação 3.18 – Solução geral bidimensional.....                              | 40 |
| Equação 3.19 – Fonte de calor na ponta do arame eletrodo.....                | 40 |
| Equação 3.20 – Fluxo de calor superficial sob a junta .....                  | 46 |
| Equação 3.21 – Fluxo de calor de Gauss.....                                  | 47 |
| Equação 3.22 – Distribuição volumétrica de energia na frente da tocha .....  | 48 |
| Equação 3.23 – Distribuição volumétrica de energia atrás da tocha .....      | 48 |
| Equação 3.24 – Fator de calor imputado na chapa .....                        | 49 |
| Equação 3.25 – Fator parcial de calor imputado na frente da tocha.....       | 49 |
| Equação 3.26 – Fator parcial de calor imputado atrás da tocha .....          | 49 |
| Equação 3.27 – Parâmetros de áreas locais a frente da solda.....             | 49 |
| Equação 3.28 – Parâmetros de áreas locais atrás da solda .....               | 49 |
| Equação 3.29 - Força geradora de tensões .....                               | 55 |
| Equação 3.30 - Forças excêntricas .....                                      | 55 |
| Equação 3.31 - Dilatação superficial.....                                    | 55 |
| Equação 3.32 - Dilatação linear.....                                         | 55 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Equação 3.33 - Tensão gerada pela diferença da temperatura .....         | 55  |
| Equação 4.1 – Condução geral de calor do processo de soldagem GMAW ..... | 79  |
| Equação 4.2 - Condução geral do calor .....                              | 85  |
| Equação 4.3 - Fluxo de calor .....                                       | 85  |
| Equação 4.4 - Balanço geral térmico do calor de soldagem.....            | 86  |
| Equação 4.5 - Convecção .....                                            | 89  |
| Equação 4.6 - Radiação .....                                             | 89  |
| Equação 5.1 - Diluição da solda .....                                    | 107 |
| Equação 6.1 - Rendimento térmico de soldagem .....                       | 136 |
| Equação 6.2 - Balanço de Energia.....                                    | 141 |
| Equação 6.3 - Balanço de Energia.....                                    | 141 |
| Equação 6.4 - Balanço de Energia.....                                    | 141 |

## LISTA DE SIGLAS

|                  |                                                                                |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| A                | Análise Química                                                                |
| ABNT             | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                       |
| ANSYS            | <i>Analysis System of ANSYS, Inc.</i>                                          |
| ARBL             | Alta Resistência e Baixa Liga                                                  |
| ASTM A36         | <i>American Society for Testing and Materials – Carbon steel</i>               |
| AWS              | <i>American Welding Society</i>                                                |
| CA               | Corrente alternada                                                             |
| CC+              | Polaridade positiva da Corrente contínua                                       |
| CCT              | <i>Continuous cooling transformation</i>                                       |
| CE               | Carbono Equivalente                                                            |
| $CE_{IIW}$       | Carbono Equivalente normatizado pelo <i>International Institute of Welding</i> |
| $CE_{pcm}$       | Carbono Equivalente por composição do material                                 |
| CMT              | <i>Cold Metal Transfer</i>                                                     |
| COMSOL           | <i>Multiphysical Simulation Analysis</i>                                       |
| $C_p$            | Calor característico do material                                               |
| CP               | Corpo de Prova                                                                 |
| CSN              | Companhia Siderúrgica Nacional                                                 |
| D                | MicroDureza                                                                    |
| DBCP             | Distância do Bico de Contato à Peça                                            |
| E                | Módulo de Elasticidade                                                         |
| $E_f$            | Energia interna final                                                          |
| $E_i$            | Energia inicial                                                                |
| $E_s$            | Energia de soldagem                                                            |
| Fe-C             | Ferro Carbono                                                                  |
| GMAW             | <i>Gas Metal Arc Welding</i>                                                   |
| $H_{net}$        | Aporte térmico de soldagem                                                     |
| I                | Corrente de soldagem                                                           |
| $K_0^{\delta r}$ | Função de Bessel modificada                                                    |
| $K_T$            | Difusividade térmica do material dependente da temperatura                     |
| $L_o$            | Distância inicial entre dois pontos                                            |
| M                | Macrografia                                                                    |
| MAG              | <i>Metal Active Gas</i>                                                        |

|            |                                                        |
|------------|--------------------------------------------------------|
| MB         | Metal de base                                          |
| MEF        | Método dos Elementos Finitos                           |
| MEL        | Método de escaneamento a <i>laser</i>                  |
| MIG        | <i>Metal Inert Gas</i>                                 |
| MS         | Metal de solda                                         |
| NBR        | Norma Brasileira                                       |
| P          | Energia total da fonte de calor                        |
| $P_f$      | Distribuição volumétrica de energia em frente da tocha |
| $P_r$      | Distribuição volumétrica de energia atrás da tocha     |
| Q          | Energia térmica                                        |
| $Q_m$      | Energia média de soldagem                              |
| $Q_{teq}$  | Quantidade de energia total equivalente                |
| R          | Ponto de referência de análise                         |
| RMD        | <i>Regulated Metal Deposition</i>                      |
| $R_n$      | Referência anterior na poça de fusão                   |
| $R'_n$     | Referência posterior na poça de fusão                  |
| $S_o$      | Seção inicial                                          |
| STL        | <i>Standard Triangle Language</i>                      |
| STT        | <i>Surface Tension Transfer</i>                        |
| SYSWELD    | <i>Simulation Welding</i>                              |
| SZF        | Seção da Zona Fundida                                  |
| SZTA       | Seção da Zona Termicamente Afetada                     |
| T          | Temperatura                                            |
| <b>T</b>   | Teste de tração                                        |
| $T_0$      | Temperatura referencial                                |
| $T_a$      | Temperatura ambiente                                   |
| $T_c$      | Temperatura crítica                                    |
| $T_f$      | Temperatura de fusão                                   |
| $T_i$      | Temperatura de fusão por elemento químico              |
| $T_p$      | Temperatura de pico                                    |
| $T'_r$     | Taxa de resfriamento                                   |
| $T_\infty$ | Temperatura do fluido envolvente                       |
| U          | Tensão de soldagem                                     |
| USI-FIRE   | USIMINAS - Aço resistente ao fogo                      |

|            |                                                                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------|
| $V_a$      | Velocidade de alimentação                                       |
| $V_s$      | Velocidade de soldagem                                          |
| $V_t$      | Velocidade de resfriamento                                      |
| $W_i$      | Peso em porcentagem do material                                 |
| XRD        | <i>X-ray diffraction</i>                                        |
| YASNAC XRC | Linguagem de algoritmo estruturado codificado                   |
| ZAC        | Zona Afetada pelo Calor                                         |
| 2G         | Posição de soldagem horizontal                                  |
| $a$        | Comprimento frontal da projeção da poça de fusão                |
| $a_f$      | Comprimento frontal da poça de fusão                            |
| $a_r$      | Comprimento por trás da fonte de calor                          |
| $b$        | Semi largura da poça de fusão                                   |
| $c$        | Calor específico do metal                                       |
| $f_f$      | Repartição de energia em frente a tocha                         |
| $f_r$      | Repartição de energia atrás da tocha                            |
| $h$        | Espessura da chapa metálica                                     |
| $h_c$      | Coeficiente de convecção                                        |
| $k$        | Difusividade térmica                                            |
| $nh$       | Referência pontual a partir da superfície da chapa              |
| $p$        | Profundidade da zona fundida                                    |
| $q$        | Fonte de energia                                                |
| $q_0$      | Fonte de calor                                                  |
| $q_{arc}$  | Potência do arco elétrico                                       |
| $q_i$      | Fluxo de calor inicial                                          |
| $q_m$      | Fluxo térmico transferido para o material                       |
| $q_w$      | Fluxo térmico de liquefação                                     |
| $r$        | Distância do centro da poça de fusão até o calor que se propaga |
| $t$        | Tempo                                                           |
| $t_f$      | Tempo de fusão do metal                                         |
| $v$        | Velocidade de soldagem                                          |
| $x$        | Posição inicial de soldagem                                     |
| $x, y, z$  | Coordenadas tridimensionais                                     |
| $w$        | Coordenada móvel                                                |
| $\alpha$   | Coeficiente de dilatação térmica linear                         |

|                       |                                                                 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $\beta$               | Coeficiente de dilatação térmica superficial do material        |
| $\Delta l$            | Deformação linear                                               |
| $\Delta \sigma$       | Diferença de tensão residual                                    |
| $\Delta L$            | Dilatação térmica linear                                        |
| $\Delta S$            | Dilatação térmica superficial                                   |
| $\Delta T$            | Diferença de temperatura                                        |
| $\nabla T$            | Gradiente de temperatura                                        |
| $\delta$              | Difusividade térmica do material                                |
| $\varepsilon$         | Emissividade do material                                        |
| $\eta$                | Rendimento do processo de soldagem                              |
| $\eta_{\text{médio}}$ | Eficiência média do processo de soldagem GMAW                   |
| $\lambda$             | Condutividade térmica do metal                                  |
| $\lambda_T$           | Condutibilidades térmicas do material dependente da temperatura |
| $\nu$                 | Coeficiente de Poisson                                          |
| $\rho$                | Densidade do material                                           |
| $\sigma$              | Constante de Stefan-Boltzmann                                   |
| $\sigma_e$            | Tensão de escoamento                                            |
| $\sigma \varepsilon$  | Radiação                                                        |
| $\sigma_i$            | Tensão residual existente                                       |
| $\sigma_r$            | Tensão residual                                                 |
| $\sigma_x$            | Tensão longitudinal                                             |
| $\sigma_y$            | Tensão transversal                                              |
| $\sigma_z$            | Tensão cisalhante                                               |
| $\tau$                | Tensão de cisalhamento                                          |
| $\phi$                | Velocidade de resfriamento                                      |

## SUMÁRIO

|                                                              |       |
|--------------------------------------------------------------|-------|
| <b>RESUMO</b> .....                                          | i     |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                        | ii    |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                                | iii   |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                                | x     |
| <b>LISTA DE EQUAÇÕES</b> .....                               | xii   |
| <b>LISTA DE SIGLAS</b> .....                                 | xiv   |
| <b>SUMÁRIO</b> .....                                         | xviii |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                   | 1     |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....                                    | 4     |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....                                      | 4     |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                              | 4     |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                        | 5     |
| 3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇO ESTRUTURAL .....             | 8     |
| 3.2 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-MAG.....         | 13    |
| 3.3 REGIÕES DA JUNTA SOLDADA.....                            | 17    |
| 3.3.1 <i>Zona fundida</i> .....                              | 18    |
| 3.3.2 <i>Zona afetada pelo calor</i> .....                   | 23    |
| 3.3.3 <i>Zona de ligação</i> .....                           | 24    |
| 3.4 FATORES RELEVANTES NO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG.....      | 24    |
| 3.5 ASPECTOS TÉRMICOS DA SOLDAGEM.....                       | 27    |
| 3.5.1 <i>Distribuição térmica na chapa dobrada</i> .....     | 28    |
| 3.5.2 <i>Ciclo Térmico</i> .....                             | 28    |
| 3.5.3 <i>Taxa de resfriamento na chapa dobrada</i> .....     | 29    |
| 3.5.4 <i>Repartição térmica</i> .....                        | 32    |
| 3.5.5 <i>Aporte térmico</i> .....                            | 32    |
| 3.5.6 <i>Fluxo de calor na soldagem</i> .....                | 34    |
| 3.5.7 <i>Condução de calor em chapas de aço</i> .....        | 37    |
| 3.6 MODELOS MATEMÁTICOS DE FONTES DE CALOR NA SOLDAGEM ..... | 41    |
| 3.6.1 <i>Modelo de Rosenthal</i> .....                       | 44    |
| 3.6.1.1 Fonte superficial de Gauss.....                      | 46    |
| 3.6.1.2 Fonte volumétrica do tipo elipsoidal .....           | 46    |
| 3.6.1.3 Fonte volumétrica do tipo duplo elipsoidal .....     | 47    |
| 3.7 MODELAGEM DA AÇÃO DO MATERIAL DE ADIÇÃO.....             | 49    |

|         |                                                                             |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.8     | TERMOPAR E PIROMETRIA.....                                                  | 50  |
| 3.8.1   | <i>Emissividade .....</i>                                                   | 51  |
| 3.9     | ESCANEAMENTO A LASER.....                                                   | 52  |
| 3.10    | DISTORÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS .....                                          | 53  |
| 3.11    | TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM .....                                         | 54  |
| 3.11.1  | <i>Aplicação do raio-X .....</i>                                            | 58  |
| 4       | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                            | 60  |
| 4.1     | MATERIAIS .....                                                             | 60  |
| 4.2     | MÉTODOS .....                                                               | 60  |
| 4.2.1   | <i>Procedimentos e equipamentos utilizados.....</i>                         | 60  |
| 4.2.1.1 | Procedimentos de soldagem .....                                             | 61  |
| 4.2.1.2 | Extração dos corpos de provas .....                                         | 66  |
| 4.3     | MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS.....                                              | 68  |
| 4.4     | ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....                                        | 69  |
| 4.5     | MEDIDAS DAS TENSÕES RESIDUAIS .....                                         | 70  |
| 4.6     | MICRODUREZA NA JUNTA SOLDADA .....                                          | 73  |
| 4.7     | COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS.....                                       | 74  |
| 4.8     | MACROESTRUTURA DAS JUNTAS SOLDADAS.....                                     | 75  |
| 4.9     | MEDIDA DA TEMPERATURA.....                                                  | 75  |
| 4.10    | FORMULAÇÃO NUMÉRICA - ELEMENTOS FINITOS .....                               | 77  |
| 4.10.1  | <i>Modelagem por elementos finitos.....</i>                                 | 79  |
| 4.10.2  | <i>Parâmetros das constantes dos materiais e processo de soldagem .....</i> | 80  |
| 4.10.3  | <i>Malha de elementos finitos da Peça de teste .....</i>                    | 83  |
| 4.10.4  | <i>Campo térmico .....</i>                                                  | 85  |
| 4.10.5  | <i>Fonte de calor.....</i>                                                  | 85  |
| 4.10.6  | <i>Condição de contorno térmica .....</i>                                   | 89  |
| 4.10.7  | <i>Condição de contorno estrutural.....</i>                                 | 90  |
| 4.10.8  | <i>Tensão residual .....</i>                                                | 90  |
| 4.10.9  | <i>Deformação .....</i>                                                     | 90  |
| 5       | <b>RESULTADOS .....</b>                                                     | 91  |
| 5.1     | PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM .....                                              | 91  |
| 5.2     | MÉTODO DE ESCANEAMENTO A LASER.....                                         | 92  |
| 5.3     | RESISTÊNCIA MECÂNICA .....                                                  | 96  |
| 5.5     | MICRODUREZA NA JUNTA SOLDADA .....                                          | 102 |

|      |                                                           |     |
|------|-----------------------------------------------------------|-----|
| 5.6  | ANÁLISE MACROESTRUTURAL .....                             | 103 |
| 5.7  | AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA .....                            | 107 |
| 5.8  | ELEMENTOS FINITOS .....                                   | 108 |
| 5.9  | TENSÕES RESIDUAIS .....                                   | 116 |
| 5.10 | DEFORMAÇÕES .....                                         | 117 |
| 6    | <b>DISCUSSÃO</b> .....                                    | 118 |
| 6.1  | PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM .....                            | 118 |
| 6.2  | MÉTODO DE ESCANEAMENTO A LASER .....                      | 119 |
| 6.3  | RESISTÊNCIA MECÂNICA .....                                | 121 |
| 6.4  | MÉTODO XRD NA TENSÃO RESIDUAL .....                       | 122 |
| 6.5  | MICRODUREZA NA JUNTA SOLDADA .....                        | 125 |
| 6.6  | ANÁLISE QUÍMICA .....                                     | 127 |
| 6.7  | ANÁLISE MACROESTRUTURAL .....                             | 130 |
| 6.8  | AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA .....                            | 130 |
| 6.9  | ELEMENTOS FINITOS .....                                   | 131 |
| 6.10 | TENSÕES RESIDUAIS .....                                   | 142 |
| 6.11 | DEFORMAÇÕES .....                                         | 143 |
| 7    | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                   | 145 |
| 8    | <b>PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS</b> .....                | 148 |
| 9    | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                   | 149 |
| 10   | <b>APÊNDICES</b> .....                                    | 180 |
| 10.1 | APÊNDICE A - ESPECTROMETRIA DOS CP <sub>s</sub> .....     | 180 |
| 10.2 | APÊNDICE B - TRANSFORMAÇÃO DE FASES .....                 | 183 |
| 10.3 | APÊNDICE C - MACROGRAFIAS DAS PEÇAS DE TESTE .....        | 185 |
| 10.4 | APÊNDICE D - MICROGRAFIAS DAS PEÇAS DE TESTE .....        | 189 |
| 10.5 | APÊNDICE E - GRÁFICOS DOS COEFICIENTES FÍSICOS .....      | 192 |
| 10.6 | APÊNDICE F - DISTORÇÃO NAS PEÇAS DE TESTE .....           | 194 |
| 10.7 | APÊNDICE G - TENSÕES NAS PEÇAS DE TESTE .....             | 201 |
| 10.8 | APÊNDICE H - ENSAIO DE TRAÇÃO .....                       | 209 |
| 11   | <b>ANEXOS</b> .....                                       | 229 |
| 11.1 | ANEXO A - PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS .....                | 229 |
| 11.2 | ANEXO B - CERTIFICADOS DOS MATERIAIS .....                | 231 |
| 11.3 | ANEXO C – SÍNTESE ANALÍTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM ..... | 233 |

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem é atualmente um dos setores essenciais das indústrias da metalmecânica e está presente nas suas diversas ramificações. Na busca incessante do aprimoramento da qualidade dos produtos manufaturados, as pesquisas com foco nas distorções e tensões residuais ajudam o desenvolvimento, com grandes melhorias nas linhas de produção.

No entanto, a distorção ainda continua sendo um problema persistente, ocasionando outros inconvenientes até a remanufatura. Na corrida pela inovação, a robotização tem se tornando um equipamento essencial, o qual aumenta a produtividade em série e minora os problemas oriundos pela limitação física do homem. Ademais, a inteligência artificial, na integração industrial, não oferece soluções definidas frente a determinados defeitos, como empenamentos.

Atualmente, o método visual das distorções recorrentes pós-soldagens tem sido utilizado no fim da linha de produção.

Nesse sentido, a seleção pelo processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e exclusivamente MAG (*Metal Active Gas*), integrado a um braço robótico Motoman UP6, representa efetivamente esse tipo de evento, dentro das fábricas.

As deformações induzidas pelo calor absorvido, quando o arco elétrico atua na poça de fusão, têm sido objeto de estudo para muitos pesquisadores, porque, além de incidir em prejuízo, também justifica-se pela sustentabilidade ambiental, quanto aos desperdícios de materiais, que, no mínimo, resultará em economia de energia despendida nos processos de siderurgia da sucata de milhares de toneladas anuais.

Sistematizar um novo método eficiente, para entender, visualizar, prever e controlar os efeitos da temperatura sobre os elementos de construções metálicas, com certeza será uma ferramenta auxiliadora no controle da qualidade e ajudará a desenvolver *softwares* específicos para as linhas de produção.

De fato, o processo de soldagem libera uma grande energia numa pequeníssima área, onde se desdobra em um dos fenômenos causadores das tensões residuais e da distorção, consequências negativas inevitáveis, mas que podem ser reduzidas, dependendo da aplicação do elemento estrutural soldado. Por isso, como tudo depende dessa quantidade de calor, é interessante saber a influência que o tipo de metal de base e consumível usado reflete nessa iteração, já que suas composições variam com o uso.

A tensão residual com magnitude em torno de 40% da tensão de escoamento tem representado risco, mesmo porque se situa em pequenas regiões heterogêneas, sendo um problema quando essas regiões soldadas se cruzam às regiões encruadas, como do perfil

estrutural conformado a frio e, nesse caso, a situação se agrava devido à presença da ZAC (*Zona Afetada pelo Calor*).

Logo, ter o domínio das distorções exige prever a sua ocorrência, de forma confiável e precisa, com o fim de preservar a integridade das juntas soldadas. Por conseguinte, com base nas pesquisas que utilizaram o sensor ótico a *laser*, que analisa o deslocamento planar, a varredura tridimensional do objeto primitivo como matriz pelos equipamentos modernos de escaneamento associado a novas proposituras de métodos analíticos, constitui um método aprimorado para essa finalidade.

A sinergia de sistemas e as tentativas de se combinar equipamentos são aplicadas constantemente, com o intuito de se adquirir um sistema prático e viável (CHENG, YU, *et al.*, 2021).

O uso de termopares e termômetros auxilia na aquisição de temperatura, sendo duas das formas de medir temperatura e comparar com os acontecimentos térmicos por elementos finitos transferidos para o perfil metálico.

Muitas pesquisas recentes têm focado o que tange às distorções promovidas pelos processos de soldagem, empregando diversos tipos de métodos e ferramentas, nas simulações para fins automobilístico, naval, aeronáutico e espacial. Na realidade, diversos materiais, dependendo do tipo de metal, exigem um aporte térmico em função da sua constituição, e os consumíveis também causam modificação do sistema termodinâmico sobre esses materiais; ora, para validar os métodos em diversos equipamentos, cada pesquisa procedeu usando medidores analógicos, medidores a *laser*, equipamentos de raio-X, ultrassom e *softwares* com câmeras ópticas.

Na maioria dessas investigações, o resultado da distribuição térmica correspondeu bem, mas, quando se refere às tensões residuais e deformações, essa convergência exigiu análise estatística na interpretação dos resultados, pois, quando se apegam as imagens, houve um certo distanciamento da aplicação por elementos finitos, o que explica uma certa variação de uma pesquisa para outra.

Nesse contexto, o escaneamento tridimensional, com sobreposição das imagens original e depois de soldado, é um diferencial dos trabalhos realizados por sensores ópticos a *laser* acoplados aos robôs de soldagem, o que possibilita analisar as diferenças de deslocamento de um para o outro, devido às temperaturas de cada região do material soldado e, principalmente, por ser um procedimento perfeitamente aplicável na fabricação de estruturas treliçadas, como vigas, tesouras, colunas etc.

E, dessa forma, será possível conseguir validar o modelo numérico criado através do método dos elementos finitos, com a modelagem do protótipo pela simulação da fonte de calor em movimento, idealizando as juntas soldadas no perfil metálico.

Além disso, ainda se tem registro da aplicação desse método de escaneamento a *laser* moderno sobre um perfil estrutural conformado a frio tipo “U”, no sistema de sobreposição de imagens, que revela imagens de alta resolução com a validação por elementos finitos e auxiliados pelo método de XRD, na análise de tensões residuais.

Assim, em função das elevadas temperaturas abruptas inseridas no processo de soldagem, a proposta experimental baseia-se nas imagens com seus respectivos gradientes de deslocamento, realizadas no escaneamento a *laser* e comparadas com os deslocamentos pelo modelo de elementos finitos, através do *software* ANSYS 2021R2.

A caracterização desse modelo é determinada pelas propriedades físicas dos materiais e com auxílio da medição das temperaturas, mediante os registros de temperatura distantes da poça de fusão, utilizando-se, no lado do cordão da soldagem, sensores termopares o modelo é balizado.

Paralelamente, o método de escaneamento a *laser* (MEL), além de ser validado pelo método dos elementos finitos (MEF), pode proporcionar novos padrões operacionais, mediante a caracterização de todo o ciclo térmico da soldagem e por ser mais um controlador de deslocamentos pontuais, atuar na redução de defeitos, antes e depois da solidificação do metal fundido, e aumentar a confiabilidade das linhas produtivas em geral.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as deformações do perfil de aço estrutural conformado a frio tipo “U” pelo processo de solda ao arco elétrico *Gás Metal Arc* (GMAW-MAG) e validar com métodos experimentais, para modelar o campo de temperatura e deslocamentos por análises de escaneamento a *laser* e comparar com o método dos elementos finitos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar soldagem ao arco com proteção gasosa GMAW-MAG em chapas de aço ASTM A36 (ASTM, 2019) e ARBL CSN Civil 300 (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2020) estrutural conformado a frio tipo “U”.

Comparar os escaneamentos a *laser*, antes e depois da soldagem, através de técnicas por emissão de feixe do *laser*, mediante equipamento com mesa rotativa e tratamento antirreflexivo.

Avaliar as tensões residuais por meio de técnicas de medição por raio-X, mediante equipamento de difração de raio X.

Modelar os campos de temperatura e deslocamentos pelo método de elementos finitos, em três dimensões, para comparação com os dados em STL.

Validação do modelo teórico.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de realizar a pesquisa, além de coletar dados, é necessário confrontá-los com o conhecimento produzido sobre a temática, buscando levantar-se, para isso, por meio da revisão bibliográfica, como o tema em questão foi pesquisado e abordado, nos últimos anos. Aliás, na elaboração do estudo, a revisão trouxe diferentes perspectivas teóricas e metodológicas, evidenciando diferentes temas que atravessam o objeto de estudo.

Na revisão de literatura, foram encontrados diversos trabalhos que discutem a questão quanto ao processo de soldagem, mas não se restringem a ela. Entre eles, podem ser destacados os trabalhos de (CHEN, 2020), (BAIDYA, SEIICHIRO, *et al.*, 2017), (ALVES, 2019), (BANIK, KUMAR, *et al.*, 2021) e (CARRASCO, HURTADO e REYES, 2019), os quais enfocam a soldagem analisada por elementos finitos; (CHELONI, FONSECA, *et al.*, 2022), sobre a análise da microestrutura; (GHORBEL, KTARI e HADDAR, 2021), a respeito da distorção, utilizando o sensor óptico a *laser*. Essas pesquisas abordam aspectos metodológicos, na tentativa de apresentar a melhor forma de prever os efeitos do calor de soldagem. Durante a busca, não houve uma relação completa com a vinculação da temática, na investigação dos estudos associados, principalmente ao método de escaneamento a *laser*.

O levantamento das pesquisas, a partir desse momento, ficou delimitado à busca em três bancos de dados: o *Scientific Electronic Library On-line* - Biblioteca Eletrônica Científica (SciELO), a Biblioteca Digital Brasileira de Dissertações e Teses (BDTD) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), nos últimos dez anos. Posteriormente, ficou compreendido que apenas o SciELO era bancos de dados autênticos, pois a BDTD e a CAPES eram buscadores, os quais pesquisam em diferentes bancos de dados.

Com a escolha dos descritores, encontraram-se 691 trabalhos, segundo se observa na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Trabalhos em cada base de dados

| BDTD |                                         |                      |
|------|-----------------------------------------|----------------------|
| No.  | Descritores                             | Teses e dissertações |
| 01   | Soldagem GMAW                           | 136                  |
| 02   | Elementos finitos na soldagem           | 17                   |
| 03   | Escaneamento a <i>laser</i> na soldagem | 0                    |
| 04   | Análise da distorção na soldagem        | 8                    |
| 05   | Análise da tensão residual na soldagem  | 14                   |

| CAPES              |                                         |            |
|--------------------|-----------------------------------------|------------|
| No.                | Descritores                             | Artigos    |
| 01                 | Soldagem GMAW                           | 147        |
| 02                 | Elementos finitos na soldagem           | 184        |
| 03                 | Escaneamento a <i>laser</i> na soldagem | 30         |
| 04                 | Análise da distorção na soldagem        | 53         |
| 05                 | Análise da tensão residual na soldagem  | 62         |
| SCIELO             |                                         |            |
| No.                | Descritores                             | Artigos    |
| 01                 | Soldagem GMAW                           | 32         |
| 02                 | Elementos finitos na soldagem           | 4          |
| 03                 | Escaneamento a <i>laser</i> na soldagem | 1          |
| 04                 | Análise da distorção na soldagem        | 2          |
| 05                 | Análise da tensão residual na soldagem  | 1          |
| Total              |                                         |            |
| No.                | Descritores                             | Trabalhos  |
| 01                 | Soldagem GMAW                           | 315        |
| 02                 | Elementos finitos na soldagem           | 205        |
| 03                 | Escaneamento a <i>laser</i> na soldagem | 31         |
| 04                 | Análise da distorção na soldagem        | 63         |
| 05                 | Análise da tensão residual na soldagem  | 77         |
| <b>Total geral</b> |                                         | <b>691</b> |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 3.2 mostra o nível de acessibilidade e proximidade ao tema.

Tabela 3.2 – Trabalhos disponíveis para o acesso

| Base de dados | Selecionados | Sem acesso | Disponíveis |
|---------------|--------------|------------|-------------|
| BDTD          | 8            | 0          | 8           |
| CAPES         | 4            | 0          | 4           |
| ERIC          | 9            | 4          | 5           |
| SCIELO        | 3            | 0          | 3           |
| TOTAL         | 24           | 4          | 20          |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, surgiu a Tabela 3.3 com os principais artigos examinados no tocante aos trabalhos referentes ao assunto em tela.

Tabela 3.3 – Trabalhos selecionados para estudo

| Pesquisas com foco na soldagem e métodos de validação  |             |                |   |   |   |         |          |   |   |    |    |    |    |    |    |    |      |
|--------------------------------------------------------|-------------|----------------|---|---|---|---------|----------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|------|
| Autores                                                | 1           | 2              | 3 | 4 | 5 | 6       | 7        | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | Ano  |
| Roberts, I. A. <i>et al.</i>                           | Laser       | AISI 1006      | X | X | ✓ |         |          | X | X | X  | X  |    | X  | ✓  | X  | ✓  | 2009 |
| Xiaocong He                                            | Laser       | AISI 304       | ✓ | X | ✓ |         |          | X | X | X  | X  |    | ✓  | X  | X  | X  | 2012 |
| Yilbas B. S. <i>et al.</i>                             | Laser       | Aço carbono    | X | X | ✓ | Solid70 | Solid 45 | ✓ | X | X  | X  |    | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | 2010 |
| Singh, Sapam N. <i>et al.</i>                          | Deposição   | Ti inconel     | X | X | ✓ | Solid70 | X        | X | X | X  | X  |    | X  | ✓  | X  | X  | 2021 |
| Mahmood, T. <i>et al.</i>                              | Laser       | Dissimila<br>r | X | X | ✓ | Dc3d8   | X        | X | X | X  | X  |    | X  | ✓  | X  | X  | 2007 |
| Cheloni, João P.M. <i>et al.</i>                       | Laser       | Aisi h13       | X | X | ✓ | Solid90 | X        | X | X | X  | X  |    | X  | ✓  | X  | ✓  | 2022 |
| Bayraktar, Can; Demir, Eralp                           | Laser       | --             | X | X | ✓ | --      | --       | X | X | X  | X  |    | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | 2022 |
| Dortkasli, Kerem; Isik, Murat; Demir, Eralp            | Laser       | In718          | X | X | ✓ | --      | --       | X | X | X  | X  |    | X  | ✓  | X  | ✓  | 2022 |
| Liu, Weinan <i>et al.</i>                              | --          | Vidro          | X | X | ✓ | --      | --       | X | ✓ | X  | X  |    | X  | X  | X  | X  | 2022 |
| Favaretti, Piero; Parussini, Lucia                     | Laser       | Dc04           | X | X | X | --      | X        | X | X | X  | ✓  |    | X  | ✓  | X  | ✓  | 2022 |
| Khanafer, K. <i>et al.</i>                             | Laser       | --             | X | X | X | --      | --       | X | X | X  | ✓  |    | ✓  | ✓  | X  | X  | 2022 |
| Chen, Shijia; Guillemot, Gildas; Gandin, Charles André | GMAW        | Uranus 2202    | X | X | X | --      | --       | X | X | X  | X  |    | X  | ✓  | ✓  | ✓  | 2016 |
| Eren, I.; Karasu Asnaz, M. S.                          | GMAW        | S355j2g3       | X | X | ✓ | --      | X        | X | ✓ | X  | ✓  |    | X  | ✓  | X  | X  | 2022 |
| Zhu, Sheng                                             | GMAW        | Alumínio       | ✓ | X | ✓ | --      | X        | X | ✓ | X  | X  | ✓  | X  | X  | ✓  | X  | 2013 |
| Baidya Saha <i>et al.</i>                              | GMAW        | --             | ✓ | ✓ | ✓ | --      | --       | X | ✓ | X  | ✓  | ✓  | X  | ✓  | X  | X  | 2017 |
| Zhao, Huihui <i>et al.</i>                             | GMAW        | S235jr         | X | ✓ | ✓ | --      | --       | X | X | X  | X  | X  | ✓  | X  | X  | X  | 2012 |
| Montevecchi, Filippo <i>et al.</i>                     | GMAW        | S235jr         | X | X | X | --      | --       | X | X | X  | ✓  | X  | ✓  | ✓  | X  | X  | 2016 |
| Ghafouri, Mehran <i>et al.</i>                         | GMAW        | S960 mc        | X | X | X | --      | --       | X | X | X  | ✓  | X  | X  | ✓  | ✓  | ✓  | 2020 |
| L.A. Carrasco González <i>et al.</i>                   | GMAW        | 304 SS         | ✓ | ✓ | ✓ | --      | --       | X | ✓ | X  | ✓  | X  | X  | X  | ✓  | ✓  | 2017 |
| Rubio Ramirez, Cristian <i>et al.</i>                  | GMAW        | Hardox 450     | ✓ | ✓ | ✓ | --      | --       | X | X | X  | ✓  | ✓  | X  | X  | X  | X  | 2021 |
| Derakhshan, Ehsan Dezhparvar <i>et al.</i>             | Laser, GMAW | A1011-50       | ✓ | ✓ | ✓ | --      | --       | ✓ | X | X  | ✓  | ✓  | X  | X  | X  | X  | 2018 |
| Haochen Um, Joseph Polden <i>et al.</i>                | GMAW        | Al-4043        | ✓ | ✓ | ✓ | X       | X        | X | ✓ | X  | X  | ✓  | X  | X  | X  | X  | 2022 |

|                           |     |                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |
|---------------------------|-----|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------|
| Ilman, M.N. <i>et al.</i> | Mig | Alumínio<br>aa5083 | ✓ | ✓ | ✓ | X | X | X | X | X | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 2022 |
|---------------------------|-----|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------|

Fonte: Elaborada pelo autor.

Legenda:

|                        |                         |                       |                   |
|------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1-Tipo de soldagem     | 2-Tipo do aço           | 3-Braço robótico      | 4-Multiprocessado |
| 5-Elementos finitos    | 6- Elemento térmico     | 7-Elemento estrutural | 8-Técnica XRD     |
| 9-Escaneamento a laser | 10-Perfil dobrado       | 11-Distorção          | 12-Alinhamento    |
| 13-Tensão residual     | 14-Distribuição térmica | 15-Microdureza        | 16-Microestrutura |
| ✓ - Sim                | X - Não                 | - - Sem referência    |                   |

### 3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇO ESTRUTURAL

Atualmente, é comum o comércio dos aços estruturais ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300, que possuem uma resistência mecânica, relativamente, alta, boa tenacidade em baixas temperaturas e melhor soldabilidade, tais propriedades influenciam o processo de soldagem, como representado pela Tabela 3.4 (FERREIRA, 2017).

Tabela 3.4 - Resistência mecânica dos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36 (veja o Anexo B)

| Resistência mecânica |                      |                       |
|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Aço                  | Tensão de escoamento | Limite de resistência |
| ARBL CSN Civil 300   | 317 Mpa              | 432 Mpa               |
| ASTM A36             | 282 Mpa              | 398 Mpa               |

Fonte: (ACELORMITTAL BRASIL S.A., 2014) ; (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2014).

Os aços resistentes à ação térmica, como os aços USI-FIRE<sup>1</sup>, possuem propriedades mecânicas peculiares para dadas condições, graças aos aditivos químicos na sua composição, como Mn, Mo e o Ni. Contudo, em virtude dos baixos percentuais de carbono presentes nesses aços, tais materiais apresentam uma elevada soldabilidade (COSTA e MODENESI, 2019).

Esses aços microligados têm sua composição química semelhante à de um aço de baixo carbono, porém, com adições de elementos de liga, na ordem de 0,1% Nb, Ti ou V, para assegurar as propriedades mecânicas especiais (GONÇALVES, BASTOS, *et al.*, 2020).

O vanádio, como no ARBL CSN Civil 300, pode ser usado no endurecimento por precipitação em temperaturas baixas. A Tabela 3.5 mostra a composição química básica desses aços, segundo a USIMINAS e a ASTM.

<sup>1</sup> USI-FIRE: Designação dada pela USIMINAS ao aço resistente ao fogo.

Tabela 3.5 - Composição química dos aços estruturais

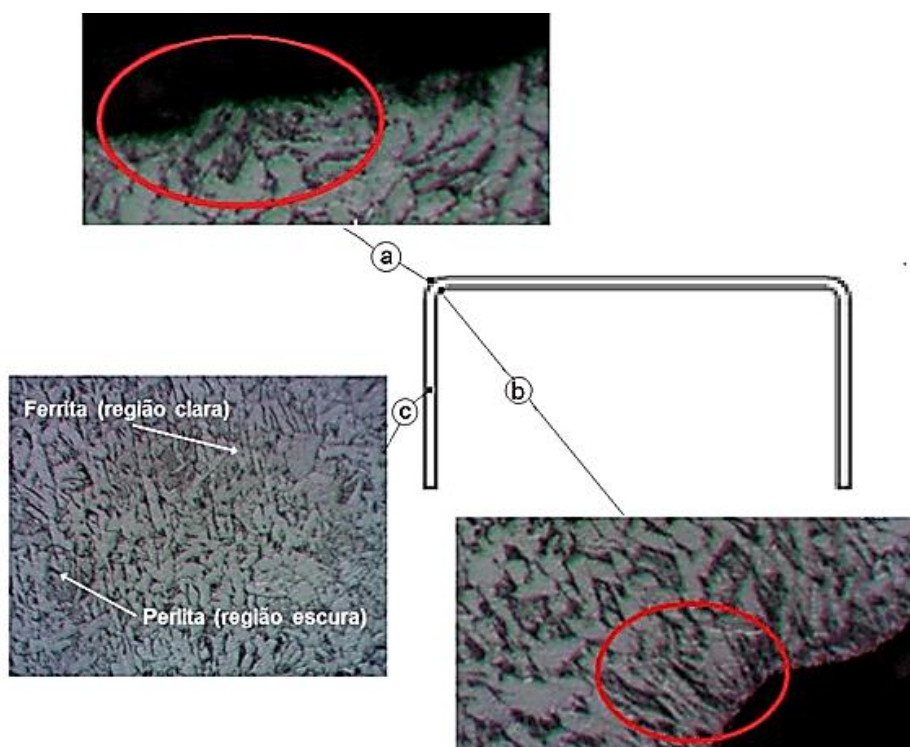
| Norma           | Grau | Composição Química (%) |             |           |            |            |
|-----------------|------|------------------------|-------------|-----------|------------|------------|
|                 |      | C                      | Mn          | Si        | P          | S          |
| CSN Civil       | 300  |                        | 1,60 máx.   |           | 0,035 máx. | 0,020 máx. |
|                 |      | 0,25 máx.              | 0,50 - 1,60 | 0,40 máx. |            |            |
| ASTM A36 (2014) | -    |                        | -           |           | 0,030 máx. | 0,030 máx. |

Fonte: USIMINAS SIDERÚRGICA DE MINAS GERAIS S.A., 2020; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2019.

Os elementos químicos, como o titânio, agem no dimensionamento do grão, durante o reaquecimento, enquanto o nióbio, na dimensão do grão, retardando a recristalização (BARBOSA; SANTOS, 2019).

A conformação da chapa lisa em perfil estrutural dobrado através de dobradeiras equipadas por cutelo é amplamente usada nas indústrias do ramo metalmeccânica, e as normas ABNT NBR 6355:2001 e a ABNT NBR 14672:2010 regem a qualidade do produto para a geometria do perfil (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

Figura 3.1 - Microestrutura do aço ASTM A36 nas regiões conformadas a frio



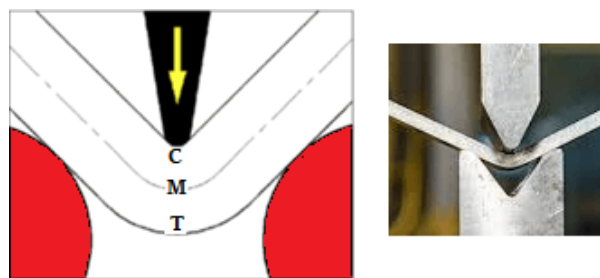
Mostrando: a) grãos alongados na superfície externa da dobra; b) grãos espremidos na face interna da dobra e c) matriz da chapa plana.

Fonte: Adaptada de (BOTH, 2017).

A Figura 3.1 mostra a microestrutura, onde as curvas dobradas encruam regiões discretamente heterogêneas, enrijecendo o perfil, melhorando a resistência à flexão, melhorando a capacidade à flambagem, servindo como vínculo de segunda espécie no processo de soldagem e restringindo, pois, as translações (FROHN-SÖRENSEN, MAŠEK, *et al.*, 2020).

O processo de dobramento a ser aplicado na chapa metálica (RAGHAVAN, 2006), pode ocasionar um desvio do eixo da chapa, distanciando-se da aplicação do cutelo, ocorrendo o esmagamento pela carga pontual, conforme se verifica na Figura 3.2, dependendo da ductilidade do material.

Figura 3.2 - Processo de dobramento



Fonte: Adaptada de (PORNPUSIRI e KANLAYASIRI, 2020).

A Figura 3.3 representa os defeitos possíveis num perfil de chapa dobrada.

Figura 3.3 - Deslocamentos locais do processo de conformação da chapa dobrada

| DEFEITOS HORIZONTAIS DE CONFORMAÇÃO |                                                                                                                                                                                                                                      |                         |                         |                            |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
|                                     | <b>VETORES DE DESLOCAMENTOS x</b>                                                                                                                                                                                                    |                         |                         |                            |
|                                     | <table> <tr> <td> <math>\alpha \neq \beta</math><br/> </td><td> <math>\alpha \neq \beta</math><br/> </td></tr> <tr> <td> <math>\alpha \neq \beta</math><br/> </td><td> <math>\alpha \neq \beta</math><br/> </td></tr> </table>       | $\alpha \neq \beta$<br> | $\alpha \neq \beta$<br> | $\alpha \neq \beta$<br>    |
| $\alpha \neq \beta$<br>             | $\alpha \neq \beta$<br>                                                                                                                                                                                                              |                         |                         |                            |
| $\alpha \neq \beta$<br>             | $\alpha \neq \beta$<br>                                                                                                                                                                                                              |                         |                         |                            |
| DEFEITOS VERTICAIS DE CONFORMAÇÃO   |                                                                                                                                                                                                                                      |                         |                         |                            |
|                                     | <b>VETORES DE DESLOCAMENTOS y</b>                                                                                                                                                                                                    |                         |                         |                            |
|                                     | <table> <tr> <td> <math>\alpha \neq \beta</math><br/> </td><td> <math>\alpha \neq \beta</math><br/> </td></tr> <tr> <td> <math>\alpha \approx \beta</math><br/> </td><td> <math>\alpha \approx \beta</math><br/> </td></tr> </table> | $\alpha \neq \beta$<br> | $\alpha \neq \beta$<br> | $\alpha \approx \beta$<br> |
| $\alpha \neq \beta$<br>             | $\alpha \neq \beta$<br>                                                                                                                                                                                                              |                         |                         |                            |
| $\alpha \approx \beta$<br>          | $\alpha \approx \beta$<br>                                                                                                                                                                                                           |                         |                         |                            |

Fonte: (PEREIRA, SOUSA e GONÇALVES, 2020)

Ao se aplicar o processo de soldagem juntamente ao escaneamento a *laser*, a chapa metálica deve ser previamente inspecionada quanto à sua normalidade e conformidade (YANG, WANG, *et al.*, 2021), como alinhamento, angulação, distorção, esquadro e paralelismo.

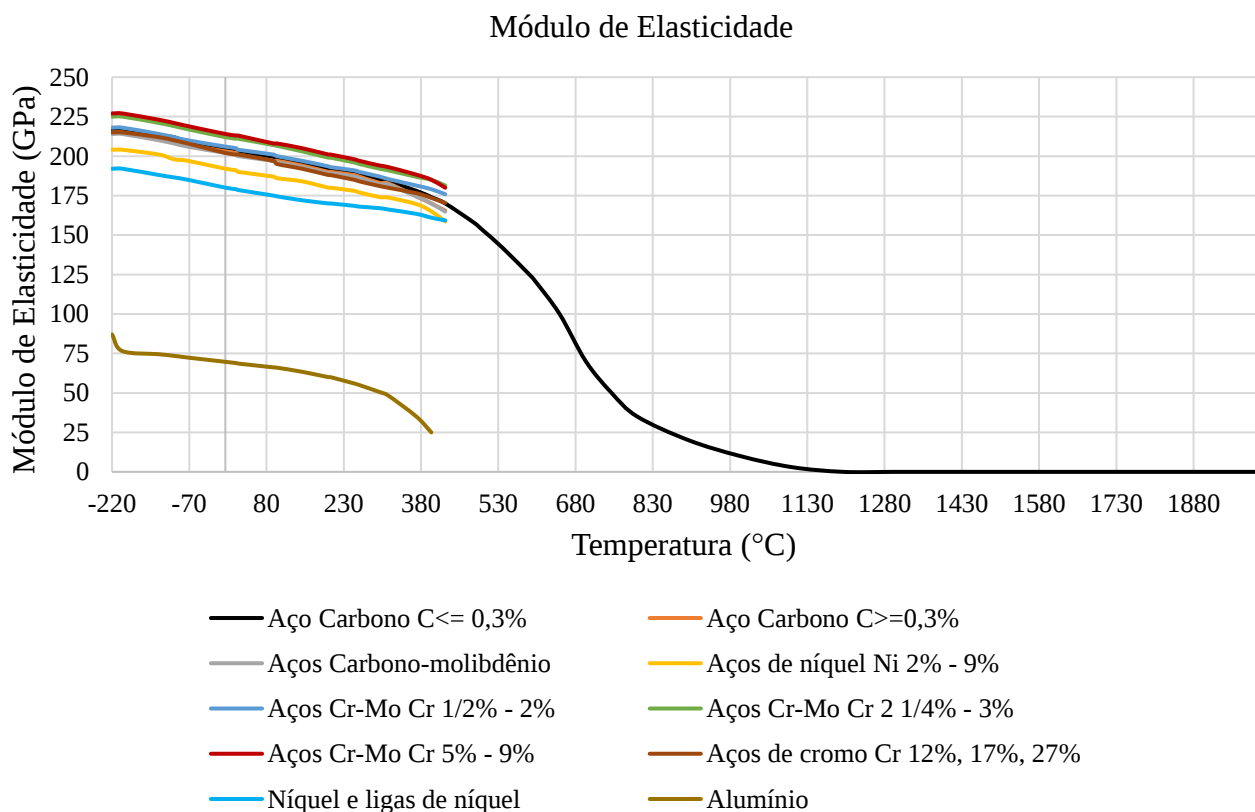
Dentre as propriedades mecânicas primordiais estão a tensão de escoamento e de resistência de uma ligação soldada, com definidas regiões elástica e plástica, as quais variam com a temperatura, causadoras de deformações lineares que resultam nas distorções, além das transformações estruturais (RAMIREZ, 2020), conforme demonstra a Figura 3.4.

As regiões curvadas retêm tensões residuais, por conta do processo; de modo que a parte externa concentra tensões de tração, ao passo que a interna, de compressão. Causando no perfil uma imperceptível estricção e afinamento (GERBO, THRALL, *et al.*, 2016).

Esses perfis, conformados a frio, podem estar sujeitos a diversos tipos de defeitos, os quais podem se relacionar à operação, afetando consideravelmente os parâmetros geométricos dimensionais (LI, FENG, *et al.*, 2021).

Ademais, as tensões residuais obedecerão ao fluxo térmico preferencialmente nas direções perpendiculares ao cordão de solda; não se espera que as tensões nesta região se anulem, influenciando as propriedades mecânicas, especificamente, nessa região (HOSOYA, MATSUMURA, *et al.*, 2020).

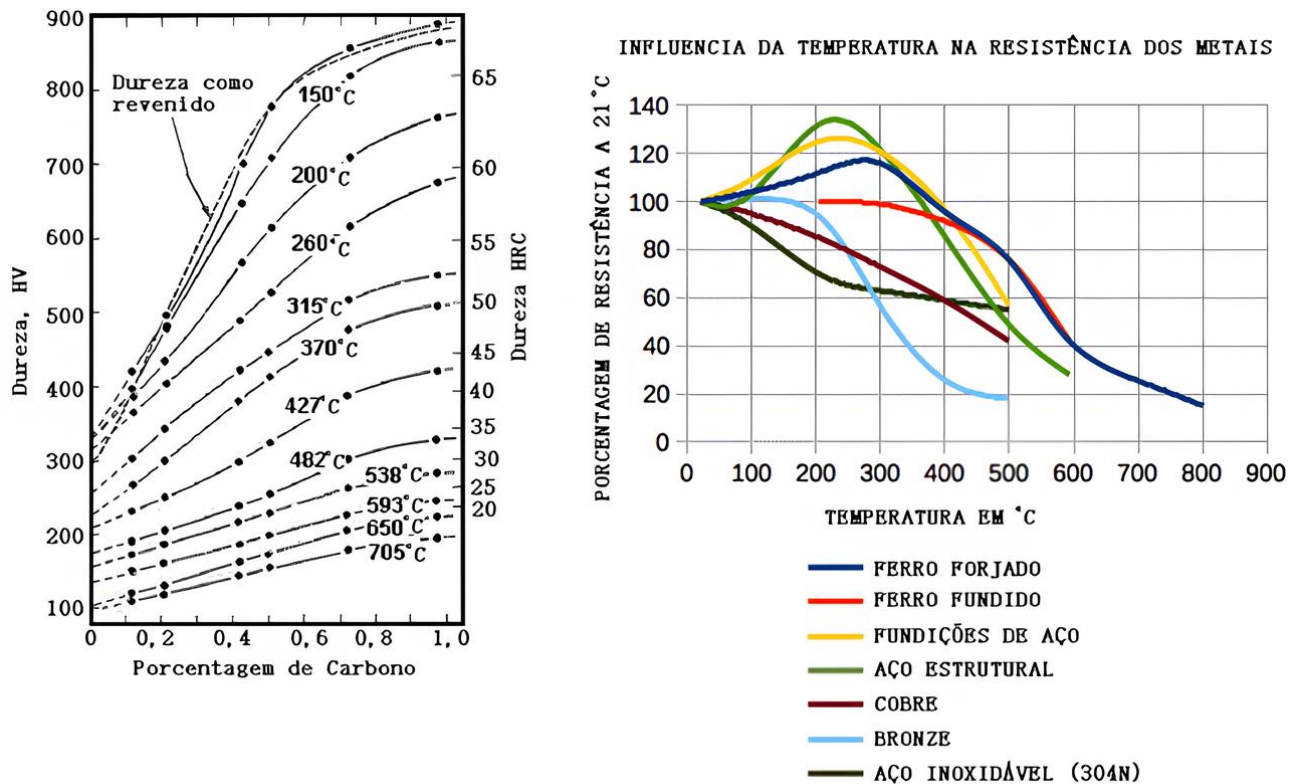
Figura 3.4 - Alteração do módulo de elasticidade entre os metais em função da temperatura



Fonte: Adaptada de (CALLISTER, 2006) ; (THE ENGINEERING TOOLBOX, 2021).

Há redução de quase 60% na tensão de escoamento, em torno dos 600° C, alterando também a resistência do aço; o cordão de solda, num determinado tempo e ponto, é de certa forma fragilizado pela existência da cratera da poça com o metal líquido em fusão, no percurso da solda, havendo a transferência de calor, que, por sua vez, afeta a dureza do material na ZAC, de que é exemplo o aço SAE-1045, mostrado pela Figura 3.5 (CALLISTER, 2006).

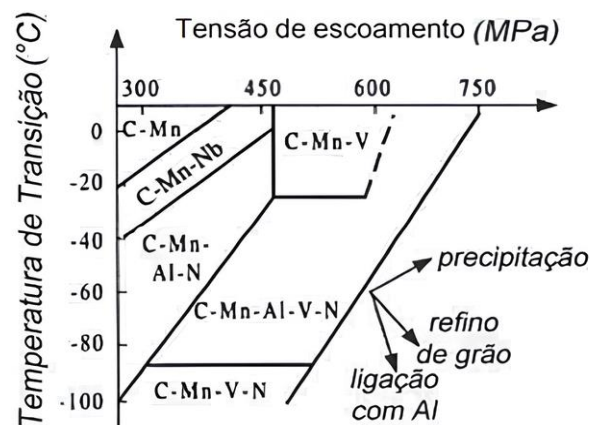
Figura 3.5 - Revenimento do aço carbono variando temperatura e peso de carbono



Fonte: (CANALE, YAO, *et al.*, 2008).

A microestrutura do cordão de solda, devido às transformações decorrentes do calor de soldagem, é evidenciada pelas matrizes específicas e heterogêneas, focalizadas na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Tensão de escoamento x temperatura de transição para os aços ARBL



Fonte: (TISZA, 2002).

Algumas peculiaridades físicas dos aços podem variar com a alteração de estado do material, quando não permanecem mais à temperatura ambiente de 20 °C, à medida que há alteração das temperaturas de exposição, como no caso da condutividade térmica e o módulo de elasticidade (WANG, CHENG, *et al.*, 2006).

Assim, a condutividade térmica se relaciona com a capacidade de transmissão de calor pontual dependente da temperatura, de sorte que, a partir daí, a eficiência do sistema pode até melhorar com a temperatura elevada (HARRIS, 2009), alterando discretamente o comportamento.

Também quanto ao módulo de elasticidade, como está estreitamente associado à lei de Hooke, quando o aço se expõe a altas temperaturas, não mais obedece ao comportamento linear frente às deformações e tensões residuais (KONG, MA e KOVACEVIC, 2011).

A soldabilidade deve ser averiguada, tendo em vista desde a temperatura inicial até a fusão dada pela ação do arco elétrico, pois o metal de base pode necessitar de um pré-aquecimento (ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009) e (FEUJOFACK KEMDA, BARKA, *et al.*, 2020).

O Carbono Equivalente fornece a facilidade de união, a partir da composição química do aço, determinado em % de pesos através da equação (SAOUDI, FELLAH, *et al.*, 2020), onde a equação 3.1 se refere ao aço ASTM A36, enquanto a equação 3.2 é mais apropriada ao ARBL CSN Civil 300:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (3.1)$$

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3.2)$$

Os aços com porcentagem entre 0,15% C a 0,30% C proporcionam a faixa de soldabilidade desejada (TOMKÓW, FYDRYCH e ROGALSKI, 2020), como nos aços ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300, os quais dispensam o tratamento térmico preparatório para o processo de soldagem.

### 3.2 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW-MAG

O processo de soldagem GMAW é o mais utilizado no mundo, por sua versatilidade e alta qualidade dos cordões de solda, o que, atualmente, tem sido um determinante no ambiente industrial (MASUBUCHI, 1980, SCOTTI, 2014).

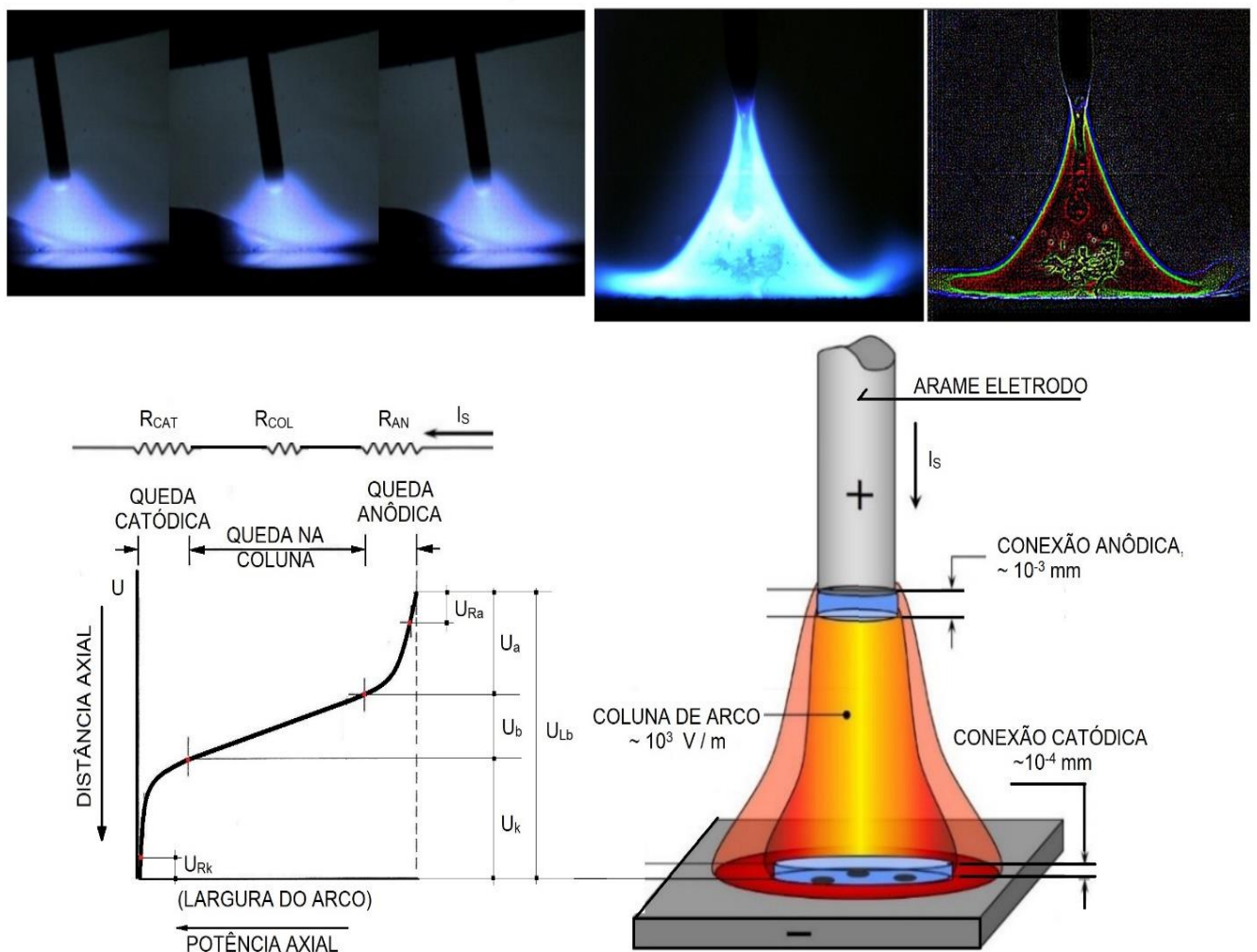
Os equipamentos que executam o processo de soldagem podem variar de um sistema básico ao avançado, e a formação fundamental ocorre sempre por uma fonte de energia,

alimentador do arame-eletrodo, tocha, polo de contato e o gás de proteção (PAES, 2016), que promovem a energia necessária numa região bem pequena, o que possibilita executar diversos tipos de modos de transferência metálica.

Os parâmetros de soldagem se devem a certos fatores, como a constituição química do consumível, suas dimensões, as quais interferem na resistência elétrica e na incidência do calor.

O processo de soldagem GMAW, é amplamente utilizado nas indústrias metalmeccânica, naval, automobilística, petrolífera e nas estruturas metálicas; a replicação da realidade fabril é apresentada na Figura 3.7 (EGERLAND, 2015), mostrando o arco elétrico típico.

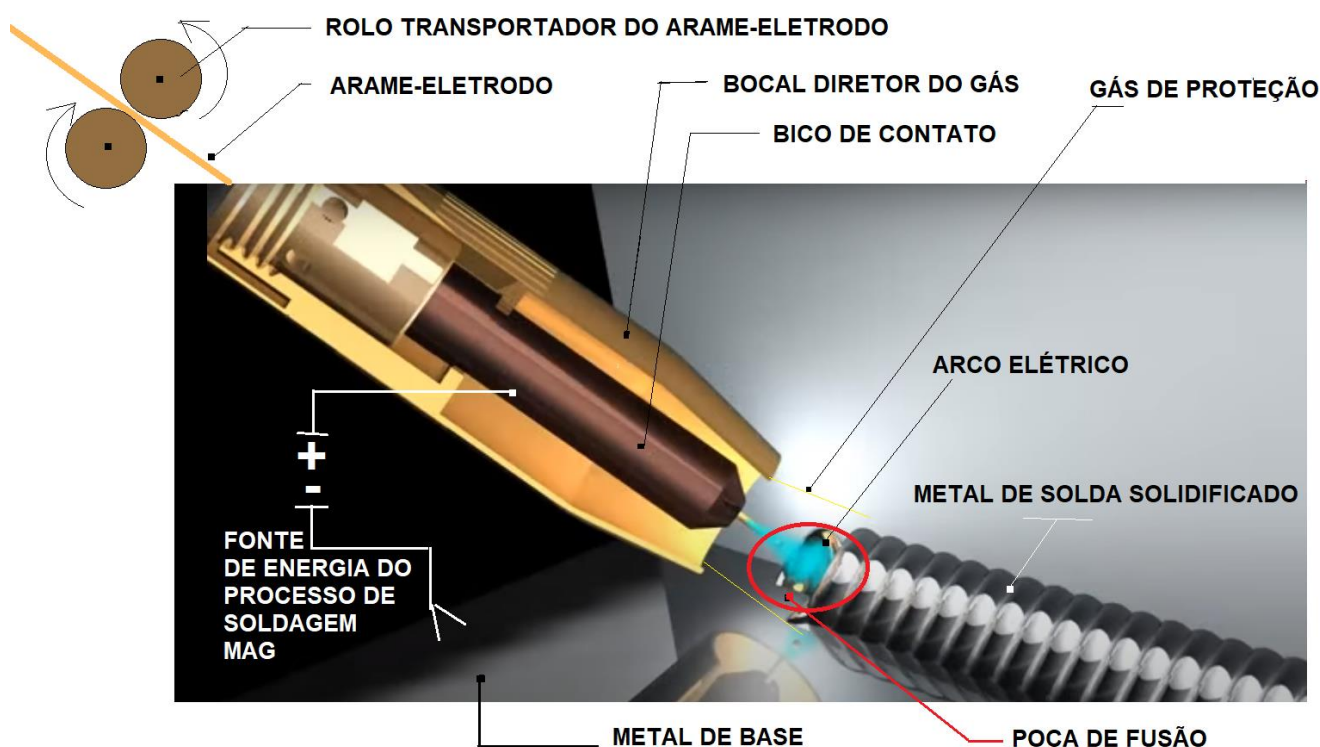
Figura 3.7 - Esquema de resistência elétrica do arco voltaico



Fonte: Adaptada de (PIRES, 2018) e (EGERLAND, 2015).

Nesse processo de soldagem, o calor latente direcionado pelo arco elétrico é produzido pela descarga elétrica, no ambiente gasoso ionizado (RIOS, FILHO, *et al.*, 2021), conforme esquematizado na Figura 3.8, em que o aquecimento capaz de fundir os metais de base e o arame-eletrodo continuamente depositado (MODENESI, 2007) é produto dos parâmetros de soldagem.

Figura 3.8 - Processo de soldagem GMAW



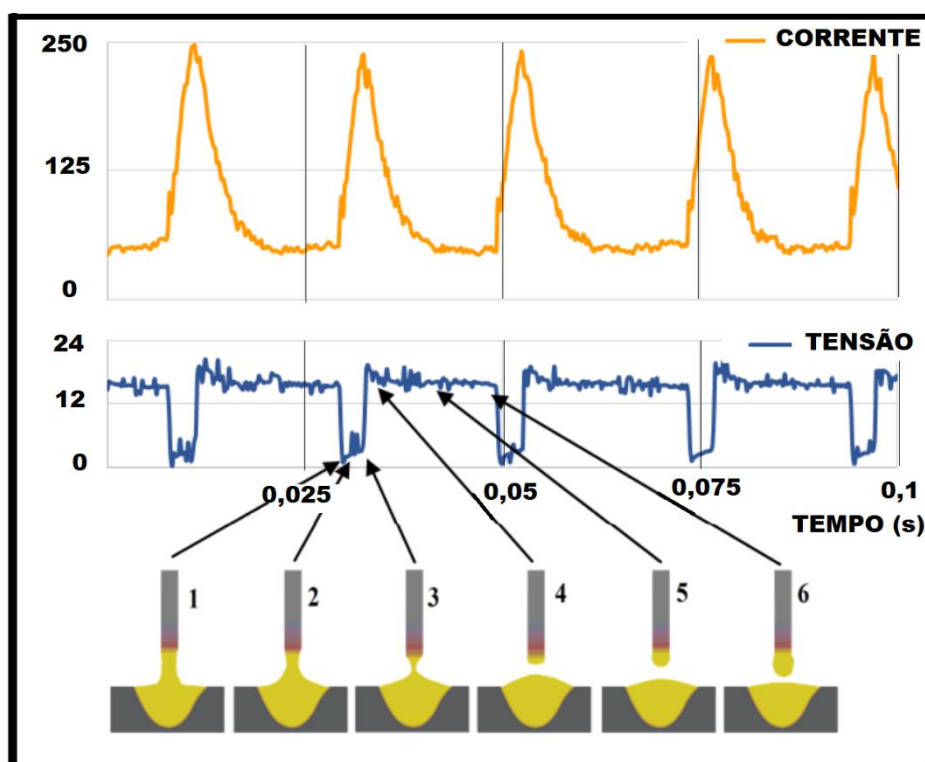
Fonte: Adaptada de (BOB e SPARKY, 2017), (VOIGT, CUNHA e DÍAZ, 2017) e (CIG SOLDAS, 1987).

Essas características são adequadas para a soldagem de chapas, de finas até grossas, e soldagem fora da posição plana, graças a pequenas dimensões do volume da poça de fusão, permitindo elevado controle do processo (PEREIRA, 2016).

A frequência dos curtos-circuitos determina também a formação da dimensão da poça de solda, em suas dimensões como largura, comprimento e profundidade, com as gotas depositadas na poça de fusão e a polaridade favorável para esse processo em CC+, que eleva a corrente e a tensão (SCOTTI e VLADIMIR, 2014). O contrário dessa polaridade dificulta a regulação dos parâmetros do processo de soldagem e a fusão do metal de base e do metal de adição (HORI e HANEDA, 1999).

No caso do processo de soldagem MIG/MAG, no modo por curto-circuito com a transferência da gota por contato da ponta do arame-eletrodo com o metal de base (MB), como se vê na Figura 3.9, o calor liquefaz o metal que atinge periodicamente a poça de fusão, com o destacamento dessa gota, e isso se dá em correntes e tensões de soldagens baixas, com uma frequência média dos curtos-circuitos (HOYOS-ARANGO e MEJIA-LOPEZ, 2018) e (EDA, OGINO.YOSUKE e ASAI, 2020). Essa transferência aleatória agita a superfície do metal líquido com o próprio consumível que toca, durante a diluição.

Figura 3.9 - Processo de soldagem MIG/MAG, na transferência por curto-circuito



Fonte: (HOYOS-ARANGO e MEJIA-LOPEZ, 2018).

A transferência de metal por meio do arco elétrico acontece por quatro modos básicos – aerossol, globular, pulsada e curto-circuito, dependendo dos parâmetros operacionais, como nível de corrente, polaridade, composição do gás de proteção, diâmetro do arame-eletrodo, DBCP e composição química do substrato e consumível (HIRATA, BELTZAC, *et al.*, 2014).

Ademais, uma variável que pode interferir no processo de soldagem é o efeito *joule* concedido pela intensidade da corrente, que afeta diretamente a energia de soldagem e consegue, assim, controlar a entrada de calor na peça de trabalho e modificar o volume do cordão de solda (CARY e HELZER, 2005).

No processo de soldagem GMAW, quando o eletrodo fica no polo positivo, CC+, e se tem nessa polaridade o arco mais estável (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Como a tensão de soldagem é outro parâmetro importante e influencia diretamente a energia específica de soldagem, na largura do cordão, na altura do arco e no modo de transferência de metal (EWI, 2015).

Geralmente, tensões menores que 22 V promovem a transferência por curto-circuito e, acima desse nível, muda-se a transferência para outro modo (WEMAN, 2012).

Mais um parâmetro que deverá ser observado é a velocidade de alimentação do arame-eletrodo sólido, que altera a tensão e a corrente de soldagem na fonte de energia, cuidando para

que a aceleração de alimentação corresponda à regulação da altura do arco eletrovoltaico, potencializando a energia para fundir o metal de solda (CORREIA, KRUNG e D., 2016).

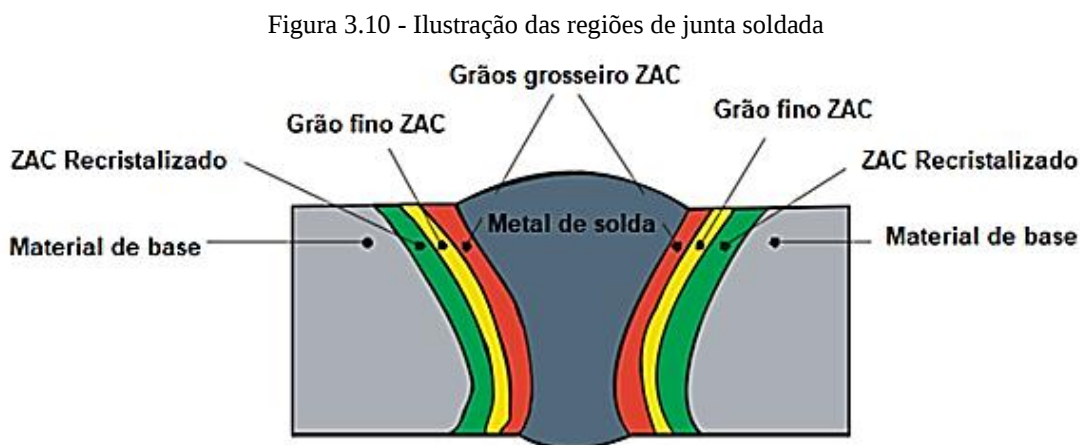
É igualmente relevante controlar a velocidade de soldagem, pois o transporte da tocha em relação à peça de trabalho a ser soldada deve ser precisa. E acompanhar o arco na linha da junta, para que não haja desvios e, conseqüentemente, alteração na penetração da solda (ALVES, 2019).

Outra variável que não influi nos parâmetros da modelagem por elementos finitos, mas é importante durante o processo de soldagem, é a vazão do gás de proteção, a qual pode influir na qualidade do metal depositado, principalmente na atividade com o metal líquido, no caso do processo MAG. Se for ineficiente, debilita a proteção, ocasionando poros e oxidação no cordão de solda; se for alta, promove o surgimento de impurezas no metal depositado. Logo, para não ocorrer nem um nem outro, a regulação do gás de proteção deve atender à distância entre o bocal da tocha, também ao nível de corrente de soldagem, a presença de ventos, a peça de trabalho, com pressão suficiente para sustentação da atmosfera do plasma. Desse modo, o *stick-out* deve ser adequado, pois o trecho do arame-eletrodo por onde passa a corrente elétrica e gera o calor, por efeito *joule* até a peça de trabalho que define a taxa de fusão de material (FILHO, SAIRRE e ANTONIO, 2007), necessita de estar envolvida pelo gás.

### 3.3 REGIÕES DA JUNTA SOLDADA

A junta soldada contém peculiaridades, com regiões microestruturais bem distintas; cada uma delas depende das condições térmicas a que estarão expostas e da composição química do metal de solda, produto da diluição do metal de base com o metal de adição, principalmente a zona fundida e a zona afetada pelo calor (FAKI, BURI e MUMINOVI, 2011).

A Figura 3.10 esquematiza as regiões significativas do cordão de solda.

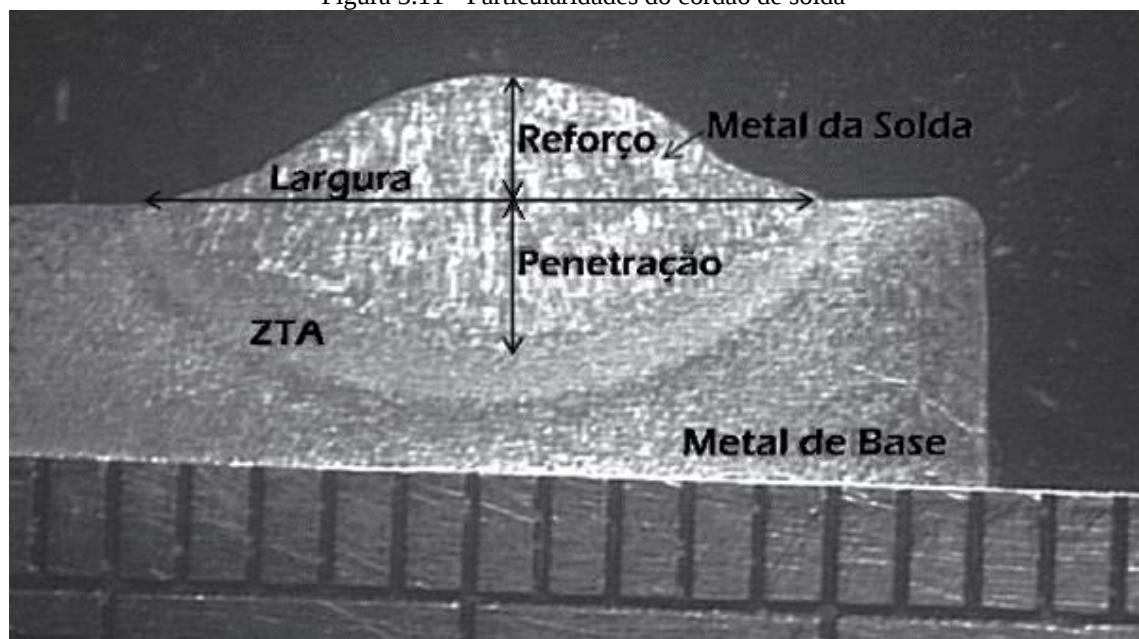


Fonte: (FAKI, BURI e MUMINOVI, 2011).

### 3.3.1 Zona fundida

A zona fundida se caracteriza pelas temperaturas máximas do processo de soldagem recebidas do arco elétrico, resultado da poça líquida que solidificou o metal de solda. Nem sempre o núcleo das altas temperaturas acontece na superfície, dependendo da preparação da junta e espessura da chapa, como no caso da Figura 3.11, onde o cordão de solda foi aplicado diretamente sobre a placa (SILVA, BRACARENSE e PESSOA, 2012).

Figura 3.11 - Particularidades do cordão de solda



Fonte: (SILVA, BRACARENSE e PESSOA, 2012).

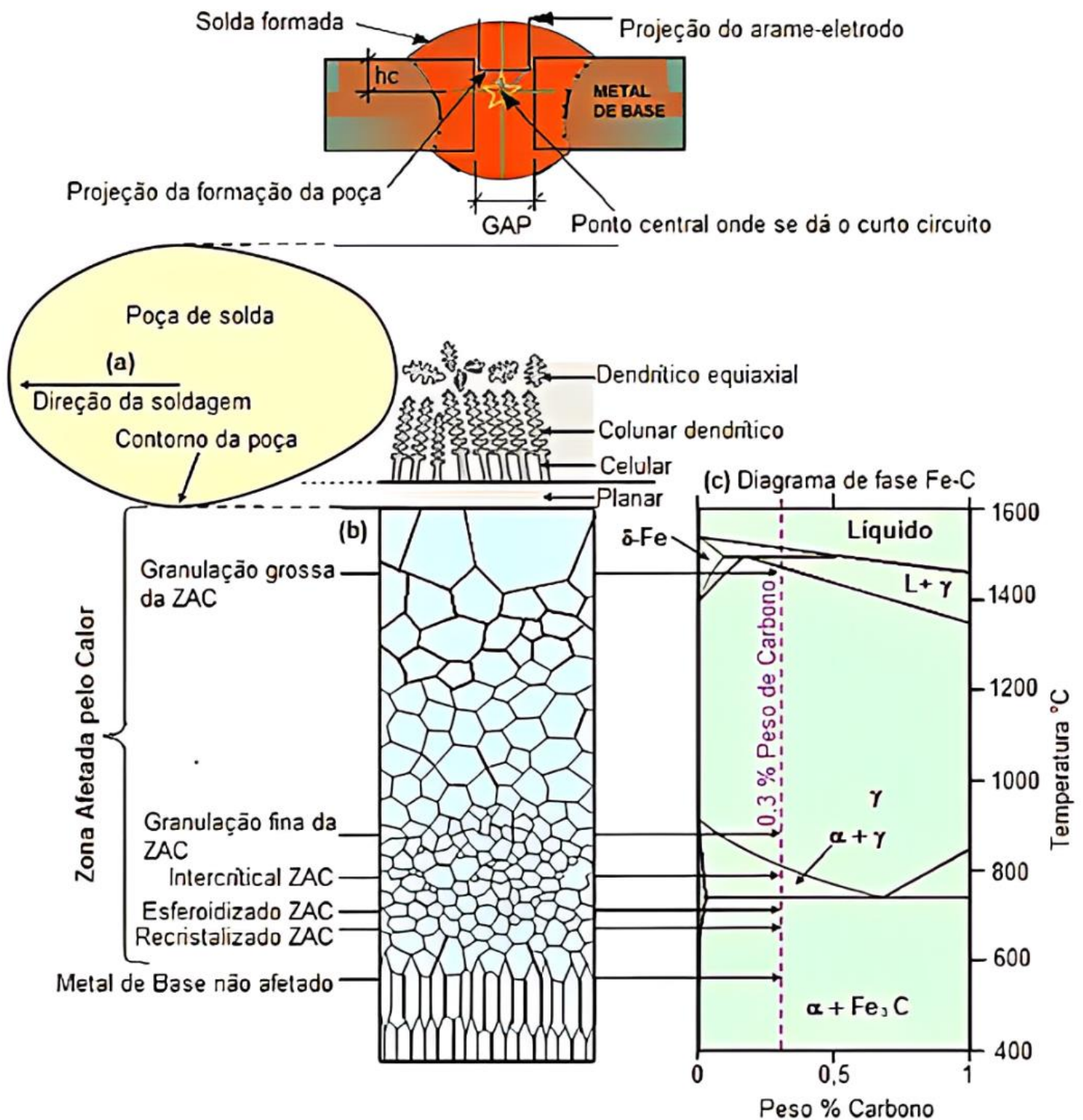
E, delineada pelo contorno do metal de solda, onde ocorre o crescimento concorrente de grãos, durante a solidificação, preferencialmente na direção perpendicular à interface líquido e sólido, conforme apresenta a Figura 3.12, verifica-se a sua acomodação na matriz estrutural (DODGE, 2014).

Quando se faz o uso do robô de soldagem, o resultado da zona fundida é mais homogêneo, e o ideal para esse processo é não ultrapassar muito além da temperatura de fusão e causar o superaquecimento indesejado.

Muitas pesquisas apontaram a temperatura na poça líquida de solda, uma faixa térmica entre 1500 °C e 1850 °C, com uma temperatura média de 1675 °C.

O calor atuante na zona fundida é transferido por condução, sendo a principal forma de propagação onde há perda térmica por convecção e radiação, que é praticamente desconsiderada (TAVARES, PORCARO, *et al.*, 2020). O ponto da zona fundida por onde o calor flui coincide exatamente com o centro de abertura do curto-circuito.

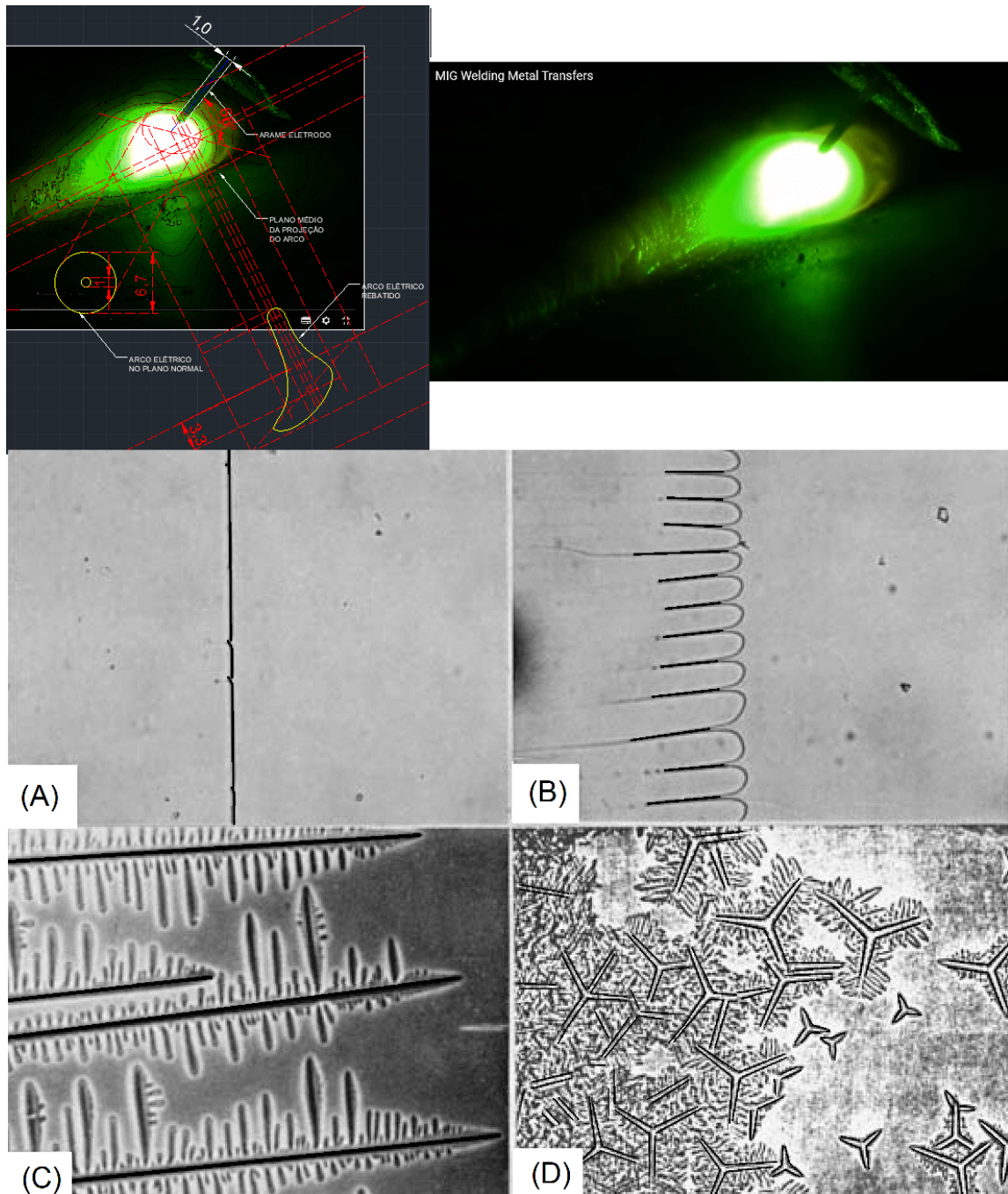
Figura 3.12 - Esquema do crescimento competitivo de grãos na zona fundida



Fonte: Adaptada de (DODGE, 2014).

E, num corte transversal da poça de fusão, o processo de formação da zona fundida ocorrerá das bordas para o centro, segundo mostrado nos esquemas das Figuras 3.13 e 3.14.

Figura 3.13 - Modos de solidificação da poça de fusão, ampliado 67 x.



Onde: (a) solidificação planar de tetrabrometo de carbono; (b) solidificação celular de tetrabrometo de carbono com uma quantidade pequena de impureza; (c) solidificação dendrítica colunar de tetrabrometo de carbono com várias taxas de impureza; (d) solidificação dendrítica equiaxial de ciclohexanol com impureza.

Fonte: Adaptada de (KOU, 2003).

Figura 3.14 - Processo de solidificação na junta soldada de topo



Fonte: (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

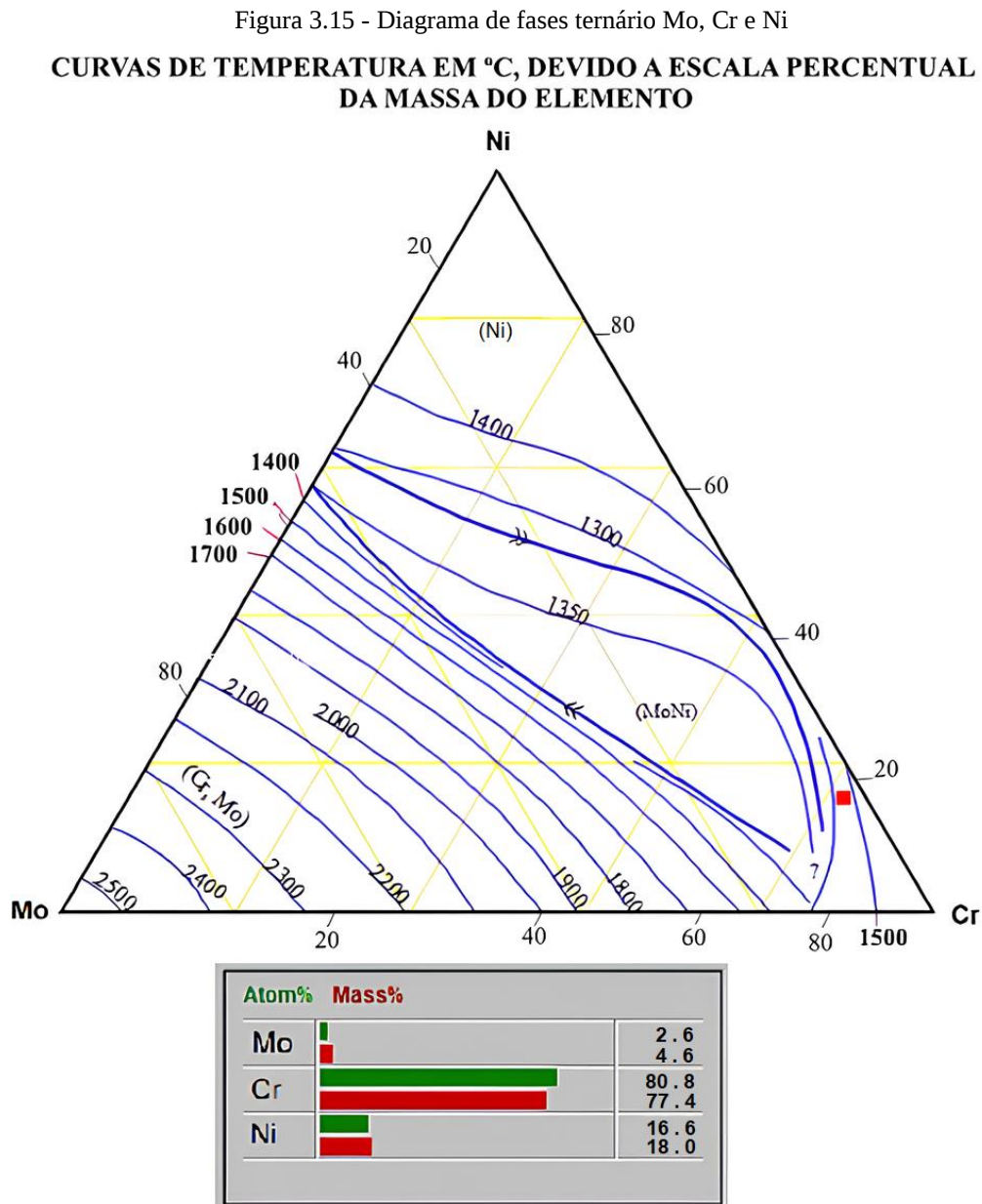
A equação que auxilia a previsão da temperatura de fusão, dependendo da composição química do metal constituído, pode ser representada pelas suas proporções em massa:

$$\bar{T}_f = \frac{\sum T_i \cdot w_i\%}{100\%} \quad (3.3)$$

Onde:

- $\bar{T}_f$  é a temperatura de fusão equivalente da composição química;
- $T_i$  é a temperatura de fusão de cada elemento químico individualmente e
- $W_i$  é o peso em porcentagem da composição.

Como exemplo, a Figura 3.15 apresenta a influência da diluição do titânio, molibdênio e cromo, na formação da zona fundida em relação à temperatura de fusão:

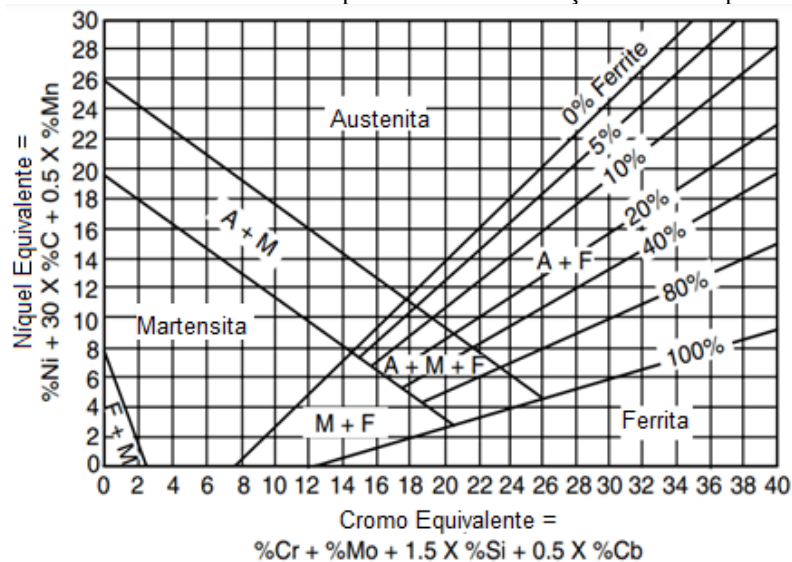


Fonte: (SIEDSCHLAG, 1925).

Nos instantes de existência da zona fundida formada pela cratera que contém o aço líquido, há uma certa liberdade de movimento normal da chapa metálica, no ponto da região líquida da poça, enquanto a tocha segue o seu trajeto e, pelo efeito cortante pontual na chapa metálica, se torna algo a ser considerado no desalinhamento das partes, em função da grandeza dessa extensão (ELEKTRISKA SVETSNINGS AKTIE BOLAGET - ESAB, 2005).

Kou, conhecendo a composição química da solução ocorrida na zona fundida, concorda ser uma forma de prever a composição final no metal de solda a utilização do gráfico de Schaeffler, exemplificado na Figura 3.16 (KOU, 2003).

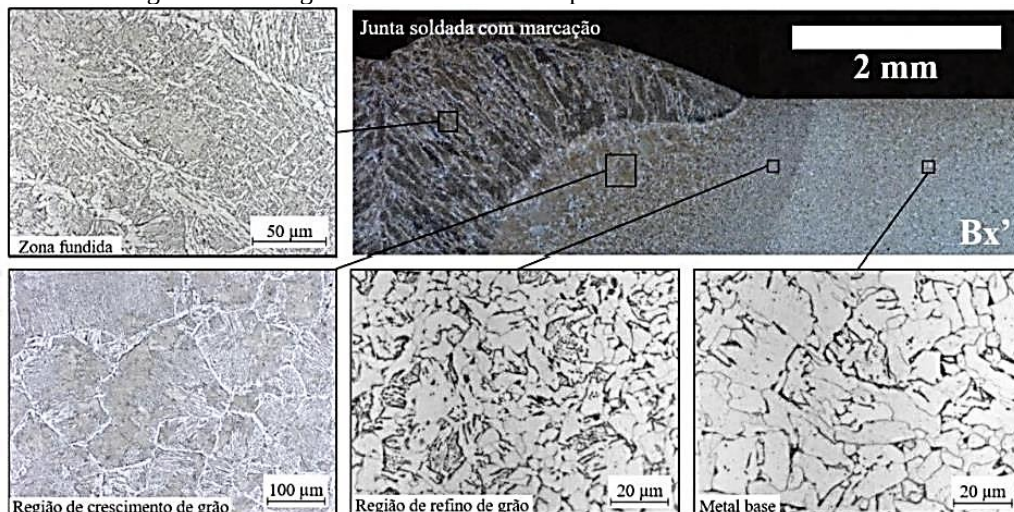
Figura 3.16 - Tabela de Schaeffler: expectativa da constituição da solda a partir das ligas



Fonte: (SCHAEFFLER, 1949)

A Figura 3.17 contém a configuração basilar microestrutural do cordão de solda pelo processo de soldagem GMAW-MAG:

Figura 3.17 - Regiões do cordão de solda por fusão e suas microestruturas



Fonte: (CARPENEDO, 2021).

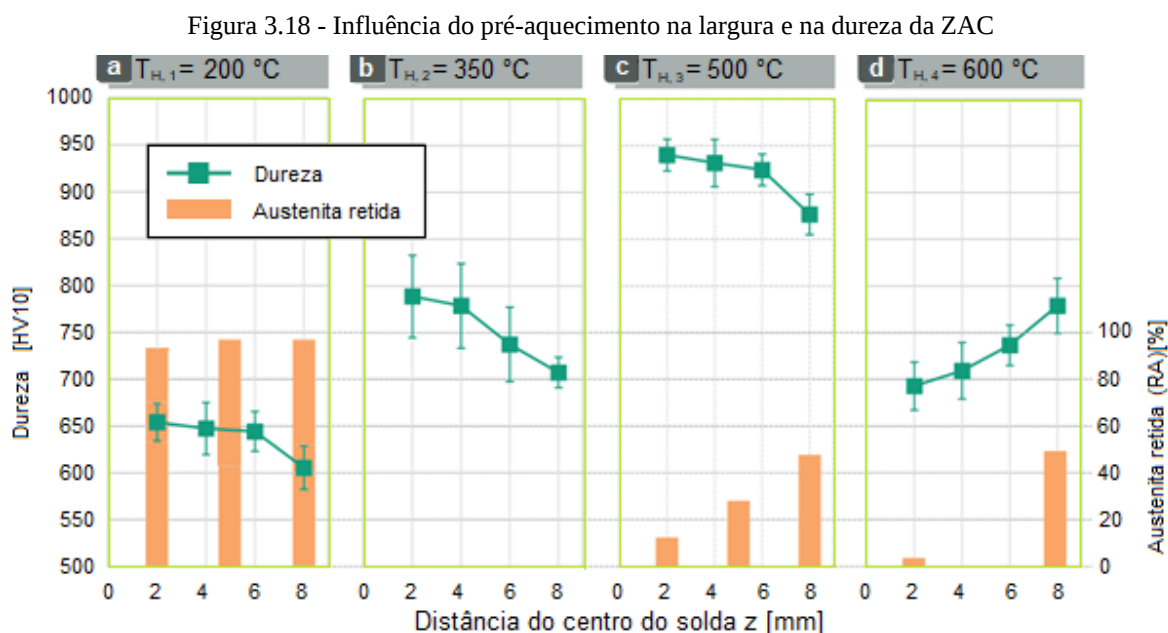
A microestrutura na zona fundida é atribuída às ocorrências de sobreposições de temperaturas impostas pelo calor de soldagem, como na zona fundida, na qual as isotermas que fluem com o decorrer do tempo estão sujeitas à sobreposição de isotermas pelo efeito de borda, dependendo da dimensão da chapa metálica e promovendo alteração contínua até nas tensões internas (DEHUA CUI, 2001).

### 3.3.2 Zona afetada pelo calor

A ZAC é a região onde não ocorre a fusão do metal de base, ou seja, a região compreendida entre a zona fundida e o metal de base não afetado termicamente, que teve modificação das propriedades mecânicas e/ou metalúrgicas, devido a imposição da mudança brusca de temperatura decorrente da operação de soldagem (KUMAR, 2014).

À medida que há transformação de fase, nessa região, intrinsecamente acontecerá expansão seguida de retração complexa e sucessiva até a estabilização (BORBA, SANTOS e MODENESI, 2020), sendo que a retração térmica, na superfície, não é exatamente igual à distribuição térmica a partir da poça de fusão, mas, para as chapas finas, se admite o mesmo efeito térmico por toda espessura, porque pontualmente é insignificante a variação de temperatura.

Tendo em vista que a largura e a dureza da zona afetada pelo calor são influenciadas pelo aporte térmico, a Figura 3.18 mostra como o pré-aquecimento aumenta a energia final de soldagem, porém, esse pré-aquecimento altera significativamente a taxa de resfriamento, promovendo a redução da dureza nessa região (SAEWE, WILMS, *et al.*, 2021).



Fonte: (SAEWE, WILMS, *et al.*, 2021).

### 3.3.3 Zona de ligação

A zona de ligação é bem definida pelo limite que separa o MS e a ZAC, onde o crescimento dos grãos na poça de fusão se conglomerou, desenvolvendo a orientação cristalográfica (LIPPOLD, 2015) e (DODGE, 2014).

O cordão de solda, demarcado pela linha transitória entre a poça de fusão, líquida, misturado ao metal de base, sólido, se liquefaz e, a partir daí, inicia-se a solidificação e a nucleação gradualmente em direção ao baricentro da solda, enquanto há transferência do calor até a sua equalização (REISGEN, OECHSNER, *et al.*, 2020).

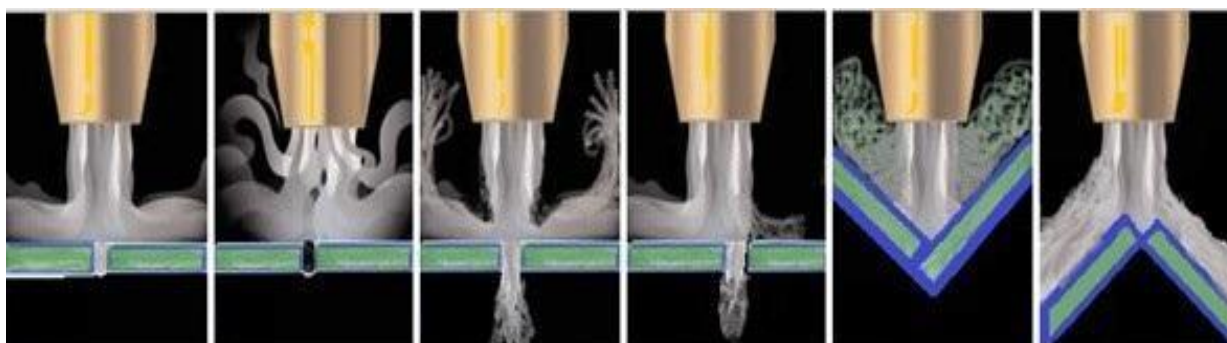
Entre a poça de fusão e a zona afetada pelo calor ocorre a retração, a qual começa quando, na poça de fusão, surge a formação dos grãos sólidos (PINTO, SOUZA FILHO, *et al.*, 2020). Logo, essa retração na soldagem se torna gradual, quando o sistema instável busca o equilíbrio térmico, aproximando-se da temperatura-ambiente, por ocasião do resfriamento (SELVAMANI, VELMURUGAN, *et al.*, 2020).

## 3.4 FATORES RELEVANTES NO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

No que concerne ao consumível, o diâmetro e o comprimento da ponta influem diretamente na resistência elétrica (MESSLER, 2019).

O uso do gás de proteção eficiente na soldagem é de forma que permita a sua ação constante na poça de fusão (LINDE, 2016). A adição de dióxido de carbono facilita a ionização do plasma, proporcionando o efeito-estufa, de sorte que essa camada impede a perda de calor para o espaço exterior, promovendo o aquecimento do sistema como um todo (MESSLER, 2004) e atentando ao fluxo de início ao fim da soldagem, com a correta direção e orientação, como exhibe a Figura 3.19 (PEREIRA, 2016).

Figura 3.19 - Posicionamento da junta diante da vazão do gás de proteção



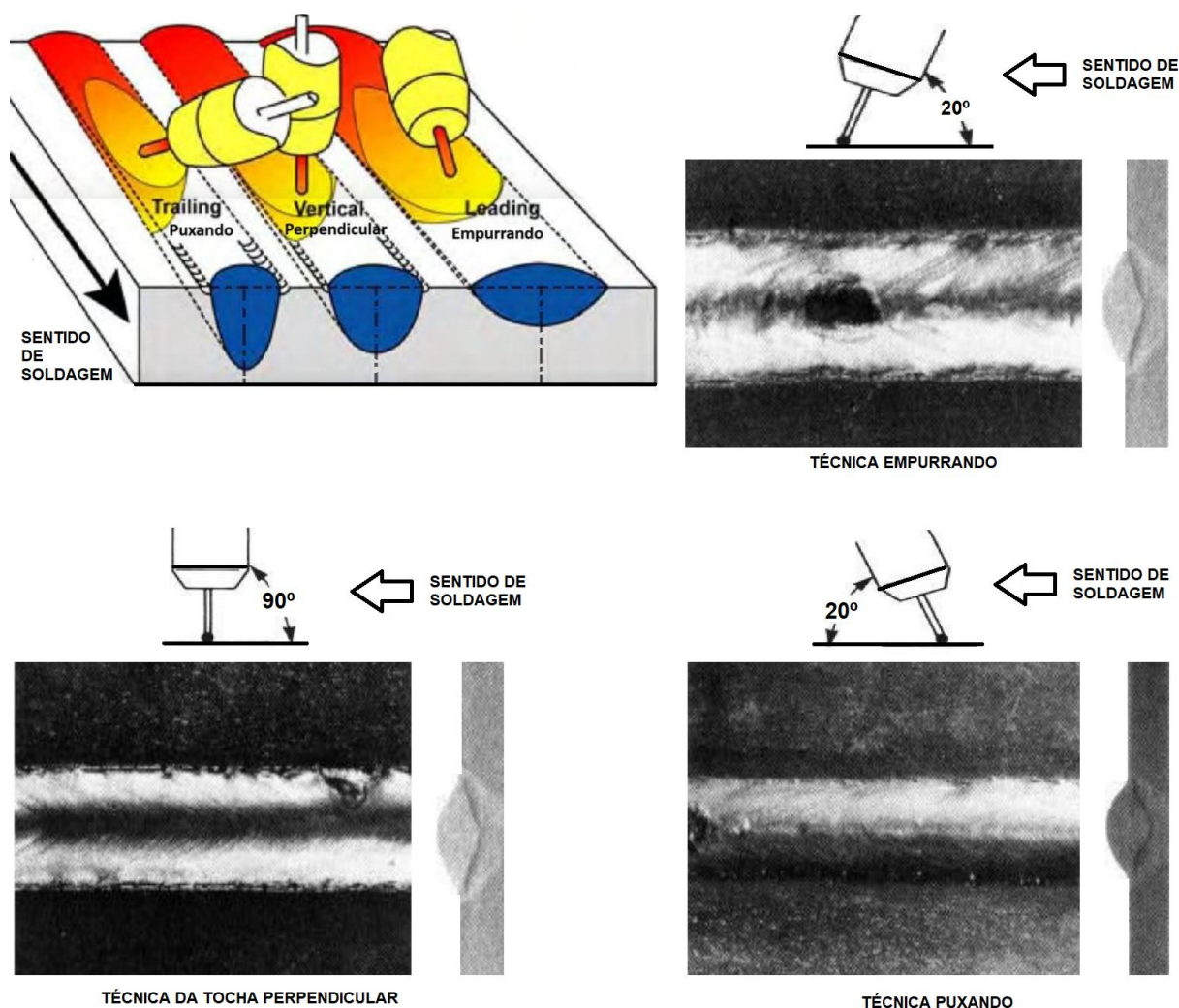
Sendo, da esquerda para a direita: fluxo normal, fluxo insuficiente, fluxo com alta pressão acima da junta, desalinhamento da junta com vazamento, fluxo acumulado pelo retorno e fluxo com direção prejudicial.

Fonte: (PEREIRA, 2016).

Como a junta é o local de instalação da poça de fusão dos metais, a fresta deve ser preparada de forma adequada, constituindo, portanto, um dos requisitos essenciais para a realização da soldagem, que não pode ser ignorada, pois existe a prática de formalidades, a qual vai desde a limpeza até o seu acabamento. No caso de chapas finas, não requerem chanfros, mas devem ser alinhadas, paralelas e isentas de rebarbas, podendo variar o *gap* do contato até 20% do diâmetro do consumível (MOORE, DAVIS e COPLAN, 2013).

Por isso, é importante manter corretamente essa configuração do arame-eletrodo, para que a tocha se movimente alinhada sobre a junta, de início ao fim da solda, controlando a geometria do cordão, a falta de penetração e o excesso de calor apenas em um lado da fresta no metal de base (MOHAMMADPOUR, 2020) e (AVENTA, 2015). O sentido de soldagem pode ser realizado, puxando-se ou se empurrando, com inclinação da tocha observando o melhor ângulo entre 20° e 90°, tendo em vista a melhor penetração (PANDOLFI, RODRIGUES e MODENESI, 2016). A Figura 3.20 apresenta como isso acontece:

Figura 3.20 - Efeito da posição e sentido da tocha de soldagem sobre o cordão de solda

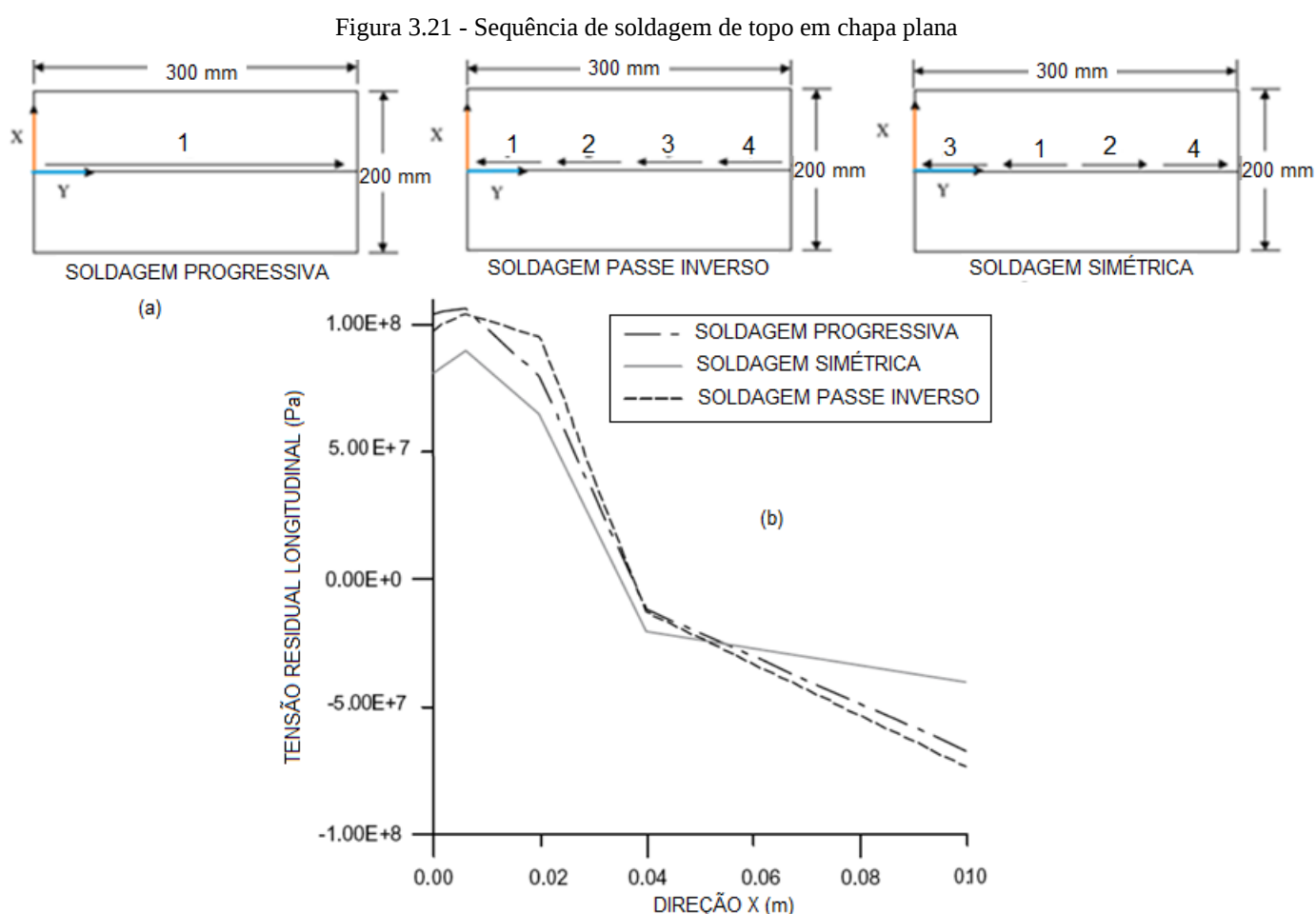


Fonte: (PASQUALINI, SONTAG, *et al.*, 2017) e (INSPECTION, 2009).

Algumas combinações de posição e direção de soldagem favorecem mais do que outras a entrada de calor incidente no metal de base e a forma do plasma, sob a influência gravitacional, que podem modificar a distribuição térmica (PIRES, LOUREIRO e BOLMSJO, 2006).

Com o robô Motoman UP6 conectado, a tocha fica isenta de botoeira, pois sua comunicação é direcionada pelo *startup* do sistema, com seis graus de liberdade de movimento, e a central de controle admite interface com número limitado de outros robôs (YASKAWA AMERICA, INC., 2022).

A sequência de soldagem é orientada por um equipamento de soldagem integrado a um dispositivo que controla a distorção; assim, o mapa das tensões residuais corresponderá, porque, desse modo, se dará a entrada de calor e a dissipação térmica. O caminho de soldagem pode ser determinado de inúmeras maneiras de combinação, mas somente uma é a melhor para cada caso e resultado esperado, que conduzirá às condições da menor distorção no elemento soldado. E, no caso de único passe de solda, pode ser realizado nas formas contínua, convergente das bordas para o centro, intermitente, escalonada ou de outro tipo. A Figura 3.21 mostra algumas sequências escolhidas por Chen (2019):



Sendo (a) trajetos do passe simples e (b) o resultado da distribuição de tensões residuais.

Fonte: (CHEN, 2019).

A principal finalidade no uso do robô é a conservação dessas constantes, no processo de soldagem, tornando o modelo fidedigno com alto desempenho de 11,91 kg/h versus a mão de obra especializada de 5,99 kg/h/homem, na fabricação de estrutura metálica, num ciclo de trabalho ininterrupto (JUNIOR, NASCIMENTO, *et al.*, 2019). O sistema robotizado no processo de soldagem MAG pode ser integrado a quase todos os equipamentos mais sofisticados, mesmo quando esses robôs se acoplam a mesas giratórias e translativas, associados a sensores para controle de frestas, barreiras, vazios e alinhamento (KERSTEN, 2020). Inúmeros benefícios do sistema robótico são atribuídos aos processos de soldagem, dentre os quais está a absolvição de gabaritos externos, que, muitas vezes, são interferências ao próprio processo, principalmente quando o processo exigir multipasses, como no trabalho dos pesquisadores (JAVADI, SWEENEY, *et al.*, 2021).

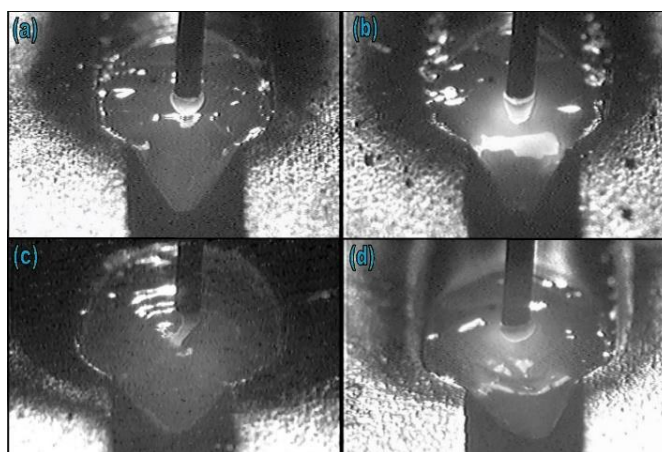
Essas sequências estudadas têm o objetivo de diminuir os efeitos térmicos. Em uma combinação de sequências de soldagem, sempre deverá ser definida a referência de partida e os demais reposicionamentos previamente programados.

Conforme já visto, a eliminação das distorções no processo de soldagem é um árduo trabalho; contudo, é possível atenuar a sua instalação, com uma sequência que amortize as retrações com as expansões. Porém, é sabido que as indústrias do ramo da metalmecânica optam sempre por um único passe sequencial, por considerar a sua utilização e a inevitabilidade das distorções (CHEN, 2019).

### 3.5 ASPECTOS TÉRMICOS DA SOLDAGEM

Alguns aspectos no processo de soldagem, devido à ação térmica, são possíveis de serem notados, quando se observa a poça de fusão, indicado na Figura 3.22, a seguir.

Figura 3.22 - Poças de fusão no processo de soldagem MIG/MAG



Sendo (a)Curto-circuito, (b) RMD, (c) STT e (d) CMT.

Fonte: (MOTA, MACHADO, *et al.*, 2014).

No cordão de solda, muitos fenômenos acontecem simultaneamente, como a agitação do líquido pela vibração da ponta do arame-eletrodo que toca a poça de fusão e pelo efeito *joule*, o qual interfere a intensidade de energia elétrica, no processo por curto-circuito.

### **3.5.1 Distribuição térmica na chapa dobrada**

A distribuição térmica que ocorre nas chapas de aço; quando recebem uma energia térmica intensa e constante, respondem a esse sistema termodinâmico na conservação de energia cedida e transferida, sempre sendo a mesma diferença. Mas, quando duas chapas planas têm suficiente distância entre elas para se comunicarem, a forma de transferência e recepção de energia entre os sistemas se torna diferente, mesmo que os resultados tenham pequena variação (ROBERTSON, 2019).

Baseadas nesse contexto, de dois planos paralelos de chapas, no caso das chapas dobradas que são compostas de planos perpendiculares entre si ou ortogonais, as regiões de maior energia térmica espontaneamente transferirão calor com mais facilidade para os lados de menor energia, acontecendo transferência por condução em taxas diferentes (CARRASCO, HURTADO e REYES, 2019).

Além disso, as curvas que enrijeceram o perfil são regiões possíveis de comunicação entre sistemas termodinâmicos, com tempo de resfriamento específico, até atingir o equilíbrio.

Como não se encontraram, na literatura, pesquisas específicas sobre o assunto, a distribuição térmica ainda será considerada como sistema plano, como de inúmeros trabalhos.

### **3.5.2 Ciclo Térmico**

Através do caminhar da tocha de soldagem, há contínua entrada de calor transferida para o metal de base, caracterizando o ciclo térmico de soldagem com a forma de uma onda alta e cauda abatida, a qual registra a temperatura máxima até o seu equilíbrio térmico, repetindo para todos os pontos. Como se o arco elétrico estivesse parado, a entrada desse calor seria transferida por toda a chapa, resultando em um ciclo térmico de uma situação quase estacionária.

Assim, formam-se fronteiras térmicas definidas entre a ligação do cordão de solda e a zona afetada pelo calor, possuindo uma variação de temperatura ( $T$ ) em função do tempo ( $t$ ), com ciclos térmicos para todos os pontos (YANG, ZHANG e ZHAO, 2020) (DEMARQUE, SANTOS, *et al.*, 2018).

A partir do ciclo térmico de soldagem na curva  $T \times t$ , além de se determinar a temperatura máxima, o tempo de ocorrência e a velocidade de resfriamento, em cada ponto do material soldado se determinam alguns fenômenos, como as deformações, as transformações microestruturais, as tensões residuais e as propriedades mecânicas na junta soldada (SUN, HAMELIN, *et al.*, 2020).

À medida que o ponto de análise se afasta do eixo central da solda, ponto de referência principal, as temperaturas diminuem em função do tempo. Assim, tem-se o campo tempo e espaço dessa dissipação térmica de soldagem, que influencia o ciclo térmico e a velocidade de resfriamento,  $V_t$ , mostrada pela tangente na curva  $T \times t$ , que assume valores elevados (DEMARQUE, SANTOS, *et al.*, 2018).

### 3.5.3 Taxa de resfriamento na chapa dobrada

Em qualquer processo de soldagem, a taxa de resfriamento tem sua importância, por ser o mecanismo de transformação, o qual, assessorado a sistemas computacionais, permita que o resultado esperado seja o mais próximo do real. No caso dos aços ao carbono e baixa liga, essas taxas de resfriamento têm comum interesse próximo à região perlítica das curvas CCT, focando a temperatura crítica aproximada de  $T_c = 545 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ao se determinar a taxa de resfriamento,  $T'_r$ , no processo de soldagem variando a posição e o tempo, a partir do ciclo térmico, das diferenças de temperaturas experimentais, ou equacionadas por meio da equação 3.4 para perfis estruturais de aço dobrado em chapas finas, na linha central da solda, quando o metal está se solidificando, pode ser observada uma temperatura que passa em um determinado ponto (ROSENTHAL, 1946):

$$T'_{r(x,y,z)} = 2\pi\lambda\rho c \left( \frac{h}{H_{net}} \right)^2 (T_c - T_o)^2 \quad (3.4)$$

Onde:

- $T_o^2$  se refere à temperatura inicial da chapa dobrada em  $[^\circ\text{C}]$ ,
- $T_c$  é a temperatura de estudo para calcular a velocidade de resfriamento em  $[^\circ\text{C}]$ ,
- $h$  é a espessura das chapas de aço em  $[\text{m}]$ ,
- $H_{net}$  se trata do aporte térmico de soldagem em  $[\text{J} \cdot \text{m}^{-1}]$ ,
- $c$  é o calor específico do metal em  $[\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}]$ ,

---

<sup>2</sup> A temperatura inicial pode não ser a temperatura-ambiente de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; depende das temperaturas no intervalo de tempo de interesse.

- $\rho$  é a densidade do aço em  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ ,
- $\lambda$  é a condutividade térmica do metal em  $[\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$  e
- $(x,y,z)$  são as direções cartesianas.

Quando se empregar perfis dobrados com chapas espessas, o calor específico volumétrico deixa de ter influência na taxa de resfriamento, segundo se verifica na equação 3.5:

$$T'_{r(x,y,z)} = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad (3.5)$$

Entretanto, na maioria dos casos, a área de granulação é grossa, durante o processo de soldagem, em razão da influência da taxa de resfriamento e estruturas mais finas em aços de baixa temperabilidade. Quanto maior for o teor de carbono, mais frágil será a estrutura a ser formada, sendo a martensita maclada a estrutura mais frágil a se formar na zona afetada pelo calor, quando ocorre a presença de hidrogênio difundido no processo de soldagem (DING, LI, *et al.*, 2020).

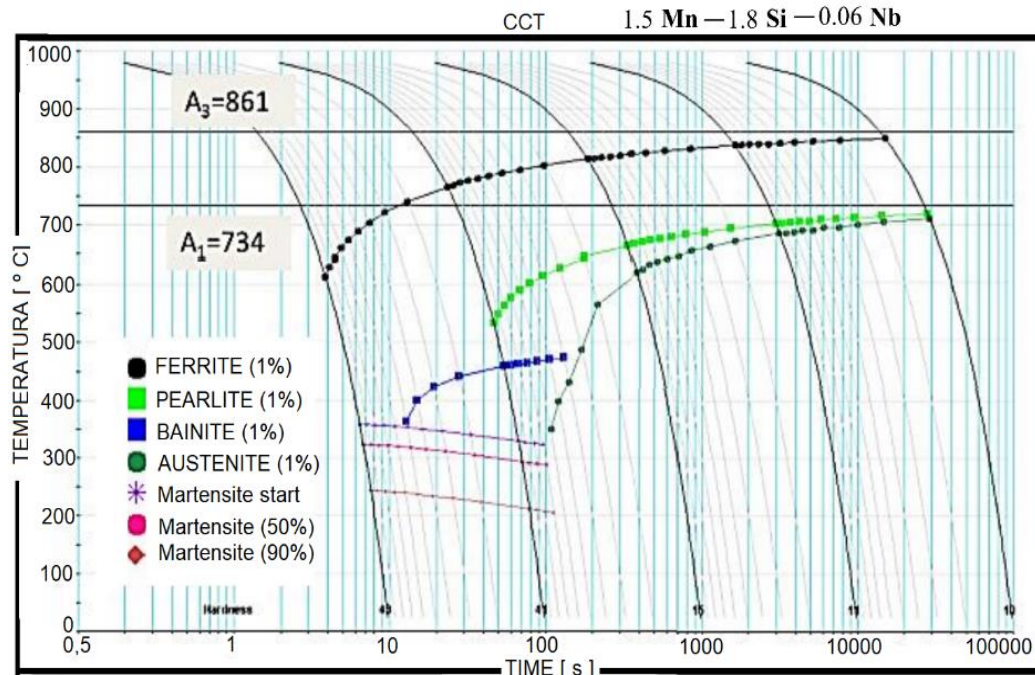
Assim, em alguns aços de baixa liga e baixo carbono, altas velocidades de resfriamento podem causar uma região com mais tenacidade, pela formação desse microconstituente. Processos com alta energia de soldagem tendem a gerar a zona alterada pelo calor, excessivamente grosseira e de baixa tenacidade (GÓRKA, 2020).

Definida a taxa de resfriamento para a chapa dobrada tipo U, é possível determinar a microestrutura nas áreas de interesse, desde onde não é mais possível nenhuma transformação, findando-se na zona afetada pelo calor gerado pelo arco; depois desse limite, o ciclo térmico fica mais abatido. No caso das chapas finas, admite-se a transferência de calor bidimensional, que é justificada pela espessura fina (BAYRAKTAR e DEMIR, 2022).

Quando a taxa de resfriamento é alta, surgem microcomponentes de transição de baixa temperatura com alta dureza e, em taxas baixas, há formação de estruturas ferríticas grosseiras e frágeis, como na ZAC, próximo à linha de fusão. Devido à sua maior temperabilidade, essa fragilização se torna proeminente em aços de alta resistência, e o ideal é dispor de condições de soldagem, de maneira que as taxas de resfriamento sejam adequadas conforme a curva CCT (BECKER, 2012) (ALBUQUERQUE, 2010).

É mostrado, na Figura 3.23, que a microestrutura menos susceptível às trincas a frio é obtida a partir do controle das taxas de resfriamento, por meio da determinação do ciclo térmico (KRIVTSUN, DEMCHENKO e KRIKENT, 2010):

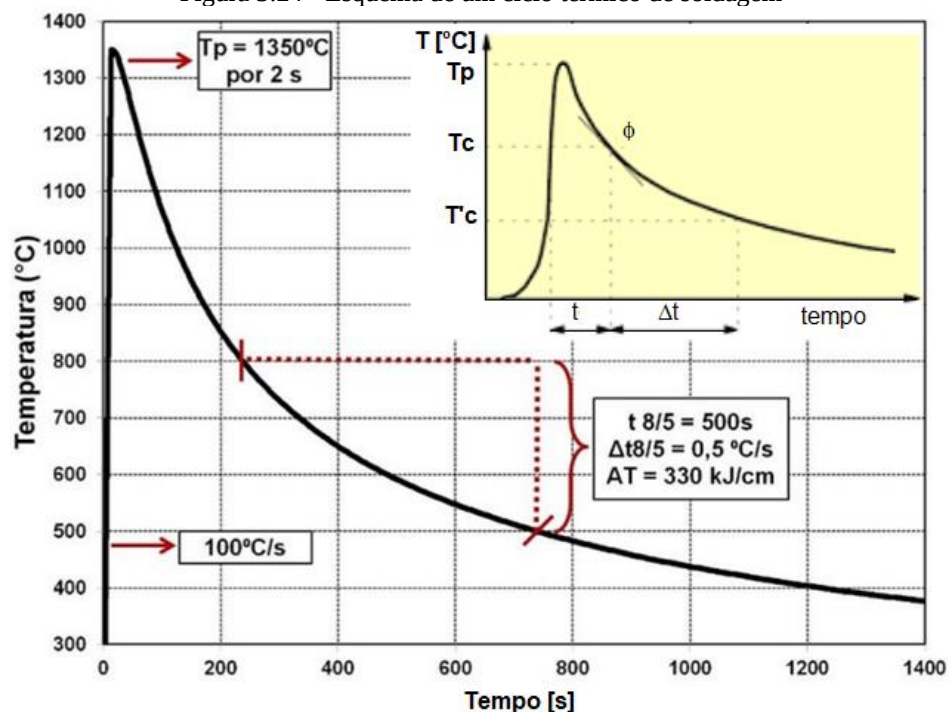
Figura 3.23 - Diagrama CCT do aço microligado ao Nióbio e curvas de resfriamento



Fonte: (BUBLÍKOVÁ, JIRKOVÁ, *et al.*, 2020).

Por conseguinte, o ciclo térmico de soldagem registra a variação de temperatura em qualquer ponto da chapa dobrada, existindo um ciclo térmico particular, dependente do seu posicionamento em relação à solda, o qual determina a temperatura de pico ( $T_p$ ), o tempo ( $t$ ), a temperatura crítica ( $T_c$ ) e a velocidade de resfriamento ( $\phi$ ). Tais parâmetros balizadores do ciclo térmico são apresentados na Figura 3.24 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011):

Figura 3.24 - Esquema de um ciclo térmico de soldagem



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

A temperatura de pico e a taxa de resfriamento dependem de alguns fatores, como as condições de soldagem, a geometria da peça, as propriedades térmicas dos elementos a serem soldados, a temperatura inicial e a distância da linha de deslocamento da fonte de calor (BOUCHERIT, ABDI, *et al.*, 2020).

#### 3.5.4 *Repartição térmica*

A repartição térmica tem a peculiaridade da acentuada distribuição térmica, partindo do interior do cordão de solda, atravessando todo o perfil metálico e passando pela zona afetada pelo calor equidistante, de ponto a outro.

A temperatura de pico referencia a viabilidade do pré-aquecimento no metal de base, pois a área de curva será proporcional ao calor aplicado e o seu condicionamento para realizar a soldagem, sendo adicionada à temperatura de pico (MACHADO, 2000).

Assim, as temperaturas podem ser observadas na distribuição de calor que flui na junta soldada, representada pela maior temperatura atingida ao longo da seção transversal pelo efeito do resfriamento e demais comportamentos físicos no cordão de solda à medida que se distancia (COURAS, 2021).

#### 3.5.5 *Aporte térmico*

As temperaturas às quais a junta soldada é submetida, durante o processo de soldagem, variam com a energia de soldagem aplicada sobre uma pequena área, e esse aporte térmico pode ser expresso pela equação (3.6), exposta a seguir. Concomitantemente, o rendimento médio do arco, portanto, pode ser considerado  $\eta_{\text{médio}} = 0,78$  para o processo GMAW (MISHCHENKO e SCOTTI, 2020), que pode ser verificado posteriormente pelos parâmetros de soldagem experimentais, observando-se o processo robotizado. Com isso, esse rendimento sobe, porém, nunca será conservado como o ideal de 100%, mas, apesar dos respingos, que é um dos principais fatores da eficiência, é possível admitir como critério,  $\eta_{\text{médio}} = 0,9$ .

$$E_s = \eta \cdot \frac{60 \cdot U \cdot I}{v} \quad (3.6)$$

Onde:

- $E_s$  se refere à energia disponível de soldagem [ $\text{J.m}^{-1}$ ];
- $\eta$  é o rendimento do arco ou eficiência do processo de soldagem;
- $U$  é a tensão média de soldagem [V];

- $I$  é a corrente média de soldagem [A] e
- $v$  se trata da velocidade de soldagem [m / min].

O aporte térmico é a energia de soldagem, que modifica a estrutura molecular do aço, interferindo nas propriedades mecânicas do cordão de solda, tornando a região frágil a tração (ASTM INTERNATIONAL, 2011).

A DBCP, a qual contempla o *stick-out*<sup>3</sup> adicionado ao comprimento do arco na soldagem pelo processo MIG/MAG, pode alterar a corrente média, o aporte térmico e a frequência de transferência metálica no modo por curto-circuito. Essa variação influi na altura de arco, interferindo no consumo e na corrente, porque, quando o *stick-out* aumenta, a resistência elétrica também aumenta. Assim, para continuar a fundir o arame-eletrodo com a mesma taxa de alimentação, é necessária uma corrente mais baixa (GUILHERME, BENEDETTI, *et al.*, 2020).

Dessa forma, o desempenho do processo GMAW-MAG pode ser prescrito pelo rendimento ( $\eta$ ), quando se mede pelo calorímetro o aporte térmico à peça de trabalho ou pela relação da energia interna do sistema pela realizada (PEREIRA e FRAGA, 2020), uma vez que, no processo de soldagem, parte da potência elétrica gerada funde o metal de solda, sendo o restante dissipado entre o metal-base e o ambiente.

O mesmo mecanismo de transferência de calor internamente, na coluna do arco envolvido pelo gás de proteção direcionado ao metal de base, que ocorre por convecção, é responsável pela formação do cordão, sua molhabilidade, a tensão superficial e características metalúrgicas do cordão de solda (IET - POWER AND ENERGY SERIES 4.0, 2007).

Há influência dos gases com baixo potencial de ionização, como o argônio, os quais conduzem a corrente elétrica com pouca resistência ao transporte de elétrons, requerendo baixas tensões elétricas para um arco estável, com menor aporte energético, no processo de soldagem. A penetração também depende da transferência metálica. Ao contrário de certos gases, como He e CO<sub>2</sub>, resistem à condução de elétrons, requerendo maior tensão e calor no arco, sobreaquecendo o material a ser unido e justificando a largura do cordão de solda (SEQUEIRA, 2019).

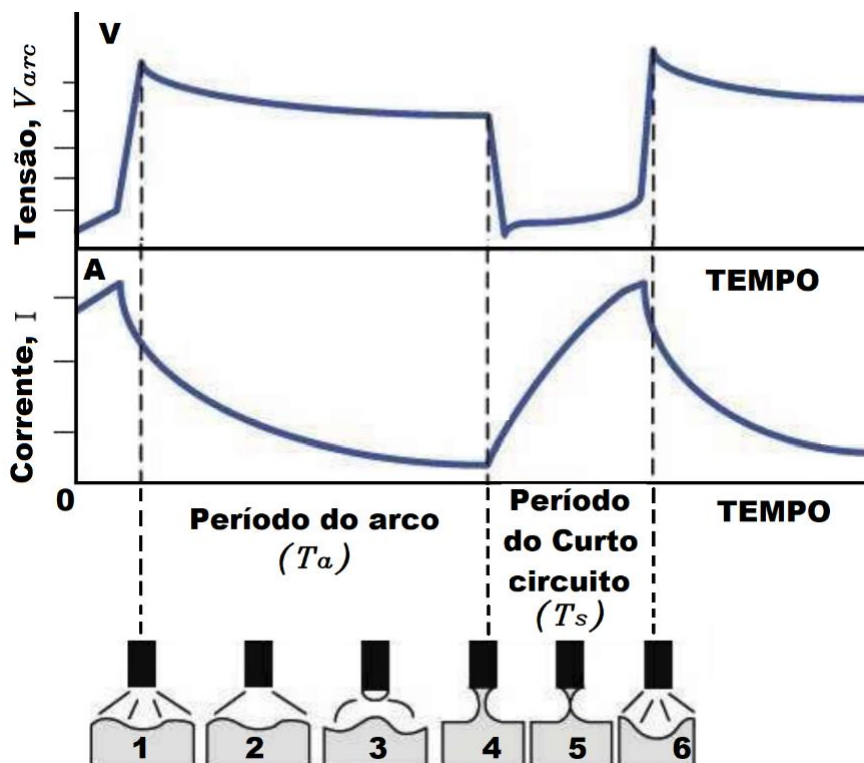
No modo por curto-circuito, desenvolve-se uma poça de fusão diminuta, na ação da energia térmica com descontinuidade da tensão, devido aos distintos momentos nos quais o arame toca a poça de fusão; logo, o metal é transferido, principalmente, devido à tensão superficial do metal líquido. Dessa maneira, o arco é reaberto e o arame-eletrodo, com velocidade de alimentação constante, consegue fundir-se pelo calor absorvido do arco (X., HU,

---

<sup>3</sup> *stick-out*, é a distância livre da ponta do bico de contato.

*et al.*, 2004). Eventualmente, o arco é extinto por outro curto, que recomeça outro ciclo e, como o metal não é transferido, durante o arco aberto, isso ocorre somente no curto-circuito mostrado na Figura 3.25 (MOTA, MACHADO, *et al.*, 2014).

Figura 3.25 - Corrente x tensão elétrica típico do ciclo por curto-circuito



Fonte: (BERA, 2018).

### 3.5.6 Fluxo de calor na soldagem

O fluxo de calor, enquanto parte de toda conjuntura do sistema termodinâmico que proporciona a realização da fusão dos materiais e como uma fonte de aquecimento, no balanço de energia, proveniente do arame-eletrodo sólido, é baseado em quatro parcelas: aquecimento anódico, catódico, por resistência elétrica e radiação (ILMAN, KUSMONO, *et al.*, 2022).

No aquecimento anódico, o calor é gerado principalmente pelo choque de elétrons no anodo e pela energia de “condensação” dos elétrons.

Já no aquecimento catódico, ocorre na existência de reações que liberam energia, como o choque dos íons positivos no cátodo e a neutralização desses íons, na superfície do cátodo.

No caso do aquecimento por resistência elétrica, a liberação de energia é desenvolvida pelo efeito Joule (XU, HUA, *et al.*, 2022).

E o aquecimento por radiação é gerado pelo arco ou pela poça de fusão, mas desprezado frente à proeminência dos outros tipos de aquecimento (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Ainda que o processo de soldagem por fusão ocorra com a inserção do fluxo de calor provindo da fonte energética concentrada num pequeno volume, esse calor expressivo causa efeitos, em regiões de pequenas extensões, as quais se superaquecem, onde um ponto pode ter uma temperatura mais alta e sucessivamente outros terem temperaturas mais baixas, surgindo um gradiente que descreve a distribuição térmica não linear com o tempo. Assim, as áreas aquecidas se dilatam, ficando restringidas pelas áreas adjacentes em temperaturas mais baixas, gerando deformações elásticas e plásticas não uniformes pela peça, causando as tensões residuais permanentes, após o resfriamento total, até atingir a temperatura-ambiente (NATAGO GUIL', 2022).

Durante o processo de soldagem, enquanto as áreas são aquecidas, por condução, as temperaturas concorrem entre si, evidenciando o resfriamento, por convecção. Nessa flutuação térmica, enquanto acontece a soldagem, as tensões residuais aleatoriamente instáveis da mesma forma complexa, oriundas das deformações plásticas, também são instáveis, devido às espontâneas contrações e expansões volumétricas no estado sólido, as quais são imobilizadas pelas regiões adjacentes suficientemente distantes desses efeitos. Devido aos diferenciais de temperatura pontuais, durante o resfriamento do material soldado, são os instantes em que ocorrem as transformações microestruturais da austenita (RIOS, PAYÃO FILHO, *et al.*, 2022).

A Tabela 3.6 aponta as parcelas, indicando como participam, no balanço térmico, quanto ao fluxo de calor fornecido e à transferência, através do material soldado (MODENESI, 2007).

Tabela 3.6 - Distribuição térmica na soldagem por fusão

| <b>Entrada de calor</b>      | <b>Valor %</b> |
|------------------------------|----------------|
| Arco elétrico                | 100            |
| Reações exotérmicas          | 6              |
| <b>Saída de calor</b>        | <b>Valor %</b> |
| Perdas no arco e no eletrodo | 20             |
| Condução através da peça     | 78             |
| Perdas na superfície da peça | 2              |

Valores de energia dispostos em função da energia gerada no arco (100%).

Fonte: Adaptado de MODENESI (2007).

A expressão do balanço de energia relacionado à condução do calor através do perfil estrutural metálico transferido, no domínio do tempo  $t$  referente ao sistema cartesiano tri axial  $(x,y,z)$ , em função da temperatura, é representada pela equação 3.7 (FREGNI, 2019):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_0 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

Onde:

- $T(x, y, z)$  se trata da temperatura em [°C] em seu posicionamento tridimensional;
- $x, y, z$  são as coordenadas cartesianas tri-ortogonais em [m];
- $t$  é o tempo, propriamente dito em [s];
- $\lambda_T$  são as condutibilidades térmicas do material dependente da temperatura em [W. m<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>], na sua respectiva direção global;
- $\rho$  é densidade do material<sup>4</sup> em [kg. m<sup>-3</sup>];
- $c$  é o calor específico do material em [J. kg<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>] e
- $q_0$  é a fonte de calor em [W. m<sup>-3</sup>].

Nessa equação, nota-se a dissipação da temperatura por condução radial pelo material, causado pelo aporte térmico da fonte de soldagem, e esse fenômeno de causa e efeito é resultado da energia do sistema pelo tempo que atua até o equilíbrio térmico, dependendo das propriedades do material.

Na soldagem, é de senso comum a inexistência de fontes no interior do perfil metálico, considerando a condutividade térmica constante,  $\lambda_T = \lambda$  como na equação 3.8. Contudo, com o intuito de reduzir as pequenas diferenças de alguns pesquisadores do Japão, Nishio conseguiu realizar a análise com a variação de  $\lambda$  em função dos níveis de temperatura a que o metal se expõe (NISHIO; IWASAKI *et al.*, 2015), aprimorando os resultados. Simplificando com  $\lambda_T = \lambda$ , obtém-se a difusividade térmica do aço com a equação 3.9, tomando  $k = \lambda \cdot \rho^{-1} \cdot c^{-1}$ :

$$\lambda \left( \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.9)$$

Onde:

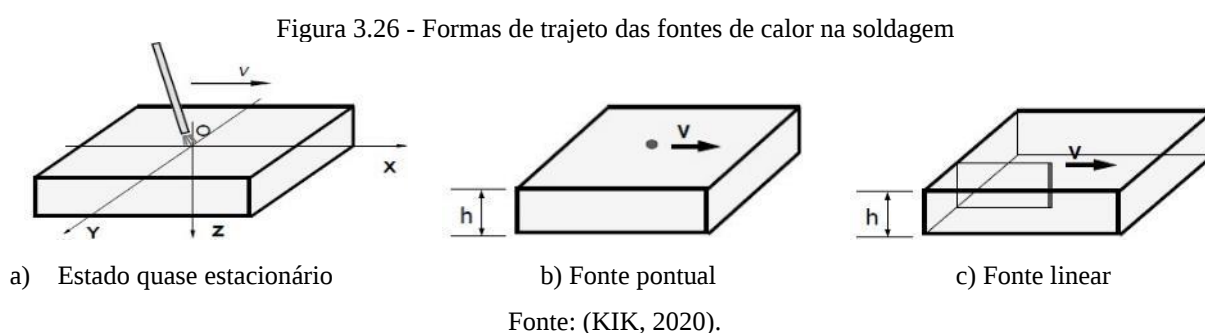
- $\delta$  é a difusividade térmica do aço em [m<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>] com as demais variáveis já citadas anteriormente.

Logo, na modelagem numérica de  $\lambda_T$ , é conveniente relacionar com a temperatura e suas coordenadas ( $x, y, z$ ).

---

<sup>4</sup> A densidade do aço em específico, é referido na temperatura ambiente em torno de 20 °C, contudo existe a variação mediante ao estado físico.

Pela complexidade de alcançar um resultado fiel, os estudos de Rosenthal (ROSENTHAL, 1946) usaram um artifício para estabelecer o estado “quase estacionário”, aplicando a lei de Fourier, onde o termo independente do tempo assume o argumento intrínseco do sistema de coordenadas que se movimenta em conjunto com a fonte de calor a uma certa velocidade. Esse referencial de coordenadas é definido pela física clássica como sendo o estado em que ocorre, após um tempo muito extenso, considerando-o infinito. Nas situações reais, a suposição pode ser assumida em soldas curtas, com velocidade constante, sem tecimento, nas quais os instantes inicial e final constituem a temperatura correspondente à energia imposta pelo arco elétrico que aumenta com abertura dele e, ao final, após a sua extinção. A Figura 3.26 focaliza as formas nas quais se pode dar essa transição da fonte de calor de soldagem, podendo ser pontual, como em chapas grossas, através da deposição de um cordão de solda superficial, mas linear, quando ocorrer soldagem de penetração total para chapa fina (KIK, 2020):



### 3.5.7 Condução de calor em chapas de aço

A condução pode ser tratada como a principal forma de transporte de calor, no aço, fornecendo uma equação de transferência básica de Fourier, a qual flui por três eixos, considerando uma fonte móvel de calor sobre a chapa metálica no regime “quase estacionário”, caracterizado pela distribuição térmica com valor constante; abaixo, a equação 3.10 mostra a relação da coordenada “x” com a coordenada móvel “w” (MENDEZ, 2020):

$$w = x - vt \quad (3.10)$$

Onde:

- w é a coordenada móvel da tocha de soldagem em [m],
- x é a sua posição inicial de soldagem na chapa correspondente ao tempo em [m],
- v é a velocidade de soldagem em [m. s<sup>-1</sup>] e
- t se trata do tempo em [s].

Reajustando a Equação 3.10 e inserindo a coordenada móvel de soldagem “w” em função do tempo t, obtém-se a Equação 3.11 para o regime quase estacionário:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial w} \quad (3.11)$$

Assim, com as coordenadas móveis estabelecidas e usando-as para solução das equações diferenciais, determinam-se as temperaturas, com a equação 3.12 como solução para o problema de chapa grossa (PRABANDAPU e SOMAYAJULU, 2020):

$$T = T_0 + \frac{P}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot e^{-\delta w} \left[ \frac{e^{-\delta}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\delta R'_n}}{R'_n} + \frac{e^{-\delta R_n}}{R_n} \right) \right]; \text{ com } \delta = \frac{v}{2k} \quad (3.12)$$

Onde:

- $T_0$  refere-se à temperatura referencial na chapa em [°C];
- $P$  é a quantidade total de energia disponível na fonte de calor em [W]; no caso do arame-eletrodo, seria a grandeza expressa pela energia total, sendo  $P = U \cdot I$ ;
- $U$  é a tensão do arco elétrico em [V],
- $I$  é a corrente média de soldagem em [A],
- $\lambda$  é a condutibilidade térmica do aço em [J. s - 1. m - 1. °C - 1]
- $\delta$  é a difusividade térmica unitária distribuída pelo perfil metálico em [m<sup>-1</sup>]
- $k$  é a difusividade térmica do aço em [m<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>]
- $R$  é uma referência pontual da transferência de calor do centro da poça de fusão em [m]:

$$R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2} \quad (3.13)$$

- $R_n$  é o ponto à frente da poça de fusão em [m];

$$R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh - z)^2} \quad (3.14)$$

- $R'_n$  é o ponto atrás da poça de fusão em [m];

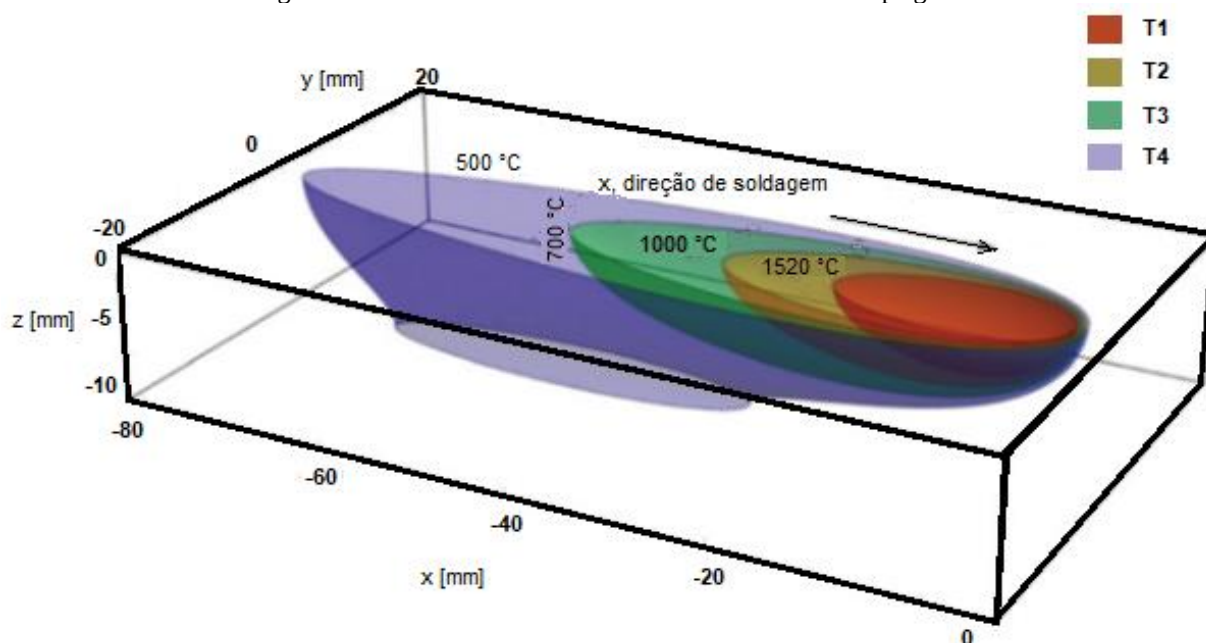
$$R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh + z)^2} \quad (3.15)$$

- $nh$  relaciona a componente de posição no eixo  $z$ , a partir da fonte de calor na chapa [m].

É importante ressaltar que a classificação de espessuras, para uma chapa fina ou chapa grossa, não é a mesma definição dada pelas normas (NBR-6658, 1994) , como (NBR-5915, 2003), (NBR-11888, 2008), (NBR-5903, 2015), (NBR-ISO-7438, 2022) e (NBR-6215, 2011), devido à inconsistência matemática, mas Rosenthal propôs duas condições para isso, sendo recomendado verificar os limites de transição, para serem mais bem interpretadas as duas formas.

A Figura 3.27 ilustra o desenvolvimento das isothermas distribuídas tridimensionalmente, dispondo as temperaturas na espessura da chapa grossa (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992):

Figura 3.27 - Fluxo de calor e as curvas isotérmicas na chapa grossa



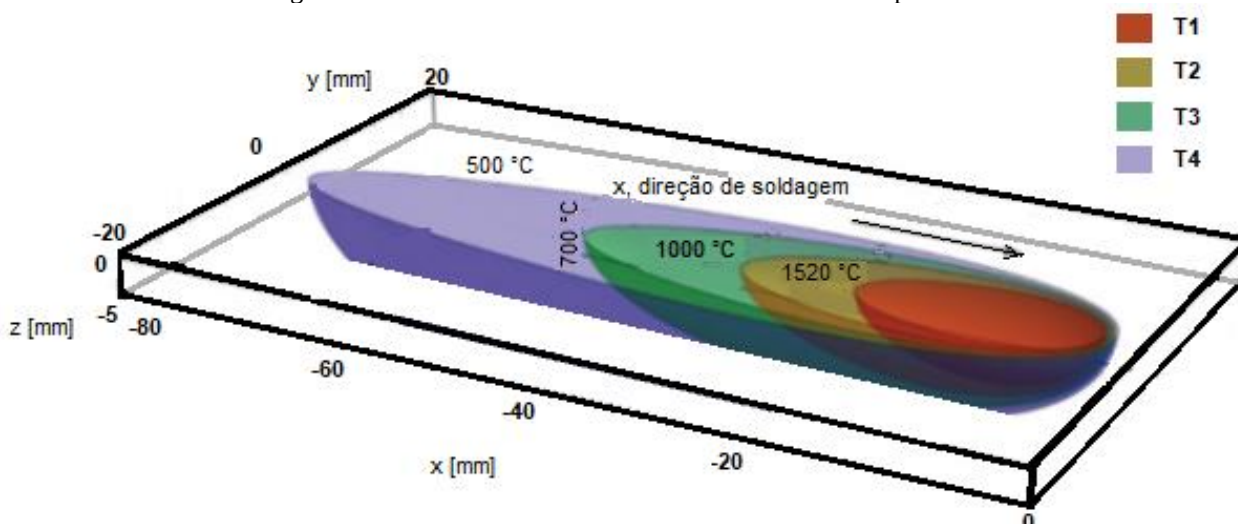
Sendo  $T1 > T2 > T3 > T4$ .

Fonte: Adaptado de (MDPI, 2020).

No caso em que se tem um perfil estrutural monossimétrico, formado por chapa dobrada a frio com fina espessura, é recomendada uma fonte de energia que leve em conta o regime quase estacionário, com velocidade  $v$  e admitindo a espessura finita com a direção de soldagem paralela ao eixo  $x$  (MIRKOOHI, SIEVERS, *et al.*, 2020).

O método consensual para chapas finas, com a coordenada do tipo móvel, de acordo com a equação 3.11, sem processamento de fluxo de calor na direção da espessura da chapa, que é ignorado, por ser insensível à diferença finita, simplifica o sistema para um fluxo bidirecional com a fonte de calor tipo linear, conforme ilustra a Figura 3.28:

Figura 3.28 - Fluxo de calor e as curvas isotérmicas na chapa fina



Sendo  $T1 > T2 > T3 > T4$ .

Fonte: Adaptado de MDPI (2020).

Logo, no caso de chapa fina em que o perfil metálico dobrado é confeccionado, considerando-se a condução de calor em duas dimensões, x e y, e admitindo-se a fonte de calor a forma linear e constantes as propriedades básicas termofísicas (C., M. e GURGEL, 2008), a Equação 3.11 pode ser reescrita para a Equação 3.16:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{v}{k} \frac{\partial T}{\partial w} \quad (3.16)$$

E a solução geral assume a expressão na Equação 3.17:

$$T = T_0 + \frac{P}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} e^{-\delta} \cdot K_0^{\delta r} \quad (3.17)$$

Onde:

- P é a energia total na fonte de calor linear, para manter o arco elétrico em [J. s<sup>-1</sup>. m<sup>-1</sup>];
- λ é a condutividade térmica da chapa metálica em [W. m<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>];
- δ é a difusividade térmica no perfil metálico em [m<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>];
- T<sub>0</sub> é a temperatura de referência a que o perfil está exposto em [°C].
- r é a distância do centro da poça de fusão ao calor de propagação no instante t em [m] e

$$r = (w^2 + y^2)^{0,5} \quad (3.18)$$

- K<sub>0</sub><sup>ar</sup> é a função de Bessel modificada, segundo espécie e de ordem zero.

Por analogia, o mesmo procedimento matemático pode ser adotado para o caso da chapa de espessura intermediária, como a espessura finita **h**, podendo ser tomada a mesma solução que para a espessura infinita. Assim, com o modelo de fluxo de calor das fontes de calor, equidistantes com cota de **2nh** e **n** variando de -∞ a ∞, dispostas simetricamente, obtém-se a solução para esse tipo de problema, com R<sub>k</sub> = [x<sup>2</sup> + y<sup>2</sup> + (z - 2nh)<sup>2</sup>]<sup>0,5</sup> (ROSENTHAL, 1941).

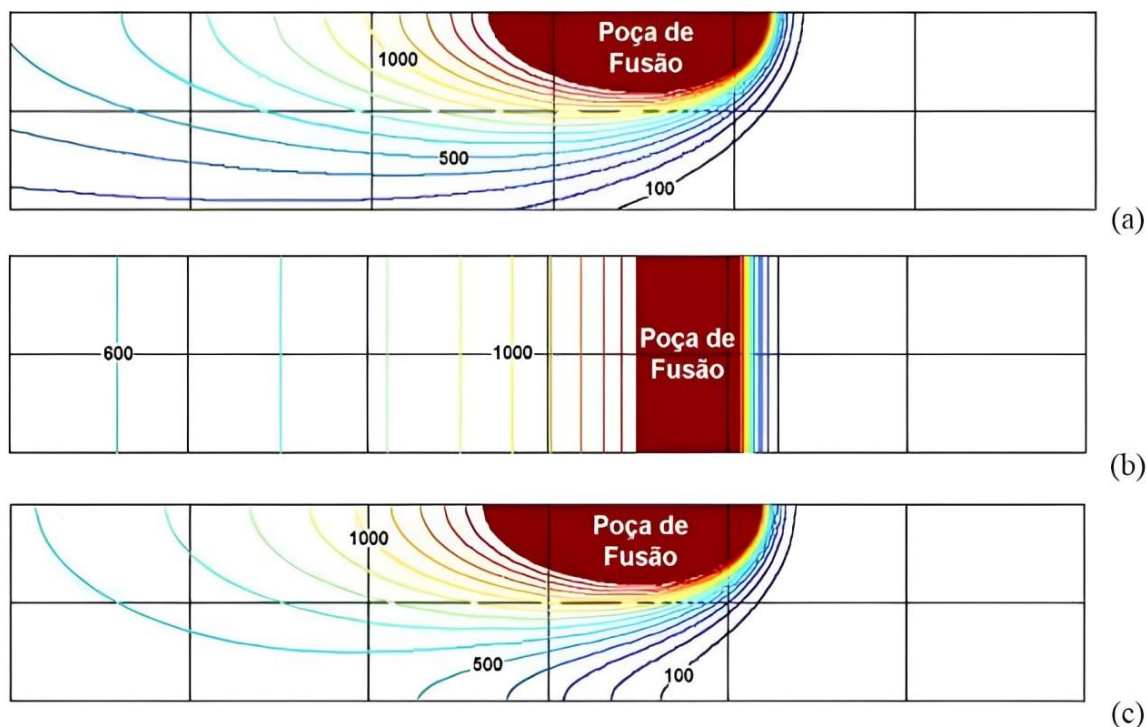
Atentando ao tempo necessário para que a condução de calor, na chapa fina de aço, atinja o regime quase estacionário, durante a soldagem no processo MAG, sendo R' a distância até a fonte de calor que propaga no instante t, a constante de tempo será dada pela equação 3.19:

$$t = \frac{R'^2 \rho_c}{6k} \quad (3.19)$$

Rosenthal (1941) conseguiu estabelecer, também, os resultados da pesquisa sobre as fontes pontuais de calor ao redor da poça de fusão e no plano xz e sua respectiva propagação de calor, os quais podem ser visualizados na Figura 3.29. Nessa solução bidimensional, na

chapa fina disposta na Figura 3.29, têm-se as isothermas verticalizadas, por ser ignorada a variável  $z$ .

Figura 3.29 - Distribuição térmica em torno da poça de fusão, na espessura da chapa



Conforme os três modelos matemáticos de Rosenthal: a) Chapa grossa, b) chapa fina e c) chapa intermediária.  
 Fonte: ROSENTHAL (1946).

Esses resultados semelhantes ocorrem nas fontes pontuais de calor para chapas grossa e intermediária, nas regiões próximas da superfície superior da chapa e da fonte de calor.

### 3.6 MODELOS MATEMÁTICOS DE FONTES DE CALOR NA SOLDAGEM

O arco elétrico, que é uma descarga elétrica, é a fundamental fonte de calor no processo de soldagem, mantida por um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do cátodo aquecido e conservado pela ionização térmica do gás aquecido. Esse fluxo ionizado de pequenas dimensões, atuando também numa pequena área do metal-base, tem alta intensidade, que leva à temperatura de fusão e, para isso, três fatores são essenciais: ionização, calor e emissão. A ionização se trata da energia necessária à produção de potencial de ionização térmica; o calor é devido à movimentação de cargas elétricas. No processo MIG/MAG a emissão de elétrons acontece por campos. (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Logo, simular o processo de soldagem envolve iterações dos campos térmico, mecânico e metalúrgico. Ademais, outros envolventes secundários são: a integração do material de adição, o movimento da fonte de calor, o comportamento em alta temperatura da peça na região fundida, com bruscas variações térmicas em seu contorno, o que torna a discretização do modelo

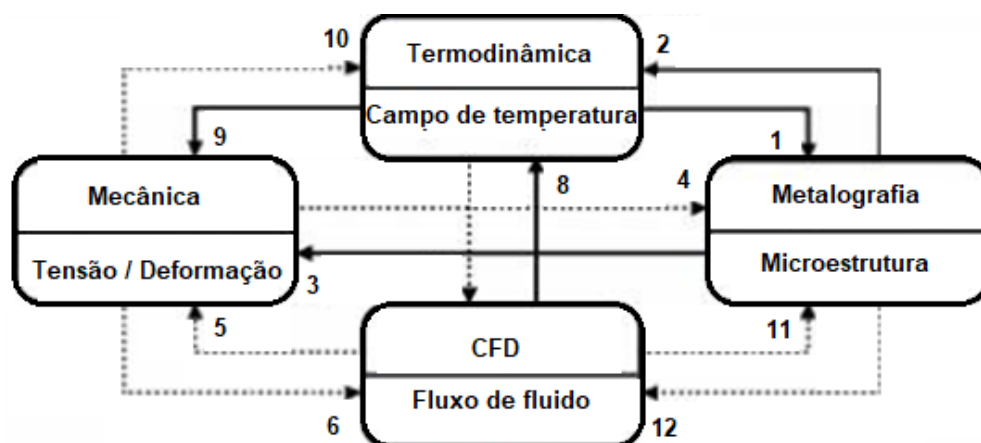
de soldagem, através do método dos elementos com volume finito, mais complexa. Alguns *softwares* de elementos finitos, com o intuito de simplificar todo o processo matemático para soldagem, estão disponíveis atualmente, como ANSYS®, SYSWELD®, SIMUFACT WELD e COMSOL®, capazes de ser empregados para carregamento desse tipo de simulação. Há vários modelos contemporâneos, como o de Anca, que conseguiu representar a física do arco, o fenômeno de poça de fusão, as deformações elastoplásticas e a condução de calor de boa precisão (ANCA, CARDONA, *et al.*, 2010).

Segundo Chen (2020), o fenômeno do fluxo de fluido é desconsiderado, uma vez que o gás não tem a intenção de prever as geometrias da poça de fusão, quando essas possíveis geometrias podem ser utilizadas nos parâmetros de entrada. Assim, o modelo é mais confiável fora da região da poça de fusão do que em seu interior (CHEN, 2020).

Durante o processo de soldagem, o campo térmico promove a força motriz para as alterações mecânica, estrutural e comportamental do material envolvido. As influências mútuas, sejam fortes ou fracas quanto à iteratividade nas simulações com os efeitos mecânicos da soldagem, exigem o cálculo para os campos térmicos e mecânicos. O comportamento do material, devido à mudança microestrutural, depende da temperatura e do histórico das deformações. O campo de deformação tem certa influência nas transformações microestruturais, pois estas não dependem exclusivamente da composição química do aço, mas também são oriundas do histórico térmico de soldagem e do campo de tensão. É possível observar tal influência na microestrutura, principalmente na ZAC e na zona de fusão da solda (QURESHI, 2008).

A Figura 3.30 demonstra os diferentes campos que se envolvem mutuamente, no campo de temperatura, tensão, deformação, estado microestrutural, associados ao fluxo de fluido na soldagem (LIU, PALAZOTTO, *et al.*, 2019):

Figura 3.30 - Fluxograma dos diferentes campos e suas interações na simulação de soldagem



Fonte: LIU; PALAZOTTO *et al.* (2019).

Fenômenos detalhados na poça de fusão podem ser levados em conta em estudo isolado, no nível de refinamento, e a modelagem do fluxo de calor será primária, quando esse estudo tem foco nas mudanças das geometrias próximas da região. Durante a análise térmica, a evolução microestrutural pode ser modelada pelos procedimentos de cálculo, mediante método comum de incorporação indireta dos aspectos físicos do material modelado (SOUZA, RESENDE e SCOTTI, 2009).

Diante da ocorrência do fenômeno da soldagem, a Tabela 3.7 traz, resumidamente, as possíveis combinações entre campos distintos da física e sua interatividade no processo:

Tabela 3.7 - Interação entre diferentes campos físicos

| <b>Acoplamento</b> | <b>Descrição do Acoplamento</b>                                                                                | <b>Natureza</b> |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1                  | O fluxo de fluido produz uma transferência de calor significativa                                              | Forte           |
| 2                  | Devido à variação de temperatura, são produzidas deformações                                                   | Forte           |
| 3                  | Os efeitos das temperaturas causam tensões internas                                                            | Forte           |
| 4                  | O calor é gerado devido à deformação mecânica do tipo elasticidade, plasticidade ou taxa de deformação térmica | Fraco           |
| 5                  | A expansão térmica depende da microestrutura                                                                   | Forte           |
| 6                  | Reação do material elastoplástico depende da microestrutura                                                    | Forte           |
| 7                  | Mudança de fase resulta em deformação plástica associada                                                       | Forte           |
| 8                  | Microestrutura afeta a condutividade térmica                                                                   | Médio           |
| 9                  | O calor latente é liberado, durante a transformação de fase                                                    | Médio           |
| 10                 | A velocidade do fluido é afetada pela temperatura                                                              | Fraco           |
| 11                 | Microestrutura depende da temperatura                                                                          | Forte           |
| 12                 | Mudanças de fase são afetadas pelo estado de tensão                                                            | Fraco           |
| 13                 | A pressão do fluido produz deformação                                                                          | Fraco           |
| 14                 | Microestrutura do material é alterada pelo padrão de escoamento                                                | Fraco           |
| 15                 | A microestrutura do material é afetada pelo padrão do fluxo                                                    | Fraco           |
| 16                 | Padrões de fluxo são afetados por deformações estruturais                                                      | Fraco           |

Vinculações dentre diferentes campos e o grau de interação entre eles, quando da realização do processo de soldagem ao arco elétrico.

Fonte: (PAN, SHEN, *et al.*, 2020).

Também a distorção, que representa um conjunto de deformações, a tensão residual e a redução do limite de resistência na junta soldada e suas regiões vizinhas são sensíveis à ação térmica que requer atenção na modelagem relacionada à soldagem. Nesse contexto, o modelo eficiente na simulação da soldagem concentra-se nos campos de calor, por causa do efeito sobre a tensão, deformação e microestrutura (VERGA, 2020).

### 3.6.1 Modelo de Rosenthal

Como citado, nos campos de temperatura previstos pelos modelos de Rosenthal para a chapa grossa, fina e intermediária, no plano  $xz$  e em torno da poça de fusão com a solução bidimensional para chapa fina, as isotermas são verticais, pois a variável  $z$  é desconsiderada. Nesse sentido, os resultados usam a fonte pontual de calor análogo ao da chapa grossa e intermediária na superfície superior da chapa (MUNRO, AYAS, *et al.*, 2019).

Pelo MEF, permite-se levar em consideração a dependência das propriedades termofísicas do material, como condutividade térmica, calor específico, densidade e outras de interesse, em função da temperatura, tendo em vista as trocas de calor com o meio, por convecção e radiação. Todavia, uma análise tridimensional transiente necessita de tempo para realização dos cálculos e, com isso, recursos de informática relativamente sofisticados (PITTNER, 2012).

Ao se efetuar a simulação de soldagem MAG por elementos finitos, deve-se atender aos parâmetros de soldagem com a formação da malha apropriada no modelo, assim como muitos pesquisadores que, em função dos fortes gradientes de temperatura, perceberam a necessidade de refinar o elemento finito ao redor do cordão de solda, como fez a equipe de Peng Xuan, de forma eficiente, obtendo resultados equivalentes ao acontecimento real (PENG, XU, *et al.*, 2020).

Quando não se tem fluxo térmico<sup>5</sup>, não há transformações, segundo se observa na Tabela 3.8:

Tabela 3.8 - Situações conhecidas no processo de soldagem

|            | <b>MB</b>    |                         | <b>ZAC</b>           | <b>MS</b>  | <b>Poça de fusão</b> |
|------------|--------------|-------------------------|----------------------|------------|----------------------|
| $t$        | 0            |                         | $\infty$             |            | $t_f$                |
| $\Delta T$ | 0            |                         | 0                    |            | 0                    |
| $\Delta l$ | 0            | 0                       | $p(x,y)+/- \Delta l$ |            | 0                    |
| $\sigma_r$ | $\sigma_i+0$ | $\sigma_i+\Delta\sigma$ | $\sigma_i+\sigma_r$  | $\sigma_r$ | 0                    |

Onde  $\sigma_r$  é a tensão residual,  $\sigma_i$  é a tensão residual existente,  $\Delta\sigma$  é a diferença de tensão residual resultante do calor,  $\Delta l$  é o deformação devido ao calor transferido,  $p(x,y)$  ponto no plano cartesiano,  $\Delta T$  é a diferença de temperatura,  $t$  é o tempo e  $t_f$  é o tempo de fusão do metal.

Fonte: (MACHADO, 2000).

De maneira a entender a complexidade, é preciso dispor das condições de contorno, evidenciadas na Tabela 3.9:

<sup>5</sup> Inexistência do fluxo térmico, o material se encontra numa única temperatura, considerando-se, assim que está num estado como que saturado.

Tabela 3.9 - Condições iniciais e de contorno no processo de soldagem

| Descrição                  | Equação                                                                  | Grau       | Aplicação               |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------|
| Temperatura na superfície  | $T(t) = F(t)$                                                            | 1ª espécie | MB, ZAC e MS            |
| Fluxo de calor             | $\frac{dT}{dt} = 0 \quad \dot{q}_s(t) = F(t)$                            | 2ª espécie | MB, ZAC e MS            |
| Perda por radiação         | $\dot{q}_r = -\sigma\epsilon(T_s^4 - T_a^4)$                             | 3ª espécie | MB, ZAC e MS            |
| Perda por convecção        | $\dot{q}_c = -\frac{k_a}{\delta}(T_s - T_a) = -h_c(T_s - T_a)$           | 3ª espécie | MB, ZAC e MS            |
| Especial                   | $\dot{q}_e = \frac{k_1}{e}(T_i - T_e)$                                   | 3ª espécie | MB, ZAC e MS            |
| Combinação de coeficientes | $\dot{q}_c = -\frac{h}{k}(T_s - T_a)$                                    | 3ª espécie | Estado estacionário     |
|                            | $h = hc + hr$<br>$T_s = T_a \quad k_a \cdot \dot{q}_a = k \cdot \dot{q}$ | 4ª espécie | Estado não estacionário |

Fonte: (MACHADO, 2000).

A Figura 3.31 sintetiza a evolução analítica do processo de soldagem GMAW (ver Anexo C), desde a abertura do arco elétrico ao fim da execução do cordão de solda:

Figura 3.31 - Resumo das equações no campo de temperatura e sua aplicação na soldagem

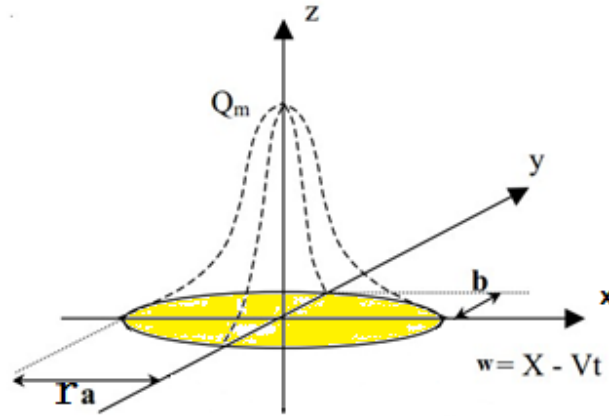
| Processo de soldagem GMAW                                                                                                            |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fontes térmicas                                                                                                                      |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| Instantâneas concentradas - FTIC                                                                                                     |                                                                                                                                                     | Contínuas concentradas - FTCC                                                                                                                                                                                                                                                                            | Movimento superficial - FTMS                                                             |                                                                                                                                                                             |
| Sólido infinito                                                                                                                      | Sólido semi-infinito                                                                                                                                | Sólido infinito                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Sólido semi-infinito                                                                     |                                                                                                                                                                             |
| Tipo Ponto                                                                                                                           |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| $T = \frac{Q}{8\rho c\sqrt{(\pi\alpha)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{R'^2}{4t\alpha}\right]$<br><br>$t_{(rmax)} = \frac{R'^2}{6\alpha}$ | $T = \frac{Q}{4\rho c\sqrt{(\pi\alpha)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{R^2}{4t\alpha}\right]$<br><br>$T_{(R=0)} = \frac{Q}{4\rho C\sqrt{\pi^3\alpha^3}}$ | $T = \frac{q}{4\pi k R'} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{R'}{2\sqrt{t\alpha}}\right)$                                                                                                                                                                                                               | $T = \frac{q}{8\rho c\sqrt{(\pi\alpha)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{R^2}{4t\alpha}\right]$ | $T = \frac{q}{2k\pi R} \cdot \exp\left[-\frac{v(R+\omega)}{2\alpha}\right]$                                                                                                 |
|                                                                                                                                      |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          | $T(x < 0) = \frac{q}{2\pi k R}$                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                      |                                                                                                                                                     | $T(t \rightarrow \infty) = \frac{q}{4\pi k R}$                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                          | $T(x > 0) = \frac{q}{2\pi k R} \cdot \exp\left(-\frac{vR}{\alpha}\right)$                                                                                                   |
|                                                                                                                                      |                                                                                                                                                     | $T(z > 0) = \frac{q}{2\pi g k} \cdot \exp\left(-\frac{vw}{2\alpha}\right) \cdot \left\{k_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_0\left[\frac{vr}{2\alpha} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \alpha^2 \pi^2 n^2}{v^2 g^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \cdot \cos\frac{n\pi z}{g}\right\}$ |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| Tipo linha                                                                                                                           |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| $T = \frac{Q_l}{4\pi k t} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{4t\alpha}\right]$                                                              | $T = \frac{Q_l}{4\pi g k t} \cdot \exp\left[-bt - \frac{r^2}{4t\alpha}\right]$                                                                      | $T = \frac{q_l}{4\pi k} \cdot Ei\left(-\frac{r^2}{2t\alpha}\right)$                                                                                                                                                                                                                                      | $T = \frac{q_l}{4\pi k t} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{4t\alpha}\right]$                  | $T = \frac{q_l}{2\pi g k} \cdot \exp\left(-\frac{vw}{2\alpha}\right) \cdot k_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \left[\frac{r(v^2 + 4b\alpha)^{\frac{1}{2}}}{2\alpha}\right]$ |
|                                                                                                                                      | $T_{(r=0)} = \frac{Q_l}{4\pi g k t} \cdot \exp[-bt]$                                                                                                | $T = \frac{q_l}{4\pi k} \left(\ln\frac{4t\alpha}{r^2} - \gamma\right)$                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                          | $T_{(v=0,t=\infty)} = \frac{q_p}{2\pi g k} \cdot k_0\left(\frac{\sqrt{b\alpha}}{\alpha}\right)$                                                                             |
|                                                                                                                                      |                                                                                                                                                     | $T_{(\Delta T=0)} = \frac{q_l}{4\pi k} \left(\ln\frac{1}{r}\right)$                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| Tipo plano                                                                                                                           |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| $T = \frac{Q_p}{2\rho c A \sqrt{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4t\alpha}\right]$                                       | $T = \frac{Q_p}{2\rho c A \sqrt{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-bt - \frac{x^2}{4t\alpha}\right]$                                                      | $T = \frac{q_p}{\rho c} \left\{\sqrt{\frac{t}{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4t\alpha}\right] - \frac{ x-x' }{2\alpha} \cdot \operatorname{erfc}\frac{ x-x' }{2\sqrt{t\alpha}}\right\}$                                                                                                    |                                                                                          | $T = \frac{q_p}{4A\rho c\sqrt{v^2 + 4b\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{vw}{2\alpha} - \frac{ \omega  \cdot \sqrt{v^2 + 4b\alpha}}{2\alpha}\right]$                           |
|                                                                                                                                      | $T_{(x=0)} = \frac{Q_p}{2\rho c A \sqrt{\pi\alpha}} \cdot \exp[-bt]$                                                                                | $T_{(x=0,\Delta T=0)} = \frac{q_p}{\rho c} \left\{\sqrt{\frac{t}{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{4t\alpha}\right] - \frac{x}{2\alpha}\right\}$                                                                                                                                                   |                                                                                          |                                                                                                                                                                             |
| ABERTURA DO ARCO ELÉTRICO                                                                                                            |                                                                                                                                                     | PAUSA DO ARCO ELÉTRICO                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                          | TRAJETO DO ARCO ELÉTRICO                                                                                                                                                    |

Fonte: (MACHADO, 2000)

### 3.6.1.1 Fonte superficial de Gauss

Como cada condição de soldagem pode ter uma fonte modelada, a qual se enquadra melhor na pesquisa, essa fonte possui o formato de sino persistente no arco elétrico, assumindo a curva da modalidade gaussiana infinita com raio limite, focalizada na Figura 3.32, e geometria projetada na poça de fusão (KSHIRSAGAR, 2020):

Figura 3.32 - Modelo de fonte superficial de Gauss



Fonte: Adaptado de KSHIRSAGAR (2020).

A projeção incidente na superfície da peça recebe toda energia na pequena região de soldagem expressa na distribuição de Gauss, representada analiticamente pela Equação 3.20, onde  $r_a$  equivale ao raio do disco e recebe 95% da energia de soldagem (DE VRIES, 2004):

$$q(x, y) = \frac{3\eta UI}{\pi r_a^2} e^{\left[ \frac{-3(w^2 + y^2)}{r_a^2} \right]} \quad (3.20)$$

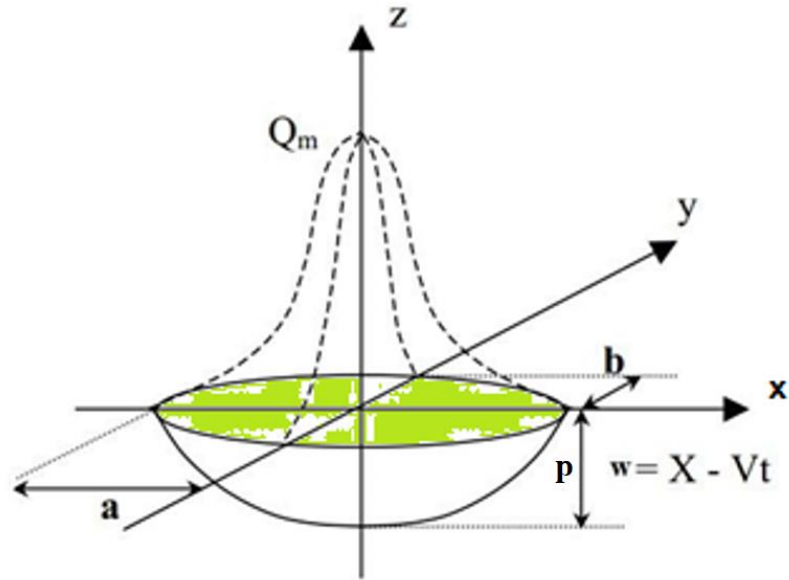
Onde:

- $x, y$  são coordenadas cartesianas bidimensionais em [m];
- $w$  se trata da coordenada móvel em relação a poça de fusão em [m];
- $\eta$  é a eficiência de soldagem;
- $U$  é a tensão elétrica para manter o arco elétrico em [V];
- $I$  é a corrente elétrica em [A] e as demais variáveis similares às citadas anteriormente.

### 3.6.1.2 Fonte volumétrica do tipo elipsoidal

Outro modelo usado por alguns pesquisadores está ilustrado na Figura 3.33, onde o fluxo volumétrico finito apresenta curva gaussiana tridimensional finita no molde elipsoidal de raios ( $a, b$  e  $c$ ), com densidade do fluxo, conforme se vê na Equação 3.21 (LINDGREN e MICHALERIS, 2011):

Figura 3.33 - Esquema de fonte elipsoidal



Fonte: CHEN (2014).

$$q(x, y, z) = \eta UI \frac{6\sqrt{3}}{3} \frac{1}{abp\pi^2} e^{\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^2}{p^2}\right)} \quad (3.21)$$

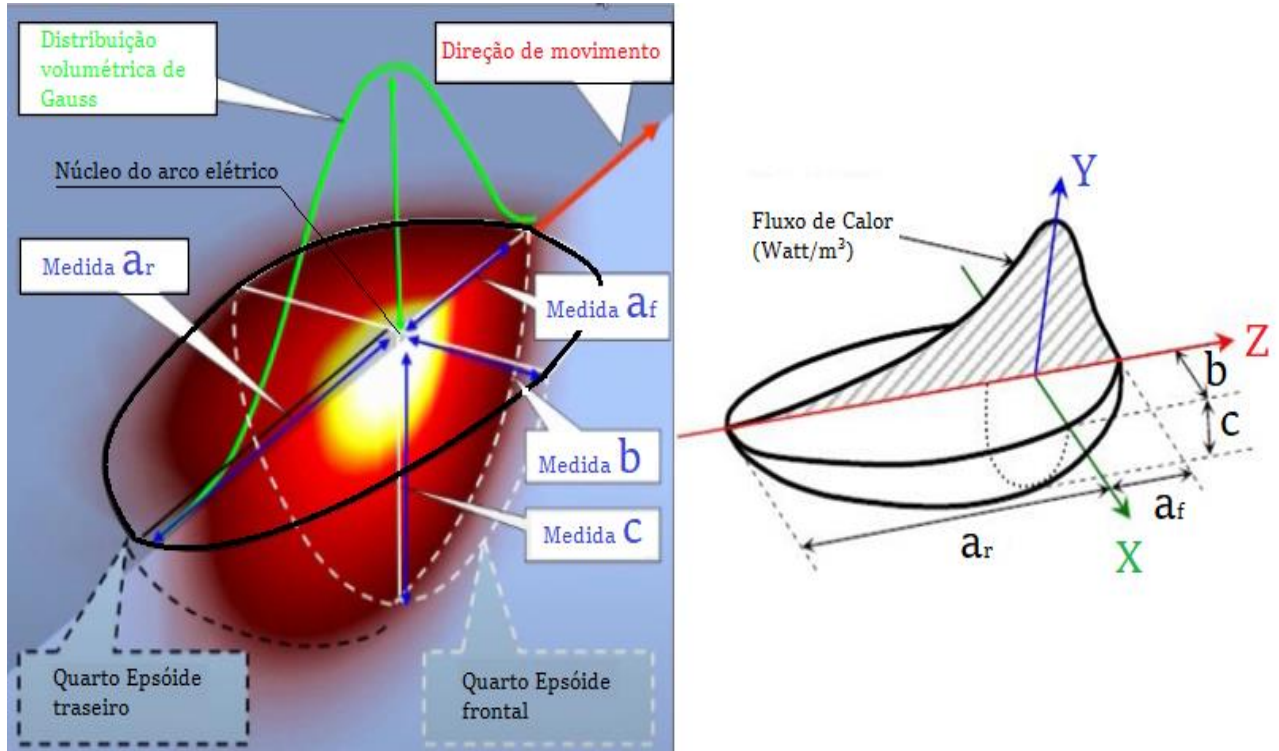
Onde:

- $Q_m$  é a energia média de soldagem;
- $q(x, y, z) \therefore q(w, y, z)$  é a transformação de coordenadas;
- $x, y, z$  são as coordenadas cartesianas em [m];
- $w$  é a coordenada móvel em [m];
- $\eta$  é a eficiência de soldagem;
- $U$  é a tensão elétrica em [V];
- $I$  é a corrente elétrica em [A];
- $a$  é o comprimento da poça de fusão em frente da projeção incidente da ponta do eletrodo na superfície da peça [m];
- $b$  é a semilargura da poça de fusão em [m];
- $p$  é a profundidade da zona fundida em [m].

### 3.6.1.3 Fonte volumétrica do tipo duplo elipsoidal

Esse modelo de fonte é a proposta para representar o calor de solda, com base em uma distribuição de densidade de potência de Gauss no espaço, com centro na origem e que se tornou o modelo mais utilizado, na atualidade. A precisão desse modelo se aproxima de tal forma que projeta o bulbo da poça de fusão experimental, conforme disposto na Figura 3.34 (GOLDAK, CHAKRAVARTI e BIBBY, 1983):

Figura 3.34 - Modelo de fonte de calor de soldagem de Goldak



Composta de dupla elipsoide: frontal e outra posterior relacionada ao movimento dela na direção Z com a forma da função gaussiana na distribuição de energia.

Fonte: Adaptado de (HEXAGON SIMUFACT-WELDING, 2022).

Essa fonte de calor, que possui a distribuição volumétrica de energia na parte da frente da tocha da dupla elipsoide, é dada pela equação 3.22, por  $P_f(x, y, z)$ , e, na parte de trás, pela equação 3.23, por  $P_r(x, y, z)$ :

$$P_f(x, y, z) = f_f \eta UI \frac{6\sqrt{3}}{a_f b c \pi^{\frac{3}{2}}} e^{\left(\frac{-3x^2}{a_f^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)} \quad (3.22)$$

$$P_r(x, y, z) = f_r \eta UI \frac{6\sqrt{3}}{a_r b c \pi^{\frac{3}{2}}} e^{\left(\frac{-3x^2}{a_r^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)} \quad (3.23)$$

Onde:

- $P_f$  se refere à distribuição volumétrica de energia em frente da tocha em  $[W \cdot m^{-3}]$ ;
- $P_r$  é a distribuição volumétrica de energia atrás da tocha em  $[W \cdot m^{-3}]$ ;
- $f_f$  é a repartição de energia em frente da tocha;
- $f_r$  é a repartição de energia atrás da tocha;
- $a_f$  é o comprimento da poça de fusão em frente da tocha em [m];
- $a_r$  é o comprimento da poça de fusão atrás da tocha em [m];
- $b$  é a semilargura da poça de fusão em [m];
- $c$  é a profundidade da zona fundida em [m].

Os fatores de fração  $f_f$  e  $f_r$  do calor depositado na frente e atrás, simultaneamente, da fonte são apresentados nas equações 3.24, 3.25 e 3.26, a seguir:

$$f_f + f_r = 2 \quad (3.24)$$

$$f_f = \frac{2a_f}{a_r + a_f} \quad (3.25)$$

$$f_r = \frac{2a_r}{a_f + a_r} \quad (3.26)$$

Os fatores  $a_f$ , e  $a_r$  são obtidos pelos parâmetros  $b$  e  $c$ , através das equações 3.27 e 3.28:

$$a_f = \frac{c}{2} \quad (3.27)$$

$$a_r = 2 \cdot c \quad (3.28)$$

Segundo Alves (2019), a distância em frente da fonte de calor deve ser igual à metade da largura da solda,  $a_f = b$ , e, por detrás da fonte, precisa ser duas vezes a largura,  $a_r = 4 \cdot b$  (ALVES, 2019) (FARIAS, 2020).

### 3.7 MODELAGEM DA AÇÃO DO MATERIAL DE ADIÇÃO

O caso da modelagem da ação do material de adição é a parte que pode ser suprimida pela ação direta da fonte sobre o metal, ainda que, nas soldagens por fusão a arco elétrico, seja o que acontece, mas eleva o trabalho de modelagem a um patamar bem mais complexo, por conta da representação da adição de metal, devido ao arame-eletrodo e, por consequência, à sua diluição na poça, por isso, os pesquisadores trabalham no foco desse modelo, separando em duas formas: o fluxo pelo consumível e o fluxo no cordão de solda. São exemplos os trabalhos de Yilbas, Singh, Mahmood, Cheloni e Haoxiang, os quais focaram o fluxo aplicado na chapa metálica (YILBAS, ARIF e ABDUL ALEEM, 2010) (SINGH, CHOWDHURY, *et al.*, 2021) (MAHMOOD, MIAN, *et al.*, 2007) (CHELONI, FONSECA, *et al.*, 2022) (HAOXIANG LANG, 2009).

Tal dificuldade se explica por não se conseguir prever a irregularidade da seção transversal, no percurso da soldagem, dadas a diversas variantes citadas desde o início do capítulo. Nessa perspectiva, o que é considerado no modelo é a coluna de plasma (PONOMAROV, 2014), não a deposição do metal incorporado ao metal de base, como sendo a seção transversal de menor dimensão encontrada para garantir a geometria do cordão, à medida que a tocha de soldagem se desloca, formando a solda e fixando a situação da tocha no

ponto de execução do processo. Dessa forma, o modelo é realizado, conduzindo ao resultado confiável na distribuição térmica (BAYRAKTAR e DEMIR, 2022).

De acordo com Ding, a prática são três técnicas computacionais que têm sido aplicadas à deposição do metal de adição no processo de soldagem: a do elemento desativado adaptada em soldagens multipasse; a do elemento em repouso, o qual raramente produz uma não convergência nas equações diferenciais; e a do elemento em movimento, capaz de promover um ganho computacional, quando comparado ao do elemento em repouso, pouco aplicado pelos pesquisadores (DING, 2012).

Apesar da agitação espontânea da poça de fusão, na técnica do elemento em repouso, todos os elementos, incluindo os de preenchimento do metal depositados posteriormente, são gerados desde o início da modelagem e não são realmente retirados do MEF, para alcançar os resultados da condutividade e das grandezas termofísicas. Nessa análise térmica, todos os nós desativados, com exceção dos relacionados ao metal-base, são disponibilizados na temperatura ambiente, enquanto os elementos são ativados sequencialmente, quando estão sob a influência da fonte de calor (ZIBEROV, TOKAR, *et al.*, 2015).

### 3.8 TERMOPAR E PIROMETRIA

Um meio de captar e registrar as diferentes temperaturas é a pirometria, na qual a temperatura é avaliada pela radiação infravermelha emitida da chapa metálica, dependendo do equipamento (DOUMANIDIS e KWAK, 2002).

O termopar, apesar de não conseguir captar o calor perdido por radiação e convecção, é a técnica de leitura direta da temperatura, através de sensores que geram as leituras de temperatura para um *software* com sistema Arduino, o qual permite o tratamento de dados com filtragens e podem ser interpretados com precisão (GUK, KIM, *et al.*, 2018).

Assim, a pirometria ou o termopar podem obter os valores de temperatura das Peças de teste caracterizadas por temperaturas diferentes daquelas do ambiente e monitoradas com eficiência térmica, podendo ser aplicadas nas edificações, na medicina, na inspeção preventiva e em incêndios. Desse modo, é razoável adotar os termopares para avaliação de temperaturas e o pirômetro como auxiliar na detecção dos campos térmicos das peças metálicas soldadas (RODRIGUES, DUARTE, *et al.*, 2019) (INCOTERM, 2011) (INSTRUTHERM) (FILIPEFLOP).

A desobstrução de obstáculos próximos à medição é um quesito que ajuda, quando se utilizar a pirometria por infravermelho, para não afetar a leitura da temperatura. No caso do termopar, a desobstrução se restringe ao raio de programação do robô por onde a tocha de

soldagem passar (MAGALHÃES e BOLMSJÖ, 2019) e, em ambientes externos, as condições atmosféricas impactam nos resultados das leituras e, na radiação solar incidente superficialmente, alteram a temperatura do material (LI, MAMTIMIN, *et al.*, 2019).

### 3.8.1 Emissividade

Existem certos fatores que influenciam a emissividade dos materiais, como rugosidade superficial, temperatura, comprimento de onda da radiação, material e condições ambientais, essencialmente quanto à iluminância e à temperatura ambiental. A Tabela 3.10 revela a capacidade dos materiais em emitir calor (METCALFE e QUIGLEY, 1975):

Tabela 3.10 - Emissividade de alguns materiais a 0 °C (~273 °K)

| <b>Material</b>                  | <b>Emissividade</b> |
|----------------------------------|---------------------|
| Alumínio polido                  | 0,05                |
| Alumínio fortemente oxidado      | 0,25                |
| Latão polido                     | 0,03                |
| Tijolo                           | 0,85                |
| Tijolo refratário rugoso         | 0,94                |
| Bronze polido                    | 0,10                |
| Ferro fundido ou fundição rugosa | 0,81                |
| Ferro fundido polido             | 0,21                |
| Concreto                         | 0,54                |
| Vidro                            | 0,92                |
| Neve                             | 0,80                |
| Água                             | 0,98                |
| Aço, superfície rugosa           | 0,96                |
| Tinta, óleo                      | 0,94                |
| Solo gelado                      | 0,93                |

Fonte: (JAMROZIK e GÓRKA, 2020).

A emissividade acima de 0,50, dificulta a medição da temperatura superficial (MOHAMMAD, SUSMITA, *et al.*, 2021).

Essa emissividade é uma peculiaridade da superfície do material, a qual afeta a quantidade de energia radiante emitida e o nível de seu tratamento se torna relevante, pois pode

ser alterado em função da temperatura do objeto, rugosidade, reflexão e ângulo de inspeção.

Ao valorizar suas magnitudes, o aspecto quantitativo visa a obter resultados de leituras térmicas confiáveis, e essa valoração da emissividade é trabalhosa, quando se trata de temperaturas elevadas, todavia, é de consenso entre os principais pesquisadores da área, como Wen, que usou o método MRT (*Multispectral Radiation Thermometry*), Albatici, que mediu a emissividade do aço pelo método ITT (*Infrared Thermovision Technique*); Li também usou a espectrometria sobre a chapa metálica e Yujiao empregou o método MRT (*Mathematical Multispectral Radiation Thermometry*), medindo a emissividade do aço, aproximando-se do valor médio de 0,51, com margem de erro abaixo de 10% (WEN, 2010) (ALBATI, PASSERINI, *et al.*, 2013) (LI, HUANG, *et al.*, 2022) (YUJIAO QIAN, 2022).

Logo, é importante averiguar se há alguma alteração na temperatura-ambiente e na umidade relativa do ar, pois a saturação ambiental aumenta o fluxo térmico convectivo e modifica o ambiente no qual o objeto estará imerso.

### 3.9 ESCANEAMENTO A LASER

O escaneamento a *laser* é uma metodologia muito utilizada para varreduras tridimensionais de objetos a serem replicados para projetos *As Built* em Cad, reproduzindo imagens reais com câmeras de alta resolução e podendo ser um equipamento aplicável nas indústrias injetoras, com a modelagem para diversos fins, inclusive nas impressões 3D. Essa tecnologia vem sendo modernizada com novas aplicações, tendo muito a oferecer, conforme o seu destino, mas é preciso conhecer o funcionamento do sistema, a fim de alcançar resultados com qualidade (SIKSTROM, ERICSSON, *et al.*, 2006).

Como todo método de precisão rigorosa, a emissão de um feixe de *laser* emitido pelo equipamento desenha a posição cartesiana 3D, com os pontos capturados ou *nuvem de pontos* e, simultaneamente, a câmera de alta resolução caracteriza o material da superfície gerada.

Nesse sentido, qualquer objeto pode ser escaneado, inclusive o ser humano, para aplicação da medicina; o cuidado que se deve ter é com o tipo de material a ser representado pelo arquivo STL<sup>6</sup>, porque a capacidade de reflexão da luz interfere no transporte, gerando pontos desfocados (LIU, 2022).

Quanto mais opaco for o material, melhor se torna o escaneamento, como o plástico, diferente do aço, o qual possui alta reflexão de luz, sendo necessário um preparo com uma

---

<sup>6</sup> STL é um formato de arquivo nativo do software CAD de estereolitografia criado pela 3D Systems, originalmente como "Standard Triangle Language" ou "Standard Tessellation Language".

película antirreflexiva à base de pó de silicato de magnésio hidratado,  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , misturado com agente lubrificante, para bloquear o espelhamento da luz infravermelha, produzindo um arquivo sem desvios superficiais (MOORE, DAVIS, *et al.*, 2009).

Fredrik efetuou um dos trabalhos mais aproximados, mas usando outra técnica, com os primeiros modelos com sensor óptico a *laser*, de sorte a averiguar o alinhamento dos deslocamentos com o *laser* diretamente focado na placa metálica nervurada, durante a soldagem, gerando imagens de baixa resolução, conseguindo validar o seu trabalho por meio dos elementos finitos e chegando a um bom grau de precisão (SIKSTROM, ERICSSON, *et al.*, 2006).

Liu usou o método de escaneamento, para avaliar a fratura na solda em placa metálica, obtendo igualmente resultados que ajudaram na investigação com certa dificuldade na resolução da imagem (LIU, 2022).

Percebe-se que nas pesquisas, quase de um modo geral, quando utilizam o escaneamento direto sem descrição de preparo superficial e sem sobreposição de imagens, as imagens foram razoáveis, porém, exibindo certa descontinuidade do gradiente.

Sheng recorreu ao escaneamento, para analisar a microdureza no cordão de solda, o que representou um trabalho mais complexo, por envolver a microestrutura, mas também obteve resultados confiáveis (ZHU, 2013).

Carrasco, empregando o escaneamento para estudar as distorções em tubo de aço inox na junta soldada, conseguiu bons resultados com leitura direta, não havendo registro do preparo superficial e conseguindo fazer a medição (CARRASCO, HURTADO e REYES, 2019).

### 3.10 DISTORÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS

As distorções, como produto das deformações lineares (x,y,z) e angulares ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ ), estão associadas ao tempo decorrido desde a fusão até a solidificação da solda, que, com o resfriamento, implica deformação de origem das tensões residuais. As deformações flutuam até o estabelecimento se instalar definitivamente em pequenas regiões, aleatoriamente, devido às transformações microestruturais e aos esforços internos e dinâmicos, com expansão oriunda do aquecimento e contração gerada pelo resfriamento. Além disso, com o calor transferido da poça de fusão para a chapa, há o surgimento de tensões térmicas longitudinais e transversais, posterior a sua propagação, como evidencia a Figura 3.35 (ARUNKUMAR, DHINAKARAN, *et al.*, 2020):



próximo à zona afetada pelo calor com as tensões residuais que exercem influência no desempenho dos elementos estruturais.

Sem o alívio de tensões mediante a presença de solicitações externas, a força que produz a tensão pode ser benéfica, dependendo da origem, seja ela de tração, seja de compressão. Já na tensão em flexão, o binário de forças resultantes do momento fletor atuante na junta soldada interfere em certas regiões da peça, podendo ocorrer a fratura sob os efeitos das tensões principais e, quando necessitam do equilíbrio mecânico, recorrem às equações:

$$\int_A \vec{\sigma} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.29)$$

$$\int_A d\vec{M} = 0 \quad (3.30)$$

Por outro lado, a tensão de origem da diferença finita de temperaturas de um ponto a outro, devido ao resfriamento ou aquecimento, pode ser obtida pela equação fundamental da dilatação térmica superficial,  $\Delta s$ , e linear,  $\Delta L$ :

$$\Delta s = s_0 \cdot \beta \cdot \Delta T; \text{ com } \beta = 2 \cdot \alpha \quad (3.31)$$

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.32)$$

Onde:

- $S_0$  refere-se à área inicial;
- $\beta$  é o coeficiente de dilatação térmica superficial do material;
- $\Delta T$  é a diferença de temperatura;
- $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear e
- $L_0$  representa a distância entre os pontos de estudo.

As expansões e retrações, as quais geram internamente forças causadoras de tensões residuais,  $\sigma$ , em razão do desenvolvimento das flutuações térmicas por todo o material sólido, no regime quase estacionário; as tensões podem ser obtidas pela equação 3.33:

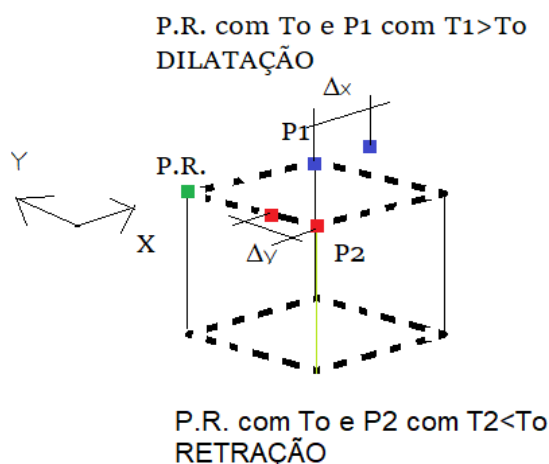
$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (3.33)$$

Onde:

- $E$  é o módulo elástico do material com as demais variáveis citadas anteriormente.

A Figura 3.36 ilustra o esquema do deslocamento pontual devido à diferença de temperatura, a partir do mesmo referencial:

Figura 3.36 - Esquema do deslocamento pontual promovido pelas tensões internas



Fonte: Adaptado de (AZEVEDO, 2015).

Os campos de tensões e temperatura distintamente são bem consolidados; quando esses dois campos se integram, na soldagem, é necessário recorrer a recursos peculiares a cada caso: logo não serão obtidos resultados iguais nas pesquisas, de sorte que, às vezes, podem ser bem diferentes (ZHU, 2013).

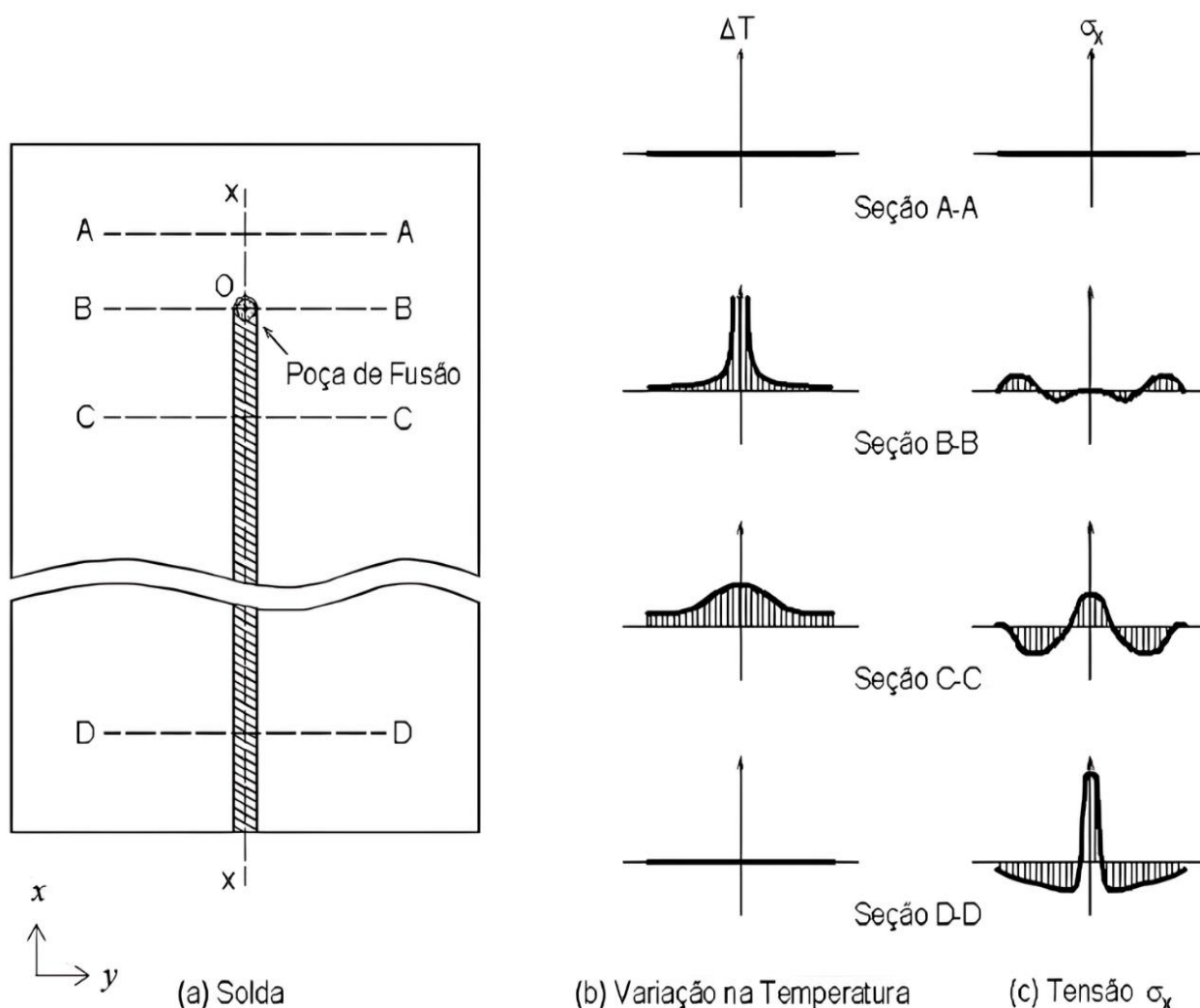
A maior taxa de resfriamento acontece a partir da poça de fusão após a solidificação do metal de solda e, coincidentemente, onde ocorre a maior taxa de fluxo convectivo com o meio, ainda do centro de simetria da região de fusão, onde se tem o maior aquecimento, por ocasião da poça líquida, sob a ação da fonte na chapa metálica com dimensões suficientes em dissipar o calor com o resfriamento rápido no percurso da solda e o resfriamento lento para as extremidades da chapa metálica (WAHAB, PAINTER e DAVIES, 1998).

Geralmente, durante o processo, enquanto ocorre aquecimento de regiões específicas das peças a serem unidas, o restante da peça com pontos suficientemente distantes com temperaturas inferiores tem a influência da temperatura-ambiente. Portanto, a distribuição térmica acompanha o trajeto da poça de fusão, decorrendo a espontânea dilatação térmica das partes aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, gerando as deformações elásticas e, possivelmente, plásticas não uniformes. Essas restrições que impedem os deslocamentos são as responsáveis pelas tensões residuais de soldagem, juntamente com as transformações do estado líquido para o sólido do material, induzindo a variações volumétricas e a deformações multidirecionais, terminando com as distorções (ZHAO, ZHANG, *et al.*, 2012)

Além de Zhao, o qual mostrou as variações de tensão normal longitudinal na direção x, durante a soldagem em multipasse sobre a placa, Long trabalhou de semelhante modo, porém, em único passe, revelando essa influência da distribuição térmica (LONG, GERY, *et al.*, 2009).

Na sequência, a Figura 3.37 mostra o desenvolvimento da tensão residual na trajetória da solda:

Figura 3.37 - Ilustração da relação da temperatura com a tensão residual na soldagem



Fonte: Adaptado de (FISCHER, 2011).

Existe a dinâmica das distribuições das tensões residuais iterativamente com as distribuições térmicas, ao longo da linha longitudinal de movimento da tocha, de maneira instável, enquanto à frente do arco elétrico é nulo o gradiente térmico, apresentando as características originais do metal de base, pois não chegou o efeito da temperatura. Mas, ao longo do metal de solda constituído depois da passagem da tocha de soldagem, a distribuição térmica tem gradientes suficientes para a instalação das tensões residuais (FISCHER, 2011).

Assim, o mapeamento de tensão “ $\sigma$ ”, ao longo da direção x, exibe aspecto conservador, com exceção das extremidades, porém, na direção y, será um mapa irregular e imprevisível, dependendo das temperaturas. Essas tensões residuais se dissipam a uma distância tal da solda, de maneira que seja admitida infinita, tornando nulos os efeitos térmicos. E as tensões, como resultado do processo de soldagem, têm normalmente os valores da componente de tensão longitudinal ( $\sigma_x$ ), paralela à solda, superiores aos das transversais ( $\sigma_y$ ) e de cisalhamento ( $\sigma_z = \tau$ ) (SUGAHARA, BARROS, *et al.*, 2018).

A impressão final de distribuição das tensões residuais é um mapa complexo, ao longo da chapa metálica, notando-se elevadas tensões atrativas que existem nas zonas fundida e termicamente afetada, enquanto há tensões compressivas no metal de base em regiões afastadas do cordão de solda (WANG, ZHANG, *et al.*, 2017) (RONG, HUANG e WANG, 2021).

Quanto à zona afetada pelo calor, em ambos os lados do cordão de solda, existem tensões compressivas, devido à expansão dessas áreas, restringida pela vizinhança, onde se presenciam as temperaturas mais baixas. A magnitude da tensão de compressão atinge seu valor máximo a uma certa distância da poça de fusão e, um pouco mais distante, surgem tensões de tração permanentes (MANSUR, FILHO, *et al.*, 2011), de que se originam as distorções.

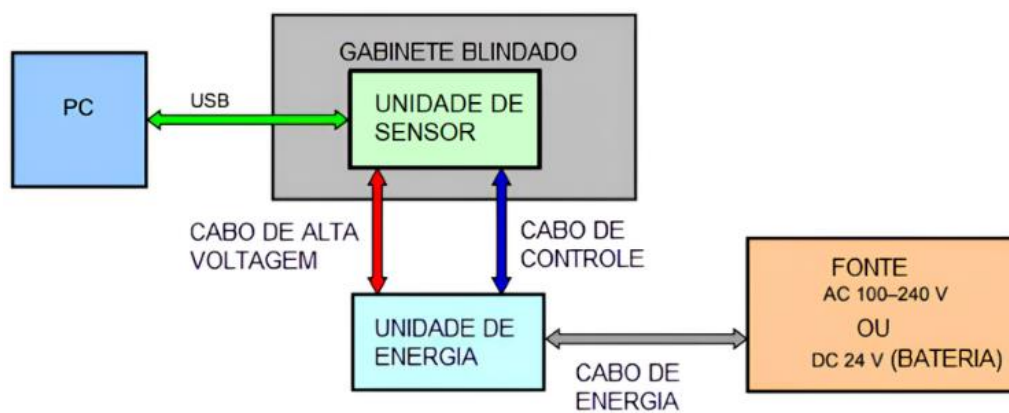
### **3.11.1 Aplicação do raio-X**

Os aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, pela sua composição Fe-C e ligas, exigem uma variada caracterização de suas propriedades mecânicas, dependendo da aplicação, incluindo resistência, dureza e elasticidade. Determinados processos e tratamentos térmicos, como tratamentos superficiais e, principalmente, a soldagem, produzem deformação induzida termicamente, alterando essas propriedades. A deformação plástica deixa tensões internamente no material e, embora isso não possa ser observado visivelmente, precisa ser controlado e compreendido.

As tensões residuais anormais e descaracterizadas podem causar falhas inesperadas, nos componentes soldados, e a avaliação se torna uma baliza para garantir a vida útil dos materiais, podendo ser mensurada por dois procedimentos, utilizando difração de raios-X, conforme a lei de Bragg (MAQBOOL, MAAß, *et al.*, 2021) e (MAAß, HAHN e TEKKAYA, 2021): a instrumentação é baseada no  $\sin^2\psi$ , método de análise XRD e o equipamento portátil  $\mu$ -X360s da Pulstec, o qual se ampara no  $\cos \alpha$ , método de análise XRD, sendo o mais moderno, atualmente.

O seu funcionamento se deve a uma fonte de energia de alta capacidade, por meio de um Trafo que fornece a potência para emissão de raios-X, acoplado a um computador que possui o *software* e registra as tensões da refração do feixe de raios. A Figura 3.38 enfoca o diagrama dos equipamentos:

Figura 3.38 - Esquema dos componentes do equipamento de difração de raio-X



Fonte: (PULSTEC, 2016).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para idealizar o problema do calor da soldagem, o qual causa as deformações e foi verificado por termopares, os materiais e métodos que servirão de base se encontram descritos adiante. Com efeito, os aços com os consumíveis, depois processados, foram preparados para os seus respectivos laboratórios, que analisaram suas propriedades, após o escaneamento a *laser* realizado e validando, na sequência, o modelo por elementos finitos.

### 4.1 MATERIAIS

Os aços estruturais ASTM A36 e ARBL, patinável, CSN Civil 300, respectivamente, nas espessuras de 3,04 mm e 2,65 mm, sob a forma de perfil tipo “U” dobrado a frio, foram usados como metais de base. Os arame-eletrodos, nas especificações AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6, com diâmetros, de modo sequencial, de diâmetro nominal de 1,0 mm, foram empregados como metais de adição. Em todas as soldas, a proteção gasosa foi feita pela mistura 75% Ar - 25% CO<sub>2</sub>, na vazão de  $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (12,5 l. min<sup>-1</sup>). Os dados da Tabela 4.1 sugerem que caso o metal de solda não conter defeitos, a fratura dos corpos de prova de ensaio de tração mais provável vai acontecer fora da solda (ou seja, no metal de base).

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos metais de base e de adição

| Material      | Dados obtidos dos fornecedores |                                   | Dados obtidos nos ensaios de tração<br>(veja Figuras 10.85 e 10.86) |                                   |
|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|               | Tensão de escoamento, MPa      | Tensão limite de resistência, MPa | Tensão de escoamento, MPa                                           | Tensão limite de resistência, MPa |
| ASTM A36      | 282                            | 398                               | 277, 266                                                            | 400, 380                          |
| CSN Civil 300 | 317                            | 432                               | 270, 261, 306                                                       | 386, 409, 425                     |
| ER70S         | 480*                           | 570*                              | -                                                                   | -                                 |

Fonte: \* - [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.pinnaclealloys.com/wp/wp-content/uploads/2015/11/Pinnacle-Alloys-ER70S-6-2.17.pdf](http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.pinnaclealloys.com/wp/wp-content/uploads/2015/11/Pinnacle-Alloys-ER70S-6-2.17.pdf) – acessado 13-12-2023

### 4.2 MÉTODOS

#### 4.2.1 Procedimentos e equipamentos utilizados

#### 4.2.1.1 Procedimentos de soldagem

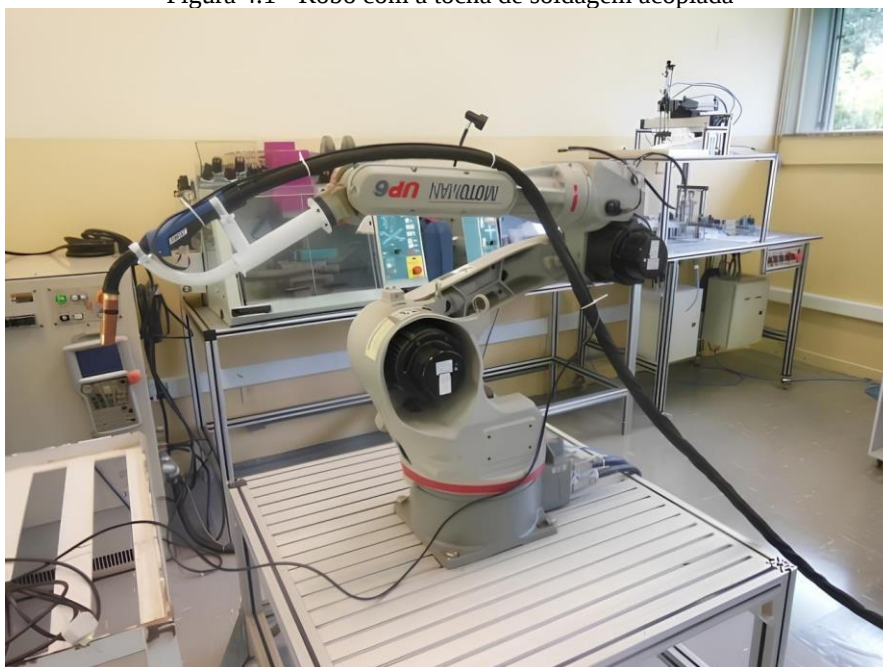
Com o intuito de reproduzir o processo de união de barras que são soldadas nas indústrias de estruturas metálicas, as Peças de teste representaram a completa separação das duas metades, de forma que permanecessem alinhadas, conservando uma fresta aberta uniformemente e, para isso, foram preparadas as possíveis juntas, nesse processo de soldagem.

De modo geral, os aços na junta são resultantes de produtos com endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos microligantes e processados em único passe. As chapas de aço dobrada usadas na indústria metalmecânica são classificadas, segundo a norma ABNT NBR 6355:2012, em função de sua resistência mecânica, como o aço ARBL CSN Civil 300.

A deposição do cordão de solda, aplicado diante do processo de soldagem GMAW-MAG automatizado com o braço robótico Motoman UP6, ocorreu na junta de topo sem bisel, ao longo do sentido longitudinal da Peça de teste, descrevendo o desenvolvimento de seu perfil.

Minucioso preparo das juntas, com técnicas de corte, aparas e limpeza de resíduos, foi implementado, para aquelas estarem prontas a se sujeitar ao processo de soldagem MAG convencional, usando a fonte EUTECTIC-PULSE 3000, com deslocamento da tocha realizado pelo braço robótico e controlador YASNAC XRC, programado através de algoritmo estruturado, constituído de linhas de comando, para execução das operações de soldagem em único passe, com a tocha de soldagem acoplada ao robô, conforme indicado na Figura 4.1:

Figura 4.1 - Robô com a tocha de soldagem acoplada



Fonte: Elaborada pelo autor

Foi necessária a instalação de suportes de articulação do cabo da tocha, pegador da tocha no robô e mesa como gabarito da Peça de teste, de forma a mantê-la sempre no referencial devido à área circulante do robô, principalmente quando não se tem sensor de interferência.

O suporte da tocha foi confeccionado exclusivamente para a conexão do robô e adaptada através de parafusos especiais.

E, para que, no espaço restrito do laboratório, o robô, instalado, não parasse por qualquer interferência ou obstáculo inesperado, o cabeamento também teve a atenção devida, para que as conexões estivessem fixas e encaixadas, tendo-se um cuidado maior quanto ao enrolamento ou estrangulamento.

O laboratório foi adequado para a exaustão dos fumos e gases de soldagem, durante os procedimentos.

Ora, com os perfis de chapa de aço dobrado tipo “U”, nas dimensões de 100 x 50 x 3,04 mm e 100 x 50 x 2,65 mm, no comprimento de 170 mm preparados, deu-se início ao processo de soldagem.

Para isso, foi imprescindível o uso da mesa do gabarito com recursos de fixação da Peça de Teste, permanecendo sempre os perfis na mesma posição, sem obstruir o trajeto da tocha de soldagem. Assim, foram produzidos quatro grupos de peças de teste, selecionadas pelo tipo de preparação de junta de soldagem.

O deslocamento da tocha foi programado para o sentido anti-horário, de modo a acompanhar as juntas de solda preparadas com frestas médias de 1,2 mm, com o seccionamento transversal por serra manual e montadas de topo, como pode ser observado na Figura 4.2:

Figura 4.2 - Preparação e posicionamento-padrão das juntas



Fonte: Elaborada pelo autor

Ademais, é fundamental que o algoritmo que descreve as devidas linhas retas e curvas de comando seja configurado com as respectivas velocidades e *stick-out* a que o robô se limita.

A programação do robô abrangeu diversos detalhes, a fim de que o processo de soldagem fosse bem-sucedido. Assim, com o controlador no modo manual, foram definidas as posições de translação e rotação dos motores e, através do painel de comando, fixou-se o referencial de deslocamento da tocha necessário para executar todo o trajeto, conforme se vê na Figura 4.3:

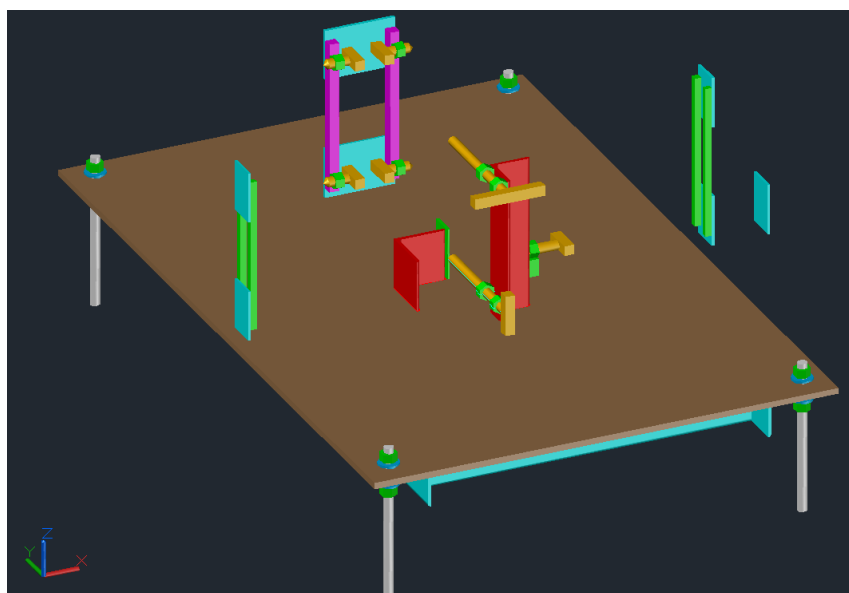
Figura 4.3 - Preparo da Peça de teste para o procedimento de soldagem na posição 2G



Fonte: Elaborada pelo autor

A mesa para gabaritar e referenciar a Peça de teste, na posição de soldagem 2G especificada pela AWS D1.1M:2020 (AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020), foi confeccionada como mostra a Figura 4.4:

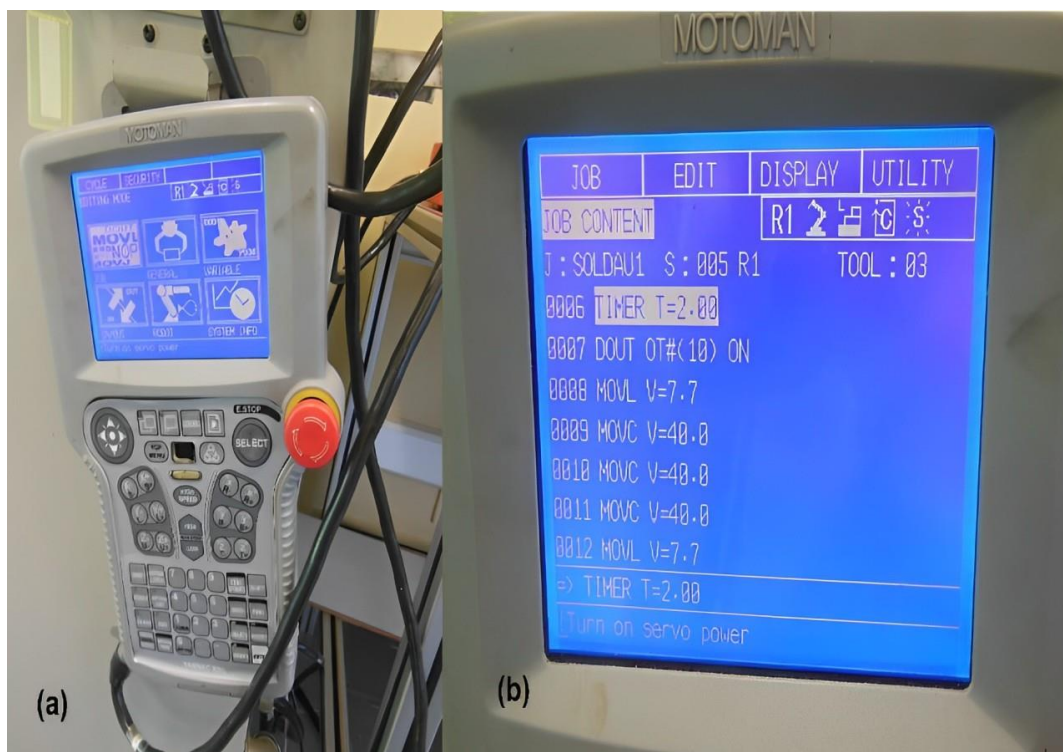
Figura 4.4 - Projeto da mesa para gabarito e referenciamento da Peça de teste



Fonte: Elaborada pelo autor

Também foi preciso fazer ajustes refinados no equipamento de soldagem, para conservação da densidade de corrente, tendo sido observados os volumes de consumíveis, imposição do instante de abertura do arco e controle devidos à velocidade angular e linear de soldagem. A extensa programação da sequência de soldagem pode ser vista, de forma parcial, na Figura 4.5:

Figura 4.5 - Algoritmo da programação do robô para executar o processo de soldagem



Sendo: a) painel de programação do controlador YASNAC XRC e b) rotina de comandos parcial do procedimento de soldagem.

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao término da soldagem de cada Peça de teste, foram definidas as devidas nomenclaturas e marcações para se extrair os CPs, com vistas a seu determinado fim experimental, posteriormente, tendo-se um cuidado com o descarte.

Desse modo, o primeiro grupo contém a união precedida por três pontos de solda, voltados para o interior do perfil, deixando livre a passagem do consumível pelo lado externo, sendo dois nas extremidades e outro no centro do desenvolvimento do perfil.

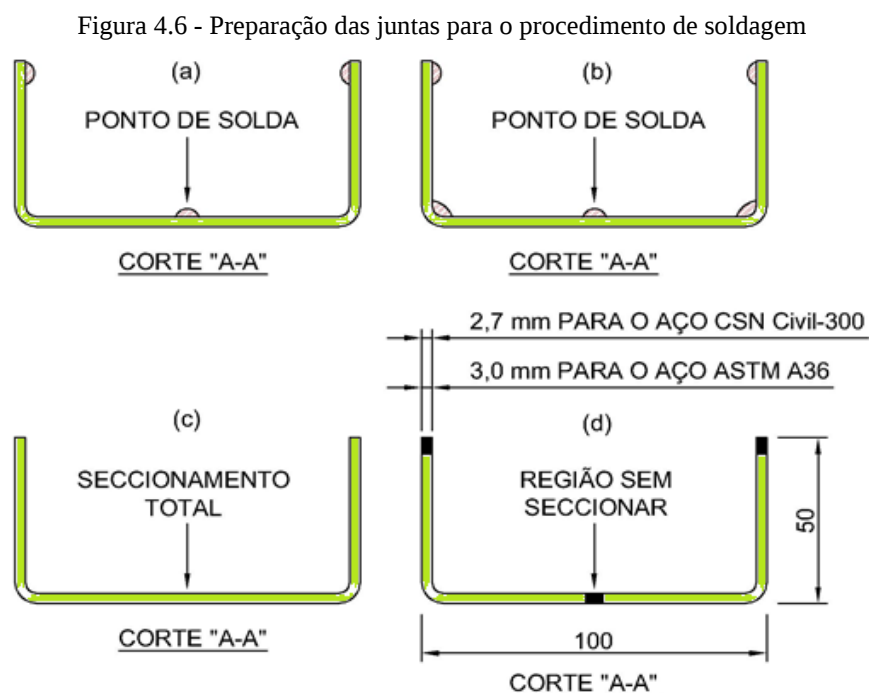
O segundo grupo, assim como o primeiro, tem a adição de mais dois pontos de solda nas curvas, dando um total de cinco pontos de solda para o interior.

Para o terceiro, devido ao seccionamento total, foi elaborado um dispositivo metálico avulso, que serviu de grampo tipo sargento sobre a mesa de soldagem.

Utilizou-se também um quarto tipo de junta, denominada experimental, a qual consistiu em seccionar transversalmente o perfil dobrado, preservando um pequeno elemento de material

no meio e nas extremidades, que manteve a sua conjunção, como para todos, na conservação do perfeito alinhamento das metades.

A Figura 4.6 demonstra concisamente o seccionamento e preparo do perfil “U”:



O corte “A-A” é o seccionamento, passando através das juntas, sendo: a) preparada com três pontos de soldas, b) disposta com cinco pontos de soldas, c) seccionada sem ponto de solda e d) experimental disposta mostrando os elementos de união conservados no seccionamento.

Fonte: Elaborada pelo autor

Nessas situações, ainda dois tipos diferentes de consumíveis foram usados, a fim de montar quatro conjuntos de Peça de testes para cada par de metal base, contendo 20 juntas, considerando que cada condição de soldagem se repete cinco vezes, portanto, resulta um total de 80 juntas soldadas, como apresenta a Tabela 4.2, sendo formados dois conjuntos de CPs A e B. No total, os grupos A e B contêm, cada um, quarenta juntas para soldagem, marcadas conforme seus respectivos códigos, sendo o último dígito a sequência de repetição:

Tabela 4.2 - Codificação e quantificação dos corpos de prova para soldagem

| Metal de base | Código | Arame-eletrodo | Código | Tipo junta         | Código |
|---------------|--------|----------------|--------|--------------------|--------|
| ASTM A36      | A      | AWS ER70S-6    | 1      | 3 pontos de solda  | 1      |
|               |        |                |        | 5 pontos de solda  | 2      |
|               |        |                |        | Sem ponto de solda | 3      |
|               |        |                |        | Experimental       | 4      |
|               |        | AWS ER70S-3    | 2      | 3 pontos de solda  | 1      |
|               |        |                |        | 5 pontos de solda  | 2      |
|               |        |                |        | Sem ponto de solda | 3      |
|               |        |                |        | Experimental       | 4      |

|               |   |             |   |                    |   |
|---------------|---|-------------|---|--------------------|---|
| CSN Civil 300 | B | AWS ER70S-6 | 1 | 3 pontos de solda  | 1 |
|               |   |             |   | 5 pontos de solda  | 2 |
|               |   |             |   | Sem ponto de solda | 3 |
|               |   |             |   | Experimental       | 4 |
|               |   | AWS ER70S-3 | 2 | 3 pontos de solda  | 1 |
|               |   |             |   | 5 pontos de solda  | 2 |
|               |   |             |   | Sem ponto de solda | 3 |
|               |   |             |   | Experimental       | 4 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Durante a execução das soldas, os valores instantâneos da corrente e tensão de soldagem e a velocidade de alimentação do arame-eletrodo foram compilados, através do sistema de aquisição e processamento de dados SAP-V4.23-IMC. A Tabela 4.3 contempla esses números, em termos de valores médios:

Tabela 4.3 - Valores médios dos parâmetros de soldagem

| Conjunto de CPs | U - (V) | I - (A) | V <sub>a</sub> - (mm. s <sup>-1</sup> ) | V <sub>s</sub> - (mm. s <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|---------|---------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| A1              | 20,51   | 160,58  | 108,30                                  | 10,00                                   |
| A2              | 22,65   | 143,87  | 108,30                                  | 7,70                                    |
| B1              | 19,72   | 151,97  | 108,30                                  | 10,00                                   |
| B2              | 22,39   | 144,07  | 108,30                                  | 7,70                                    |

U, I, V<sub>a</sub> e V<sub>s</sub> são, respectivamente, tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame-eletrodo e velocidade de soldagem.

Fonte: Elaborada pelo autor

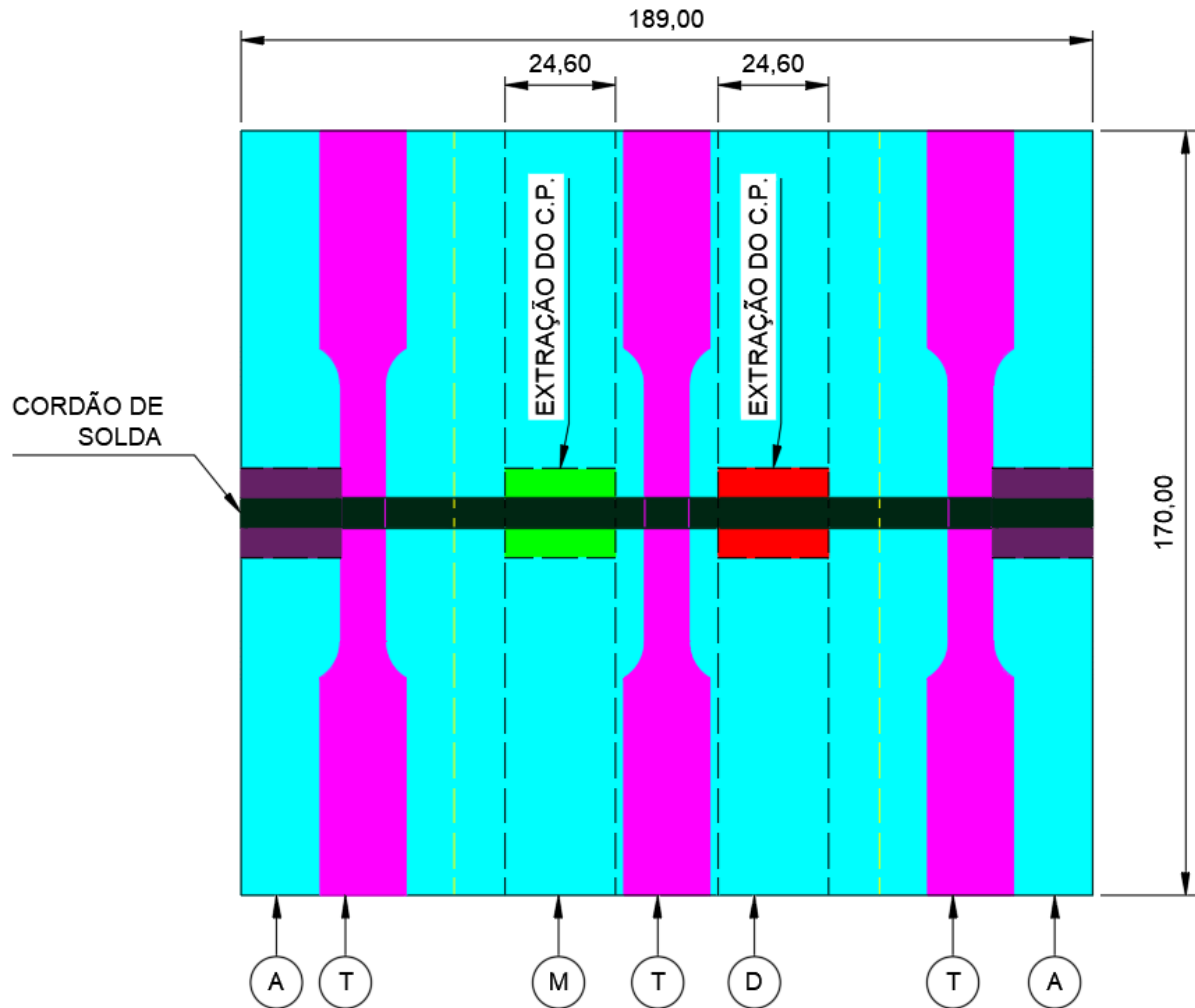
Também os oscilogramas dessas grandezas estão registrados para cada junta soldada, durante o período de arco aberto. Com a regulagem e a seleção do programa, o processo de soldagem é devidamente escolhido na máquina de soldagem, em função do tipo de material, diâmetro do arame-eletrodo e tipo do gás de proteção ora fixados, bem como da velocidade de alimentação do consumível. Assim, foram os requisitos que permitiram a constância da densidade de corrente nos arame-eletrodos em 205 – 194 A. mm<sup>-2</sup>.

#### 4.2.1.2 Extração dos corpos de provas

A Peça de teste, depois de soldada, foi criteriosamente estudada para a extração dos CPs dos perfis metálicos, os quais foram encaminhados aos laboratórios específicos, para realização dos ensaios de microdureza, macrografia, análise química e tração.

Assim, foi projetado o seccionamento das Peças de teste, como se vê na Figura 4.7:

Figura 4.7 - Seccionamento das Peças de teste, conforme sua finalidade



Fonte: Elaborada pelo autor

Legenda de marcação dos CPs:

- Teste de tração, representada pela sigla “T”;
- Área de usinagem descartada, sem representação;
- Teste de microdureza Vicker, representada pela sigla “D”;
- Macrografia, representada pela sigla “M”;
- Análise química, representada pela sigla “A”.

Onde:

“T” se refere ao ensaio de tração, “M” à análise da macrografia, “D” ao ensaio de microdureza e “A” ao ensaio de espectrometria. No caso do teste de tração não houve separação das abas e almas, uma vez que os resultados são iguais.

### 4.3 MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

O método de escaneamento a *laser* é baseado na emissão de um feixe de *laser* que faz a leitura duas vezes, para que a sobreposição das imagens meça os deslocamentos pontuais entre as superfícies primitiva e obtida.

Foi selecionada uma Peça de teste intacta, por grupo, para ser processada na forma primitiva, ou seja, antes do processo de soldagem e na forma deformada posterior à soldagem, salientando-se que tem que ser a mesma peça. A seleção foi de maneira aleatória, totalizando quatro medições de Peças de teste.

Portanto, a avaliação das distorções em função da soldagem foi realizada pela técnica da sobreposição das imagens da junta, antes e depois da solda. Logo, inúmeros pontos superficiais por toda a junta foram coletados, a partir de imagens produzidas por um escâner focal tridimensional de base giratória. Usando o aplicativo de computador Atos Versão profissional V.75S41 de análise superficial, os dados coletados desse modo permitiram a remontagem e a sobreposição de imagens conjuntas.

Para melhorar a resolução da imagem escaneada e evitar o reflexo do feixe de *laser*, na captura da nuvem de pontos na superfície metálica da Peça de teste, foi aplicada uma película de pasta aderente com camada aproximada de 75  $\mu\text{m}$  a base de graxa de forma homogênea, para fixação de pó de silicato de magnésio hidratado,  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , para atenuar o efeito altamente reflexivo do metal e, por conseguinte, melhorar a leitura de pontos pelo feixe de laser. Além disso, a iluminação ambiente também foi controlada com luz auxiliar com foco específico, a fim de manter iluminância constante sobre as Peças de teste.

E, com os escaneamentos dos pontos extremos e medidas vetoriais de todas as Peças de teste, foram processadas as deformidades tridimensionais. Na sequência, a Figura 4.8 traz como ilustração a imagem de uma Peça de teste soldada, copiada por escâner:

Figura 4.8 - Captura tridimensional da nuvem de pontos do escaneamento a *laser*

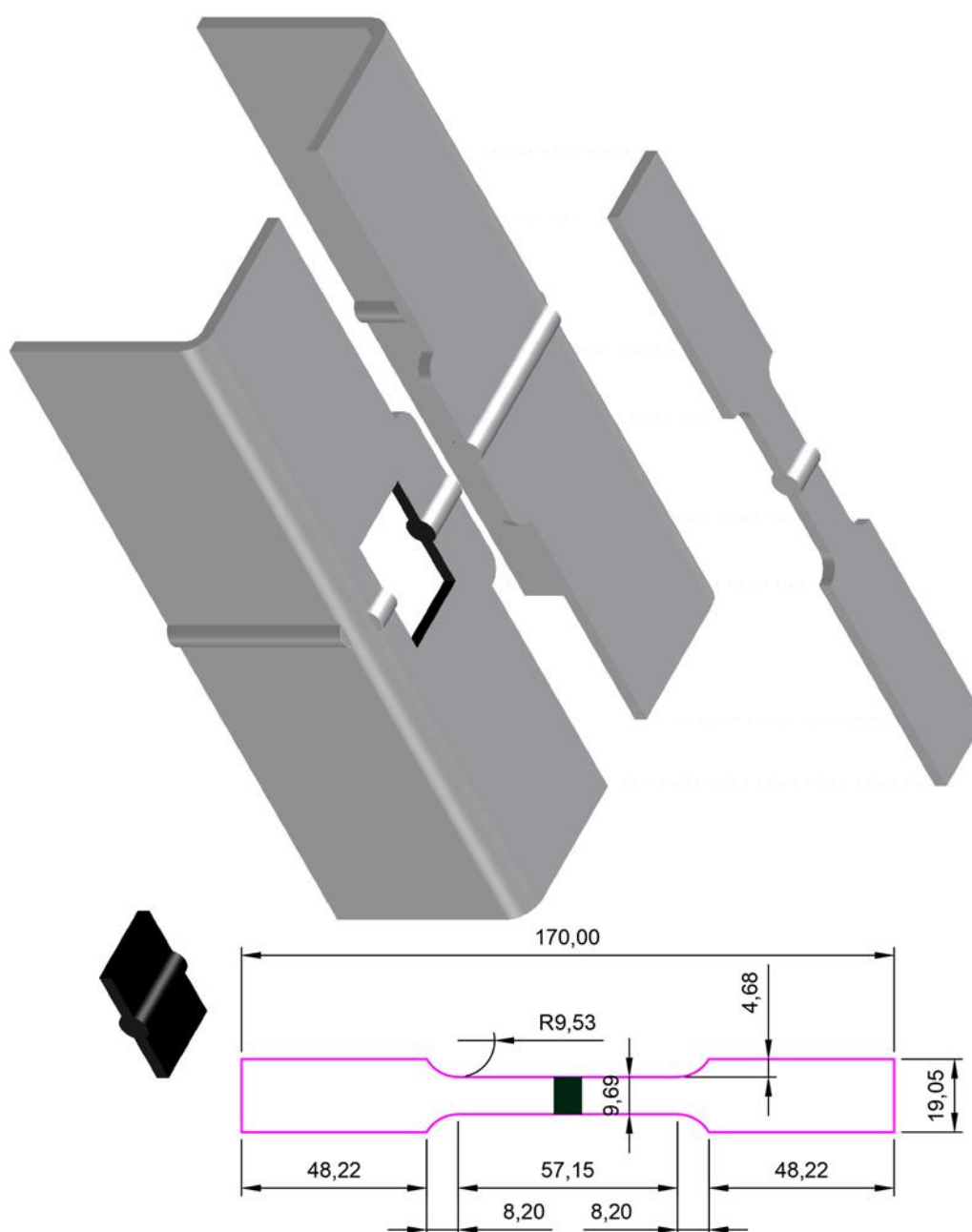


Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para a avaliação da resistência mecânica, os CPs extraídos, conforme o projeto da Figura 4.9, foram usinados e devidamente preparados na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, onde se totalizaram 48 unidades, sendo 24 para cada grupo. Esse procedimento obedeceu aos requisitos normativos da ABNT NBR 6892:2013 (ABNT, 2013), passando pelos processos de corte, fresa e plaina, com suas respectivas espessuras, para serem aplicados ao ensaio de tração no equipamento universal de testes Instron EMIC sistema 200/2000.

Figura 4.9 - CP usinado para ensaio de tração



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.5 MEDIDAS DAS TENSÕES RESIDUAIS

Com equipamento de difração de raio-X da Pulstec  $\mu$ -X360s.

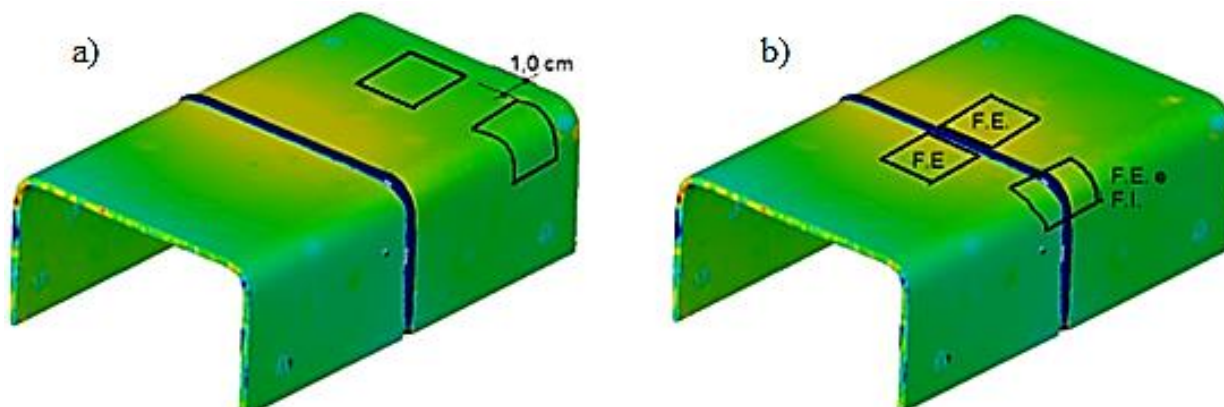
Essa técnica se baseia na matriz pura de grafite, em que, balizado o equipamento e posicionado corretamente a Peça de teste sobre a mesa de leitura, se procede ao seu acionamento, o qual, por segurança, só emite o feixe de difração dos raios-X após a preparação protocolada. Assim, os usuários devidamente conscientes aceitam o acionamento mediante sinais sonoros e visuais de alerta; a Figura 4.10 mostra o equipamento U-X360s da Pulstec:



Fonte: (PULSTEC, 2016).

Nessa perspectiva, foi avaliada a tensão residual sobre pontos nas áreas pré-determinadas sobre a Peça de teste, conforme ilustra a Figura 4.11, abaixo, operação realizada no laboratório da Vas Tecnologia de São Paulo - SP:

Figura 4.11 - Regiões de análise da tensão residual



Sendo a) Metal de base e b) Metal de solda. Onde F.E. corresponde à face externa e F.I., à face interna.

Fonte: Elaborada pelo autor

Com esse procedimento da difração de raios-X, XRD<sup>7</sup>, sistema da Pulstec, o dispositivo de medição de tensão residual emite a onda de raio-X devidamente calibrada pela peça-matriz<sup>8</sup>, com o ângulo aproximado de 35°, medindo o valor da tensão residual instalada na junta soldada.

Esses valores normalmente são para as duas direções principais, x e y, que, no caso de chapa fina, a direção z, segundo já explanado anteriormente, é desprezada em razão de sua interferência. Obtém-se, assim, um mapeamento pontual da distribuição de tensão residual superficial de pequena profundidade.

Esse método se ampara no método do  $\cos \alpha$ <sup>9</sup>, usando um único ângulo fixo de raios-X incidentes, para a superfície das Peças de teste. O feixe de raios-X difusos omnidirecionais de 360° são amostrados por um detector bidimensional, em uma única exposição, produzindo a imagem do anel Debye-Scherrer<sup>10</sup> (KUMAR MAURYA e NIRANJAN, 2021), no qual o resultado da medição da tensão residual é automaticamente determinado. O tamanho compacto e a baixa exigência de potência da fonte de raios-X resultam no instrumento portátil adequado, possibilitando a realização das medições no local. Desse modo, os componentes volumosos exigem que as Peças de teste sejam preparadas por seccionamentos. O método  $\cos \alpha$  permite medições com precisão, na avaliação da tensão residual (TEIXEIRA, MORENO, *et al.*, 2021), amostrados em 125 pontos ao redor do anel Debye-Scherrer.

Os instrumentos são geralmente estacionários e há a necessidade de alinhamento rigoroso, durante a operação, sendo necessário alterar o ângulo incidente de raios-X sobre a superfície da Peça de teste e proteger os usuários, quanto à emissão dos raios. Para padronizar o procedimento de medição, deve-se fazer, no mínimo, sete exposições angulares controladas com precisão e a detecção de raios-X subsequente em cada ângulo. Em seguida, a integração desses sinais é necessária para produzir um único valor de medição da tensão residual. Nesse procedimento operacional ainda são restritos o tamanho e a forma da Peça de teste, por ser executado em laboratório, podendo ser caracterizados pelo XRD. Porém, para certas situações importantes, nas quais a caracterização da tensão residual seja vital, seções de tamanho adequado precisam ser cortados, para se ajustar ao equipamento de medição ou posicioná-los no local, com uso de outros dispositivos.

Também foram avaliadas as tensões na região dobrada do perfil estrutural de aço chapa

---

<sup>7</sup> XRD: essa sigla vem do inglês *X-ray diffraction*.

<sup>8</sup> Peça-matriz é o material puro. Dependendo do tipo de material a ser analisado pelo equipamento, como no caso do aço, é usado o grafite.

<sup>9</sup> No método do  $\cos \alpha$ , os raios-X são 360° - omnidirecionalmente difundidos da estrutura policristalina do CP ao redor do feixe dos raios-X incidentes; por isso, são detectados imediatamente pelo sensor bidimensional. Vantagem em relação ao  $\sin \alpha$ , quanto ao retorno de resposta direta e rápida, exigindo menos dos processadores.

<sup>10</sup> Anel de Debye-Scherrer, em homenagem ao seu idealizador, é o anel compacto da peça-matriz e por ele se determinam as variações e medições operadas no material de estudo.

conformada a frio, porque essa região se encontra sujeita a um binário de forças externas promovidas pelo processo de dobramento, a força externa aplicada externamente no ponto de dobramento, ocorrendo a tração com a deformação plástica e internamente, de forma inversa, com o esmagamento dos grãos pela compressão.

Então pode ser observado na Figura 4.12, como a chapa plana de aço adquire as dobras e não recupera sua forma original após o processo de dobramento pelo equipamento que aplica e remove a força para esse trabalho:

Figura 4.12 - Deformação por dobramento



Fonte: Elaborada pelo autor

Essas áreas deformadas plasticamente vão possuir as tensões residuais induzidas pelo processo, e a microestrutura fica modificada, apresentando, por um lado, grãos alongados e, por outro lado, grãos encruados. Essas tensões residuais são medidas pelo equipamento de XRD, determinando a variação da distância interplanar de rede e das constantes elásticas do aço.

Porque a distância interplanar da rede aumenta ou diminui, dependendo da direção e ângulo dos planos de rede da estrutura cristalina do aço, onde a incidência do feixe de irradiação dos raios é direcionada mede, simultaneamente, a variação da tensão. E, para alcançar o resultado em operação, durante a medição, esse sistema necessita de alta estabilidade do equipamento e ajuste de giro do tubo de raio-X, de forma que a tensão residual é avaliada com específico ângulo de difração, nas distâncias interplanares, dentro da estrutura cristalina do grão.

Contudo, o equipamento  $\mu$ -X360s tem capacidade de identificar a textura dentro da Peça

de teste, bem como compreender o tamanho do grão, durante a irradiação de raios-X.

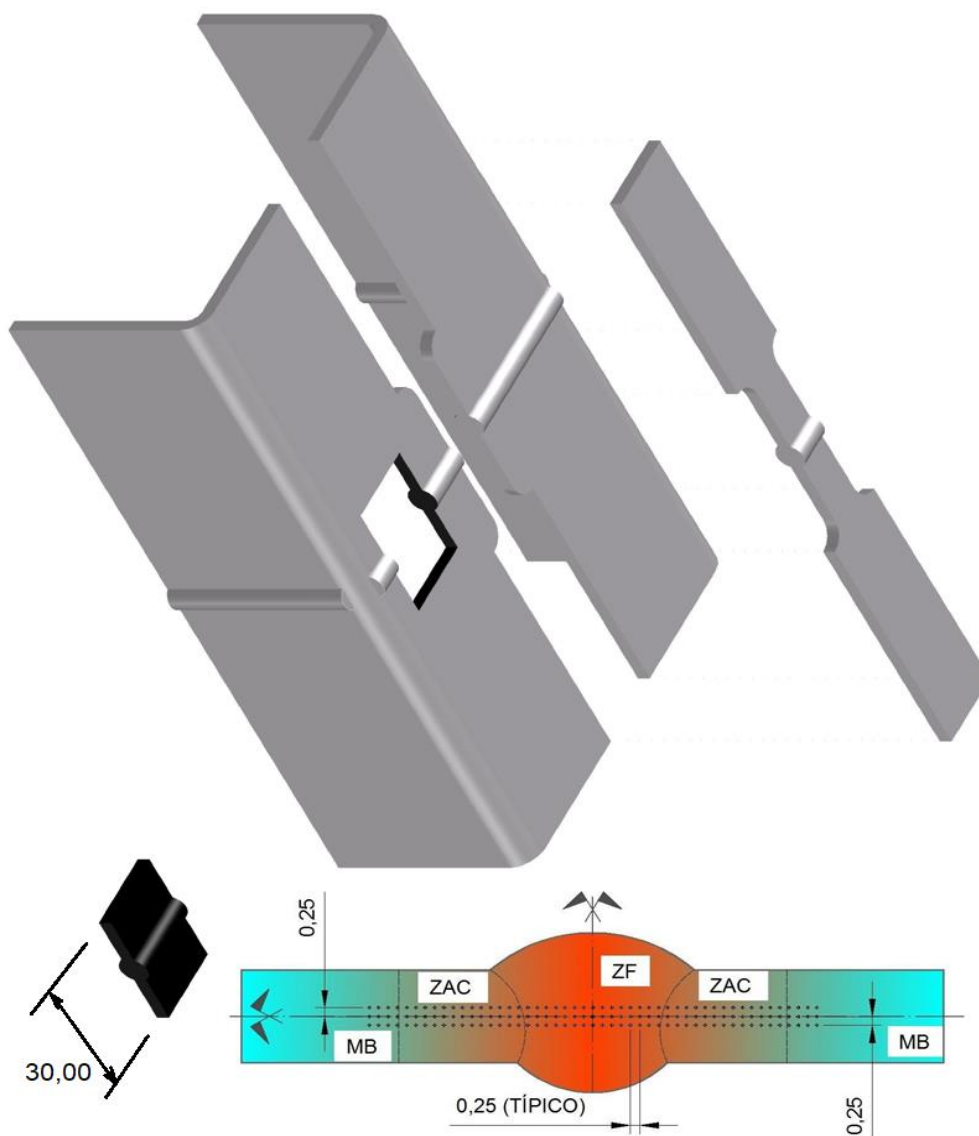
#### 4.6 MICRODUREZA NA JUNTA SOLDADA

Foram preparados CPs com a mesma prática metalográfica convencional usada na macrografia, com exceção do ataque químico reagente na superfície, com nital 1%.

A fim de realizar a medição da microdureza, o Laboratório de Engenharia Mecânica utilizou o microdurômetro Digimess HV1000, em 16 CPs selecionados, um de cada grupo.

Foi empregado o método Vickers, para uma carga de 1,0 Kg aplicada à distância, entre os pontos, de 0,25 mm, em três linhas formadas na direção longitudinal da junta soldada, resultando em um conjunto de valores medidos percorrendo o metal-base, a zona afetada pelo calor e a zona de fusão, como mostra a Figura 4.13:

Figura 4.13 - CP com a situação dos pontos das medidas de microdureza dos aços



Fonte: Elaborada pelo autor

Com as medidas de microdureza tabuladas, utilizou-se o aplicativo GeoGebra, V.5.0, como ferramenta para análise estatística dos dados e geração da curva média dos conjuntos de CPs A1, A2, B1 e B2, codificados na Tabela 4.2, onde o aço ASTM A36 pertence aos conjuntos A1, que utilizou o arame-eletrodo AWS ER70S-6, como o AWS ER70S-3 para o A2 e, assim sucessivamente, para o aço ARBL CSN Civil 300, pertencentes aos conjuntos B1 e B2.

#### 4.7 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

As análises químicas obtidas dos metais de solda foram feitas no Laboratório de Qualidade da Jacto Fundição, situada na cidade de Quintana - SP, por meio de um espectrômetro de emissão ótica Spectro Max-X, conforme evidencia a Figura 4.14:

Figura 4.14 - Espectrômetro



Fonte: Elaborada pelo autor

Nessa análise, para cada condição de soldagem, utilizou-se um CP, totalizando 16 CPs, os quais foram preparados igualmente por todos os laboratórios, pela prática metalográfica convencional.

Assim, foi realizado o embutimento em baquelite, lixamento na sequência 120, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, polimento e ataque químico superficial reagente com nital 2%, a fim de localizar o centro do cordão de solda e metal de base, objeto da análise.

E, para a avaliar a composição química do material, adotou-se a espectrometria, nas regiões da ZF, ZAC e MB, respectivamente nessa ordem, cujas imagens mostram os resultados médios dos aços utilizados.

#### 4.8 MACROESTRUTURA DAS JUNTAS SOLDADAS

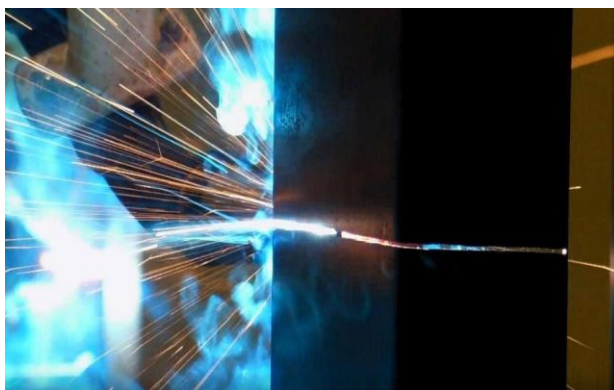
Para a avaliação macroestrutural, os CPs foram submetidos ao processo convencional da prática metalográfica, o qual consiste no embutimento em resina acrílica, lixamento na sequência 120, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, polimento com alumina de granulação 1  $\mu\text{m}$  e ataque químico com a solução aquosa composta de 15 ml de ácido clorídrico, 10 ml de ácido acético e 10 ml de ácido nítrico.

No que se refere à caracterização macroestrutural das soldas, utilizou-se o programa AutoCAD, para calcular as regiões relacionadas do cordão de solda, com as fotomicrografias digitalizadas das seções transversais das juntas soldadas. Assim, foram determinadas, para cada condição de soldagem, as dimensões geométricas da seção transversal dos cordões de solda, a penetração, a diluição da solda no metal de base expressa, em (%) dada pela relação geométrica do cordão de solda, com as medidas em milímetros.

#### 4.9 MEDIDA DA TEMPERATURA

Para se avaliar a temperatura, no momento da soldagem, segundo apresentado na Figura 4.15, foram empregados termopares tipo K, devidamente fixados à Peça de teste para aquisição de temperatura:

Figura 4.15 - Execução da soldagem MAG, norma ASME seção IX (ASME, 1998)



Fonte: Elaborada pelo autor

Esses termopares têm a característica de responder ao contato direto, sendo necessário assegurar a fixação e seu posicionamento, nas Peças de teste, sem a interferência da passagem da tocha de soldagem executada pelo robô, e registrar, assim, o histórico de temperaturas.

Essas análises térmicas dos metais de solda foram realizadas no Laboratório de Soldagem do SENAI de Pederneiras - SP, por meio de um aquisitor de temperatura TC-08 *Data Logger*, o qual comporta até 8 canais, com termopares do tipo B, E, J, K, N, R, S, T, através do aplicativo PicoLog 6.2.0, conforme se verifica na imagem da Figura 4.16:

Figura 4.16 - Aquisitor de temperatura: TC-08 *Data Logger*



Fonte: (PICO TECHNOLOGY, 2021).

Assim definidos, quatro termopares, tipo K, compostos de Cromel e Alumel, operando na faixa de temperatura de  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com sensibilidade de aproximadamente  $41\text{ }\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , foram utilizados. O critério para a distribuição desses termopares foi partir do centro do cordão de solda, ficando dispostos a 7, 10, 15 e 20 mm, de forma radial, para permitir o aperto dos parafusos e fazer a conectividade com a chapa metálica.

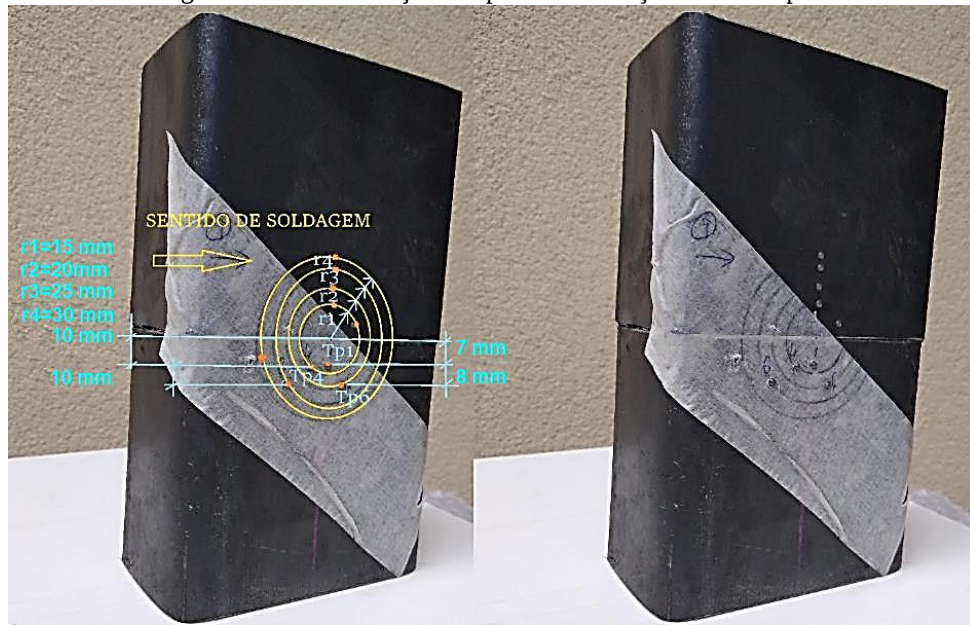
Em todo o sistema, no Laboratório de Soldagem, no momento de execução do processo que o robô executava a solda, o aquisitor de temperatura, conectado a um *notebook*, relatava instantaneamente os valores. O aplicativo gera uma memória dos resultados, que são tabulados automaticamente, com prévio tratamento estatístico com as próprias funções. O aplicativo do aquisitor lê e registra automaticamente, de modo instantâneo, todos os valores de temperatura.

Os termopares usados continham dois condutores diferentes, unidos na extremidade e, com a outra extremidade ligada ao aparelho em tempo real e instantâneo, foram registradas as temperaturas. no decorrer do tempo.

Além disso, como auxílio visual muito útil, foi empregada uma câmera térmica para registrar a transferência de calor pela chapa, no momento da soldagem.

Assim, foram consideradas um total de 12 Peças de teste, representando três peças para cada grupo, selecionados aleatoriamente. A Figura 4.17 ilustra a situação de fixação dos termopares, de modo que eles não se tocassem.

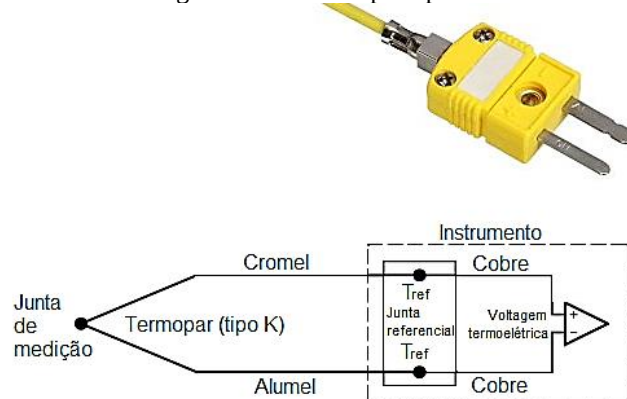
Figura 4.17 - Distribuição dos pontos de fixação dos termopares



Fonte: Elaborada pelo autor

Cada sensor de temperatura pela junção de medição, especificamente plugado aos canais 1, 4, 6 e 8, aferiu as temperaturas. Quando essa junção é aquecida ou resfriada, o gradiente de temperatura gera uma tensão termoelétrica ao longo dos fios, a qual se expressa, de forma gráfica ou analítica, cujo sistema é esquematicamente mostrado na Figura 4.18:

Figura 4.18 - Termopar tipo K



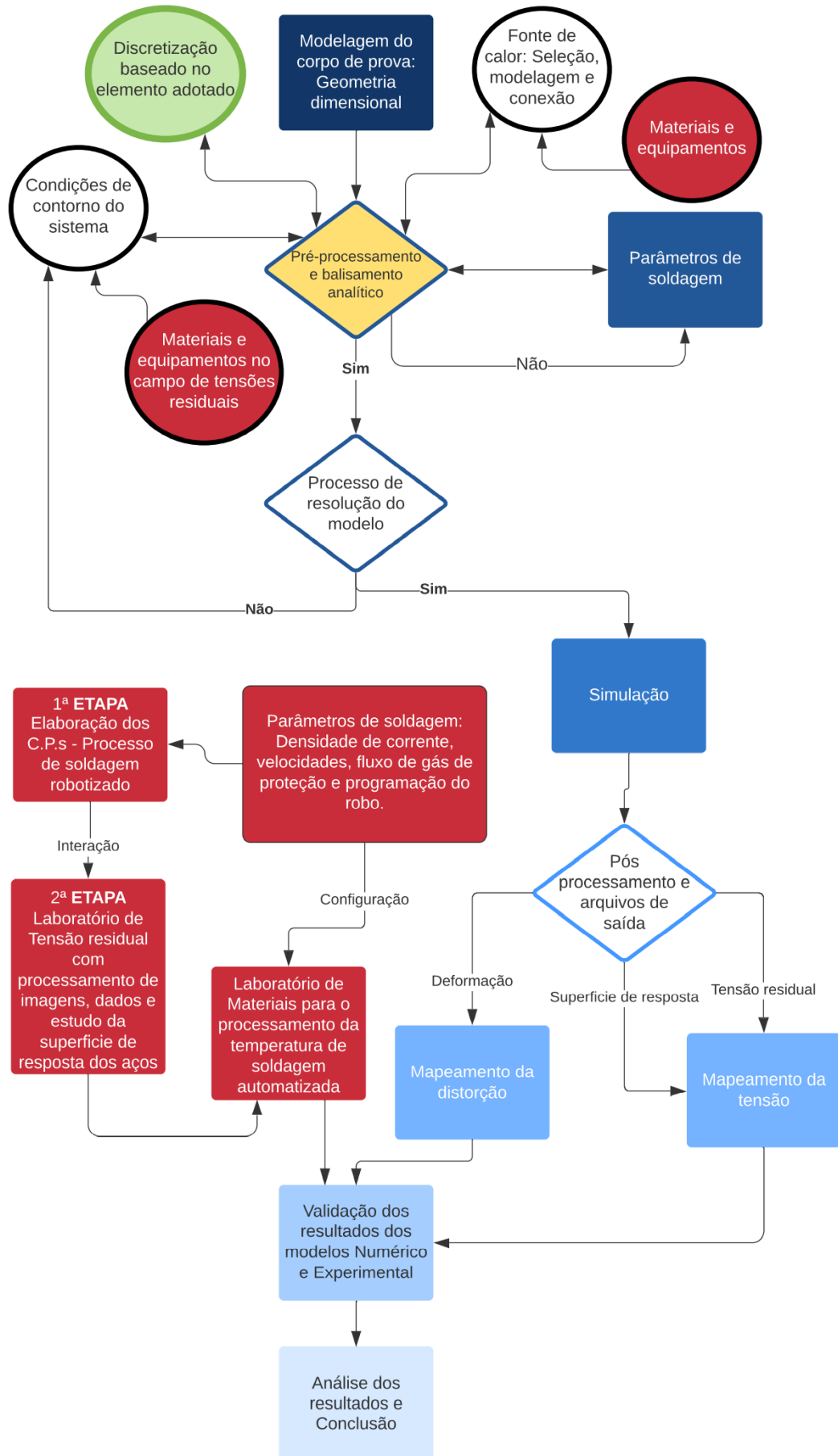
Fonte: (PICO TECHNOLOGY, 2019).

Conforme se observa, para determinar a temperatura real na junção de medição, o instrumento mede sua temperatura interna, em uma junção de referência ( $T_{ref}$ ), enquanto a tensão termoelétrica gerada nos fios termopares também é medida e, com esses dados, são referenciadas as tabelas de convergência para o termopar específico em uso.

#### 4.10 FORMULAÇÃO NUMÉRICA - ELEMENTOS FINITOS

A Figura 4.19 esclarece o fluxo de sequência das atividades que foram necessárias:

Figura 4.19 - Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborada pelo autor

Assim, foram realizados os procedimentos passo a passo, diante do experimento e da modelagem matemática e com o consequente direcionamento ao estudo, para validação dos resultados obtidos.

Compilados os resultados obtidos pelos laboratórios e, assim, organizado um banco de dados para modelar e aprimorar os parâmetros reais e as condições de contorno, dá-se início à formulação por elementos finitos.

Cada etapa foi cumprida, de maneira sistemática, até que todo o seu conteúdo fosse finalizado sem transposição de etapas.

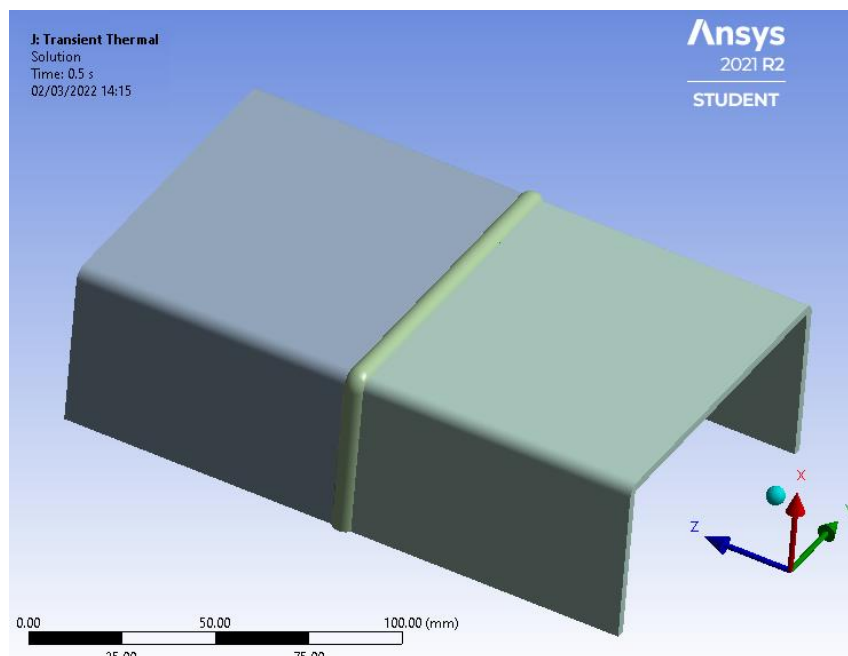
#### 4.10.1 Modelagem por elementos finitos

A equação 4.1 representa a equação de transferência de calor no modelo numérico utilizado:

$$q(x, y, x, t) = f_f \eta UI \frac{6\sqrt{3}}{a_f b c \pi^2} e^{\left(\frac{-3(x-vt)^2}{a^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)} \quad (4.1)$$

Seguindo o fluxograma metodológico com os parâmetros de soldagem definidos, foi implementado o desenvolvimento da modelagem tridimensional da Peça de teste para aplicação das condições de contorno numérica do campo térmico oriundo do processo de soldagem ao arco elétrico GMAW-MAG, com as propriedades dos materiais e processo. A Figura 4.20 indica a modelagem sólida da Peça de teste:

Figura 4.20 - Modelo sólido tridimensional da Peça de teste



Fonte: Elaborada pelo autor

Com o plugin “*Heat motion*”, um comando especial dentro do ANSYS procedeu-se a simulação automática da soldagem com seus devidos processos matemáticos.

#### 4.10.2 Parâmetros das constantes dos materiais e processo de soldagem

Quanto aos parâmetros devido ao processo de soldagem, a Tabela 4.4 traz esses valores:

Tabela 4.4 - Parâmetros de soldagem experimentais para a modelagem matemática

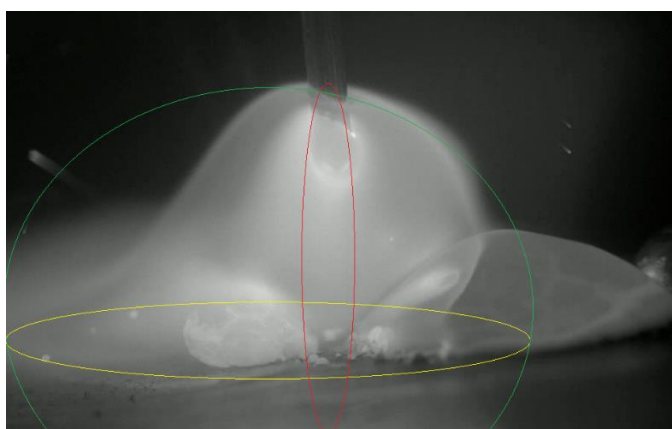
| <b>Tipos de aços utilizados</b>               | <b>ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300</b> |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Parâmetros de soldagem admitidos</b>       |                                      |
| Corrente [A]                                  | 192                                  |
| Tensão [V]                                    | 18,4                                 |
| Velocidade de soldagem [ $\text{m. s}^{-1}$ ] | 0,01                                 |
| Eficiência térmica do processo [%]            | 85                                   |
| Tempo médio de soldagem [s]                   | 18,7                                 |
| Comprimento do cordão de solda [m]            | 0,187                                |

Fonte: Elaborada pelo autor

Determinou-se, para cálculo do aporte térmico, o valor do rendimento do arco elétrico no processo de soldagem, admitindo-se o mesmo baseado nos experimentos feitos por (WU, ZHANG e CHEN, 2017), com 85% para o GMAW-MAG.

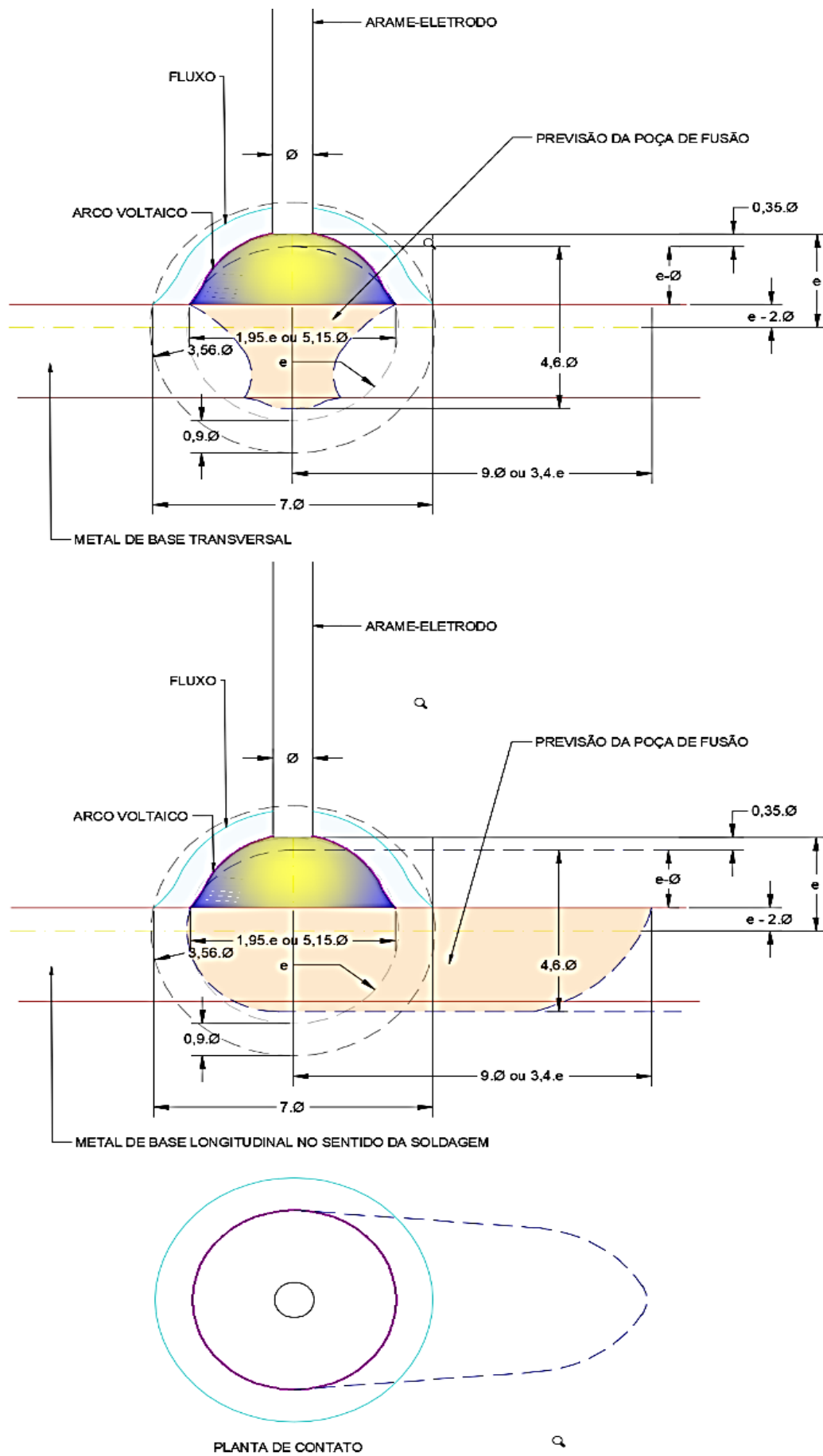
O tipo de fluxo admitido foi o elipsoide como os demais pesquisadores fizeram e como mostra a imagem da Figura 4.21 e a Figura 4.22; o esquema; de acordo com o percebido nos experimentos de soldagem, está na fase metodológica. Esse modelo combina duas elipsoides diferentes, sendo uma no quadrante frontal ao arame-eletrodo e a outra no quadrante anterior (KAMALA e GOLDAK, 1993) e (KIM, IM e KIM, 2005).

Figura 4.21 - Fluxo elipsoide



Fonte: (XIRIS AUTOMATION INC., 2021).

Figura 4.22 - Dimensões do Fluxo elipsoide baseado nos experimentos.



Fonte: Elaborada pelo autor

As alterações nas propriedades termofísicas do aço, em função da variação da temperatura, foram consideradas como análise não linear (NASER, 2018), sem consideração do fluxo de fluido sobre a poça de fusão, pois se trata de outro estudo particular e específico, com outra análise complementar.

E, para constituir esses parâmetros, a leitura dos artigos publicados por (ROCHA, ANTONINO, *et al.*, 2018) , (BRICKSTAD e JOSEFSON, 1998) e (FANG, 2015) – os quais se encontram no Anexos A, B e C –, usando valores dessas constantes, serviram para balizar a modelagem por elementos finitos.

Com o emprego do aplicativo *Thermo Calc academic* versão\2022a, imputando as propriedades químicas apuradas experimentalmente, obtiveram-se os cálculos das propriedades dos materiais, baseados nos aços ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300, e comparando-se com os usados nos artigos, composição esta, relativa aos valores, apresentada na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Coeficientes termofísicos

| <b>Propriedades dos aços estruturais</b> |            |                                         |                      |      |      |      |      |          |          |          |
|------------------------------------------|------------|-----------------------------------------|----------------------|------|------|------|------|----------|----------|----------|
| <b>Descrição</b>                         | <b>Cód</b> | <b>Unidade</b>                          | <b>Comportamento</b> |      |      |      |      |          |          |          |
| Temperatura                              | T          | °C                                      | 20                   | 250  | 500  | 750  | 1000 | 1500     | 1700     | 2500     |
| Condutividade térmica                    | k          | W . m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup>  | 51                   | 48   | 40   | 27   | 31   | 37       | 42       | 49       |
| Densidade                                | $\rho$     | Kg . m <sup>-3</sup>                    | 7863                 | 7790 | 7695 | 7632 | 7593 | 7350     | 7300     | 7090     |
| Calor específico                         | c          | J . kg <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> | 468                  | 495  | 540  | 685  | 680  | 670      | 790      | 830      |
| Coeficiente de Poisson                   | $\nu$      | -                                       | 0,29                 | 0,22 | 0,31 | 0,35 | 0,40 | 0,49     | 0,50     | 0,50     |
| Coeficiente de dilatação térmica         | $\alpha$   | °C <sup>-1</sup><br>(x e-05)            | 1.16                 | 1.22 | 1.39 | 1.48 | 1.34 | 1.33     | 1.32     | 1.31     |
| Módulo de elasticidade                   | E          | Kg . m <sup>-2</sup><br>(x e+10)        | 2.16                 | 1.76 | 1.20 | .713 | .133 | 2.00e-03 | 1.30e-03 | 1.00e-03 |
| Tensão de escoamento                     | $\sigma_e$ | Kg . m <sup>-2</sup><br>(x e+07)        | 2.53                 | 2.12 | 1.44 | .84  | .163 | 0.01     | -        | -        |

Fonte: Elaborada pelo autor

Para equacionar o modelo como proposto, é razoável admitir a transferência de calor por condução e convecção, a fim de se obter o resultado da variação da temperatura em relação ao tempo.

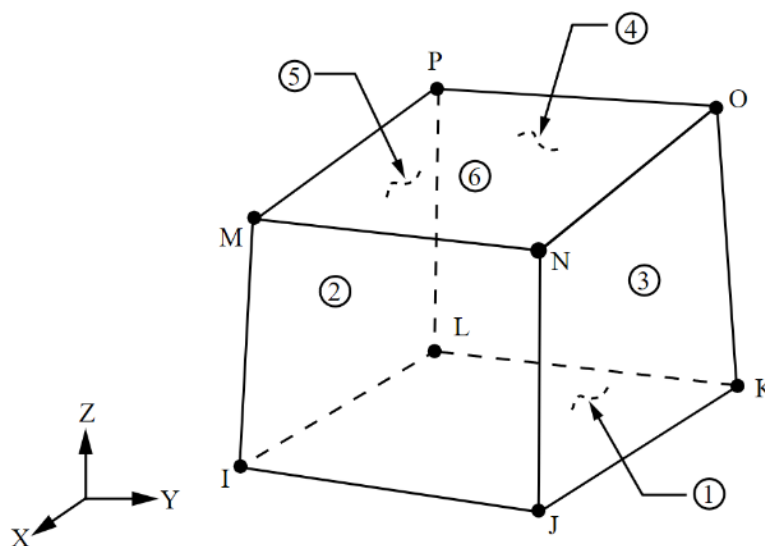
Assim, essa modelagem servirá para simular a presença do calor latente na poça de fusão e do calor sensível dos sistemas, com a inserção de dados no *software* de elementos finitos ANSYS<sup>(R)</sup> Workbench.

#### 4.10.3 Malha de elementos finitos da Peça de teste

O perfil estrutural de chapa de aço conformada a frio tipo “U”, soldado depois de modelado, com o foco de atender à necessidade do desenvolvimento de procedimentos com precisão aceitável com respeito à realidade, usa o método de cálculos nos sistemas contínuos. Foi formada a malha, com a divisão de um número finito de partes conectadas entre si por intermédio de nós apropriados ao caso deste estudo, com as proeminentes grandezas físicas imprescindíveis aos cálculos para a simulação do processo de soldagem GMAW-MAG (GOLDAK e AKLAGHI, 2005).

Com a opção do elemento SOLID70, os parâmetros associados à soldagem são interpretados como parâmetros de fluxo de fluido que retorna a melhor resposta, por ser de formulação linear (SCHULDES, 2017). A Figura 4.23 enfoca esse elemento, esquematicamente:

Figura 4.23 - Elemento finito do tipo SOLID70



Fonte: ANSYS (2022).

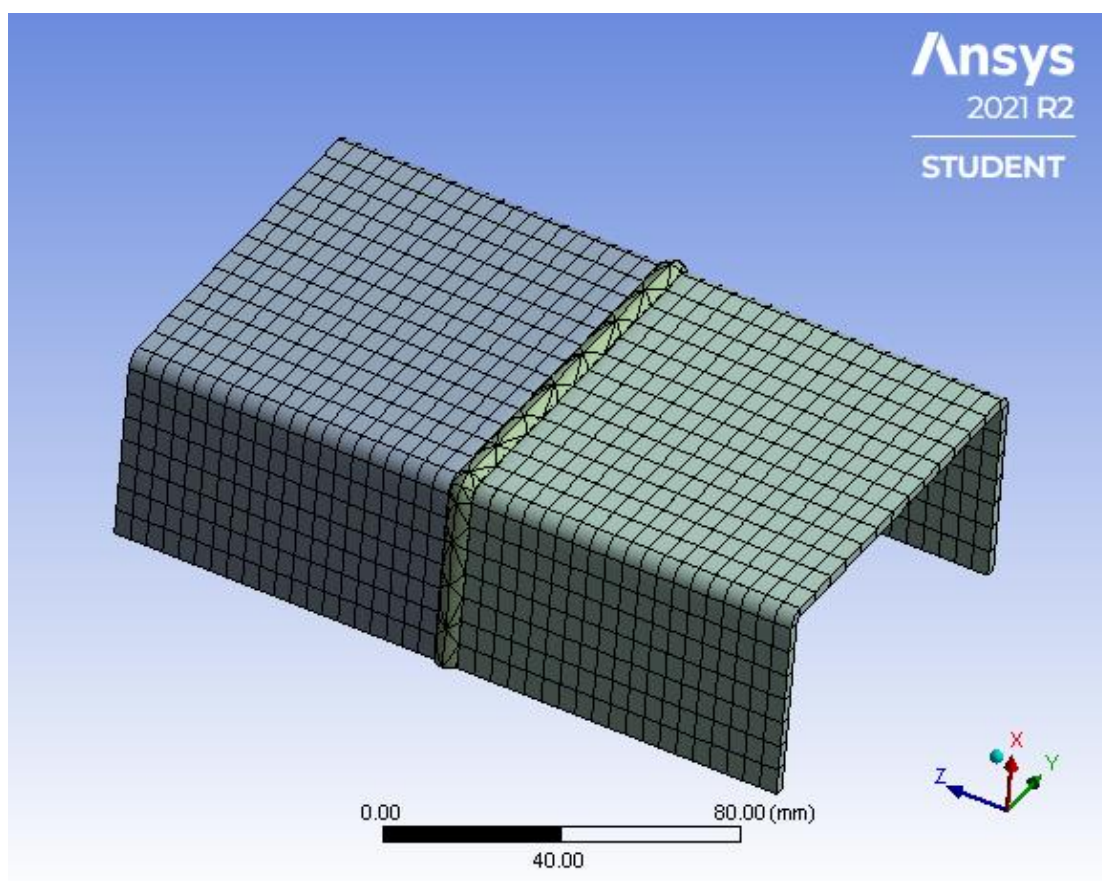
Isso levou à seleção do tipo de elemento cúbico para a discretização do modelo, no qual o calor é a principal grandeza a ser avaliada; segundo o fabricante desse *software* (ANSYS), um dos recomendados é o SOLID70, que tem capacidade de condução térmica 3D, usada pelos pesquisadores da área. O elemento tem oito nós com um único grau de liberdade, a temperatura, em cada nó, perfazendo dessa forma um total de oito graus de liberdade. Ele é aplicável a uma análise térmica 3D, de estado estacionário ou transiente. Pode compensar, igualmente, o fluxo de calor e, como contém a mesma configuração do elemento sólido condutor, pode comutar estruturalmente, permitindo a relação com um elemento estrutural equivalente

como SOLID185 empregado na modelagem 3D de mesmas características volta das para as translações nas direções nodais x, y e z.

O SOLID185 contempla a plasticidade, a hiperelasticidade, o enrijecimento por tensão, a fluência, a grande deflexão, a grande capacidade de deformação e a formulação mista para simular deformações e tensões de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis.

Com essa malha, o modelo contém 4829 elementos e 30869 nós, tendo sido determinado após a execução de testes de convergência, com a finalidade de encontrar a melhor discretização, a qual analisa a solução do problema. Na zona fundida e na zona termicamente afetada, a malha foi refinada, por serem regiões onde focaliza a soldagem. O incremento de tempo empregado foi de 0,001 s e o critério de convergência de 0,1 °C, porque a solução de um determinado passo converge quando, em cada nó, a diferença de temperatura da iteração atual para a anterior é menor que 0,1 °C, conforme indica a Figura 4.24:

Figura 4.24 - Malha de elementos finitos



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.10.4 Campo térmico

Em se tratando de soldagem por fusão, a existência da fonte responsável pela inserção de calor concentrado com alta intensidade aplica-se à junta com material de adição.

Essa fonte de calor se deslocará sobre o perfil de chapa de aço dobrada, ocorrendo a condução de calor através dela, tendo em vista o tempo  $t$  e se relacionando a um sistema cartesiano tri-ortogonal  $(x, y, z)$ , que pode ser expresso pela equação 4.2 (WAINER, DUARTE e MELLO, 1992):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{teq} ; \text{ com } q = -k \nabla T \quad (4.2)$$

Onde:

- $T$  representa a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $q$  é a geração da fonte de energia no processo de soldagem em  $[\text{W}]$ ;
- $x, y, z$  são as coordenadas cartesianas triortogonais;
- $t$  é o tempo;
- $K_T$  a condutividade térmica;
- $\rho$  a densidade do material e
- $C_p$  se trata do calor característico do material.
- $Q_{teq}$  é quantidade de energia total equivalente.

#### 4.10.5 Fonte de calor

A equação 4.3 evidencia o cálculo da fonte de energia no processo de soldagem:

$$q = q_{arc} - q_i - \frac{\int h_c (T - T_0) dA}{\int dV} - \frac{\int \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) dA}{\int dV} \quad (4.3)$$

Onde:

- $q_{arc}$  é a potência gerada do arco elétrico em  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$ , assim como a fonte modelada por Goldak;
- $q_i$  é o fluxo de calor inicial, através da superfície;
- $h_c$  representa a transferência de calor cedidos ao ambiente por convecção e
- $\sigma \varepsilon$  representa a radiação.

A simulação do movimento da fonte de calor é concebida de modo natural, em que o movimento da tocha o fluxo de calor é aplicado consecutivamente ao conjunto de finitos nós. Nesse momento é que se inicia a instalação das tensões residuais oriundas das retrações. A solução foi obtida a partir do estudo da equação geral do problema térmico de calor,

representada através da Equação 4.4:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f_f \eta UI \frac{6\sqrt{3}}{a_f b c \pi^{\frac{3}{2}}} e^{\left( \frac{-3(x-vt)^2}{a^2} \right)} e^{\left( \frac{-3y^2}{b^2} \right)} e^{\left( \frac{-3z^2}{c^2} \right)} \\ - q_i - \frac{\int h_c (T - T_0) dA}{\int dV} - \frac{\int \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) dA}{\int dV} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Onde:

- a, b e c correspondem aos valores independentes da dimensão do fluxo do tipo duplo elipsoide;
- $f_f$  é a repartição de energia em frente da tocha;
- $\eta$  é o rendimento do processo de soldagem;
- U é a tensão elétrica;
- I é a corrente;
- x, y e z são as coordenadas;
- c é calor específico;
- v é a velocidade de soldagem;
- $K_T$  é a difusividade térmica;
- $a_f$  se correlaciona ao fator de forma da projeção da elipse na superfície à frente do fluxo;
- $q_i$  é o fluxo de calor inicial;
- $h_c$  é a convecção;
- $\sigma \varepsilon$  é a radiação e
- $\rho$  é a densidade do material.

Esse modelo foi também realizado por Robert Feng em chapa plana de 6 mm de espessura, nas dimensões de 200 x 200 mm, baseado nas mesmas equações, parâmetros e coeficientes físicos para outro tipo de aço, sem validar o processo de soldagem a arco elétrico SMAW (ROBERT, 2015).

Outros pesquisadores utilizaram as equações, variando os parâmetros, em razão do processo de soldagem ou do tipo de aço em seus coeficientes físicos, como İlker Eren, que realizou a modelagem em chapas planas de 200 x 300 mm, com solda de filete no processo de soldagem GMAW, porém, empregando idênticas equações e parâmetros e validando o processo pelo escaneamento, com variação das espessuras das chapas em 3, 5 e 8 mm e margem de erro abaixo de 0.094 mm (İLKER e MELIKE SULTAN KARASU, 2022).

Zhu e Sheng também adotaram a modelagem da simulação da soldagem, para validar a microestrutura do cordão de solda, no processo de soldagem GMAW, chegando à conclusão de

que o procedimento conduziu à forma de prever a propriedade geométrica e microestrutural da solda em alumínio (ZHU, 2013).

Baidya Saha e seu grupo usaram equações semelhantes, com validação estatística na simulação de soldagem GMAW, conseguindo boa precisão com imagens de qualidade razoável; o interessante foi a aproximação dos valores dada pela regressão estatística (BAIDYA, SEIICHIRO, *et al.*, 2017).

Zhao e Huihui fizeram a modelagem nos mesmos moldes de equações para o processo de soldagem GMAW, com a intenção de estudar os resultados de tensões e transferência de calor, no multipasse de solda sobreposta em coluna (ZHAO, ZHANG, *et al.*, 2012).

Ramirez (2020) estudou identicamente, baseado no mesmo equacionamento em chapa plana no aço de elevada resistência Hardox, no sentido de modelar a simulação de soldagem GMAW, para prever a distorção e a tensão residual advindas do processo.

Segundo Derakhshan, em seu trabalho experimental, semelhantemente utilizou as mesmas equações de transferência de calor para o modelamento da soldagem por contato GMAW, como a *laser SAW*, na placa de aço carbono, validando a tensão pelo teste de tração e a distorção por sensor ótico a laser, sendo que observou diferença de até 21% na modelagem (DERAKHSHAN, YAZDIAN, *et al.*, 2018).

O ANSYS não realiza esse movimento de forma automática, sendo necessária a inserção das variáveis do equacionamento implementado como uma sub-rotina, no qual realizará essa tarefa. Essa sub-rotina baseada na mesma equação é uma extensão denominada *Motion Heat*, a qual aplica sequencialmente o fluxo de calor aos nós, em função do tempo, de acordo com a velocidade de soldagem adotada (BRICKSTAD; JOSEFSON, 1998).

A Figura 4.25 apresenta o modelo de fonte de calor em movimento pela tocha, no processo de soldagem GMAW-MAG, simulada pela dupla-elipsoide de Goldak:

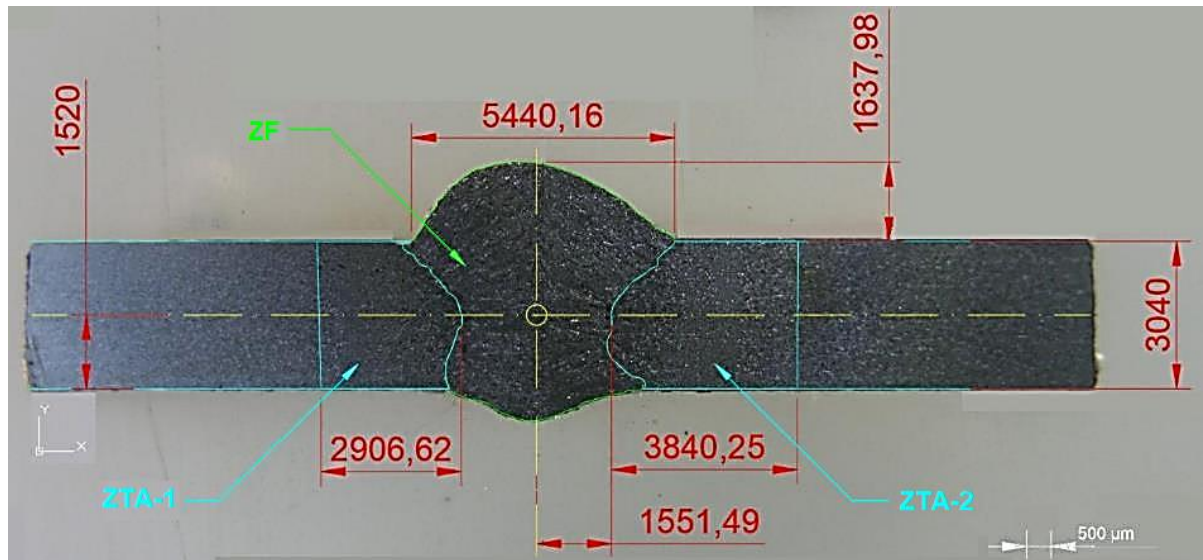
Figura 4.25 - Fluxo de energia na soldagem GMAW-MAG



Fonte: Elaborada pelo autor

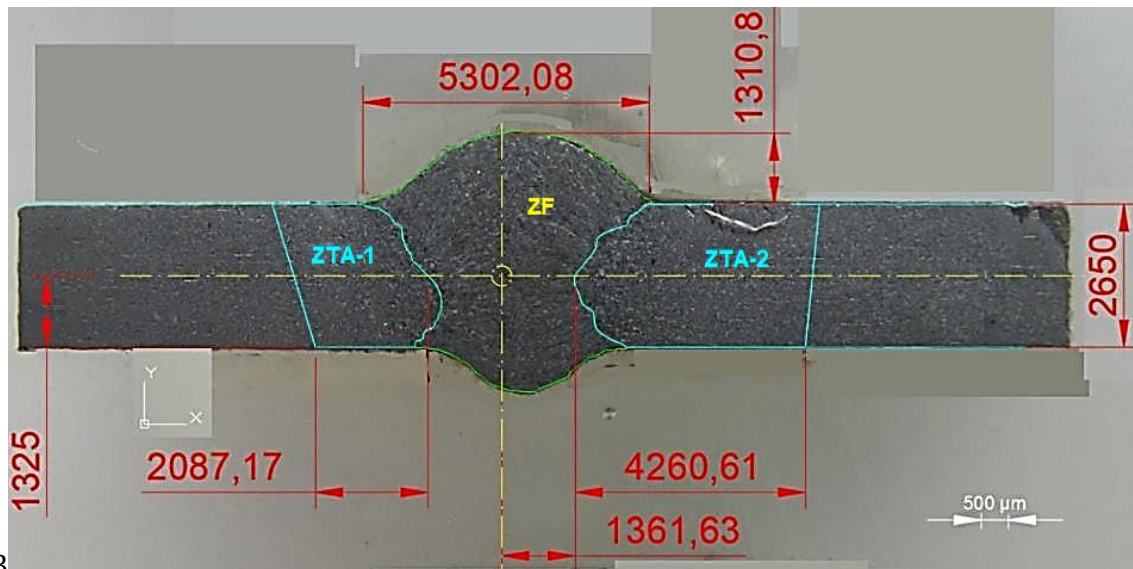
Os parâmetros da fonte de energia como b (distância do centro do cordão ao fim do reforço) e c (medida da profundidade do cordão) foram medidos pela macrografia da poça de fusão da junta soldada, conforme se observam nas Figuras 4.26 e 4.27:

Figura 4.26 - Medidas da junta soldada do aço ASTM A36, ampliadas 13 x



SZF = 19,0088 mm<sup>2</sup>; Circunferência = 18,8494 mm; SZTA-1 = 7,8144 mm<sup>2</sup>; Perímetro = 11,4388 mm; SZTA-2 = 10,6158 mm<sup>2</sup>; Perímetro = 12,8675 mm. Após ataque do ácido nital a 5%  
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.27 - Medidas da junta soldada do aço CSN Civil 300, ampliadas 13 x



SZF = 14,8909 mm<sup>2</sup>; Circunferência = 18,0498 mm; SZTA-1 = 6,0901 mm<sup>2</sup>; Perímetro = 9,8848 mm; SZTA-2 = 10,4952 mm<sup>2</sup>; Perímetro = 12,9254 mm. Após ataque do ácido nital a 5%  
Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4.6 resume os valores paramétricos geométricos médios experimentais, para a definição do contato do fluxo da fonte de calor de Goldak sobre a peça de trabalho, no ANSYS, tanto para os aços ASTM A36 como para o ARBL CSN Civil 300.

Tabela 4.6 - Parâmetros geométricos para os aços ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300

| Tipo de aço | ASTM A36 | ARBL CSN Civil 300 | Admitidos | Unidade |
|-------------|----------|--------------------|-----------|---------|
| Parâmetros  | Valores  |                    |           |         |
| B           | 0.00272  | 0.00265            | 0.00300   | [m]     |
| C           | 0.00304  | 0.00266            | 0.00285   | [m]     |
| Af          | 0.00152  | 0.00133            | 0.00143   | [m]     |
| Ar          | 0.00608  | 0.00532            | 0.00570   | [m]     |
| Ff          | 0.40000  |                    |           |         |
| Fr          | 1.60000  |                    |           |         |

Onde  $b$  é a semilargura da poça de fusão,  $c$  é a profundidade da zona fundida,  $af$  é o comprimento da poça de fusão em frente da tocha,  $ar$  é o comprimento da poça de fusão atrás da tocha,  $ff$  é a repartição de energia em frente da tocha e  $fr$  é a repartição de energia atrás da tocha.

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.10.6 Condição de contorno térmica

As perdas de calor na convecção e radiação com o ambiente em seu entorno, provenientes do processo de soldagem, são representadas pelas expressões 4.5 e 4.6, respectivamente:

$$\phi c = h_c(T - T_\infty) \quad (4.5)$$

$$\Phi_r = \sigma' \varepsilon' (T^4 - T_\infty^4) \quad (4.6)$$

Onde:

- $h_c$  é o coeficiente de convecção;
- $T$  é a temperatura da superfície do perfil metálico;
- $T_\infty$  é a temperatura do fluido envolvente ( $T_\infty = 27^\circ\text{C} \approx 300^\circ\text{K}$ );
- $\sigma'^{11}$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma' = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) e
- $\varepsilon'^{12}$  é a emissividade do material ( $\varepsilon = 0,91$ ) (ZAREIAN, 2020).

A condição de contorno concernente à radiação é linear, pois a parcela convectiva e a radiação são simplificadas no modelamento, por não interferir significativamente nos resultados.

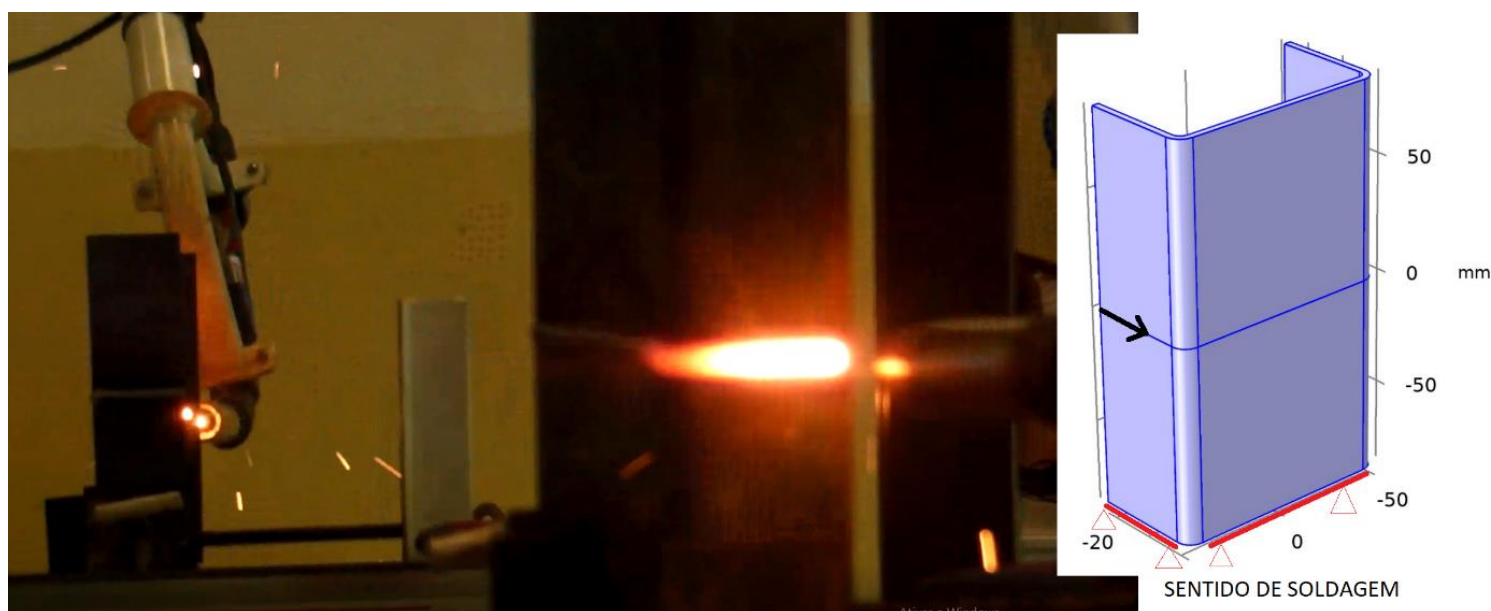
<sup>11</sup>  $\sigma$  é letra grega que representa a constante de Stefan-Boltzmann; para fazer distinção entre as tensões residuais, foi descrita como  $\sigma'$ .

<sup>12</sup>  $\varepsilon$ , representa a emissividade, porém se usa  $\varepsilon'$  a fim de distinguir a deformação específica do aço.

#### 4.10.7 Condição de contorno estrutural

A fixação da Peça de teste foi considerada na modelagem como uma restrição de fixação, simplesmente para fazer permanecer a peça sempre no mesmo lugar que o robô passar e, portanto, todo restante ficou livre. Partindo dessa hipótese, em que a peça elaborada foi pinçada em um ponto, por meio de suas arestas inferiores de menor comprimento, localizadas na base do perfil dobrado, garantiu-se, dessa maneira, a inexistência de graus de liberdade diante do modelo analisado, como apresentado na Figura 4.28:

Figura 4.28 - Condição de fixação da Peça de teste



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.10.8 Tensão residual

A tensão residual é baseada na equação 3.33, onde a resultante das forças nas direções  $x, y, z$  corresponde a uma equivalente, que é a tensão instalada nos seus determinados pontos (JIAN, WU, *et al.*, 2015). Ou seja, é a tensão que encontrou um ponto de equilíbrio, em função das dilatações e retrações restringidas pelo material num tempo bem longo.

#### 4.10.9 Deformação

A deformação é o produto da equação 3.32, devido às expansões e retrações, correspondente às tensões residuais, durante um longo tempo (BACHMANN, AVILOV, *et al.*, 2011).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Atendendo ao objetivo da realização da soldagem e análise dos resultados do processo de soldagem, o produto está representado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Procedimento de soldagem elaborado no conjunto de Peças de teste A2

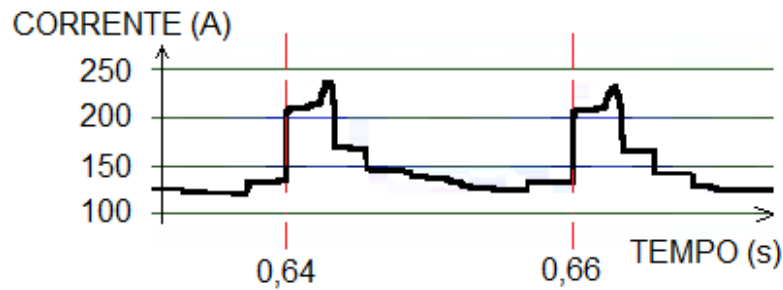


Fonte: Elaborada pelo autor

Neste trabalho, foram produzidas, durante o processo de soldagem, soldas uniformes e padronizadas com velocidades constantes, mantendo o tempo de execução em 18,7 s. Os volumes de deposição, consequentemente, também foram constantes e com aproveitamento total do consumível.

No aspecto atinente à estabilidade do arco elétrico, o ruído ininterrupto e cadenciado, produzido durante o processo de soldagem com o arco aberto, que permaneceu em torno de 85 DB, é uma referência observada pela curva de onda da intensidade de corrente, apontada na Figura 5.2, na qual o tempo de abertura do curto-circuito aconteceu a cada 0,02 s.

Figura 5.2 - Padrão de onda do processo de soldagem



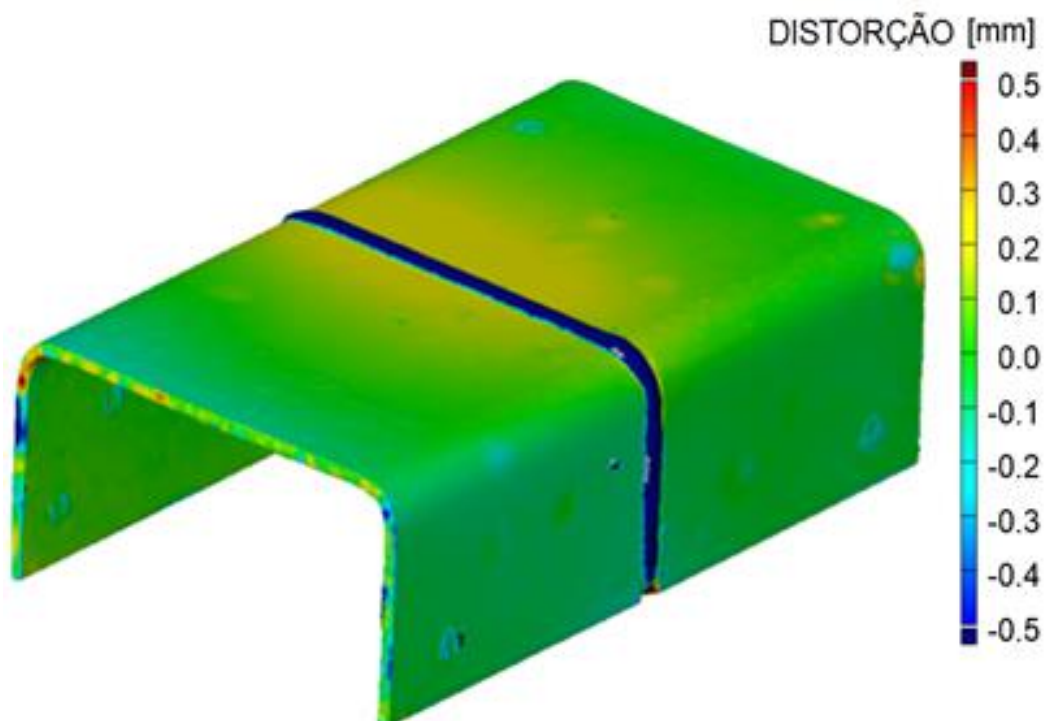
Fonte: Elaborada pelo autor

O fluxo do arco elétrico conservou uma altura média de 1 mm, verificado e registrado nas filmagens realizadas no laboratório, durante a soldagem. Estimou-se o tempo de resfriamento da peça, após soldagem, na média de 27 minutos, até atingir um pouco mais que a temperatura-ambiente, de aproximadamente 27 °C, medida por um termômetro a *laser*.

## 5.2 MÉTODO DE ESCANEAMENTO A *LASER*

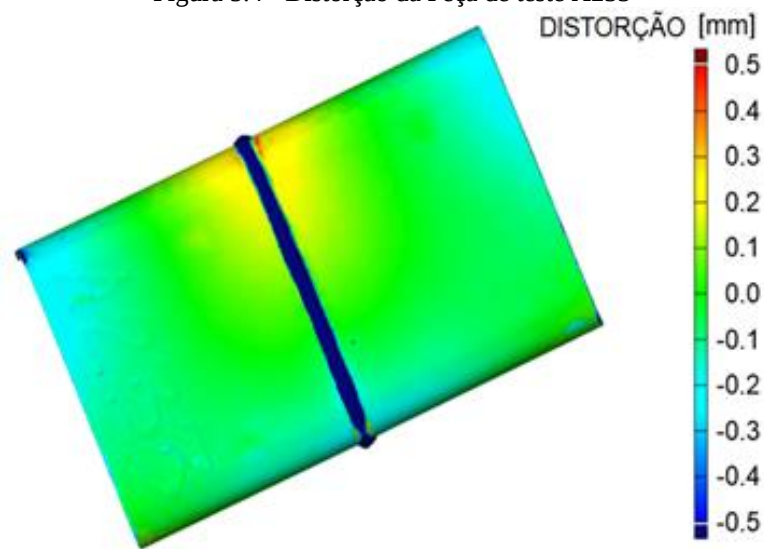
A análise das distorções, por esse método a *laser*, mediu os valores das deformidades desenvolvidas pelo aplicativo Atos, demonstrando, nas Peças de teste, respectivamente, indicados nas Figuras 5.3, conjunto A1; Figura 5.4, conjunto A2; Figura 5.5, conjunto B1; Figura 5.6, conjunto B2, com seus aspectos após a soldagem.

Figura 5.3 - Distorção da Peça de teste A133



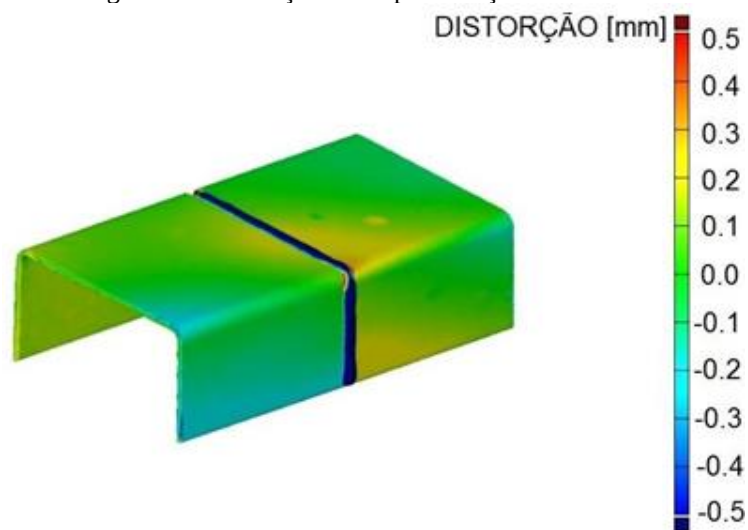
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.4 - Distorção da Peça de teste A233



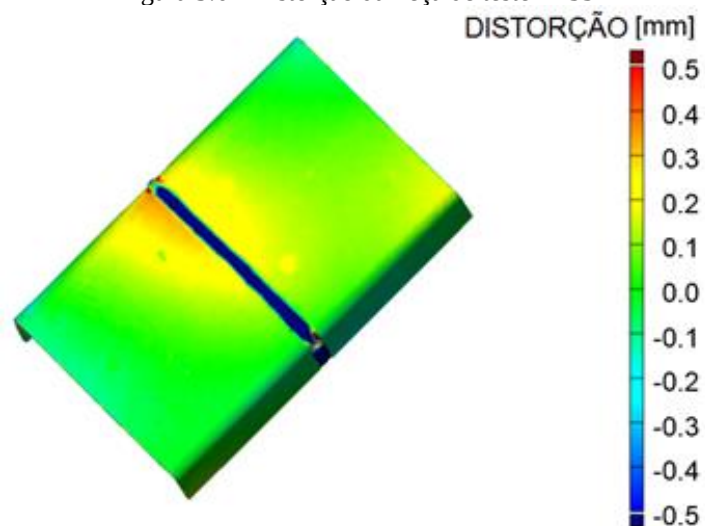
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.5 - Distorção do corpo da Peça de teste B133



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.6 - Distorção da Peça de teste B233



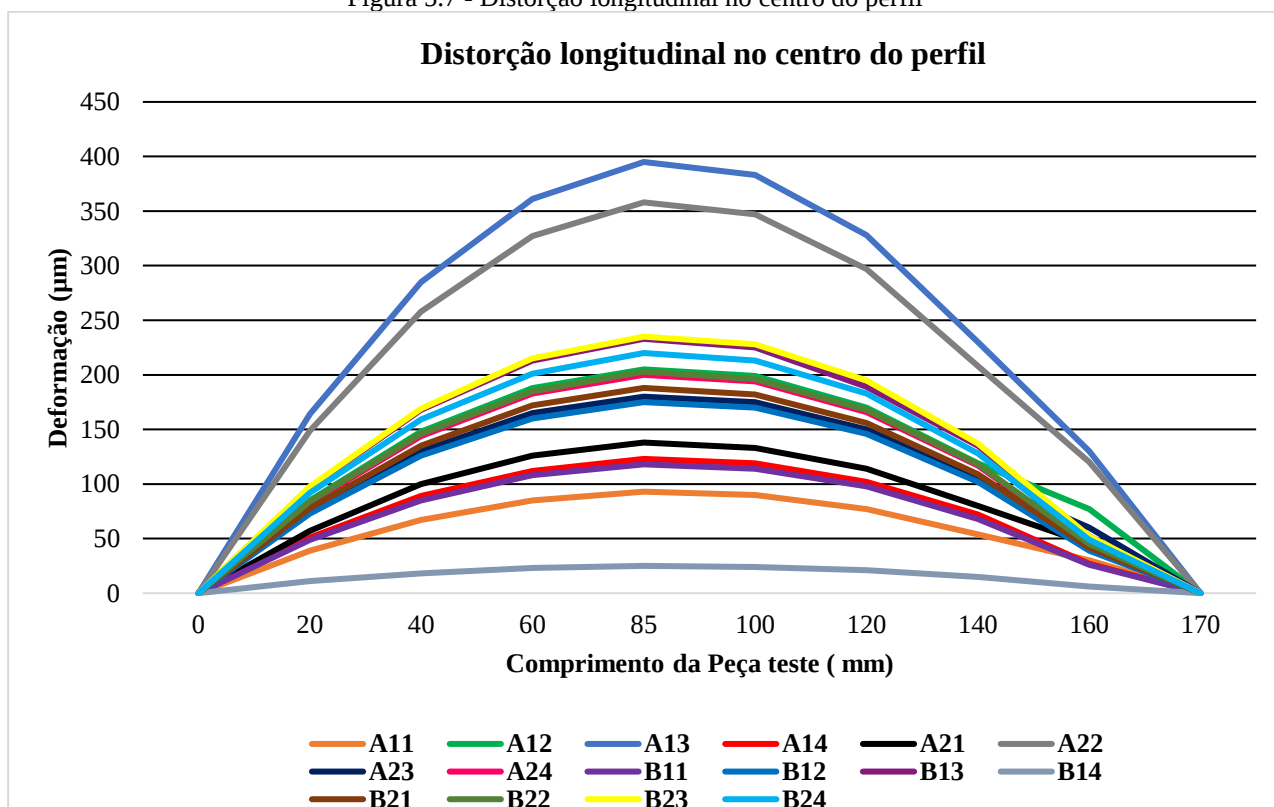
Fonte: Elaborada pelo autor

É possível observar a semelhança nas distorções produzidas, apresentadas na Figura 5.3 e na Figura 5.4 para o aço ASTM A36, e, no caso das Figuras 5.5 e 5.6, de semelhante modo, as deformidades referentes ao grupo da Peça de teste no aço ARBL CSN Civil 300, as quais acompanharam na mesma proporcionalidade, estando anexado no Apêndice F o mapeamento dos valores dos deslocamentos das Peças de teste.

Quanto à distorção próxima à linha do cordão de solda, de modo geral, houve um comportamento semelhante para os dois tipos de aços, sendo que o aço ARBL CSN Civil 300 com o eletrodo AWS ER70S-6, da Figura 5.5, apresentou acréscimo desprezível de 0,02 mm, sendo que essa distorção ocorreu em uma área maior da Peça de teste, diferentemente da Figura 5.3, para o aço ASTM A36, tornando-se o menor no centro do perfil.

No entanto, a Figura 5.7 exhibe a deformidade, de forma côncava, representativa dos conjuntos soldados A11, A12, A13, A14, A21, A22, A23, A24, B11, B12, B13, B14, B21, B22, B23, B24, que evidenciam os empenamentos, passando pelo centro longitudinal do perfil. Ademais, foram organizados por tipos de junta e respectivos arame-eletrodos AWS ER70S-6 e AWS ER70S-3 utilizados, onde os conjuntos soldados A11, A21, B11 e B21 são os tipos de juntas com três pontos, A12, A22, B12 e B22 são as peças de teste com junta de cinco pontos, A13, A23, B13 e B23 são as com tipo de junta seccionada e A14, A24, B14 e B24 são as com juntas experimentais.

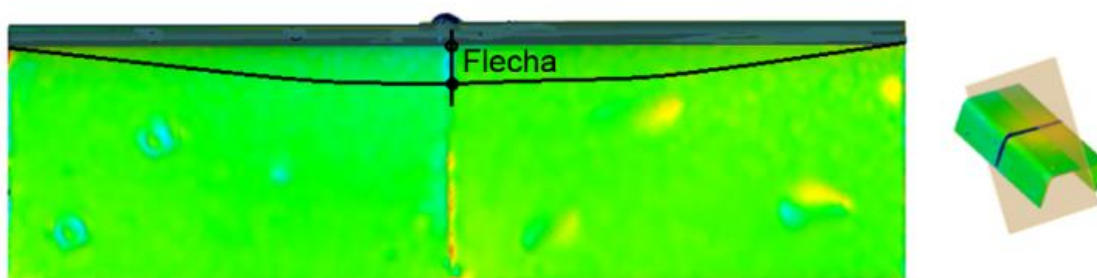
Figura 5.7 - Distorção longitudinal no centro do perfil



Fonte: Elaborada pelo autor

Foram compilados os resultados médios da depressão, devido à distorção, esquematizada na Figura 5.8 e estabelecida na Tabela 5.1.

Figura 5.8 - Flexão na Peça de teste



Fonte: Elaborada pelo autor

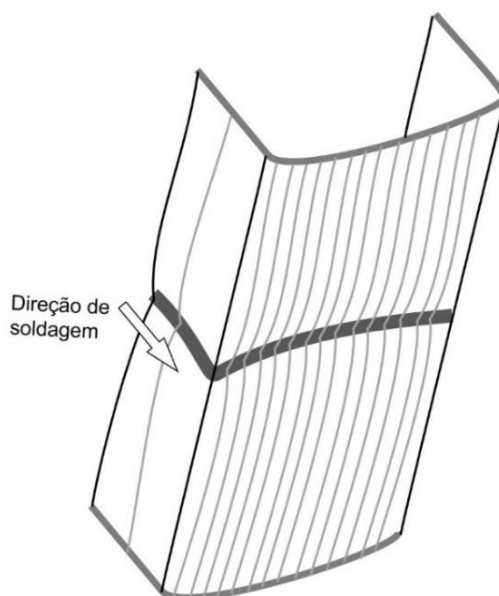
Tabela 5.1 - Valores médios da flexão no perfil devido à distorção

| Conjunto de Peça de teste | Flecha ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------|--------------------------|
| A1                        | 271                      |
| A2                        | 229                      |
| B1                        | 401                      |
| B2                        | 318                      |
| Média geral               | 304,75                   |

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 5.9 ilustra os valores de deslocamentos baseado nos dados das Figuras 10.46 – 10.54, na Tabela 10.7, do apêndice F.

Figura 5.9 - Ilustração baseada nos dados das figuras 10.46 - 10.54 do apêndice.



Fonte: Elaborada pelo autor

### 5.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A Tabela 5.2 comporta as medições médias para os aços ASTM A36 (A) e CSN Civil 300 (B):

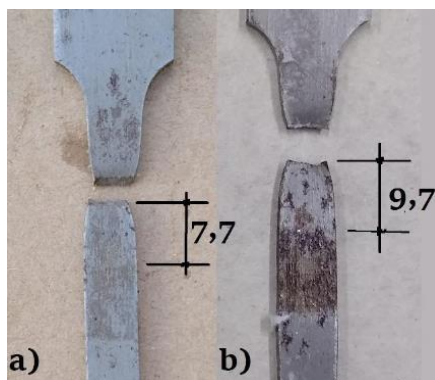
Tabela 5.2 - Dados de resistência mecânica dos aços ASTM A36 e CSN Civil 300 obtidos dos fornecedores e medidos nos ensaios de tração (peças de teste soldadas)

| Metal de base | Dados obtidos dos fornecedores |                                   | Dados obtidos nos ensaios de tração                                                                                                   |                                                                                                                                       |
|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|               | Tensão de escoamento, MPa      | Tensão limite de resistência, MPa | Tensão de escoamento, MPa                                                                                                             | Tensão limite de resistência, MPa                                                                                                     |
| ASTM A36      | 282                            | 398                               | 202, 199, 190, 292, 199, 314, 241, 242, 222, 259, 250, 245, 225, 250, 212, 220, 200, 185, 205, 240, 184<br><b>184 - 314</b>           | 300, 310, 302, 403, 305, 413, 349, 345, 326, 366, 347, 352, 347, 360, 322, 340, 316, 290, 316, 349, 294<br><b>290 - 413</b>           |
| CSN Civil 300 | 317                            | 432                               | 325, 257, 311, 323, 317, 344, 304, 333, 266, 324, 310, 308, 299, 315, 307, 319, 332, 321, 285, 312, 306, 298, 289<br><b>257 - 344</b> | 424, 358, 419, 420, 417, 436, 421, 434, 430, 408, 414, 379, 415, 414, 412, 420, 418, 426, 419, 417, 411, 395, 397<br><b>358 - 436</b> |

Fonte: Elaborada pelo autor.

O comportamento dos materiais frente ao esforço de tração constituiu um padrão bem definido de rompimento, logo após o cordão de soldagem, para ser preciso no limiar da ZAC com o MB, em torno de 7,7 mm de distância livre do cordão de solda para o aço ASTM A36 e 9,7 mm para o ARBL CSN Civil 300, como mostra a Figura 5.10:

Figura 5.10 - Rompimento das Peças de teste: a) ARBL CSN Civil 300 e b) ASTM A36



Fonte: Elaborada pelo autor

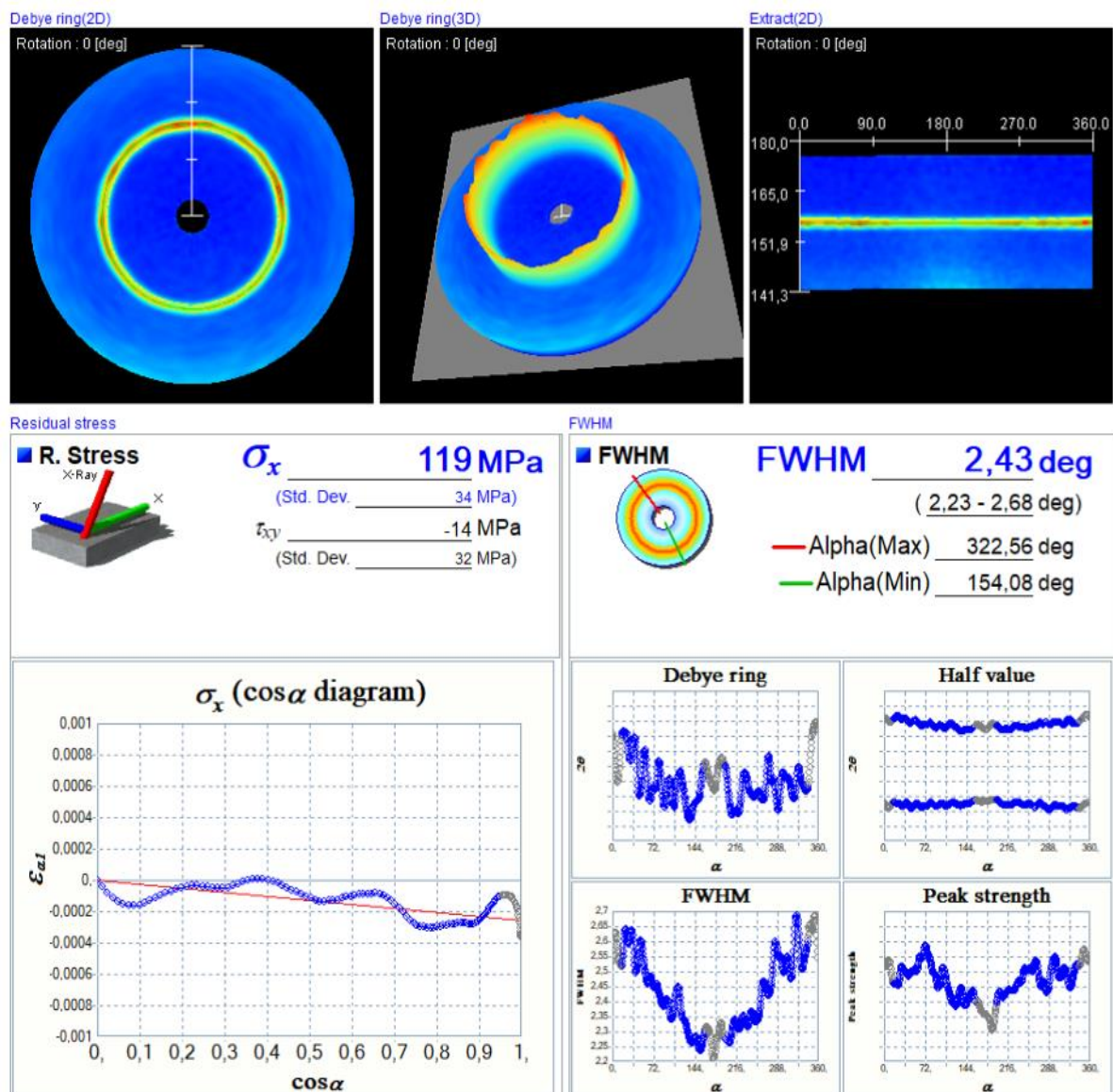
## 5.4 MÉTODO XRD NA TENSÃO RESIDUAL

Quanto à análise das tensões residuais presentes nas Peças de teste, o equipamento de raio-X (XRD) mensurou os valores dessas tensões, com os quais se implementou o tratamento estatístico desses dados recebidos do laboratório, que compôs o mapeamento superficial.

Admitindo-se a mesma referência cartesiana global da modelagem, tem-se que o sentido transversal corresponde à direção x para a tensão residual mensurada  $\sigma_x$ , enquanto o sentido longitudinal em relação à altura do perfil dobrado, na direção z, corresponde então ao  $\sigma_y$ .

Exemplo de uma das leituras recebidas é focalizado na Figura 5.11, com as tensões residuais nos planos principais direcionais de x e y, com as respectivas representações dos anéis de Debye-Scherrer:

Figura 5.11 - Tensão residual avaliada pelo equipamento  $\mu$ -X360s, no ponto inicial transversal da Peça de teste A244, ao lado do cordão de solda

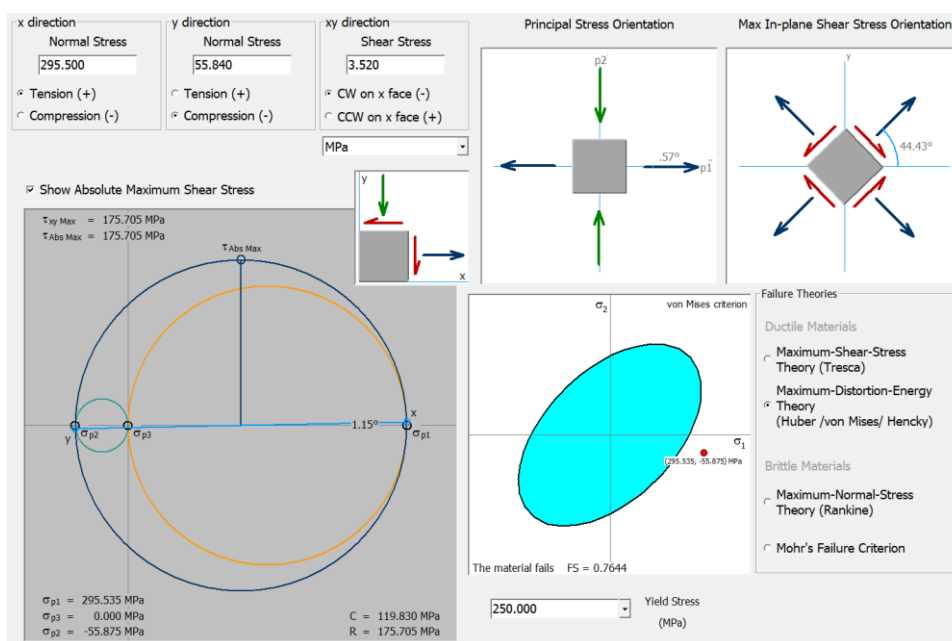


Fonte: Elaborada pelo autor

Partindo desse princípio, tabularam-se os resultados para reconhecimento das tensões residuais, estatisticamente, e analisando parte a parte dos conjuntos de Peças de teste A e B, referidos aos aços ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300.

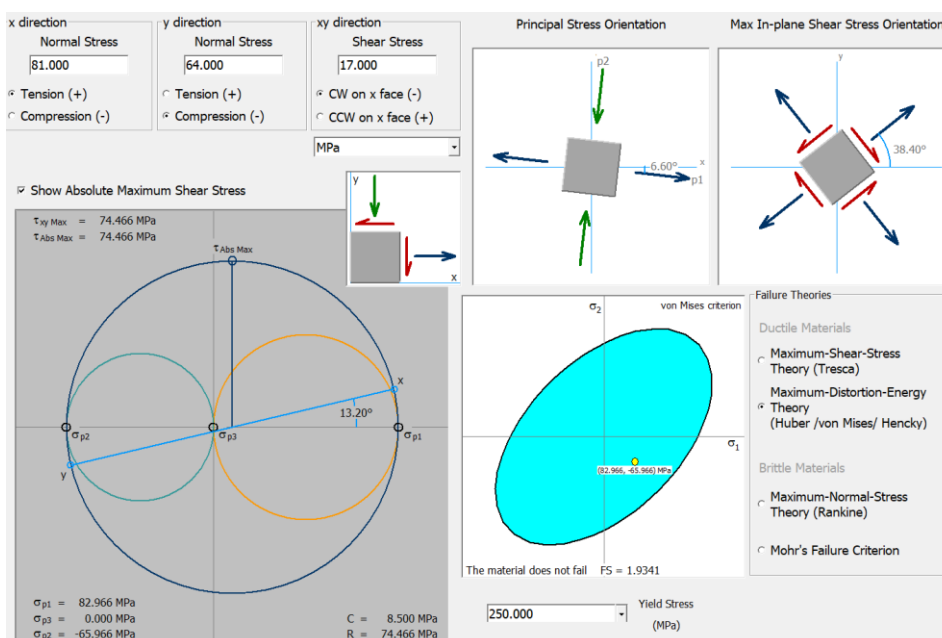
Assim, obtiveram-se os valores médios próximos ao cordão de solda, mostrado na Figura 5.12, e no metal de base original, conforme se tem na Figura 5.13, para melhor entendimento da distribuição de tensões residuais equivalentes, começando pela curva da dobra do perfil estrutural ASTM A36:

Figura 5.12 - Tensão residual média situada nas Peças de teste A, próxima ao cordão de solda



Fonte: Elaborada pelo autor

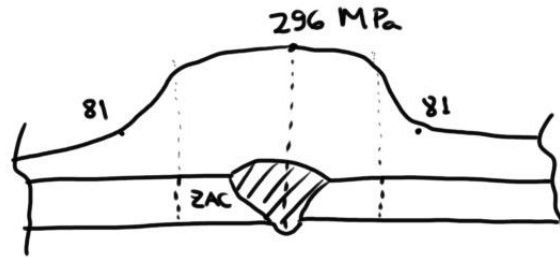
Figura 5.13 - Tensão residual média encontrada no metal de base das Peças de teste A



Fonte: Elaborada pelo autor

Após o processo de soldagem, o resultado da tensão residual média na região da solda registrou a tensão equivalente igual a 296 MPa, como se vê esquematicamente, na Figura 5.14:

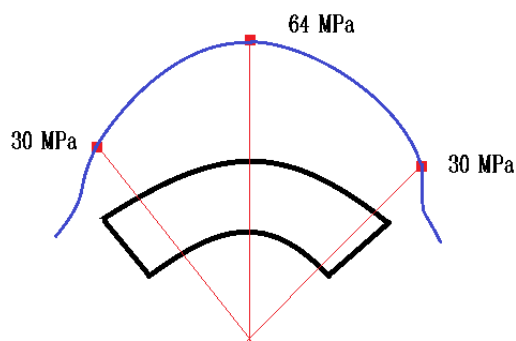
Figura 5.14 - Tensão residual no percurso da dobra



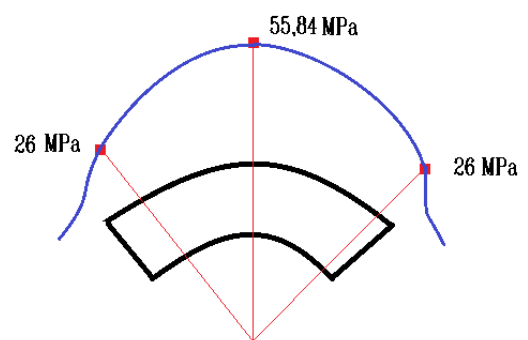
Fonte: Elaborada pelo autor

Na seção transversal da dobra, o desempenho da tensão residual medida foi como evidenciado na Figura 5.15, para facilitar a visualização foram projetadas as curvas de compressão e tração da mesma forma no desenho, com a sua devida indicação:

Figura 5.15 - Tensão residual média na dobra do perfil metálico ASTM A36

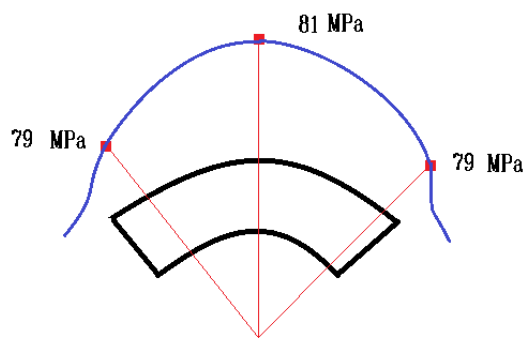


a) Tensão residual no metal de base pelo processo de dobramento

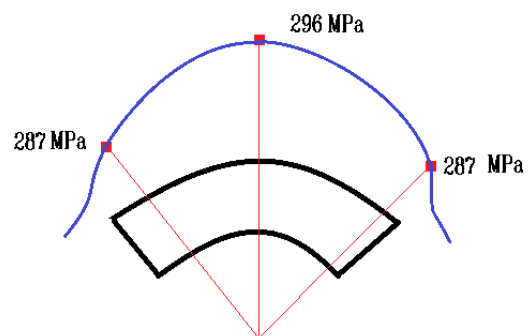


b) Tensão residual medida no contorno do cordão de solda com a ZAC

Compressão ao longo da solda (junta)



c) Tensão residual no metal de base



d) Tensão residual no limiar do cordão de solda

Tração ao longo da solda (junta)

Fonte: Elaborada pelo autor

Ademais, o resultado da tensão residual média,  $\sigma_x$ , nos planos de corte projetados, foi organizado como se encontra representado na Figura 5.16:

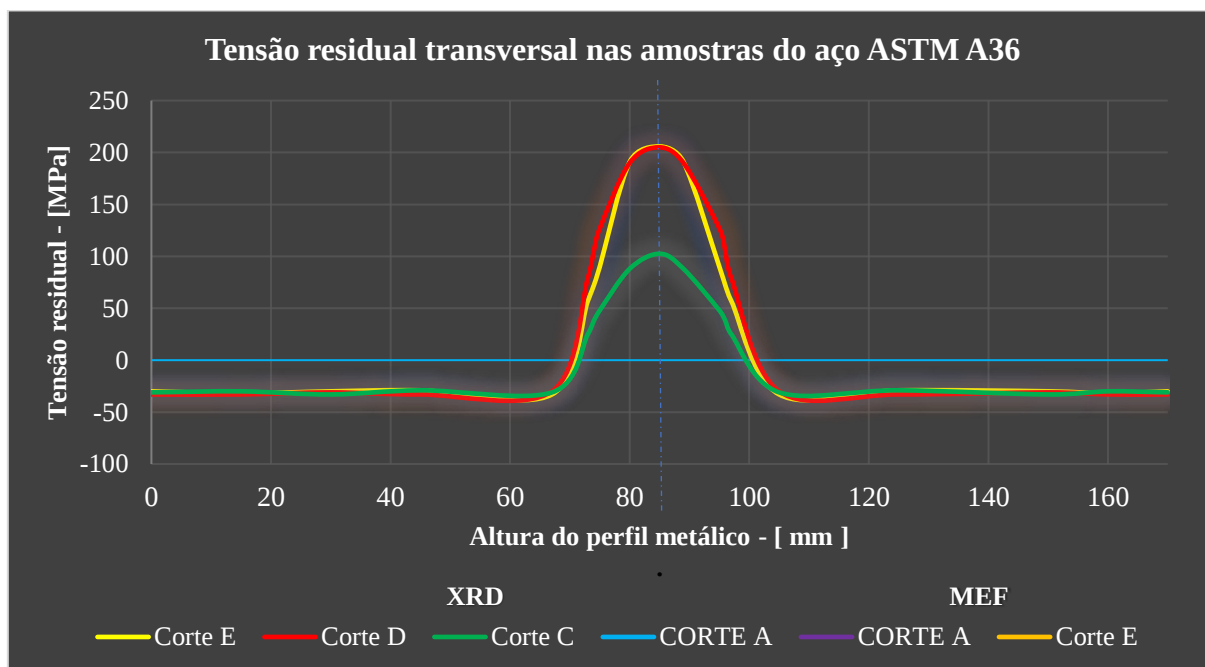
Figura 5.16 - Representação dos planos de corte na Peça de teste



Fonte: Elaborada pelo autor

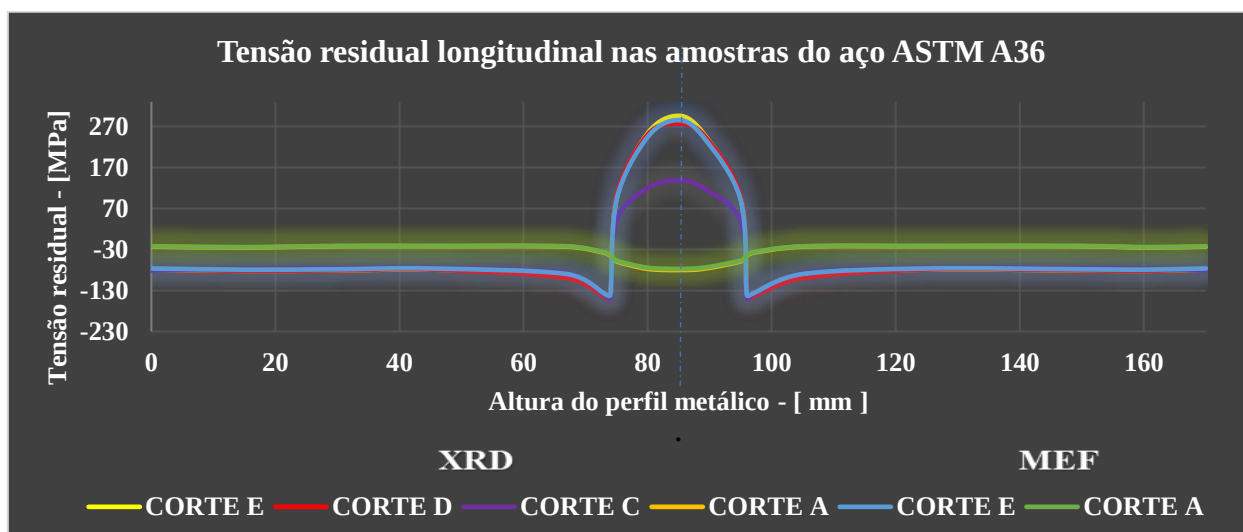
E, na sequência, as Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam os gráficos de tensões residuais médios mensurados, tanto para  $\sigma_x$  como para  $\sigma_y$  presentes nas Peças de teste:

Figura 5.17 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço ASTM A36



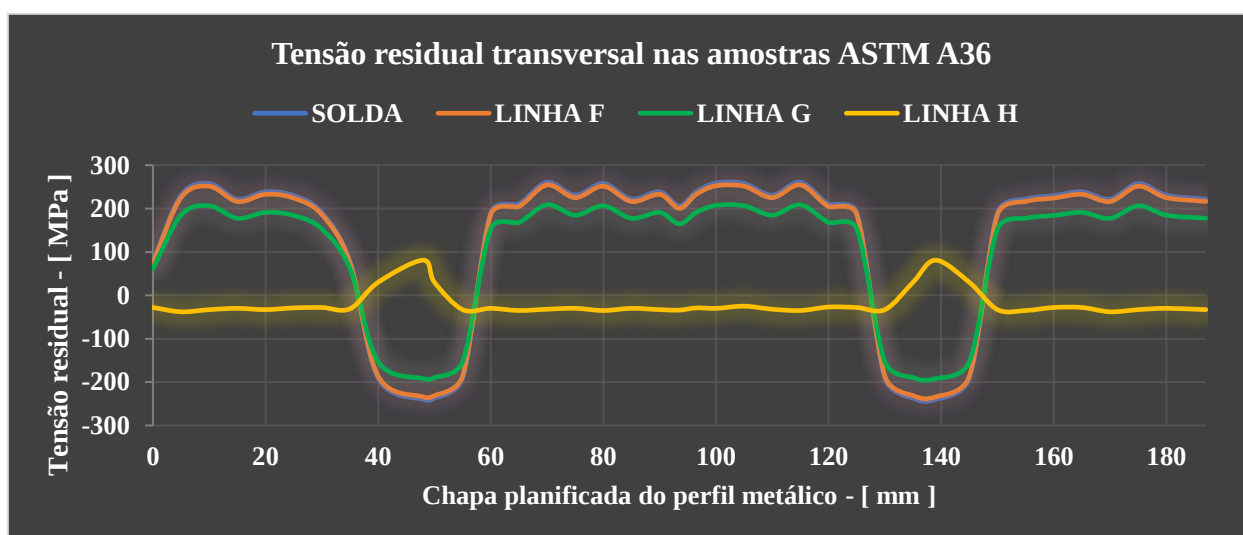
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.18 - Gráfico da tensão residual longitudinal nas amostras do aço ASTM A36



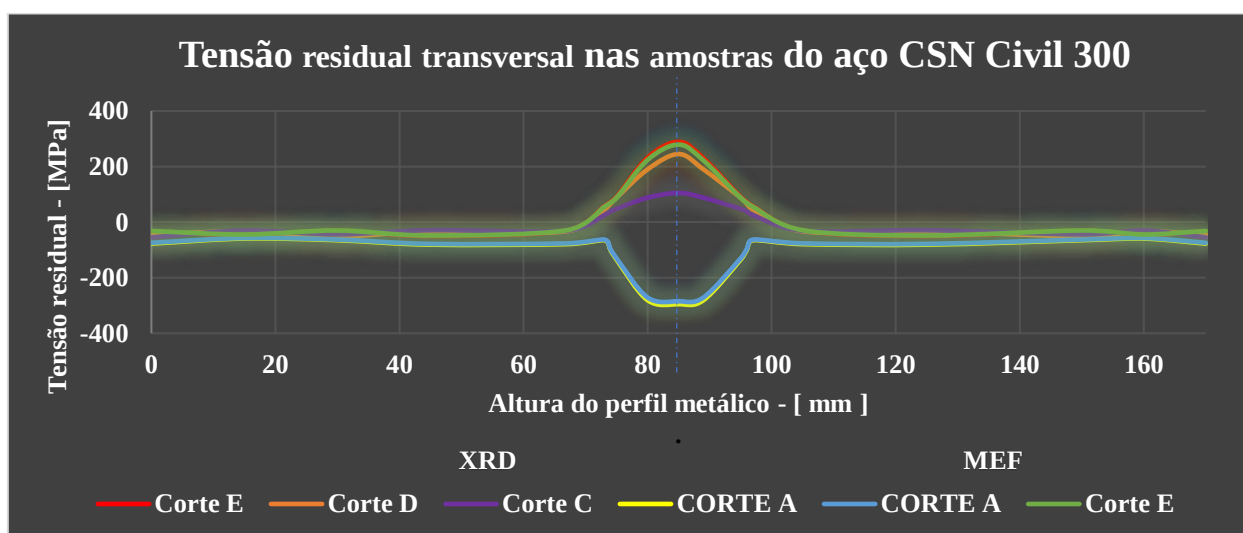
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.19 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço ASTM A36



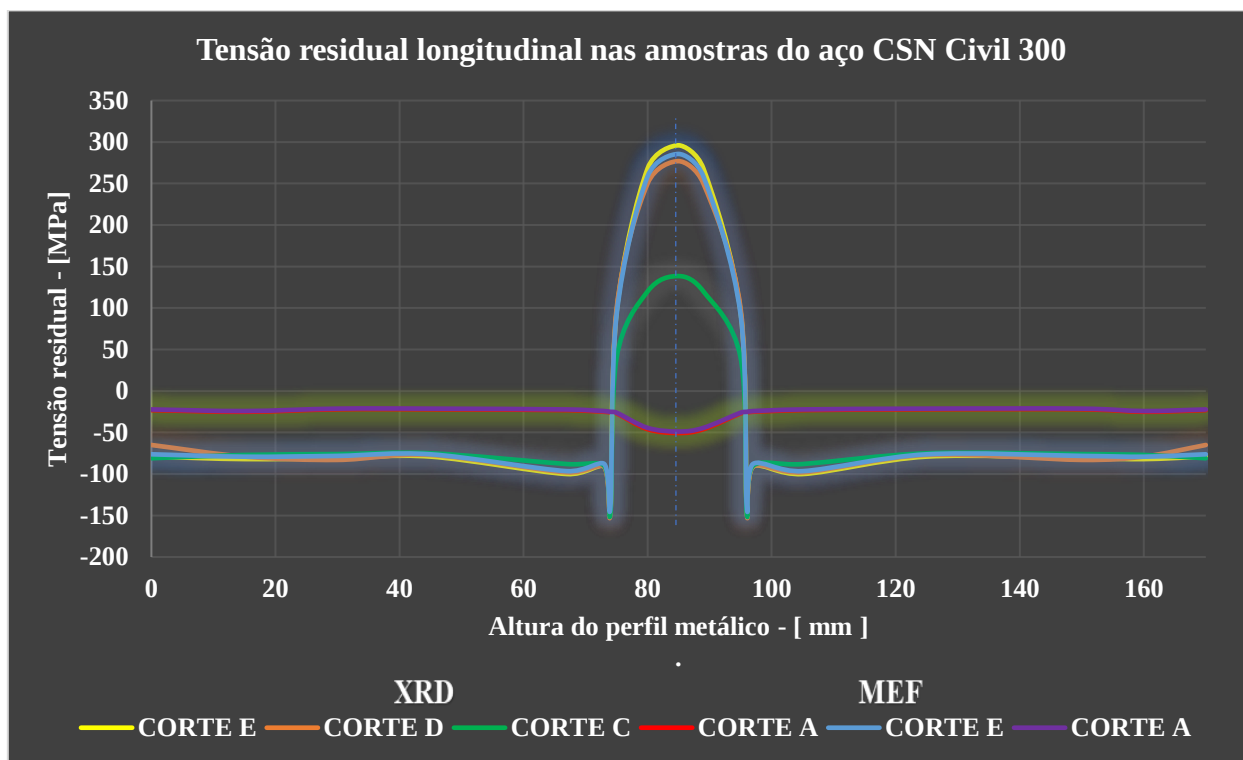
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.20 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço CSN Civil 300



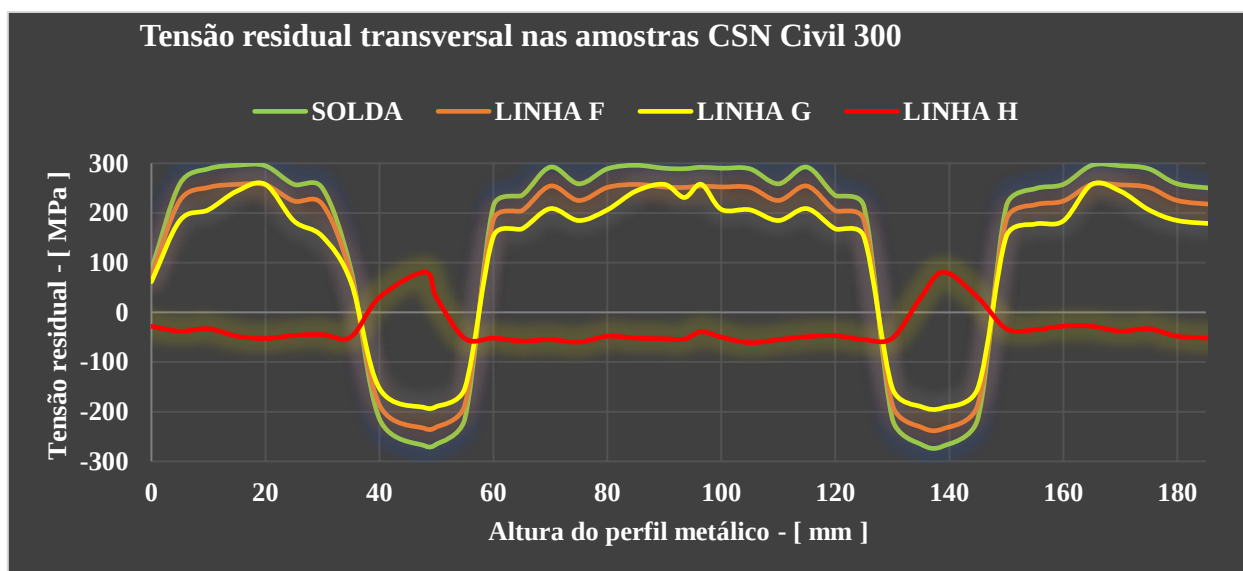
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.21 - Gráfico da tensão residual longitudinal nas amostras do aço CSN Civil 300



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.22 - Gráfico da tensão residual transversal nas amostras do aço CSN Civil 300

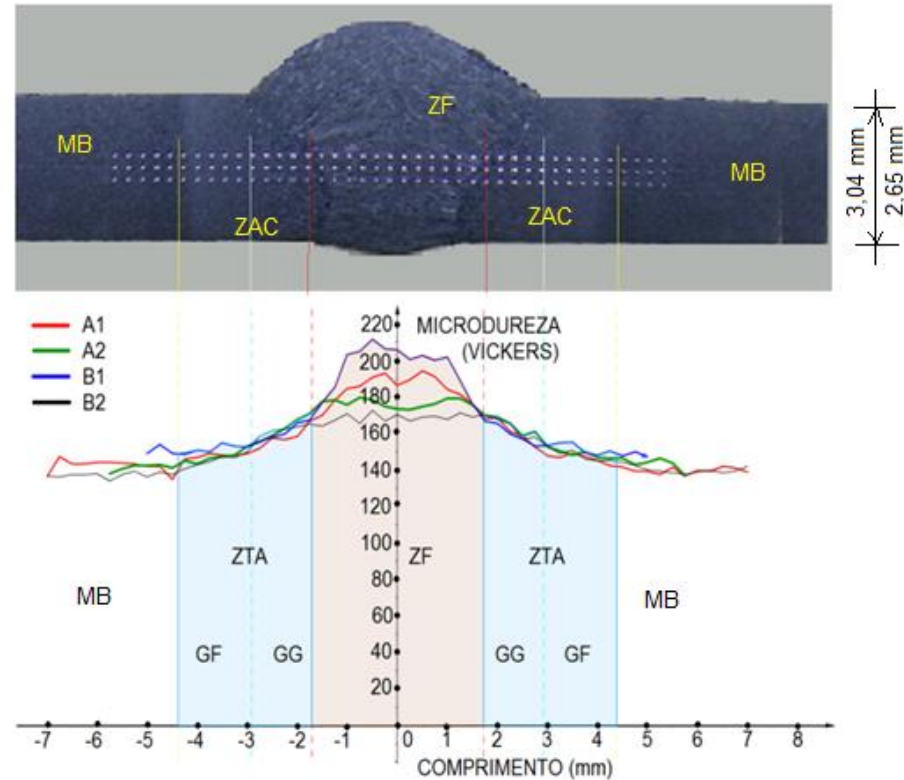


Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.5 MICRODUREZA NA JUNTA SOLDADA

A análise de microdureza permitiu as resultâncias das leituras das medições de microdureza de cada conjunto de CPs, os quais foram organizados em planilha Excel e exportados a outro aplicativo GeoGebra Clássico 6, de onde se geraram as curvas de durezas, segundo se vê na Figura 5.23:

Figura 5.23 - Curvas de dureza para os conjuntos A1, A2, B1 e B2



Fonte: Elaborada pelo autor

Esses valores auxiliam a interpretação das resistências finais do cordão de solda, e o gráfico de linhas mostra os valores médios, passando pelo MB, pela ZAC e chegando à ZF; distinguindo, assim, os conjuntos de CPs representativos A1, A2, B1 e B2.

Na Tabela 5.3, tem-se a média das durezas por grupo de CP e geral com relação a ZF, ZAC e MB:

Tabela 5.3 - Valores médios das medidas de microdureza Vickers (HV)

| Conjunto de CPs | MB  | ZAC | ZAC |     | ZF  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |     |     | GF  | GG  |     |
| A1              | 141 | 155 | 149 | 161 | 188 |
| A2              | 143 | 150 | 143 | 156 | 176 |
| B1              | 151 | 161 | 154 | 165 | 203 |
| B2              | 137 | 146 | 142 | 152 | 168 |
| Geral           | 143 | 153 | 147 | 159 | 184 |

MB, ZAC, GF, GG e ZF são, respectivamente, metal de base, zona termicamente afetada, região de grãos finos, região de grãos grosseiros e zona de fusão.

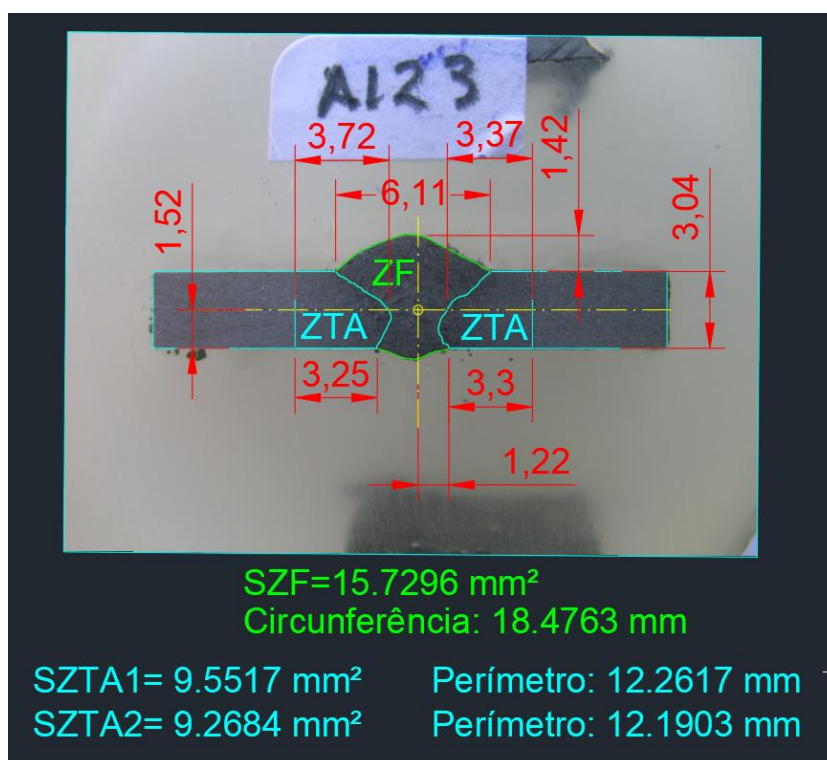
Fonte: Elaborada pelo autor

5.6 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A análise das fotomicrografias foi importante para uma investigação geométrica dos cordões de solda, resultado do processo de soldagem produzido pelo braço robótico. E, com o

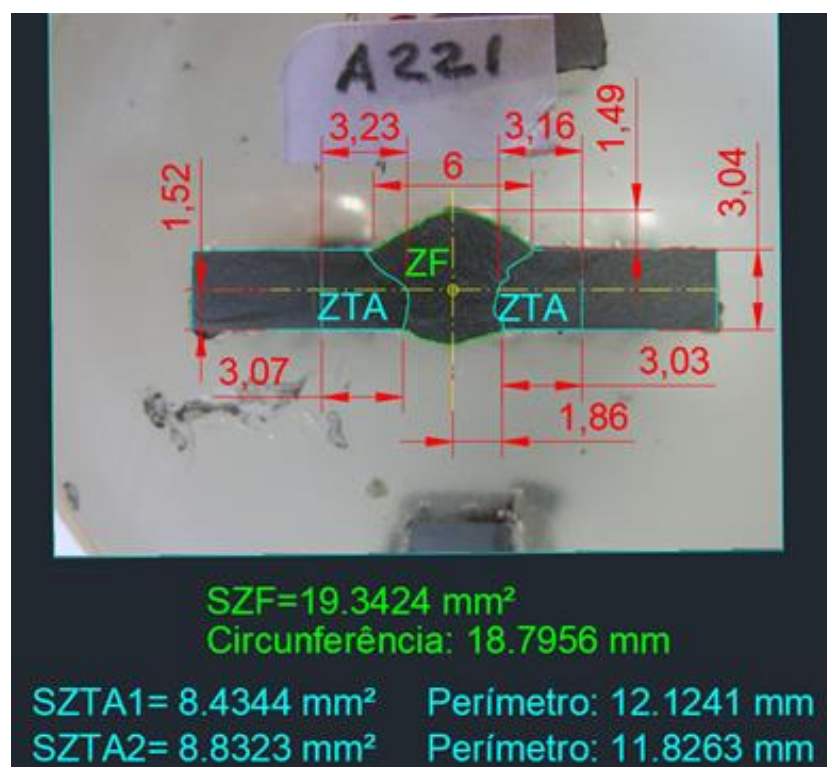
uso do aplicativo AutoCad-Student V.2021, pode-se conferir suas dimensões precisamente, conforme indicam as Figuras de 5.24 a 5.27:

Figura 5.24 - Análise macrográfica do corpo de prova A123



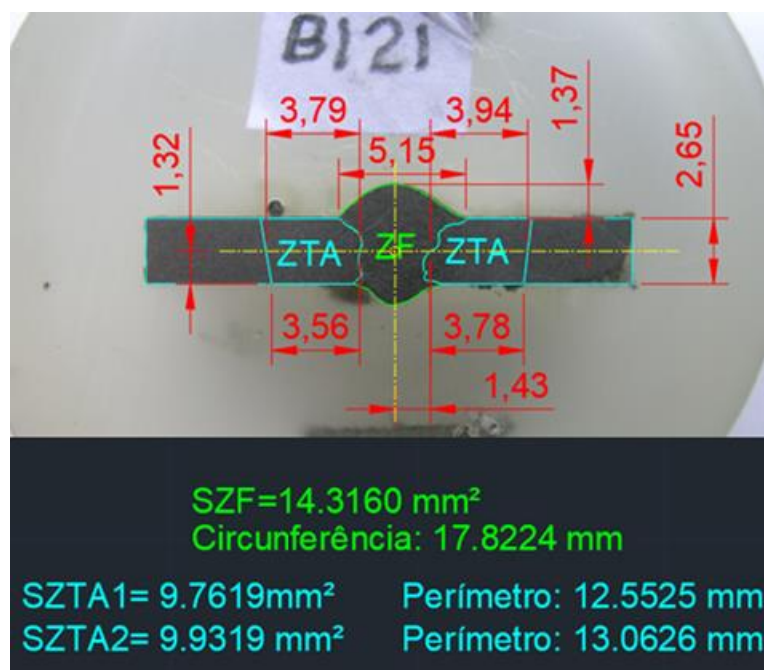
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.25 - Análise macrográfica do corpo de prova A221



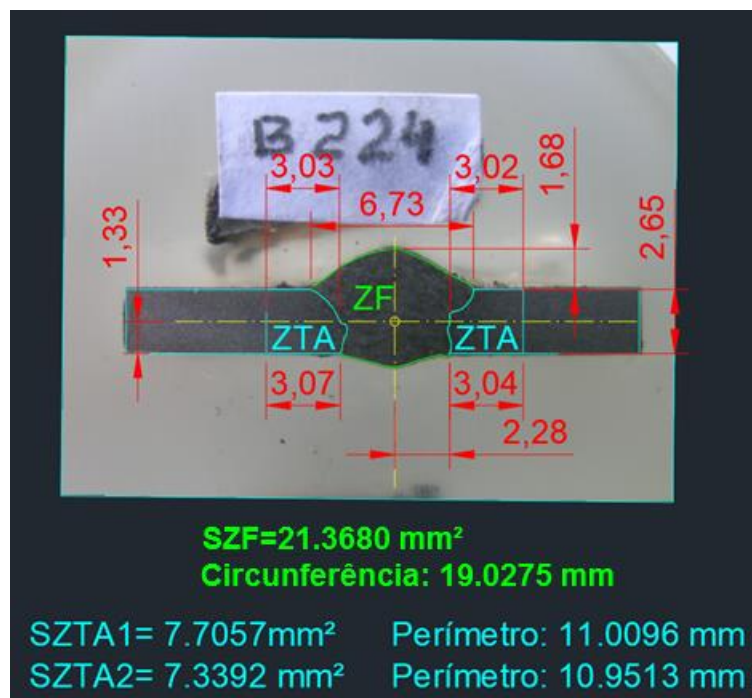
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.26 - Análise macrográfica do corpo de prova B121



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.27 - Análise macrográfica do corpo de prova B224



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a média das medidas das larguras das regiões afetadas termicamente, pode-se definir exatamente o diâmetro da elipse de Gauss e o término da zona termicamente afetada, onde se limita o fim da transformação microestrutural. Na sequência, a Tabela 5.4 sintetiza essas larguras nas juntas de solda tabuladas no Excel, com resultados em valores médios por grupo e geral:

Tabela 5.4 - Larguras médias do cordão, da ZAC e da elipse de Gauss [mm]

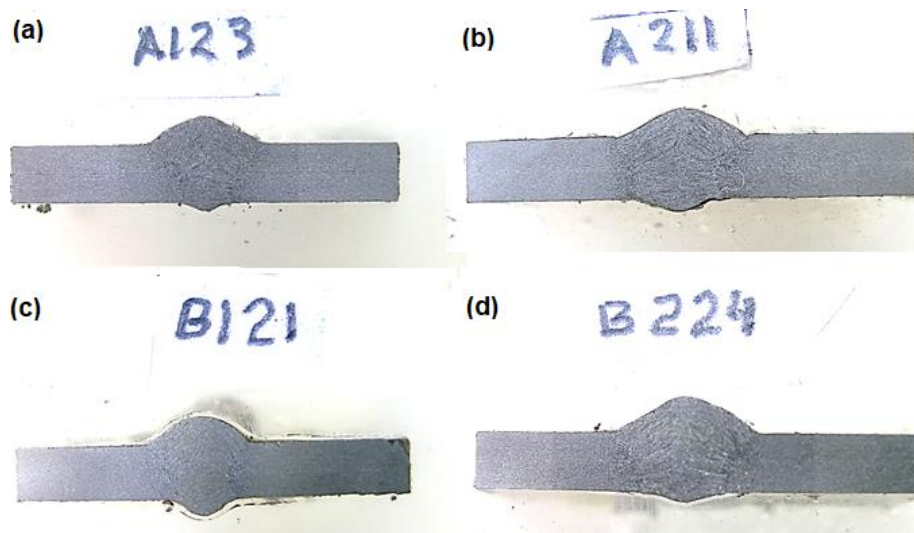
| CP    | Largura do cordão | ZAC I | ZAC S | b   | Lt  |
|-------|-------------------|-------|-------|-----|-----|
| A     | 6.0               | 3.1   | 3.7   | 3.0 | 6.4 |
| B     | 6.1               | 3.0   | 3.8   |     |     |
| GERAL | 6.1               | 3.0   | 3.8   |     |     |

Onde: ZAC I refere-se à zona termicamente afetada inferior da Peça de teste, ZAC S, zona termicamente afetada superior da Peça de teste, b, metade da largura da elipse de Gauss e Lt, fim de transformação microestrutural, partindo do centro do cordão.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Fazendo a relação minuciosa das larguras das regiões afetadas termicamente, verifica-se, nessa análise, que o arame-eletrodo ER70S-3 produziu uma zona termicamente afetada mais larga, segundo se observa na Figura 5.28:

Figura 5.28 - Fotomicrografias das juntas soldadas

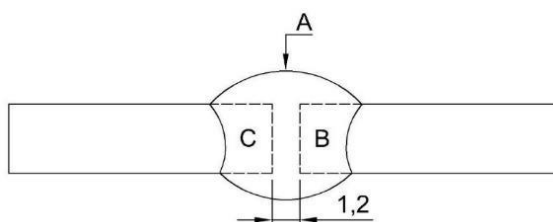


Nos diferentes conjuntos de CPs de metal de base com metal de solda: (a) no aço ASTM A36 com arame-eletrodo AWS ER70S-6, (b) no aço ASTM A36 com consumível AWS ER70S-3, (c) no aço CSN Civil 300 com arame-eletrodo AWS ER70S-6 e (d) no aço CSN Civil 300 com consumível AWS ER70S-3.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Depois de verificados os valores medidos e calculadas as respectivas áreas do cordão de solda, aplicou-se a equação 5.1 e foram tabulados e analisados os resultados das diluições das soldas nos metais de base, como mostra o esquema da Figura 5.29:

Figura 5.29 - Áreas para cálculo da diluição da solda



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$D = \frac{(C + B)}{A} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

No que concerne à área do cordão de solda após a análise dos resultados, as áreas do metal de base C e B dissolvido no metal de solda A resultaram no percentual de diluição da solda D, com uma média geral para os aços ASTM A36 de aproximadamente 45% e para o aço ARBL CSN Civil 300, com 48%. De um modo geral, a diluição média apresentou uma proporção de 46,5%.

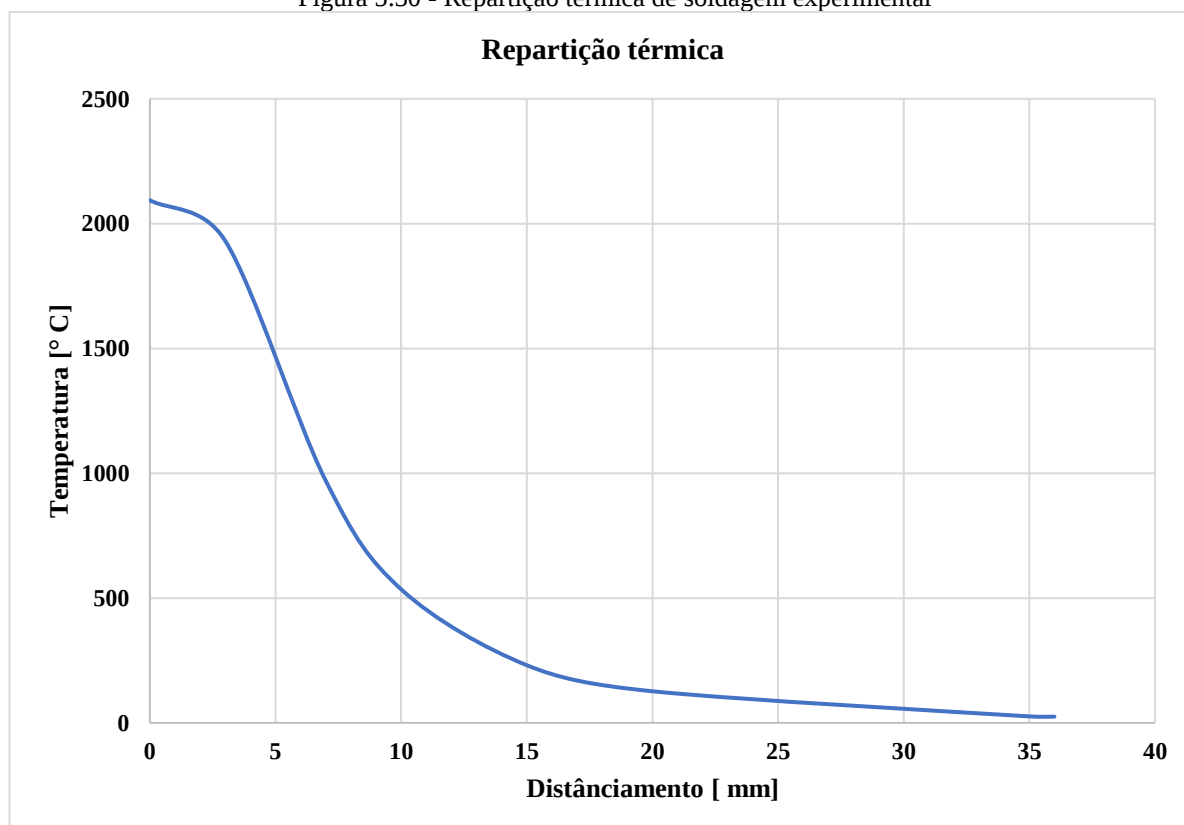
## 5.7 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA

Como um outro auxílio complementar, a análise da temperatura, durante o experimento de soldagem, teve o intuito de verificar se a resposta por elementos finitos é próxima da experimental; essa verificação da temperatura foi perto do cordão de solda.

O canal 4 registrou a temperatura de 157°C, quando a tocha de soldagem passou e, ainda com mais um auxílio de uma câmera termográfica, se vê na imagem o registro de 150°C, também demonstrando o desempenho eficiente do termopar.

Essas medições das temperaturas resultaram no ciclo térmico, realçado no gráfico que contém a curva de temperatura média no experimento, conforme disposto na Figura 5.30:

Figura 5.30 - Repartição térmica de soldagem experimental

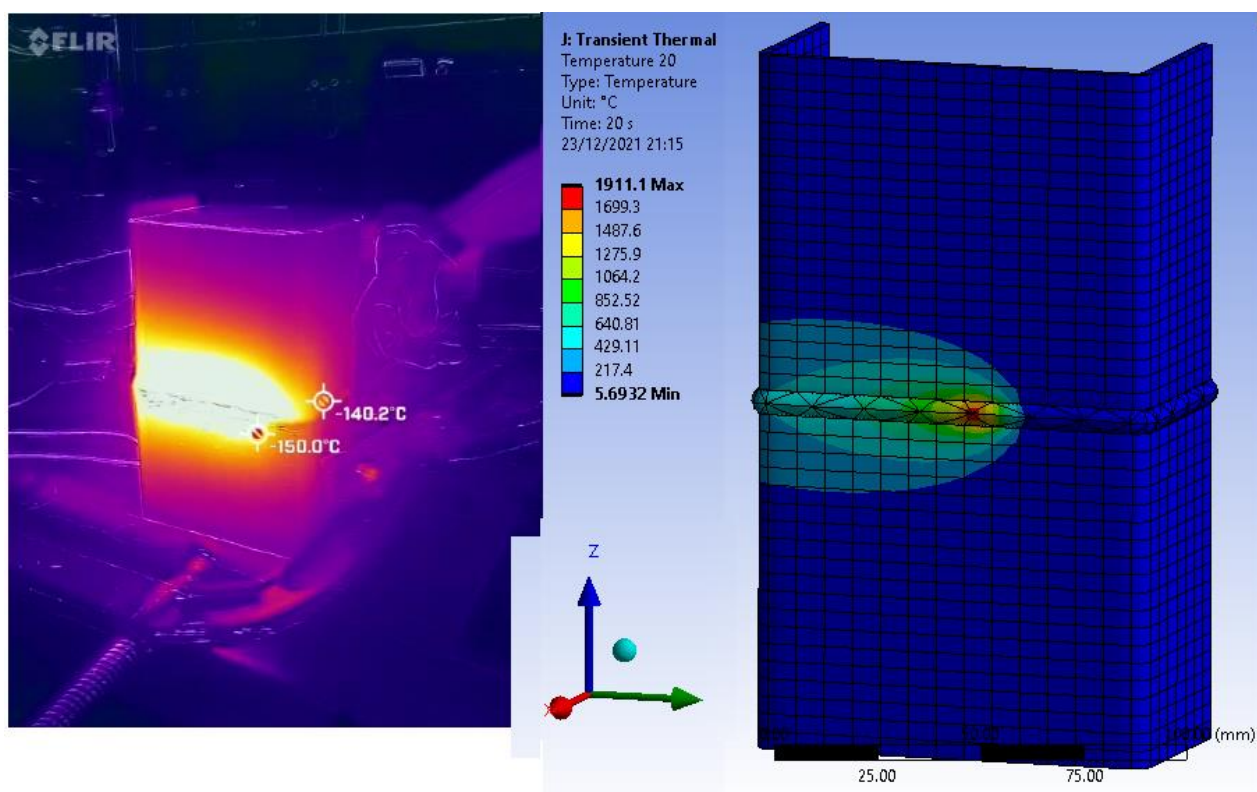


Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.8 ELEMENTOS FINITOS

A análise dos problemas na engenharia de soldagem tem sua relevância, no campo de temperatura. Nessa perspectiva, a Figura 5.31 indica que essa distribuição térmica com os ciclos térmicos obtidos experimentalmente, na face do material, demonstra compatibilidade de resultados:

Figura 5.31 - Distribuição térmica corrido 66 mm pela tocha de soldagem no perfil



Sendo: a) distribuição térmica na alma do perfil dobrado experimental e b) distribuição térmica pelo ANSYS.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante a análise pelos elementos finitos, após inúmeras iterações realizadas com o uso de um processador extremamente rápido e de última geração, depois de quase uma hora, obtiveram-se os resultados, os quais descreveram fielmente o comportamento térmico do processo de soldagem experimental, além de terem sido obtidas as imagens provenientes da modelagem matemática, em que se presenciam os campos térmicos temporais, conseguindo-se atender ao objetivo específico quanto à modelagem do campo de temperatura.

Com a temperatura-ambiente considerada de 25 °C, porém o intervalo das escalas<sup>13</sup> térmicas extrapolou os valores limites nas superfícies superior e inferior da soldagem e as três

<sup>13</sup> Escalas térmicas, no ANSYS mostra o intervalo de temperaturas e pode ser configurada no interesse de comprovação, como se observa que o azul escuro contempla as temperaturas partindo de 5,69 °C definido automaticamente, a 217,4 °C, não essa região seja propriamente 5,69 °C, mas 25° C que se encontra dentro do intervalo.

superfícies circundantes espontaneamente transferiram o calor por convecção, com o coeficiente convectivo de  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , e o plano de simetria da soldagem na fresta sendo tomado como adiabático.

O pós-processamento, nos aspectos térmicos pontuais, dependeu dos *steps* e *substeps*, dado esse que experimentalmente foi conferido com a temperatura, depois de aproximadamente 20 minutos passados do término da solda da Peça de teste, atingindo  $45^\circ\text{C}$  e se aproximando do equilíbrio, tendo decorrido mais sete minutos, aproximadamente.

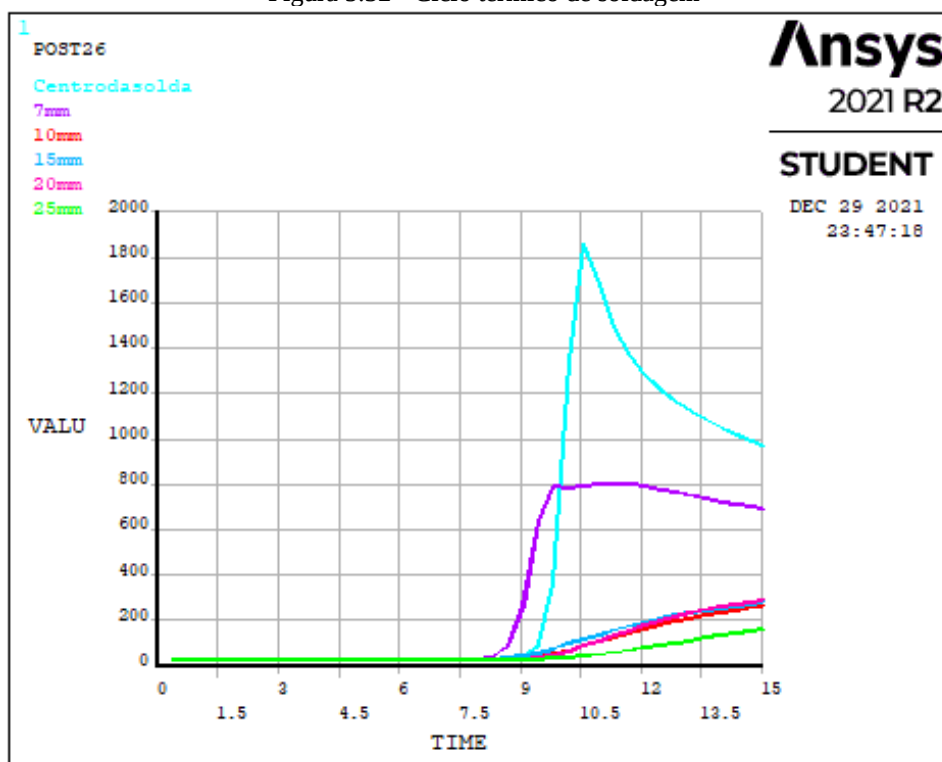
As distribuições de temperaturas, ao longo do eixo do cordão de solda, se dão ao aquecimento da Peça de teste no local da junta soldada, há 87,5 mm de altura, e a fresta da junta é o local em que se atingem as temperaturas mais elevadas.

Com a soldagem em andamento e o arco elétrico fornecendo a energia térmica, vem-se aquecendo toda a região, antes de terminar a soldagem e, por onde o arco vai passando, as temperaturas se alteram de forma expressiva, em relação à temperatura-ambiente de  $25^\circ\text{C}$ .

Com efeito, suas características na análise por elementos finitos, na simulação do processo de soldagem, podem ser simplificadas, de modo que, pela teoria, a análise corresponde termicamente a essa simulação.

Assim, comparando-se os ciclos térmicos gerados que se distanciam da linha de centro do cordão de solda, nos mesmos pontos experimentais, as temperaturas de pico revelam semelhança comportamental entre elas, como pode ser observado na Figura 5.32:

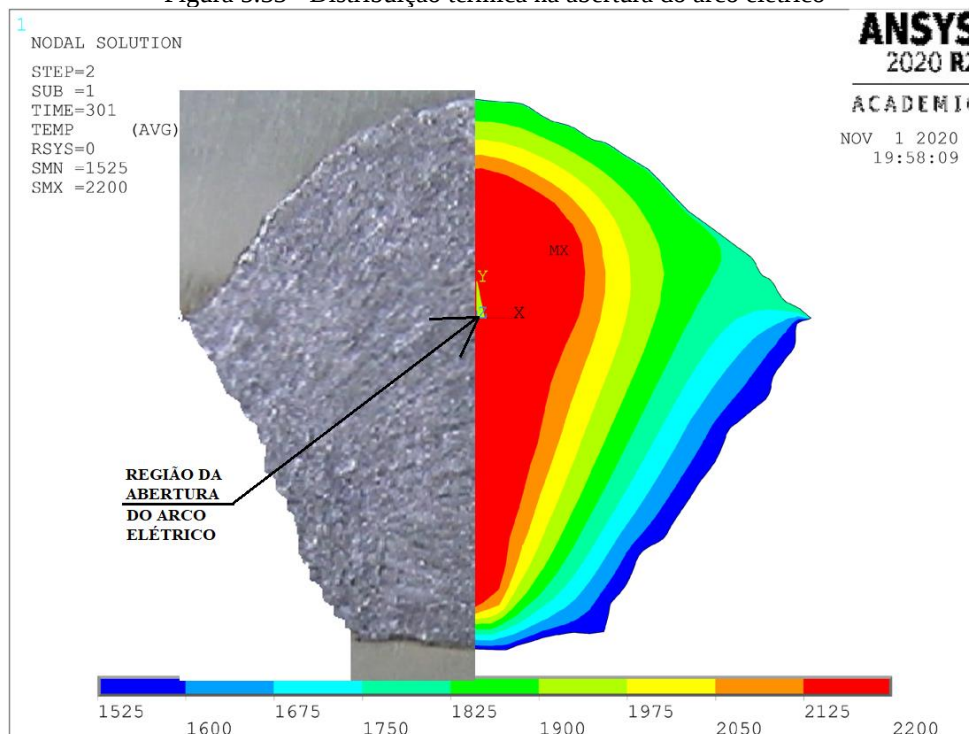
Figura 5.32 - Ciclo térmico de soldagem



Fonte: Elaborada pelo autor

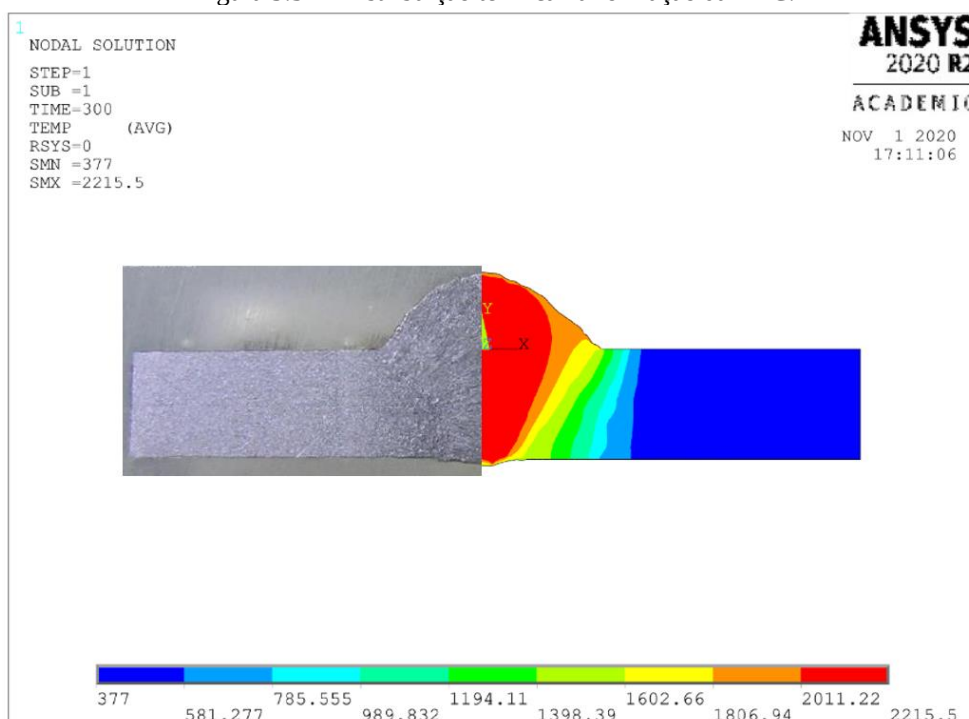
O resultado da distribuição térmica no cordão de solda, analisado isoladamente, segundo aponta a Figura 5.33, demonstra que, dentro da linha de ligação, tem-se o contorno em que a temperatura de 1525°C acontece, quando ainda há presença de metal líquido. E, na Figura 5.34, fica claro que realmente a temperatura de transformação microestrutural termina na zona afetada pelo calor:

Figura 5.33 - Distribuição térmica na abertura do arco elétrico



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.34 - Distribuição térmica na formação da ZAC.

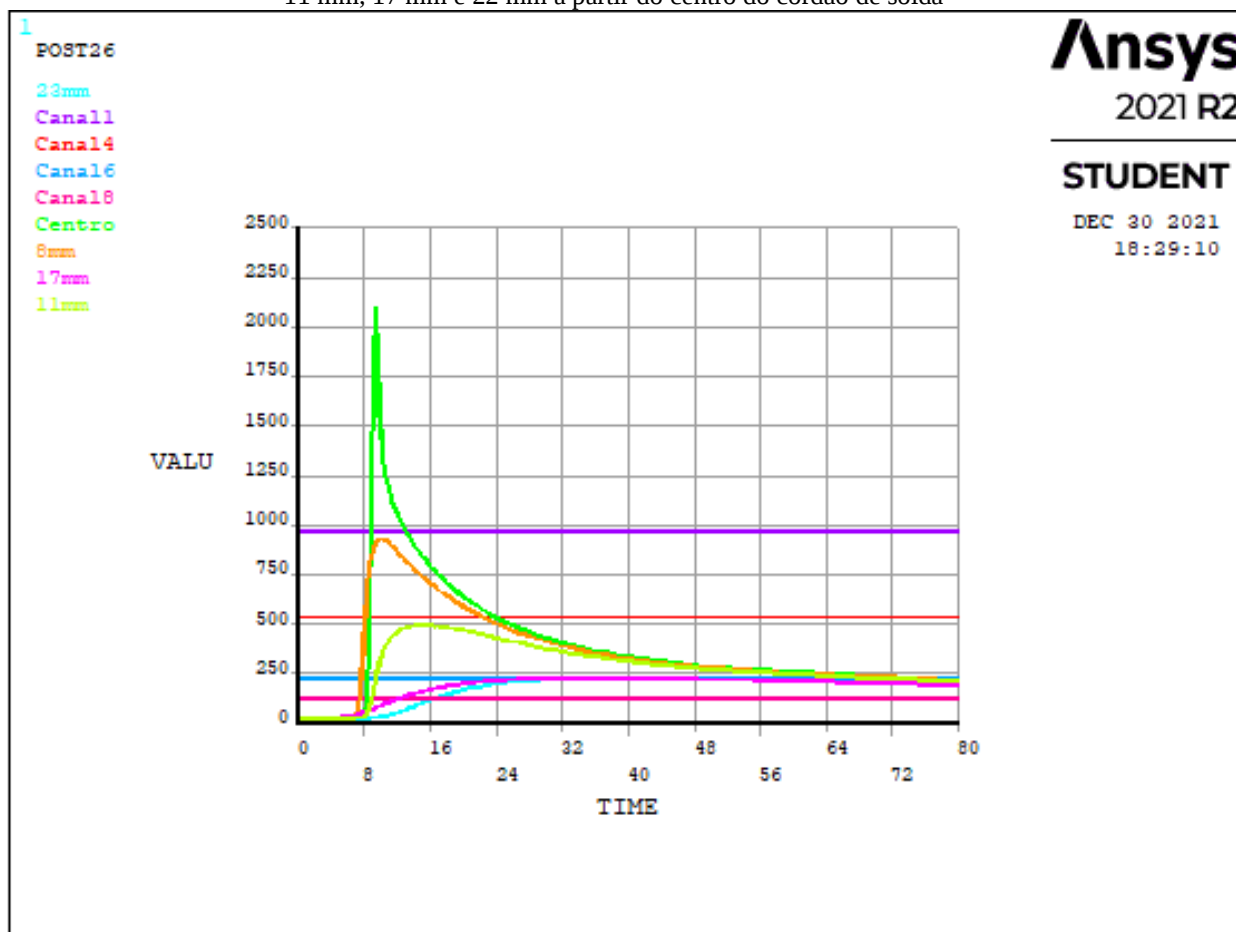


Fonte: Elaborada pelo autor

A análise de problemas de engenharia de soldagem tem grande importância, tendo em vista o comportamento do aço estrutural ASTM A36 e CSN Civil 300, dependendo da sua aplicação.

Na Figura 5.35, expõem-se os resultados das temperaturas calculadas, comparando-os com os obtidos experimentalmente:

Figura 5.35 - Ciclos térmicos pelos MEF e experimentais registrados pelos canais nas distâncias de 0 mm, 8 mm, 11 mm, 17 mm e 22 mm a partir do centro do cordão de solda



Fonte: Elaborada pelo autor

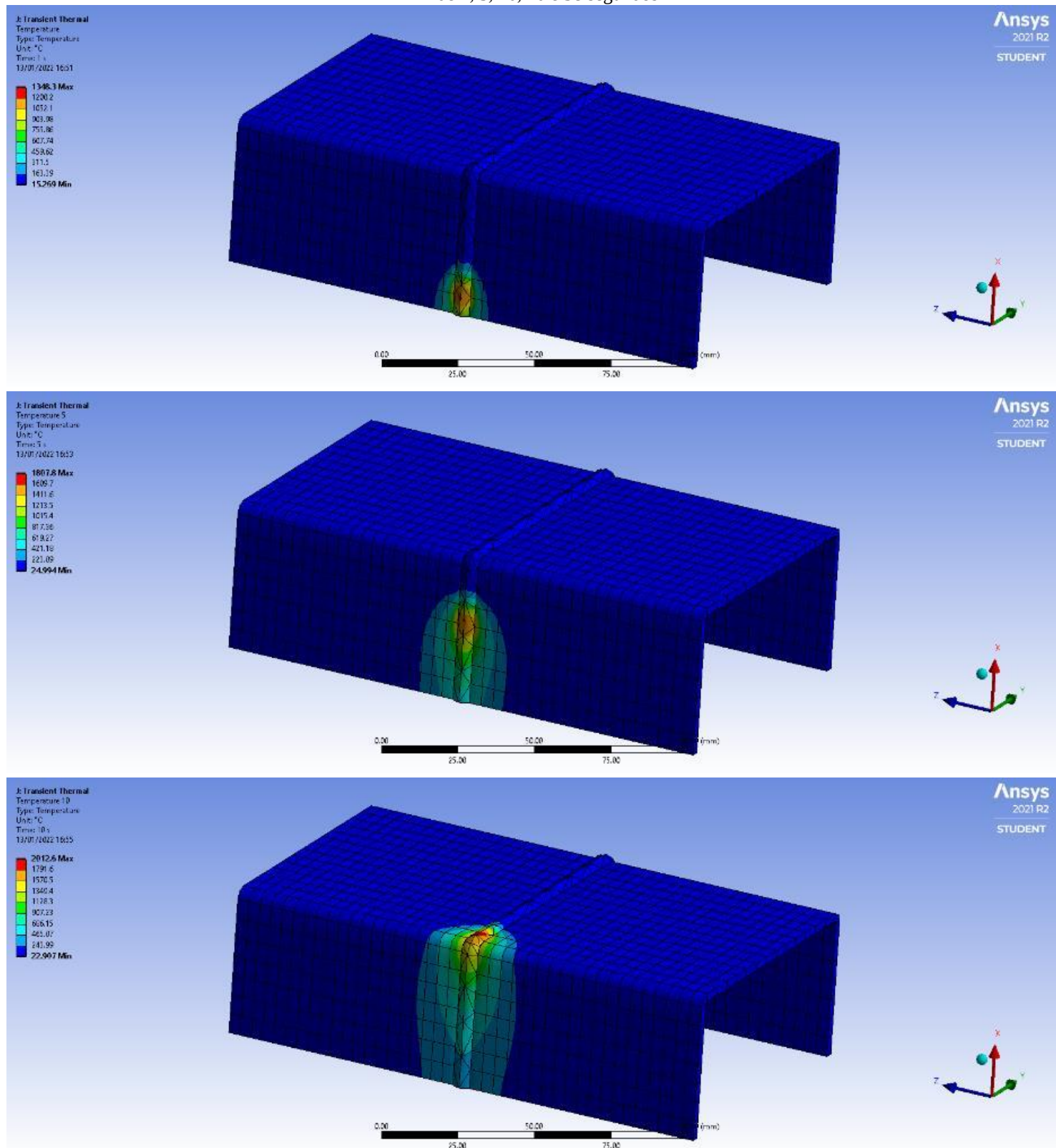
Com o uso da equação 3.7, determinou-se a energia térmica do arco elétrico, no ponto de aquecimento e com a densidade máxima do fluxo de calor no centro definido pelas equações 3.22 e 3.23, obtendo-se o resultado que suportou a base de dados na comutação com as tensões residuais e deformações.

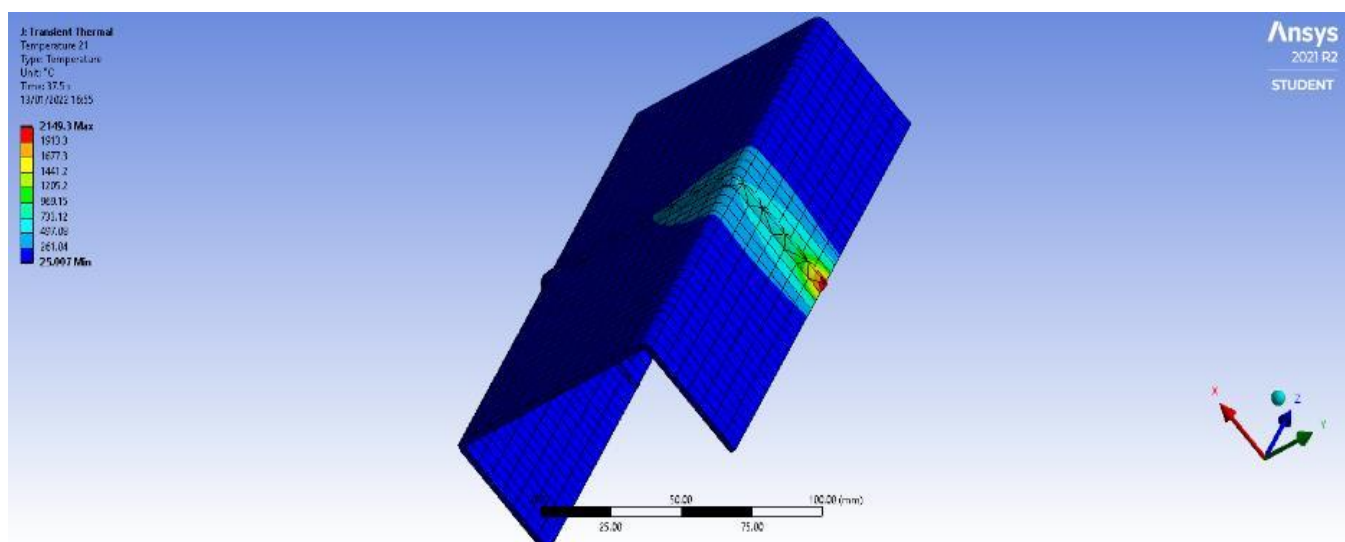
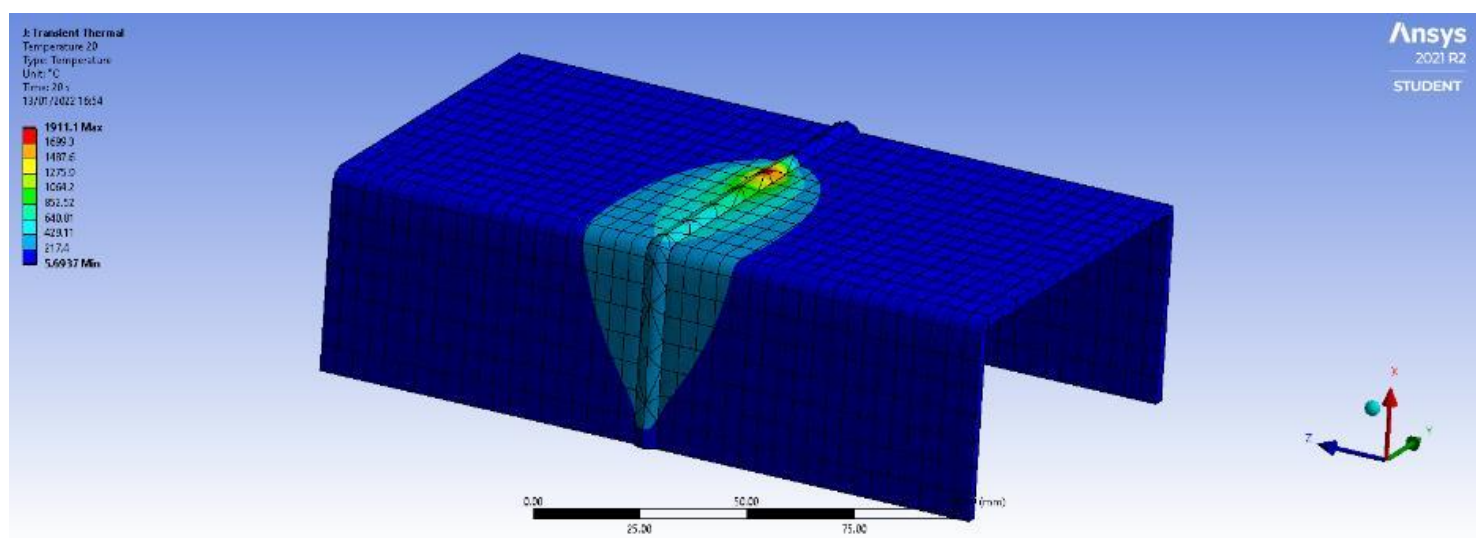
Assim, o método dos elementos finitos para o processo de soldagem consiste fundamentalmente na condução de calor transiente não linear e, por fim, linear, sendo um dos objetivos específicos atingidos.

As Figuras 5.36, 5.37 e 5.38 apresentam os dados das distribuições de temperatura como resultado dos ensaios numéricos, em três diferentes planos: a aba esquerda, por onde o robô

iniciou a soldagem, a frontal e a aba lateral direita, onde finaliza a solda. Conforme a fonte de calor se move, esses planos se alinham em momentos subsequentes e mostram as mudanças rápidas na transferência de calor na zona de fusão e zona afetada pelo calor.

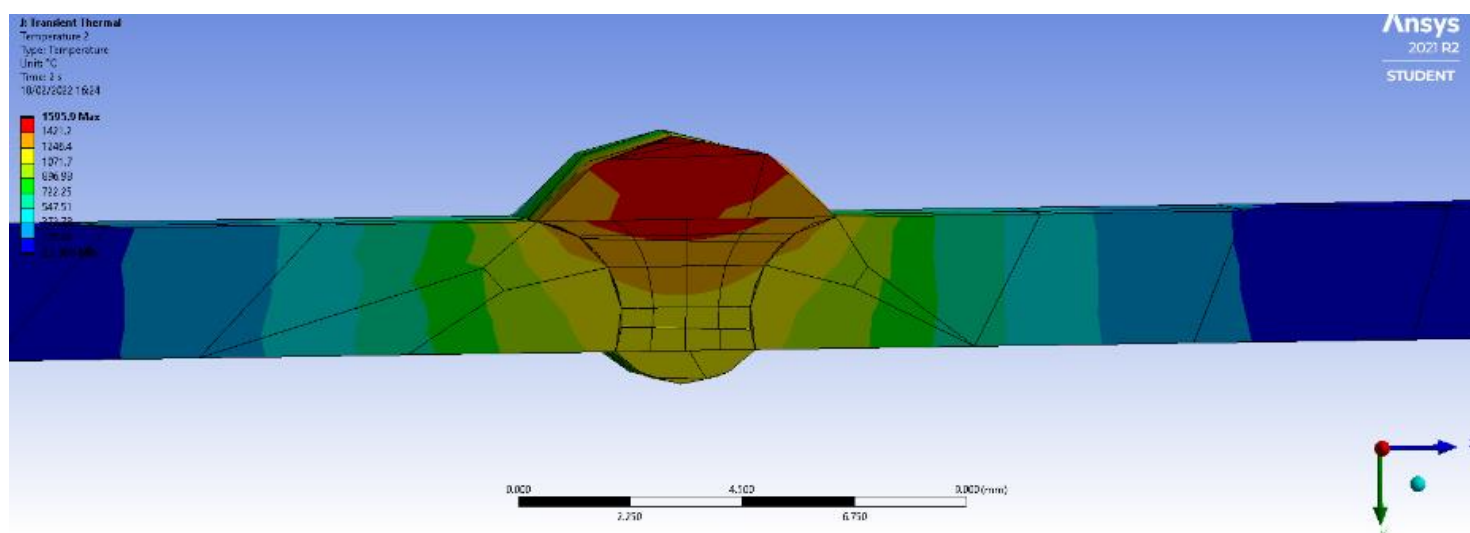
Figura 5.36 - Distribuição térmica na junta soldada dos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, nos instantes de 1, 5, 10, 20 e 38 segundos

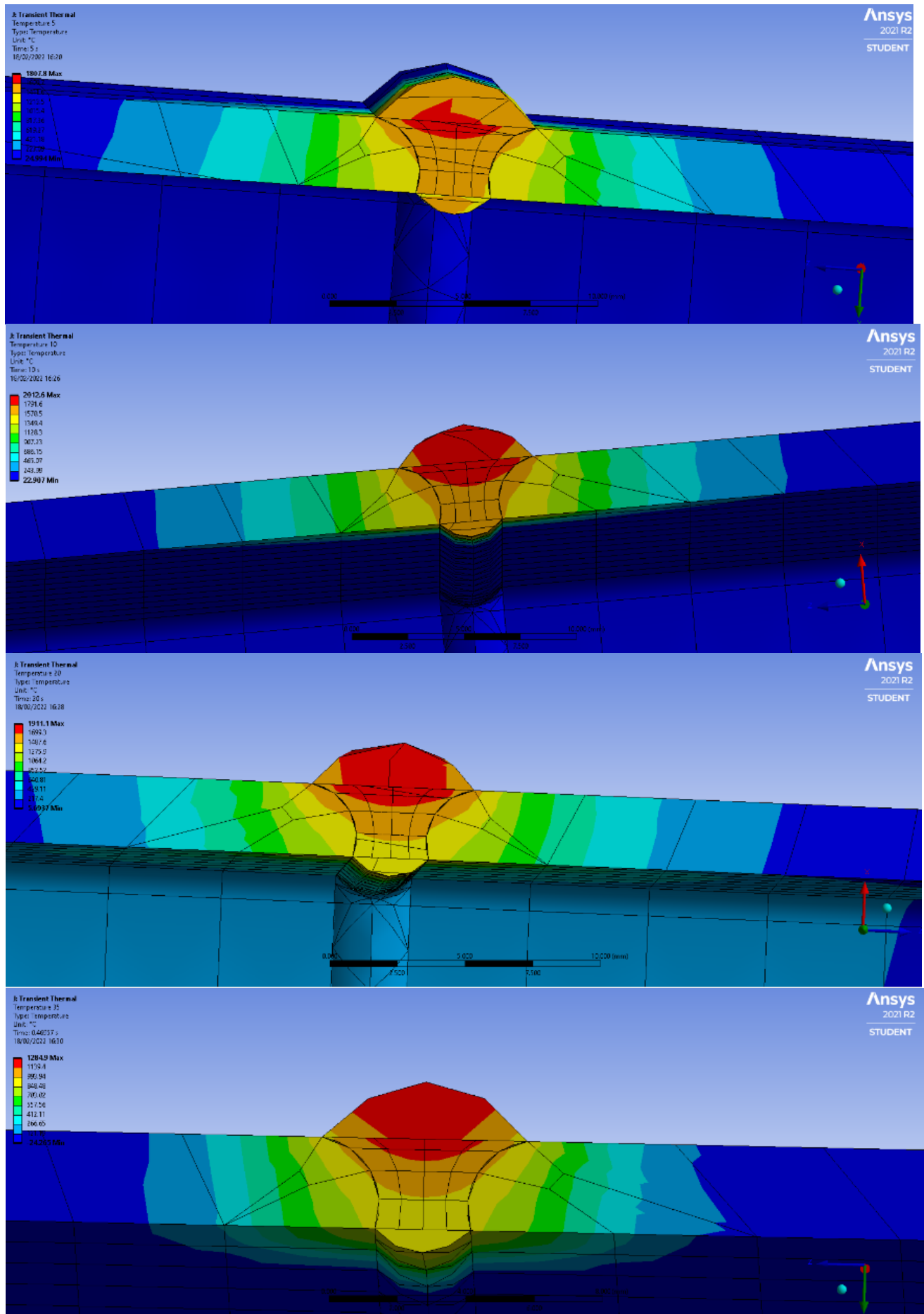




Fonte: Elaborada pelo autor

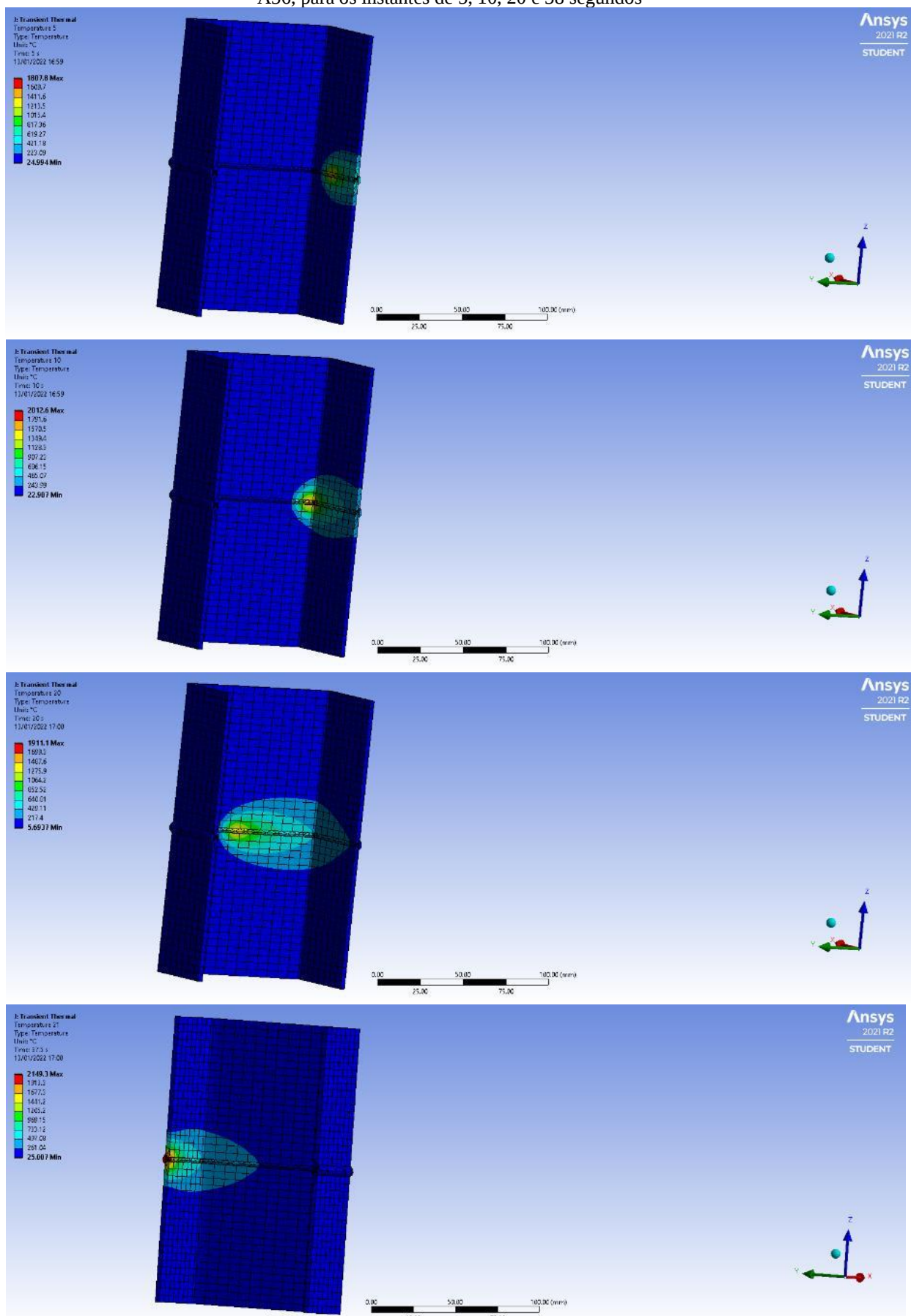
Figura 5.37 - Distribuição térmica na seção transversal da junta soldada dos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, nos instantes de 1, 5, 10, 20 e 35 segundos





Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5.38 - Distribuição térmica da junta soldada da Peça de teste nos aços ARBL CSN Civil 300 e ASTM A36, para os instantes de 5, 10, 20 e 38 segundos



Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.9 TENSÕES RESIDUAIS

Os resultados da análise do campo de tensão simulado, que se desenvolve durante a soldagem das Peça de teste em questão, foram usados como resposta para a configuração das condições de contorno para o modelo virtual.

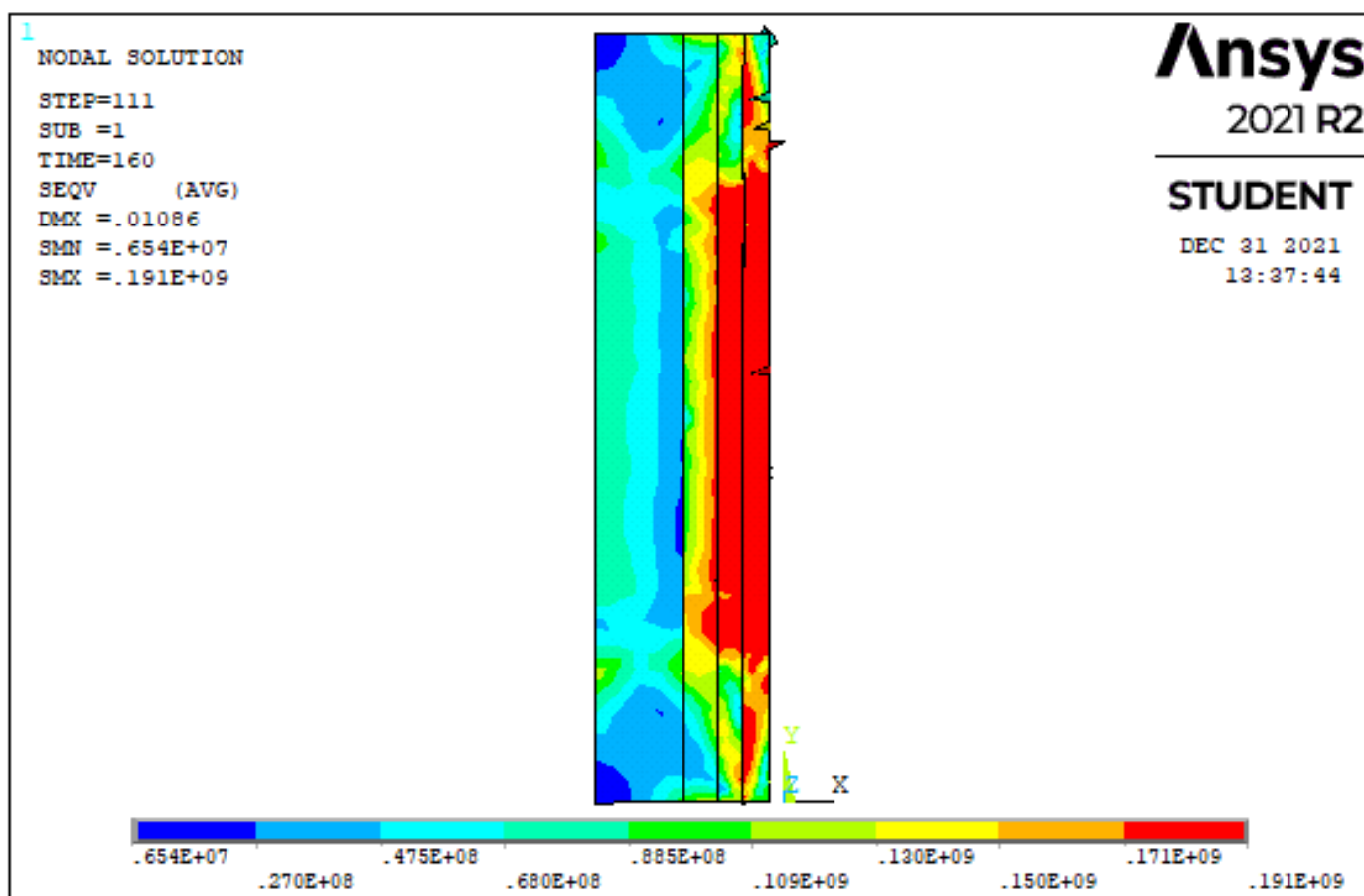
Como as tensões se originam a partir de situações nas quais ocorrem transientes de temperatura e múltiplas interferências, que podem acontecer de inibir esses fenômenos envolvidos, pois estão entrelaçadas com os efeitos das ondas de calor que caminham e se refletem nas interfaces do perfil metálico.

Caso a velocidade da tocha não seja suficientemente alta e a chapa se estreitar demais ou possuir inúmeras dobras na chapa metálica, essa reflexão das isotermas pode ser tal que a resposta no ANSYS pode ser notada outro comportamento, como alívio de tensões.

Nesse modelo convencional para um perfil dobrado tipo “U”, o efeito de borda é bem pronunciado.

A Figura 5.39 associa os resultados numéricos com os obtidos pelo ANSYS, na chapa planificada, para melhor visualização:

Figura 5.39 - Distribuição de tensões residuais instaladas na Peça de teste em  $[N \cdot m^{-2}]$



Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.10 DEFORMAÇÕES

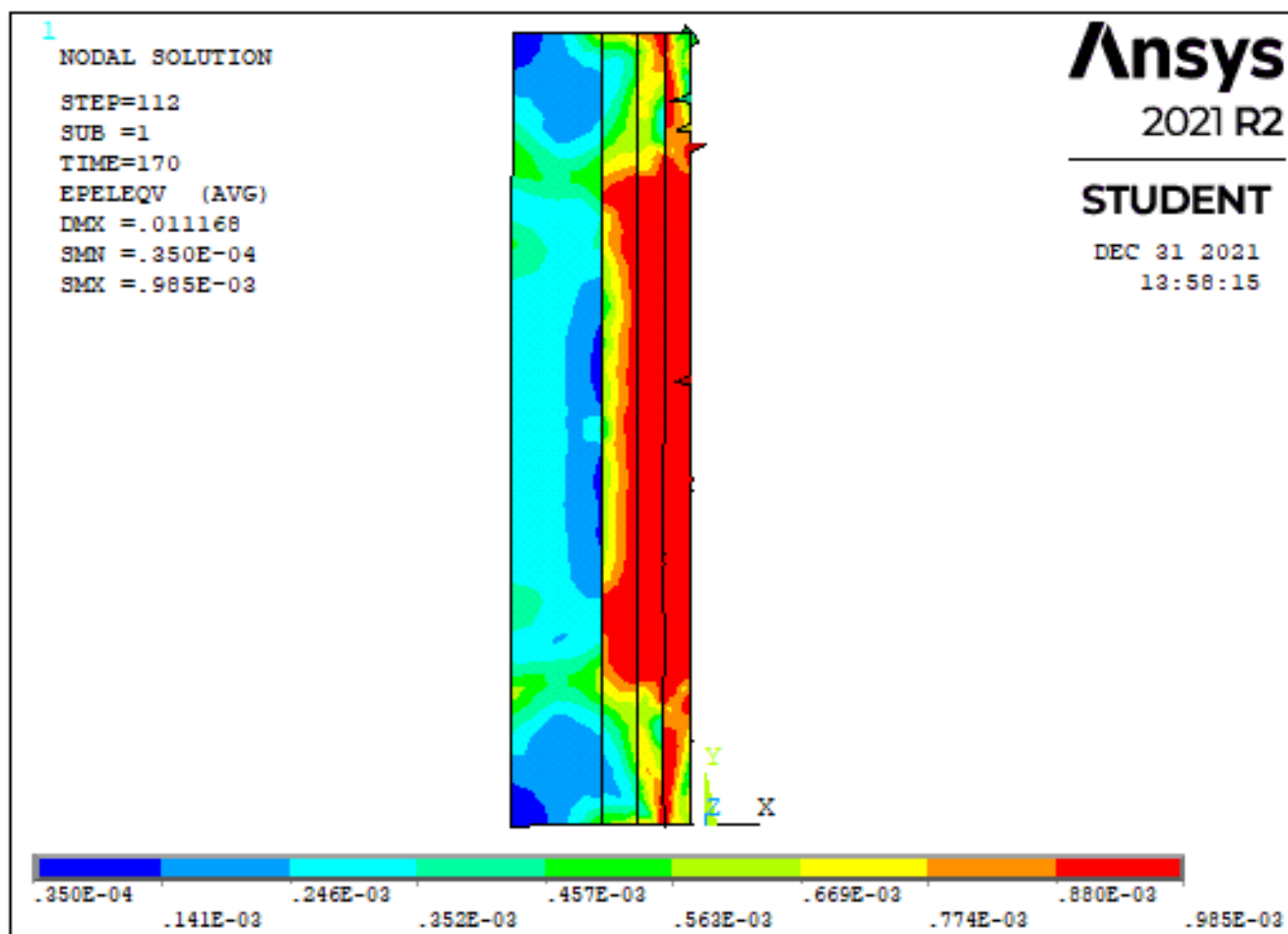
A análise de simulação das deformações do perfil dobrado tipo “U” foi feita a partir das tensões residuais concomitantemente realizadas pelo sistema termodinâmico da soldagem.

Também atingindo o objeto específico, com a análise de simulação de campo de deformação, resultado das distorções oriundas do processo de soldagem, sendo a extensão dos mesmos resultados das tensões residuais, definidos pelas mesmas condições de contorno e aplicação das cargas advindas das ações térmicas, observa-se que esses resultados foram consoantes aos experimentais.

Como já citado abrangentemente, as deformações se instalam depois que se atinge um estado quase estacionário, fato que o sólido não é demasiadamente estreito e existem poucas dobras na aproximação de superfícies, o que torna a propagação das isothermas proporcional à difusividade do material.

Ademais, para melhorar a visualização, a Figura 5.40 reúne os resultados numéricos obtidos pelo ANSYS, na chapa planificada:

Figura 5.40 - Distribuição de deformação instalada na Peça de teste em [m].



Fonte: Elaborada pelo autor

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Haja vista que o processo de soldagem GMAW, praticado atualmente, nas indústrias de estruturas metálicas, é, usualmente, semiautomático, a implementação do braço robótico, nesse processo, acrescenta melhorias devido a diversos fatores, os quais culminam em economia, no retorno do lucro exponencial em longo prazo, a redução de mão de obra, a agilidade produtiva e a padronização dos produtos – e tudo isso justifica a aplicação do robô, apesar de seu alto custo de instalação, nos setores de soldagem.

Nesse contexto, o processo de soldagem robotizado realiza muito bem os procedimentos.

Com a implantação de robô, utilizando os parâmetros de soldagem nas posições e caminhamento de soldagem, idealizando como a soldagem é executada nas linhas de produção, de modo sistemático, as indústrias que se qualificam à robotização deverão passar por reestruturação tecnológica.

E com as observações experimentais executadas, no tocante ao método de escaneamento a integração do equipamento com o robô de soldagem aconteceu a adaptação proposta, viável que de forma simultânea fez a varredura de deformações com a leitura das tensões residuais devido ao processo de soldagem.

Por conseguinte, obtiveram-se soldas uniformes e padronizadas, com velocidades constantes, mantendo-se o tempo de execução em 18,7s. Os volumes de deposição também foram constantes e quase inexistiu a perda de consumível, confirmando, mais uma vez, a elevada taxa de produtividade do processo MAG.

No que se refere à DBCP, controlando em 12 vezes o diâmetro do arame-eletrodo, a geração de respingo foi praticamente inexistente. Entretanto, vale ressaltar que a geração de respingo também depende da indutância, do gás de proteção e da tensão do arco.

A programação do robô, para executar o percurso de soldagem, conservou a posição do arame-eletrodo no núcleo da linha da fresta, bem como as características da soldagem linear similar à curvilínea.

Outra questão importante foi organizar adequadamente os equipamentos e acessórios integrados ao robô, a fim de que o espaço de trabalho ficasse isento de obstrução. Uma vez definida a posição horizontal da tocha de soldagem, conservou-se o equipamento, nessa posição fixada perpendicular ao plano de soldagem, de forma que a mangueira não interferisse nas translações e rotações do robô, em todo o percurso de soldagem.

Também o comprimento da mangueira foi disposto, sem promover o estrangulamento, nos movimentos curvos, sem acentuar o efeito Helix na saída do arame-eletrodo, principalmente quando se trabalha com consumível em bobina de 1 kg. No entanto, o processo de soldagem não causou interrupção nos cordões de solda.

Outros aspectos foram cuidadosamente preparados, para que a Peça de teste permanecesse na base de apoio projetado com seus demais acessórios de fixação, o qual serviu de gabarito e conservou o ponto referencial de cada um.

## 6.2 MÉTODO DE ESCANEAMENTO A LASER

Esse método de escaneamento foi bastante eficiente, nas medições, no sentido de ser constituído de equipamentos portáteis e que conseguem ler a Peça de teste na disposição para ser avaliada, o que permite a sua adequação para a fábrica onde se produzem estruturas soldadas, sem a interferência humana, pois o robô tem movimentos repetitivos e controlados, mesmo que o feixe de *laser* faça a varredura do conjunto soldado.

A precisão de leitura apresentada pelos gradientes valorizados mostra que há convergência de valores para a gradual deformação nas Peças de teste, sendo possível visualizar esse fenômeno no perfil deformado, o que auxilia em tomada de decisão.

Como o processo de soldagem foi realizado em único passe, os resultados produziram um mesmo comportamento nas Peças de teste, independentemente do tipo de material ou preparo da junta.

Ainda independentemente do tipo de aço, espessura, junta ou arame-eletrodo empregado, o modo das deformações das Peças de teste foi semelhante, o que pode ser atribuído principalmente a essa condição.

É certo que, quando se trabalha com esses tipos de perfis dobrados, que trazem defeitos do processo de dobramento, em si mesmos, o que não corresponde identicamente ao projeto, mas com a garantia de que isso não interfere nos resultados obtidos pelo método de escaneamento a *laser*, mesmo assim, faz-se a leitura do perfil usado, de sorte a validar perfeitamente os valores adquiridos.

É oportuno lembrar que a espessura entre os aços é estreitamente diferente: o mais fino, de 2,65 mm, refere-se ao aço ARBL CSN Civil 300, que se espera ser mais sensível às deformações do que o aço ASTM A36, com espessura de 3,04 mm, sendo que as diferenças de espessura entre os dois tipos de aço é de 14,3%.

Quando se compara as peças de teste dos dois aços distintos, utilizados na pesquisa, soldados pelo arame-eletrodo AWS ER70S-3 nota-se através das Figuras 5.4 e 5.6, que a maior

deformação ocorreu no aço ARBL CSN Civil 300, de menor espessura, deformação essa afetou uma maior extensão, com ordem de 0,1 mm a mais na concavidade. Isso leva a relacionar com a entrada de calor que esse consumível produz, sendo maior que o arame-eletrodo AWS ER70S-6 e possuindo composição química diferente, principalmente nos teores de Mn e Si, elementos desoxidantes capazes de alterar a combustão do oxigênio.

A menor deformação foi verificada no perfil dobrado no aço ARBL CSN Civil 300, usando-se uma preparação de junta experimental; por sua vez, a maior deformação ocorreu nesse mesmo tipo de perfil, empregando-se uma junta preparada com cinco pontos, ambos com o arame-eletrodo AWS ER70S-6.

O perfil que correspondeu a uma deformação mediana foi confeccionado no aço ASTM A36, com a junta seccionada e utilizando-se igualmente o arame-eletrodo AWS ER70S-6.

Entre os grupos dos aços ASTM A36, os resultados das distorções para os aços ARBL CSN Civil 300 foram discretamente melhores, nas Peças de teste com junta de cinco pontos de solda; acredita-se ser por causa da minimização da deformidade da junta, pela existência dos pontos de solda, que restringe e assegura a abertura da fresta. A dilatação gerada pelo aquecimento da poça de fusão com a translação da tocha promove a deformação, que encontra obstáculos e restrição, dificultando a abertura pelos pontos de solda posterior. Logo após o arrefecimento do cordão de solda, a retração causada, de certa forma, também é impedida pelas partes resfriadas.

As abas suportam e restringem o empenamento dos cantos, na ordem de 0,4 mm. De modo geral, os grupos dos aços CSN Civil 300 apresentaram discretamente a menor distorção global, as abas demonstraram deformações na ordem de 0,08 mm fora do plano e, na alma, um repuxo de maior proporção, possivelmente por razão da maior capacidade de apoio das abas, na ordem de 0,23 mm, que, por conseguinte, leva ao menor empenamento de 0,27 mm.

Como o aporte de energia térmica, considerando o tempo de resfriamento da Peça de teste, após soldagem, está diretamente ligado com a distorção, conforme exposto nos itens 3.5 e 3.6, para atingir a temperatura-ambiente (25°C), o tempo médio de resfriamento foi de aproximadamente 35 minutos. Por outro lado, devido à curta limitação da chapa dobrada impedindo a radiação, que é um fator benéfico para o resfriamento, a entrada de calor, na prática, é instantânea e cumulativa. Ainda mais, com a presença de abas dobradas, uma quantidade considerável de calor pode ser recuperada pelo lado interno da seção por convecção, ou conservando por mais um pouco de tempo o calor, nessa pequena área. Como o equilíbrio total do calor recebido é o mesmo do calor perdido, o que causa deformações são as taxas de aquecimento e resfriamento, a saber, o aquecimento rápido e o resfriamento lento. As dilatações

e as retrações são induzidas de maneira que, sustentando a velocidade de soldagem, resultam no mesmo comportamento de deformidade.

Esse método se apresentou de forma satisfatória, atingindo o objetivo específico quanto aos resultados, podendo ser aprimorado com o tempo de escaneamento inicial, ou seja, o pré-escaneamento do conjunto metálico a ser soldado, para a realização das análises computacionais.

Levando em conta o processo de fabricação nas indústrias, como as de estruturas metálicas, as quais exigem projetos mecânicos de alta precisão, o setor de soldagem, para evitar os problemas quanto a distorções, tem nesse método um forte aliado, por estar à disposição, bastando que seja implementado.

Do ponto de vista da espessura do material, a discreta variação no processo de soldagem robotizado pouco influenciou o aporte térmico, mas por meio do método de escaneamento a *laser*, pode-se observar os deslocamentos consequentes da distribuição térmica transiente no material.

### 6.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Analisando-se os testes de tração e cruzando-se os resultados quanto à deformação e tensão, depois de tabulados e tratados estatisticamente, foram selecionados os valores médios das resistências de escoamento e máxima, averiguando paralelamente o alongamento correspondente.

Com esses valores médios dos CPs, ficou notório que, além da superioridade em relação à mostrada pelo fornecedor do material, conforme os CAs do fabricante, há uma boa margem de segurança, sendo para o aço ASTM A36 na ordem de 9,4% e, para o ARBL CSN Civil 300, a tensão de escoamento com 14% acima sendo satisfatório, apresentando um comportamento de alongamento-padrão.

Tendo em vista os resultados de resistência mecânica dos ensaios, é válido considerar os limites de resistência propostos nos parâmetros das propriedades dos materiais e na modelagem no ANSYS *Workbench* e ADPL, pois se relacionam aos estados de tensões.

O comportamento dos materiais frente ao esforço de tração, com rompimento logo no limiar da ZAC com o MB, em torno de 7,7 mm de distância livre do cordão de solda para o aço ASTM A36 e 9,7 mm para o ARBL CSN Civil 300, é explicado principalmente pela incompatibilidade de tensões residuais, mudança de fase, alteração de dureza e alotropia nessa determinada região.

O arame-eletrodo AWS ER70S-6 produz a menor largura da zona afetada pelo calor, e o rompimento do CP evidenciou que, nas regiões de transição da incompatibilidade de tensões residuais próximo ao cordão de solda, especificamente na zona termicamente afetada e o metal de base sem distinção do tipo de aço ou consumível, é o setor fragilizado com variação de ductilidade.

#### 6.4 MÉTODO XRD NA TENSÃO RESIDUAL

Analisando-se as tensões por XRD, houve colonização incompatível mais próxima do metal de solda.

Corroborado pelo critério da máxima energia de deformação, apresentado na Figura 5.13, é possível ter uma situação dos pontos estruturais quanto ao estado plano de tensão, sendo notório que o processo de dobramento tem instalado uma tensão média normal de tração medida em x, numa magnitude de 81 Mpa, promovido pelo alongamento radial, surgindo perpendicularmente uma tensão em y no valor de 64 Mpa, comprimindo as células unitárias, em torno dessa região, plastificando-a. A tensão cisalhante existe, porém, de pequena magnitude em relação às tensões principais, de modo que tem o valor de 17 MPa.

Quanto às tensões principais, essa região do perfil original tem um comprometimento com respeito às ações de forças externas, se atuarem, como foi no teste de tração, se juntando a tensões internas de tração e reduzindo tensões de compressão.

Após a execução do processo de soldagem, a tensão residual média resultante na região do metal de solda exibiu um valor equivalente na ordem de 295,5 MPa, como se vê na figura 5.12, evidenciando que houve um tratamento térmico tal, nessa transformação microestrutural, suficiente para manter a tensão tão elevada sem fissuração, registrando a elevação de 214,5 Mpa, nessa região plastificada.

Com referência às regiões dobradas do perfil estrutural, os efeitos quanto às tensões residuais têm particularidades exclusivas dessas áreas, como mostrado na Figura 5.14, apontando tensões mais críticas justamente no metal de solda com valores na ordem de 296 Mpa; ora, o conhecimento deste detalhe auxiliará como critério de projeto, dependendo da sua aplicação. O registro da tensão no material primitivo devido ao processo siderúrgico é abaixo de 26 MPa.

Por outro lado, cruzando as informações do ensaio de tração, o calor de soldagem causou um alívio de tensão, no sentido do eixo y, na ordem de 14%, registrando 55,84 MPa e praticamente extinguindo a tensão cisalhante. E, pelo critério de falha, a fragilidade constituída mostra que o material adquiriu a redução da ductilidade do aço, nessa região do cordão de solda,

e o aumento da dureza, novamente, assim, demonstrando a alteração microestrutural. Isso justifica o teste de tração do corpo de prova, quando se rompe fora do cordão posterior à zona termicamente afetada, apresentado nas Figuras 6.1 e 6.2:

Figura 6.1 - Rompimento dos corpos de prova ao teste de tração do grupo A



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 6.2 - Rompimento dos corpos de prova ao teste de tração do grupo B



Fonte: Elaborada pelo autor

Nessas imagens, é clara a ruptura sempre fora do cordão de solda, comprovando que a influência da temperatura se associou à melhoria das propriedades mecânicas, onde a distância média “d” de 7,7 mm, para os aços ASTM A36, e 9,7 mm, para os aços ARBL CSN Civil 300,

depois do cordão, permanecendo na região do metal de base. Isso indica que o calor de soldagem promoveu o desenvolvimento de um resfriamento térmico, tornando susceptível o rompimento, e a instalação da tensão residual nessa camada sugere que essa tensão inserida de 296 MPa propiciou a fratura, sabendo-se que a tensão resistente para o aço ASTM A36 é 360MPa, ficando-se com uma reserva de tensão muito baixa para a tração. Confirma-se também pela transformação alotrópica de fase do aço próximo nessa região.

No caso do aço ARBL CSN Civil 300, atingiu a tensão máxima de 402 Mpa, e a média ficou na ordem de 286 Mpa, comportando-se de modo muito semelhante ao outro aço, ficando mais evidente que, no sentido do trajeto de soldagem, com a incidência de calor, houve geral diminuição das tensões, na ordem de 12%, o que é mais perceptível após o robô virar a última dobra e terminar a soldagem. A maior compressão registrada foi de 148 Mpa, com média de 139 Mpa.

Com o mapeamento das tensões residuais mostrado nas Figuras 5.16 e 5.21, os registros das tensões mais expressivas concentrou-se próximo ao limiar da ligação do cordão de solda com a ZAC, havendo o maior valor registrado de tração igual a 306 MPa e uma média geral de 298 MPa, manifestando, assim, as máximas tensões residuais, à medida que se afasta do cordão de solda, com a queda discreta da tensão e, abruptamente, a inversão de tensão de tração para compressão, registrando as maiores compressões na ordem de 150 Mpa, com o maior registro de 176 MPa.

Esse comportamento é explicado pelo calor, com sucessivos aquecimentos e resfriamentos, até atingir o equilíbrio térmico, alterando o grau de agitação molecular principalmente próximo ao cordão de solda, quando se tem a transição do estado líquido para o sólido do metal de solda, segundo realçado na Figura 5.12, com a situação de tensão residual para o aço ASTM A36.

Assim, esse método da técnica XRD se revelou eficaz nas medições de tensões residuais, devido ao processo de soldagem, corroborando o método de escaneamento a *laser*, já que foram coerentes com os resultados numéricos e, por conseguinte, confirmando mais outro objetivo especificado neste trabalho.

## 6.5 MICRODUREZA NA JUNTA SOLDADA

Pelos resultados dos valores de dureza, pode-se observar que o cordão de solda adquire as maiores medidas de microdureza, em função do próprio processo metalúrgico do cordão de solda, segundo a Figura 5.23, que demonstra bem isso, evidenciando valores próximos a 200 HV.

Apesar de não ser o foco a transformação microestrutural de fases, no Apêndice C, estão as imagens de micrografia que auxiliam na visualização das regiões afetadas pela dureza do material corroborado por essas transformações.

Além disso, observando as medidas de microdureza da Tabela 5.3, nota-se que os CPs expressaram os maiores resultados nas regiões do MB, da ZAC e da ZF, no aço ARBL CSN Civil 300, utilizando o arame-eletrodo AWS ER70-S6; comparando-se com o ASTM A36, também se apresenta, na mesma proporção, com esse mesmo consumível, que relaciona esse arame-eletrodo à sua constituição química com maior teor de Mn e Si.

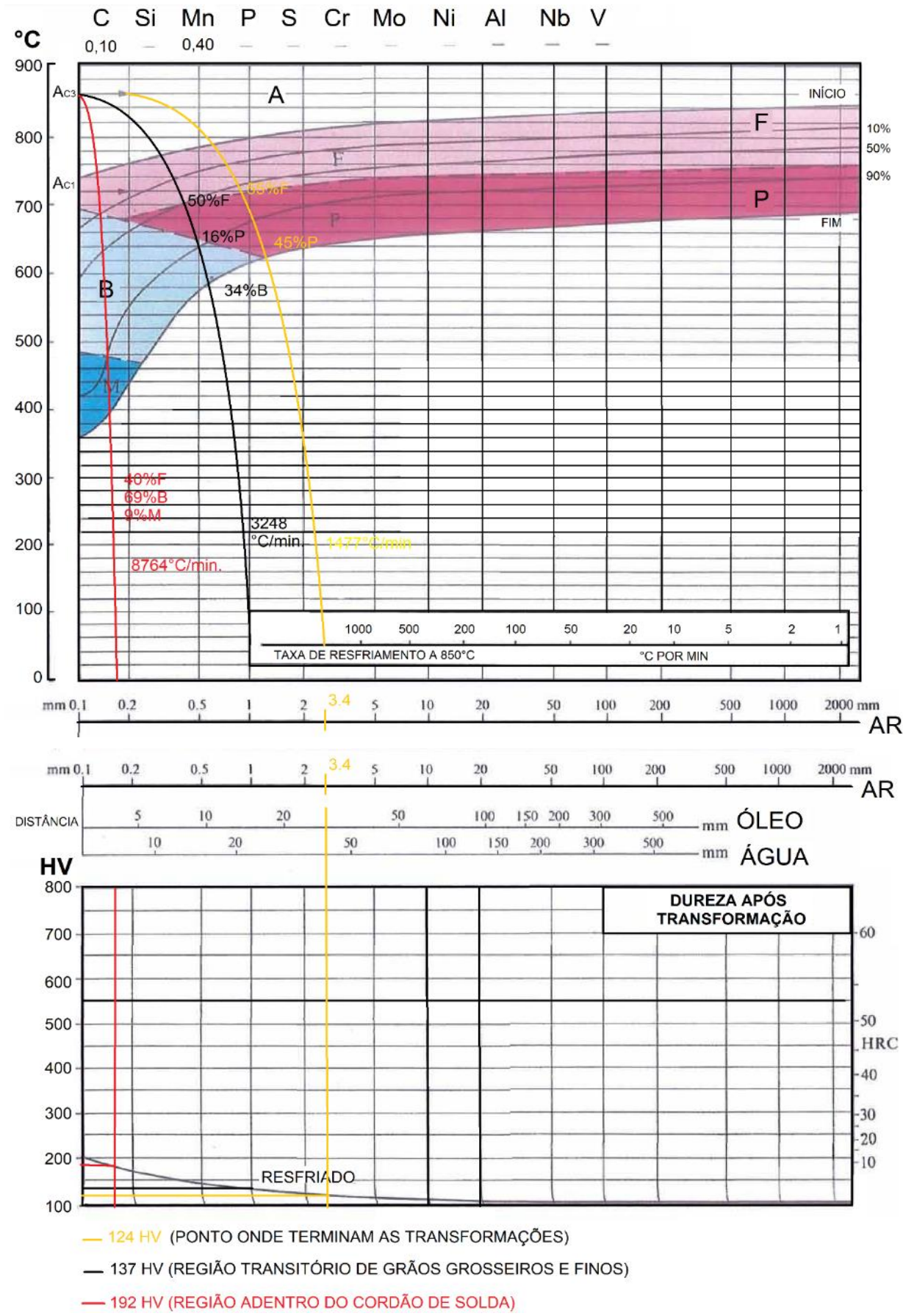
Por outro lado, percebe-se que, com o uso do arame-eletrodo com a redução de dureza, há uma melhoria na ductilidade.

Nas indústrias de estruturas metálicas, o objetivo é conseguir os níveis de dureza do metal de solda próximo aos do MB.

Ponderando o exposto, quando a aplicação é voltada a projetos de componentes estruturais com ligações que necessitam de menor dureza, é recomendado, por conseguinte, o uso do arame-eletrodo AWS ER70S-3, todavia, quando o elemento estrutural necessitar de maior dureza, o mais apropriado será o arame-eletrodo AWS ER70S-6.

Tendo vista a zona termicamente afetada, a qual não constitui o foco deste trabalho, serve como referência a existência da transformação microestrutural do MB, devido à taxa de resfriamento, como se vê na Figura 6.3, resultando em microconstituintes de maiores dureza que o MB. Logo, com base no diagrama CCT, para o aço carbono com 0,10% em peso e com os resultados das taxas de resfriamento calculadas pela equação 3.5, obtêm-se as seguintes transformações:

Figura 6.3 - Dureza pelo diagrama CCT do aço ao carbono



Fonte: Elaborada pelo autor.

No sentido de resistência mecânica, há uma melhor concordância para o grupo A2, aço ASTM A36, usando o consumível AWS ER70S-3.

Assim, fica estabelecido mais uma vez que, para cada finalidade de uma estrutura metálica, como vigas, colunas, treliças etc., é possível indicar o melhor tipo de aço com o arame-eletrodo adequado, de forma que promovam as características da solda com menor susceptibilidade a trincas e boa tenacidade.

## 6.6 ANÁLISE QUÍMICA

Na espectrometria utilizada pelo método de emissão óptica em plasma, arco e centelha de argônio, com acoplamento indutivo nos CPs, a constituição química expressa em percentual de peso está explícita na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Teores dos principais elementos químicos presentes nos aços (% em peso)

| Elementos Químicos | Metal de base |               | Metal de solda |      |             |      |
|--------------------|---------------|---------------|----------------|------|-------------|------|
|                    | ASTM A36      | CSN Civil 300 | AWS ER70S-6    |      | AWS ER70S-3 |      |
|                    | Grupo A       | Grupo B       | A1             | B1   | A2          | B2   |
| C                  | 0,1000        | 0,1000        | 0,09           | 0,08 | 0,09        | 0,09 |
| Si                 | 0,0400        | 0,0400        | 0,60           | 0,53 | 0,32        | 0,27 |
| Mn                 | 0,4900        | 0,5700        | 0,86           | 0,70 | 0,75        | 0,66 |
| P                  | 0,0200        | 0,0200        | 0,02           | 0,01 | 0,02        | 0,02 |
| S                  | 0,0200        | 0,0200        | 0,03           | 0,02 | 0,02        | 0,02 |
| Cr                 | 0,0200        | 0,0200        | 0,01           | 0,01 | 0,02        | 0,01 |
| Ni                 | 0,0100        | 0,0100        | 0,01           | 0,01 | 0,01        | 0,01 |
| Al                 | 0,0500        | 0,0400        | 0,01           | 0,02 | 0,02        | 0,02 |
| Cu                 | 0,0200        | 0,0100        | 0,04           | 0,04 | 0,09        | 0,07 |
| Nb                 | 0,0001        | 0,0020        |                |      |             |      |
| V                  | 0,0000        | 0,0020        |                |      |             |      |
| Ti                 | < 0,0010      | < 0,0010      |                |      |             |      |
| B                  |               | < 0,0050      |                |      |             |      |
| N                  | 0,0015        | 0,0044        |                |      |             |      |
| Ca                 |               | 0,0011        |                |      |             |      |

Fonte: Elaborada pelo autor

Nessa análise da composição química dos materiais, com os valores de cada CP tabulados e tratados estatisticamente, relacionam-se os valores médios dos elementos químicos presentes no metal de solda e base dos conjuntos de CPs.

Constata-se certa divergência, quanto aos anunciados pelo CA do fornecedor, principalmente a respeito do peso do elemento desoxidante Mn, que apresentou um desvio de aproximadamente 29%, para ambos os aços.

Esses resultados são diferentes, se comparados com os dados fornecidos pelas Tabelas do Apêndice A, pelo fato de se tratar de valores normatizados com os reais, porém, dentro dos intervalos normativos.

Com referência ao metal de base, foi observado que o teor de C apontou a média geral de 0,10%, para ambos os aços, enquanto o teor de Mn obtido, para o aço ASTM A36, foi o valor de 0,49% e, para o aço CSN Civil 300, de 0,57%, o que aumenta o risco no surgimento de trincas, devido à presença do Mn. O elemento de liga presente, como Al, apresentou média percentual em massa, no aço ASTM A36, igual a 0,05%. Por outro lado, no aço CSN Civil 300, a média foi de 0,04%. Com isso, evidencia-se a diferença discreta no percentual de alumínio, como elemento antioxidante que pode conduzir a melhora da resistência à corrosão. Em compensação, o aço ARBL CSN Civil 300 tem a presença de baixa liga de outros elementos, o que qualifica o material.

Simultaneamente, para o metal de solda, os teores de C e Mn, diluídos no metal de base, apresentaram médias de 0,09% e 0,86%, para o aço ASTM A36, com a utilização do arame-eletrodo AWS ER70S-6; contudo o arame-eletrodo AWS ER70S-3 conservou a taxa de carbono e presenciou um decréscimo de manganês para 0,75%, demonstrando ser um consumível de melhor diluição em 14,7%, no mesmo processo de soldagem. No entanto, as taxas de Mn foram maiores que as do metal de base, o que pode alterar a temperatura de austenitização, reduzindo-a. No aço CSN Civil 300, empregando o arame-eletrodo AWS ER70S-6, o carbono evidenciou 0,08% e o manganês, 0,70%; semelhantemente, para o arame-eletrodo AWS ER70S-3, conservando o teor de C e contendo pouca alteração com o Mn, reduzindo-o para 0,66%, o que mostra boa conformidade com o aço estrutural para ambos os consumíveis, num percentual de 6% na diluição.

Nota-se, portanto, que o aço ASTM A36 fica mais sensível na diluição do Mn no metal de solda, em relação ao aço ARBL CSN Civil 300, com a mudança do consumível.

Do mesmo modo, os elementos de liga, como Cr e Cu, apresentaram valores médios de 0,02% e 0,09%, para o aço ASTM A36, utilizando o arame-eletrodo AWS ER70S-3; por sua vez, com o arame-eletrodo AWS ER70S-6, houve redução de aproximadamente 50% para esses

elementos na diluição, o cromo, para 0,01% e o cobre, para 0,04%. De maneira oposta, no caso do aço CSN Civil 300, o Cr se manteve, tendo variação no teor Cu, com o uso do eletrodo AWS ER70S-6, havendo adição na diluição de 0,04% para 0,07%, quando se alterou o arame-eletrodo AWS ER70S-3, proporcionando significativa melhora da resistência à corrosão. A presença do Cu na diluição, quando se utilizou o consumível AWS ER70S-6, é proveniente do metal de base, ao passo que a presença do Cu, com o arame-eletrodo AWS ER70S-3, é advinda dele mesmo diluído, demonstrando sua eficiência no aumento de resistência à corrosão de, pelo menos, o dobro, quando se dilui. Praticamente não há grandes alterações nas taxas de Cr, favorecendo a resistência à corrosão.

No que se refere ao Si, elemento desoxidante, houve um significativo aumento na diluição dos arame-eletrodos nos metais de base, bem como o AWS ER70S-6 alcança os maiores teores, por volta de 0,57%, na média geral, tendo efeito negativo na temperabilidade em relação ao AWS ER70S-3, com 0,29%. Como o Si reflete em aumento de dureza e resistência, percebe-se que, na diluição o consumível AWS ER70S-6, terá um efeito endurecedor maior do que o AWS ER70S-3.

Nesse contexto, fica claro mais uma vez que o tipo de consumível influencia a composição química do cordão de solda sobre os aspectos metalúrgicos.

Corroborada pela análise da espectrometria, do metal de solda e base, conferem-se as condições satisfatórias quanto à comparação geral dos elementos químicos recomendados pelo fabricante de ambos. E, aplicando os valores reais, nas equações 3.1 e 3.2, que melhor explicam a soldabilidade para esses casos, obtêm-se os valores do carbono equivalente (CE), constados na Tabela 6.2:

Tabela 6.2 - Carbono equivalente médio (CE) no metal de base

| Grupo de CPs | CE real | CE calculado |
|--------------|---------|--------------|
| A            | 0,20    | 0,18         |
| B            | 0,19    | 0,25         |

Fonte: Elaborada pelo autor

Com o aço ASTM A36, resultou o valor médio do CE igual a 0,20, ficando próximo das estatísticas do fabricante, que é de 0,18, de sorte a demonstrar valores próximos ao especificado. Enquanto, com o aço CSN Civil 300, o CE ficou em aproximadamente 0,19, mais distante do comparado com o fabricante, que fornece 0,25; contudo, confirma-se a eficácia do teste e a boa soldabilidade dos aços, não se necessitando de nenhum tipo de tratamento térmico para o procedimento de soldagem.

## 6.7 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

Os CPs, de modo geral, apresentaram cordão de solda com ótimo aspecto, obtendo penetração com reforço no verso do cordão e sem mordedura, como resultado do processo robotizado que, comparado ao processo manual, revela que, neste, não se atinge a homogeneidade conseguida.

A geometria dos cordões, usando o arame-eletrodo AWS ER70S-3, resultou em um aumento significativo de 13,6% (como ilustrado na figura 5.28), maiores larguras da zona termicamente afetada. Logo, a deposição do metal de adição para o consumível AWS ER70S-3 foi maior.

Com a média da dimensão da largura da região afetada termicamente, pode-se definir o diâmetro da elipse de Gauss e o fim da zona afetada pelo calor, a qual limita o fim da transformação microestrutural. A Tabela 5.4 resume essas larguras nas juntas de solda tabuladas no Excel, com resultados dos valores médios por grupo e geral.

Não somente o processo de fabricação de estruturas metálicas se atrai ao ótimo aspecto das soldas, com diminutas falhas, mas também mantém as seções do cordão, como especificado nas macrografias, por conta do uso do robô, dando qualidade a todo o percurso de soldagem e gerando alta produtividade.

Pela Figura 5.21, nota-se uma leve excentricidade geométrica do cordão de solda devido ao efeito gravitacional, sem prejudicar a qualidade, mesmo que desalinhando discretamente o eixo de simetria, por se tratar de único passe.

Em outro ponto de vista, com os mesmos parâmetros de soldagem, no sistema robotizado, é possível haver diversos tipos de procedimentos, resultando em cordões de soldas específicos para cada finalidade, apenas alterando alguma variável, como o consumível.

As larguras das zonas termicamente afetadas variaram em função do aporte térmico; com isso, as temperaturas de transformações acima de 450°C tornaram a microestrutura mais sensível, indicando que o processo de soldagem tende a uma melhor eficiência, no sentido de programação do controlador do robô, utilizando o consumível AWS ER70S-6 para ambos os aços.

## 6.8 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA

Ao se analisar a temperatura, durante o experimento de soldagem, observa-se que os termopares tipo K respondem bem ao calor que eles recebem, com pequena variação em relação

à câmera termográfica, na ordem de variação menor que 2%, demonstrando, assim, sua eficiência.

Ainda com os valores de temperatura dos canais dos termopares, conseguiu-se construir a curva de repartição térmica, a qual exhibe um comportamento similar ao de muitos pesquisadores, como (ZANIN, 2010) e (GUERRA, 2017), durante os intervalos de tempo, indicando uma regularidade no experimento.

Essas leituras de temperaturas ajudaram na modelagem por elementos finitos, no lançamento do modelo e na sua discretização, com base na emissividade de 0,91, que tem essa configuração prevista pelo fabricante dos equipamentos.

A aplicação do termopar na face normal da soldagem, durante os experimentos para a verificação da temperatura que causa a distorção e tensão residual, é um dado importante para balizamento da apropriada condição de contorno no método de elementos finitos, obtendo-se valores muito próximos aos medidos experimentalmente. Ora, as tensões residuais se limitaram ao valor medido de 196 Mpa.

O sentido de soldagem produz um comportamento único das distorções, devido à instalação setorizada e incompatível de tensões residuais.

A distribuição térmica, inevitável do processo de soldagem, é um fator determinante na instalação e desenvolvimento das tensões residuais e das deformações, o que pode ser valorizado através do método de escaneamento a *laser*, interagindo com o método dos elementos finitos como ferramenta de controle.

As tensões residuais medidas evidenciaram o comportamento mais brando, nas dobras do perfil, quando comparado com a sua alma.

O efeito de borda, no tocante à distribuição térmica, provocou um certo alívio de tensão, como registrado pelo escaneamento, com as menores deformações.

## 6.9 ELEMENTOS FINITOS

Através da análise dos elementos finitos, após inúmeras interações realizadas com o uso de um processador extremamente rápido e de última geração, depois de quase uma hora, conseguiram-se os resultados que descreveram fielmente o comportamento térmico do processo de soldagem experimental, tendo sido obtidas as imagens provenientes da modelagem matemática onde se presenciam os campos térmicos temporais, conseguindo atender ao objetivo específico no que concerne à modelagem do campo de temperatura.

Com o fim de validar o modelo de simulação do processo de soldagem, os estudos de distribuição térmica, com a representação dos campos de temperatura que acontecem nas

regiões intermediárias ao percurso da poça de fusão, obtiveram o resultado satisfatório em face da realidade.

O calor cedido à poça de fusão, devido à soldagem, é instantaneamente transferido na direção da espessura e, em seguida, na direção radial por todo perfil da peça de teste, também verificado pelos pesquisadores (SILVA; DEMARQUE *et al.*, 2020), (LI, FENG, *et al.*, 2018); (MASOOMI; PEGUES *et al.*, 2018), em seus trabalhos com chapas finas.

Nota-se a que, nos resultados da Figura 5.31, há uma excelente concordância, em todos os aspectos, principalmente quanto à distribuição térmica, salvo com uma discreta diferença no contorno da dobra, a qual se mostra um pouco mais abrangente; contudo, não é relevante ao caso, já que o objetivo foi alcançado, quanto à realização do método de modelagem do campo de temperatura.

Os parâmetros dos materiais têm uma relevância significativa, levando-se em conta o coeficiente limite de transferência de calor e o calor latente, para o processo de simulação de soldagem, no ANSYS. A simulação de análise de campo de temperatura, durante a soldagem, teve pré-tratamento, com a aplicação e solução de dois sistemas físicos: pós-processamento do campo de temperatura e outro no campo de tensão.

Com a temperatura-ambiente considerada de 25°C, as superfícies superior e inferior da soldagem e as três superfícies circundantes transferem o calor por convecção, com o coeficiente de convecção de  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ , enquanto o plano de simetria da soldagem na fresta é adiabático.

O pós-processamento, nos aspectos térmicos pontuais, dependeu dos *steps* e *substeps*, dado que experimentalmente se conferiu a temperatura depois de uns 20 minutos passados do término da solda da Peça de teste, a qual atingiu 45°C, próximo do equilíbrio; o tempo levou aproximadamente mais 10 minutos.

Na Figura 5.31, percebe-se que o calor móvel, ao longo da projeção de soldagem, gradualmente é transferido, de forma radial, nas direções do perfil, dissipadas por condução e convecção.

As temperaturas na borda, onde a soldagem é iniciada, diminuem rapidamente, em função das propriedades térmicas do material, por um regime não linear, destacando-se o intervalo entre 450°C e 850°C, principalmente na zona termicamente afetada.

Quanto à taxa de resfriamento, percebe-se, pelos resultados, que são convergentes, sendo que se trata de um comportamento de queda da temperatura brusca.

A região de interesse térmico, por conseguinte, se restringe na maioria dos casos ao MS e à ZAC, através da análise térmica no processo de soldagem dividida em análise térmica de estado estacionário e análise térmica transiente.

Yo obteve a mesma resposta de distribuição térmica, conforme a imagem da Figura 5.32, usando os elementos Quad 4node 55 e Brick 8node 70.

Durante o processo de soldagem, quando parte do material de base derrete e se dilui, com o arame-eletrodo, esse sistema recebe energia do fluxo térmico. Por outro lado, quando a poça se solidifica, ela libera energia térmica na forma de calor, a qual é transferida para toda Peça de teste, formando a zona termicamente afetada pelas diferenças de calor, que é cedido e recebido até atingir o equilíbrio, como resultado das suas dimensões.

Ademais, a distribuição térmica justifica a fonte de geração Goldak, pois, na prática, a poça de fusão não é esférica simétrica, na soldagem, como no processo a *laser*. Ao se calcular com a função de distribuição da fonte de calor dupla elipsoidal, verifica-se que o gradiente de temperatura, na primeira metade do elipsoide, é íngreme como na realidade, enquanto o gradiente de temperatura, na segunda metade do elipsoide, é relativamente lento. Assim, considera-se a primeira metade como um elipsoide de 1/4 e a metade posterior como outro elipsoide de 1/4, conforme as equações 3.24, 3.25 e 3.26.

As temperaturas registradas ao longo do eixo do cordão de solda, conforme apresentado na Figura 5.33, se dão ao aquecimento da Peça de teste no local da junta soldada, onde o arame-eletrodo abre o arco elétrico e o mantém na posição de coordenada específica em  $z = 87,5$  mm, e a fresta da junta atinge as temperaturas mais elevadas.

Com a soldagem em andamento, o arco elétrico gerando a energia térmica vem pré-aquecendo toda a região, antes de terminar a soldagem e, por onde o arco vai passando, as temperaturas alteram-se de forma progressiva e expressivas, em relação à temperatura-ambiente de 25°C e, depois de um tempo, isso muda inversamente.

A análise de problemas de engenharia de soldagem tem grande importância, devido ao comportamento do aço estrutural ASTM A36 e CSN Civil 300, dependendo da sua aplicação, pois suas características na análise por elementos finitos, na simulação do processo de soldagem, podem ser simplificadas de maneira que a teoria da análise, correspondendo termicamente, atendeu à simulação. Assim, o método dos elementos finitos para o processo de soldagem consiste fundamentalmente da condução de calor transiente não linear, sendo um dos objetivos específicos atingidos.

Com o uso da equação 3.6, determina-se a energia térmica do arco elétrico transferida no processo de soldagem, no ponto de aquecimento e, com a densidade máxima do fluxo de

calor no centro definido pela equação 3.21, obtém-se o resultado que serve de base de dados na comutação com as tensões residuais e deformações.

Observa-se ainda, na Figura 5.34, que existem muitos fatores os quais podem influenciar os resultados dos campos de temperatura obtidos através do sistema MEF e experimental, como a eficiência térmica do processo de soldagem GMAW, que varia desde 75% a 95%, índice que também influencia os resultados no MEF.

Outro fator é o valor da emissividade nos sistemas experimentais e MEF, que varia de 0,9 e 0,97.

Por outro lado, cruzando-se as informações do resultado das temperaturas de pico, nos canais medidos, onde cada ponto do cordão de solda se desenvolve no processo de soldagem, construiu-se a Tabela 6.3, focalizando a comparação das temperaturas de pico alcançadas na soldagem e as temperaturas medidas experimentalmente, partindo do eixo da junta. Além disso, nos sistemas robotizados, a programação, disposição dos equipamentos e os parâmetros do robô na linguagem YASNAC, bem como o tecimento, passes, posição e sequências de soldagem, combinadas ou simples, influenciam a energia interna do sistema.

Tabela 6.3 - Confrontação entre picos de temperatura e os medidos pelos termopares

| <b>Distâncias<br/>[mm]</b> | <b>MEF<br/>[°C]</b> | <b>Experimental<br/>[°C]</b> | <b>Erro<br/>[%]</b> |
|----------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>0</b>                   | 2143                | 2090                         | 2.54%               |
| <b>8</b>                   | 754                 | 749                          | 0.67%               |
| <b>11</b>                  | 429                 | 422                          | 1.66%               |
| <b>17</b>                  | 129                 | 127                          | 1.57%               |
| <b>22</b>                  | 28                  | 27                           | 3.70%               |

Fonte: Elaborada pelo autor

O desvio foi definido com base no ensaio experimental, e o pico de temperatura pelo modelo numérico foi de 0,67%, no ponto localizado a 8 mm do centro do cordão de solda.

As temperaturas de até 980°C, encontradas entre as distâncias de 0 e 8 mm do eixo do cordão, mostraram leituras bem consistentes, com erro médio de 1,6%. Quando as marcações estavam próximas da faixa de 800 e 500°C, na leitura do MEF, entre os relativos pontos afastados 0, 8 e 11 mm do centroide do cordão, verificou-se o erro médio de 1,62%.

Ainda se percebeu o estabelecimento de padrões nos sistemas robotizados para o DBCP e, por conseguinte, o *stick-out*, como uma variável importante que age diretamente nos parâmetros de tensão de soldagem, definindo maior ou menor calor por efeito *joule*

disponibilizado ao arame-eletrodo, impactando em variações na transferência de calor ao metal-base e modificando a penetração da solda.

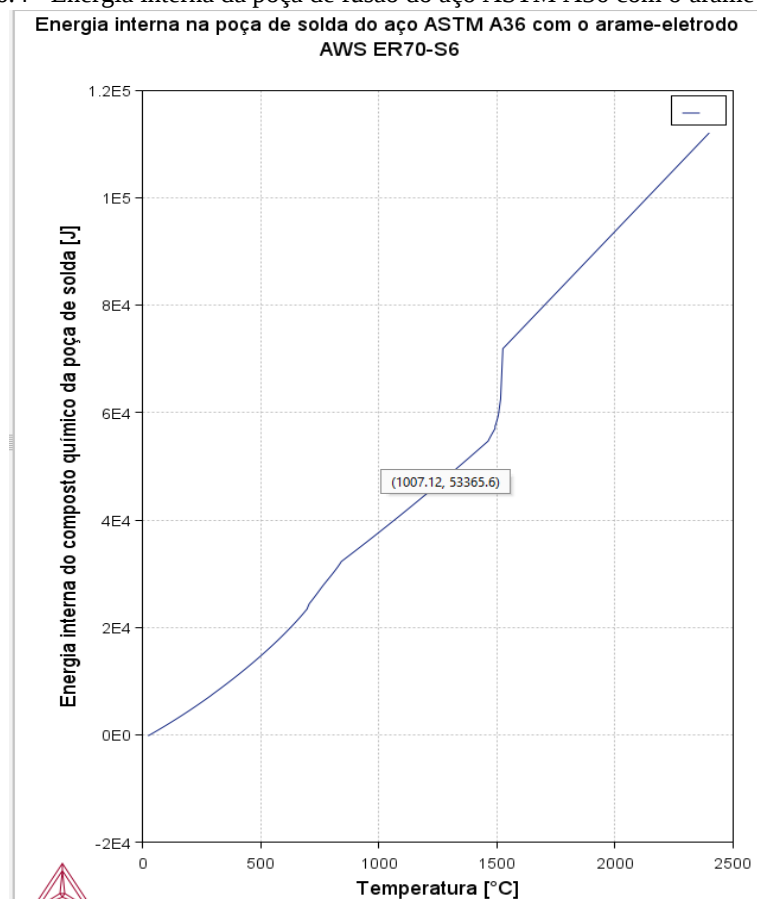
O gás de proteção 75% Ar - 25% CO<sub>2</sub>, também deve ter um direcionamento criterioso, ainda mais que, no processo de soldagem MAG, ele interfere no cordão de solda e no aporte térmico, pela dissociação do gás carbônico, na interação do oxigênio como comburente. Deve-se programar a direção do gás, a não ser que o robô tenha sensor, para que seja eficiente a proteção da poça de fusão.

Pelas imagens de 5.30 a 5.32, provenientes do campo de temperatura, fica caracterizado que tanto os resultados numéricos provindos do método numérico e pelo método de elementos finitos, bem como os resultados provindos dos experimentos, demonstraram elevada compatibilidade com os resultados obtidos.

A temperatura de pico, para os aços em questão, atingiu em torno de 2146 °C, com 2,67% de diferença em relação ao experimental, quando aplicadas uma tensão de 18,7 volts e corrente de 191 amperes, sob uma velocidade de soldagem de 0,01 [m. s<sup>-1</sup>], correspondendo a um aporte térmico de 332,7 x10<sup>3</sup> [J. m<sup>-1</sup>], diante de espessura de chapa de 3,04 mm.

Verifica-se, pela Figura 6.4, a energia interna exigida pelo metal de solda com esse aporte térmico:

Figura 6.4 - Energia interna da poça de fusão do aço ASTM A36 com o arame ER70S-6



Fonte: ThermoCalc V.2022 (Academic).

Segundo o *software* ThermoCalc, a nucleação do aço ASTM A36, quando se emprega o arame-eletrodo AWS ER70S-6 ou AWS ER70S-3, se dá aos 1527°C e aos 1493°C; não existe mais líquido na poça de fusão e a transformação microestrutural se estende dos 851°C, à medida que o resfriamento vai acontecendo, aos 335°C. Na zona termicamente afetada, após a linha de ligação, o metal se resfria e a temperatura cai, como ficou evidente nos ciclos térmicos, necessitou de uma determinada energia para a conversão de calor, determinando, assim, a largura dessa região.

Assim, do ponto de vista de energia interna exigida por esse sistema, demonstra variação quando se usa o consumível AWS ER70S-6, enfocado na Figura 6.4, em que registra a energia necessária de 55678 J para a realização do cordão de solda; com o arco elétrico estável no percurso de 18,7 s, a potência básica é de 2784 W, implicando o aporte térmico de 226,8 W. s. mm<sup>-1</sup>, comparado com a energia de soldagem usada, 332,7 W. s. mm<sup>-1</sup>, mostrando que essa energia utilizada no processo de soldagem está com 42,2% acima do necessário teórico.

Pela equação 6.1, a qual determina o rendimento térmico (PEREIRA e FRAGA, 2020) efetivo do processo de soldagem, verifica-se que o seu resultado é  $\eta = 0,87$ , o que é bem próximo ao empregado no método dos elementos finitos com  $\eta = 0,85$ :

$$\eta = \frac{q_m}{q_w} \quad (6.1)$$

Onde:

- $\eta$  é o rendimento do processo de soldagem;
- $q_m$  é a quantidade de calor transferida pelo arco elétrico na peça de trabalho e
- $q_w$  é o fluxo térmico para liquefazer o metal.

Antecipando um resumo dos rendimentos térmicos, no processo de soldagem experimental, a Tabela 6.4 reúne os valores calculados e usados no método dos elementos finitos:

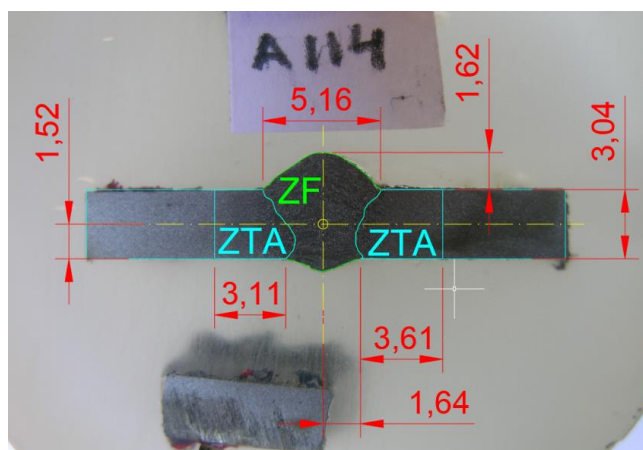
Tabela 6.4 - Rendimento de soldagem

| Conjunto | $\eta$ | $\eta_{\text{média}}$ |
|----------|--------|-----------------------|
| A1       | 0.87   | 0.87                  |
| A2       | 0.88   |                       |
| B1       | 0.86   |                       |
| B2       | 0.87   |                       |

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 6.5 evidencia o formato do metal de solda sob o efeito do aporte térmico imposto no processo de soldagem, nos mesmos parâmetros, soldando o aço ASTM A36 com o consumível AWS ER70S-6:

Figura 6.5 - Formato do cordão de solda do aço ASTM A36 com o consumível ER70S-6



Fonte: Elaborada pelo autor

Já sobre o aporte térmico, quando se troca o consumível para AWS ER70S-3, a energia interna do sistema para a realização da fusão dos materiais é 71721 J, fornecendo uma potência de 3586 W e exigindo uma energia maior, resultando em um aporte térmico necessário de 292,1 W. s.  $\text{mm}^{-1}$ , o qual, ao ser comparado com a energia de soldagem usada, 332,7 W. s.  $\text{mm}^{-1}$ , observa-se que essa energia utilizada no processo de soldagem está com 13,9% acima do necessário teórico e, portanto, tem um rendimento de  $\eta = 0,88$ , com menor perda de energia, durante o processo.

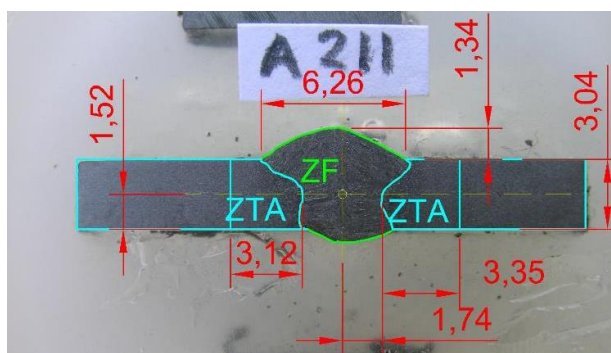
As chapas finas de aço 2,65 mm e 3,04 mm pouco influenciaram os cálculos, sendo quase a relação entre as espessuras, dado que as finas têm menor massa, logo, há uma pequena elevação da energia interna.

Como o robô de soldagem manteve a velocidade de soldagem, energia de soldagem e os parâmetros da fonte de Goldak, na evolução do campo de temperatura gerado pela soldagem de junta de topo da Peça de teste, utilizando-se do processo GMAW-MAG, verificou-se que esses fatores exercem uma grande influência no tamanho da ZF e ZAC, bem como nas temperaturas de pico da ZF, pois se obtiveram cordões de solda e distribuição térmica com precisão de 99%, quando comparados com os testes experimentais.

Visto que a dimensão da zona termicamente afetada é influenciada por todos os fatores já citados, como a velocidade de soldagem e o aporte térmico, em qualquer ponto da chapa metálica que atingir a temperatura de transformação, por volta dos 450°C, haverá o estabelecimento dessa região e, conseqüentemente, aumento da dureza local.

Além disso, pode-se dizer que, para o processo de soldagem com os mesmos parâmetros de soldagem, o aço ASTM A36, usando como consumível AWS ER70S-3, se aplica melhor ao sistema composto, sendo comprovado, com a macrografias e a Figura 6.6, que o cordão é mais largo:

Figura 6.6 - Formato do cordão de solda do aço ASTM A36 com o consumível ER70S-3

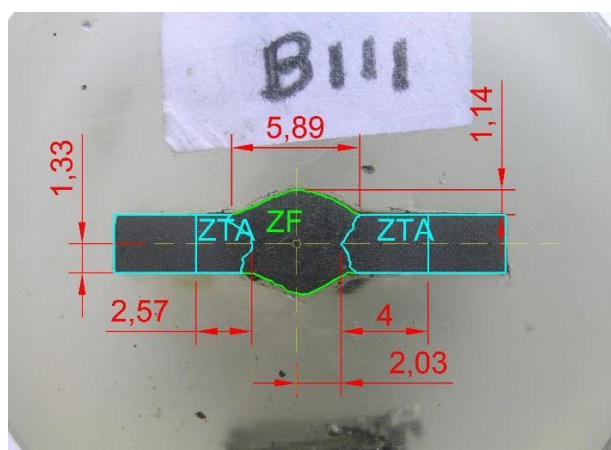


Fonte: Elaborada pelo autor

Entretanto, no caso do aço ARBL CSN Civil 300, usando o consumível AWS ER70S-6, com essa constituição química da poça de fusão, a energia interna do sistema necessária para a realização da fusão dos materiais no processo de soldagem é 69897 J, com uma potência de 3495 W. Essa diluição exigiu o aporte térmico igual a 284,7 W. s. mm<sup>-1</sup> e, novamente comparado com a energia de soldagem usada, 332,7 W. s. mm<sup>-1</sup>, nota-se que a energia utilizada no processo de soldagem fica com 16,9% acima do necessário teórico e, portanto, resultou em um rendimento igual a  $\eta = 0,86$ .

Quase o ideal para o processo de soldagem nesse parâmetro – e a Figura 6.7 mostra isso, na macrografia do cordão.

Figura 6.7 - Forma do cordão de solda no aço ARBL CSN Civil 300 e arame ER70S-6



Fonte: Elaborada pelo autor

Cotejando-se os resultados alcançados com um conjunto de autores, verifica-se o grau de dificuldade encontrado em comparar as conclusões de aporte térmico e correlacioná-los com as resultâncias do campo térmico, como (GHOSH, SEN, *et al.*, 2021), (NGUYEN e CHUJUTALLI, 2021), (EISAZADEH e AIDUN, 2021) e (TARAPHDAR, MAHAPATRA, *et al.*, 2021).

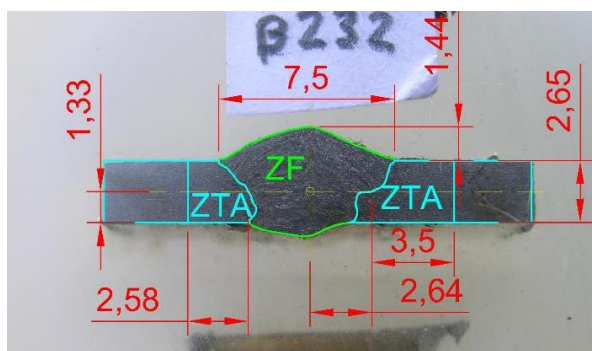
Dessa forma, há evidências sobre resultados de trabalhos que apresentam temperaturas e tensões residuais acompanhadas ou não dos deslocamentos, diante de um intervalo de valoração bem aproximada e, ao compará-los através do índice de aporte de calor, eles se revelam diferentes.

Em acréscimo, analisando o último grupo de CP, vemos que, quanto à energia interna do sistema, para a realização da soldagem dos materiais, é necessário 70842 J com uma potência de 3542 W.

O consumível AWS ER70S-3, diluído com o aço CSN Civil 300, exigiu um aporte térmico de 288,6 W. s. mm<sup>-1</sup> e, comparando-se com a energia de soldagem atuante de 332,7 W. s. mm<sup>-1</sup>, percebe-se que a energia usada nesse processo de soldagem fica com 15,3% acima do necessário, mostrando a melhor eficiência para com esse aço e nessa espessura de 3,04 mm.

Tem-se, na Figura 6.8, a formação do cordão com esses parâmetros, obtendo-se um rendimento de  $\eta = 0,87$ :

Figura 6.8 - Forma do cordão de solda no aço ARBL CSN Civil 300 e arame ER70S-3



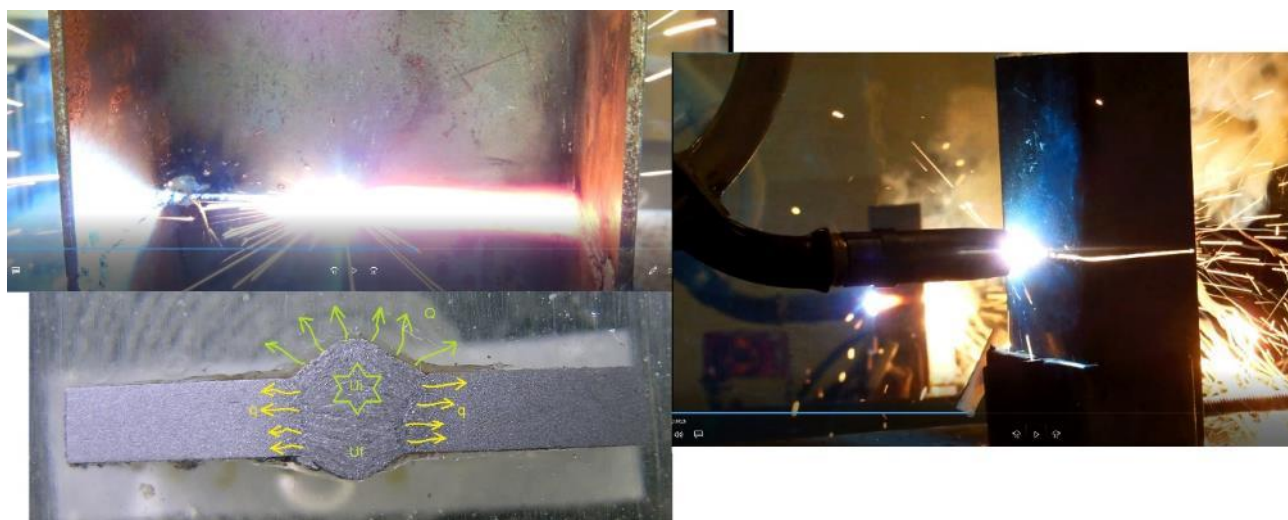
Fonte: Elaborada pelo autor

Mais um outro aspecto se refere à conservação de energia na soldagem, observando-se a energia interna dos diversos sistemas, dentro do processo de soldagem, em particular na poça de fusão e na zona termicamente afetada.

Assim, quando o arco elétrico gera o calor para a deposição metálica, a energia interna do sistema MB + arame-eletrodo + poça de fusão é alterada pelo grau de agitação das moléculas em temperaturas muito acima da fusão de 1525°C, cedendo energia térmica para o ambiente (Q).

Essa energia interna pode ser associada à energia inicial ( $E_i$ )  $332,7 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ , decorrente do movimento interno das moléculas da poça de fusão, sendo bastante agitado, para o MB, que tinha uma energia interna em equilíbrio  $0,7 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$  e, para elevar a um grau de agitação das moléculas até que se obtenha a fase líquida, o total de energia será a energia inteira inicial somada à energia interna final, sendo o quanto de energia foi cedido,  $333,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ , para isso acontecer, conforme ilustrado no esquema da Figura 6.9, acerca de quanto trabalho foi realizado:

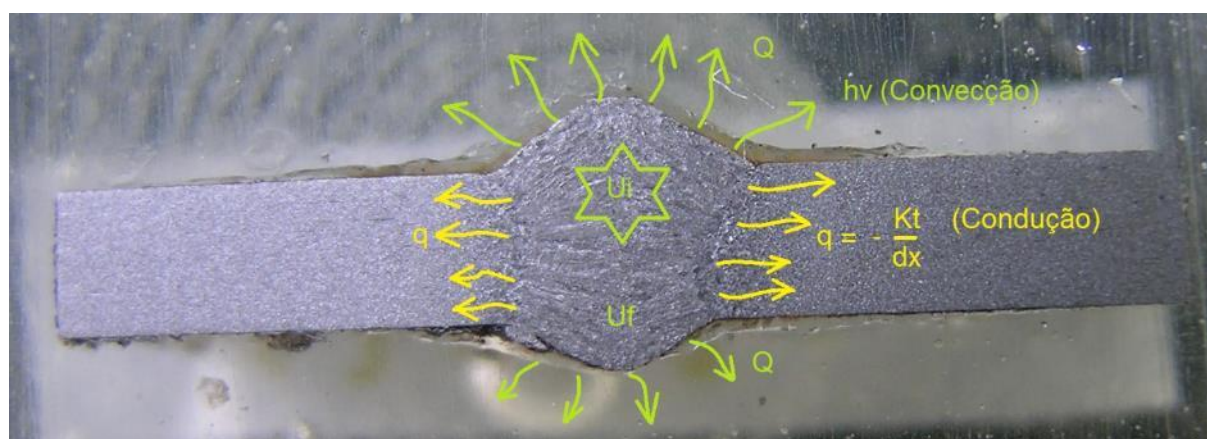
Figura 6.9 - Energia interna de soldagem



Fonte: Elaborada pelo autor

A temperatura diz respeito a quanto calor o sistema é capaz de transferir; como a poça de fusão tem a temperatura maior que a temperatura do ambiente, ela vai ceder calor ou energia térmica para o ambiente e para os pontos do metal que está em menor energia e, quando o equilíbrio for atingido, a poça de fusão vai estar com uma energia interna inferior à inicial, que é a energia interna final ( $E_f$ ), como pode ser visto no esquema da Figura 6.10:

Figura 6.10 - Transferência de calor na poça de fusão



Fonte: Elaborada pelo autor

Como só há trocas de calor envolvidas, isso pode ser expresso também pela equação 6.2:

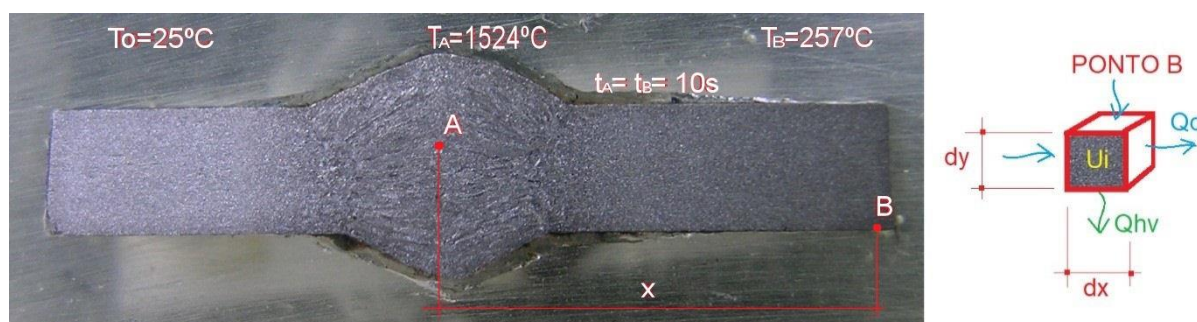
$$E_f - E_i = Q < 0 \quad (6.2)$$

Quer dizer que a energia final menos a energia inicial é igual à energia cedida ao MB e ao ambiente, na forma de calor.

Uma vez que a energia inicial na poça de fusão é maior do que a energia final, isso tem de ser menor que zero, significando que o calor foi cedido, para o metal e o ambiente, na forma de calor transferido por condução e convecção. Logo, a quantidade de energia interna que o sistema poça de fusão + metal de base + ambiente perdeu, na forma de calor, é exatamente igual à energia térmica que o ambiente e o metal ganharam, indicando que o total de energia envolvida no sistema continua o mesmo, ou seja, conservando a energia do sistema.

Por seu lado, em qualquer ponto distante da poça de fusão com temperatura mais baixa, o calor vai fluir do maior para esses pontos, como representa a Figura 6.11:

Figura 6.11 - Transferência de calor distante da poça de fusão



Fonte: Elaborada pelo autor

Seja o ponto B com energia interna inicial ( $E_i$ ), após receber energia térmica na forma de calor fornecida  $Q$  pelos pontos de maior energia até um equilíbrio, ela passará para um aumento de agitação das moléculas e a ser a energia final ( $E_f$ ), considerando que esse fluxo de calor cedido do ponto de maior energia é  $Q$ , como mostra a equação 6.3:

$$E_f - E_i = Q > 0 \quad (6.3)$$

Quer dizer que a energia final menos a energia inicial vai ser igual ao calor recebido ou cedido pelos pontos de maior energia. Tem-se um calor maior que zero, significando que a energia cedida para esse ponto B, porque totaliza a energia o ponto de maior energia, perdeu na forma de calor, sendo exatamente a que o ponto B recebeu, conservando a energia do sistema.

O trabalho é a forma que modifica a energia interna do sistema, podendo ser equacionado pela expressão 6.4:

$$E_f - E_i = Q + W < \text{ou} > 0 \quad (6.4)$$

No processo de soldagem, é cedida uma grande quantidade de calor  $Q$ , ou energia térmica, convertida do arco elétrico e aumentando o grau de agitação interna das moléculas, de maneira a realizar o trabalho espontâneo de transferência de calor para o MB, concomitantemente para o ambiente, até que o equilíbrio seja atingido. A variação de energia interna da poça de fusão com o MB e o ambiente é igual à diferença de energia na forma de calor, que foi cedida do arco elétrico para o sistema, correspondendo ao trabalho feito para esses acontecimentos, mantendo a conservação de energia, registrada pela distribuição térmica pela Peça de teste.

Os valores encontrados demonstram confiabilidade no uso desse método, confrontados com os valores do processo real de soldagem.

## 6.10 TENSÕES RESIDUAIS

Com os resultados obtidos no campo de tensões residuais, advindos da ação do calor, elemento essencial que supre a poça de fusão, essa quantidade e intensidade têm de ser tais, para realizar a solda, porém, influenciarão diretamente os fenômenos mecânicos que sucedem, como as deformações.

Assim, toda a energia térmica irá causar as expansões próximas ao cordão de solda, que, de um lado, é restringida pelo MB, surgindo uma força residual de compressão devido a esses deslocamentos impedidos, dando o surgimento de tensão residual de soldagem, internamente, no material.

Desse modo, para se analisar a superfície, foram planificadas e vinculadas as curvas para registro do histórico de tensões calculadas com a simulação de deposição de metal de solda.

O pós-processamento foi feito, estudando-se os aspectos térmicos pontuais que promovem as tensões residuais, as quais causam os deslocamentos das distorções, conseguindo concretizar o objetivo específico deste trabalho.

Essa operação se constituiu com a definição dos parâmetros, das constantes do elemento e do material, construção do modelo de soldagem, discretização da malha, limitando-se aos objetivos quanto às análises térmica e de tensão interna no material.

Na análise de simulação de campo de tensão, ocorreu a necessidade de substituição do equipamento computacional para uma configuração mais avançada acessível, em razão das limitações de processamento, durante a convergência equacional de soldagem, usando-se o método de cálculo do campo de tensão de soldagem, definido pelas condições de contorno e suas aplicações internas das cargas.

A resolução do cálculo conseguiu efetuar a simulação de deposição de metal de solda,

corresponder à solidificação do cordão e observar que a distribuição de tensão se conformou bastante ao experimental, para não se dizer idêntica. Nessa análise de tensão residual de soldagem de superfície plana tridimensional, registrada pelo histórico de engenharia que o ANSYS produz, é possível visualizar o comportamento da Peça de teste, frente à ação térmica. Como aqui está assegurado o direcionamento de soldagem, a instalação de tensões também seguiu esse condicionamento, de sorte que o produto de um processo de soldagem é constatado pela sua qualidade.

No pós-processamento estudado, os aspectos térmicos pontuais, gráficos térmicos, demonstraram que as tensões têm origem dos cordões para o metal de base, na mesma direção em que transita a energia térmica, instalando-se de forma proeminente, próximo ao cordão de solda, na ordem de 15 a 20 vezes a espessura do material.

Percebe-se que há uma pequena diferença entre as abas por onde a tocha iniciou e terminou a soldagem; nas curvas das dobras, ocorreu concorrência de tensões, instalando-se de uma forma padrão. Nas dobras, é possível verificar perceptível mudança e alterações das tensões, confirmadas pelo medido pela PULSTEC.

Notam-se as maiores tensões residuais na ordem de 190 Mpa, alterando-se numa distribuição equidistante da solda, na superfície da chapa em que posicionou a tocha.

Além disso, as menores tensões residuais são registradas na ordem de 65 Mpa para o tempo de 160s de resfriamento.

Após um certo tempo, não muito maior que 22s, as tensões residuais já apresentam suas características, como também foram validadas pelo experimento, empregando-se o método XRD. No Apêndice G, são expostos os valores experimentais de todas as Peças de teste.

A instalação de tensões residuais se desdobra, à medida que o gradiente térmico é sucessivo e, conseqüentemente, por se tratar de chapa fina, há evidência dos empenamentos.

Existe certa relação quanto à dureza da zona termicamente afetada com a instalação de tensões residuais e, por isso, tem-se o surgimento das distorções, por causa da capacidade de a chapa dobrada conter as expansões e contrações no volume do cordão de solda formado, sendo que a geometria do cordão tem geralmente, no ponto de abertura do arco, a parte mais volumosa.

## 6.11 DEFORMAÇÕES

As deformações aparentemente apresentaram diferentes valores do medido pelo escaneamento, mas o que, na verdade, se vê é a deformação livre da metade de uma Peça de teste, e a deformação resultante é a central, subtraída da extremidade e praticamente dividida

simetricamente, resultando em uma deformação aproximada de 0,496 mm, contra 0,445 mm, medida pelo escaneamento, fornecendo um erro na ordem de 11,4%.

No pós-processamento, considerando os aspectos térmicos pontuais, as deformações devidas às tensões residuais mostraram como as distorções se instalam na Peça de teste, nesse tipo de processo de soldagem, e com os parâmetros experimentais. Observa-se que esse comportamento distorcional pode ser medido pelo método de escaneamento a *laser*, com um grau de assertividade de 98,5%, conforme verificado pelos deslocamentos pontuais, de maneira a se validar.

A análise de simulação do campo de deformação, durante a soldagem, no mesmo método de cálculo do campo de tensão de soldagem, mostrou que, resolvendo-se o cálculo com a simulação de deposição de metal de solda e solidificação, as deformações residuais de soldagem que a superfície plana tridimensional registra conseguiram representar, bem próximo à realidade, um processo de soldagem dentro da indústria.

Nesse contexto, esse método avaliativo das distorções funciona como uma ferramenta importante, não só para avaliar, mas também para ajudar a corrigir os problemas, antecipadamente.

Ademais, a análise de simulação de campo de deformação objetivou caracterizar as deformações, em função da soldagem no processo GMAW-MAG, utilizando o MEF; para tal, o escaneamento a *laser* apontou que as abas não tiveram grandes alterações, ao contrário da alma do perfil.

Assim, tem-se que a metodologia por escaneamento é compatível ao método dos elementos finitos, de modo que a interação é perfeitamente viável para os processos robotizados na soldagem MAG.

A deformação é sempre maior no lado que se inicia o cordão de solda, como no aço ARBL CSN Civil 300, resultando no mesmo comportamento do ASTM A36, porém, com menor empenamento. A menor espessura da chapa, aliada ao maior teor de Mn na composição química do cordão apresentou a maior rigidez, com deslocamento de 0,27 mm, sendo uma condição favorável ao projeto de treliças.

## 7 CONCLUSÕES

O método de escaneamento a *laser* (MEL), implementado baseado no preparo superficial com repetição de varredura de imagens primitiva e soldada, sobrepostas no mesmo referencial, conseguiu modelar e medir com boa precisão as distorções por emissão do feixe de *laser*, construindo imagens de ótima qualidade, por meio das câmeras de alta resolução, sendo compatível com o avaliado pelo MEF e apresentando uma variação de até 0,16 mm. Ademais, esse valor é maior do que o prescrito pelo próprio fabricante do equipamento, o qual especifica  $\pm 0,2 \mu\text{m}$ . O método de escaneamento a *laser* (MEL) obteve resultado de ótima resolução, por emissão de feixes de *laser*, devido ao preparo superficial padrão, com camada média de  $75 \mu\text{m}$  antirreflexiva, executando-se um primeiro escaneamento da peça original com a mesma precisão que no segundo escaneamento da mesma peça soldada sobre a mesa rotativa, produzindo o arquivo STL da imagem final da sobreposição desses escaneamentos no mesmo ponto de referência, procedimento que elevou a precisão dos resultados.

Nesse contexto, esse método se mostra viável, na sua praticidade e avaliação da distorção em perfis de aço estrutural conformado a frio tipo “U”, constituindo um sistema robotizado perfeitamente adaptável e confiável para uma fábrica de estruturas metálicas e possibilitando a integração nos setores de soldagem, automatização e correção das distorções de estruturas metálicas fabricadas com o processo de soldagem MAG e robô, para tesouras, vigas, pilares e qualquer elemento estrutural.

Além disso, a simulação do processo de soldagem GMAW-MAG, pelo método dos elementos finitos, no ANSYS, realizou o mapeamento da distribuição térmica dos deslocamentos e tensões residuais com alto grau de assertividade e semelhante aos resultados dos pesquisadores que trabalharam nessa linha.

O processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa GMAW-MAG, em chapas de aço estrutural conformado a frio tipo “U”, nos aços ASTM A36 e ARBL CSN Civil 300, nas dimensões 100 x 50 x 2,65/3,04 mm, com as juntas propostas e integrado ao robô Motoman UP6, com a programação na linguagem do controlador YASNAC, foi bem-sucedido para as peças que passaram pelo processo, usando os parâmetros constantes fornecidos na Tabela 4.3. Todo sistema correspondeu, de maneira satisfatória e viável, para a aplicação, resultando cordão de solda de alta qualidade.

A técnica por XRD, empregando o equipamento da Pulstec  $\mu$ -X360s, avalia com alta precisão as tensões principais, resultando em um estado plano de tensões para qualquer ponto que se queira estudar, além de ensinar conhecer as regiões que se plastificaram ou não, em função das tensões residuais, através da técnica por raio-X, indicando os pontos e seus

respectivos valores, na forma de quadros e tabelas.

A simulação do processo de soldagem pelo ANSYS modelou os campos de temperatura, deslocamentos e tensões residuais, pelo método de elementos finitos da Peça de teste, apresentando adequada precisão, bem como os consequentes deslocamentos calculados e as tensões residuais, permitindo comparar esses resultados matemáticos com os experimentais, o que demonstrou um alto grau de aproximação entre eles.

Assim, os objetivos foram alcançados e o método de escaneamento com o modelo de elementos finitos foi validado.

Todos os estudos experimentais advindos do processo de soldagem MAG, na transferência do tipo curto-circuito, apresentaram resultados de aporte térmico em *joules* por segundo. O rendimento ( $\eta_m$ ) do arco elétrico considerado para efeito de cálculo foi o calculado do processo de soldagem GMAW-MAG de 87%, baseado na equação 6.1, corroborados pelas pesquisas de Yo, Sheng, Giovanna, Nibidu, Masabushi e Wang, que utilizaram valor bem próximo, mediante as formulações de estudo de transferência de calor, nos formatos experimentais e numéricos dos dados e informações provenientes dos seus experimentos.

Esperava-se que o tipo de preparação da junta alterasse o comportamento do perfil, frente à distorção, mas não foi o que aconteceu.

Quanto à geometria do perfil conformado a frio ficou comprovado que o consumível tem significativa influência no aporte térmico, sendo que, quando utilizado, o arame-eletrodo AWS ER70S-3 tem ação sobre a poça de fusão, aumentando a energia térmica e sendo mais eficiente, no processo de soldagem.

Os valores experimentais obtidos no processo MAG, quando comparados com outros trabalhos que usaram processo de soldagem similar, indicaram elevado grau de conformidade.

Com relação à deformação (ondulação e distorção), é sempre maior no lado em que se inicia o cordão de solda, nas chapas mais finas (2,65mm).

Ficou evidente que, no perfil estrutural de chapa dobrada tipo “U”, a presença das curvas restringe a instalação da distorção e a incompatibilidade das tensões residuais próximas ao cordão de solda. Desse modo, as abas apresentaram diminutas variações ou quase nulas, com uma concentração de tensões residuais e deformações transferidas para a alma do perfil, protegendo o perfil metálico contra distorções.

As tensões residuais medidas pelo equipamento por difração de raio-X mostraram que a região próxima ao cordão de solda concentrou uma incompatibilidade de tensões residuais, com predominância de compressão, motivando o esgotamento da seção transversal do perfil, em função da alteração brusca da ductilidade do material.

Por seu turno, a integração do robô ao processo de soldagem, com o método de escaneamento a *laser*, correspondeu de forma satisfatória, sendo perfeitamente viável, possibilitando também a integração do método XRD na leitura das tensões, já que a execução da solda é feita pelo robô, o que permite a leitura simultânea de deformação e tensão.

Como trabalhos futuros, podem ser desenvolvidos experimentos focando:

- Trocas de calor nas curvas de dobramento de chapa de aço conformado a frio;
- Modelagem por elementos finitos, incluindo o movimento de massa do cordão;
- Modelagem por elementos finitos, com simulação do fluxo de solda;
- Modelagem por elementos finitos, simulando a troca de calor com o ambiente;
- Modelagem por elementos finitos, simulando a sobreposição de calor nas curvas de um perfil dobrado;
  - Realização do mesmo estudo para outros tipos de perfis dobrados, variando o número de dobras.
  - Estudar outros processos de soldagem variando direção da solda.
  - Implementação do mesmo estudo com outros sentidos de soldagem, estudando o comportamento das distorções sobre o perfil conformado a frio tipo “U”.

## 8 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS

- “Variação das Propriedades Geométricas do Perfil Estrutural Dobrado Tipo “U” em Influência no projeto da Estrutura Metálica”, publicado na *Revista da Estrutura de Aço - REA*, v. 9, n.03, dez. 2020, ISSN:2238 - 9377.
- “Método Para Analisar A Distorção No Processo De Soldagem GMAW Do Aço Baixo Carbono Em Chapa Estrutural Dobrada Tipo U”, publicado nos *Anais do XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2022*, v. 9, n. 03, dez. 2022, ISSN:2238 - 9377.
- Perfil Estrutural Dobrado Tipo “U” Sob A Influência Da Distorção Devido Ao Processo De Soldagem MAG, publicado nos *Anais do 12º Congresso Brasileira de Engenharia de Fabricação – COBEF 2023*.
- Análises da Distorção, Corrosão e Propriedades Mecânicas no Perfil Estrutural Dobrado Tipo U no Aço ASTM A36 Na Junta Soldada, publicado nos *Anais do 12º Congresso Brasileira de Engenharia de Fabricação – COBEF 2023*.
- Analysis of distortion, corrosion and mechanical properties of welded ASTM A36 steel U-type profiles, publicado na Revista IJAERS “International Journal of Advanced Engineering Research And Science”, Vol. 10, Série 9, ano 2023, ISSN: 2349-6495.
- Análise da Microdureza e Corrosão no Processo de Soldagem Gmaw na Chapa de Aço Dobrada Tipo U, publicado na Revista “FOCO (Faculdade Novo Milênio)”, Vol. 16, Série 8, ano 2023, ISSN:1981-223X.
- Analysis of distortion, corrosion and mechanical properties of welded CSN Civil-300 steel U-type profiles, publicado na Revista “International Journal of Advanced Manufacturing Technology” (Internet), Vol. 130, ano 2024, ISSN:1433-3015.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: ABNT, v. I, 2010. 87 p. ISBN 978-85-07-02181-0. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=61687>>. Acesso em: 17 Setembro 2020. Perfil dobrado.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização**. 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: ABNT, v. I, 2012. 36 p. ISBN 978-85-07-03896-2. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193432>>. Acesso em: 17 Setembro 2020. Norma brasileira.
- ABNT, A. B. D. N. T.-. **Materiais metálicos — Ensaio de Tração**. 2013. ed. Rio de Janeiro: ABNT, v. I, 2013. 70 p. ISBN ISO 6892-1:2009. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=405097>>. Acesso em: 06 Junho 2021. Tração.
- ACELORMITTAL BRASIL S.A. **Certificado de Qualidade**. ACELORMITTAL BRASIL S.A. Tubarão, p. 1. 2014. C.A.
- AGARWAL, G. **Study of solidification cracking during laser welding in advanced high strength steels**. 1<sup>a</sup>. ed. Kota: Technische Universiteit Delft, v. I, 2019. 165 p. ISBN 978-94-6366-165-2. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FLongitudinal-and-transverse-residual-stress-distribution-in-a-weld-With-permission\\_fig5\\_334672402&psig=AOvVaw08OUSC5QpYsy7ZhQR7MrJS&ust=1615418238246000&source=images&cd=>](https://www.google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FLongitudinal-and-transverse-residual-stress-distribution-in-a-weld-With-permission_fig5_334672402&psig=AOvVaw08OUSC5QpYsy7ZhQR7MrJS&ust=1615418238246000&source=images&cd=>)>. Acesso em: 10 March 2021. hot cracking.
- AGARWAL, G. **Study of solidification cracking during laser welding in advanced high strength steels: A combined experimental and numerical approach**. 2019. ed. Aachen: Tudelft - Delft University of Technology, v. I, 2019. 165 p. ISBN 978-94-6366-165-2. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Longitudinal-and-transverse-residual-stress-distribution-in-a-weld-With-permission\\_fig5\\_334672402](https://www.researchgate.net/figure/Longitudinal-and-transverse-residual-stress-distribution-in-a-weld-With-permission_fig5_334672402)>. Acesso em: 7 February 2022. Weld.
- ALBATI, R. et al. Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. **Energy and Buildings**, v. 66, n. 2013, p. 33-40, 01 November 2013. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813003927>>. Acesso em: 30 July 2022. Thermal emissivity.
- ALBUQUERQUE, S. F. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE PROCESSOS MANUAIS E AUTOMATIZADOS SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO API 5L X80**. 2010. ed. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, v. I, 2010. 139 p. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/11370>>. Acesso em: 06 Fevereiro 2022. Robo.

- ALVES, A. D. N. S. **Simulação numérica e experimental de soldagem em operação de um aço API 5L X80 com processo GMAW**. 1ª. ed. São Paulo: USP, v. I, 2019. 195 p. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07012020-162858/publico/AntoniodoNascimentoSilvaAlvesCorr19.pdf>>. Acesso em: 4 Junho 2021. GMAW.
- ALVES, A. D. N. S. **Simulação Numérica e Experimental de Soldagem em operação de um Aço API 5L X80 com Processo GMAW**. 1ª. ed. São Paulo: USP, v. I, 2019. 195 p. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07012020-162858/publico/AntoniodoNascimentoSilvaAlvesCorr19.pdf>>. GMAW.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-A36/A36M-19. **ASM**, West Conshohocken, v. I, n. 2019, p. 3, 1 July 2019. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/A36.htm>>. Acesso em: 14 March 2021. Carbon Structural Steel.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book Of ASTM Standards. In: ASTM **ASTM**. 2019. ed. West Conshohocken: ASTM, v. I, 2019. Cap. 1, p. 3. Composição química.
- AMOUZEGARA, H.; SCHAFERB, B. W.; TOOTKABONIA, M. Thin-walled structures. **An incremental numerical method for calculation of residual stresses and strains in cold-formed steel members**, North Dartmouth, 106, n. 2016, 17 March 2016. 61-74. Disponível em: <[http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=2&ctx\\_ver=Z39.88-2004&ctx\\_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx\\_tim=2016-06-28T09%3A01%3A47IST&url\\_ver=Z39.88-2004&url\\_ctx\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr\\_id=info:sid/primox.exlibris](http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=2&ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2016-06-28T09%3A01%3A47IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr_id=info:sid/primox.exlibris)>. Acesso em: 28 Junho 2016. Chapa dobrada.
- ANCA, A. et al. Finite element modeling of welding processes. **Applied Mathematical Modelling**, Santa fe, v. 35, n. 2, p. 688-707, 6 May 2010. ISSN 0307-904X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X10002751>>. Acesso em: 26 Dezembro 2020. FEM.
- ARUNKUMAR, M. et al. Effect of Plasma Arc Welding on Residual Stress and Distortion of Thin Titanium Sheet. **Materials Research**, São Carlos, v. 22, n. 2019, p. 11, 20 Janeiro 2020. ISSN 1516-1439. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392019000600217&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392019000600217&nrm=iso)>. Acesso em: 09 March 2021. residual stress.
- ASME. Welding - Requary generals welded. In: ENGEENERS, A. S. M. **Positions Welding**. 1998. ed. New York: ASME, v. I, 1998. Cap. I, p. 275. Disponível em: <[https://www.slideshare.net/JoseDelaFuente8/codigo-asme-secc-ix-espanol?next\\_slideshow=1](https://www.slideshare.net/JoseDelaFuente8/codigo-asme-secc-ix-espanol?next_slideshow=1)>. Acesso em: 11 May 2021. Weld.
- ASTM INTERNATIONAL. **JOINING - UNDESRTANDING THE BASICS**. 1ª. ed. OHIO: ASTM INTERNATIONAL - THE MATERIALS INFORMATION SOCIETY, v. I, 2011. 327 p. ISBN 978-1-61503-825-1. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=w9KeaNE9qV4C&oi=fnd&pg=PR1&dq=The+short->

circuited+process+is+indicated+for+thin+plate+welding,+as+it+produces+a+small+melting+pool,+fast+cooling+and+out-of-position+welding.+The+discontinuity+of+voltage+a>. Acesso em: 08 NOVEMBER 2020. WELDING PROCESS.

ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-A6. **Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling**, West Conshohocken, A01.02, n. 2009, 10 March 2009. 59. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/156104277/ASTM-A6>>. Acesso em: 9 Junho 2016. Aspectos quanto a soldagem.

AVENTA. Aventa. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://aventa.com.br/novidades/posicoes-soldagem>>. Acesso em: 17 October 2020. Posições de Soldagem.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Structural Welding Code - Steel**. 2020. ed. Danvers: AWS, v. I, 2020. 664 p. ISBN 978-1-64322-087-1. Acesso em: 10 February 2022. Welding.

AZEVEDO, D. F. O. **Análise estrutural com ANSYS Workbench**. 1ª. ed. Mogi das Cruzes: [s.n.], v. I, 2015. 136 p. Disponível em: <[https://www.academia.edu/26117690/An%C3%A1lise\\_Estrutural\\_com\\_ANSYS\\_Workbench](https://www.academia.edu/26117690/An%C3%A1lise_Estrutural_com_ANSYS_Workbench)>.

Acesso em: 08 Fevereiro 2022. ANSYS.

BACHMANN, M. et al. Numerical simulation of full-penetration laser beam welding of thick aluminium plates with inductive support. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 45, n. 3, p. 14, 23 December 2011. ISSN 0022-3727. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/45/3/035201>>. Acesso em: 14 September 2021. A steady-state numerical model was developed to investigate the influence of an alternating current (ac) magnetic field during high-power full-penetration laser welding on the weld pool dynamics and weld cross section of a 20 mm thick aluminium plate in flat p.

BAIDYA, S. et al. Statistical Validation of Weldment Deformation Through Welding Simulation and 3D Optical Scanning, n. 2017, p. 10, 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Romero-5/publication/321531490\\_Statistical\\_Validation\\_of\\_Weldment\\_Deformation\\_Through\\_Welding\\_Simulation\\_and\\_3D\\_Optical\\_Scanning/links/5a26922caca2727dd882c1b4/Statistical-Validation-of-Weldment-Deformation-Throu](https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Romero-5/publication/321531490_Statistical_Validation_of_Weldment_Deformation_Through_Welding_Simulation_and_3D_Optical_Scanning/links/5a26922caca2727dd882c1b4/Statistical-Validation-of-Weldment-Deformation-Throu)>.

Acesso em: 03 August 2022. Welding.

BANIK, S. D. et al. Distortion and residual stresses in thick plate weld joint of austenitic stainless steel: Experiments and analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, Mumbai, v. 289, n. 116944, p. 13, 01 March 2021. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013620303617>>. Acesso em: 18 September 2021. Sensitization.

BARBOSA, J. V.; SANTOS, D. B. **Estudo Do Amaciamento De Um Aço Ultrabaixo Carbono Microligado Ao Titânio Após Deformação A Quente E A Morno**. 1ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v.

I, 2019. 108 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/30285>>. Acesso em: 16 Setembro 2020. Dissertação.

BAYRAKTAR, C.; DEMIR, E. A thermomechanical finite element model and its comparison to inherent strain method for powder-bed fusion process. **Additive Manufacturing**, v. 54, n. 102708, 01 June 2022. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422001129>>. Acesso em: 26 July 2022.

BAYRAKTAR, C.; DEMIR, E. A thermomechanical finite element model and its comparison to inherent strain method for powder-bed fusion process. **Additive Manufacturing**, v. 54, n. 2022, June 2022. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422001129>>. Acesso em: 30 July 2022. Thermomechanical process model.

BECKER, R. H. S. **Estudo da Influência da Taxa de Resfriamento no Últimos Passes de Laminação de Fio Máquina Sobre a Resposta ao Tratamento Térmico de Esferoidização em um Aço DIN 41Cr4**. 2012. ed. Porto Alegre: UFRS, v. I, 2012. 89 p. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96658/000918326.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 24 Outubro 2020. Laminação a quente.

BERA, M. K. Modeling Simulation of Hybrid Model for the Short-Circuit Mode of Transfer in GMAW Systems. **2018 International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)**, Singapore, I, n. 2018, 3 March 2018. 165-169. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8493645/figures#figures>>. Acesso em: 19 January 2024. GMAW.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials And Processes in Manufacturing**. 13. ed. Jefferson City: Wiley, v. I, 2019. 677 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=nh7zDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP14&dq=During+the+welding+process,+the+thermal+field+is+the+driving+force+for+mechanical+and+structural+changes+in+the+material+involved.+Mutual+influences,+whether+strong+or+weak+i>>. Acesso em: 28 December 2020.

BOB; SPARKY. **Weld Notes**. Tradução de LEGENDA AUTOMÁTICA. 1ª. ed. [S.l.]: Youtube, v. I, 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=twUAa5LWUvk&t=73s>>. Acesso em: 19 Setembro 2020. MAG.

BORBA, T. M. D.; SANTOS, O. J. D.; MODENESI, P. J. Análise Microestrutural e Cristalográfica da Fratura de Corpos de Prova de Impacto Charpy-V da Região de Grãos Grosseiros da ZAC Simulada de Aço TMCPa. **Soldagem & Inspeção**, Belo Horizonte, v. 25, n. 2020, p. 17, 27 Abril 2020. ISSN 0104-9224. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242020000100202&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242020000100202&nrm=iso)>. Acesso em: 10 Outubro 2020. Microestrutura.

BOTH, G. S. **Análise da Influência do Raio de Dobra e do Sentido de Laminação na Deformação de Chapas de Aço no Processo de Dobra**. 1ª. ed. Jaraguá do Sul: IFSC, v. I, 2017. 56 p. Disponível em:

<[https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/285/Gilberto%20Schwengber%20Both\\_TCCFAB\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/285/Gilberto%20Schwengber%20Both_TCCFAB_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 18 Setembro 2020. Perfil dobrado.

BOUCHERIT, A. et al. Weldability, microstructure, and residual stress in Al/Cu and Cu/Al friction stir spot weld joints with Zn interlayer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Boucherit, v. 111, n. 5, p. 1553-1569, 01 November 2020. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06202-z>>. Acesso em: 25 October 2020. microstructure.

BRANCO, C. A. G. D. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. 1ª. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, v. I, 1986. 599 e 617 p.

BRICKSTAD, B.; JOSEFSON, B. L. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Sweden, v. 75, n. 1998, p. 11-25, 01 January 1998. ISSN 0308-0161. Disponível em: <Multipass circumferential butt-welding of stainless steel pipes is simulated numerically in a non-linear thermo-mechanical FE-analysis. In particular, the through-thickness variation at the weld and heat affected zone, of the axial and hoop stresses and  $t$ >. Acesso em: 30 April 2021. Multipass circumferential butt-welding of stainless steel pipes is simulated numerically in a non-linear thermo-mechanical FE-analysis. In particular, the through-thickness variation at the weld and heat affected zone, of the axial and hoop stresses and  $t$ .

BUBLÍKOVÁ, D. et al. Influence of chemical composition and parameters of heat treatment on the mechanical properties and microstructure of TRIP steels. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Pilsen, 723, n. 2020, 25 February 2020. 9. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/723/1/012004>>. Acesso em: 24 OCTOBER 2020. in which appropriate heat treatment can produce mixed hardening structures, make them candidates for a broad range of applications, namely in the automotive industry. TRIP steels (in which transformation-induced plasticity operates) with a carbon content.

C., V. R.; M., M. T.; GURGEL, J. M. A. M. Estudo teórico e experimental da condução de calor no processo de soldagem ao arco submerso. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 4, n. 2009, p. 13, 23 Abril 2008. ISSN 1809-8797. Disponível em: <<http://www.dema.ufcg.edu.br/revista>>. Acesso em: 07 NOVEMBRO 2020. condução de calor.

CALLISTER, W. D. J. **Fundamentos da Ciência e Engenharia De Materiais**. Tradução de M.Sc. Sérgio Murilo Stamile Soares. 2ª. ed. Salt Lake City: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., v. I, 2006. 702 p. ISBN 978-85-216-1515-6. Engenharia Mecânica.

CANALE, L. et al. A Historical Overview Of Steel Tempering Parameters. **International Journal of Microstructure and Materials Properties**, v. 3, p. 53, 01 jan. 2008. Disponível em: <[file:///C:/Users/josem/Downloads/2008-96\\_Canale.pdf](file:///C:/Users/josem/Downloads/2008-96_Canale.pdf)>. Acesso em: 17 Setembro 2020.

CARPENEDO, M. EFEITOS QUE A MARCAÇÃO NA JUNTA DE SOLDA TEM NA VIDA EM FADIGA DE CHAPAS SOLDADAS COM CORDÕES INTERMITENTES PELO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG NO AÇO ASTM A1011 GR50 CLASSE 2. 2021. ed. Porto Alegre: UFRGS,

- v. I, 2021. 120 p. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/219138>>. Acesso em: 06 Fevereiro 2022. Microestrutura.
- CARRASCO, G. L. A.; HURTADO, D. E.; REYES, V. F. A. Evaluation of Distortion in Welding Unions of 304 Stainless Steel with Elliptic Trajectory Using a Welding Robot. **Springer International Publishing Switzerland**, Saltillo, v. I, n. 2019, p. 11, 2019. Acesso em: 26 July 2022. Elliptic trajectories.
- CARY, H. B.; HELZER, S. C. **Modern Welding Technology**. 6<sup>a</sup>. ed. New Jersey: Pearson Education, v. I, 2005. 780 p. ISBN 0-13-113029-3. Soldagem.
- CHELONI, J. P. M. et al. The transient temperature field and microstructural evolution of additively manufactured AISI H13 steel supported by finite element analysis. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 19, n. 2022, p. 4583-4597, 01 July 2022. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422010055>>. Acesso em: 30 July 2022. Processing parameters.
- CHEN, J. **Modelling of Laser Welding of Aluminium using COMSOL Multiphysics**. 2020. ed. STOCKHOLM: KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, v. I, 2020. 73 p. ISBN 1478719. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1478719/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 26 December 2020. COMSOL.
- CHEN, S. **Three dimensional Cellular Automaton – Finite Element (CAFE) modeling for the grain structures development in Gas Tungsten / Metal Arc Welding processes**. Tradução de Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF). 2014. ed. Paris: Mines Paris Tech, v. I, 2014. 209 p. ISBN 2014ENMP0010. Disponível em: <<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01038028/document>>. Acesso em: 29 December 2020. Modélisation 3D CAFE.
- CHEN, S. **Investigation of FEM numerical simulation for the process of metal additive manufacturing in macro scale**. 2019. ed. Lyon: Université de Lyon, v. I, 2019. 235 p. ISBN 2019LYSEI048. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02402859/document>>. Acesso em: 18 October 2020. Additive manufacturing.
- CHENG, Y. et al. Real-time sensing of gas metal arc welding process – A literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 70, n. 2021, p. 01, 01 October 2021. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521006423>>. Acesso em: 15 September 2021. Gas metal arc welding.
- CIG SOLDAS. **http: //cigsoldas.com.br/cig-soldas-empresa/**. [S.l.]: [s.n.], 1987. Disponível em: <<http://cigsoldas.com.br/cig-virtua-500-ws-cccv-pro/>>. Acesso em: 20 Setembro 2020. Solda.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Certificado de Qualidade. **Norma CSN**, Volta Redonda, 2014. 1. Certificado de Conformidade.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. CSN. **Norma CSN**, São Paulo, v. I, n. 2020, p. 22, Dezembro 2020. Disponível em: <<https://www.csn.com.br/homepage/acos-planos/laminados-a-quente/>>. Acesso em: 14 Março 2021. Aços Classe Estrutural.

CORREIA, F. C.; KRUNG, G. E. O.; D., M. Correlação entre a Velocidade de Soldagem e da Alimentação do Arame no Processo de Soldagem GMAW com a Geometria, Microestrutura e Macroestrutura do Cordão de Solda. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Natal, 2016, n. 2016, 06 a 10 Novembro 2016. 5520-5530.

COSTA, A. V.; MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Um Aço Patinável de Alto Silício Para Construção Metálica Com Resistência Extra à Corrosão em Atmosfera Marinha**. 1ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 2019. 91 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/RAOA-BBSMB7>>. Acesso em: 16 Setembro 2020. Dissertação.

COURAS, D. D. J. N. P. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAÇÃO DA SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS NOS REGIMES DE ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO**. 1ª. ed. Fortaleza: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, v. I, 2021. 198 p. Disponível em: <[file:///C:/Users/josem/Downloads/2021\\_tese\\_djnpcouras.pdf](file:///C:/Users/josem/Downloads/2021_tese_djnpcouras.pdf)>. Acesso em: 06 Fevereiro 2022. Simulação.

DE VRIES, E. **Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding**. 1ª. ed. Columbus: The Ohio State University, v. I, 2004. 272 p. ISBN osu1078415529. Disponível em: <[http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=osu1078415529](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1078415529)>. Acesso em: 29 December 2020. Ultrasonic Welding.

DEHUA CUI, M. **THERMAL DISTORTION EVALUATION BY 3-DIMENSIONAL GEOMETRIC REASONING**. 1ª. ed. Ann Arbor: UMI®, v. I, 2001. 235 p. ISBN 48106-1346. Disponível em: <[https://etd.ohiolink.edu/!etd.send\\_file?accession=osu1486397841222501&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1486397841222501&disposition=inline)>. Acesso em: 14 October 2020. weld.

DEMARQUE, R. et al. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO CICLO TÉRMICO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DE JUNTAS SOLDADAS ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DO APORTE TÉRMICO EM JUNTAS SOLDADAS DOS AÇOS AUTENÍSTICOS AISI 316L PELO PROCESSO GMAW. **Tecnologia de Metalurgia, Materiais e Mineração**, SÃO PAULO, v. 15, n. 3, p. 232-241, 15 JULHO 2018. ISSN 2176-1523. Disponível em: <<https://tecnologiамmm.com.br/article/10.4322/2176-1523.1389/pdf/tmm-15-3-232.pdf>>. Acesso em: 24 OUTUBRO 2020. Heat affected zone.

DENG, D. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. **Materials & Design**, v. 30, n. 2, p. 359 - 366, 01 February 2009. ISSN 0261-3069. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908001556>>. Acesso em: 17 SEPTEMBER 2021. Welding distortion.

DERAKHSHAN, E. D. et al. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. **Optics & Laser Technology**, v. I, n. 104, p. 170-182, 01 August 2018. ISSN 0030-3992.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399217312409>>. Acesso em: 03 August 2022. Residual stress.

DING, J. **Thermo-mechanical Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing Process**. 1<sup>a</sup>. ed. Bedford: CRANFIELD UNIVERSITY, v. I, 2012. 216 p. Disponível em: <<http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7897>>. Acesso em: 31 December 2020. With the help of the FE models studies on different deposition parameters.

DING, K. et al. Clarification of the false liquation crack existed in 9% Cr/CrMoV dissimilar welded joint by comparative etching process and in situ laser scanning confocal microscope. **Journal of Materials Research and Technology**, Shanghai, v. 9, n. 3, p. 6048-6058, 01 May 2020. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542031173X>>. Acesso em: 26 October 2020. Dissimilar welded joint.

DODGE, M. F. **The Effect of Heat Treatment on the Embrittlement of Dissimilar Welded Joints**. 1<sup>a</sup>. ed. Leicester: University of Leicester, v. 1, 2014. 228 p. Disponível em: <<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/pstorage-leicester-213265548798/18305021/MDodgeThesis.pdf>>. Acesso em: 08 March 2021. To investigate the embrittlement mechanisms, a programme of microstructural.

DOUMANIDIS, C.; KWAK, Y.-M. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 79, n. 4, p. 251-262, 01 April 2002. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016102000248>>. Acesso em: 10 JANUARY 2021. Gas metal arc welding.

DUMITRESCU, L. F. S.; HILLERT, M.; SUNDMAN, B. A Reassessment of Ti-C-N Based on a Critical Review of Available Assessments of Ti-N and Ti-C. **Materials Research Center**, Stockholm, v. 34, n. 1997, p. 1, 1 September 1997. ISSN TRITA-MAC-0616.

EDA, S.; OGINO, YOSUKE; ASAI, S. numerical study of the effects of short-circuiting current on a controlled short-circuit transfer process. **J-STAGE**, Osaka, v. 38, n. 4, p. 11, 1 April 2020. ISSN 2434-8252. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjws/38/4/38\\_392/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjws/38/4/38_392/_article/-char/ja/)>. Acesso em: 1 Março 2022. Short.

EGERLAND, S. A Contribution to Arc Length Discussion. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 20, n. 2015, p. 14, 15 Setembro 2015. ISSN 1980-6973. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242015000300367&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242015000300367&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 19 Setembro 2020. Arco elétrico.

EISAZADEH, H.; AIDUN, D. K. Residual stress reduction in dissimilar metals weld. **Journal of Manufacturing Processes**, Norfolk, v. 64, n. 2021, p. 1462- 1475, 01 April 2021. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661252100164X>>. Acesso em: 19 September 2021. Dissimilar metals weld.

ELEKTRISKA SVETSNINGS AKTIE BOLAGET - ESAB. **Apostila Soldagem MIGMAG**. Tradução de Cleber Fortes. 2005. ed. São Paulo: ESAB, v. I, 2005. 68 p. Disponível em:

- <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmigmag\\_low.pdf](https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf)>. Acesso em: 25 Outubro 2020. Apostila Soldagem MIGMAG.
- EWI. EWI. **EWI**, 30 June 2015. Disponível em: <<https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-welding-current-welding-voltage/>>. Acesso em: 30 Setembro 2015. Solda.
- FAKI, B.; BURI, A.; MUMINOVI, B. CHANGE OF PHYSICAL-METALLURGICAL PROPERTIES OF LOW- ALLOY STEEL 16Mo3 IN THE HEAT AFFECTED ZONE IN WELDING PROCESSES MMA AND MAG. **Trends in the Development of Machinery and Associated Technology**, Prague, v. 2011, n. 2011, p. 129-132, 12-18 September 2011. Disponível em: <<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2011/024-TMT11-303.pdf>>. Acesso em: 06 March 2021. microstructure, hardness, grain size, impact test.
- FANG, R. **ANSYS Welding**. I. ed. [S.l.]: Youtube, v. I, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-HpHvU5DyNo&t=1626s>>. Acesso em: 09 February 2022.
- FARIAS, R. M. **Desenvolvimento, otimização e automatização de novos modelos de fontes de calor para simulação numérica de processos de soldagem a arco**. 1ª. ed. Uberlândia: UFU, v. I, 2020. 193 p. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29368>>. Acesso em: 08 Fevereiro 2022. ANSYS.
- FERREIRA, D. M. B. **Metodologia para simulação computacional da distribuição de temperaturas para identificar sub-regiões reaquecidas da ZAC e avaliar suas influências nas propriedades mecânicas na soldagem multipasse de aço API 5L X80**. 1ª. ed. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, v. I, 2017. 264 p. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-08012018-110211/pt-br.php>>. Acesso em: 16 Setembro 2020.
- FEUJOFACK KEMDA, B. V. et al. Optimization of resistance spot welding process applied to A36 mild steel and hot dipped galvanized steel based on hardness and nugget geometry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 2020, p. 14, 01 jan. 2020. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04707-w>>. Acesso em: 18 Setembro 2020. welding.
- FILHO, D. F.; SAIRRE, B. P. S. D.; ANTONIO, F. V. INFLUÊNCIA DO TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG NA QUALIDADE DO CORDÃO DE AÇO INOXIDÁVEL. **COBEF - 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Estância de São Pedro, 4º, n. 2007, 15 a 18 Abril 2007. 10. Disponível em: <<http://grima.ufsc.br/cobef4/files/021008077.pdf>>. Acesso em: 03 Outubro 2020. MIG.
- FILIPEFLOP. filipeflop. **filipeflop**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/termopar-tipo-k-com-modulo-max6675/>>. Acesso em: 11 January 2021.
- FISCHER, A. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW- ARCO PULSADO**. 1ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 2011. 170 p.

Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8S7H6T>>. Acesso em: 13 Março 2021. corrente pulsada.

FREGNI, A. **Numerical studies of turbulent flows in mixed and natural convection regimes**. 2019. ed. Modena: Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, v. I, 2019. 107 p. Disponível em: <[https://scholar.google.com/scholar?as\\_ylo=2020&q=+energy+balance+where+the+heat+conduction+through+the+metallic+structural+profile+is+transferred,+in+the+t-time+domain+referring+to+the+tri+axial+Cartesian+system+\(x,y,z\)+as+a+function+of+temperature+i+mad](https://scholar.google.com/scholar?as_ylo=2020&q=+energy+balance+where+the+heat+conduction+through+the+metallic+structural+profile+is+transferred,+in+the+t-time+domain+referring+to+the+tri+axial+Cartesian+system+(x,y,z)+as+a+function+of+temperature+i+mad)>. Acesso em: 15 November 2020.

FROHN-SÖRENSEN, P. et al. Flexible Manufacturing Chain With Integrated Incremental Bending And Q-P Heat Treatment For On-demand Production Of AHSS Safety Parts. **Journal of Materials Processing Technology**, 275, n. 116312, 01 jan. 2020. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619302845>>. Acesso em: 17 Setembro 2020. Encruamento.

GERBO, E. J. et al. Full-field measurement of residual strains in cold bent steel plates. **Journal of Constructional Steel Research**, N. Y., v. 127, n. 2016, p. 16, 01 dez. 2016. ISSN 0143-974X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302188>>. Acesso em: 18 Setembro 2020. Cold bending.

GHORBEL, R.; KTARI, A.; HADDAR, N. Experimental analysis of temperature field and distortions in multi-pass welding of stainless clad steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 11, p. 3525- 3542, 01 April 2021. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06788-y>>. Acesso em: 15 September 2021. steel materials (particularly.

GHOSH, P. S. et al. Prediction of transient temperature distributions for laser welding of dissimilar metals. **Applied Sciences**, Norfolk, v. 11, n. 13, p. 1462–1475, 03 June 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://researchportal.port.ac.uk/en/publications/prediction-of-transient-temperature-distributions-for-laser-weldi>>. Acesso em: 19 September 2021. el was developed using COMSOL Multiphysics of dissimilar laser welding (butt joint) of AISI 316L and Ti6Al4V thin sheet of 2.5 mm thickness. A continuous mode (CW) fiber laser heat source of 300W laser power was used for the present study. A time-dependen.

GOLDAK, J. A.; AKLAGHI, M. **Computational Welding Mechanics**. 2005. ed. New York: Springer Science & Business Media, v. I, 2005. 322 p. ISBN 9780387232881. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=p-JVviPoyIUC>>. Acesso em: 27 April 2020. Welding.

GOLDAK, J.; CHAKRAVARTI, A.; BIBBY, M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. **METALLURGICAL TRANSACTIONS B**, Ottawa, v. 15B, n. 1984, p. 7, 14 February 1983. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02667333>>. Acesso em: 07 February 2022. Welding.

GONÇALVES, M. P. et al. **Estudo Do Efeito Do Pré E Pós-Aquecimento Na Junta Soldada Do Aço Sar 80t Pelo Processo De Soldagem Por Arco Submerso**. 1ª. ed. Curitiba: Brazilian Journal of Development, v. I, 2020. 20 p. ISBN 2525-8761. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/11758>>. Acesso em: 16 Setembro 2020. Junta soldada.

GONZALEZ, A. R.; MACHADO, I. G.; TOMAZI, A. Análise dos Parâmetros de Polaridade Negativa do Processo MAG-PV sobre Distorções Angulares. **Soldagem & Inspeção**, Belo Horizonte, v. 25, n. 2020, p. 25, 15 Janeiro 2020. ISSN 0104-9224. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242020000100203&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242020000100203&nrm=iso)>. Acesso em: 15 Outubro 2020. Soldagem & Inspeção.

GÓRKA, J. Assessment of the Effect of Laser Welding on the Properties and Structure of TMCP Steel Butt Joints. **Journal Materials**, Gliwice, v. 13, n. 6, p. 20, Poland March 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/6/1312>>. Acesso em: 24 October 2020. thermo-mechanically controlled processed.

GOU, G.; YANG, Y.; CHEN, H. Engineering. **An ICME Approach for Optimizing Thin-Welded Structure Design**, Chengdu, 6, n. 1, 15 December 2014. 936-947. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/eng>>. Acesso em: 22 Junho 2016. Estrutura soldada.

GUERRA, T. **MODELAGEM DO CICLO TÉRMICO DO PROCESSO GMAW EM AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, v. I, 2017. 144 p. ISBN 1321800/CA. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/36338/36338.PDF>>. Acesso em: 16 Fevereiro 2022. Solda.

GUILHERME, L. H. et al. Effect of MAG welding transfer mode on sigma phase precipitation and corrosion performance of 316L stainless steel multi-pass welds. **Journal of Materials Research and Technology**, Araraquara, v. 9, n. 5, p. 10537-10549, 01 set. 2020. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420315374>>. Acesso em: 08 November 2020. Welding.

GUK, E. et al. In-situ monitoring of temperature distribution in operating solid oxide fuel cell cathode using proprietary sensory techniques versus commercial thermocouples. **Applied Energy**, v. 230, n. 2018, p. 551-562, 15 November 2018. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918312947>>. Acesso em: 10 JANUARY 2021. Temperature distribution monitoring.

GUSEV, A. I. Phase Diagrams for Ordering Systems in the Order-Parameter Functional Method. **Sov. Phys. Solid State**, Moscow, v. 32, n. 1991, p. 1595-1599, 1991.

HAMMAD, A. et al. Experimental and numerical investigation of hybrid laser arc welding process and the influence of welding sequence on the manufacture of stiffened flat panels. **Journal of Manufacturing Processes**, Alexandria, v. 61, n. 2021, p. 527- 538, 01 January 2021. ISSN 1526-6125.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520308318>>. Acesso em: 18 September 2021. HLAW.

HAMMAD, A. et al. Rationally-Based Structural Design of Welded Plate Panels. **Metals**, Cádiz, v. 11, n. 9, p. 17, 28 July 2021. ISSN 2075-4701. Disponível em: <file:///C:/Users/josem/Downloads/metals-11-01381-v2.pdf>. Acesso em: 18 September 2021. buckling collapse.

HAOXIANG LANG, Y. W. C. W. D. S. A THREE-DIMENSIONAL THERMAL FINITE ELEMENT MODEL OF LASER TRANSMISSION WELDING FOR LAP-JOINT. **International Journal of Modelling and Simulation**, v. 29, n. 2, p. 150-158, 15 July 2009. ISSN 0228-6203. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/02286203.2009.11442520?scroll=top&needAccess=true>>. Acesso em: 30 July 2022. laser transmission welding of.

HARRIS, I. D. **HIGH-SPEED GMAW AND LASER GMAW HYBRID WELDING OF STEEL SHEET**. 2009. ed. CRANFIELD: CRANFIELD UNIVERSITY, v. I, 2009. 261 p. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/139672.pdf>>. Acesso em: 14 September 2021.

HEBDA, M.; SADY, R. Advances in Engineering Software. **Software for the estimation of steel weldability**, Krakow, 58, n. 1, 31 January 2013. 13-17. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.12.003>>(<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997813000021>>). Acesso em: 9 Junho 2016. Software.

HEXAGON SIMUFACT-WELDING. Simufact Welding Application Modules. **Simufact Welding Module**, Hamburg, v. 1, n. 2022, p. 1, 07 February 2022. Disponível em: <<https://www.simufact.com/contact.html>>. Acesso em: 7 February 2022. Simulation.

HIRATA, E. K. et al. **Influência da Corrente sobre o Rendimento Bruto de Fusão em Soldagem MIG/MAG**. 2010. ed. São Paulo: Soldagem & Inspeção, v. 19, 2014. 8 p. ISBN 0104-9224. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242014000200008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242014000200008&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 20 Setembro 2020. Rendimento bruto de fusão.

HORI, K.; HANEDA, M. Narrow Gap Arc welding. **J-STAGE**, Osaka, v. 1, n. 1999, p. 22, 1 February 1999. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjjws1943/68/3/68\\_3\\_179/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjjws1943/68/3/68_3_179/_pdf/-char/ja)>. Acesso em: 1 March 2022. GMAW.

HOSOYA, Y. et al. Mechanism of Improved Ductility of 1500 MPa-class Ultra-high Strength Cold-rolled Steel Sheet Produced by Rolling and Partitioning Method. **Japan Science and Technology Agency**, Tetsu-to-Hagané, v. advpub, n. 2020, p. 10, 18 April 2020. ISSN 1347-5460. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/advpub/0/advpub\\_ISIJINT-2020-027/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/advpub/0/advpub_ISIJINT-2020-027/_pdf/-char/ja)>. Acesso em: 18 Setembro 2020. stainless steel.

HOYOS-ARANGO, D. B.; MEJIA-LOPEZ, O. L. A. G.-B. J. E. Construction of a short circuit frequency map to define GMAW-S parameters during WPSs development. **Dyna rev.fac.nac.minas [online]**. 2018, Medellín, 85, n. 205, 1 June 2018. 240-248. Disponível em:<.>. Acesso em: 17 January 2024. Welding.

IET - POWER AND ENERGY SERIES 4.0. **ADVANCES IN HIGH VOLTAGE ENGINEERING.**

2<sup>a</sup>. ed. LONDON: THE INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, v. I, 2007. 647 p.

ISBN 978-0-85296-158-2. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=\\_ItI3860YAwC&oi=fnd&pg=PR17&dq=The+same+mechanism+of+heat+transfer+internally+in+the+column+of+the+arc+surrounded+by+the+protection+gas+directed+to+the+base+metal+occurs+by+convection+and+not+through+radia](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=_ItI3860YAwC&oi=fnd&pg=PR17&dq=The+same+mechanism+of+heat+transfer+internally+in+the+column+of+the+arc+surrounded+by+the+protection+gas+directed+to+the+base+metal+occurs+by+convection+and+not+through+radia)>. Acesso em: 08 NOVEMBER 2020. ELECTRIC.

İLKER, E.; MELIKE SULTAN KARASU, A. Finite Element Simulation and Experimental Validation of Welding Distortion of Fillet Welded T-joints AU. **JOURNAL of POLYTECHNIC POLİTEKNİK DERGİSİ**, v. 25, n. I, p. 455 - 466, 2022. ISSN 2147-9429. Disponível em: <<https://dergipark.org.tr/en/search?q=%22residual+stress%22>>. Acesso em: 02 August 2022. residual stress.

ILMAN, M. N. et al. Enhanced fatigue performance of tandem MIG 5083 aluminium alloy weld joints by heat sink and static thermal tensioning. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, China, v. 5, n. 4, p. 440-452, 12 January 2022. ISSN 2588-8404. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840422000324>>. Acesso em: 27 July 2022. Tandem welding.

INCOTERM. incoterm. [S.l.]: [s.n.], 2011. Disponível em: <<https://www.incoterm.com.br/media/2016/11/st-600-manual.pdf>>. Acesso em: 11 January 2021. Pirometro.

INSPECTION, T. W. Efeito do posicionamento do eletrodo (tocha) sobre as características geométricas do cordão. 2009. ed. [S.l.]: TWI. Welding Inspection, 2009. Disponível em: <<https://www.facebook.com/oSiteDaSoldagem/photos/a.656691051128419/1686688511461996/?type=3&theater>>. Acesso em: 17 October 2020. eletrodo.

INSTRUTHERM. Instrutherm. [S.l.].

ISMAIL, M. I. S.; AFIEQ, W. M. Thermal analysis on a weld joint of aluminium alloy in gas metal arc welding. **Advances in Production Engineering & Management**, Selangor, v. 11, n. 2016, p. 29-37, 01 March 2016. ISSN 1854-6250. Disponível em: <[http://apem-journal.org/Archives/2016/APEM11-1\\_029-037.pdf](http://apem-journal.org/Archives/2016/APEM11-1_029-037.pdf)>. Acesso em: 17 SEPTEMBER 2021. Aluminium alloy.

JAMROZIK, W.; GÓRKA, J. Assessing MMA Welding Process Stability Using Machine Vision-Based Arc Features Tracking System. **Sensors**, v. 21, n. 1, p. 21, December 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/84#cite>>. Acesso em: 12 January 2021. Emissivity.

JAVADI, Y. et al. Investigating the effect of residual stress on hydrogen cracking in multi-pass robotic welding through process compatible non-destructive testing. **Journal of Manufacturing Processes**, Strathclyde, v. 63, n. 2021, p. 80-87, 01 March 2021. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520301833>>. Acesso em: 02 June 2021. Multi-pass robotic welding.

JIAN, X. et al. A unified 3D model for an interaction mechanism of the plasma arc, weld pool and keyhole in plasma arc welding. **ournal of Physics D: Applied Physics**, v. 48, n. 46, p. 15, 16 October 2015. ISSN 0022-3727. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/48/46/465504>>. Acesso em: 14 September 2021. echanism of the plasma arc, weld pool and keyhole in plasma arc welding. By considering the traveling of the plasma arc along the welding direction, unified governing equations are solved in the whole domain including the torch, plasma arc, keyhole, weld.

JUNIOR, O. A. C. et al. COMPARAÇÕES NA SOLDAGEM MIG/MAG: AUTOMATIZADA E MANUAL. **II SITEFA - Simpósio de Tecnologia**, Setãozinho-SP, v. 2, n. 2019, p. 10, 19 Dezembro 2019. ISSN 2675-7540. Disponível em: <<https://sitefa.fatecsertaozinho.edu.br/index.php/sitefa/article/view/73>>. Acesso em: 06 Fevereiro 2022. Soldagem.

KAMALA, V.; GOLDAK, J. A. Error Due to Two Dimensional Approximation in Heat Transfer Analysis of Welds. **WELDING RESEARCH SUPPLEMENT**, Ottawa, v. s, n. 1993, p. 440-446, 1 September 1993. Disponível em: <[https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1993\\_09\\_s440.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1993_09_s440.pdf)>. Acesso em: 1 MAY 2021. Error Analysis.

KERSTEN, S. L. **EFFECT OF BUILD ORIENTATION OF ANISOTROPIC BEHAVIOR IN DIRECT ENERGY DEPOSITION BUILT COMPONENTS**. 1ª. ed. Georgia: George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, v. I, 2020. 119 p. Disponível em: <<https://smartechn.gatech.edu/bitstream/handle/1853/62818/KERSTEN-THESIS-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 16 October 2020. ROBOTIC.

KIK, T. Heat Source Models in Numerical Simulations of Laser Welding. **Materials**, Poland, v. 13, n. 11, p. 24, 5 June 2020. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/2653#cite>>. Acesso em: 15 NOVEMBER 2020. welding.

KIM, J.; IM, S.; KIM, H.-G. Finite Element Analysis of Arc-Welding Process by Parallel Computation. **QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY**, v. 23, n. 2005, p. 203-208, 15 FEBRUARY 2005. ISSN 0288-4771. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjjws/23/2/23\\_2\\_203/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjjws/23/2/23_2_203/_pdf/-char/en)>. Acesso em: 1 MAY 2021. WELDING.

KONG, F.; KOVACEVIC, R. Welding Processes. **Development of a Comprehensive Process Model for Hybrid Laser-Arc Welding**, Dallas, 8, n. 1, 2012. 165-190. Disponível em: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/40988.pdf>>. Acesso em: 22 Junho 2016. Compreensão do modelo do processo.

KONG, F.; MA, J.; KOVACEVIC, R. Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 6, p. 1102- 1111, 01 June 2011. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361100015X>>. Acesso em: 15 September 2021. Gas metal arc welding (GMAW).

KOU, S. **WELDING METALLURGY**. 2<sup>a</sup>. ed. Hoboken: WILEY-INTERSCIENCE, v. I, 2003. 461 p. ISBN 0-471-43491-4. Disponivel em:

<[https://www.academia.edu/35804703/WELDING\\_METALLURGY\\_SECOND\\_EDITION](https://www.academia.edu/35804703/WELDING_METALLURGY_SECOND_EDITION)>. Acesso em: 14 NOVEMBER 2020. gmaw.

KRIVTSUN, I. V.; DEMCHENKO, V. F.; KRIKENT, I. V. MODEL OF THE PROCESSES OF HEAT, MASS AND CHARGE TRANSFER IN THE ANODE REGION AND COLUMN OF THE WELDING ARC WITH REFRACTORY CATHODE. **International Scientific-Technical and Production Journal**, Avtomaticheskaya Svarka, I, n. 2010, 15 Junho 2010. 8. Disponivel em: <<https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2010/tpwj201006all.pdf>>. Acesso em: 24 October 2020. electric arc.

KSHIRSAGAR, R. **Deriving a reversible mathematical model for predicting geometrical, microstructural and mechanical outputs applied to single pass welds made in 304L austenitic stainless steels**. 1<sup>a</sup>. ed. Coventry: Coventry University, v. I, 2020. 263 p. ISBN P85686. Disponivel em: <[https://scholar.google.com/scholar?as\\_ylo=2019&q=Another+good+gmaw+welding+model+illustrated+in+Figure+27,+where+a+finite+volumetric+flow+presents+the+finite+3D+Gaussian+curve+in+the+ellipsoidal+molds+with+radii+a,+b+and+c,+having+the+density+of+volumetri](https://scholar.google.com/scholar?as_ylo=2019&q=Another+good+gmaw+welding+model+illustrated+in+Figure+27,+where+a+finite+volumetric+flow+presents+the+finite+3D+Gaussian+curve+in+the+ellipsoidal+molds+with+radii+a,+b+and+c,+having+the+density+of+volumetri)>. Acesso em: 29 December 2020.

KUMAR MAURYA, R.; NIRANJAN, M. S. Experimental investigations of effect of tempering on residual stresses developed during the turning operation. **Materials Today: Proceedings**, Greater Noida, v. I, n. 2021, p. 7, 18 abr. 2021. ISSN 2214-7853. Disponivel em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321024639>>. Acesso em: 10 May 2021. Tempering.

KUMAR, K. S. Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Work Piece Welded By Laser Welding Process. **Procedia Materials Science**, Gokaraju, v. 6, n. 2014, p. 821-834, 2014. ISSN 2211-8128. Disponivel em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/82120344.pdf>>. Acesso em: 07 March 2021. Temperature Distribution, Cooling Rate, Peak Temperature, Thermal Cycle.

LI, J. et al. Effects of Summer Rainfall on the Soil Thermal Properties and Surface Energy Balances in the Badain Jaran Desert. **Advances in Meteorology**, v. 2019, n. 2019, p. 13, 06 December 2019. ISSN 1687-9309. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1155/2019/4960624>>. Acesso em: 06 March 2021. Based on observational data collected during the summer of 2009 from the southern Badain Jaran Desert, the surface sensible and latent heat fluxes and shallow soil thermal storage were obtained through corrections and quality control measures. The soil th.

LI, J. et al. Measurements of spectral emissivity, reflectance and transmittance at high temperatures using laser heating and auxiliary light source. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 183, n. 2022, 01 February 2022. ISSN 0017-9310. Disponivel em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931021011984>>. Acesso em: 30 July 2022. Temperature.

LI, Y. et al. An evolutionary keyhole-mode heat transfer model in continuous plasma arc welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 117, n. 2018, p. 1188-1198, 01 February 2018. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931017320665>>. Acesso em: 14 September 2021. Keyhole-mode heat source.

LI, Z. et al. Investigating Welding Distortion of Thin-Plate Stiffened Panel Steel Structures by Means of Thermal Elastic Plastic Finite Element Method. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 30, n. 5, p. 3677- 3690, 01 May 2021. ISSN 1544-1024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11665-021-05646-y>>. Acesso em: 15 September 2021. thin-plate weldments have been increasingly used in various engineering structures to meet the requ.

LIDAM, R. N. et al. Angular distortion analysis of the multipass welding process on combined joint types using thermo-elastic-plastic FEM with experimental validation. **Int J Adv Manuf Technol**, Jakarta, v. 69, n. 2012, p. :2373–2386, September 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-013-5184-6.pdf>>. Acesso em: 17 September 2021. Angular distortion.

LINDE. Universidade Federal de Juiz de Fora. [S.l.]: [s.n.], 2016. Disponível em: <[https://www.ufjf.br/profab/files/2016/09/Gases-de-Protecaao\\_catalogo-gases-e-processos.pdf](https://www.ufjf.br/profab/files/2016/09/Gases-de-Protecaao_catalogo-gases-e-processos.pdf)>. Acesso em: 04 Outubro 2020. Proteção.

LINDGREN, L.-E.; MICHALERIS, P. **Minimization of Welding Distortion and Buckling**. 2011. ed. [S.l.]: ELSEVIER, v. 22, 2011. 22-78 p. ISBN 978-1-84569-662-7. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845696627500023>>. Acesso em: 29 December 2020. nonlinear thermomechanics.

LIPPOLD, J. C. **Welding Matallurgy and weldability**. 1ª. ed. New Jersey: Wiley, v. I, 2015. 421 p. ISBN 2014033412. Disponível em: <<http://www.iso-iran.ir/standards/others/Welding%20Metallurgy%20and%20Weldability-Lippold.pdf>>. Acesso em: 09 March 2021. The main topic of this book is material “weldability.” As described in Chapter 1.

LIU, B. C. et al. Experimental and numerical investigation of interfacial microstructure in fully age-hardened 15-5 PH stainless steel during impact welding. **Journal of Materials Science**, v. 54, n. 13, p. 9824-9842, March 2019. ISSN 1573-4803. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10853-019-03546-0>>. Acesso em: 26 December 2020. ully age-hardened 15-5 PH stainless steel with itself at average impact speed of 682 m/s and impact angles ranging from 8° to 28°. It was assumed that higher angles corresponded with higher shear stresses at impact point. Microstructural examination indic.

LIU, W. A. R. Y. A. F. X. A. H. Y. Crack Growth Analysis of Ultraviolet Nanosecond Laser Scanning Glass with Acoustic Emission. **SSRN**, v. I, n. 2022, p. 18, 10 June 2022. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=4133194>>. Acesso em: 31 July 2022. Glass; Acoustic emission.

- LONG, H. et al. Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates. **Materials & Design**, v. 30, n. 2009, p. 4126-4135, December 2009. ISSN 0261-3069. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/223599155\\_Prediction\\_of\\_welding\\_distortion\\_in\\_butt\\_joint\\_of\\_thin\\_plates](https://www.researchgate.net/publication/223599155_Prediction_of_welding_distortion_in_butt_joint_of_thin_plates)>. Acesso em: 12 March 2021. Butt joint welding.
- LOWELL, C. E. Solid Solution of Boron in Graphite. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 50, n. 1967, p. 4, 1967.
- MAAß, F.; HAHN, M.; TEKKAYA, A. E. Adjusting residual stresses by flexible stress superposition in incremental sheet metal forming. **Archive of Applied Mechanics**, Baroper, v. I, n. 2021, p. 11, 22 March 2021. ISSN 1432-0681. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00419-021-01929-x>>. Acesso em: 09 May 2021. Process-induced residual stresses significantly influence the mechanical properties of a formed component. A polymer pad is used as a flexible die in two-point incremental forming to induce compressive residual stresses in the component during the forming.
- MACHADO, I. G. **Condução do calor na Soldagem**: Fundamentos e aplicações. 1ª. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, v. I, 2000. 119 p. ISBN 85-86647-31-4. Calor.
- MAGALHÃES, A. J. D.; BOLMSJÖ, G. Thermal Dissipation Effect on Temperature-controlled Friction Stir Welding. **Soldagem & Inspeção**, Belo Horizonte - MG, v. 24, n. 2019, p. 9, 08 October 2019. ISSN 0104-9224. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242019000100225&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242019000100225&nrm=iso)>. Acesso em: 06 Março 2021. Soldadura por fricção linear.
- MAHMOOD, T. et al. Finite element modeling of transmission laser microjoining process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 186, n. 1, p. 8, 07 May 2007. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606011393>>. Acesso em: 30 July 2022. Finite element.
- MANSUR, T. R. et al. Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. I, n. 2011, p. 274-284, 16 Setembro 2011. ISSN 1980-6973. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/si/v16n3/09.pdf>>. Acesso em: 13 Março 2021. limite de resistencia a fadiga.
- MAQBOOL, F. et al. Targeted residual stress generation in single and two point incremental sheet forming (ISF). **Archive of Applied Mechanics**, Zurich, v. I, n. 2021, p. 22, 05 May 2021. ISSN 1432-0681. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00419-021-01935-z>>. Acesso em: 09 May 2021. The mechanical properties and the operating life of a formed component are highly dependent on the residual stress state. There is always a high magnitude of residual stresses in the components formed by incremental sheet forming (ISF) due to the localize.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 2011. 363 p. ISBN 978-85-7041-748-0. Solda.
- MASOOMI, M. et al. A numerical and experimental investigation of convective heat transfer during laser-powder bed fusion. **Additive Manufacturing**, v. 22, n. 2018, p. 729-745, 01 August 2018. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418302938>>. Acesso em: 14 September 2021. Ti-6Al-4V.

MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures**. 1<sup>a</sup>. ed. Boston: Pergamon Press, v. I, 1980. 654 p. ISBN 9781483188430. Estrutura da solda.

MDPI. **Science, Characterization and Technology of joining and Welding**. 2020. ed. Toledo: MDPI, v. I, 2020. 240 p. ISBN 2075-4701. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=IEjmDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=point+source+in+the+quasi-stationary+state+on+welding+gmaw,+with+velocity+v+and+considering+the+sheet+thickness+as+semi+infinite+so+&ots=2wDhPUjLZL&sig=M7xyasCd8QJDZMxfvPS7etE>>. Acesso em: 18 November 2020. Heat source.

MENDEZ, P. F. Reduced order models for welding and solidification processes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Jonkonping, v. 861, n. 012003, p. 24, 13 June 2020. ISSN 1757-899X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/861/1/012003>>. Acesso em: 15 November 2020. This paper reviews the foundations of modelling of materials processing and methodologies of analysis outside the traditional discretization of the domain (e.g. finite elements, finite volume, etc.). It starts with a review of the mathematical framework w.

MESSLER, J. R. W. **Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy**. 1<sup>a</sup>. ed. Troy: WILEY-VCH, v. I, 2004. 661 p. ISBN 978-0-471-25376-1. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=SlA2E145pbQC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Welding+GMAW+The+addition+of+carbon+dioxide+and+the+consequent+fraction+of+dissociated+oxygen+in+addition+to+reducing+the+surface+tension+of+the+liquid+metal+and+facilitating+>>>.

Acesso em: 04 outubro 2020. Processo de soldagem.

MESSLER, J. R. W. **A Practical Guide to Welding Solutions**. 1<sup>a</sup>. ed. N.Y.: SPi Global, v. I, 2019. 331 p. ISBN 978-3-527-34543-4. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=VvaFDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Welding+process+GMAW,+they+form+a+potential+differential+with+the+crown+in+the+welding,+modifying+the+transport+of+the+electric+current.+And+if+the+contribution+of+this+filli>>. Acesso em: 04 Outubro 2020. processo de soldagem MAG.

METCALFE, J. C.; QUIGLEY, M. B. C. Heat Transfer in Plasma-Arc Welding. **Welding Research Supplement**, v. I, n. 1975, p. 99-104, March 1975. Disponível em: <[https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1975\\_03\\_s99.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1975_03_s99.pdf)>. Acesso em: 12 January 2020. Heat.

MIRKOOHI, E. et al. Thermo-mechanical modeling of thermal stress in metal additive manufacturing considering elastoplastic hardening. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 28, n. 2020, p. 52-67, 01 January 2020. ISSN 1755-5817. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175558172030002X>>. Acesso em: 18 November 2020. Metal additive manufacturing.

MISHCHENKO, A.; SCOTTI, A. Welding thermal stress diagrams as a means of assessing material proneness to residual stresses. **Journal of Materials Science**, v. 56, n. 2, p. 1694-1712, 21 September

2020. ISSN 1573-4803. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10853-020-05294-y>>. Acesso em: 27 Outubro 2020. governed mainly by two complex concurrent phenomena.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. 1ª. ed. Belo Horizonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, v. I, 2007. 151 p. Disponível em:

<<file:///C:/Users/josem/Downloads/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20F%C3%ADsica%20do%20Arco%20El%C3%A9trico.%20E%20sua%20Aplica%C3%A7%C3%A3o%20na%20Soldagem%20dos%20Metais.pdf>>. Acesso em: 19 Setembro 2020. Processo de soldagem.

MOHAMMAD, S. R. et al. Monitoring and analysis of melt-assisted deformation behavior of 304L stainless steel during multipass laser forming process using IR pyrometer and laser-based displacement sensor. **Optics & Laser Technology**, v. 135, n. 106718, p. 106718, March 2021. ISSN 0030-3992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399220313517>>. Acesso em: 29 January 2021. monitoring of melt-based.

MOHAMMADPOUR, M. **Experimental Study and Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow in Laser Welded and Brazed Joints**. 1ª. ed. Urmia: Bobby B. Lyle School of Engineering, v. I, 2020. 151 p. Disponível em: <[https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=engineering\\_mechanical\\_etds](https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=engineering_mechanical_etds)>. Acesso em: 17 October 2020. Weld.

MOHANTY, U. K. et al. Thermal modelling of alternating current square waveform arc welding. **Case Studies in Thermal Engineering**, Sangaredd, v. 25, n. 100885, p. 12, 01 June 2021. ISSN 2214-157X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21000484>>. Acesso em: 18 September 2021. Heat source model.

MOORE, J. H. et al. **A Practical Guide to Design and Construction**. 4ª. ed. New York: Cambridge University Press, v. 1, 2009. 644 p. ISBN 978-0-521-87858-6. Disponível em: <[http://minerva.ufsc.br/~kanaan/astro/instruments/ebooksclub.org\\_\\_Building\\_Scientific\\_Apparatus\\_Fourth\\_Edition.pdf](http://minerva.ufsc.br/~kanaan/astro/instruments/ebooksclub.org__Building_Scientific_Apparatus_Fourth_Edition.pdf)>. Acesso em: 06 March 2021. BUILDING.

MOORE, J. H.; DAVIS, C. C.; COPLAN, M. A. **Building Scientific Apparatus**. 4ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, v. I, 2013. 673 p. ISBN 978-0-521-87858-6. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=fdhGGY4Xw\\_QC&oi=fnd&pg=PR13&dq=As+the+joint+of+welding+is+the+installation+site+of+the+melting+pool+of+the+metals+the+crack+must+be+prepared+properly.+In+the+case+of+thin+plates+does+not+require+chamfers,+>](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=fdhGGY4Xw_QC&oi=fnd&pg=PR13&dq=As+the+joint+of+welding+is+the+installation+site+of+the+melting+pool+of+the+metals+the+crack+must+be+prepared+properly.+In+the+case+of+thin+plates+does+not+require+chamfers,+>)>. Acesso em: 05 Outubro 2020. Fabricação.

MOTA, C. P. et al. ESTUDO DE SOLDAGEM MIG/MAG CURTO-CIRCUITO CONTROLADO E CONVENCIONAL ATRAVÉS DE MONITORAMENTO POR SISTEMA DE VISÃO NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO. **POSMEC 2014 – Simpósio do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica**, Uberlândia, v. 2014, n. 2014, p. 4, 26 Novembro 2014. Disponível em:

<[http://swge.inf.br/PDF/POSMEC2014-0008\\_16418.PDF](http://swge.inf.br/PDF/POSMEC2014-0008_16418.PDF)>. Acesso em: 7 Novembro 2020. STT; RMD; CMT.

MUNRO, D. et al. On process-step parallel computability and linear superposition of mechanical responses in additive manufacturing process simulation. **Additive Manufacturing**, v. 28, n. 2019, p. 738-749, 01 Agosto 2019. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418305591>>. Acesso em: 28 December 2020. Macroscale mechanical modeling.

NASER, M. Z. Deriving temperature-dependent material models for structural steel through artificial intelligence. **Construction and Building Materials**, Clenson, v. 191, n. 2018, p. 56-68, 12 October 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818323766>>. Acesso em: 26 abr. 2021. Artificial intelligence.

NATAGO GUIL', M. **Modeling and Control of Laser Wire Additive Manufacturing**. 2022. ed. Luxembourg: University of Luxembourg, Kirchberg, Luxembourg, v. I, 2022. 123 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10993/51762>>. Acesso em: 27 July 2022. Parametric Modeling.

NBR-11888, N. **Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço-carbono e aço de baixa liga e alta resistência - Requisitos gerais**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, v. 1, 2008. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=Qm9ZWk5pa2orTmpNSWFQVVZlbnE3SlIGOU NqRSs1SWlSSmd1b2pCQnY2ND0=>>>. Acesso em: 26 Fevereiro 2022.

NBR-5903, N. **Produtos planos laminados de aço — Terminologia**. 2015. ed. RIO DE JANEIRO: ABNT, v. 1, 2015. 10 p. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=R1NLVUthMkt0TlZrQ0tVL2U3ZDhUMmNESXl NNHFGZytUbGlnYS9GdmmdkUT0=>>>. Acesso em: 26 FEVEREIRO 2022.

NBR-5915, N. **Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem**. 2003. ed. Rio de Janeiro: ABNT, v. 1, 2003. 6 p. Disponível em: <[https://intranet.ifs.ifsuldeminas.edu.br/eder.clementino/GEST%C3%83O%20AMBIENTAL/GERENCIAMENTO%20AMBIENTAL\\_6%20GA/GERENCIAMENTO%20AMBIENTAL/NORMAS%20BRASILEIRAS%20REGULAMENTADORAS/NBR/NBR%2005915%20-%202003%20-%20Chapas%20Finas%20a%20Frio%20de%20A%C3%A7o%>](https://intranet.ifs.ifsuldeminas.edu.br/eder.clementino/GEST%C3%83O%20AMBIENTAL/GERENCIAMENTO%20AMBIENTAL_6%20GA/GERENCIAMENTO%20AMBIENTAL/NORMAS%20BRASILEIRAS%20REGULAMENTADORAS/NBR/NBR%2005915%20-%202003%20-%20Chapas%20Finas%20a%20Frio%20de%20A%C3%A7o%>)>. Acesso em: 14 Outubro 2022.

NBR-6215, N. **Produtos siderúrgicos — Terminologia**. 2011. ed. RIO DE JANEIRO: ABNT, v. 1, 2011. 20 p. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=OTgxZ2xxdHQxZHlZNFBOZzlZWldBaHQtyVUt UTGpyeG1DdWlncGI2alJtND0=>>>. Acesso em: 26 FEVERIEO 2022. CHAPAS.

NBR-6658, N. **Chapas e bobinas de aço laminadas a frio**. 1994. ed. Rio de Janeiro: ABNT, v. 6, 1994. 6 p. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=N2VqTHdGNit4R0FrVzQ5OFJmNVc3aXRzN0dy bkhtVngwUlNSV0w0YlBpTT0=#>>>. Acesso em: 26 Fevereiro 2022.

- NBR-ISO-7438, N. **Materiais metálicos — Ensaio de dobramento**. 2022. ed. RIO DE JANEIRO: ABNT, v. 1, 2022. 14 p. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=d0JDY1pZWGlE1keDBtOGsyWXIrd3hDVGgwRCs0UG5ieEVDbDBFQWJIST0=>>>. Acesso em: 26 FEVEREIRO 2022. CHAPA.
- NGUYEN, N.; CHUJUTALLI, J. H. Simulating convective-radiative heat sink effect by means of FEA-based Gaussian heat sources and its approximate analytical solutions for semi-infinite body. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. I, n. 2021, p. 26, 06 September 2021. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07699-8>>. Acesso em: 19 September 2021. microhardness.
- NISHIO, Y. et al. Study of deformation reduction for steel panels of composite slabs using three-dimensional thermal conductivity - thermal stress analysis during hot dip galvanizing. **Procedimentos de engenharia estrutural**, v. 61A, n. 3, p. 10, 3 March 2015. ISSN 1881-820X. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/61A/0/61A\\_1104/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/61A/0/61A_1104/_pdf/-char/ja)>. Acesso em: 15 NOVEMBER 2020. thermal stress analysis.
- ODIAKA, T. et al. Numerical analysis of butt and lap welded titanium reinforced mild steel joints. **Materials Today: Proceedings**, Johannesburg, v. 44, n. 2021, p. 1175- 1184, 01 January 2021. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320388441>>. Acesso em: 18 September 2021. GMAW.
- ORDAN'YAN, S. S. Reaction in the System TiCx-TiB2. **Sov. Powder Metall Met. Ceram.**, Kiev, v. 152, n. 1975, p. 728-738, 1975.
- PAES, L. E. D. S. **SOLDAGEM TIG ORBITAL – TÉCNICA DE ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME VISANDO AUMENTO NA PRODUTIVIDADE**. 1ª. ed. Florianópolis: UFSC, v. I, 2016. 206 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/176703/347848.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 Setembro 2020. Processo de soldagem.
- PAN, H. et al. Effect of Annealing Process on Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of a Fe-Si-Cr-Mo-C Deep Drawing Dual-Phase Steel. **MDPI**, v. 10, n. 2020, p. 16, 2 September 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4352/10/9/777#cite>>. Acesso em: 28 December 2020. mechanical properties.
- PANDOLFI, G. S.; RODRIGUES, F. G. P.; MODENESI, P. J. Avaliação da Ocorrência de Construção Mecânica do Arco na Soldagem A-TIG de Aços Inoxidáveis Austeníticos. **Soldagem & Inspeção**, Belo Horizonte, v. 21, n. 2016, p. 428-443, 15 Dezembro 2016. ISSN 0104-9224. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242016000400428&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242016000400428&nrm=iso)>. Acesso em: 17 Outubro 2020. Arco na Soldagem.
- PASQUALINI, A. et al. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA SOLDAGEM AUTOMATIZADA DE ROSCAS TRANSPORTADORAS. **SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, Volta Redonda, 151, n. 2017, 15 Julho 2017. 15. Disponível em:

<[https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos09/151\\_Maquina\\_Solda.pdf](https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos09/151_Maquina_Solda.pdf)>. Acesso em: 17 Outubro 2020. Solda.

PENG, X. et al. An adaptive Bernstein-Bézier finite element method for heat transfer analysis in welding. **Advances in Engineering Software**, v. 148, n. 2020, p. 102855, 01 October 2020. ISSN 102855. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997820302349>>. Acesso em: 29 December 2020. Adaptive refinement.

PEREIRA, G. B. A.; FRAGA, F. E. N. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM. **UFERSA**, Mossró-RN, 1, n. 2020, 04 Fevereiro 2020. 10. Disponível em: <[https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5820/1/GiovannaBAP\\_ART.pdf](https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5820/1/GiovannaBAP_ART.pdf)>. Acesso em: 09 Julho 2022. Soldagem.

PEREIRA, J. P. **SOLDAGEM MAG COM BRAÇO ROBÓTICO DE AÇOS ASTM A36 E CSN CIVIL EM PERFIL ESTRUTURAL DOBRADO A FRIO**. 1ª. ed. Bauru: UNESP, v. I, 2016. 130 p. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/148565>>. Acesso em: 04 Outubro 2020. Processo de Soldagem GMAW.

PEREIRA, J. P.; SOUSA, E. A. C.; GONÇALVES, G. M. B. Variação das propriedades geométricas do perfil estrutural dobrado tipo "U" e influência no projeto de estruturas metálicas. **REA - Revista da Estrutura de Aço**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 359-369, 01 Dezembro 2020. ISSN 2238-9377. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/revista-da-estrutura-de-aco-rea/>>. Acesso em: 24 Fevereiro 2022. Chapa dobrada.

PICO TECHNOLOGY. **TC-08 User's Guide**. 2019. ed. Cambridgeshire: Pico Technology, v. I, 2019. 13 p. Disponível em: <<https://www.picotech.com/about/uk-address>>. Acesso em: 2 November 2021. Temperature.

PICO TECHNOLOGY. Pico Technology, 1 November 2021. Disponível em: <<https://www.picotech.com/download/datasheets/tc-08-thermocouple-data-logger-users-guide.pdf>>. Acesso em: 1 November 2021. Aquisitor.

PINTO, F. C. et al. Defects in parts manufactured by selective laser melting caused by  $\delta$ -ferrite in reused 316L steel powder feedstock. **JOURNAL ELSEVIER**, Lorena, v. 31, n. 2020, p. 10, 01 jan. 2020. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419307602>>. Acesso em: 12 Outubro 2020. AISI 316L steel.

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BOLMSJO. **Welding Robots - Tecnology, System Issues and Applications**. 1ª. ed. London: Springer, v. I, 2006. 183 p. ISBN 978-1-85233-953-1. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=DFJAdDg-STYC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Some+combinations+of+position+and+direction+of+welding+favor+more+than+others+the+input+of+incident+heat+in+the+base+metal+and+the+shape+of+the+plasma+by+the+gravitational+ef>>. Acesso em: 17 October 2020. Robots.

PIRES, K. G. F. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO BOCAL NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**. 1ª. ed. Uberlândia: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, v. I, 2018. 46 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/23691/1/Avalia%C3%A7%C3%A3oInfluenciaTamanho.pdf>>.

Acesso em: 19 Setembro 2020. Arco elétrico.

PITTNER, A. **Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme**. I. ed. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), v. 85, 2012. 213 p. ISBN 1613-4249. Disponível em: <urn:nbn:de:kobv:b43-733>. Acesso em: 29 December 2020. Global Optimisation.

PORNPUSIRI, N.; KANLAYASIRI, K. Effect of bending temperatures on the microstructure and springback of a TRIP steel sheet. **Defence Technology**, Bangkok, v. 16, n. 2020, p. 7, 01 out. 2020. ISSN 2214-9147. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914719310384>>. Acesso em: 18 Setembro 2020. Phase transformation.

PRABANDAPU, H.; SOMAYAJULU, S. R. Gas Metal Arc Welding Sequence Effect on Residual Stress and Distortion by using Finite Element Analysis. **International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)**, Hyderabad, v. 05, n. 12, p. 15, 15 Mar 2020. ISSN 2454-9150. Disponível em:

<[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/62985600/IJREAMV05I126001020200417-76199-kkrbq2.pdf?1587112896=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGas\\_Metal\\_Arc\\_Welding\\_Sequence\\_Effect\\_on.pdf&Expires=1605491741&Signature=OxL3yJ1~eyXO7XGYJ4vHzop-B6Nku](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/62985600/IJREAMV05I126001020200417-76199-kkrbq2.pdf?1587112896=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGas_Metal_Arc_Welding_Sequence_Effect_on.pdf&Expires=1605491741&Signature=OxL3yJ1~eyXO7XGYJ4vHzop-B6Nku)>. Acesso em: 15 November 2020. residual stresses and distortion.

PULSTEC. **General description of the  $\mu$ -X360s**. 2016. ed. Nakagawa: PULSTEC, v. I, 2016. 21 p. Disponível em:

<<https://www.pulstec.co.jp/websystem4/webroot/attach/documentens/0/1595323656CPNv.pdf>>.

Acesso em: 14 MARCH 2021. stresses.

QURESHI, M. E. **ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES AND DISTORTIONS IN CIRCUMFERENTIALLY WELDED THIN-WALLED CYLINDERS**. 2008. ed. Rawalpindi: Department of Mechanical Engineering, v. I, 2008. 256 p. ISBN 2002-NUST-MS-PhD-20. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/profile/Ejaz\\_Qureshi4/publication/48336090\\_Analysis\\_Of\\_Residual\\_Stresses\\_And\\_Distortions\\_In\\_Circumferentially\\_Welded\\_Thin-Walled\\_Cylinders/links/02e7e5229e2329b0ff000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ejaz_Qureshi4/publication/48336090_Analysis_Of_Residual_Stresses_And_Distortions_In_Circumferentially_Welded_Thin-Walled_Cylinders/links/02e7e5229e2329b0ff000000.pdf)>. Acesso em: 28 December 2020. Welding.

RAGHAVAN, V. **Physical Metallurgy: Principles and Practice**. 2ª. ed. New Delhi: Prentice-Hall of India Privative Limited, v. I, 2006. 232 p. ISBN 978-81-203-3012-2. Encruamento.

RAMIREZ, C. R. R. **Estudo Das Distorções Em Chapas Finas De Um Aço Com Alta Resistência Mecânica E Ao Desgaste Soldadas Pelos Processos MAG E TIG**. 1ª. ed. Porto Alegre: Escola de

Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. I, 2020. 104 p. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/212196/001115707.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 Setembro 2020. Soldagem chapa fina.

REISGEN, U. et al. Influence of Preheating on Lamellar Gray Cast Iron for Surface Layer Welding applications with Plasma-Transferred Arc Powder and Metal Inert Gas Welding Processes with Duplex Steel as Filler Material. **J Therm Spray Tech**, Darmstadt, v. 29, n. 2020, p. 724-740, 01 Abril 2020. ISSN 1544-1016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11666-020-01014-9>>. Acesso em: 13 Outubro 2020. The good capacity of gray cast.

RICHARD, B. **The Welding Workplace**. 1<sup>a</sup>. ed. Abington: Abington Publishing, v. I, 2000. 213 p. ISBN 1-85573-445-1. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=nV80hUqmD\\_8C&oi=fnd&pg=PR11&dq=gas+composition+of+welding+gmaw+is+able+to+dismay+the+duration+of+the+short+and+by+compressing+the+arc+and+modifying+the+drop+size.&ots=\\_bdqAOwGvU&sig=Wei4bLH-ts7NPP-Qws4\\_8-a](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=nV80hUqmD_8C&oi=fnd&pg=PR11&dq=gas+composition+of+welding+gmaw+is+able+to+dismay+the+duration+of+the+short+and+by+compressing+the+arc+and+modifying+the+drop+size.&ots=_bdqAOwGvU&sig=Wei4bLH-ts7NPP-Qws4_8-a)>. Acesso em: 08 November 2020. welding.

RIOS, M. C. G. et al. Microstructural characterization of the physical simulated and welded heat-affected zone of 9% Ni steel pipe. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2022, p. 3033-3046, 01 Março 2022. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422001892>>. Acesso em: 27 Julho 2022. Computational welding simulation.

RIOS, M. C. G. R. et al. Microstructural Characterization of the Simulated Heat-Affected Zone of 9 Pct Ni Steel. **Metallurgical and Materials Transactions**, v. 11, n. 2012, November 2021. Disponível em: <<https://www.springerprofessional.de/en/microstructural-characterization-of-the-simulated-heat-affected-/19656034>>. Acesso em: 05 February 2022. ZTA.

ROBERT, F. ANSYS welding, 22 November 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-HpHvU5DyNo&t=1626s>>. Acesso em: 13 January 2022.

ROBERTSON, S. **Microstructural manipulation by laser irradiation of prepared samples: The 'Snapshot Method'**. 2019. ed. Luleå: Luleå University of Technology, v. I, 2019. 112 p. ISBN 978-91-7790-452-6. Disponível em: <<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-76150>>. Acesso em: 25 July 2022. Bearbetnings-, yt- och fogningsteknik.

ROCHA, E. J. F. et al. Modeling of the temperature field generated by the deposition of weld bead on a steel butt joint by FEM techniques and thermographic images. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 2018, p. 7, 23 Fevereiro 2018. ISSN 1516-1439. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392018000300010&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392018000300010&nrm=iso)>. Acesso em: 30 Abril 2021. GMAW.

RODRIGUES, T. A. et al. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive. **Materials**, Lisboa, v. 12, n. 1121, p. 41, April 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121#cite>>. Acesso em: 10 January 2021. additive manufacturing.

RONG, Y.; HUANG, Y.; WANG, L. Evolution Mechanism of Transient Strain and Residual Stress Distribution in Al 6061 Laser Welding. **Crystals**, Basel, v. 11, n. 2, p. 13, 17 February 2021. ISSN 2073-4352. Disponivel em: <<https://www.mdpi.com/2073-4352/11/2/205>>. Acesso em: 13 March 2021. Considering the harm that residual stress causes to the mechanical properties of a weld joint, the evolution mechanisms of transient strain and residual stress distribution are investigated in laser welding of Al 6061, considering that these originate from.

ROSENTHAL, D. **Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting**. 1941. ed. [S.l.]: J. Weld, v. 20, 1941. 220-234 p.

ROSENTHAL, D. **The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments**. 1<sup>a</sup>. ed. New York: ASME, v. 68, 1946. 849-866 p. Disponivel em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/2653>>. Acesso em: 15 November 2020. Lei de Fourier.

ROSENTHAL, D. **The theory of moving sources of heat and its applications to metal treatments**. 1946. ed. [S.l.]: Transactions of the ASME, v. 68, 1946. 849-866 p.

RUBIO-RAMIREZ, C. et al. Prediction of angular distortion due GMAW process of thin-sheets Hardox 450® steel by numerical model and artificial neural network. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, n. 2021, p. 1202- 1213, 01 August 2021. ISSN 1526-6125. Disponivel em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521004588>>. Acesso em: 15 September 2021. Hardox 450® steel.

SAEWE, J. et al. Influence of Preheating Temperature on Hardness and Microstructure of PBF Steel hs6-5-3-8. **Preprints 2021**, Fraunhofer, v. 2021, n. 2021, p. 11-19, 29 January 2021. ISSN 202101062. Disponivel em: <<https://www.preprints.org/manuscript/202101.0622/v1>>. Acesso em: 07 March 2021. Laser Powder Bed Fusion.

SAOUDI, A. et al. Assessment and statistical correlation of mechanical properties of double sided single pass submerged arc welded line pipe steel. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, Karabuk, v. 23, n. 2020, p. 9, 01 April 2020. ISSN 2215-0986. Disponivel em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098619301648>>. Acesso em: 18 Setembro 2020. Welding procedure.

SAVAŠ, A. SELECTION OF WELDING CONDITIONS FOR MINIMIZING THE RESIDUAL STRESSES AND DEFORMATIONS DURING HARD-FACING OF MILD STEEL. **Brodogradnja**, v. 72, n. 2021, p. 1-18, 17 September 2021. Disponivel em: <[https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=367394](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=367394)>. Acesso em: 16 September 2021. grey relational analysis.

SCHAEFFLER, A. L. **Metal Prog.** 1949. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 56, 1949. 680 p.

SCHULDES, J. G. R. **THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT MODEL FOR RESIDUAL STRESSES IN PARTS MANUFACTURED BY SLM AND EBM**. 2017. ed. Al Paso: University of Texas at El Paso, v. I, 2017. 112 p. Disponivel em:

<[https://scholarworks.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1535&context=open\\_etd](https://scholarworks.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1535&context=open_etd)>. Acesso em: 27 Abril 2021. Welding.

SCOTTI, A.; VLADIMIR, P. **Soldagem MIG/MAG**. 2ª. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., v. I, 2014. 288 p. ISBN 978-85-88098-42-8. Processo de soldagem.

SELVAMANI, S. T. et al. Effects of heat distribution during cold metal transfer arc welding on galvanized steel using volumetric heat source model. **Journal of Materials Research and Technology**, Tamilnadu, v. 9, n. 5, p. 10097-10109, 01 September 2020. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420315027>>. Acesso em: 14 Outubro 2020. Galvanized steel.

SEQUEIRA, C. A. C. **High Temperature Corrosion**. 1ª. ed. Lisboa: John Wiley & Sons, v. I, 2019. 637 p. ISBN 9781119474425. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=HL59DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=The+use+of+inert+gases+such+as+Argon+\(Air\),+Helium+\(He\),+in+the+union+of+metals+are+more+reactive+with+Aluminum+\(Al\),+Magnesium+\(Mg\)+and+Titanium+\(Ti\),+in+parallel,+active+ga](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=HL59DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=The+use+of+inert+gases+such+as+Argon+(Air),+Helium+(He),+in+the+union+of+metals+are+more+reactive+with+Aluminum+(Al),+Magnesium+(Mg)+and+Titanium+(Ti),+in+parallel,+active+ga)>. Acesso em: 08 November 2020. Corrosion.

SHI, L.; TIAN, X.; ZHANG, C. Int J Adv Manuf Technol. **Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes**, Shandong, 81, n. 9, 3 June 2015. 2099-2107. Disponível em: <[http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx\\_ver=Z39.88-2004&ctx\\_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx\\_tim=2016-06-18T09%3A14%3A50IST&url\\_ver=Z39.88-2004&url\\_ctx\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr\\_id=info:sid/primox.exlibris](http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2016-06-18T09%3A14%3A50IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr_id=info:sid/primox.exlibris)>. Acesso em: 18 Junho 2016. Programação automática do robô para indústria na solda de tubos.

SHI, L.; TIAN, X.; ZHANG, C. The international journal of advanced manufacturing technology. **Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes**, Londres, 81, 1 Junho 2016. 2099-2107. Disponível em: <[http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx\\_ver=Z39.88-2004&ctx\\_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx\\_tim=2016-06-09T08%3A18%3A26IST&url\\_ver=Z39.88-2004&url\\_ctx\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr\\_id=info:sid/primox.exlibris](http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2016-06-09T08%3A18%3A26IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr_id=info:sid/primox.exlibris)>. Acesso em: 1 Junho 2016.

SHI, L.; TIAN, X.; ZHANG, C. The international journal of advanced manufacturing technology. **Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes**, Londres, 81, 1 Junho 2016. 2099-2107. Disponível em: <[http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx\\_ver=Z39.88-2004&ctx\\_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx\\_tim=2016-06-09T08%3A18%3A26IST&url\\_ver=Z39.88-2004&url\\_ctx\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr\\_id=info:sid/primox.exlibris](http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=4&ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2016-06-09T08%3A18%3A26IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr_id=info:sid/primox.exlibris)>. Acesso em: 1 Junho 2016.

SIEDSCHLAG, E. The Ternary Cr-Ni-Mo System. **Z. Metallkd**, v. 17, n. 1925, p. 53-56, 1925.

SIKSTROM, F. et al. 3D-Scanning for Weld Distortion Measuring. **2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings**, Sorrento, v. I, n. 2006, p. 2132-2137, 25 April 2006. ISSN 1091-5281. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4124735>>. Acesso em: 31 July 2022. model validation.

SILVA, R. D. S. et al. Influência do Aporte Térmico sobre as Características e Propriedades de Cordões de Solda dos Aços AISI 316 e AISI 316L. **Soldagem e Inspeção**, Belo Horizonte, v. 25, n. 2020, p. 13, 15 Maio 2020. ISSN 1980-6973. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/si/a/Z7fPkjJtqQ4DyLjSbQQmFpC/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 14 Setembro 2021. Processo TIG Autógeno.

- SILVA, W. C. D. D.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P. Efeito da profundidade de soldagem no hidrogênio difusível de soldas molhadas. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 2012, p. 298 - 305, Dezembro 2012. ISSN 0104-9224. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242012000400004&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242012000400004&nrm=iso)>. Acesso em: 14 Março 2021. Hidrogênio Difusível; Pressão Hidrostática.
- SINGH, S. N. et al. A Comparative Analysis of Laser Additive Manufacturing of High Layer Thickness Pure Ti and Inconel 718 Alloy Materials Using Finite Element Method. **Materials**, v. 14, n. 4, p. 18, February 2021. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/4/876>>. Acesso em: 30 jULY 2022. ions is a challenging task. Most of the existing studies are focused on the study of thin layer thickness and comparative study of same materials under different manufacturing conditi.
- SOUZA, D.; RESENDE, A. A. D.; SCOTTI, A. **Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG**. 3. ed. São Paulo: ABS, v. 14, 2009. 192-198 p. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/si/v14n3/v14n3a02>>. Acesso em: 28 Dezembro 2020. MIG/MAG.
- STREBKOV, V. T. Metallurgist. **ANTI-CORROSION PROTECTION FOR STRUCTURALMEMBERS AND BUILDINGS AT METALLURGICALPLANTS**, Chelyabinsk, 49, n. 5, 5 May 2005. 65-66. Acesso em: 16 Junho 2016. Estruturas metalicas.
- SUGAHARA, H. J. et al. Measurement of Residual Stresses in Welded Joints by DCP Method. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 2018, p. 5, 16 July 2018. ISSN 1516-1439. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392018000400239](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392018000400239)>. Acesso em: 13 March 2021. , displacement of coordinate points.
- SUN, Y. L. et al. Effects of dilution on the hardness and residual stresses in multipass steel weldments. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Manchester, v. 187, n. 104154, p. 12, 5 July 2020. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016120301320>>. Acesso em: 18 October 2020. Molten mixture.
- SUZUKI, M. Flux Cored Welding Wire for 9%Ni Steel. **Kobelco**, Osaka, v. 59, n. 2009, p. 5, 1 April 2009. Disponível em: <[https://www.kobelco.co.jp/technology-review/pdf/59\\_1/111-115.pdf](https://www.kobelco.co.jp/technology-review/pdf/59_1/111-115.pdf)>. Acesso em: 1 March 2022. Weld.
- TARAPHDAR, P. K. et al. Effects of groove configuration and buttering layer on the through-thickness residual stress distribution in dissimilar welds. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Bhubaneswa, v. 192, n. 104392, p. 17, 01 August 2021. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016121000909>>. Acesso em: 18 September 2021. Residual stress.
- TAVARES, T. B. et al. DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CUSTO PARA MECANIZAÇÃO DA SOLDAGEM GTAW E SUA APLICAÇÃO EM ESTUDO DE

SOLIDIFICAÇÃO DE AÇO ABNT 430. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. I, n. I, p. 13-22, 15 Fevereiro 2020. ISSN 2176-1523. Disponível em: <<https://tecnologiammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.20202062/pdf/tmm-17-1-13.pdf>>. Acesso em: 15 Outubro 2020. Soldagem.

TAWEEJUN, N.; KANCHANOMAI, C. Journal of Materials Engineering and Performance. **Effects of Carbon and Nitrogen on the Microstructure and Mechanical Properties of Carbonitrided Low-Carbon Steel**, Pathum Thani, 24, n. 12, 30 October 2015. 4853-4862. Disponível em: <[http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=6&ctx\\_ver=Z39.88-2004&ctx\\_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx\\_tim=2016-06-15T08%3A35%3A25IST&url\\_ver=Z39.88-2004&url\\_ctx\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr\\_id=info:sid/primox.exlibris](http://link-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?frbrVersion=6&ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&ctx_tim=2016-06-15T08%3A35%3A25IST&url_ver=Z39.88-2004&url_ctx_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:ctx&rfr_id=info:sid/primox.exlibris)>. Acesso em: 15 Junho 2015. Efeito do carbono e nitrogênio na microestrutura do aço.

TEIXEIRA, J. et al. Inter-critical annealing of cold-rolled ferrite-pearlite steel: Microstructure evolutions and phase transformation kinetics. **Acta Materialia**, Nancy, v. 212, n. 2021, p. 20, 15 June 2021. ISSN 1359-6454. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645421003001>>. Acesso em: 10 May 2021. Dual-Phase steels.

THE ENGINEERING TOOLBOX. Metals and Alloys - Young's Modulus of Elasticity. **The Engineering Toolbox**, New York, I, n. 2021, 29 December 2021. Disponível em: <[https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d\\_773.html](https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html)>. Acesso em: 29 December 2021. Tables.

TISZA, M. **Physical Metallurgy For Engineers**. 2ª. ed. London: ASM International Materials Park, v. I, 2002. 402 p. ISBN 0-87170-725-X. Microestrutura.

TOMKÓW, J.; FYDRYCH, D.; ROGALSKI, G. Dissimilar underwater wet welding of HSLA steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Gdańsk, v. 109, n. 2020, p. 8, 01 jul. 2020. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05617-y>>. Acesso em: 18 Setembro 2020. The high-strength low-alloy.

USIMINAS SIDERÚRGICA DE MINAS GERAIS S.A. Catálogo técnico. **USIMINAS**, Contagem, 17 Setembro 2020. 1. Disponível em: <[https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2020/03/US-0073-15F-CAT-TIRAS-A-QUENTE-01-2020-curvas\\_v2.pdf](https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2020/03/US-0073-15F-CAT-TIRAS-A-QUENTE-01-2020-curvas_v2.pdf)>. Acesso em: 17 2020 2020. Aços.

VERGA, C. **Enhancing composite material structures simulation with multi-scale approach**. 2020. ed. Torino: POLITECNICO DI TORINO, v. I, 2020. 166 p. Disponível em: <<https://webthesis.biblio.polito.it/16289/1/tesi.pdf>>. Acesso em: 28 December 2020. Termo.

VOIGT, A. L.; CUNHA, T. V. D.; DÍAZ, V. V. Metodologia de Baixo Custo para Registro de Imagens do. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 22, n. 2017, p. 4, 15 Outubro 2017. ISSN 1980-6973. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242017000400346&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242017000400346&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 19 Setembro 2020. Arco elétrico.

VOONNA, B. T. et al. Some studies of nanoparticle properties for dissimilar materials on the surface features created by EBW and LBW. **Materials Today: Proceedings**, v. I, n. 2021, 16 February 2021.

- ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532040700X>. Acesso em: 10 March 2021. Study of various microstructural properties and mechanical properties of the weld zones of different alloys, which were welded using the EBW and LBW. This study reveals all the changes occurring to the microstructural and mechanical properties due to vari.
- VRIES, E. D. **Mechanics and Mechanisms of Ultrasonic Metal Welding**. 1ª. ed. Columbus: Ohio State University, v. I, 2001. 253 p. Disponível em: [http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=osu1078415529](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1078415529). Acesso em: 29 December 2020. Ultrasonic.
- WAHAB, M. A.; PAINTER, M. J.; DAVIES, M. H. The prediction of the temperature distribution and weld pool geometry in the gas metal arc welding process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, n. 1, p. 233-239, 01 May 1998. ISSN 0924-0136. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013697004226>. Acesso em: 31 July 2022. Weld pool geometry.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. D. **Soldagem - Processos e Metalurgia**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., v. I, 1992. 494 p. ISBN 05671. Solda.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. D. **Soldagem: Precessos e Metalurgia**. 4ª. ed. São Paulo: Editora Edgar Bluvher Ltda, v. I, 1992. 506 p. ISBN 85-212-0238-5. Disponível em: [https://www.academia.edu/11499301/Soldagem\\_processos\\_e\\_metalurgia\\_Wainer\\_Brandi](https://www.academia.edu/11499301/Soldagem_processos_e_metalurgia_Wainer_Brandi). Acesso em: 27 Abril 2020. Metalurgia.
- WAINER, E.; DUARTE, B. S.; MELLO, F. D. H. D. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4ª. ed. São Paulo: Blucher, v. I, 1992. 506 p. ISBN 85-212-0238-5. Disponível em: [https://www.academia.edu/11499301/Soldagem\\_processos\\_e\\_metalurgia\\_Wainer\\_Brandi](https://www.academia.edu/11499301/Soldagem_processos_e_metalurgia_Wainer_Brandi). Acesso em: 08 Novembro 2020. Solda.
- WANG, H.-X. et al. Three-dimensional modeling of heat transfer and fluid flow in laminar-plasma material re-melting processing. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 2006, p. 2254-2264, 01 July 2006. ISSN 0017-9310. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793100600010X>. Acesso em: 14 September 2021. Metal re-melting.
- WANG, J. et al. Residual Stresses Analysis in Ball end Milling of Nickel-Based Superalloy Inconel 718. **Materials Research**, Xian, v. 20, n. 2017, p. 1681 -1689, 18 September 2017. ISSN 1516-1439. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392017000601681](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000601681). Acesso em: 13 March 2021. Ball end milling.
- WEMAN, K. **Welding processes handbook**. 2ª. ed. Sawston: Woodhead Publishing Limited, v. I, 2012. 270 p. ISBN 978-0-85709-518-3. Disponível em: [file:///C:/Users/josem/Downloads/Welding%20processes%20handbook%20by%20Klas%20Weman%20\(z-lib.org\).pdf](file:///C:/Users/josem/Downloads/Welding%20processes%20handbook%20by%20Klas%20Weman%20(z-lib.org).pdf). Acesso em: 30 Sptember 2020. GMAW.

WEN, C.-D. Investigation of steel emissivity behaviors: Examination of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) emissivity models. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 9, p. 2035-2045, 01 April 2010. ISSN 0017-9310. Disponivel em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931009007248>>. Acesso em: 30 July 2022. Emissivity.

WU, C. S.; ZHANG, H. T.; CHEN, J. Numerical simulation of keyhole behaviors and fluid dynamics in laser-gas metal arc hybrid welding of ferrite stainless steel plates. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, n. 2017, p. 235- 245, 01 January 2017. ISSN 1526-6125. Disponivel em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612516301645>>. Acesso em: 14 September 2021. Fluid flow.

X., C. Y. et al. Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW. **WELDING RESEARCH**, MIAMI, v. I, n. 2004, p. 336-343, 15 DECEMBER 2004. Disponivel em: <[http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_2004\\_12\\_s336.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2004_12_s336.pdf)>. Acesso em: 08 NOVEMBER 2020. Process Stability.

XIRIS AUTOMATION INC. GMAW. **XIRIS**, Burlington, 1, n. 2021, 13 November 2021. 1. Disponivel em: <<https://blog.xiris.com/blog/what-does-welding-sound-like-gmaw>>. Acesso em: 13 NOVEMBER 2021. WELD.

XU, P. et al. Fracture Mode Variation Mechanism of Al/Steel Dissimilar Overlap Joint Made Using Variable Polarity Cold Metal Transfer-Based Arc Brazing. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 53, n. 7, July 2022. ISSN 1544-1024. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1007/s11665-022-07134-3>>. Acesso em: 27 July 2022. d camera results with interface material characterization results, the mechanism of fracture m.

YANG, K. et al. Prediction of HAZ Microstructure and Hardness for Q960E Joints Welded by Triple-Wire GMAW Based on Thermal and Numerical Simulation. **Materials**, Tianjin, v. 14, n. 17, p. 17, 01 January 2021. ISSN 1996-1944. Disponivel em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/17/4898>>. Acesso em: 18 September 2021. heat affected zone.

YANG, K.; ZHANG, Y.; ZHAO, J. Elastoplastic Fracture Analysis of the P91 Steel Welded Joint under Repair Welding Thermal Shock Based on XFEM. **Metals**, Nanjing, v. 10, n. 2020, p. 24, 22 September 2020. Disponivel em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/10/10/1285#cite>>. Acesso em: 18 October 2020. welded joint.

YASKAWA AMERICA, INC. **Manual and instrutions Controllers**. 2022. ed. Miamisburg, OH 45342: Yaskawa America, Inc. All Rights Reserved, v. I, 2022. 584 p. Disponivel em: <<https://www.motoman.com/en-us/about/company/locations>>. Acesso em: 06 February 2022. Arc welding.

YILBAS, B. S.; ARIF, A. F. M.; ABDUL ALEEM, B. J. Laser welding of low carbon steel and thermal stress analysis. **Optics & Laser Technology**, v. 42, n. 5, p. 760-768, 01 July 2010. ISSN 0030-3992.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003039920900259X>>. Acesso em: 30 July 2022. Temperature.

YOUNG, B.; LUI, W.-M. Thin-walled structures. **Tests of cold-formed high strength stainless steel compression members**, Hong Kong, 44, n. 2, 26 March 2006. 224-234. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382310600019X>>. Acesso em: 12 Junho 2016. Rigidez.

YUJIAO QIAN, M. Z. Optimized model for monitoring temperature zones of 3D printing using RGB methods. **Manufacturing**, Xiamen, v. 12179, n. 2022, 10 June 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2636635>>. Acesso em: 30 July 2022.

ZANIN, P. V. **Estudo do ciclo térmico na zona afetada pelo calor produzida pelo processo de soldagem MAG**. 1ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, v. I, 2010. 20 p. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/27528>>. Acesso em: 16 Fevereiro 2022. Solda.

ZAREIAN, S. **Fire and Heat Transfer Modelling of Small and Large Scale Experiments**. 2020. ed. Waterloo: University of Waterloo, v. I, 2020. 92 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10012/16327>>. Acesso em: 04 May 2021. Boltzman.

ZHANG, C. et al. Study on the Molten Pool Fluid Behavior of PAW-Cable-Type Seven-Wire GMAW Hybrid Welding. **Cristals**, Changzhou, v. 12, n. 306, p. 14, 14 January 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4352/12/3/306/htm>>. Acesso em: 28 February 2022. GMAW.

ZHAO, H. et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 1, p. 276-285, 01 January 2012. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611002718>>. Acesso em: 31 July 2022. Finite element model.

ZHU, S. Robotic GMAW forming remanufacturing technology. **Advances in Manufacturing**, Shanghai, v. 1, n. 1, p. 87-90, 01 March 2013. ISSN 2195-3597. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40436-013-0001-x>>. Acesso em: 31 July 2022. GMAW forming.

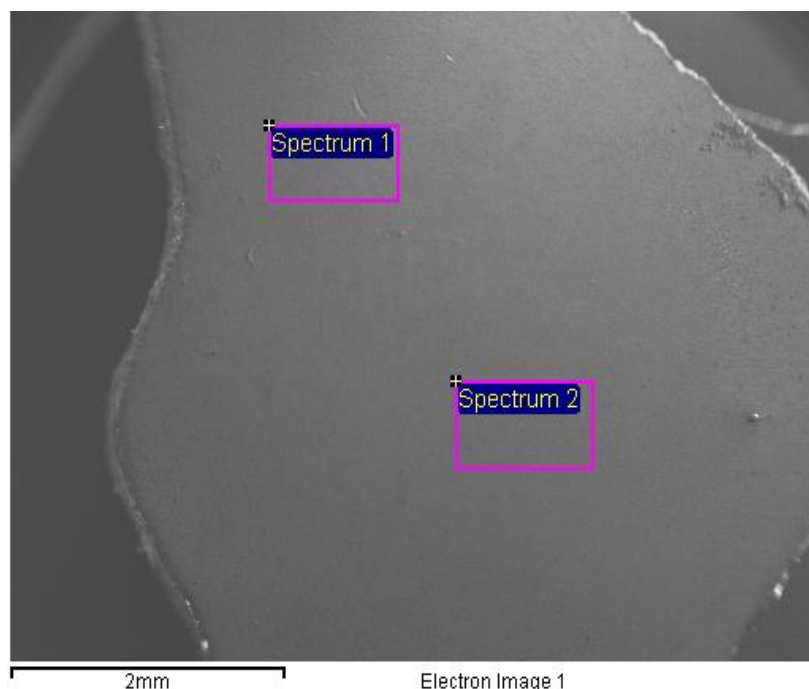
ZIBEROV, M. et al. INFLUÊNCIA DAS FORÇAS ATUANTES NA GEOMETRIA DA POÇA DE FUSÃO EM SOLDAGEM A ARCO: UMA REVISÃO. **POSMEC 2015 – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, Uberlândia, v. I, n. 2015, p. 5, 18 e 19 Novembro 2015. Disponível em: <[http://swge.inf.br/PDF/POSMEC2015-0006\\_027137.PDF](http://swge.inf.br/PDF/POSMEC2015-0006_027137.PDF)>. Acesso em: 09 Janeiro 2021. geometria da poça.

## 10 APÊNDICES

### 10.1 APÊNDICE A - ESPECTROMETRIA DOS CP<sub>s</sub>

Processo normalizado para análise dos elementos químicos do CP.

Figura 10.1 - Grão analisado por espectrometria no grupo A com o consumível ER70S-6.



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10.1 - Espectrometria no grão do grupo A (AWS ER70S-6) - Aumento 1000 x

| Espectro   | In stats. | C    | O    | Al   | Si   | Mn   | Fe    | Total |
|------------|-----------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Espectro 1 | Sim       | 3    | 1.71 | 0.6  |      | 0.6  | 94.1  | 100   |
| Espectro 2 | Sim       | 3.79 | 2.25 | 0.38 | 0.43 | 0.93 | 92.22 | 100   |
| Max.       |           | 3.79 | 2.25 | 0.6  | 0.43 | 0.93 | 94.1  |       |
| Min.       |           | 3    | 1.71 | 0.38 | 0.43 | 0.6  | 92.22 |       |

Micrografia do MS, atacado com Nital 5%, fica próximo da seguinte composição: 6% de ferrita, 56 % de Bainita e 38% de Martensita, com uma margem de erro de até 5%.

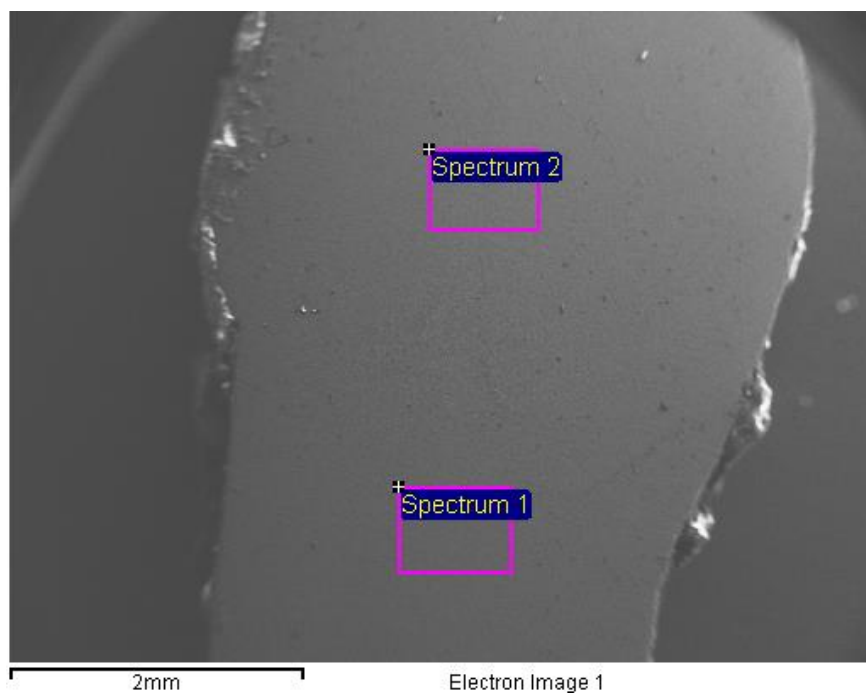
Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10.2 - Espectrometria no grão do grupo A (AWS ER70S-3) - Aumento 1000 x

| Espectro   | In stats. | C    | O    | Al   | Si   | Mn   | Fe    | Total  |
|------------|-----------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| Espectro 1 | Sim       | 4.33 | 2.56 | 0.68 |      |      | 92.43 | 100.00 |
| Espectro 2 | Sim       | 4.10 | 4.29 | 0.32 | 0.46 | 0.86 | 89.96 | 100.00 |
| Max.       |           | 4.33 | 4.29 | 0.68 | 0.46 | 0.86 | 92.43 |        |
| Min.       |           | 4.10 | 2.56 | 0.32 | 0.46 | 0.86 | 89.96 |        |

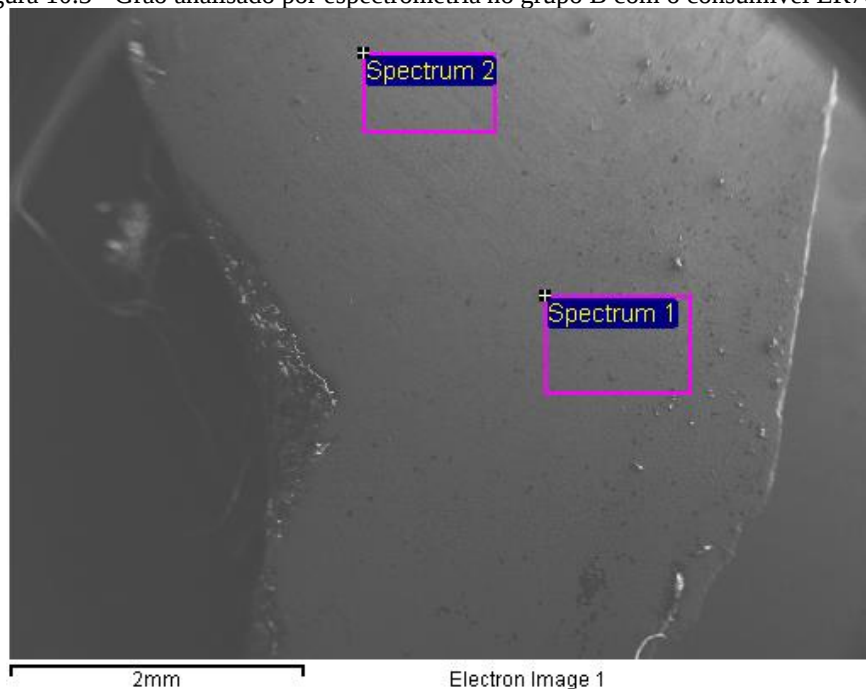
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.2 - Grão analisado por espectrometria no grupo A com o consumível ER70S-3.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.3 - Grão analisado por espectrometria no grupo B com o consumível ER70S-6.



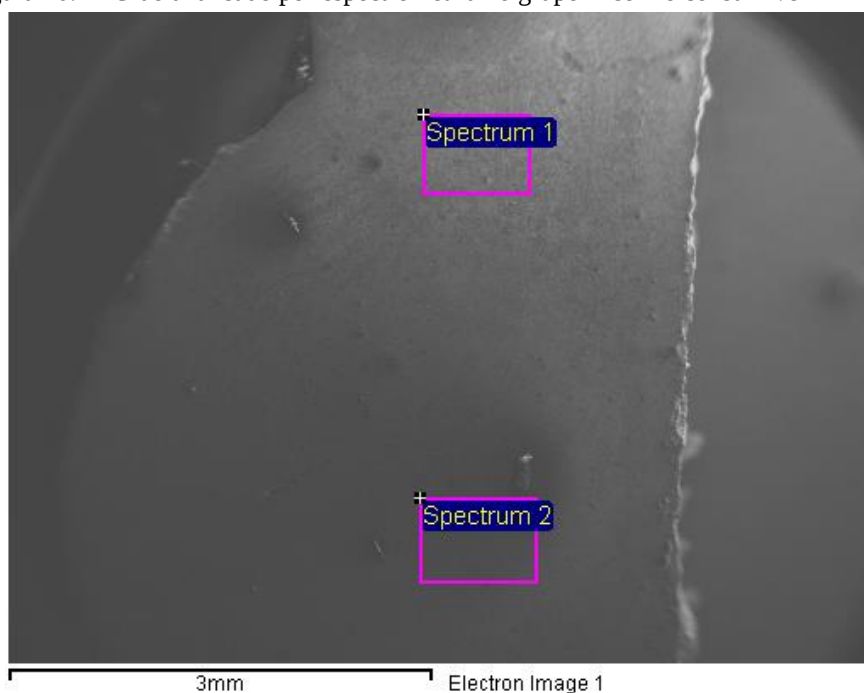
Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10.3 - Espectrometria no grão do grupo B (AWS ER70S-6) - Aumento 1000 x.

| <b>Espectro</b> | <b>In stats.</b> | <b>C</b> | <b>O</b> | <b>Al</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>Fe</b> | <b>Total</b> |
|-----------------|------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Espectro 1      | Sim              | 8.70     | 1.90     | 0.16      |           | 0.57      | 88.67     | 100.00       |
| Espectro 2      | Sim              | 8.44     | 2.51     | 0.12      | 0.46      | 0.92      | 87.56     | 100.00       |
| Max.            |                  | 8.70     | 2.51     | 0.16      | 0.46      | 0.92      | 88.67     |              |
| Min.            |                  | 8.44     | 1.90     | 0.12      | 0.46      | 0.57      | 87.56     |              |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.4 - Grão analisado por espectrometria no grupo B com o consumível ER70S-3



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10.4 - Espectrometria no grão do grupa B (AWS ER70S-3) - Aumento 1000 x

| Espectro   | In stats. | C     | Al   | Mn   | Fe    | Total  |
|------------|-----------|-------|------|------|-------|--------|
| Espectro 1 | Sim       | 5.53  | 0.05 | 0.75 | 93.67 | 100.00 |
| Espectro 2 | Sim       | 12.47 | 0.42 |      | 87.11 | 100.00 |
| Max.       |           | 12.47 | 0.42 | 0.75 | 93.67 |        |
| Min.       |           | 5.53  | 0.05 | 0.75 | 87.11 |        |

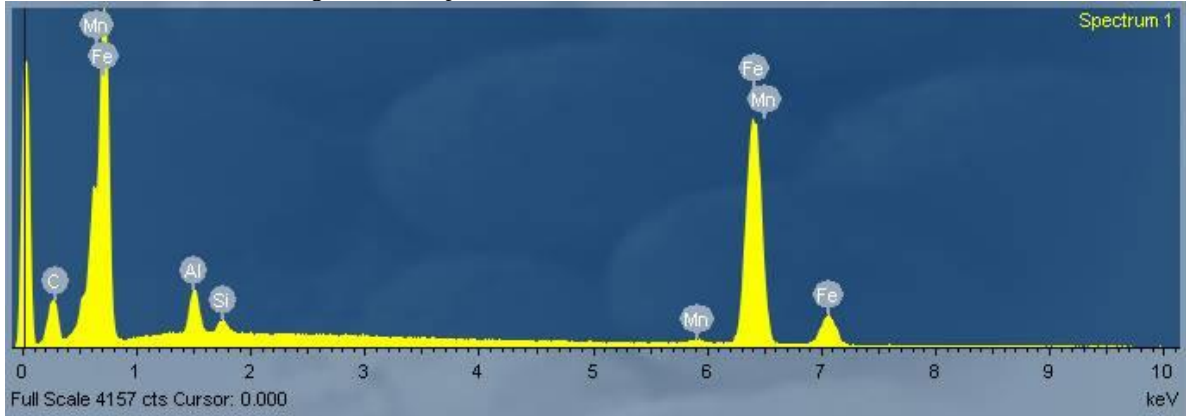
Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10.5 - Espectrometria do grão do consumível AWS ER70S-3

| Elemento | Aplicativo | Intensidade | Peso%  | Peso% | Atômico % |
|----------|------------|-------------|--------|-------|-----------|
|          | Conc.      | Corn.       |        | Sigma |           |
| C K      | 9.61       | 0.5429      | 11.63  | 0.36  | 36.95     |
| Al K     | 3.22       | 0.7162      | 2.96   | 0.08  | 4.18      |
| Si K     | 0.96       | 0.8188      | 0.77   | 0.06  | 1.04      |
| Mn K     | 1.52       | 0.9391      | 1.06   | 0.12  | 0.74      |
| Fe K     | 121.74     | 0.9568      | 83.58  | 0.37  | 57.09     |
| Total    |            |             | 100.00 |       |           |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.5 - Espectrometria do arame-eletrodo AWS ER70S-3



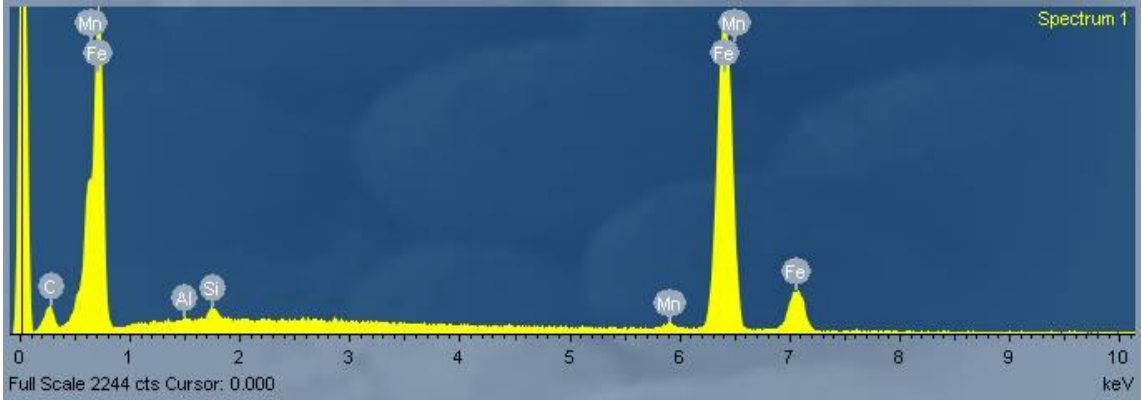
Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10.6 - Espectrometria do grão do consumível AWS ER70S-6

| Elemento | Aplicativo | Intensidade | Peso%  | Peso% | Atômico% |
|----------|------------|-------------|--------|-------|----------|
|          | Conc.      | Corrn.      |        | Sigma |          |
| C K      | 2.62       | 0.5389      | 4.76   | 0.35  | 18.76    |
| Al K     | 0.06       | 0.6884      | 0.08   | 0.06  | 0.14     |
| Si K     | 0.48       | 0.8151      | 0.58   | 0.06  | 0.97     |
| Mn K     | 1.22       | 0.9644      | 1.23   | 0.14  | 1.06     |
| Fe K     | 93.83      | 0.9833      | 93.35  | 0.37  | 79.06    |
| Total    |            |             | 100.00 |       |          |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.6 - Espectrometria do arame-eletrodo AWS ER70S-6

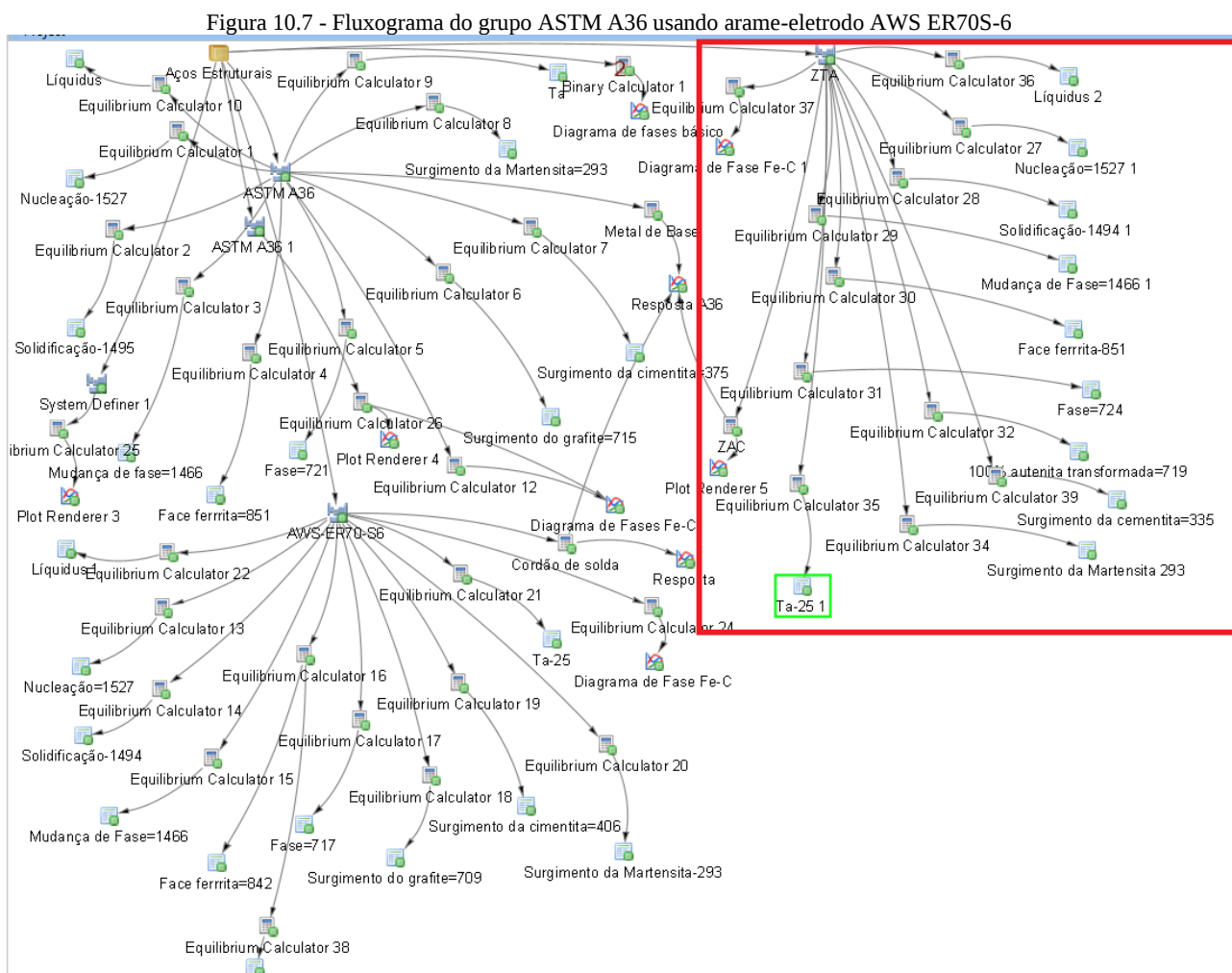


Fonte: Elaborada pelo autor

10.2 APÊNDICE B - TRANSFORMAÇÃO DE FASES

Temperatura de transformação acima dos 450 °C com o estabelecimento da martensita, aumentando a dureza local e a relação das propriedades mecânicas. A estrutura martensítica

tem relação LE/LR em torno de 0,8 a 0,99, a estrutura ferrítica fica na ordem de 0,5 a 0,7 e a austenítica em 0,3 a 0,4, como é apresentado no fluxograma da Figura 10.7.



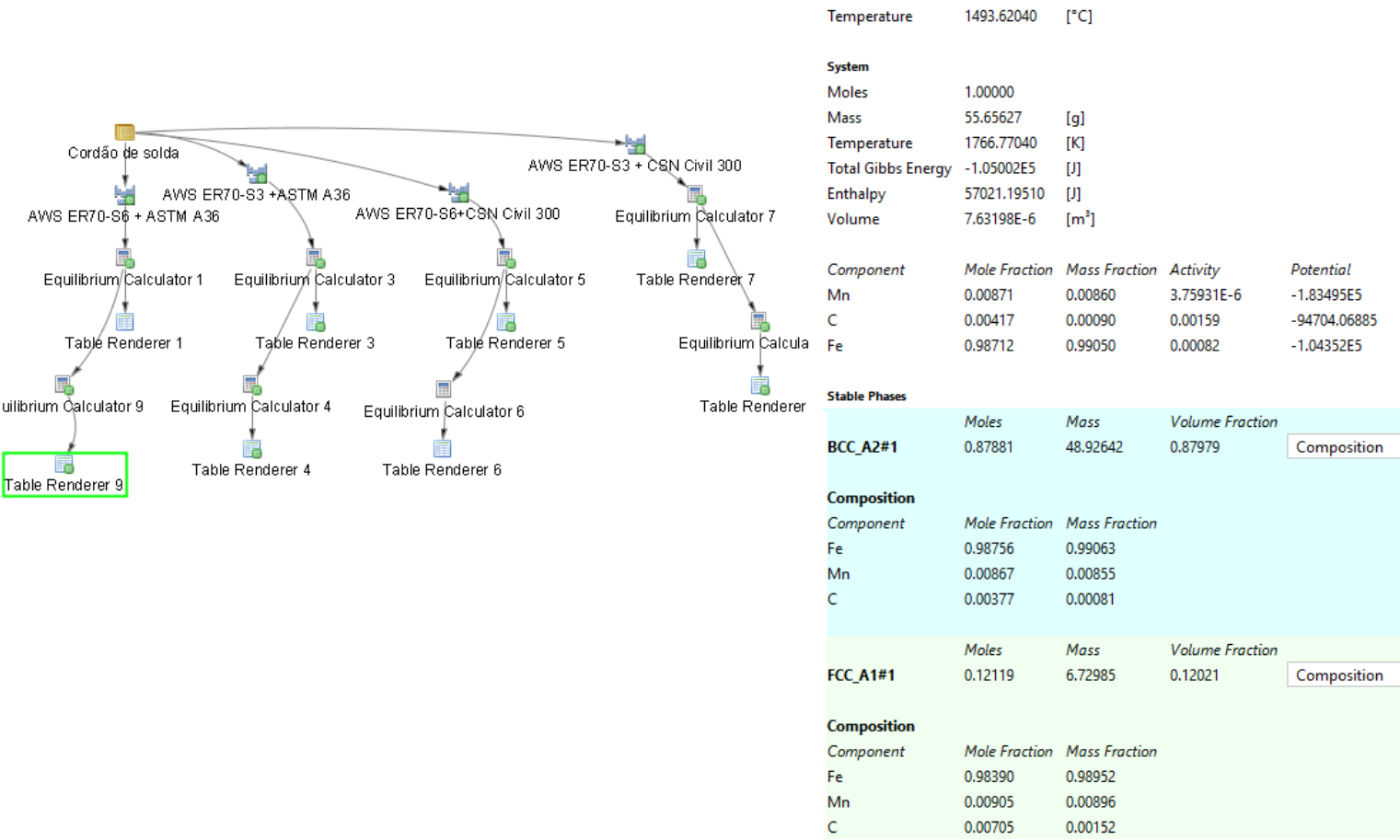
Fonte: Elaborada pelo autor

Apresentando a mesma relação de entalpia e alotropia, devido aos seus constituintes químicos. Quatro grupos foram formados: um para o aço ASTM A36, com o uso do arame-eletrodo AWS ER70-S6; outro com o mesmo aço, empregando o consumível AWS ER70-S6; um grupo com o aço CSN Civil 300, utilizando o consumível AWS ER70-S6, e, por fim, o grupo com esse aço mais o arame-eletrodo AWS ER70-S6.

O desvio-padrão dos valores em geral foi da ordem de 0,07%, obedecendo aos mesmos diagramas CCT.

A intensidade da coluna do arco elétrico sobre a superfície da área para atingir o ponto de fusão, que define o contorno da região de diluição dos elementos químicos, utilizando os arame-eletrodos AWS ER70-S6 e S3 com os respectivos aços ASTM A36 e CSN Civil 300, obtém a temperatura 1493°C, na qual não se terá mais metal líquido.

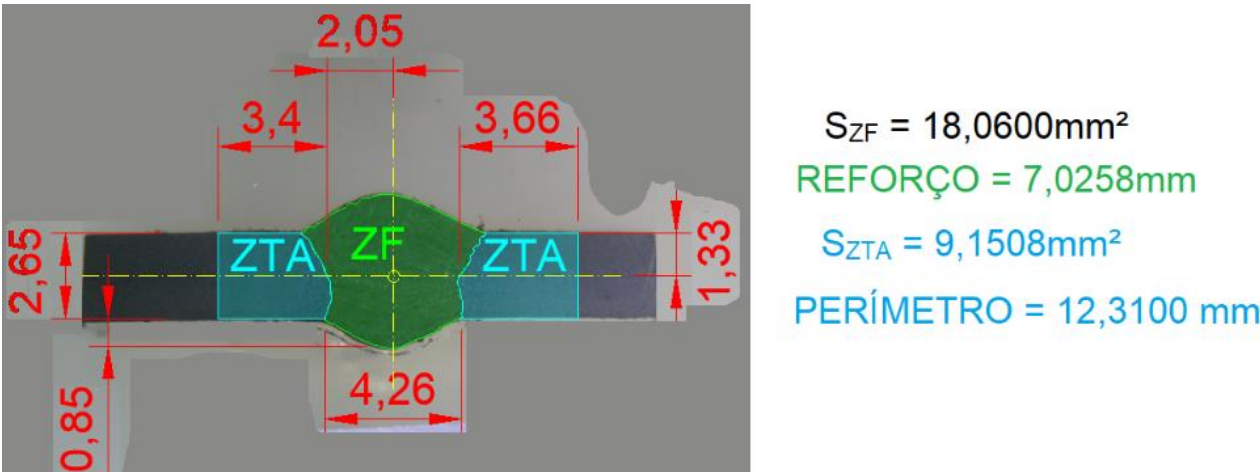
Figura 10.8 - Diluição dos elementos químicos no metal de solda



Utilizando os arame-eletrodos AWS ER70-S6 e S3 com os respectivos aços ASTM A36 e CSN Civil 300, obtendo a temperatura 1493 °C que não terá mais porção líquida de metal.  
Fonte: Elaborada pelo autor

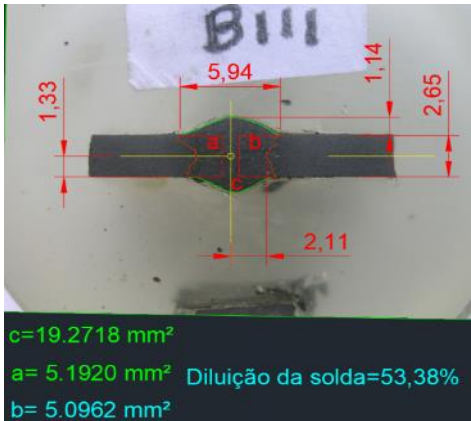
10.3 APÊNDICE C - MACROGRAFIAS DAS PEÇAS DE TESTE

Figura 10.9 - Macrografia do CP B222.



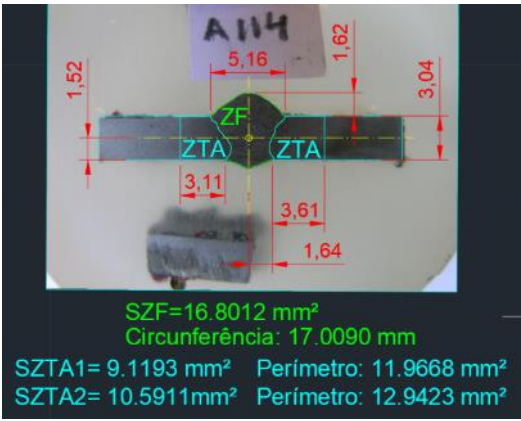
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.10 - Macrografia do CP B111



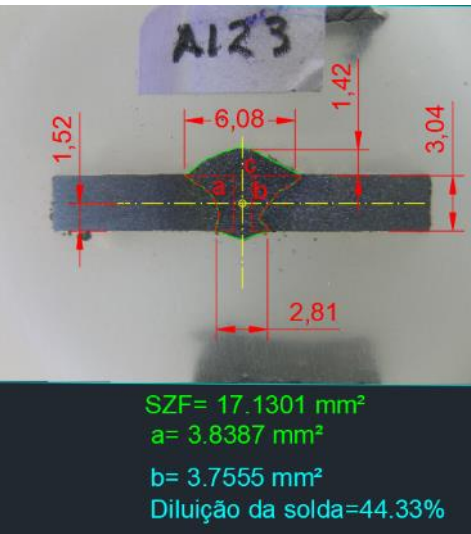
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.11 - Macrografia do CP A114.



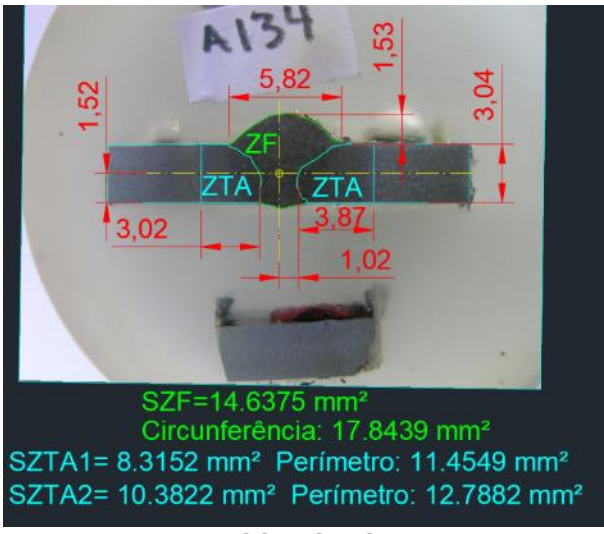
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.12 - Macrografia do CP A123.



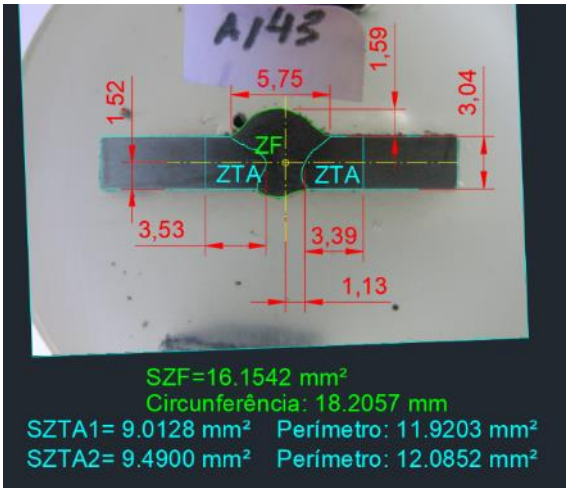
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.13 - Macrografia do CP A134.



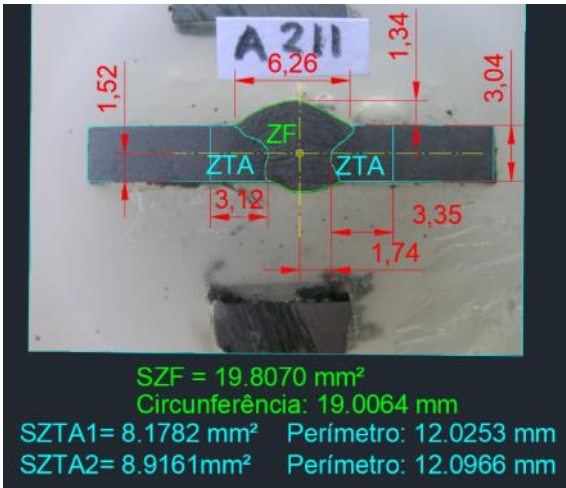
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.14 - Macrografia do CP A143.



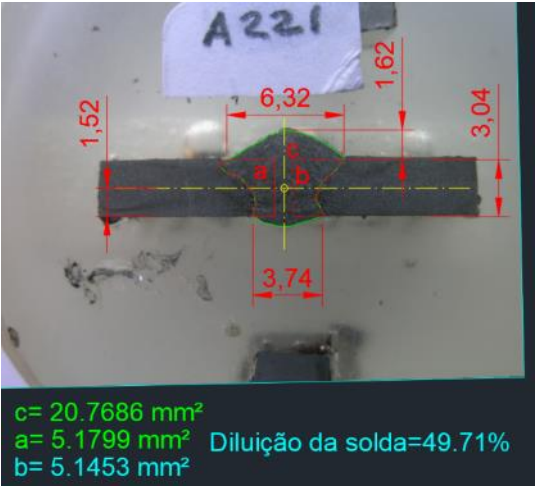
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.15 - Macrografia do CP A211.



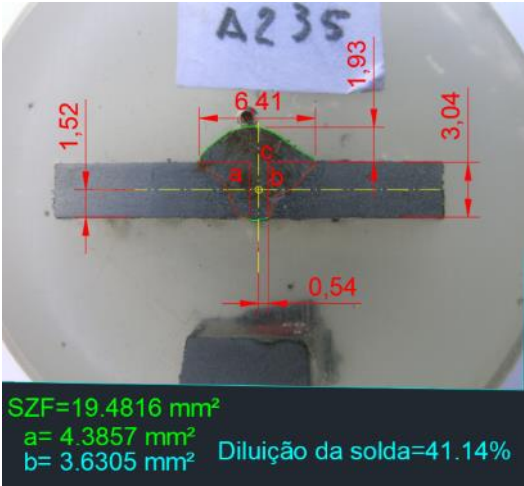
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.16 - Macrografia do CP A221.



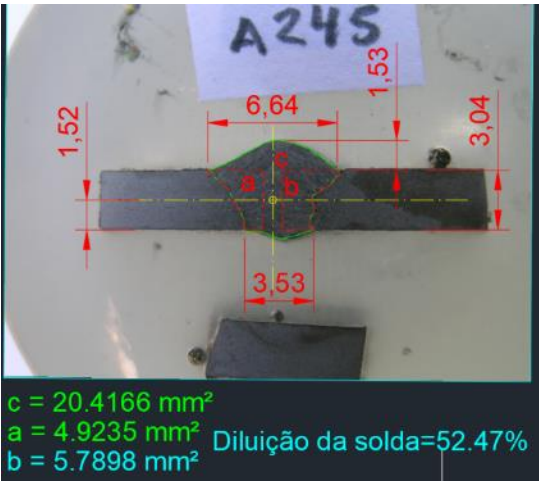
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.17 - Macrografia do CP A235.



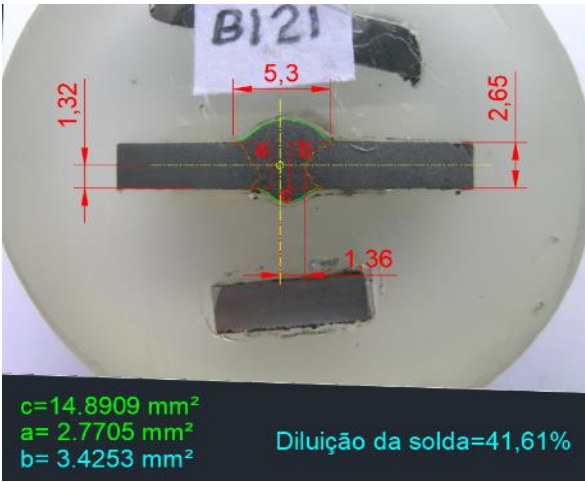
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.18 - Macrografia do CP A245.



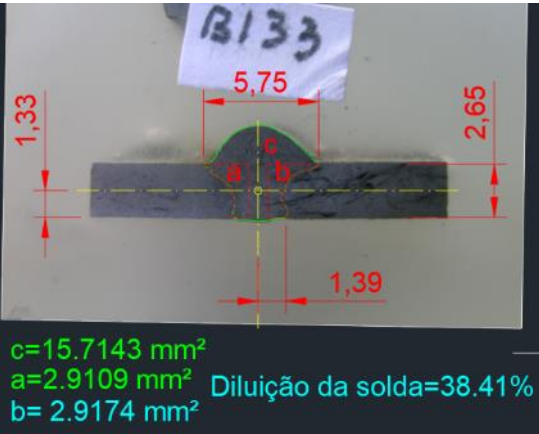
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.19 - Macrografia do CP B121.



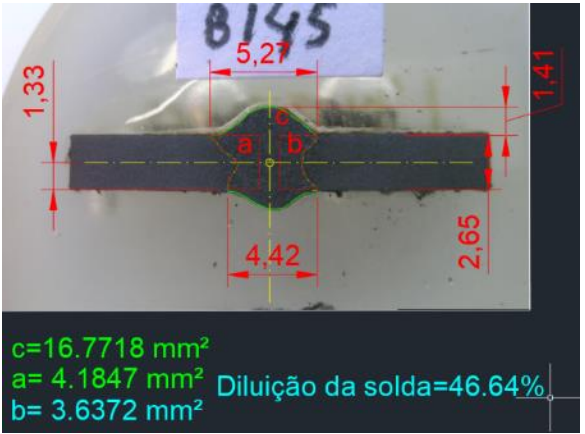
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.20 - Macrografia do CP B133.



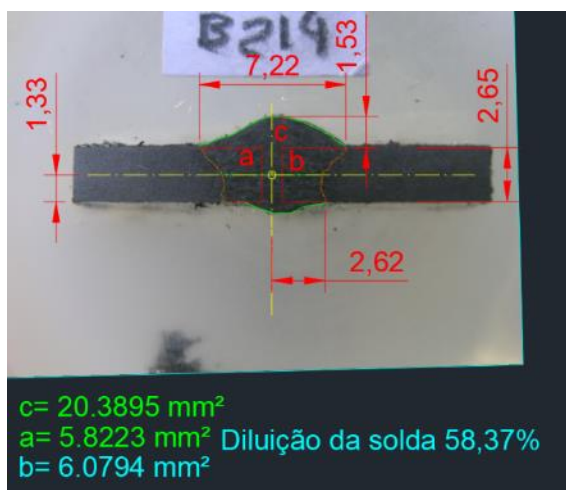
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.21 - Macrografia do CP B145.



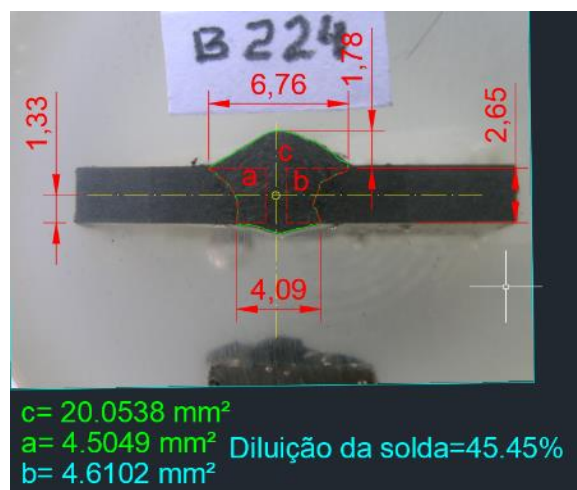
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.22 - Macrografia do CP B214.



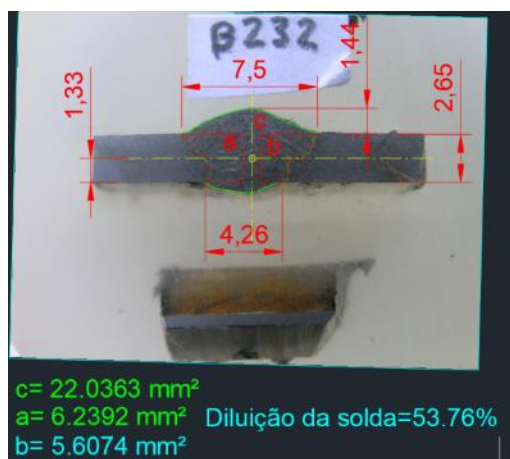
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.24 - Macrografia do CP B224.



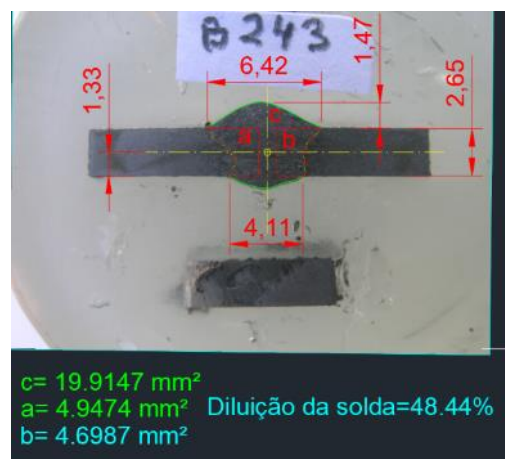
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.23 - Macrografia do CP B232.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.25 - Macrografia do CP B243.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.26 - Macrografia do CP B125.



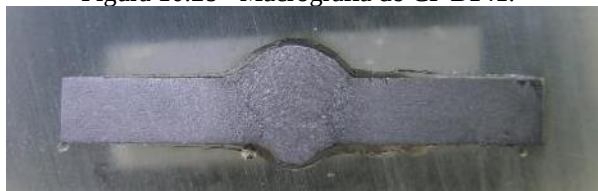
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.27 - Macrografia do CP A222.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.28 - Macrografia do CP B141.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.29 - Macrografia do CP B221.



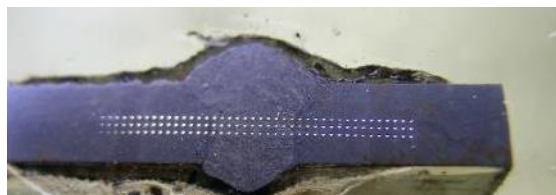
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.30 - Macrografia do CP B225.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.31 - Macrografia do CP B113.



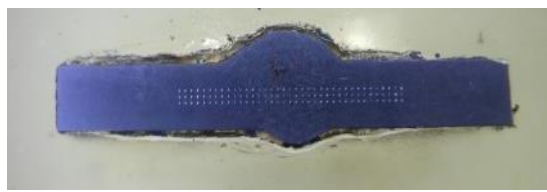
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.32 - Macrografia do CP B115.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.33 - Macrografia do CP B122.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.34 - Macrografia do CP B215.



Fonte: Elaborada pelo autor

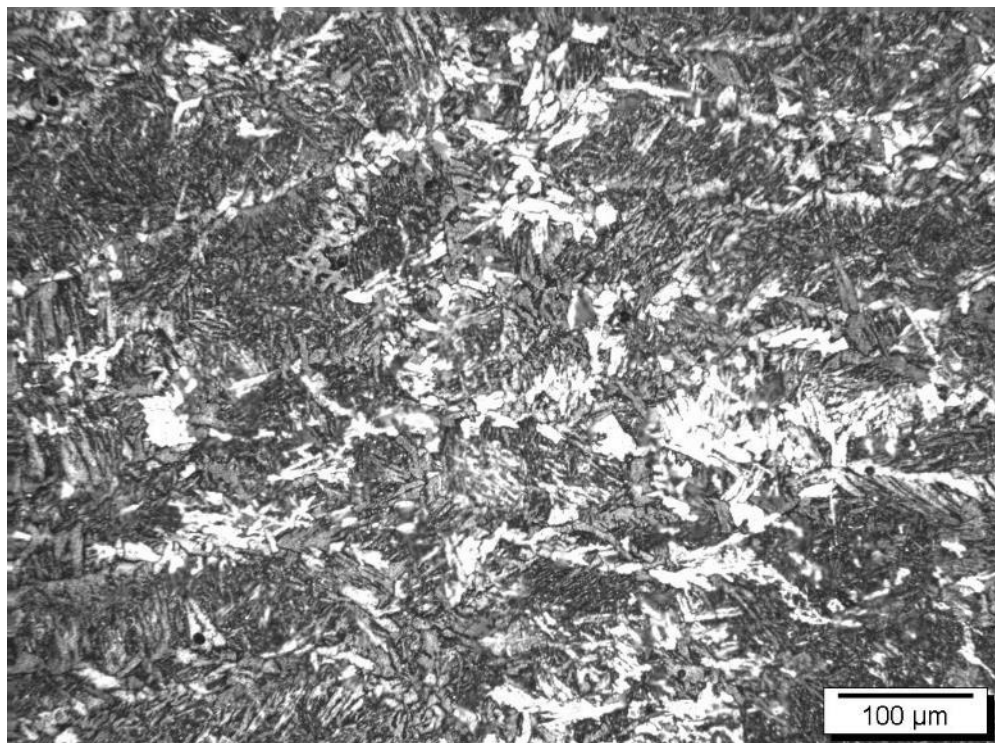
Figura 10.35 - Macrografia do CP B223.



Fonte: Elaborada pelo autor

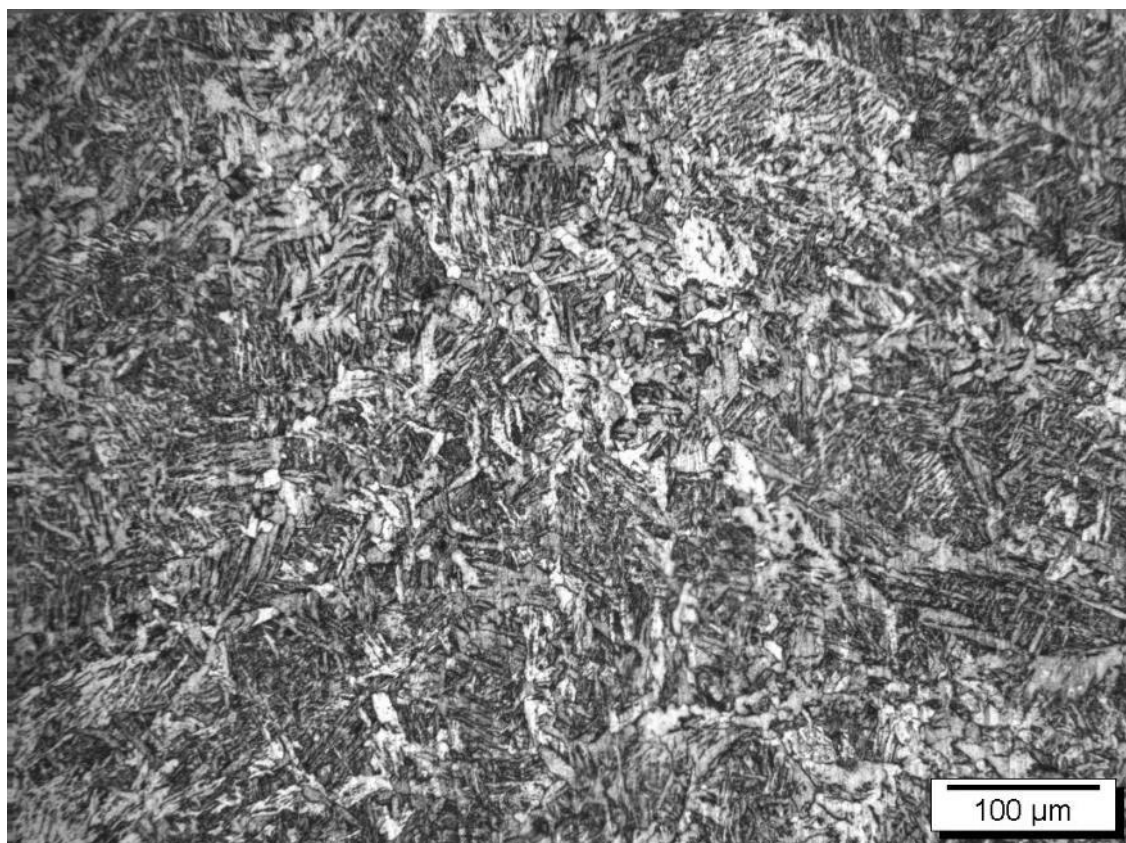
#### 10.4 APÊNDICE D - MICROGRAFIAS DAS PEÇAS DE TESTE

Figura 10.36 - Micrografia do CP A111 MS.



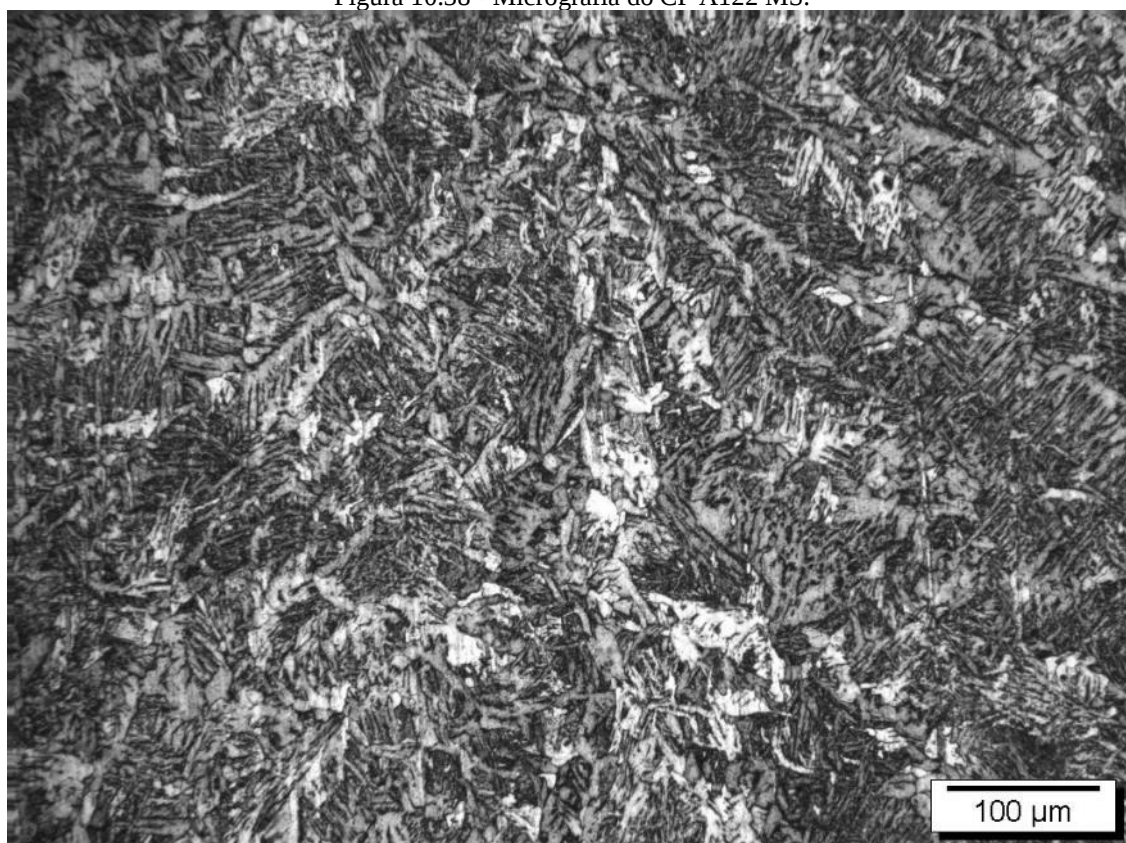
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.37 - Micrografia do CP A115 MS.



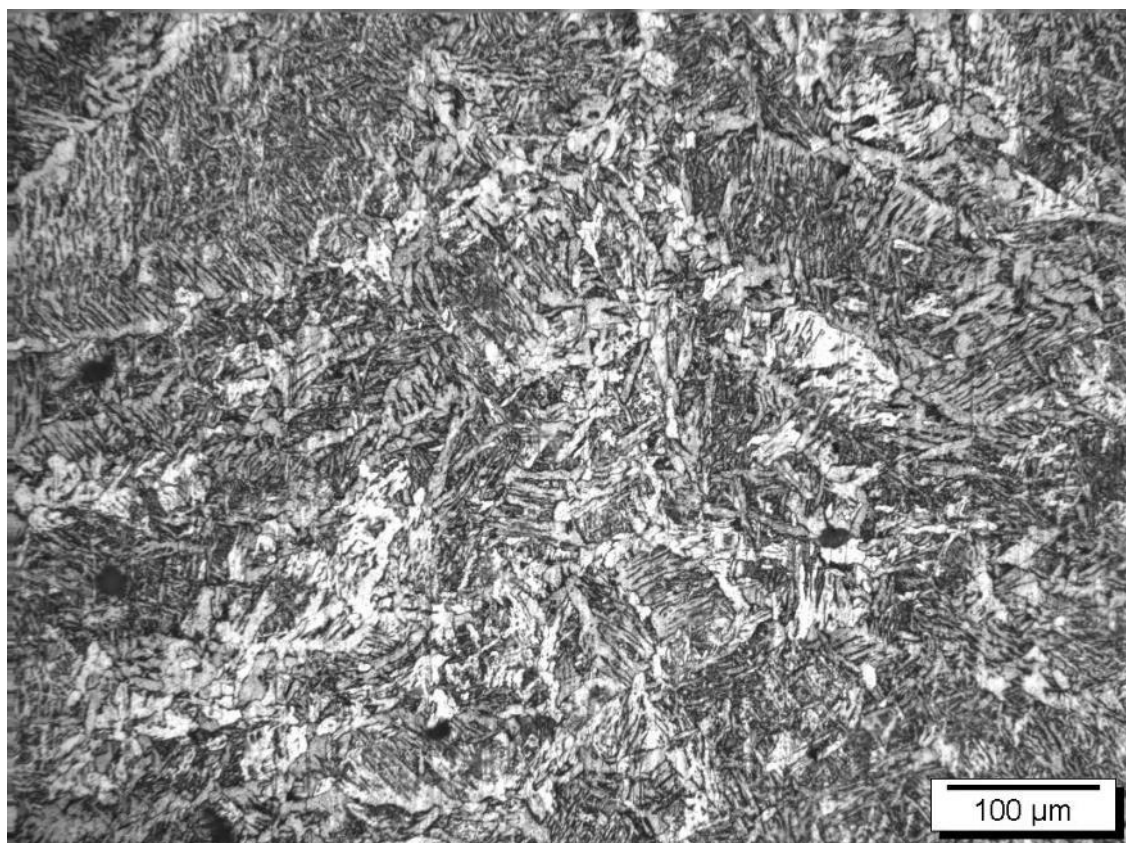
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10.38 - Micrografia do CP A122 MS.



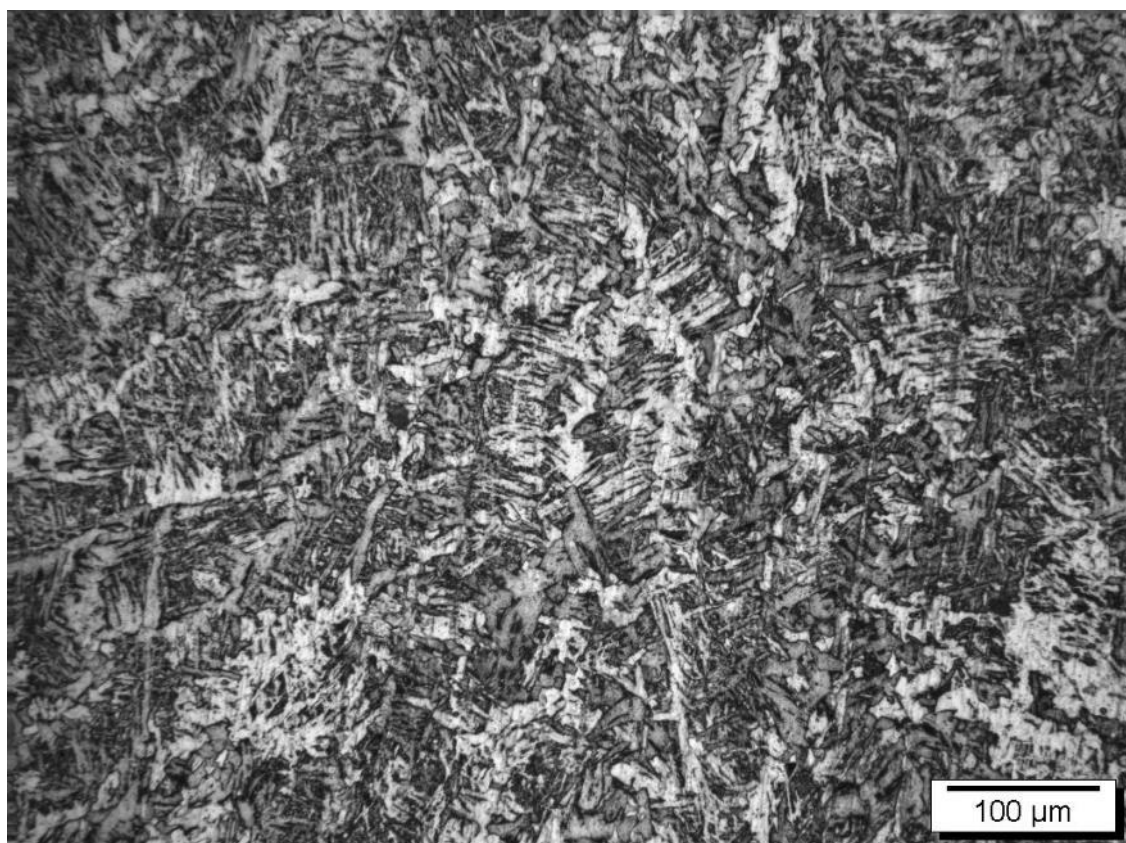
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10.39 - Micrografia do CP A131 MS



Fonte: Elaborada pelo autor

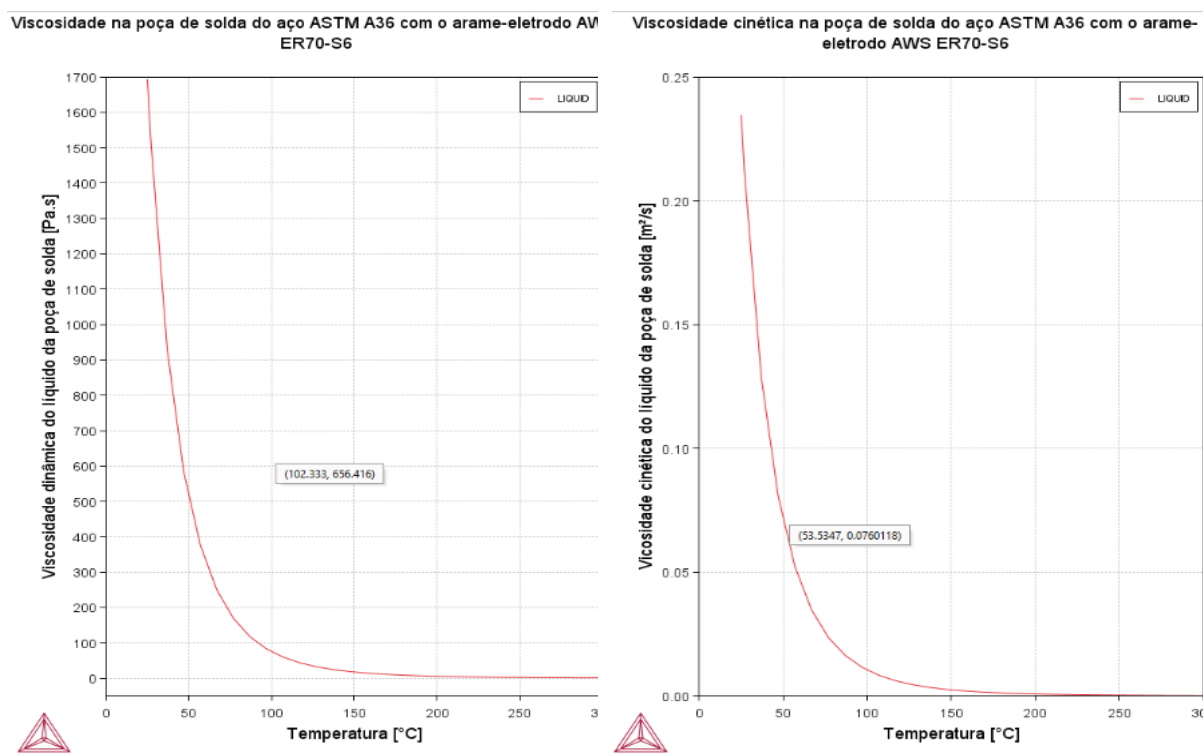
Figura 10.40 - Micrografia do CP A213 MS.



Fonte: Elaborada pelo autor

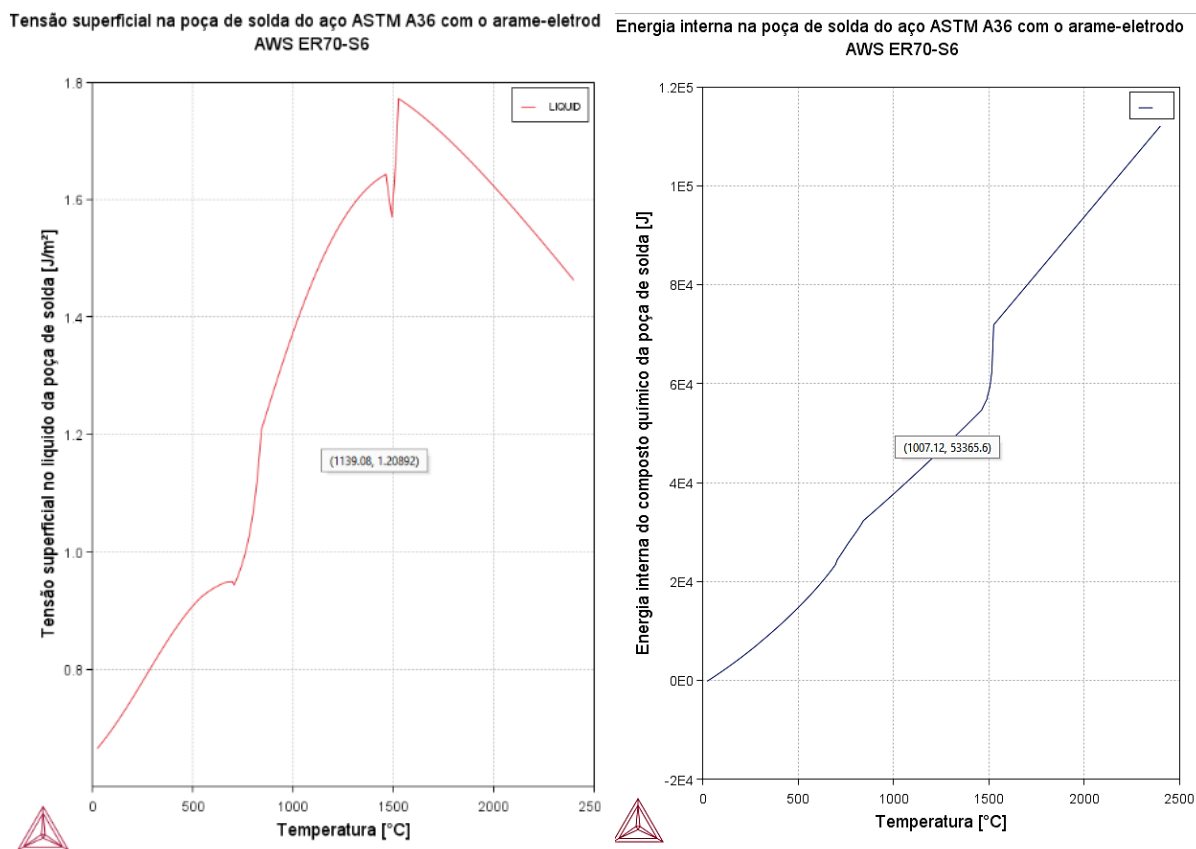
## 10.5 APÊNDICE E - GRÁFICOS DOS COEFICIENTES FÍSICOS

Figura 10.41 - Viscosidades da poça de fusão com aço ASTM A36 e AWS ER70S-6.



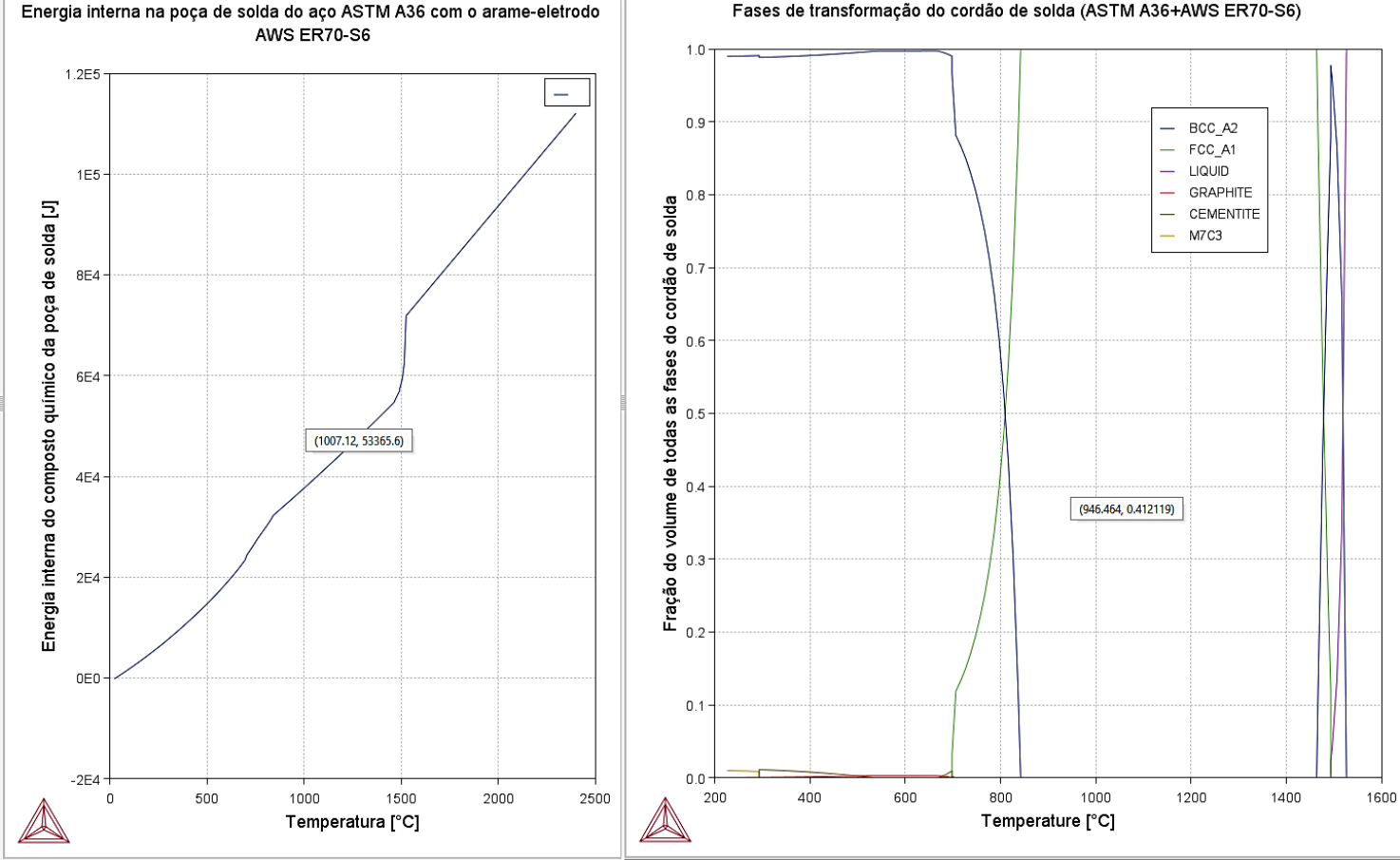
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10.42 - Tensão superficial e energia interna da poça ASTM A36 e AWS ER70S-6.



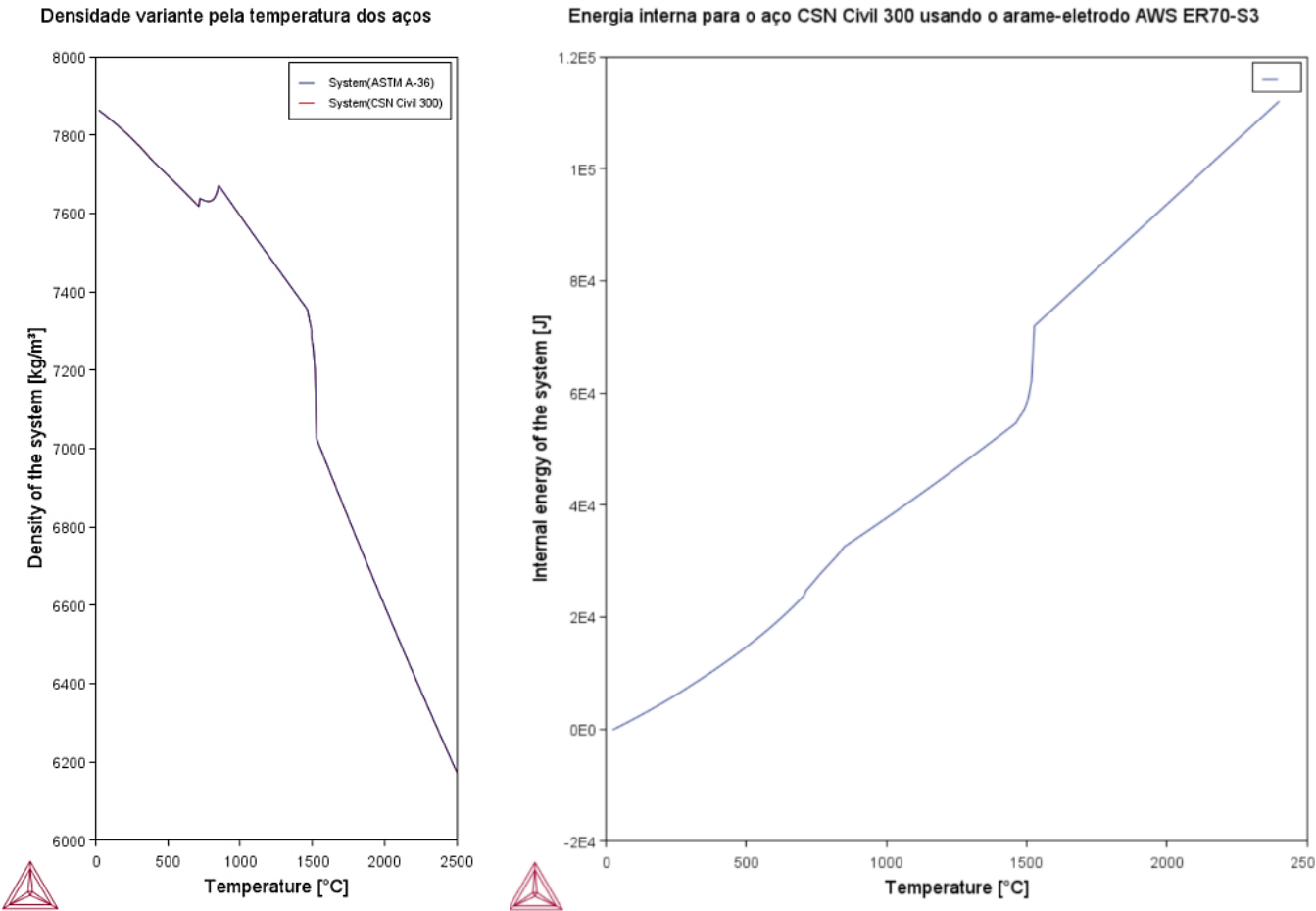
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10.43 - Energia interna e fração das fases da poça ASTM A36 e AWS ER70S-6.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.44 - Densidade e energia interna da poça no aço CSN Civil 300 e AWS ER70S-3.



10.6 APÊNDICE F - DISTORÇÃO NAS PEÇAS DE TESTE

Figura 10.45 - Disposição dos pontos principais de deslocamentos da Peça de teste.

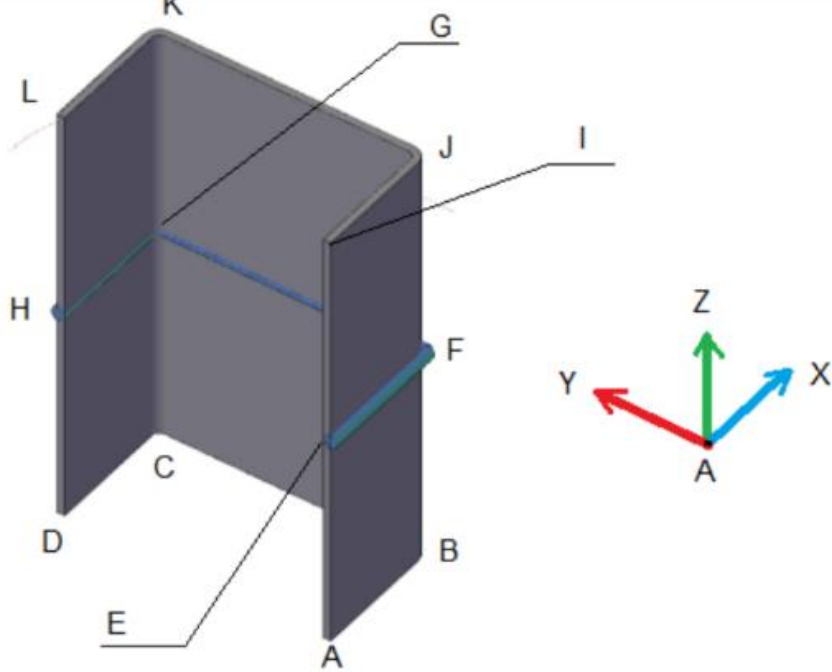


Tabela 10.7 - Deslocamentos pontuais devido a distorção

| PEÇA<br>TESTE | DESLOCAMENTOS (mm) |      |   |   |   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
|---------------|--------------------|------|---|---|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
|               | A                  |      | B | C |   | D |      | E    |      | F    | G    |      | H    |      | I    |      | J    | K    |      | L |
|               | X                  | X    | X | Y | X | Y | X    | X    | X    | X    | Y    | X    | Y    | X    | X    | X    | Y    | X    | Y    |   |
| A111          | 0,15               | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,20 | 0    | 0,20 | 0,57 | 0,57 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A112          | 0,15               | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,25 | 0    | 0,25 | 0,57 | 0,57 | 0    | 0,46 | 0    | 0,46 |   |
| A113          | 0,21               | 0,21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,06 | 0    | 0,06 | 0,35 | 0,35 | 0    | 0,12 | 0    | 0,12 |   |
| A114          | 0,12               | 0,12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,32 | 0    | 0,32 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A115          | 0,23               | 0,23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,13 | 0,13 | 0    | 0,13 | 0    | 0,13 | 0,01 | 0,01 | 0    | 0,25 | 0    | 0,25 |      |   |
| A121          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,43 | 0,43 | 0    | 0,04 | 0    | 0,04 | 0,86 | 0,86 | 0    | 0,08 | 0    | 0,08 |      |   |
| A122          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A123          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A124          | 0,61               | 0,61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,05 | 0    | 0,05 | 0,57 | 0,57 | 0    | 0,10 | 0    | 0,10 |      |   |
| A125          | 0,68               | 0,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,05 | 0    | 0,05 | 0,98 | 0,98 | 0    | 0,10 | 0    | 0,10 |      |   |
| A131          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A132          | 0,67               | 0,67 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,31 | 0    | 0,31 | 0,89 | 0,89 | 0    | 0,62 | 0    | 0,62 |      |   |
| A133          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0,19 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A134          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A135          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A141          | 0,79               | 0,79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,11 | 0    | 0,11 | 0,62 | 0,62 | 0    | 0,22 | 0    | 0,22 |      |   |
| A142          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A143          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A144          | 0,21               | 0,21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,05 | 0    | 0,05 | 0,59 | 0,59 | 0    | 0,10 | 0    | 0,10 |      |   |
| A145          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A211          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A212          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 0,08 | 0    | 0,46 | 0    | 0,46 | 0,67 | 0,67 | 0,45 | 0,92 | 0,45 | 0,92 |      |   |
| A213          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A214          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A215          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | 0,05 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1,16 | 1,16 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A221          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A222          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A223          | 0,77               | 0,77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,41 | 0    | 0,41 | 0    | 0    | 0,12 | 0,81 | 0    | 0,81 |      |   |
| A224          | 0,93               | 0,93 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,46 | 0,11 | 0,46 | 0    | 0    | 0,57 | 0,93 | 0    | 0,93 |      |   |
| A225          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A231          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A232          | 0,33               | 0,33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0,37 | 0    | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0    | 0,58 | 0    | 0,58 |      |   |
| A233          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A234          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A235          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| A241          | 0                  | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |   |

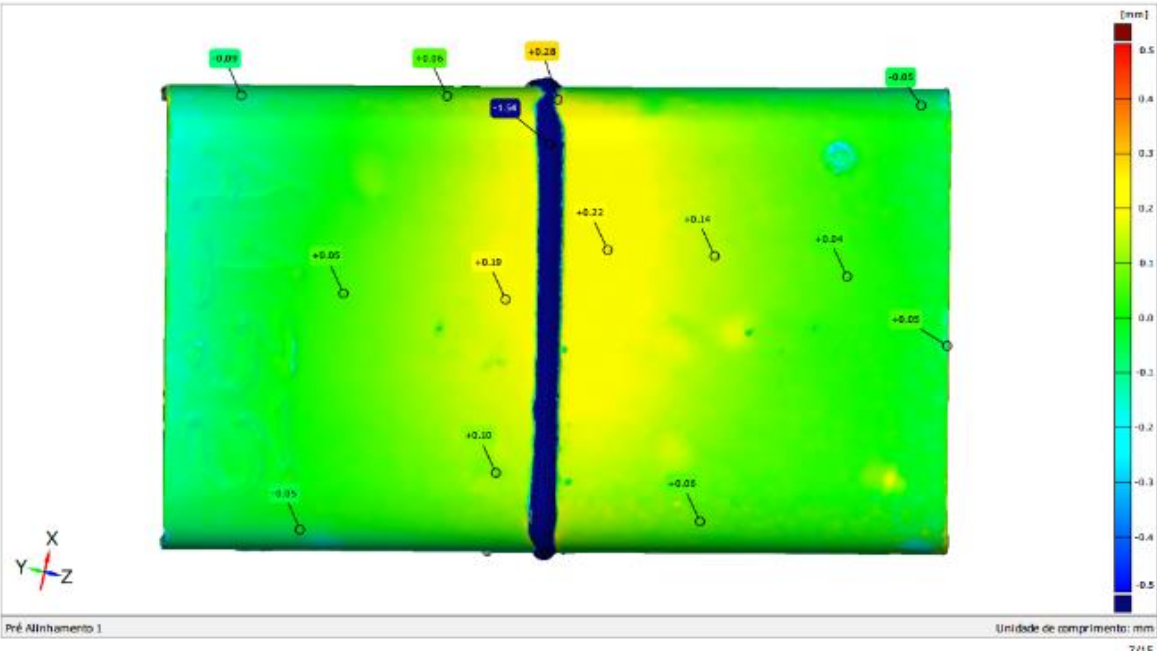


|      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |      |   |      |      |      |   |      |   |      |
|------|------|------|---|---|---|---|---|---|---|------|---|------|------|------|---|------|---|------|
| B242 | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0 | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    | 0 | 0    |
| B243 | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0    | 0 | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    | 0 | 0    |
| B244 | 0,42 | 0,42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,22 | 0 | 0,22 | 0,47 | 0,47 | 0 | 0,44 | 0 | 0,44 |
| B245 | 0,35 | 0,35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,30 | 0 | 0,30 | 0,50 | 0,50 | 0 | 0,60 | 0 | 0,60 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.46 - Distorção da Peça de teste A133.

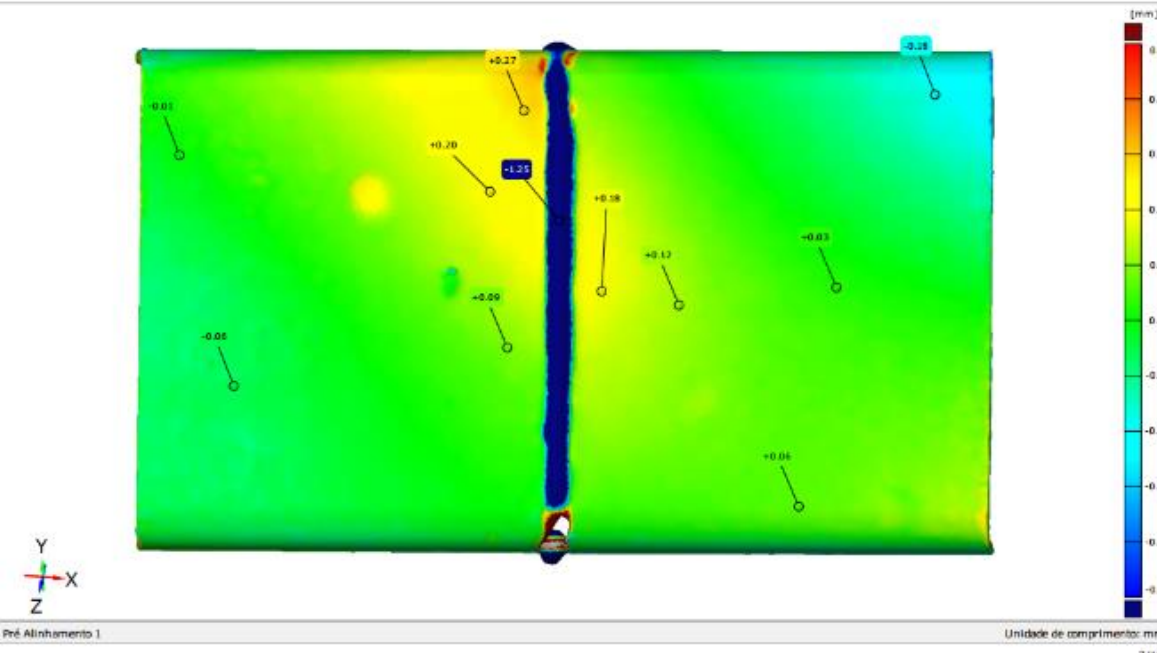
Vista Superior A133



Fonte: Elaborada pelo autor

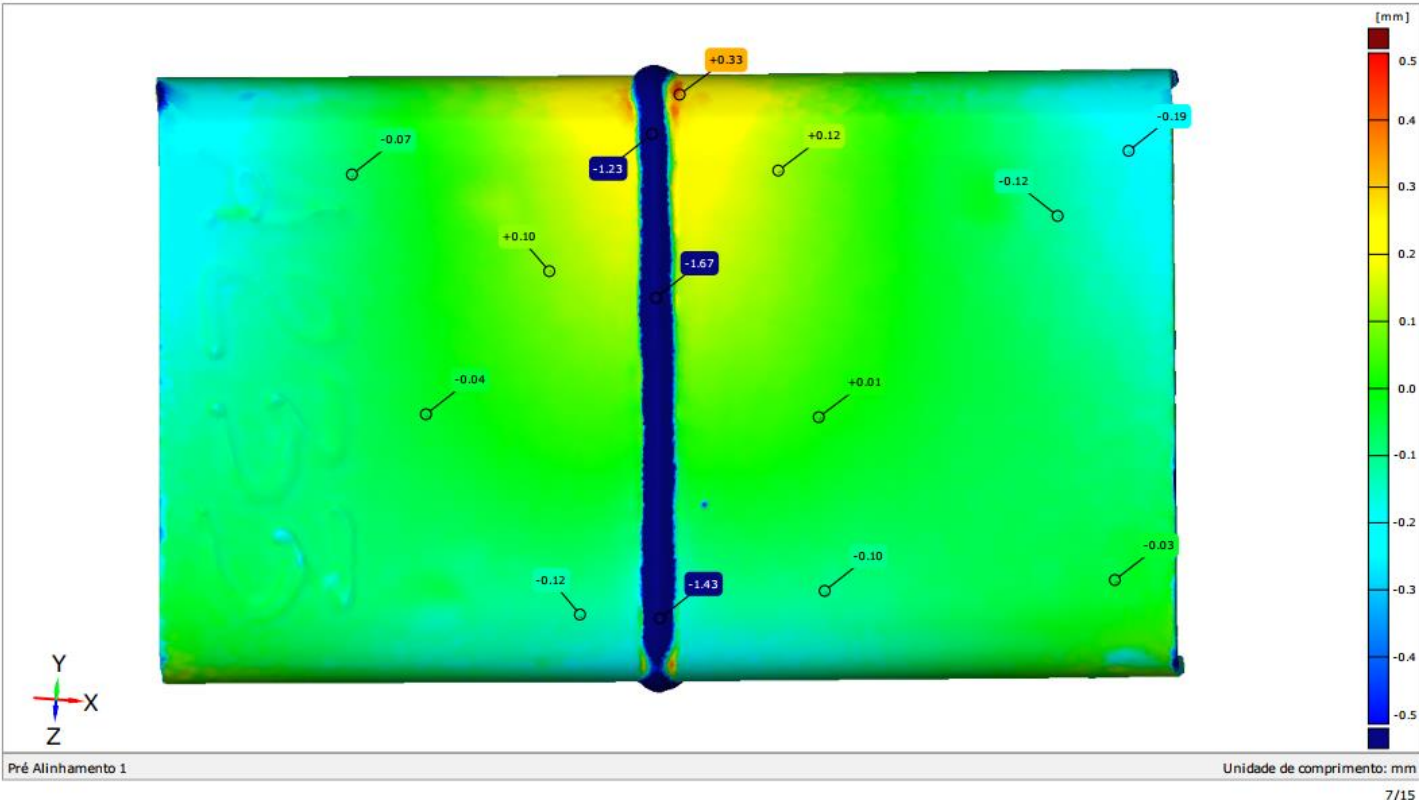
Figura 10.47 - Distorção da Peça de teste B133.

Vista Superior B133



Fonte: Elaborada pelo autor

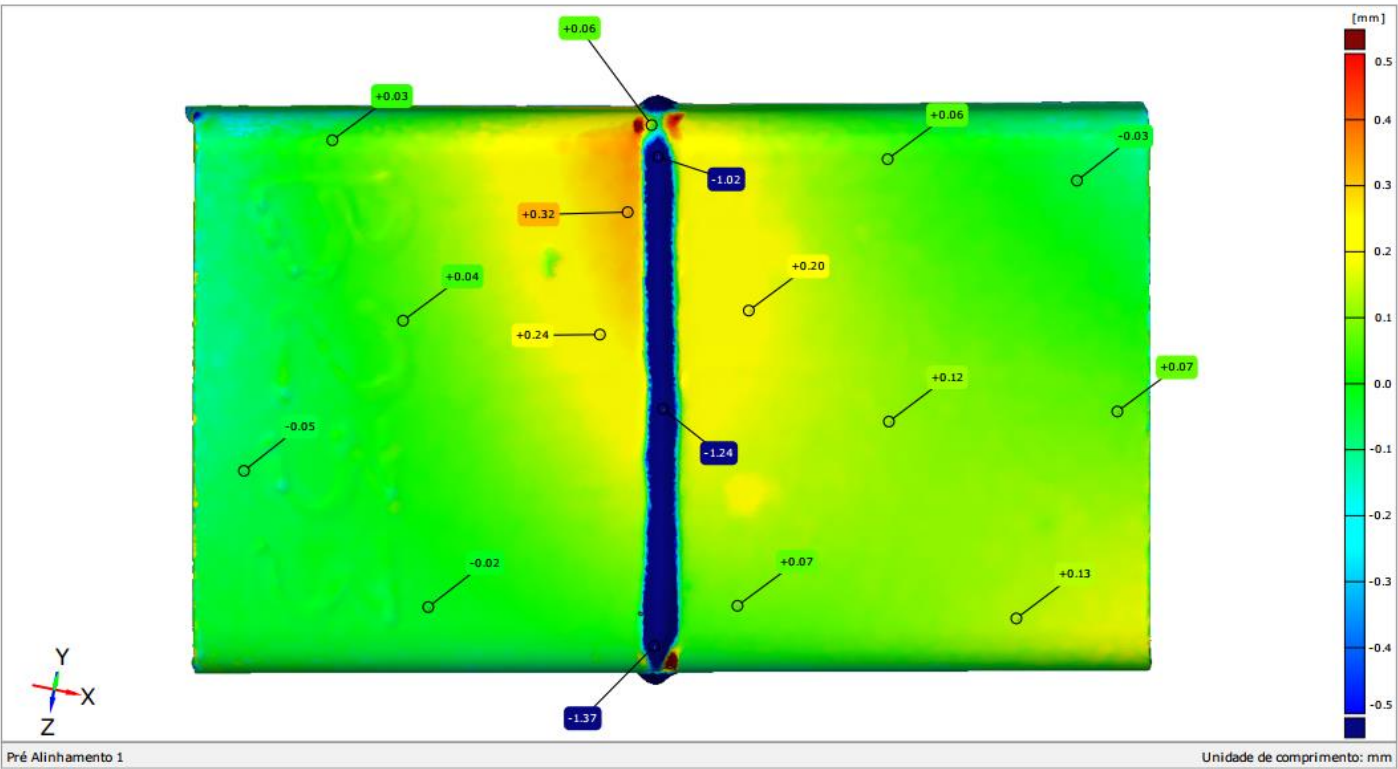
Figura 10.48 - Distorção da Peça de teste A233.



Fonte: Elaborada pelo autor

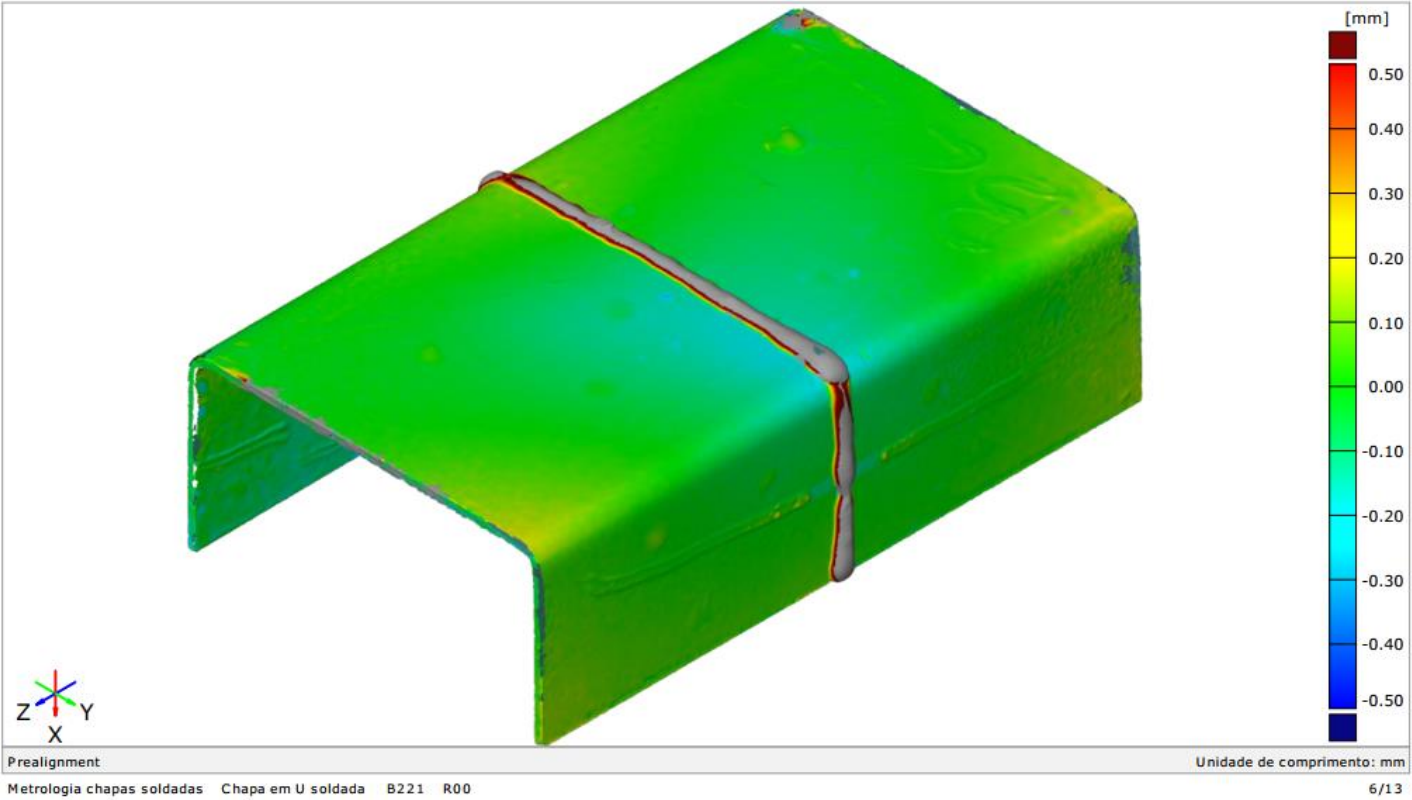
Figura 10.49 - Distorção da Peça de teste B233.

Vista Superior B233



Fonte: Elaborada pelo autor

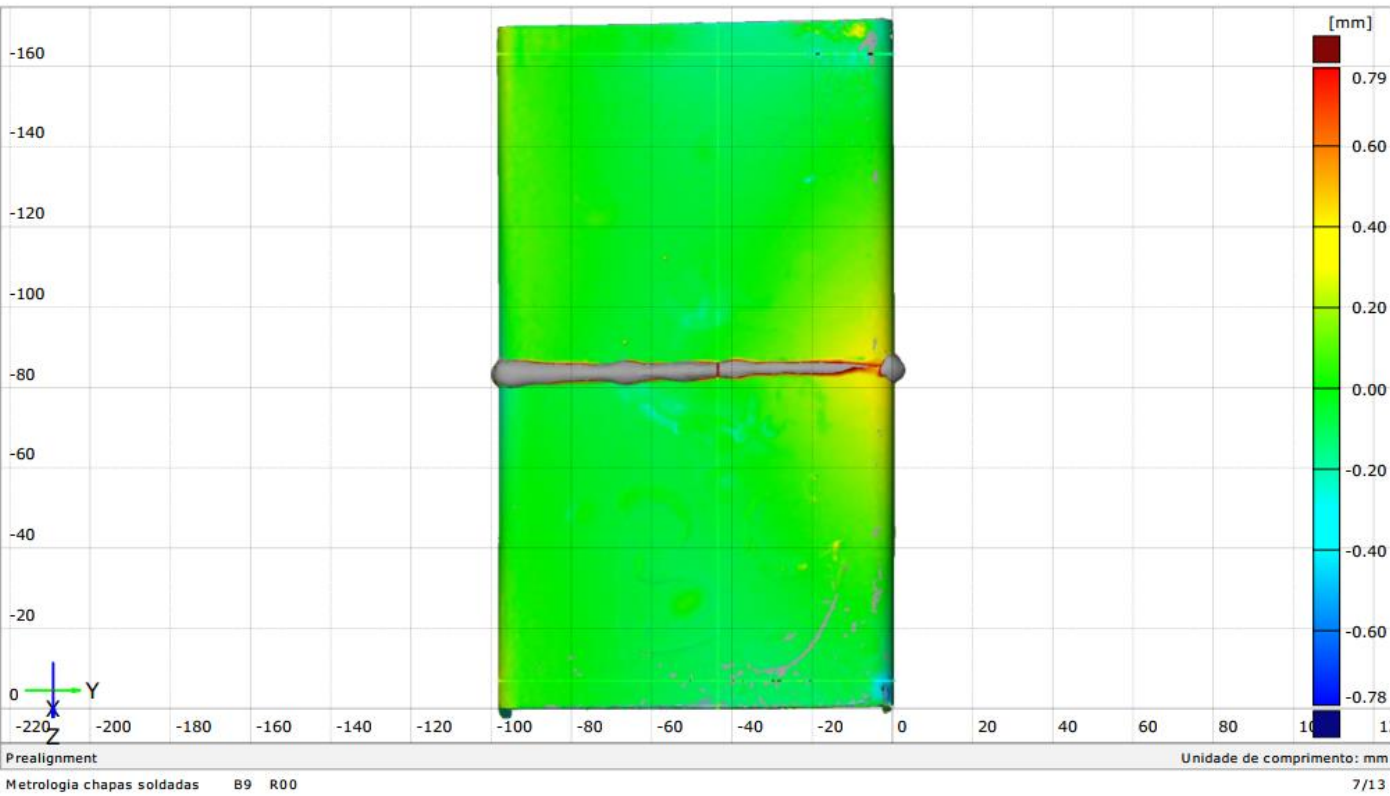
Figura 10.50 - Distorção da Peça de teste B221.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.51 - Distorção da Peça de teste B241.

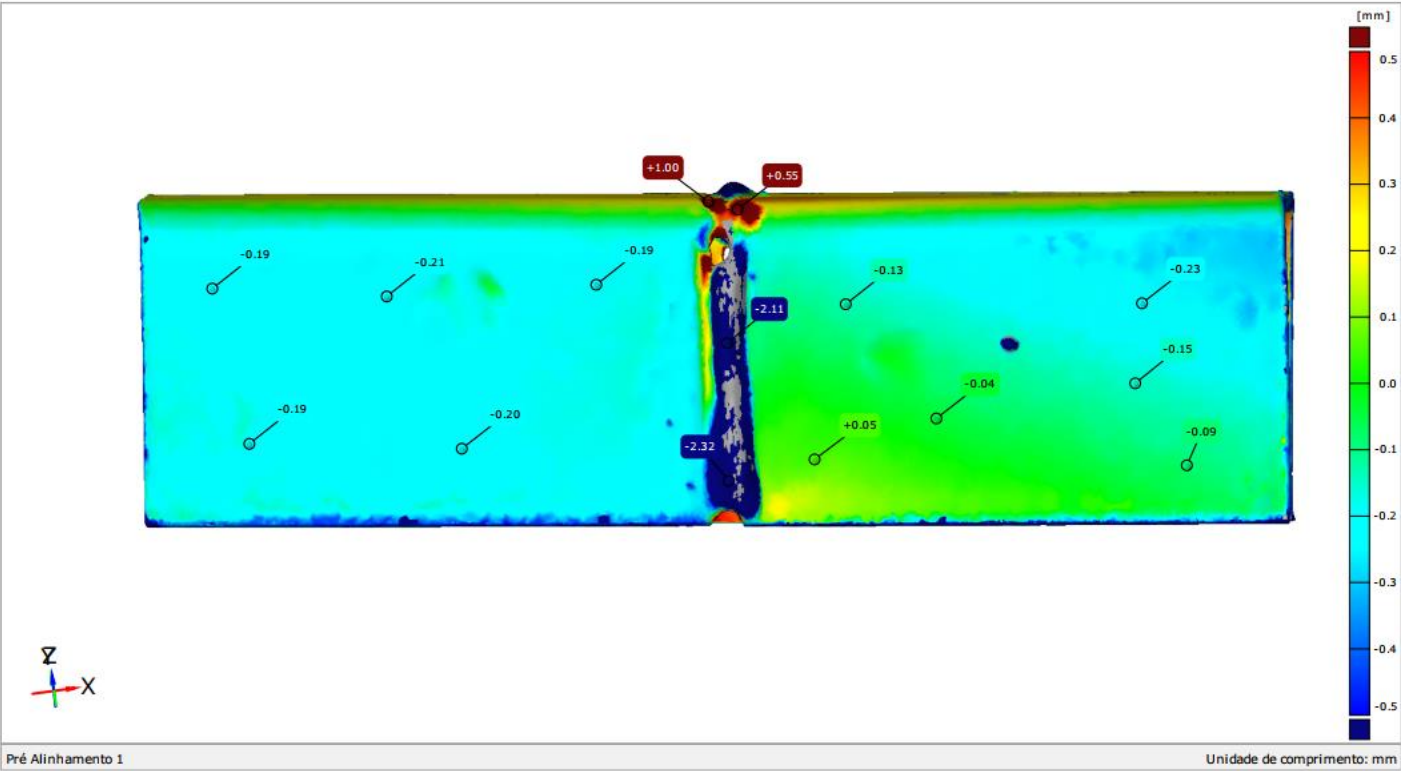
Vista superior



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.52 - Distorção da Peça de teste B343.

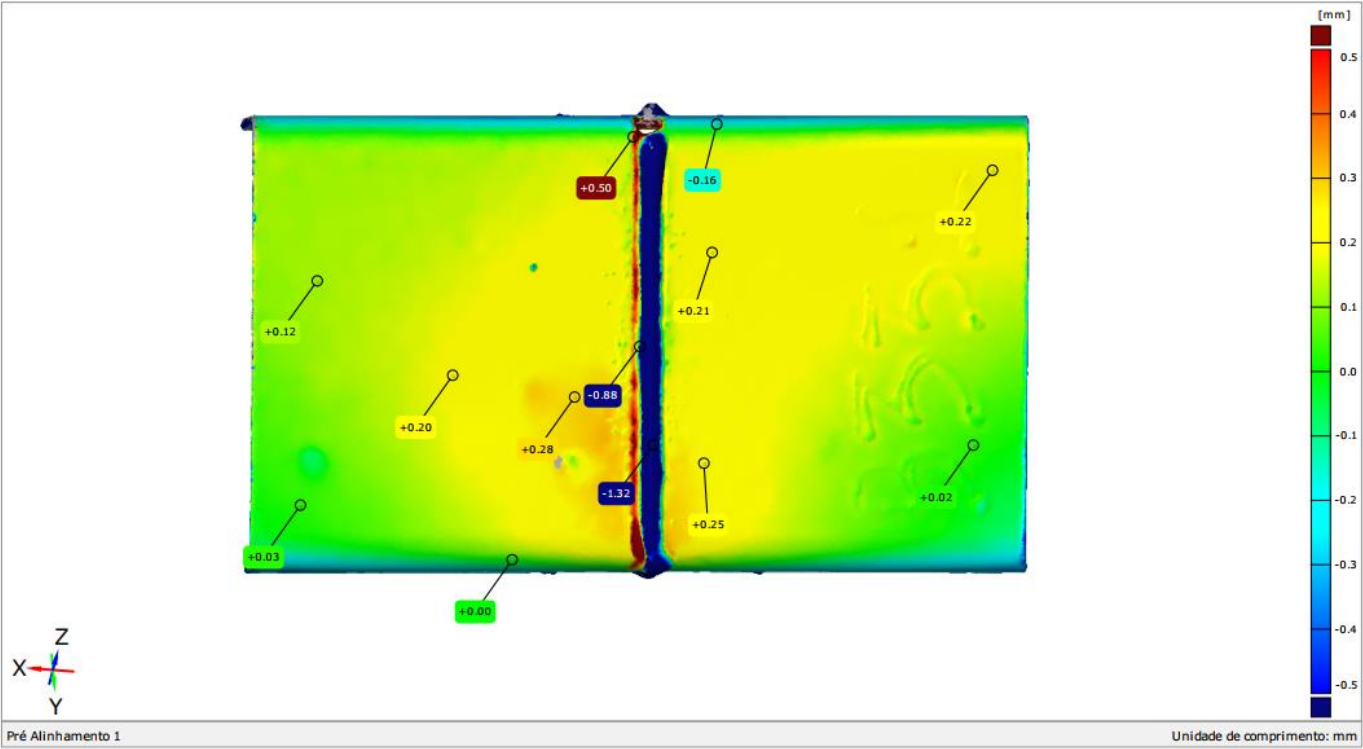
Vista lateral esquerda B343



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.53 - Distorção da Peça de teste B331.

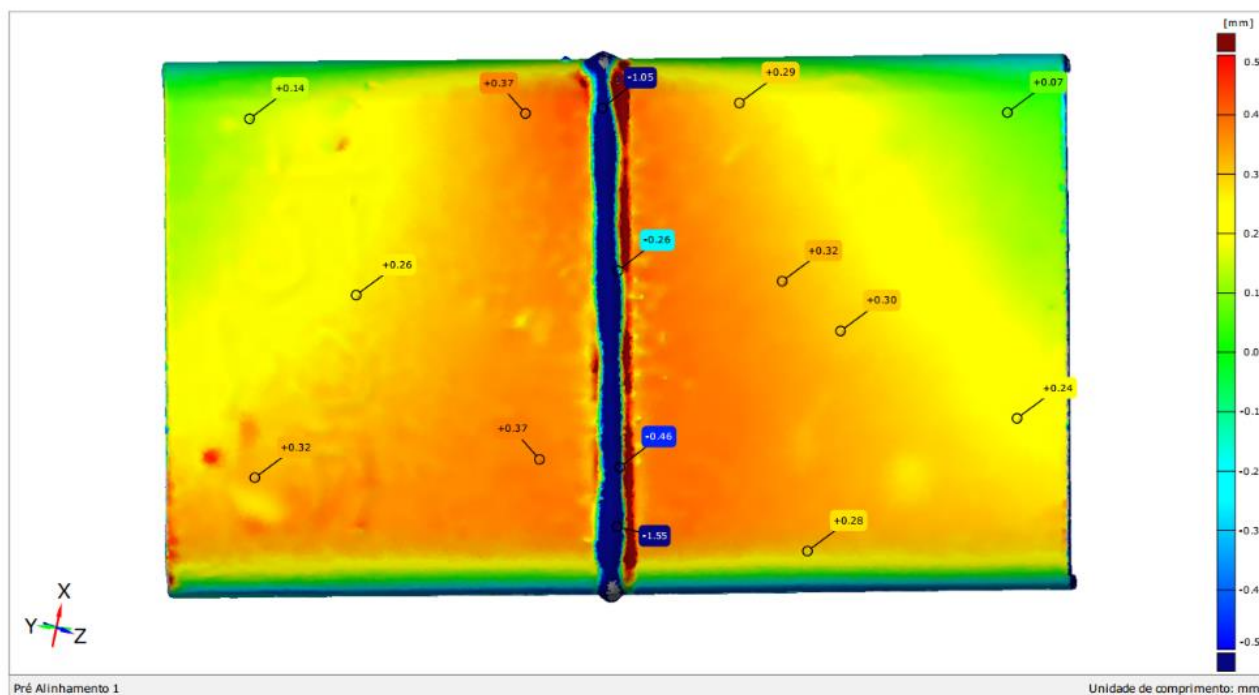
Vista superior B331



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.54 - Distorção da Peça de teste A325.

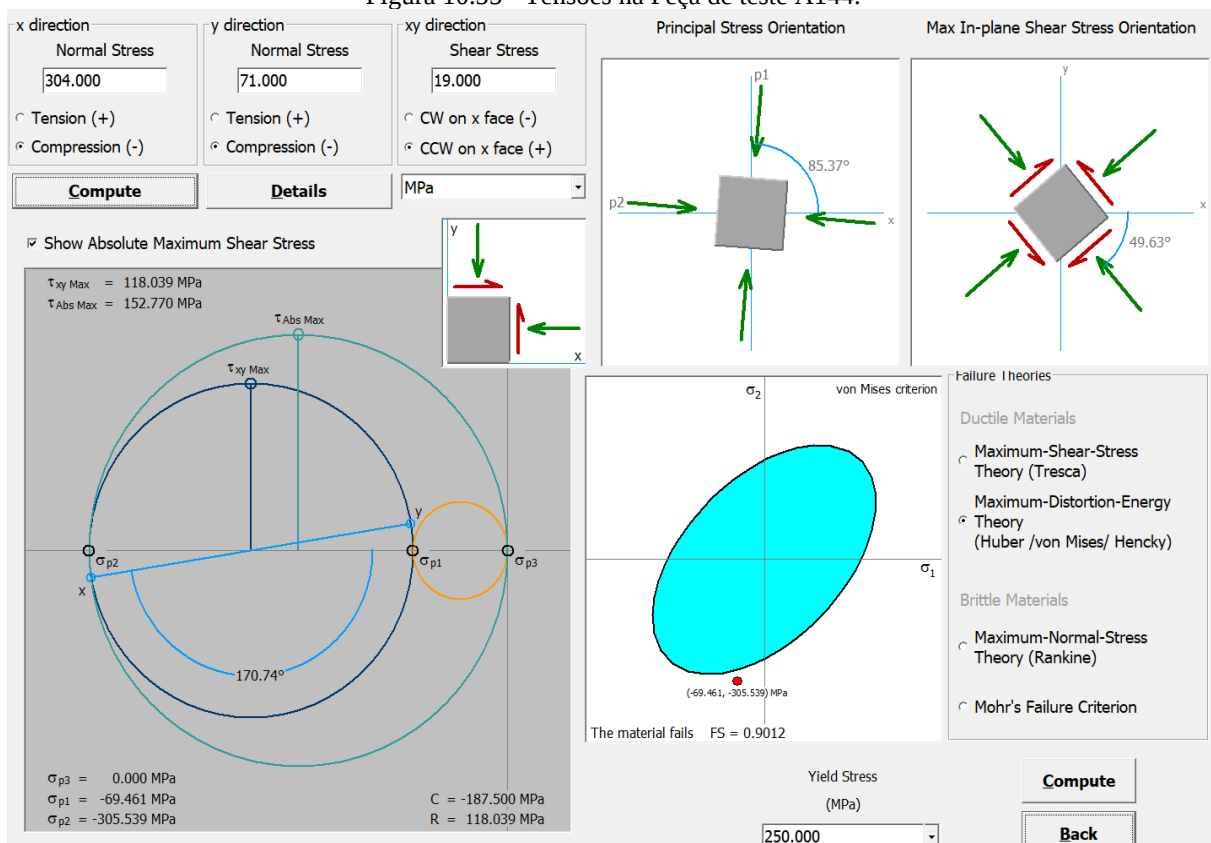
Vista superior A325



Fonte: Elaborada pelo autor

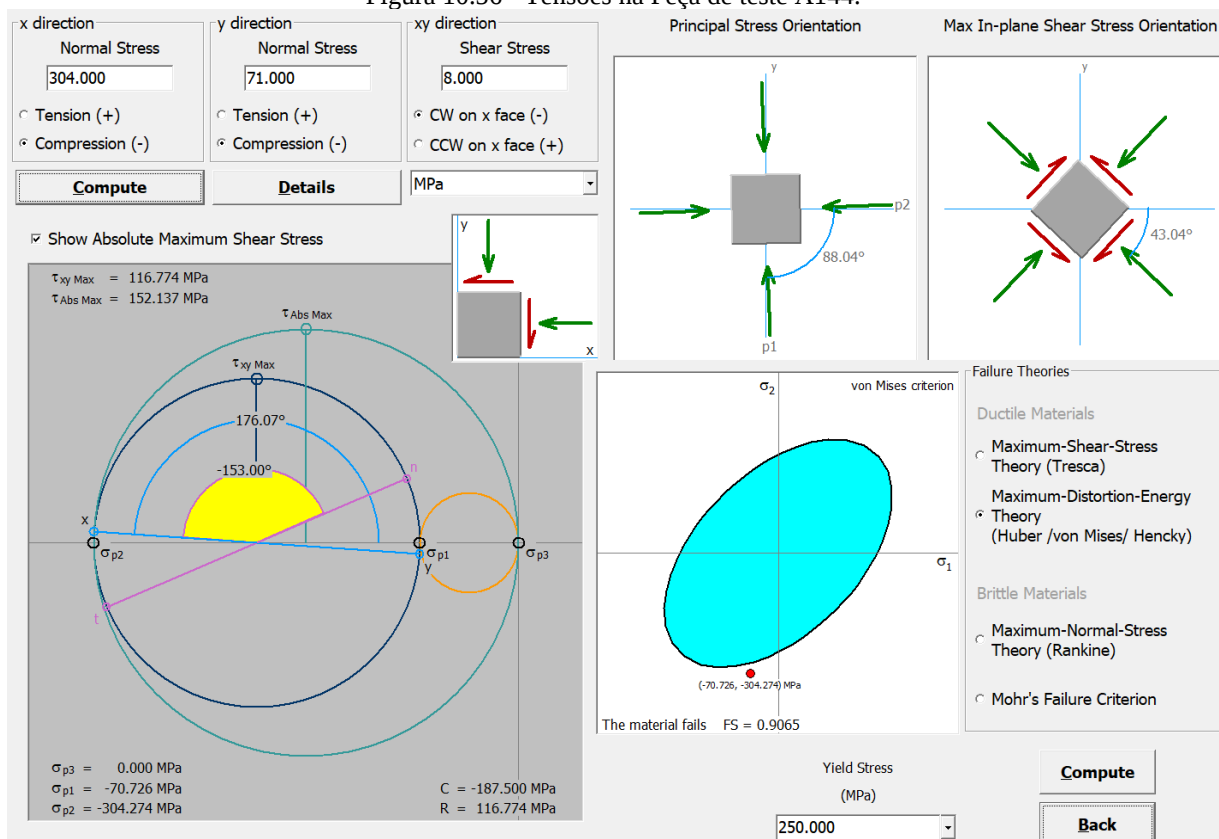
## 10.7 APÊNDICE G - TENSÕES NAS PEÇAS DE TESTE

Figura 10.55 - Tensões na Peça de teste A144.



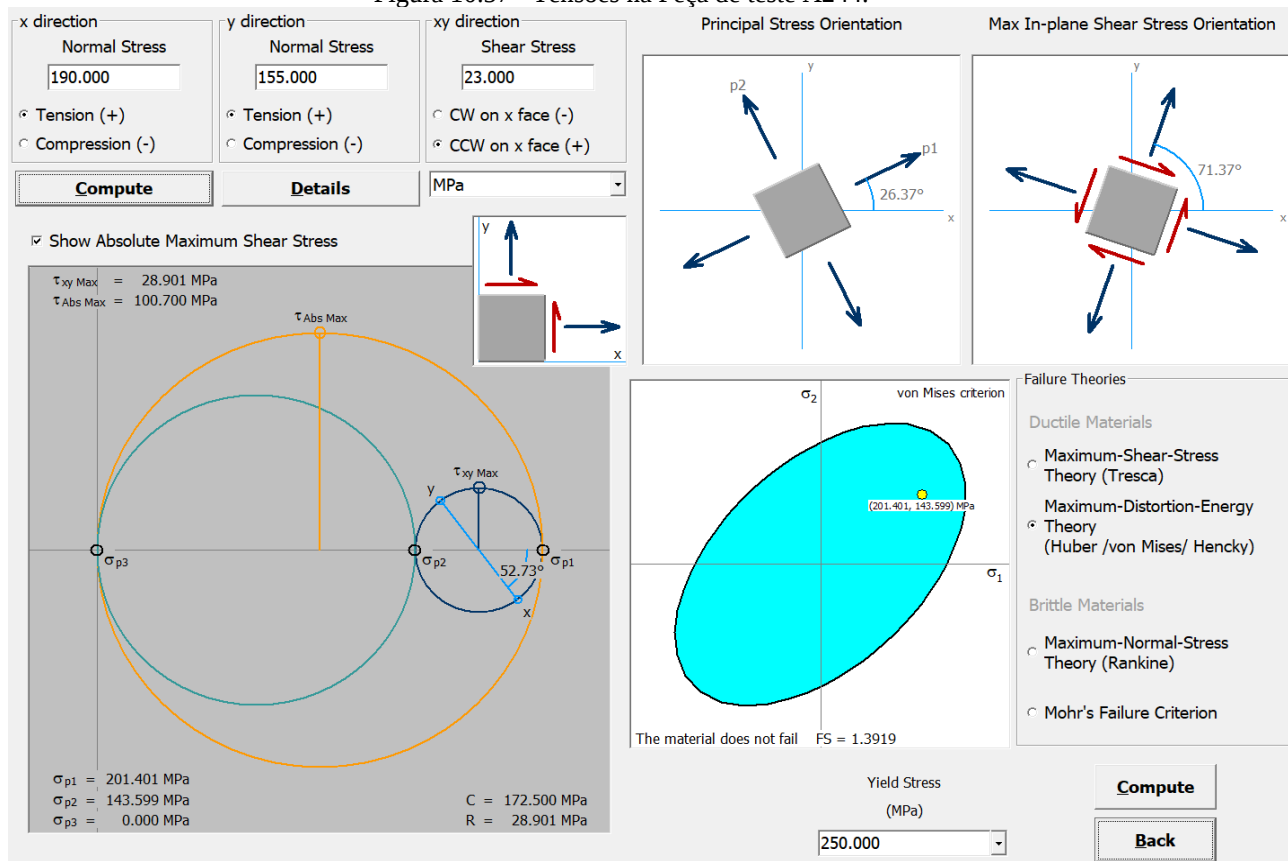
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.56 - Tensões na Peça de teste A144.



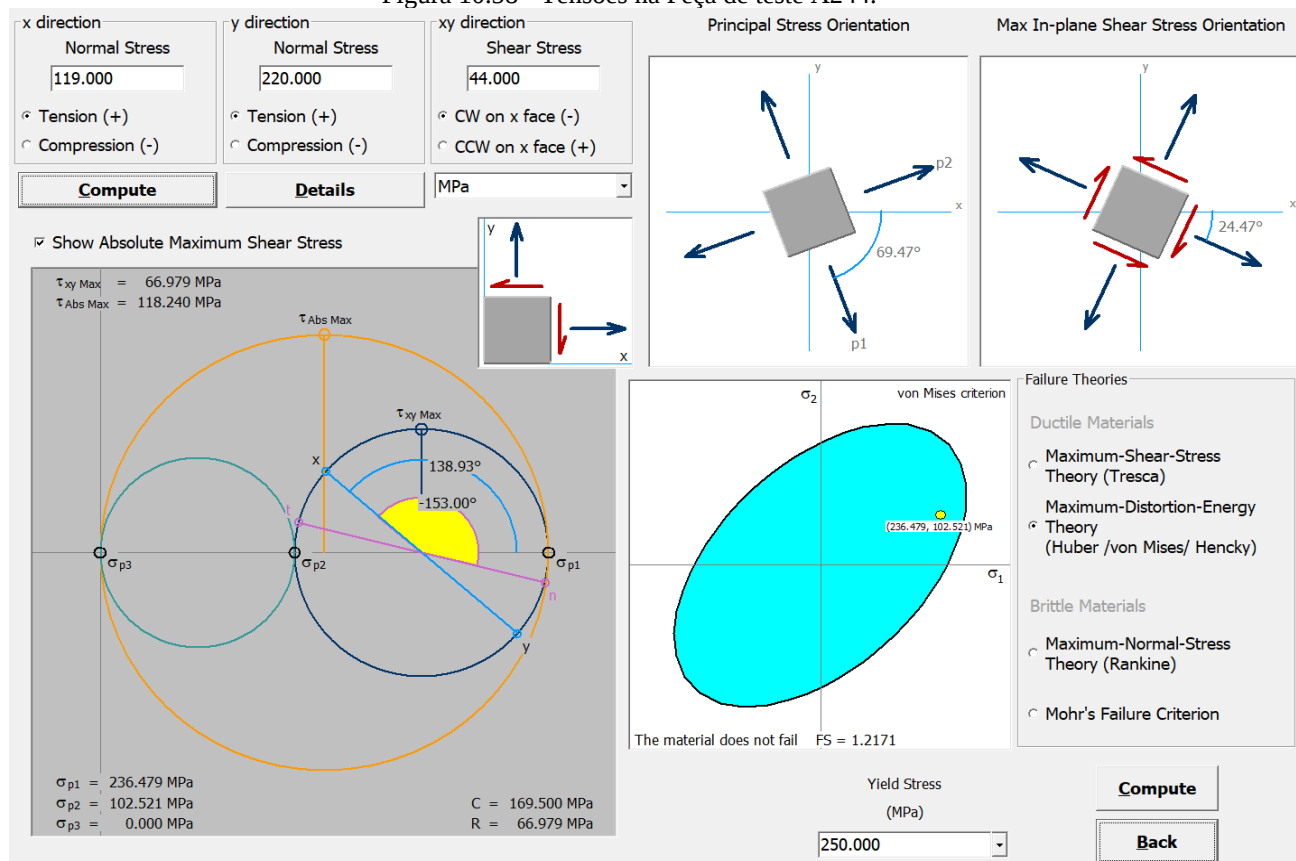
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.57 - Tensões na Peça de teste A244.



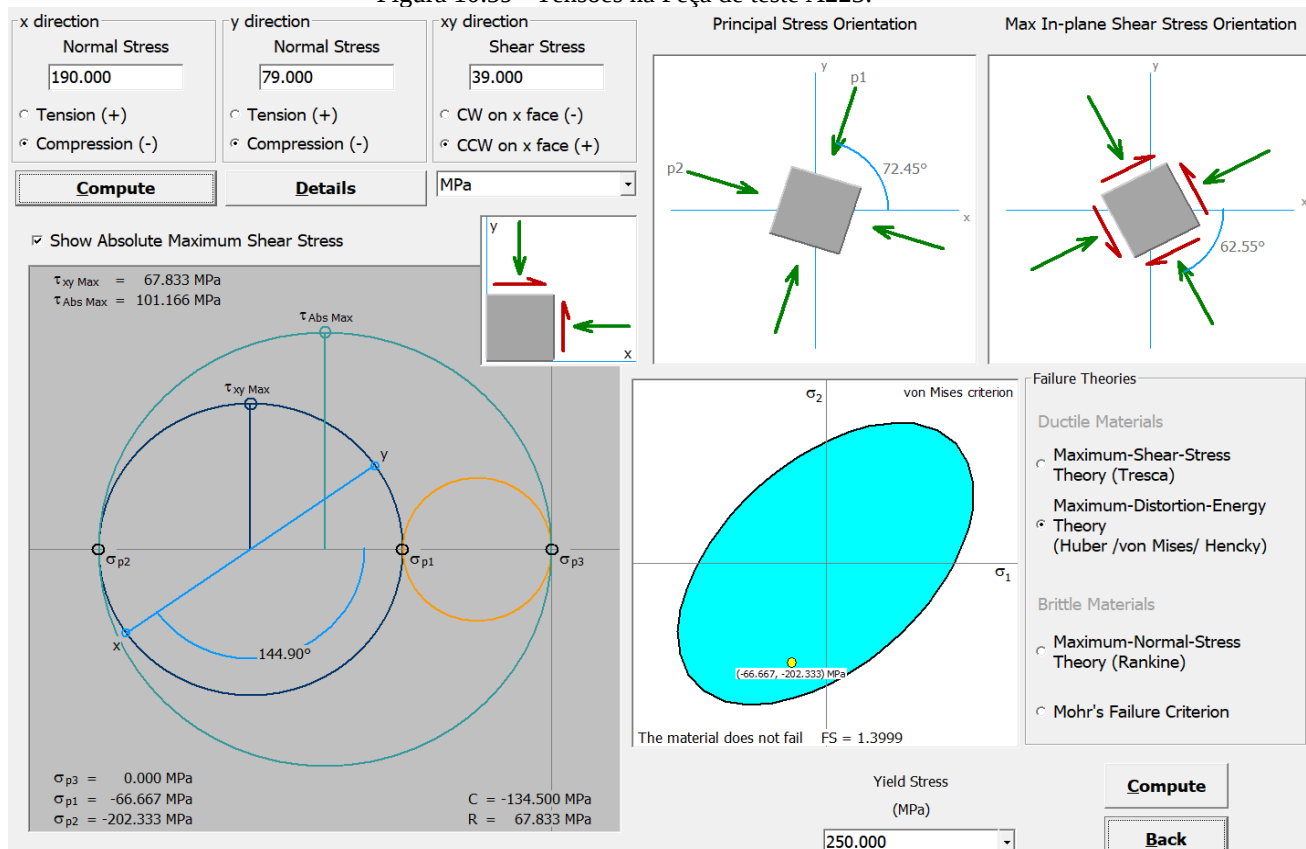
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.58 - Tensões na Peça de teste A244.



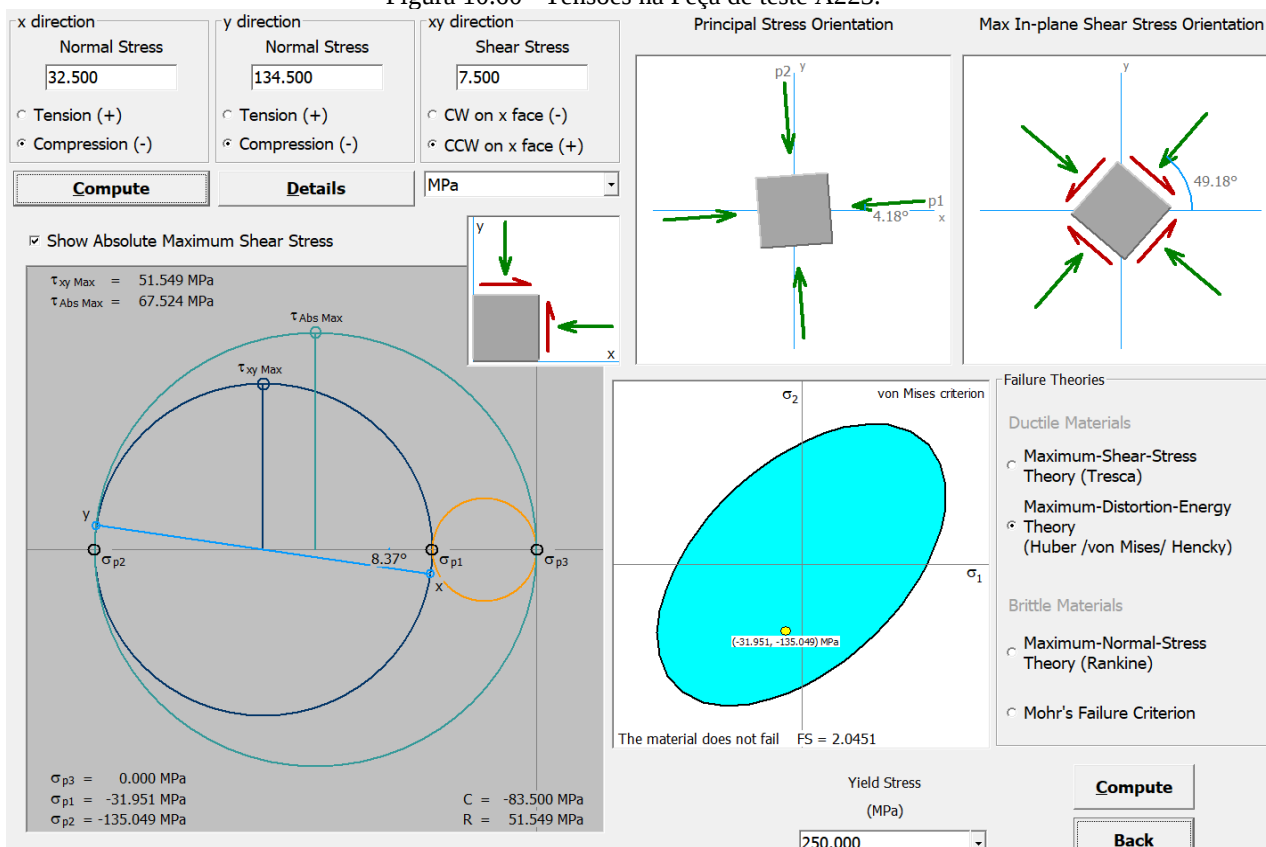
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.59 - Tensões na Peça de teste A223.



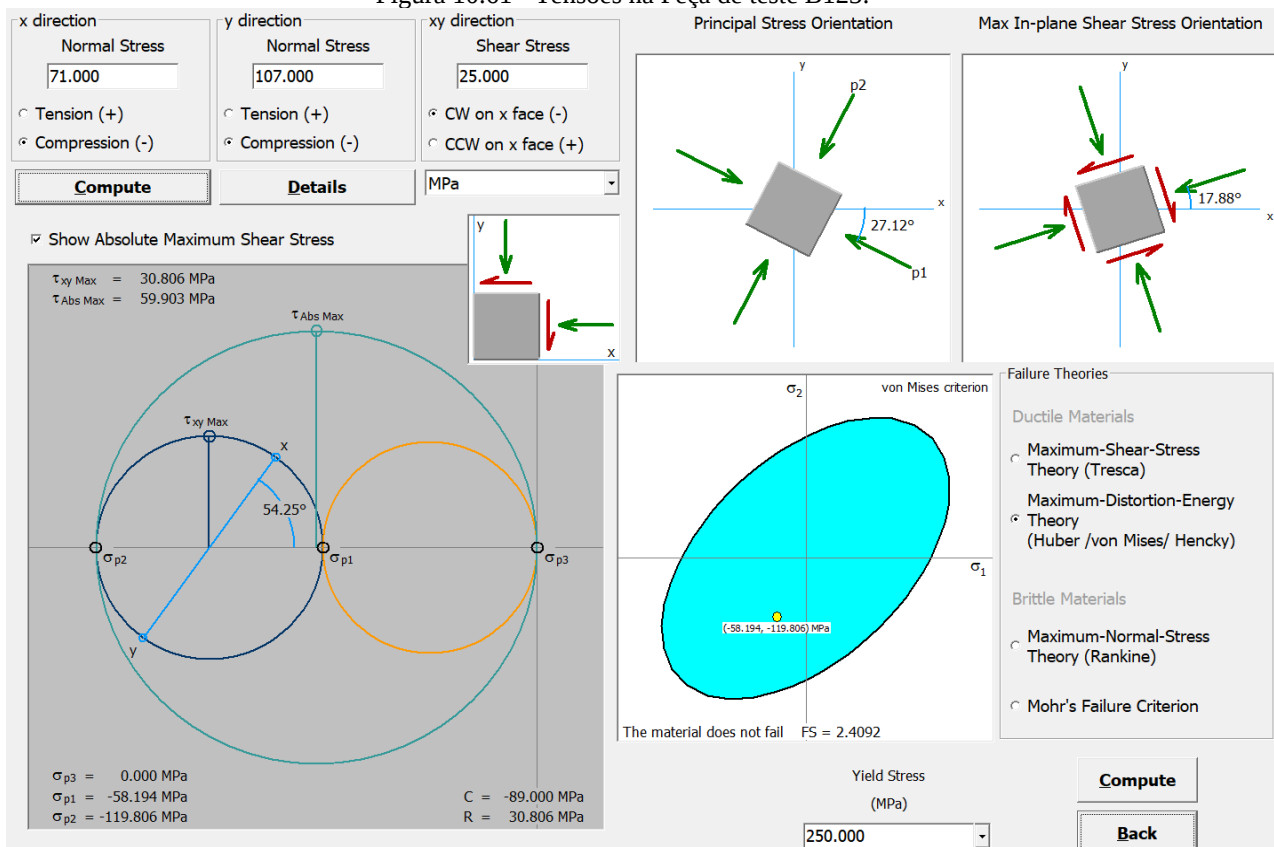
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.60 - Tensões na Peça de teste A223.



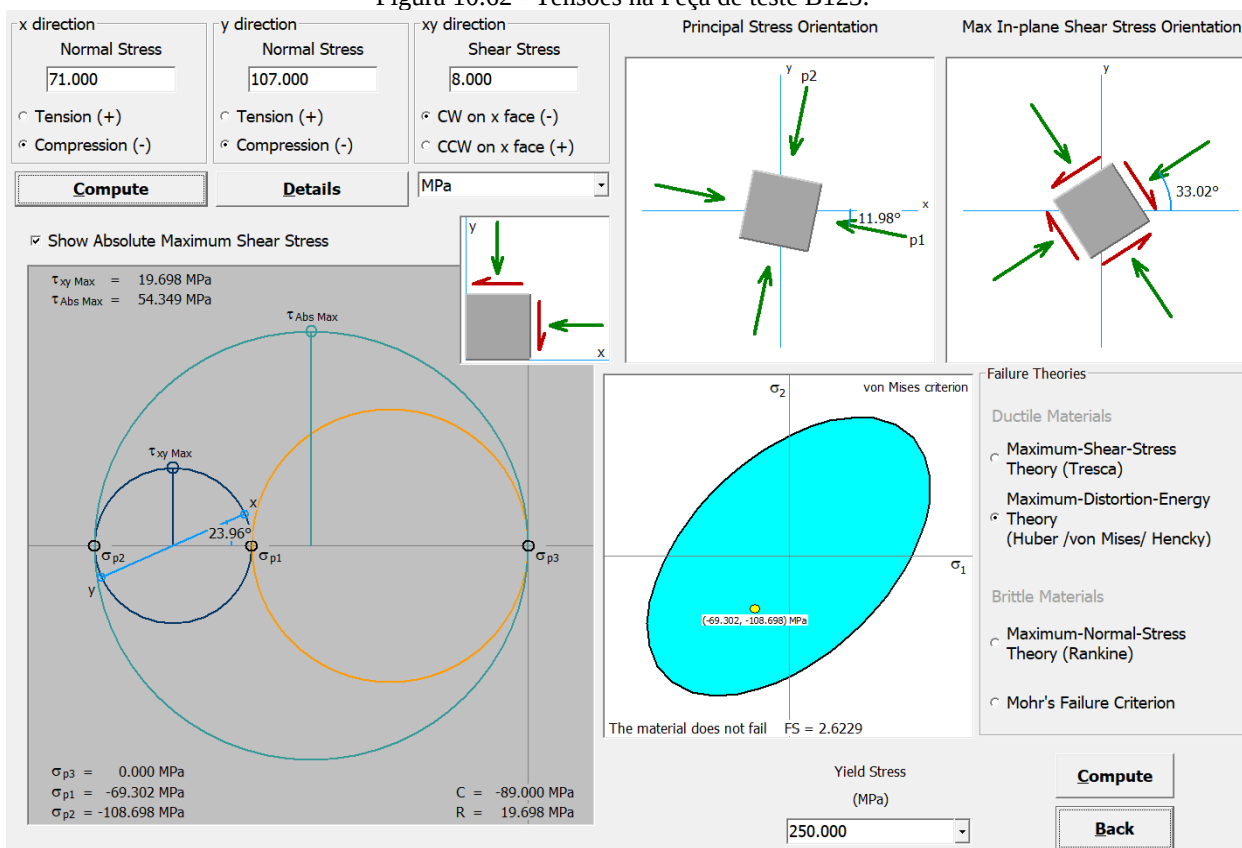
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.61 - Tensões na Peça de teste B123.



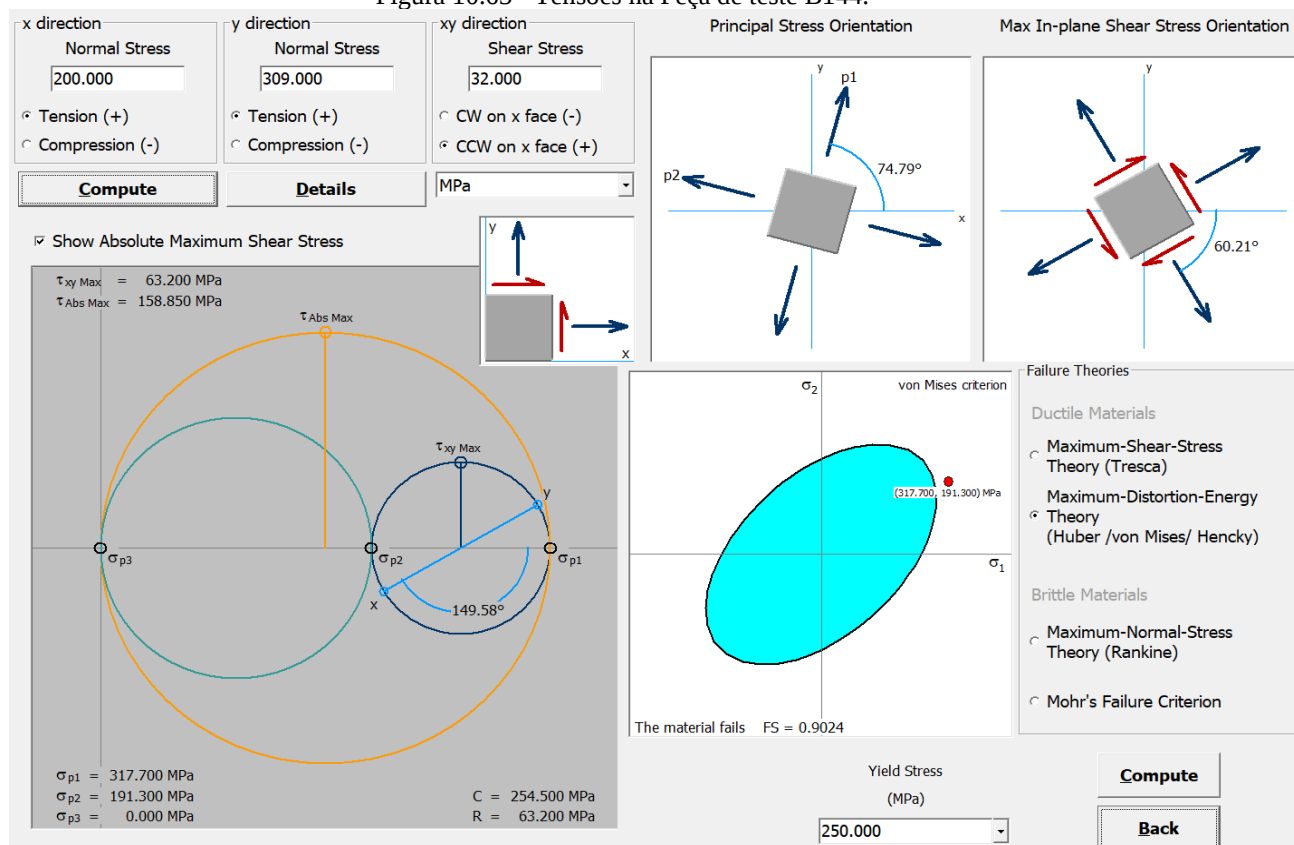
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.62 - Tensões na Peça de teste B123.



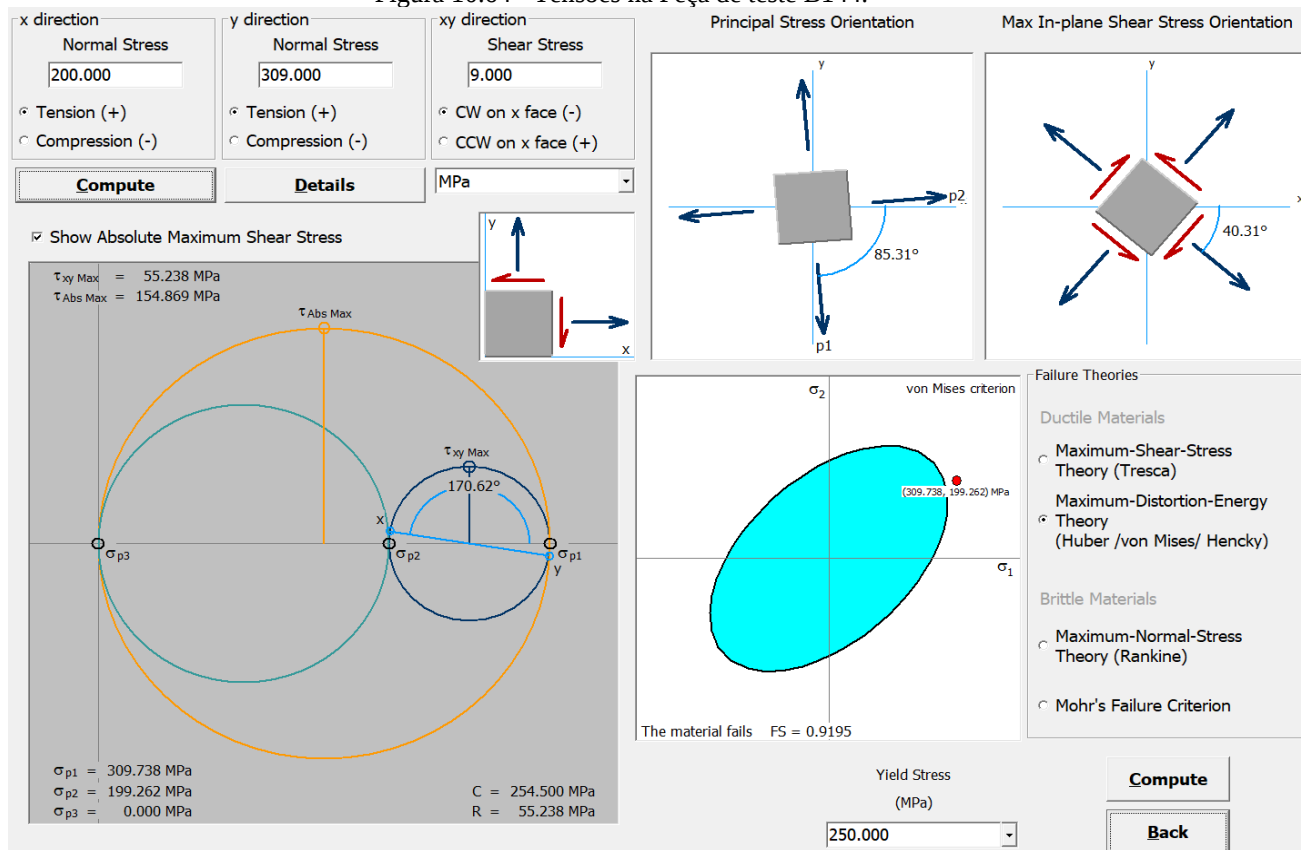
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.63 - Tensões na Peça de teste B144.



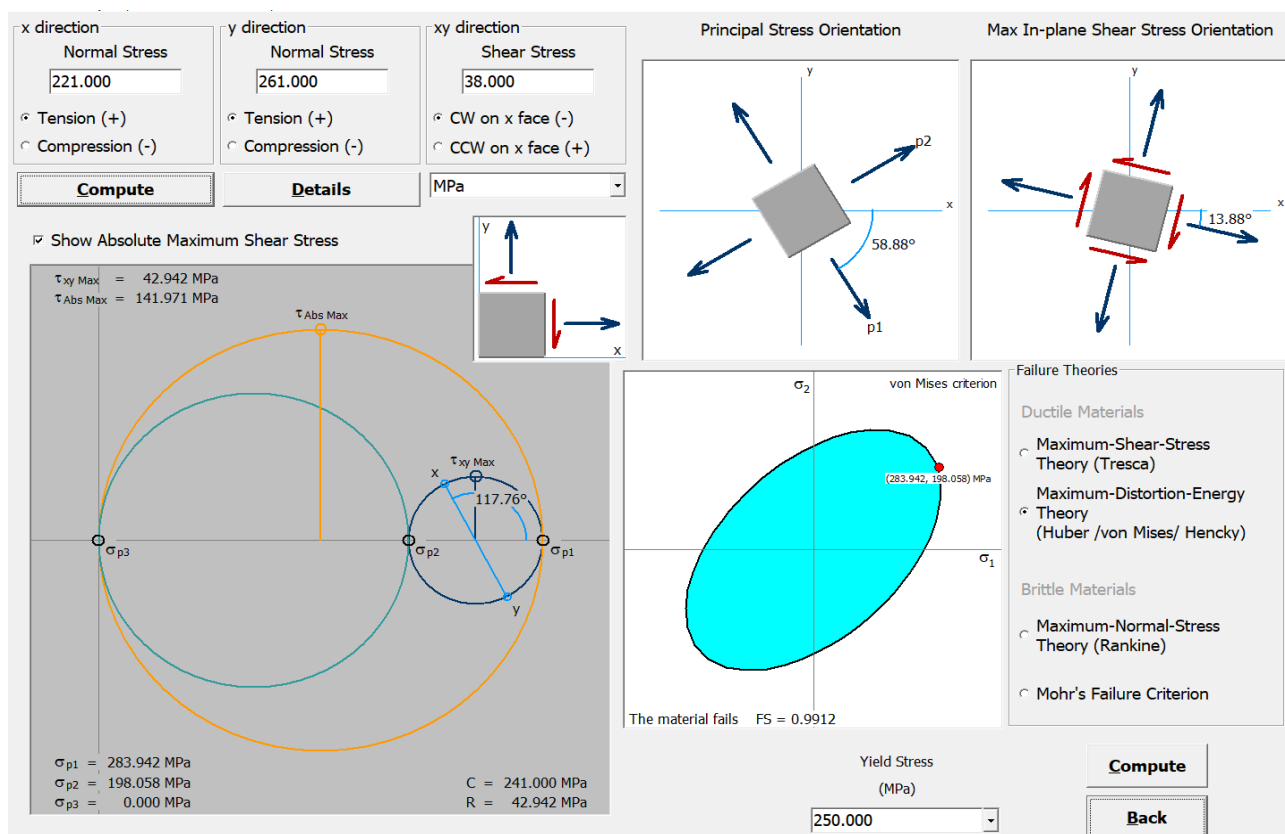
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.64 - Tensões na Peça de teste B144.



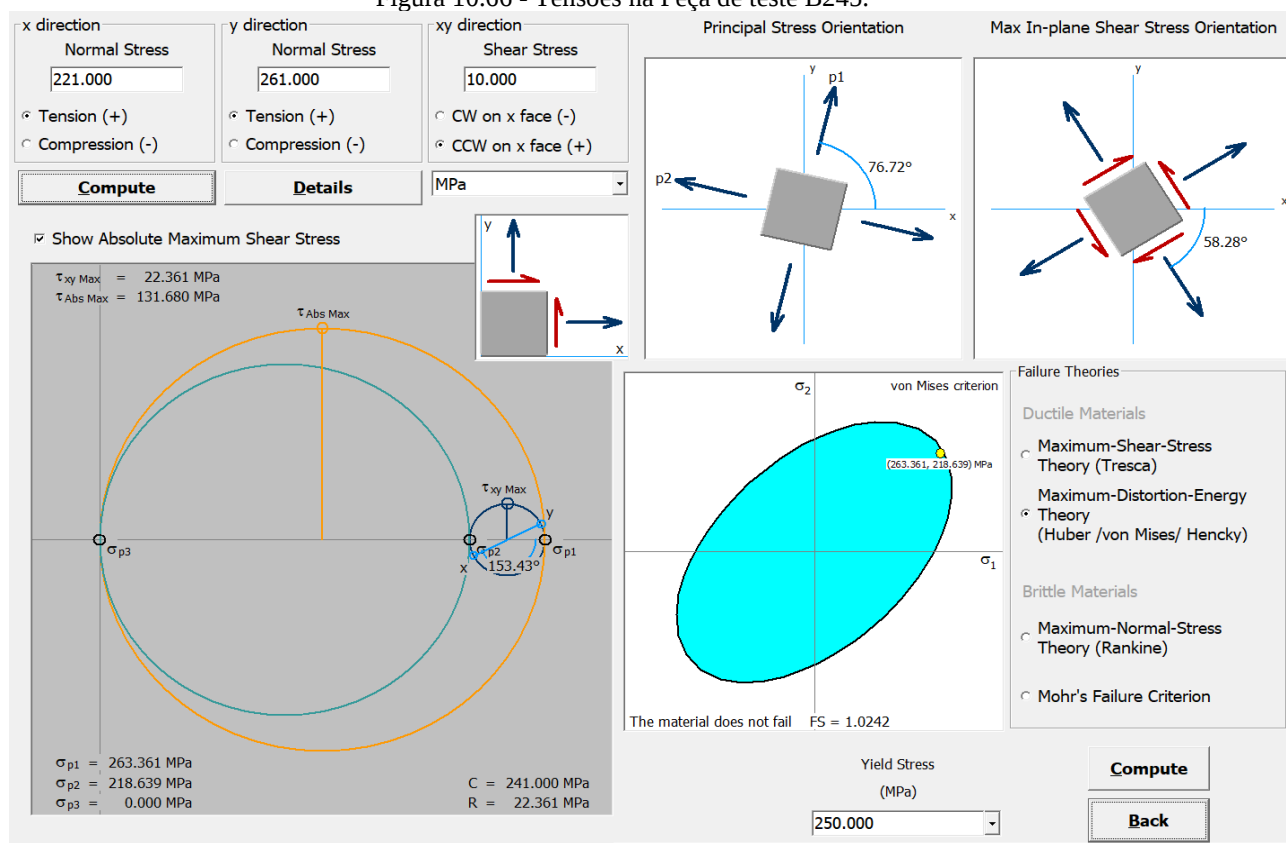
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.65 - Tensões na Peça de teste B245.



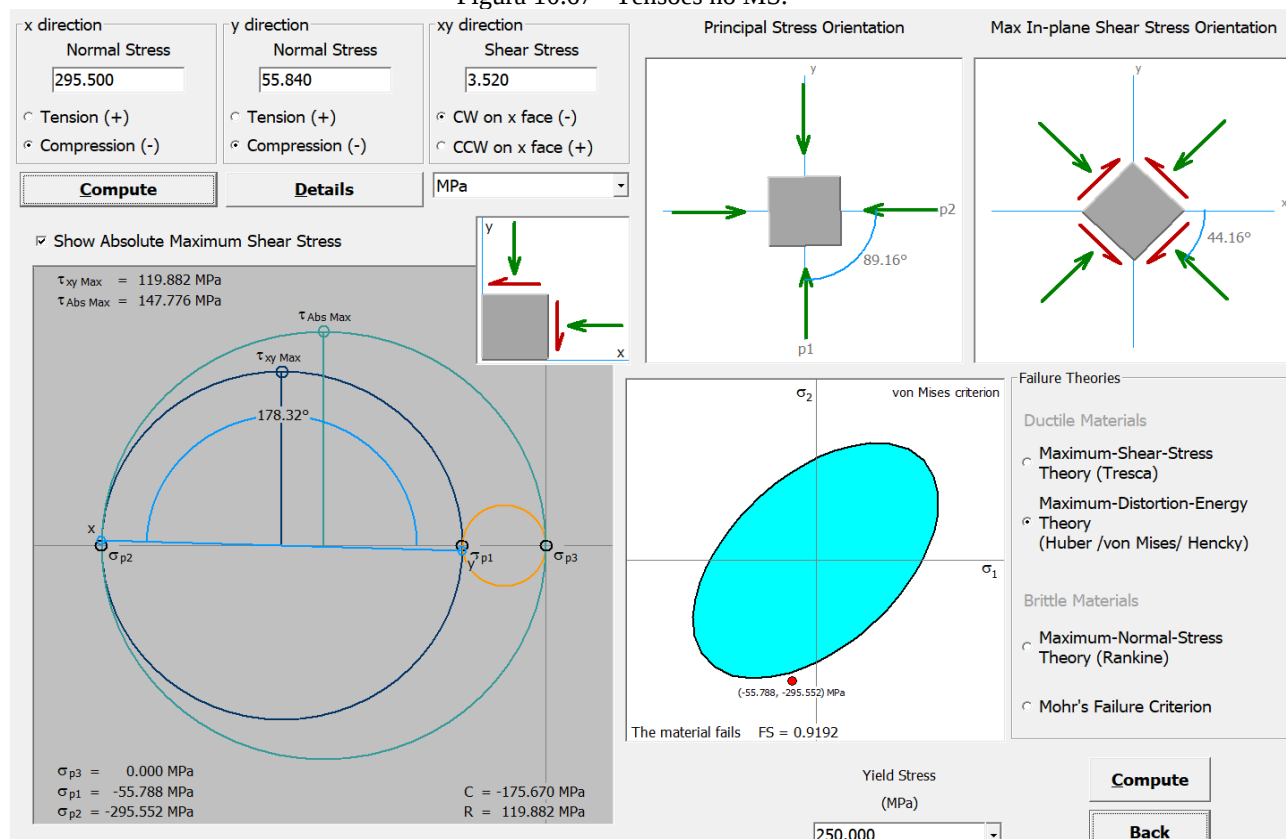
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.66 - Tensões na Peça de teste B245.



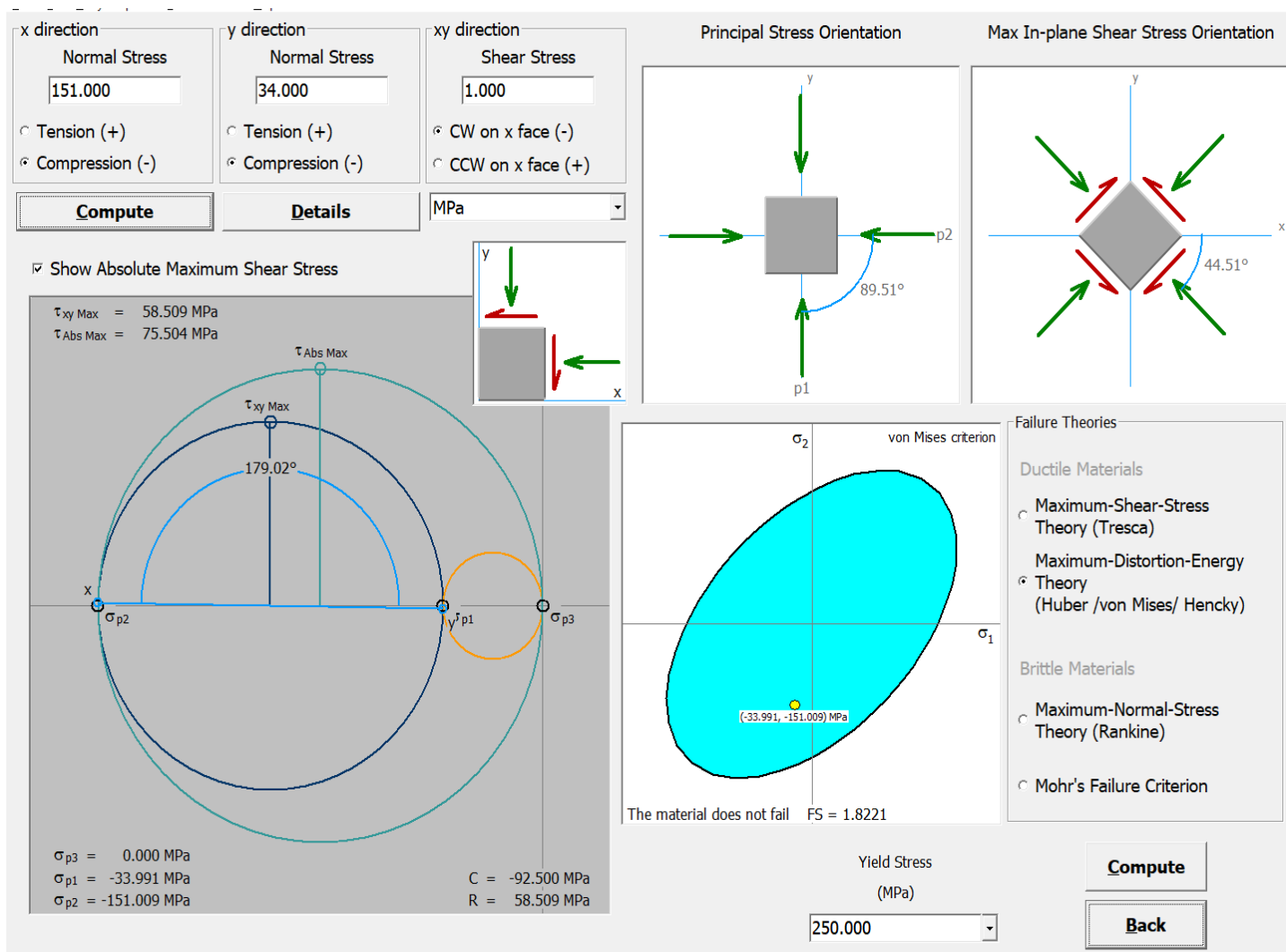
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.67 - Tensões no MS.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10.68 - Tensões no MB.



Fonte: Elaborada pelo autor









































## 11. ANEXOS

### 11.1 ANEXO A - PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS

Tabela 11.1 - Propriedades termofísicas dos materiais

| Descrição                         | Cód        | Unid.                             | Comportamento |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperatura                       | T          | °C                                | 20            | 250        | 500        | 750        | 1000       | 1500       | 1700       | 2500       |
| Condutividade térmica             | C          | $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$  | 50            | 47         | 40         | 27         | 30         | 35         | 45         | 50         |
| Densidade                         | $\rho$     | $\text{kg.m}^{-3}$                | 7820          | 7700       | 7610       | 7650       | 7490       | 7350       | 7300       | 7090       |
| Calor específico                  | C          | $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ | 460           | 480        | 530        | 675        | 670        | 660        | 780        | 820        |
| Coefficiente de poisson           | $\nu$      |                                   | 0.28          | 0.20       | 0.31       | 0.35       | 0.40       | 0.49       | 0.50       | 0.50       |
| Coefficiente de dilatação térmica | $\alpha$   | $\text{°C}^{-1}$                  | 1.10E - 05    | 1.22E - 05 | 1.39E - 05 | 1.48E - 05 | 1.34E - 05 | 1.33E - 05 | 1.32E - 05 | 1.31E - 05 |
| Módulo de elasticidade            | E          | $\text{kg.m}^{-2}$                | 0.205E+11     | 0.187E+11  | 0.150E+11  | 0.07E+11   | 0.02E+11   | 2.00E+03   | 1.30E+03   | 1.00E+03   |
| Tensão de escoamento              | $\sigma_e$ | $\text{kg.m}^{-2}$                | 22.0E+06      | 17.5E+06   | 8.0E+06    | 4.0E+06    | 1.0E+06    | 1.00E - 05 |            |            |

Fonte: (ROBERT, 2015).

Tabela 11.2 - Propriedades termofísicas dos aços

| Temperatura<br>[°C] | Condutividade<br>térmica<br>[W . m <sup>1</sup> . °C] | Coefficiente de<br>difusividade<br>térmica<br>[m <sup>2</sup> . S <sup>1</sup> ] | Coefficiente de<br>convecção<br>térmica<br>[W . m <sup>2</sup> . °C] | Coefficiente de<br>dilatação<br>[°C <sup>1</sup> ] | Calor<br>Específico<br>[J . Kg <sup>1</sup> °C] | E<br>[ x<br>10 <sup>11</sup><br>Pa] | $\nu$ |
|---------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| 0                   | 51.062                                                | 1.400E - 05                                                                      | 8                                                                    | 1.20E - 05                                         | 506.618                                         | 2.05                                | 0.278 |
| 20                  | 51.062                                                | 1.385E - 05                                                                      | 8                                                                    | 1.20E - 05                                         | 506.618                                         | 2.02                                | 0.278 |
| 100                 | 51.062                                                | 1.315E - 05                                                                      | 8                                                                    | 1.29E - 05                                         | 524.868                                         | 1.94                                | 0.283 |
| 200                 | 47.324                                                | 1.198E - 05                                                                      | 8.75                                                                 | 1.38E - 05                                         | 543.118                                         | 1.85                                | 0.288 |
| 300                 | 43.84                                                 | 1.087E - 05                                                                      | 9.4                                                                  | 1.38E - 05                                         | 555.118                                         | 1.78                                | 0.293 |
| 400                 | 40.424                                                | 9.670E - 06                                                                      | 9.7                                                                  | 1.38E - 05                                         | 588.921                                         | 1.70                                | 0.298 |
| 500                 | 29.634                                                | 8.237E - 06                                                                      | 10                                                                   | 1.38E - 05                                         | 594.370                                         | 1.65                                | 0.303 |
| 550                 | 33.546                                                | 7.358E - 06                                                                      | 10.13                                                                | 1.33E - 05                                         | 599.819                                         | 1.60                                | 0.308 |
| 600                 | 26.461                                                | 5.991E - 06                                                                      | 10.34                                                                | 1.33E - 05                                         | 605.269                                         | 1.53                                | 0.313 |
| 650                 | 18.091                                                | 3.647E - 06                                                                      | 10.38                                                                | 1.33E - 05                                         | 610.718                                         | 1.49                                | 0.317 |
| 700                 | 14.874                                                | 2.865E - 06                                                                      | 10.45                                                                | 1.33E - 05                                         | 616.168                                         | 1.44                                | 0.320 |
| 750                 | 11.386                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.5                                                                 | 7.00E - 06                                         | 621.617                                         | 1.40                                | 0.324 |
| 800                 | 14.735                                                | 2.735E - 06                                                                      | 10.6                                                                 | 8.25E - 06                                         | 627.067                                         | 1.35                                | 0.327 |
| 900                 | 14.375                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.65                                                                | 1.20E - 05                                         | 632.516                                         | 1.16                                | 0.335 |
| 1000                | 14.375                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.65                                                                | 1.29E - 05                                         | 637.966                                         | 0.96                                | 0.342 |
| 1200                | 14.735                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.65                                                                | 1.38E - 05                                         | 667.765                                         | 0.50                                | 0.350 |
| 1340                | 14.735                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.65                                                                | 1.38E - 05                                         | 707.224                                         | 0.10                                | 0.351 |
| 1390                | 14.735                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.65                                                                | 1.38E - 05                                         | 735.695                                         | 0.10                                | 0.353 |
| 2000                | 14.735                                                | 2.149E - 06                                                                      | 10.65                                                                | 1.38E - 05                                         | 780.498                                         | -                                   | -     |

Fonte: (ROCHA, ANTONINO, et al., 2018) e (BRICKSTAD e JOSEFSON, 1998).

Tabela 11.3 - Propriedades termofísicas

| Temperatura °K | Condutividade térmica<br>×10 <sup>3</sup> /(W/m°K) | Densidade × 10 <sup>3</sup><br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico<br>(J/kg°K) |
|----------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|
| 293            | 0.050                                              | 7.80                                                | 460                          |
| 523            | 0.047                                              | 7.70                                                | 480                          |
| 773            | 0.040                                              | 7.61                                                | 530                          |
| 1023           | 0.027                                              | 7.55                                                | 675                          |
| 1273           | 0.030                                              | 7.49                                                | 670                          |
| 1773           | 0.035                                              | 7.35                                                | 660                          |
| 1973           | 0.150                                              | 7.30                                                | 780                          |

Fonte: (ZHANG, , et al., 2022).



Figura 11.2 - CSN Civil 300.

|                                                                                                                                                                                                                                 |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|-----------|-------------|----------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------------|--------|--------|-------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|
|  <b>Companhia Siderúrgica Nacional</b><br>Rod. BR 303, Lócio Medra, Km. 5,001 s/nº<br>CEP: 27260-390 - Vila Santa Cecília - Volta Redonda/RJ |         | <b>Número</b><br>003163320            |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Lista de Embarque e Certificado de Conformidade</b>                                                                                                                                                                          |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Cliente</b><br>VENT LAR IND COM LTDA                                                                                                                                                                                         |         | <b>Código Cliente</b><br>10666        | <b>Contrato</b><br>003163320 |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Endereço (Faturamento)</b><br>RUA JOAO CECETTO 1335<br>MATAO<br>JARDIM POPULAR CEP:15997-154 SP BR                                                                                                                           |         | <b>Ordem Vendas</b><br>3447882/000001 | <b>Data</b><br>25.09.2014    |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Caixa Postal:</b>                                                                                                                                                                                                            |         | <b>Folha</b><br>1 / 1                 |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Nota Fiscal nº</b><br>003163320                                                                                                                                                                                              |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Marca de Embarque</b><br>CHAPA AÇO FINA LAMINADA QUENTE EM BOBINA                                                                                                                                                            |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Produto</b><br>2,65X1200-CIVIL-300-CHAPAS                                                                                                                                                                                    |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Marcação Especial</b>                                                                                                                                                                                                        |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Especificação</b><br>CSNARQ.CIVIL300                                                                                                                                                                                         |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Qualidade</b><br>Superficie 2                                                                                                                                                                                                |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Cond Borda</b><br>Universal                                                                                                                                                                                                  |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Acabamento</b><br>Com LA                                                                                                                                                                                                     |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Aplam. Restritivo</b><br>Sem AR                                                                                                                                                                                              |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Oleamento</b><br>EMBALAGEM B-2 ( MI + ME )                                                                                                                                                                                   |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Embalagem</b>                                                                                                                                                                                                                |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Análise Química (%)</b>                                                                                                                                                                                                      |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| Placa                                                                                                                                                                                                                           | C       | Mn                                    | P                            | S                       | Si           | Cu        | Ni          | Cr       | Mo     | Sn     | Al     | N                                                              | Nb     | V      | Ti                                                                            | B      | Ca     |
| C Eq.                                                                                                                                                                                                                           |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| E74805                                                                                                                                                                                                                          | 0,1470  | 0,5730                                | 0,0130                       | 0,0110                  | 0,0080       | 0,0050    | 0,0070      | 0,0120   | 0,0030 | 0,0030 | 0,0430 | 0,004400                                                       | 0,0020 | 0,0020 | 0,0040                                                                        | 0,0002 | 0,0000 |
|                                                                                                                                                                                                                                 | 0,2467  |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Propriedades Mecânicas / Magnéticas / Metalográficas</b>                                                                                                                                                                     |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| Lote                                                                                                                                                                                                                            | Corrida | LE_TR                                 | LE/TR                        | LR_TR                   | LR_TR        | LE/LR_TR  | AL_TR_50 mm | DOBR_180 |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| H935022201                                                                                                                                                                                                                      | 4C3540  | 317 MPa                               | 0,73                         | 432 MPa                 | 0,73         | 33,1 %    | OK          |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>Produto Embarcado</b>                                                                                                                                                                                                        |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| Lote                                                                                                                                                                                                                            | Corrida | Placa                                 | Espessura                    | Largura                 | Comp.Teórico | Peso Líq. | Peso Br.    |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| H935022201                                                                                                                                                                                                                      | 4C3540  | E74805                                | 2,650 MM                     | 1200,0 MM               | 513,0 M      | 12,805 TO | 12,811 TO   |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>TOTAL: Lotes: 0001</b>                                                                                                                                                                                                       |         | <b>Peso Líquido (MT):</b>             |                              | <b>Peso Bruto (MT):</b> |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
|                                                                                                                                                                                                                                 |         | 12,805                                |                              | 12,811                  |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>CERTIFICAMOS QUE O MATERIAL AQUI RELACIONADO FOI PRODUZIDO, INSPECIONADO, ENSAIADO E ANALISADO EM NOSSOS LABORATÓRIOS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA NORMA OU ESPECIFICAÇÃO PEDIDA</b>                                       |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        |                                                                |        |        |                                                                               |        |        |
| <b>ELEMENTOS QUÍMICOS EXIGIDOS PELA ESPECIFICAÇÃO ENCOMENDADA : C, S, P, MN, SI, AL</b>                                                                                                                                         |         |                                       |                              |                         |              |           |             |          |        |        |        | <b>Preparado: Délio Pinheiro</b><br>Técnico de Desenvolvimento |        |        | <b>Visto: Otávio Augusto de Souza</b><br>Ger. Geral de Processos Siderúrgicos |        |        |

Fonte: (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2020).

## 11.3 ANEXO C – SÍNTESE ANALÍTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Figura 11.3 - Síntese analítica do processo de soldagem.

| Processo de soldagem GMAW                                                                      |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fontes térmicas                                                                                |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Instantâneas concentradas - FTIC                                                               | Continuas concentradas - FTCC                                                                  | Movimento superficial - FTMS                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Sólido infinito                                                                                | Sólido semi-infinito                                                                           | Sólido infinito                                                                                                                                                                                       | Sólido semi-infinito                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Tipo Ponto                                                                                     |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $T = \frac{Q}{8\rho c\sqrt{(\pi\alpha)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{R'^2}{4t\alpha}\right]$      | $T = \frac{Q}{4\rho c\sqrt{(\pi\alpha)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{R'^2}{4t\alpha}\right]$      | $T = \frac{q}{4\pi k R'} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{R'}{2\sqrt{t\alpha}}\right)$                                                                                                            | $T = \frac{q}{2\pi k R} \cdot \exp\left[-\frac{v'(R+\omega)}{2\alpha}\right]$                                                                                                                                                                                                                  |
| $t_{(T_{max})} = \frac{R'^2}{6\alpha}$                                                         | $T_{(R=0)} = \frac{Q}{4\rho c\sqrt{\pi^3\alpha^3}}$                                            | $T = \frac{q}{8\rho c\sqrt{(\pi\alpha)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{R^2}{4t\alpha}\right]$                                                                                                              | $T(x < 0) = \frac{q}{2\pi k R}$                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                                                                                |                                                                                                | $T(t \rightarrow \infty) = \frac{q}{4\pi k R}$                                                                                                                                                        | $T(x > 0) = \frac{q}{2\pi k R} \cdot \exp\left(-\frac{vR}{\alpha}\right)$                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                                |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       | $T_{(OYR=0)} = \frac{q}{2\pi k R} \cdot \exp\left(-\frac{vR}{\alpha}\right)$                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       | $T(z > 0) = \frac{q}{2\pi g k} \cdot \exp\left(-\frac{vw}{2\alpha}\right) \cdot \left\{ k_0 \left(\frac{vR}{2\alpha}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{vR}{2\alpha} \cdot \left(1 + \frac{4\alpha^2 n^2}{v^2 g^2}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \cos \frac{n\pi z}{g} \right\}$ |
| Tipo linha                                                                                     |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $T = \frac{Q_l}{4\pi k t} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{4t\alpha}\right]$                        | $T = \frac{Q_l}{4\pi g k t} \cdot \exp\left[-bt - \frac{r^2}{4t\alpha}\right]$                 | $T = \frac{q_l}{4\pi k} \cdot \operatorname{Ei}\left(-\frac{r^2}{2t\alpha}\right)$                                                                                                                    | $T = \frac{q_l}{2\pi g k} \cdot \exp\left(-\frac{vw}{2\alpha}\right) \cdot k_0 \left(\frac{vR}{2\alpha}\right) \cdot \left[\frac{r(v^2 + 4b\alpha)^{\frac{1}{2}}}{2\alpha}\right]$                                                                                                             |
|                                                                                                | $T_{(r=0)} = \frac{Q_l}{4\pi g k t} \cdot \exp[-bt]$                                           | $T = \frac{q_l}{4\pi k t} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{4t\alpha}\right]$                                                                                                                               | $T_{(v=0, t=\infty)} = \frac{q_p}{2\pi g k} \cdot k_0 \left(\frac{\sqrt{b\alpha}}{\alpha}\right)$                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                |                                                                                                | $T_{(\Delta T=0)} = \frac{q_l}{4\pi k} \left(\ln \frac{1}{r}\right)$                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Tipo plano                                                                                     |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $T = \frac{Q_p}{2\rho c A \sqrt{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4t\alpha}\right]$ | $T = \frac{Q_p}{2\rho c A \sqrt{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-bt - \frac{x^2}{4t\alpha}\right]$ | $T = \frac{q_p}{\rho c} \sqrt{\frac{t}{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4t\alpha}\right] - \frac{ x-x' }{2\alpha} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{ x-x' }{2\sqrt{\pi\alpha}}\right]$ | $T = \frac{q_p}{4A\rho c\sqrt{v^2 + 4b\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{v\omega}{2\alpha} - \frac{ \omega  \cdot \sqrt{v^2 + 4b\alpha}}{2\alpha}\right]$                                                                                                                                         |
|                                                                                                | $T_{(x=0)} = \frac{Q_p}{2\rho c A \sqrt{\pi\alpha}} \cdot \exp[-bt]$                           | $T_{(x=0, \Delta T=0)} = \frac{q_p}{\rho c} \sqrt{\frac{t}{\pi\alpha}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{4t\alpha}\right] - \frac{x}{2\alpha}$                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ABERTURA DO ARCO ELÉTRICO                                                                      | PAUSA DO ARCO ELÉTRICO                                                                         | TRAJETO DO ARCO ELÉTRICO                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

Fonte: (MACHADO, 2000).