

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Sérgio Augusto Ferrazza da Silva

**OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DO
MÉTODO DE TAGUCHI PARA SOLDAGEM EM AÇO
DIN EN 10025 2 S275JR-AR PELO PROCESSO GMAW ROBOTIZADO**

Santa Maria, RS
2022

Sérgio Augusto Ferrazza da Silva

**OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE
TAGUCHI PARA SOLDAGEM EM AÇO DIN EN 10025-2 S275JR-AR PELO
PROCESSO GMAW ROBOTIZADO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Aparecido Buenos

Coorientador: Dr. Diego Tolotti de Almeida

Santa Maria, RS
2022

Silva, Sérgio Augusto Ferrazza
OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO
DE TAGUCHI PARA SOLDAGEM EM AÇO DIN EN 10025 2 S275JR-AR
PELO PROCESSO GMAW ROBOTIZADO / Sérgio Augusto Ferrazza
Silva.- 2022.
126 p.; 30 cm

Orientador: Alexandre Aparecido Buenos
Coorientador: Diego Tolotti de Almeida
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, RS, 2022

1. Soldagem GMAW 2. Método de Taguchi 3. Ensaios
Metalográfica 4. Análise Estatística I. Aparecido
Buenos, Alexandre II. Tolotti de Almeida, Diego III.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, SÉRGIO AUGUSTO FERRAZZA SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Sérgio Augusto Ferrazza da Silva

**OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE
TAGUCHI PARA SOLDAGEM EM AÇO DIN EN 10025-2 S275JR-AR PELO
PROCESSO GMAW ROBOTIZADO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Aprovado em 24 de agosto de 2022.

Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng. (PGMEC/UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng. (PGMEC/UFSM)

Prof. William Haupt, Dr. Eng. (PPGPPF/UPF)

Santa Maria, RS
2022

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, minha família e minha companheira.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho tornou-se possível devido à confiança, apoio e dedicação de diversas pessoas. Expresso aqui meus sinceros agradecimentos:

A meus pais inicialmente por darem-me a vida e por desde novo me ensinarem a valorizar o conhecimento como a única coisa que não pode ser tomada.

A minha companheira, por toda paciência, apoio e suporte nos momentos difíceis e por sempre acreditar e meu sucesso profissional e pessoal.

Ao professor Dr. Alexandre Aparecido Buenos, pela orientação e direcionamento durante toda a elaboração do trabalho e durante o curso como um todo.

Ao Dr. Diego Tolotti de Almeida, Supervisor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da empresa Bruning Tecnometal pela coorientação, por depositar sua confiança em meu empenho, compartilhando conhecimento e dando todo suporte desde a idealização até a conclusão de todos os ensaios.

Aos colegas Deocleber Padilha e Angélica Paola Oliveira por todo suporte dado ao trabalho, o qual não seria concluído em tempo hábil sem tal contribuição.

Em especial a empresa Bruning Tecnometal pela oportunidade de realizar esta pesquisa aplicada a seus processos de soldagem, cedendo as matérias-primas, equipamentos de corte, soldagem, preparação, análises de dureza e diluição mesmo após ter deixado seu quadro de profissionais.

Ao colega Diego dos Santos pelo auxílio na realização dos ensaios metalográficos.

A todos os demais familiares, amigos, professores e colegas que de forma direta ou indireta contribuíram para a concretização deste trabalho e realização de um sonho.

*Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores,
para fazer melhor ainda!*

Mario Sérgio Cortella

RESUMO

OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE TAGUCHI PARA SOLDAGEM EM AÇO DIN EN 10025-2 S275JR-AR PELO PROCESSO GMAW ROBOTIZADO

AUTOR: Sérgio Augusto Ferrazza da Silva
ORIENTADOR: Dr. Alexandre Aparecido Buenos
COORIENTADOR: Dr. Diego Tolotti de Almeida

A soldagem a arco elétrico com atmosfera gasosa de proteção (GMAW) é um dos meios de soldagem mais utilizado na indústria metalmeccânica, visto sua grande produtividade e possibilidade de soldagem de componentes de diversas espessuras. O aumento da performance e redução de desperdícios tem sido um desafio constante para as indústrias do ramo. Tal desafio está diretamente relacionado à seleção dos parâmetros de soldagem, pois estes afetam significativamente no consumo de consumíveis de soldagem, tais como arame de solda e gás de proteção, além de estarem atrelados as propriedades mecânicas de uma junta soldada. Frente a isso, o objetivo deste trabalho é a otimização da seleção de parâmetros de soldagem através do método de Taguchi visando a maior eficiência térmica no processo GMAW Robotizado. O aço DIN EN 10025-2 S275JR-AR, utilizado como metal base, possui teor de carbono de 0,12% com microestrutura formada por uma matriz ferrítica com grãos de perlita dispersos. Como parâmetros variáveis foram utilizados os gases de proteção C10, C25 e F36 com vazões de 15 e 20 litros por minuto, stick-out de 15, 20 e 25 milímetros, velocidades de soldagem de 250, 300 e 350 milímetros por minuto e de alimentação de 7, 9 e 11 metros por minuto. O método de Taguchi foi utilizado com a matriz experimental L18 e realizadas 3 soldagens para cada combinação. Visando atestar com confiabilidade de 95% a hierarquia de influência sobre o resultado foi realizada a análise de variância (ANOVA), com comprovação experimental através do método *one-factor-at-a-time* (OFAT). As combinações resultantes do método OFAT foram submetidas às análises de rendimento depositado, diluição, dureza e microscopia. Também foram evidenciadas as fases constituintes e impactos sobre a dureza da zona termicamente afetada (ZTA) resultantes da otimização do aporte térmico. Os resultados evidenciaram a composição do gás de proteção como sendo o parâmetro de maior influência sobre os resultados com 76% de influência no ANOVA. A combinação otimizada definida pelo método de Taguchi consistiu na utilização do gás C10, com vazão de 15 litros por minuto, stick-out de 20 milímetros, velocidade de soldagem de 350 milímetros por minuto. A combinação otimizada proporcionou 62% de eficiência térmica, diluição de 36,7% e rendimento depositado de 88,6%, no entanto foi constatado redução de dureza na ZTA, na ordem de 10,2 HV em relação à dureza do metal base. As análises metalográficas evidenciaram ferrita de segunda fase alinhada e bainita granular na ZTA-GG e refino de grão com fases de perlita e ferrita na ZTA-GR.

Palavras-chave: Eficiência Térmica, GMAW, Método de Taguchi, OFAT, Soldagem.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF PARAMETER SELECTION USING THE TAGUCHI METHOD FOR WELDING IN STEEL DIN EN 10025-2 S275JR-AR THROUGH THE ROBOTIC GMAW PROCESS

AUTHOR: Sérgio Augusto Ferrazza da Silva
ADVISOR: Dr. Alexandre Aparecido Buenos
COADVISOR: Dr. Diego Tolotti de Almeida

Gas metal arc welding (GMAW) is one of the most used welding methods in the metalworking industry, due to its high productivity and the possibility of welding different thicknesses components. The increase in performance and reduction of waste has been a constant challenge for industries. Such challenge is directly related to welding parameters selection processes, which significantly affects welding consumables consumption, such as welding wire and shielding gas, in addition to being linked to a welded joint mechanical properties. In view of this, this work focus on optimize welding parameters selection through Taguchi's method aiming at greater thermal efficiency in the Robotic GMAW process. DIN EN 10025-2 S275JR-AR steel, used as base metal, contains 0.12% of carbon with a microstructure formed by a ferritic matrix with dispersed pearlite grains. As variable parameters, shielding gases C10, C25 and F36 were used with flow rates of 15 and 20 liters per minute, stick-out of 15, 20 and 25 millimeters, welding speeds of 250, 300 and 350 millimeters per minute and feed of 7, 9 and 11 meters per minute. Taguchi's method with L18 experimental matrix was used and 3 welds were performed for each combination. Aiming to attest with 95% reliability the hierarchy of influence on the result, analysis of variance (ANOVA) was performed, with experimental confirmation through the one-factor-at-a-time (OFAT) method. Following the statistical analysis, experimental proof was carried out using the one-factor-at-a-time (OFAT) method, where the greatest influence parameter was kept constant, while changing the others. OFAT method resulting combinations were submitted to deposited yield, dilution, hardness and microscopy analyses. The constituent phases and impacts on the heat-affected zone (HTA) hardness resulting from the heat input optimization were also evidenced. Results showed shielding gas composition as results greatest influence parameter, with 76% influence on the ANOVA. Taguchi's method optimized combination consisted of using C10 gas, 15 liters per minute flow rate, 20 millimeters stick-out and 350 millimeters per minute welding speed. Optimized combination provided a thermal efficiency of 62%, 36,7% dilution and 88,6% deposited yield, however a reduction in hardness was observed in the HAZ, in the order of 10.2 HV in relation to base metal hardness. Metallographic analyzes showed aligned second-phase ferrite and granular bainite in the HAZ-GG and grain refining with pearlite and ferrite phases in the HAZ-GR.

Keywords: GMAW, OFAT, Taguchi Method, Thermal Efficiency, Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração esquemática da soldagem por fusão.....	26
Figura 2 - Representação esquemática do processo de soldagem GMAW utilizando corrente contínua e polaridade indireta.	28
Figura 3 - Energia de ionização ao longo da tabela periódica.....	31
Figura 4 - Influência do gás de proteção no perfil do cordão de solda do processo GMAW.....	32
Figura 5 - Representação da distância entre bico de contato e a peça.....	35
Figura 6 - Classificação de arames tubulares conforme AWS 5.28.....	36
Figura 7 - Representação da distribuição de energia na soldagem a arco elétrico considerando um eletrodo não consumível.	38
Figura 8 - Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe. 41	
Figura 9 - Curvas de repartição térmica	41
Figura 10 - Macroestrutura esquemática da sessão transversal de uma junta soldada... 42	
Figura 11 - Princípio operacional do calorímetro de efeito Seebeck.	43
Figura 12 - a) Montagem do calorímetro de caixa fechada; b) localização dos termopares e sentido de soldagem.....	44
Figura 13 - Calorímetro de Nitrogênio Líquido utilizado por Kenney, Miller e Smartt. (1998).	45
Figura 14 - Calorímetro de Essers e Walter.	45
Figura 15 - Calorímetro com fluxo contínuo de água.	46
Figura 16 - Sinais de temperatura esperados no calorímetro de fluxo contínuo.	46
Figura 17 - Calorímetro proposto por Kuntz (2017). a) Vista Isométrica. b) Visita explodida. c) Vetores de velocidade. d) Linhas de fluxo.	47
Figura 18 - Efeito da extensão livre do eletrodo na taxa de deposição.	48
Figura 19 - Medida da diluição na seção transversal de um cordão de (a) um cordão depositado sobre chapa e (b) uma solda de topo.....	49
Figura 20 - Crescimento epitaxial dos grãos: a) Solidificação da poça de fusão, vista de cima e corte transversa; b) Fronteira entre a ZTA e a ZF conforme linha pontilhada.....	50
Figura 21 - Microestrutura do metal de solda mostrando diferentes constituintes microestruturais.....	52
Figura 22 - Representação esquemática com a localização das sub-regiões da ZTA	54

Figura 23 - Microestrutura da ZTA para soldagem de aço com baixo carbono.....	55
Figura 24 - Fluxograma de etapas do experimento	61
Figura 25 - Dimensões dos corpos de prova para soldagem.	64
Figura 26 - Célula de solda.....	65
Figura 27 - Calorímetro.	66
Figura 28 - Interpretação da notação das matrizes ortogonais.	68
Figura 29 - Localização dos corpos de prova para uma junta de topo.	71
Figura 30 - Exemplos de regiões para teste de dureza.	72
Figura 31 - Áreas e dimensões para cálculo da diluição.	72
Figura 32 - Procedimento de mudança de orientação durante o lixamento.....	73
Figura 33 - Pontos de avaliação da microestrutura	74
Figura 34 - Curvas de temperatura de entrada e saída de água.	75
Figura 35 - Curva de variação da temperatura durante a soldagem para condição 1.	76
Figura 36 - Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico (Taguchi). 79	
Figura 37 - Razão S/N da eficiência térmica para os parâmetros de soldagem analisados.	82
Figura 38 - Eficiência térmica de soldagem em função da composição do gás.....	83
Figura 39 - Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico.....	84
Figura 40 - Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico (Taguchi vs OFAT).	85
Figura 41 - Correlação entre corrente de soldagem e profundidade de penetração (DL1).	92
Figura 42 - Comparativo entre Eficiência Térmica e Diluição.	93
Figura 43 - Dureza HV5 para cada condição de soldagem.	94
Figura 44 - Comparativo do perfil de dureza de cada ponto para as 8 combinações	95
Figura 45 - Identificação das regiões de realização da microscopia ótica.....	98
Figura 46 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 1: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.	98
Figura 47 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 2: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 300 mm/min.	99

Figura 48 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 3: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 250 mm/min.	99
Figura 49 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 4: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 20 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.	100
Figura 50 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 5: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 15 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min..	100
Figura 51 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 6: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 25 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.	101
Figura 52 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 7: Gás = C10; Vel. Alim. = 9 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.	101
Figura 53 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 8: Gás = C10; Vel. Alim. = 11 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min. Fonte: Próprio autor.	102
Figura 54 - MEV do metal base (MB). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x. .	103
Figura 55 - MEV da ZTA de grãos refinados (ZTA-GR). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.	104
Figura 56 - MEV da ZTA de grãos grosseiros (ZTA-GG). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.	104
Figura 57 - MEV da zona fundida (ZF). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.	105
Figura 58 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 1 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.	117
Figura 59 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 2 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.	117
Figura 60 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 3 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de	

	Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	117
Figura 61 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 4 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	118
Figura 62 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 5 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	118
Figura 63 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 6 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	118
Figura 64 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 7 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	119
Figura 65 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 8 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	119
Figura 66 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 9 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	119
Figura 67 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 10 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	120
Figura 68 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 11 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	120

- Figura 69 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 12 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 120
- Figura 70 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 13 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 121
- Figura 71 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 14 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 121
- Figura 72 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 15 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 121
- Figura 73 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 16 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 122
- Figura 74 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 17 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 122
- Figura 75 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 18 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 122
- Figura 76 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 1 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts.
b) Variação de T..... 123
- Figura 77 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 2 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de

	Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	123
Figura 78 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 3 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	123
Figura 79 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 4 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	124
Figura 80 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 5 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	124
Figura 81 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 6 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	124
Figura 82 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 7 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	125
Figura 83 -	Curvas de Temperatura condição de soldagem 8 - Método OFAT: Gás de proteção C10; Stick-out 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.....	125
Figura 85 -	Certificado de Inspeção de matéria prima: aço DIN EN 10025-2.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Recomendações de soldagem.....	27
Tabela 2 - Propriedades dos gases de proteção	30
Tabela 3 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem.	39
Tabela 4 - Constituintes da zona fundida de aços ferríticos observados ao microscópio ótico, segundo o sistema do IIW.....	51
Tabela 5 - Relação entre razão S/N, objetivo do experimento, características dos dados e equações.....	57
Tabela 6 - Valores obtidos em estudos anteriores para eficiência térmica de soldagem.	58
Tabela 7 - Referências de aplicação do método de Taguchi.	60
Tabela 8 - Composição química dos corpos de prova.	62
Tabela 9 - Propriedades mecânicas metal de base conforme certificado de inspeção. ..	63
Tabela 10 - Composição química do arame de solda ER70S-6.	63
Tabela 11 - Valores mínimos para propriedades mecânicas do ER 70S-6 conforme AWS 5.18.	63
Tabela 12 - Nomenclatura e composição química dos gases de proteção utilizados.	64
Tabela 13 - Parâmetros variáveis utilizados no estudo.....	67
Tabela 14 - Combinações para matriz ortogonal.....	68
Tabela 15 - Condições experimentais.....	69
Tabela 16 - Exemplo de aplicação do Método OFAT.....	70
Tabela 17 - Resultados de aporte térmico e eficiência térmica calculada.....	77
Tabela 18 - Resultados das Médias e Razão Sinal conforme Taguchi.....	80
Tabela 19 - Análise de variância (ANOVA).	81
Tabela 20 - Melhor combinação de parâmetros para máxima eficiência térmica.	82
Tabela 21 - Resultados obtidos pelo método de validação OFAT.	84
Tabela 22 - Taxa de deposição de arame e rendimento depositado.	86
Tabela 23 - Macrografias das 8 condições de soldagem do método OFAT.....	88
Tabela 24 - Macrografias das 8 condições de soldagem do método OFAT.....	89
Tabela 25 - Resultados obtidos para diluição.....	91
Tabela 26 - Comparativo das variações na dureza em relação ao metal base.	96
Tabela 27 - Desvio padrão da perda de dureza para regiões equivalentes.	97

LISTA DE SIGLAS

AM	Constituinte martensita-austenita retida
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
AWS	<i>American Welding Society</i> - Sociedade Americana de Soldagem
BG	Bainita Granular
DBCP	Distância do Bico de Contato
DOE	<i>Design Of Experiments</i> - Planejamento de Experimentos
EBW	<i>Electron Beam Welding</i> - Soldagem por Feixe de Elétrons
ESW	<i>Electroslag Welding</i> - Soldagem por Eletroescória
FA	Ferrita Acicular
FC	Agregado Ferrita Carboneto
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i> - Soldagem a Arco com Arame Tubular
FS(A)	Ferrita com Segunda Fase Alinhada
FS(NA)	Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada
GMAW	<i>Gas-Metal Arc Welding</i> - Soldagem com Atmosfera Gasosa de Proteção
GTAW	<i>Gas-Tungsten Arc Welding</i> - Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio e Gás de Proteção
IIW	<i>International Institute of Welding</i> - Instituto Internacional de Soldagem
LBW	<i>Laser Beam Welding</i> - Soldagem a Laser
M	Martensita
MAG	Metal Ativo Gás
MB	Metal de Base
MIG	Metal Inerte Gás
OFAT	<i>One Factor At a Time</i> - Um Fator por Vez
OAW	<i>Oxyacetylene Welding</i> - Soldagem com Oxiacetileno
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> - Soldagem a Plasma
PF(G)	Ferrita de Contorno de Grão

PF(I)	Ferrita Poligonal Intragranular
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> - Soldagem a Arco Submerso
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> - Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido
TIG	Tungstênio Inerte Gás
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTA-GG	ZTA de grãos grosseiros
ZTA-GR	ZTA de grãos refinados
ZTA-IC	ZTA Intercrítica
ZTA-SC	ZTA subcrítica

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt	Intervalo de aquisição de temperaturas
δ	Diluição
ϕ	Taxa de resfriamento
ρ	Densidade
A	Ampere
Al	Alumínio
Ar	Argônio
AT	Aporte Térmico
CO_2	Dióxido de carbono
c_p	Calor específico da água
Cr	Cromo
Es	Energia de Soldagem
eV/Molécula	Eletrovolt por molécula
g/l	Gramas por litro
h	Hora
H_2	Hidrogênio
He	Hélio
HV	Dureza vickers
I	Corrente
J	Joule
J/kg.K	Joule por quilograma Kelvin
K	Kelvin
kg	Quilograma
kg/h	Quilograma por hora
kg/h	Quilogramas por hora

l/min	Litros por minuto
m	Metros
m^3/s	Metro cúbico por segundo
mf	Massa final
mi	Massa inicial
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro/segundo
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
mW/m.K	Miliwatt por metro Kelvin
n	Rendimento térmico
N_2	Nitrogênio
Ni	Níquel
O_2	Oxigênio
°C	Graus Celsius
P	Potência
Qa	Calor aportado
S/N	Razão sinal-ruído
Si	Silício
Tc	Temperatura Crítica
tc	Tempo de permanência
T'c	Temperatura de base
TD	Taxa de deposição
Te	Temperatura de entrada
Tf	Temperatura de Fusão
Ti	Titânio
Tp	Temperatura de Pico

Ts	Temperatura de saída
ts	Tempo de soldagem
U	Tensão
V	Vazão de água
va	Velocidade de alimentação
Vs	Velocidade de Soldagem
W	Watt
Zr	Zircônio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA.....	24
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos.....	24
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	25
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM.....	26
2.1.1	Soldagem GMAW.....	28
2.2	PARÂMETROS DO PROCESSO GMAW.....	29
2.3	APORTE TÉRMICO E ENERGIA DE SOLDAGEM.....	37
2.3.1	Ciclo Térmico na Soldagem.....	40
2.3.2	Calorimetria e Ciclo térmico	42
2.4	AVALIAÇÃO DE SOLDAGEM	47
2.4.1	Taxa de Deposição de Arame	47
2.4.2	Diluição.....	49
2.4.3	Características da Zona Fundida (ZF).....	49
2.4.4	Características da Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	53
2.5	PROJETO DE EXPERIMENTO (DOE) – TAGUCHI	55
2.6	HISTÓRICO DE PESQUISAS SOBRE CALORIMETRIA E MÉTODO DE TAGUCHI APLICADOS AO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	57
2.6.1	Aplicação da Calorimetria na Avaliação da Eficiência Térmica de Soldagem	57
2.6.2	Aplicação do método de Taguchi em Projetos de Experimentos	59
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1	MATERIAIS	62
3.1.1	Metal Base.....	62
3.1.2	Metal de Adição	63
3.1.3	Gases de Proteção.....	63

3.1.4	Preparação dos Corpos de Prova	64
3.2	EQUIPAMENTOS.....	64
3.2.1	Equipamento de Soldagem	65
3.2.2	Calorímetro	65
3.3	PARAMETROS DE SOLDAGEM.....	67
3.4	PROJETO DE EXPERIMENTO (DOE).....	67
3.4.1	Método de Taguchi	67
3.4.2	Método OFAT	69
3.5	MÉTODO DE ANÁLISE.....	70
3.5.1	Taxa de Deposição	70
3.5.2	Ensaio de Dureza	70
3.5.3	Macrografia e Diluição	72
3.5.4	Microscopia Ótica	73
3.5.5	Microscopia Eletrônica de Varredura	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	APORTE TÉRMICO.....	75
4.1.1	Resultados Taguchi	79
4.1.2	Resultados OFAT	83
4.2	ANÁLISES METALÚRGICAS.....	86
4.2.1	Taxa de Deposição	86
4.2.2	Diluição	87
4.2.3	Ensaio de Dureza	93
4.2.4	Metalografia: Macrografia e Microscopia Ótica	97
4.2.5	Metalografia: Microscopia Eletrônica de Varredura	103
5	CONCLUSÕES	106
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A - GRÁFICOS DE TEMPERATURA – MÉTODO TAGUCHI	117
	APÊNDICE B - GRÁFICOS DE TEMPERATURA - MÉTODO OFAT	123
	ANEXO A – CERTIFICADO DE INSPEÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	126

1 INTRODUÇÃO

O aumento do aporte de tecnologia nos processos de fabricação, a demanda de componentes com geometrias cada vez mais complexas e com restrições dimensionais cada vez mais estreitas associados à competitividade crescente do mercado, exige que as empresas que buscam perpetuar-se estejam à frente na geração de conhecimento e inovação.

Os processos de soldagem atualmente ocupam uma posição de extrema relevância nas operações das indústrias do ramo metalmeccânico e devido à sua ampla aplicação há a necessidade de um maior entendimento da influência de cada parâmetro no processo. Os processos de soldagem à arco elétrico com gás de proteção (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), os quais também são conhecidos como processos de soldagem MIG/MAG, são os mais utilizados industrialmente, portanto empresas que conseguirem utilizar eficientemente os recursos envolvidos nestes processos possuirão um importante diferencial competitivo.

Segundo Búrigo *et al.* (2009) e Sgarbi (2013), a principal fonte de energia do processo de soldagem é o calor, o qual precisa ser aplicado com intensidade e quantidade necessárias para uma eficiente junta soldada, bem como a aplicação de calor sobre o material interfere diretamente em suas propriedades mecânicas, além de influenciar no comportamento metalúrgico do material.

O método de obtenção do aporte térmico nos processos a arco elétrico é função da tensão, corrente e velocidade de soldagem, multiplicados pelo coeficiente de eficiência térmica, o qual comumente é adotado conforme a norma específica para estes processos (DIN EN 1011-1, 2013). No entanto estudos utilizando a calorimetria para determinar os valores reais do coeficiente de eficiência térmica comprovaram que os valores apresentados na norma não são constantes e podem variar em função dos parâmetros de soldagem utilizados (SGARBI, 2013).

Determinar os coeficientes de eficiência térmica através da calorimetria tem como objetivo aproximar os valores simulados de aporte térmico aos realmente obtidos, pois a divergência entre os parâmetros esperados e obtidos causam alteração na velocidade de solidificação e resfriamento do material, podendo interferir na estrutura cristalina do material, na extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e nas

propriedades mecânicas da união soldada, causando alterações na resistência à tração e na dureza (QUINTINO *et al.*, 2013).

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Qual a combinação de parâmetros de soldagem que proporcionam maior eficiência térmica no processo GMAW para o aço DIN EN 10025-2 S275JR-AR?

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho foram subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos, conforme descrito a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar a otimização da seleção de parâmetros de soldagem: gás de proteção, vazão do gás de proteção, velocidade de avanço, velocidade de alimentação de arame e *stick-out*, e correlacionar suas variações com os valores de eficiência térmica do processo de soldagem GMAW.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos abaixo listados foram definidos visando o atingimento do objetivo geral do trabalho:

- Determinar qual combinação de parâmetros apresenta maior eficiência térmica através do Método de Taguchi;
- Determinar quais parâmetros exercem maior influência sobre os resultados da eficiência térmica;
- Validar os resultados do Método de Taguchi através do Método *one-factor-at-a-time* (OFAT);
- Avaliar as propriedades da soldagem através de ensaios de dureza, diluição e deposição;
- Realizar análise metalográfica da região soldada: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada ZTA e metal de base (MB).

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A principal contribuição desse estudo consiste na criação de uma base de conhecimento para a seleção de parâmetros para os processos de soldagem GMAW para o aço DIN EN 10025-2 S275JR-AR atualmente implementados na empresa Bruning Tecnometal. Além disso, esse estudo também irá contribuir para difusão da utilização de métodos estatísticos e design robusto de experimentos dentro da indústria metalmeccânica da região.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos, sendo o primeiro capítulo destinado a parte introdutória, onde apresentam-se a temática do estudo e seus objetivos.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos, formulações e embasamento teórico além de um breve histórico de estudos correlacionados à eficiência térmica do processo de soldagem e influência dos parâmetros de soldagem utilizados no estudo.

O capítulo 3 refere-se aos materiais e métodos utilizados, nele detalham-se todos os procedimentos experimentais, além dos equipamentos, meios de controle e as definições para os métodos de Taguchi e OFAT.

No capítulo 4 são apresentadas as análises e resultados obtidos nos ensaios, iniciando com as combinações de parâmetros a serem utilizados em cada soldagem, passando pelas análises de dureza, diluição, deposição até as análises metalúrgicas das regiões de soldagem.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas através dos ensaios, análises e discussão.

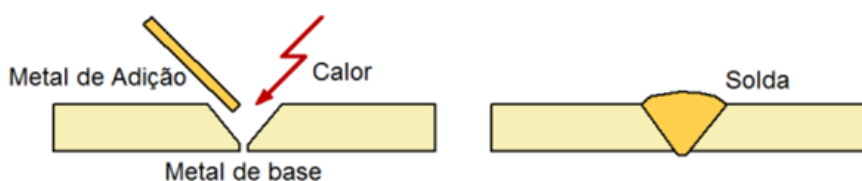
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentados conceitos relacionados ao processo de soldagem GMAW, parâmetros que influenciam no processo de soldagem, influência do ciclo térmico na soldagem e projeto de experimento.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense, (2011) o processo de soldagem consiste em unir dois materiais, assegurando na região soldada a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, onde a força de ligação entre eles possua natureza similar à força de ligação que mantém os materiais em estado sólido, deste modo pode-se definir que a soldagem ocorre quando os materiais base e o metal de adição, se este for utilizado, ligam-se quimicamente. Esta ligação química pode ocorrer basicamente por dois mecanismos, pressão e fusão. A soldagem por pressão (ou deformação) compreende, dentre outros processos a união por forjamento, ultrassom, fricção difusão e explosão. Já soldagem por fusão (Figura 1) consiste na aplicação localizada de calor na região de união para a fusão do metal base e do metal de adição, unindo permanentemente os materiais pela solidificação do metal fundido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2012).

Figura 1 - Ilustração esquemática da soldagem por fusão.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, (2011)

Segundo Kou (2003) o processo de solda por fusão pode ser classificado em três principais grupos:

- **Soldagem a Gás (*Gas Welding*)**
Soldagem com Oxiacetileno (*Oxyacetylene welding – OAW*);

- **Soldagem a Arco Elétrico (*Arc Welding*)**

Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*);

Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio e Gás de Proteção (*Gas-Tungsten Arc Welding – GTAW*);

Soldagem a Plasma (*Plasma Arc Welding – PAW*);

Soldagem a Arco com Gás de Proteção (*Gas-Metal Arc Welding – GMAW*);

Soldagem a Arco com Arame Tubular (*Flux-Cored Arc Welding – FCAW*);

Soldagem a Arco Submerso (*Submerged Arc Welding – SAW*);

Soldagem por Eletroslag (*Electroslag Welding – ESW*);

- **Soldagem por Feixe de Alta Energia (*High-Energy Beam Welding*)**

Soldagem por Feixe de Elétrons (*Electron Beam Welding – EBW*);

Soldagem a Laser (*Laser Beam Welding – LBW*);

Dentre todos os processos de soldagem por fusão supracitados, o GMAW consiste no processo mais utilizado na indústria, visto este processo poder ser utilizado para realizar a soldagem de aços carbono, aços de baixa liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, ligas à base de níquel e ligas de alumínio, abrangendo uma ampla faixa de espessuras, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Recomendações de soldagem

Material	Espessura	SMAW	SAW	GMAW	FCAW	GTAW	PAW	ESW	OFW	EBW	LBW
Aços carbono	até 3 mm	X	X	X		X			X	X	X
	3-6 mm	X	X	X	X	X			X	X	X
	6-19 mm	X	X	X	X				X	X	X
	19 mm ou maior	X	X	X	X			X	X	X	
Aços de baixa liga	até 3 mm	X	X	X		X			X	X	X
	3-6 mm	X	X	X	X	X				X	X
	6-19 mm	X	X	X	X					X	X
	19 mm ou maior	X	X	X	X			X		X	

Fonte: Adaptador de Kou (2003).

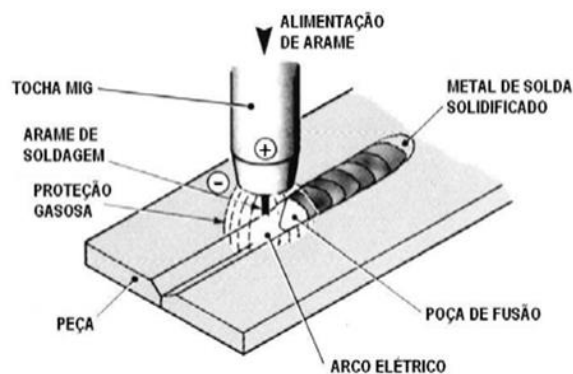
2.1.1 Soldagem GMAW

O conceito básico do processo de soldagem GMAW foi introduzido em meados de 1920, tendo sua patente e viabilidade comercial registradas em 1948 (ESAB, 2005; DOS SANTOS, 2015; ALVES, 2016), este processo de soldagem consiste em realizar a soldagem dos materiais através de um arco elétrico gerado entre a peça e um o eletrodo metálico, também chamado de arame de soldagem (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2012).

Neste processo o arco elétrico funde continuamente o eletrodo o qual alimenta a poça de fusão, visto o eletrodo não possuir revestimento há a necessidade de proteção da região de soldagem contra contaminação atmosférica, a qual é realizada através da criação de uma atmosfera gasosa de proteção, formada pela alimentação de um gás ou mistura de gases (TEIXEIRA, 2011).

O processo de soldagem com atmosfera gasosa de proteção inicialmente foi empregado na soldagem de alumínio com a utilização de gás de proteção inerte, dando origem ao termo MIG (*Metal Inert Gas*). Desenvolvimentos subsequentes permitiram o emprego deste processo em uma ampla gama de materiais, bem como a utilização de gases de proteção reativos ou ativos e mistura de gases (ESAB, 2005), dando origem ao termo MAG (*Metal Active Gas*). Atualmente o termo GMAW (*Gas-Metal Arc Welding*) é formalmente aceito para o processo de soldagem, visto a possibilidade de utilização tanto de gases inertes (Argônio ou Hélio) e gases ativos (Dióxido de Carbono, Oxigênio e Nitrogênio), podendo ser utilizadas misturas destes gases (ESAB, 2005; FOGLIATTO, 2013). A Figura 2 representa esquematicamente o processo GMAW.

Figura 2 - Representação esquemática do processo de soldagem GMAW utilizando corrente contínua e polaridade indireta.



Fonte: ESAB (2005).

2.2 PARÂMETROS DO PROCESSO GMAW

O processo de soldagem GMAW utiliza normalmente corrente contínua com polaridade invertida (CC-), ou seja, com o arame de soldagem conectado ao polo positivo (ânodo) e a peça soldada ao polo negativo (cátodo), fazendo com que o sentido do fluxo de elétrons seja do metal de base para o arame eletrodo. Nesta configuração a emissão de elétrons ocorre pelo fenômeno denominado emissão de campo, emitindo elétrons do arrancamento da superfície do metal base e da limpeza catódica, desintegração dos óxidos superficiais do metal de base (REIS E SCOTTI 2007; SCOTTI E PONOMAREV, 2008). Segundo ESAB (2005) tensões de 15 volts a 32 volts e correntes de 50 amperes até correntes superiores a 600 amperes são comumente usadas neste processo.

Dentre os principais parâmetros que influenciam no processo de soldagem destacam-se o gás de proteção, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação de arame, comprimento do eletrodo (*Stick-Out*) e o arame de soldagem. Esses serão descritos em maiores detalhes a seguir.

Gás de Proteção

O principal objetivo da utilização de atmosfera protetiva no processo GMAW é a proteção da poça de fusão evitando contaminações através da expulsão do ar atmosférico da região de soldagem (ESAB, 2005; BELTRAN, 2019).

O ar atmosférico quando presente na região de soldagem causa contaminação pela presença em sua composição de nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor de água (H_2O). Em soldagem de aços o nitrogênio é dissolvido no metal fundido, mas durante a solidificação a solubilidade diminui gerando gases que originam porosidades, além de reduzir a ductilidade e tenacidade podendo causar fissuras. Grandes concentrações de oxigênio podem proporcionar inclusões na soldagem através da ligação com elementos de liga, a ligação com o carbono presente no aço favorece a formação de monóxido e dióxido de carbono, os quais podem ficar aprisionado no metal solidificado causando porosidades. Do mesmo modo o hidrogênio gasoso (H_2), formado pelos átomos de hidrogênio (H) presentes no vapor d'água podem ficar aprisionados na zona fundida e proporcionar o surgimento de trincas à frio (ESAB, 2005; LIMA, 2019; BELTRAN 2019).

Os gases de proteção podem ser inertes, ativos ou uma mistura com sua escolha definida pelo material base, arame de soldagem, posição e preparação da junta. Os gases mais utilizados são o argônio (Ar), hélio (He), dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2), onde para a soldagem em atmosfera inerte (MIG) utilizam-se o argônio, hélio ou uma mistura destes dois gases. Já para soldagem com atmosfera ativa (MAG) os principais gases utilizados são o dióxido de carbono puro, misturas de argônio com dióxido de carbono e/ou oxigênio, e em alguns casos, aplicações de misturas com baixos teores de nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) podem ser adotadas (ESAB 2005; DOS SANTOS, 2015; ALMEIDA *et al*, 2018).

O gás de proteção também apresenta influência sobre as características do arco elétrico, forma de transferência de metal para a poça de fusão e sobre o perfil de penetração e aspecto visual do cordão de solda, deste modo além da compatibilidade química com o metal base e arame de soldagem para adequada seleção do gás de proteção se faz necessário o conhecimento das propriedades físicas como densidade, potencial de ionização ou dissociação e condutividade térmica (ESAB 2005; FISCHER 2011). A Tabela 2 apresenta as principais características dos gases de proteção mais utilizados.

Tabela 2 - Propriedades dos gases de proteção

Gás	Comportamento na Temp. de Soldagem	Densidade [g/L]	Potencial Ionização [eV/Molécula]	Potencial Dissociação [eV/Molécula]	Condutividade Térmica [mW/m.K]
He	Inerte	0,17	24,6	-	142,6
Ar	Inerte	1,66	15,8	-	16,4
CO_2	Ativo	1,85	14,4	4,3	14,7
H_2	Ativo	0,08	13,6	4,5	168,3
O_2	Ativo	1,85	13,6	5,1	24,2
N_2	Ativo	1,25	14,5	9,8	24,0

Fonte: Adaptado de Fischer (2011) e Ferreira (2018).

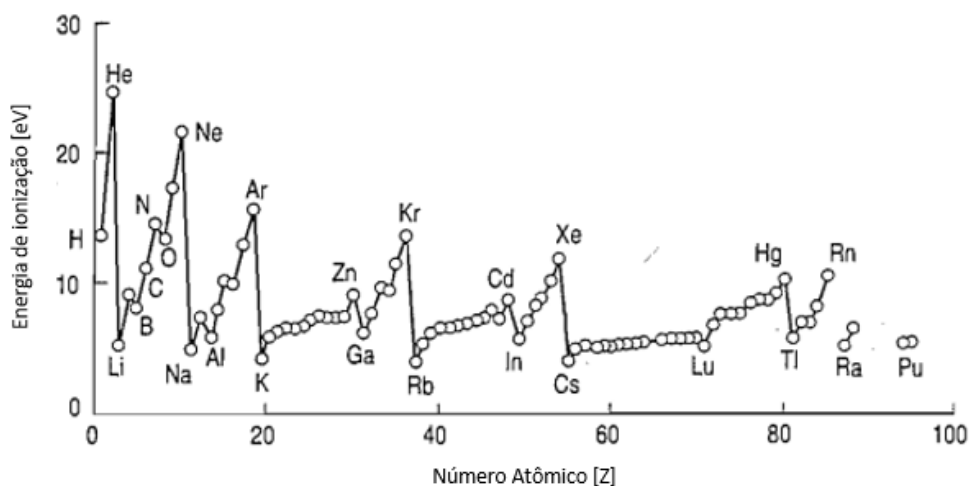
Representada pela massa dividida pelo seu volume, a densidade do gás de proteção tem sua principal influência na vazão necessária para gerar a adequada proteção do arco elétrico e da poça de fusão. Gases mais pesados como o argônio, o

oxigênio e o dióxido de carbono necessitam de uma menor vazão para soldas planas em comparação com o hélio. No entanto para soldagens em posições alternativas, como a soldagem sobre a cabeça, gases de menor densidade demandam vazão mínima para adequada proteção do processo (FISCHER, 2011; FERREIRA, 2018).

Expresso em elétron-volt (eV), o potencial de ionização mensura a energia mínima necessária para retirar um elétron da última camada de valência de um átomo, tornando-o um íon positivo, ou seja, um cátion. A energia de ionização diminui quanto maior o nível do átomo, ou seja, quanto maior o número de camadas eletrônicas, pois a energia de ionização diminui com o aumento da distância entre o núcleo e a última camada e valência, em contrapartida a energia de ionização aumenta com o aumento o peso atômico, visto ter-se um número maior de prótons, o que gera uma maior força de atração com os elétrons (SHRIVER; ATKINS, 2003; FERREIRA, 2018).

Conforme com Fischer (2011) e Ferreira (2018), a abertura e estabilidade do arco elétrico são fortemente influenciados pelo potencial de ionização, como exemplo pode-se comparar os átomos de hélio e argônio conforme dados da Figura 3. O hélio apresenta maior energia de ionização que o argônio, apresentando maior dificuldade de abertura de arco e estabilização do processo.

Figura 3 - Energia de ionização ao longo da tabela periódica.



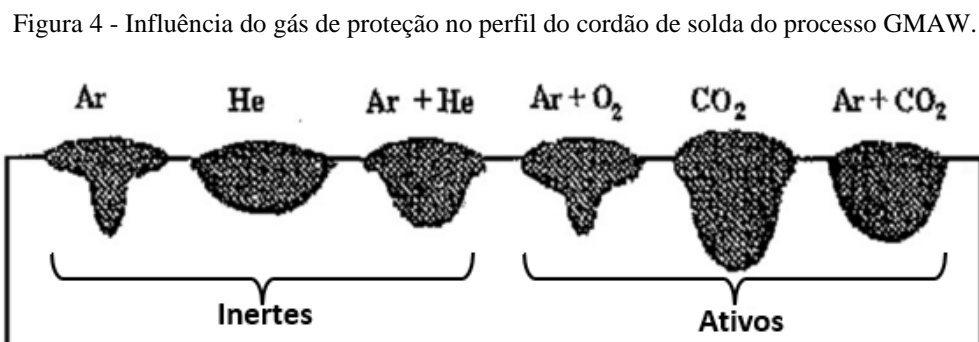
Fonte: Adaptado de Shriver e Atkins (2003).

Conforme *The Linde Group*®, Tatagiba (2015) e Ferreira (2018) para a manutenção do arco elétrico durante a soldagem com atmosfera protegida com gases moleculares há um consumo energético maior, isso ocorre porque gases constituídos de

mais de um átomo, como por exemplo o dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio, são inicialmente dissociados, reação que possui característica endotérmica. No entanto próximo à região de soldagem os átomos dissociados reagem com o metal de base combinando-se ou entre si, essa recombinação possui característica exotérmica aumentando o aporte térmico na região de soldagem.

A condutividade térmica de um gás na temperatura de soldagem consiste na capacidade do mesmo em conduzir calor, essa propriedade tem grande influência sobre a tensão necessária para manter o arco aberto. Quanto maior a condutividade térmica do gás de proteção utilizado maior a parcela de calor transmitida no sentido radial durante a soldagem, gerando uma poça de fusão maior e mais distribuída demandando maiores tensões de soldagem para manter o processo estável (ESAB 2005; SCOTTI E PONOMAREV, 2008; FERREIRA, 2018).

A Figura 4 apresenta o perfil de cordão e profundidade de penetração obtidos para os gases mais frequentemente utilizados no processo GMAW.



Fonte: Adaptado de Áquila (2012).

Gases Utilizados no Processo GMAW com Atmosfera Ativa

Conforme mencionado anteriormente, os gases mais utilizados no processo GMAW com atmosfera de proteção ativa são o argônio e hélio com adições de dióxido de carbono e/ou oxigênio, a seguir mais detalhes sobre a influência específica de cada um destes gases são apresentados.

O argônio (Ar) por ser um gás inerte, não reage com outros materiais sendo adequado para soldagem de materiais sensíveis como alumínio. No cordão de solda promove a retenção dos elementos de liga melhorando as propriedades mecânicas, além de facilitar a abertura e estabilidade do arco elétrico produzindo uma concentração da

energia do arco elétrico em uma pequena área resultando em um cordão de solda com maior penetração no centro que nas bordas (ESAB,2005; FERREIRA, 2007; LIMA, 2019; BELTRAN, 2019). Em soldagens de aços de baixo carbono com atmosfera de proteção ativa recomenda-se a utilização do argônio com adição de pequenas porcentagens de oxigênio ou dióxido de carbono (ALMEIDA *et al*, 2018; BELTRAN, 2019).

O dióxido de carbono puro (CO_2) apesar de possuir características de gás inerte à temperatura ambiente, na temperatura de soldagem comporta-se como gás ativo pois o calor gerado pelo arco elétrico promove a dissociação do mesmo em monóxido de carbono e oxigênio livre produzindo efeito oxidante no processo de soldagem, demandando a utilização de arames de soldagem que possuam elementos de liga desoxidantes. Como vantagens do dióxido de carbono destacam-se a possibilidade de empregar maior velocidade de soldagem e a obtenção de um perfil de penetração mais largo e arredondado, porém promovendo uma maior incidência de respingos de solda, além de uma maior tendência de formação de poros e oxidação em comparação com o argônio puro (ESAB,2005; FERREIRA, 2007; ALMEIDA *et al*, 2018; BELTRAN, 2019).

Misturas de dióxido de carbono com argônio são largamente utilizadas em soldagens de aços de baixa liga com a finalidade de manter o bom perfil de penetração apresentado pelo dióxido de carbono, porém reduzindo a ocorrência de respingos e a perda de tenacidade que a utilização do dióxido de carbono puro produz (ESAB,2005; BELTRAN, 2019).

O oxigênio (O_2) promove a oxidação da soldagem e a perda de elementos de liga, demandando, assim como o dióxido de carbono, a utilização de arame de soldagem com adição de elementos desoxidantes. Por ser duas a três vezes mais oxidante que o dióxido de carbono, o oxigênio não é utilizado puro, mas quando misturado ao argônio em pequenas quantidades promove uma melhor molhabilidade da poça de fusão, através da redução da tensão superficial no contato entre a poça de fusão e o metal (FERREIRA, 2007; FISCHER, 2011; ALMEIDA, 2015; LIMA, 2019).

Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem consiste na razão entre o deslocamento do arco elétrico ao longo da junta soldada e o tempo transcorrido para realizar o percurso, normalmente expressa em cm/min ou mm/min. Possui grande influência na quantidade de calor transferido para o metal base, na dimensão da poça de fusão, profundidade de penetração e taxa de deposição. Conforme a velocidade de soldagem diminui a deposição de material aumenta, no entanto promove o aumento da poça de fusão reduzindo a profundidade de penetração, aumentando o reforço e o aporte térmico excessivo pode comprometer as propriedades mecânicas da junta soldada. Em contrapartida, o aumento excessivo da velocidade de soldagem favorece a ocorrência de defeitos metalúrgicos, como o aquecimento insuficiente do metal base ocasionando a falta de fusão na solda. (ESAB,2005; SCHNEIDER, 2014; MARON, 2018; BELTRAN, 2019).

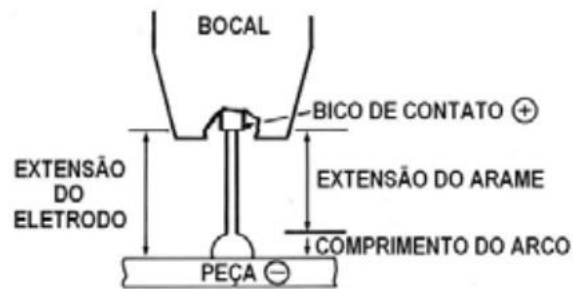
Velocidade de Alimentação de Arame

A velocidade de alimentação de arame possui correlação quase linear com a corrente de soldagem, ou seja, um aumento ou diminuição da velocidade de alimentação de arame acarreta o aumento ou diminuição proporcional na corrente elétrica, pois a fonte de tensão atende a quantidade de calor necessário para fundir o arame mantendo a voltagem definida. Mantendo-se todas as variáveis constantes o aumento da velocidade de alimentação resulta em uma maior profundidade de penetração, maior taxa de deposição (kg/h) e um reforço do cordão de solda (ESAB,2005; ALVES, 2009).

Extensão do Arame Eletrodo (*Stick-Out*)

A extensão do arame (*Stick-out*) é medido entre o metal base ou peça e o último ponto de contato elétrico no arame de solda com a tocha, região que normalmente coincide com a extremidade do bico de contato, podendo ser denominada também como distância do bico de contato e a peça (DBCP), conforme representado na Figura 5 (ESAB,2005).

Figura 5 - Representação da distância entre bico de contato e a peça.



Fonte: ESAB (2005).

O aumento do *stick-out* aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, o qual aquecerá por mais tempo através do efeito Joule, resultando em uma menor corrente necessária para fusão do arame ou, para uma mesma corrente, uma maior taxa de fusão e de deposição e, conseqüentemente, maior consumo do arame de solda (ALVES, 2009; PETRACHI, 2021).

Arames de Soldagem

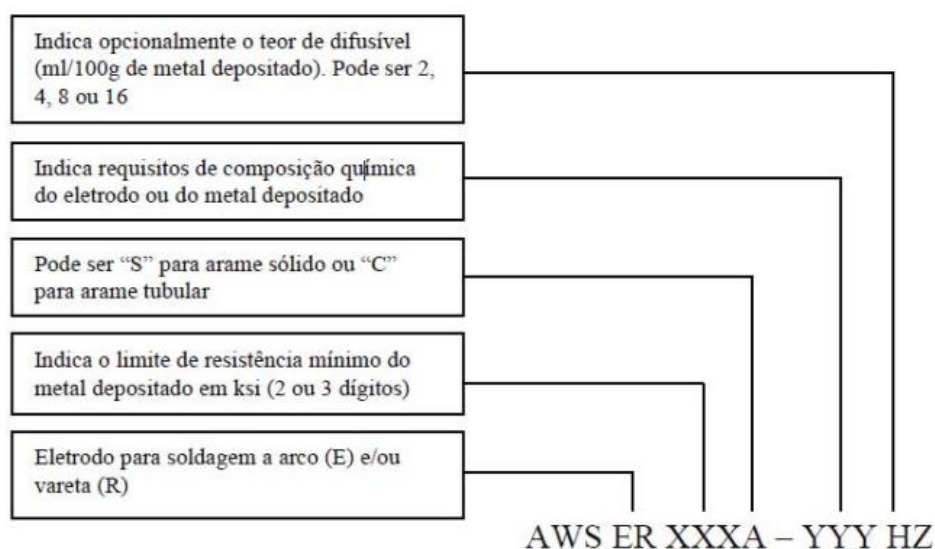
Assim como o gás de proteção, o arame de soldagem ou arame eletrodo consiste em um dos principais consumíveis do processo de soldagem GMAW. Sua adequada seleção é fundamental na qualidade da soldagem realizada, devendo-se levar em conta a compatibilidade com a composição química do metal de base a ser soldado, a composição do gás de proteção, os requisitos de aplicação e serviço, bem como o projeto da junta soldada. (ESAB, 2005; MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2012).

Na soldagem GMAW de aços carbono adicionam-se elementos de liga ao arame de soldagem, como manganês (Mn), silício (Si), entre outros, com a finalidade de controlar a desoxidação da poça de fusão, que consiste na combinação do oxigênio presente na poça de fusão com elementos do material influenciando nas propriedades mecânicas da junta soldada, além disso a desoxidação promove o surgimento de um filme vítreo sobre o cordão de solda, esta vitrificação da superfície é indesejada quando em grandes quantidades principalmente se a solda for realizada em multipasse ou se a região passará por processo de pintura posteriormente (ESAB 2005; ALMEIDA *et al*, 2018).

Além do carbono, elemento que apresenta maior influência nas propriedades mecânicas e microestruturais, outros elementos de liga podem estar presentes no arame de soldagem, como o silício (Si), manganês (Mn), alumínio (Al), titânio (Ti), zircônio (Zr), níquel (Ni), cromo (Cr) e molibdênio (Mo). O Silício e o manganês são geralmente utilizados em valores de 0,4% a 1,0% e 1,0% a 2,0% respectivamente. faixas nas quais apresentam boa capacidade de desoxidação, o aumento do percentual de silício também aumenta a resistência mecânica da junta soldada, porém com redução na ductilidade e na tenacidade podendo aumentar a sensibilidade à fissuração, já o manganês proporciona um aumento da resistência do arame de solda com maior influência que o silício. O alumínio, titânio e zircônio, elementos com grade potencial de desoxidação, são adicionados em pequenas frações normalmente inferiores a 0,2% como teor total da soma dos três elementos. Elementos como níquel, cromo e molibdênio são normalmente adicionados com a finalidade de melhoras as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão (ESAB 2005).

Arares utilizados na soldagem de aços, possuem classificação especificada conforme norma da American Welding Society AWS.18 e AWS.28 conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Classificação de arames tubulares conforme AWS 5.28.



Fonte: Scheidmandel (2013)

2.3 APORTE TÉRMICO E ENERGIA DE SOLDAGEM

O processo de soldagem GMAW caracteriza-se pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada, onde o arco elétrico provoca a fusão do metal de adição (arame de soldagem) e metal base. A movimentação causada pelo deslocamento da tocha de soldagem provoca mudanças de estado físico no material (sólido-líquido-sólido) resultando em transformações metalúrgicas na região soldada e na sua adjacência (SCHEIDMANDEL, 2013).

As variações de temperatura experimentadas pelo material soldado causam, além da mudança de estado físico, alterações dimensionais e microestruturais localizadas, podendo originar defeitos como a perda de propriedades mecânicas (resistência, dureza, tenacidade, etc.), surgimento de trincas entre outros (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

A intensidade de uma fonte de calor em soldagem não é facilmente mensurada, sendo assim de forma alternativa utiliza-se como parâmetro de medição a energia de soldagem (E_s), que consiste na energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta soldada, conforme Equação (1) (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

$$E_s = \left(\frac{U \times I}{v_s} \right) = \frac{P}{v_s} = \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (1)$$

Onde:

U = Tensão [V];

I = corrente [A];

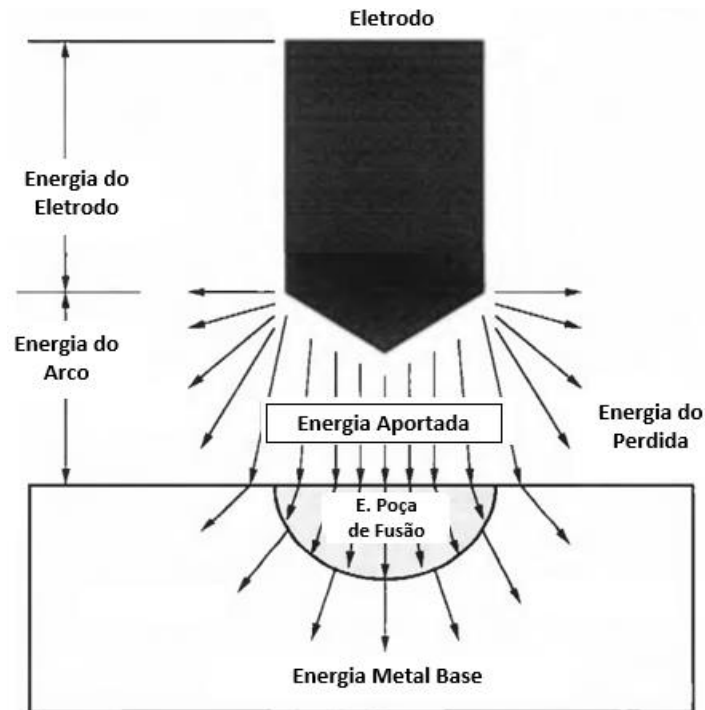
P = Potência [W]

v_s = Velocidade de soldagem [mm/s];

Conforme modelo de DuPont e Marder (1995) apresentado na Figura 7, pode-se visualizar que a energia de soldagem não é em sua totalidade transferida para a junta soldada, visto que parte do calor gerado é dissipado por meio de convecção e radiação. Além disso perdas consideráveis ocorrerem por respingos de metal de adição fundido que caem fora da região de soldagem. Em relação à energia transferida para a poça de fusão, parte é responsável pela fusão do eletrodo (arame de soldagem) e metal base e a

outra parte transmitida por condução pelo metal base aumentando sua temperatura (SGARBI, 2013; ANTONI, 2014).

Figura 7 - Representação da distribuição de energia na soldagem a arco elétrico considerando um eletrodo não consumível.



Fonte: Adaptado de DuPont e Marder (1995).

O aporte térmico (AT) de soldagem consiste na parcela da energia de soldagem transferida para a poça de fusão, sendo obtido através da multiplicação da energia de soldagem pela eficiência (ou rendimento) térmica de soldagem (η) conforme Equação (2) (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

$$AT = E_s \times \eta = \left(\frac{P}{v_s} \right) \times \eta = \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (2)$$

Alguns estudos e normas apresentam faixas estimadas para a eficiência térmica (η) de soldagem conforme o tipo de processo, no entanto estes valores não são consistentes pois não levam em conta as variáveis que influenciam o processo de soldagem, como a composição e vazão do gás de proteção, velocidade de alimentação de arame e de soldagem, comprimento do eletrodo e stick-out. A Tabela 3 apresenta as faixas de eficiência conforme Modenesi, Marques e Santos (2012) e a norma europeia

DIN EN 1011-1 (2002), a qual considera a eficiência térmica do processo de soldagem GMAW com valor de 0,8, ou seja, considera-se que 80% da energia é convertida em calor para a peça soldada (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; SGARBI, 2013; MARON, 2018).

Tabela 3 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem.

Processo	Rendimento Térmico [%]	
	MODENESI; MARQUES; SANTOS (2012)	DIN EN 1011-1 (2002)
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98	1,00
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95	0,80
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90	0,80
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80	0,60
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50	0,60

Fonte: Adaptado de DIN EM 1011-01 (2002) e Modenesi, Marques e Santos, (2012).

A eficiência térmica do processo de soldagem, também denominada como rendimento térmico ou eficiência do arco, pode ser obtida experimentalmente através da equação 3, a qual relaciona o calor aportado à peça soldada (Q_a) com a potência de soldagem (P) e o tempo de arco aberto (t_s), ou também denominado tempo de soldagem (SGARBI, 2013).

$$\eta = \frac{Q_a}{P \cdot t_s} \quad (3)$$

Para calorímetros de fluxo aberto de água o calor aportado a peça (Q_a) é obtido pela Equação 4 (KUNTZ, 2017).

$$Q_a = V \times \rho \times c_p \times \sum(T_s - T_e) \times \Delta t = [J] \quad (4)$$

Onde:

V = Vazão de água [m^3/s]

c_p = Calor específico da água [$J/kg \cdot K$]

ρ = densidade [kg/m^3]

T_e = Temperatura de entrada [K]

T_s = Temperatura de saída [K]

Δt = intervalo de tempo a aquisição conforme configuração no sistema de aquisição [s]

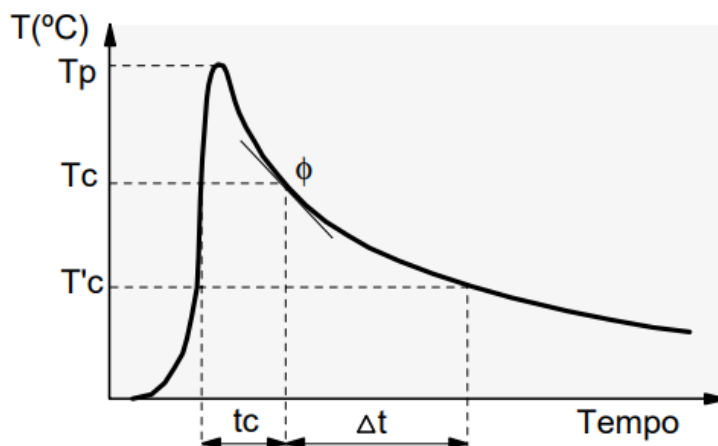
2.3.1 Ciclo Térmico na Soldagem

Durante o processo de soldagem cada ponto da peça é submetido à um ciclo térmico particular, como consequência da quantidade de calor transmitida à junta soldada através do arco elétrico. O ciclo térmico influencia diretamente nas transformações microestruturais dos aços, como por exemplo, a recristalização da estrutura cristalina e o coalescimento/dissolução de precipitados, causando variações nas propriedades mecânicas como dureza, tenacidade e ductilidade (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006; SCHEIDMANDEL, 2013).

Os principais fatores que caracterizam o ciclo térmico são a temperatura de pico (T_p), temperatura crítica (T_c), temperatura de início ou base ($T'c$), tempo de permanência (t_c) e velocidade de resfriamento (ϕ), conforme expresso na Figura 8 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006; SGARBI, 2013)

A temperatura máxima obtida por um determinado ponto durante a soldagem é denominada temperatura de pico (T_p) no gráfico do ciclo térmico e indica a possibilidade de transformações microestruturais neste ponto. O tempo de permanência (t_c) acima da temperatura crítica (T_c) consiste em um parâmetro relevante para materiais nos quais existe a possibilidade de dissolução, crescimento de grão ou ambos. Já a velocidade de resfriamento (ϕ) é um importante parâmetro na caracterização microestrutural de materiais que sofrem transformações de fase durante o resfriamento. No caso do aço, a taxa de resfriamento é determinada pela inclinação da curva do ciclo térmico, no entanto como parâmetro alternativo pode-se assumir o tempo de resfriamento (Δt) entre a temperatura crítica (T_c) e de base ($T'c$), onde a temperatura de base consiste na temperatura inicial do processo (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006; SCHEIDMANDEL, 2013).

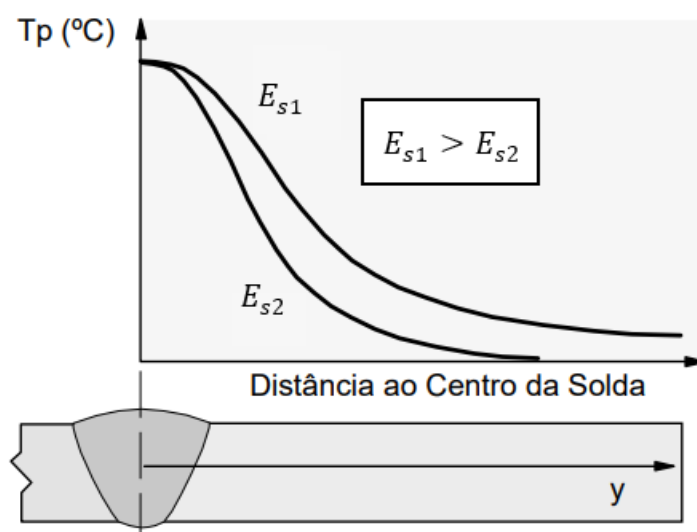
Figura 8 - Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe.



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2006).

Como reflexo do gradiente de temperatura no sentido transversal à região de soldagem, as regiões adjacentes do metal base são submetidas à ciclos térmicos com temperaturas de pico decrescentes à medida que o ponto analisado se distancia do eixo central da solda. Além disso, para uma mesma configuração de soldagem quanto maior a energia mais larga a faixa do metal base impactada, conforme apresentado esquematicamente nas curvas de repartição térmica da Figura 9 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006).

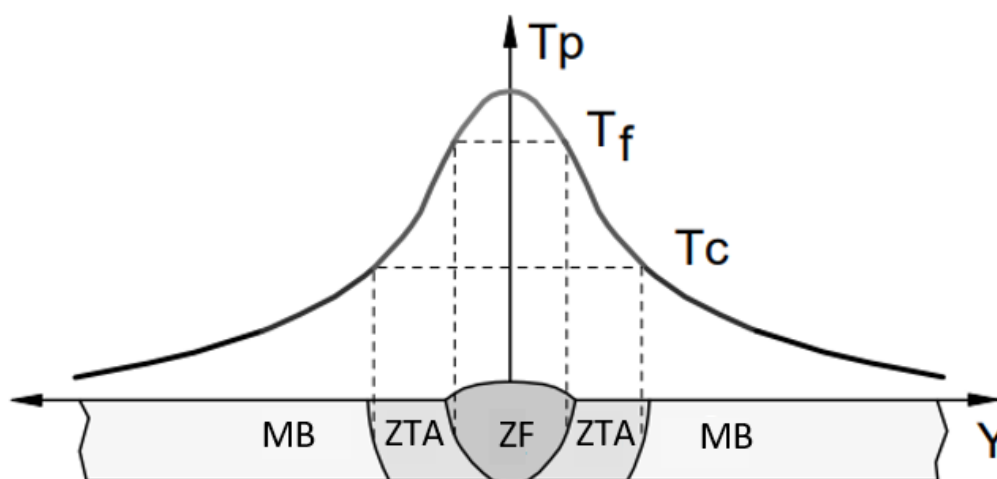
Figura 9 - Curvas de repartição térmica



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2006).

Como resultado das diferentes temperaturas de pico ao longo da sessão transversal da peça durante a soldagem, a macroestrutura de soldas por fusão apresenta três regiões principais, denominadas de zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e o metal base (MB), conforme apresentado na Figura 10. A zona fundida ZF, consiste na região com a maior temperatura de pico, onde o material foi fundido durante a soldagem. A região adjacente à ZF onde o material não sofreu fusão, porém teve suas propriedades mecânicas e/ou microestruturais alteradas pelo ciclo térmico de soldagem é denominada zona termicamente afetada (ZTA). Nesta região a temperatura de pico experimentada é superior à temperatura crítica (T_c) do metal base (MB). Já o metal base consiste na região de comparação, localizada suficientemente distante da região de soldagem, onde nenhuma propriedade tenha sofrido alteração visto a T_p da região ser inferior à T_c (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006).

Figura 10 - Macroestrutura esquemática da sessão transversal de uma junta soldada.



Fonte: adaptado de Modenesi, Marques e Santos (2006).

2.3.2 Calorimetria e Ciclo térmico

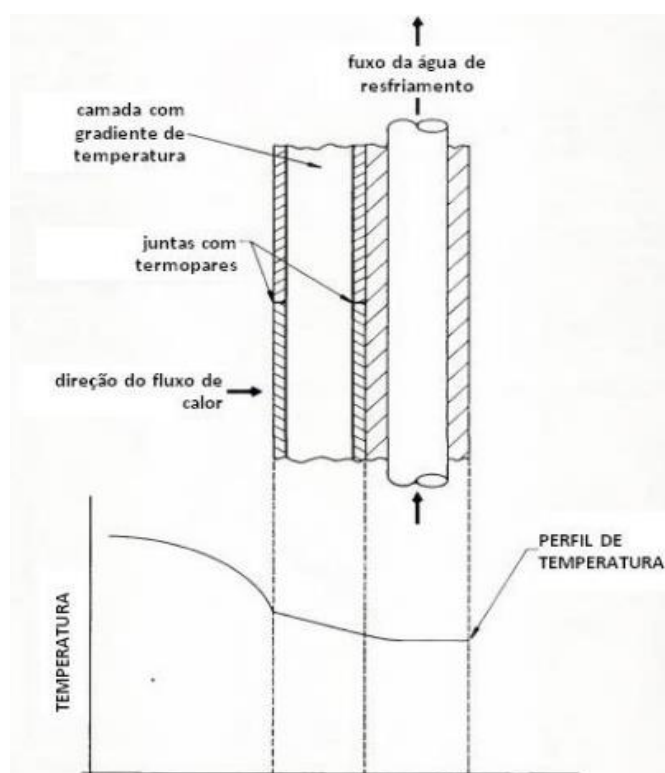
Conforme Sgarbi (2013) a calorimetria consiste no ato de mensurar a troca de energia térmica entre corpos ou sistemas, podendo-se determinar experimentalmente a condutividade térmica ou capacidade calorífica dos materiais.

A calorimetria no estudo dos processos de soldagem faz uso de equipamentos denominados calorímetros, os quais tem apresentado através de soluções experimentais resultados satisfatórios visto envolver as principais variáveis associadas à soldagem. Os

calorímetros podem ser concebidos de diversas formas, como por exemplo calorímetros de efeito Seebeck, de caixa fechada, de nitrogênio líquido e de água, sendo este o mais difundido no estudo de processos de soldagem. As soluções experimentais obtidas com o uso de calorímetros têm apresentado resultados satisfatórios visto envolver as principais variáveis associadas à soldagem (ARÉVALO, 2011; SGARBI, 2013).

O calorímetro apresentado na Figura 11 baseia-se no princípio termoelétrico de Seebeck, sendo que este calorímetro basicamente consiste em um termocondutor sujeito a um gradiente de temperatura, onde um dos lados é constantemente resfriado com água e o outro fica em contato com o corpo de prova sendo soldado. A eficiência térmica de soldagem mensurada com este calorímetro para o processo GMAW foi de 80% no trabalho de Fuerschbach e Knorovsky (1991) e de 84% no trabalho Dupont e Marder (1995) (SGARBI, 2013).

Figura 11 - Princípio operacional do calorímetro de efeito Seebeck.

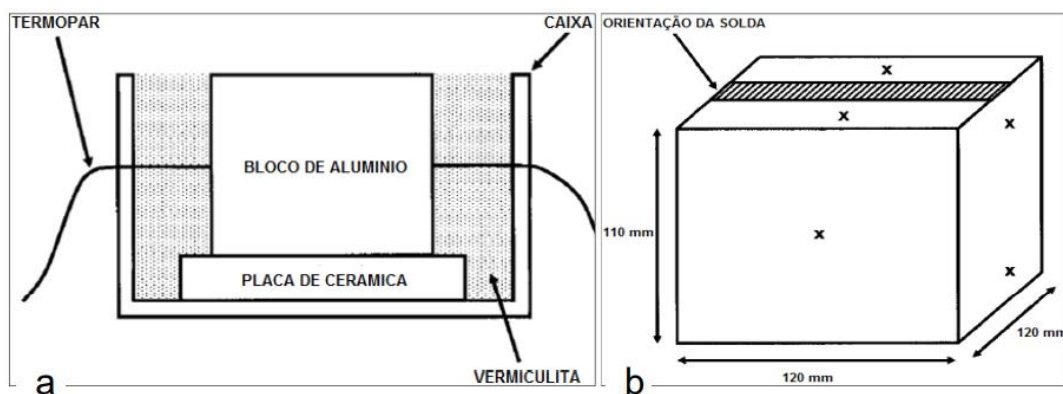


Fonte: DuPont e Marder (1995).

O calorímetro de caixa fechada (Figura 12 a), como o utilizado no trabalho de Cantin e Francis (2005), é constituído de uma caixa com uma base cerâmica suportando

o material a ser soldado, evitando assim perdas consideráveis por condução pela base do material soldado. Visando evitar perdas com o ambiente, o espaço interno restante da caixa foi preenchido com vermiculita, caracterizada pela baixa condutividade térmica. Os autores avaliaram a eficiência térmica do processo de soldagem GMAW em alumínio, realizaram a soldagem de um bloco de alumínio monitorado através de 8 termopares distribuídos no bloco conforme Figura 12 b, como resultado observaram variações de 46% a 89% nos resultados (ARÉVALO, 2011; SGARBI, 2013).

Figura 12 - a) Montagem do calorímetro de caixa fechada; b) localização dos termopares e sentido de soldagem



Fonte: Adaptado de Cantin e Francis (2005).

O calorímetro de nitrogênio líquido apresenta baixo erro de medição e uma boa repetibilidade, no entanto está atrelado a um elevado custo de utilização em comparação com os demais calorímetros. Kenney *et al.* (1998), Joseph (2001), Scotti e Ponomarev (2008), Pepe (2010) e Arévalo (2011) utilizaram deste conceito de calorímetro para avaliar o processo de soldagem GMAW. O conceito básico do calorímetro de nitrogênio líquido consiste em resfriar a peça soldada submergindo-a em um recipiente com nitrogênio líquido (Dewar) posicionado sobre uma balança digital, com a finalidade de relacionar a massa evaporada de nitrogênio líquido para mensurar o aporte térmico de soldagem, conforme apresentado na Figura 13 (ARÉVALO, 2011; KUNTZ, 2017). As principais diferenças nos estudos dos referidos autores são apresentadas a seguir.

- Kenney *et al.* (1998) e Joseph (2001) – Monitoramento da perda de massa através do programa LabVIEW;

- Scotti e Ponomarev (2008) e Pepe (2010) – Perda de massa monitorada através de uma WebCam direcionada para o display da balança;
- Arévalo (2011) – Sistema automatizado eliminando a interferência nos resultados causada pelo deslocamento do operador com a peça soldada até a balança.

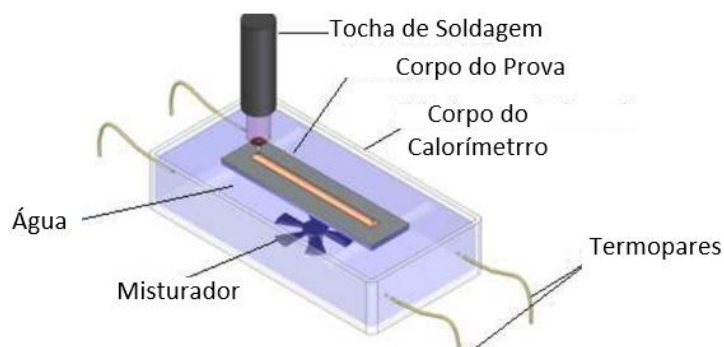
Figura 13 - Calorímetro de Nitrogênio Líquido utilizado por Kenney, Miller e Smartt. (1998).



Fonte: Adaptado de Arévalo (2011).

Essers e Walter (1981) estudaram a eficiência térmica através de um calorímetro que consistia em soldar uma chapa com a face de soldagem exposta ao ambiente e a face oposta imersa em um tanque de água (Figura 14), o qual possuía um agitador para garantir a homogeneidade da temperatura em todo volume de controle de água, sendo este um dos calorímetros mais difundidos (SGARBI, 2013).

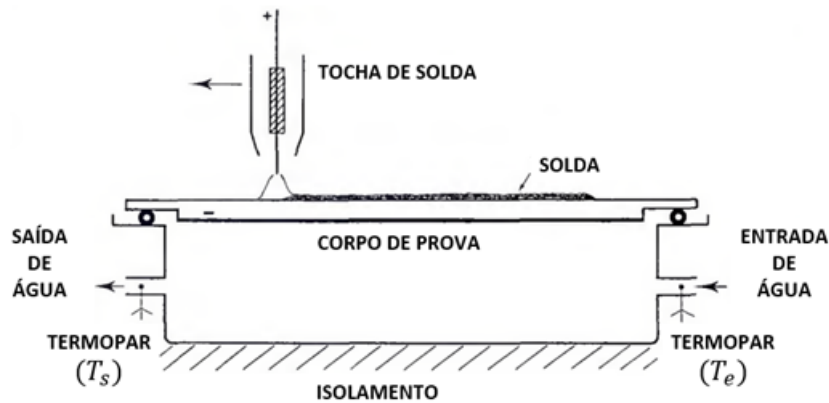
Figura 14 - Calorímetro de Essers e Walter.



Fonte: Adaptado Arévalo (2011).

Lu e Kou (1989) realizaram o estudo de eficiência térmica do processo de soldagem GMAW utilizando um calorímetro com fluxo contínuo de água (Figura 15), com o qual obtiveram eficiência térmica média de 80%.

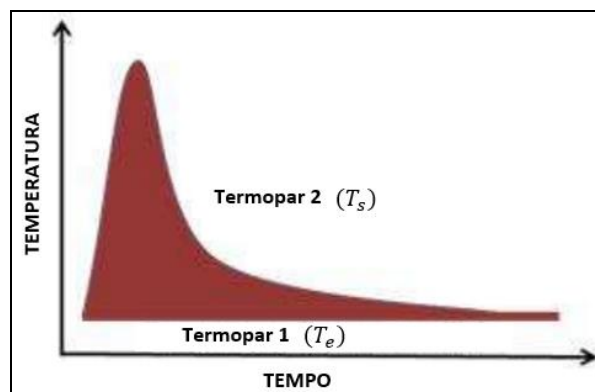
Figura 15 - Calorímetro com fluxo contínuo de água.



Fonte: Adaptado de Lu e Kou (1989).

Assim como o calorímetro de Essers e Walter (1981), a face oposta do material soldado fica em contato com a água. Esse calorímetro possui carcaça com isolamento térmico e os termopares utilizados medem a temperatura da água na entrada e na saída. Espera-se que a temperatura na entrada se mantenha constante, ou o mais próximo disso, visto não haver recirculação de água nesse modelo de calorímetro. Com estas informações, gráficos de temperatura como o da Figura 16 podem ser gerados, tornando as informações visuais tais como temperatura de pico, tempo de aquecimento e resfriamento além da intensidade do aquecimento e resfriamento através da inclinação das respectivas curvas.

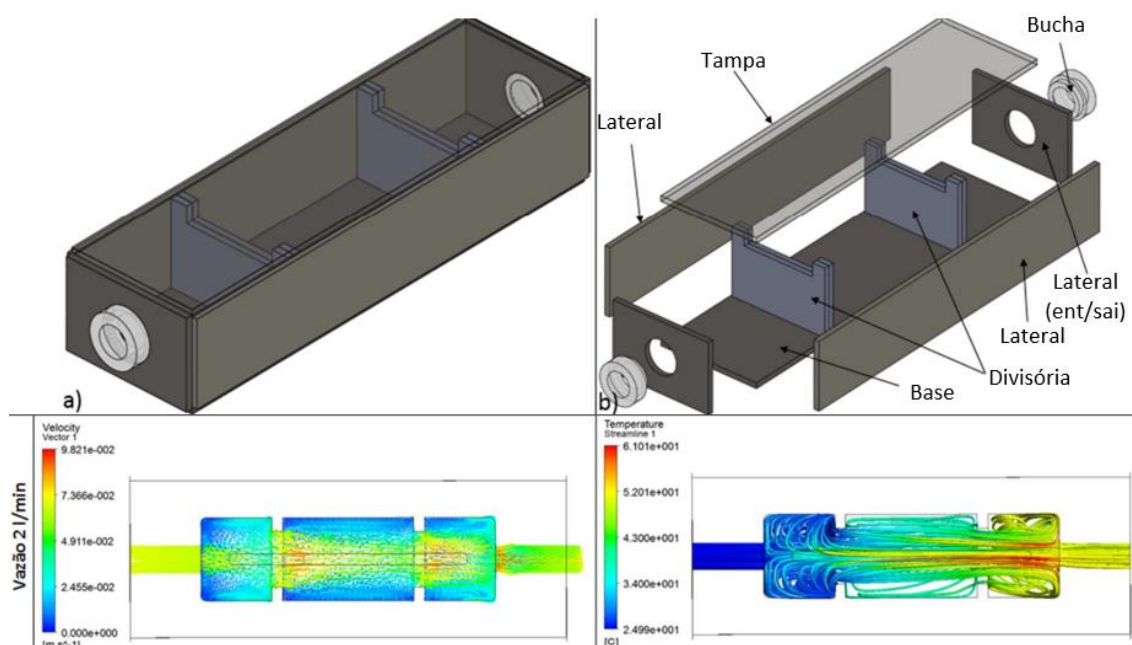
Figura 16 - Sinais de temperatura esperados no calorímetro de fluxo contínuo.



Fonte: Adaptado de Arévalo (2011).

Uma variação no modelo de Lu e Kou (1989) foi estudada por Kuntz (2017), em seu trabalho o autor avaliou a inclusão de divisórias como obstáculos físicos à turbulência da água dentro do calorímetro, bem como a influência destas e da vazão na homogeneidade da temperatura na sessão transversal ao escoamento, obtendo como melhor condição o calorímetro com duas divisórias com vazão de 2 l/min, conforme Figura 17.

Figura 17 - Calorímetro proposto por Kuntz (2017). a) Vista Isométrica. b) Visita explodida. c) Vetores de velocidade. d) Linhas de fluxo.



Fonte: Adaptado de Kuntz (2017).

2.4 AVALIAÇÃO DE SOLDAGEM

A taxa de deposição de arame, a diluição e características da zona fundida e da zona termicamente afetada são fatores de alta relevância na avaliação de soldagem, pois influenciam nas respostas mecânicas da peça soldada além de influenciar nos custos do processo.

2.4.1 Taxa de Deposição de Arame

A taxa de deposição (TD) mensura quanto do arame de solda é depositado em massa por unidade de tempo, é obtida através da razão da diferença de massa do corpo

de prova antes (m_i) e pós soldagem (m_f) pelo tempo de soldagem (t_s), conforme Equação 5.

$$TD = \frac{m_f - m_i}{t_s} = \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (5)$$

Onde:

TD = Taxa de deposição [kg/h]

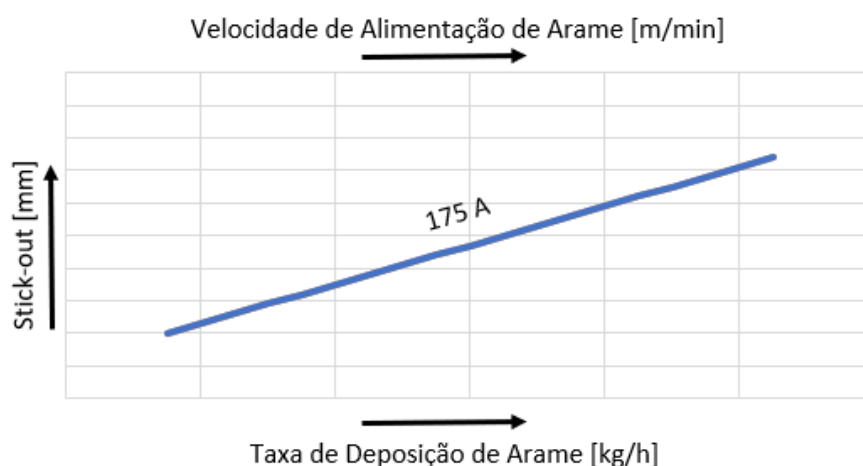
m_i = Massa inicial do corpo de prova [kg]

m_f = Massa final do corpo de prova [kg]

t_s = tempo de soldagem [h]

Conforme ESAB (2005) o processo GMAW é considerado um processo muito eficiente, sendo assim uma pequena fração do arame de soldagem fundido é perdida em forma de respingos. O aumento do *stick-out* e altas velocidade de alimentação de arame associados a técnica empurrada permite a manutenção de uma baixa corrente de soldagem, aumentando a deposição, porém reduzindo em contrapartida a penetração, visto maior consumo de energia para fundir uma taxa maior de arame, a Figura 18 exemplifica essa correlação.

Figura 18 - Efeito da extensão livre do eletrodo na taxa de deposição.



Fonte: Adaptado de ESAB (2005).

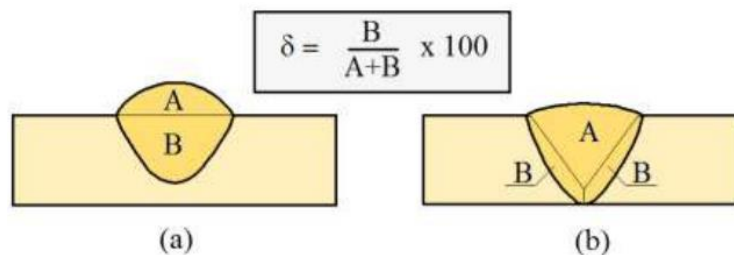
2.4.2 Diluição

O coeficiente de diluição (δ), ou apenas diluição, é definido como a proporção ou percentual com que o metal base participa da zona fundida sendo obtido pela Equação 6 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

$$\delta = \frac{\text{Massa fundida do metal base}}{\text{Massa total do cordão de solda}} \times 100 = [\%] \quad (6)$$

De forma prática, a diluição pode ser obtida pela medida das áreas “A” e “B” em uma macrografia da seção transversal da solda, onde “B” representa a porção do metal base e “A” a porção do metal de adição conforme apresentado na Figura 19 e Equação 7 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Figura 19 - Medida da diluição na seção transversal de um cordão de (a) um cordão depositado sobre chapa e (b) uma solda de topo.



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012).

$$\delta = \frac{B}{(A+B)} \times 100 = [\%] \quad (7)$$

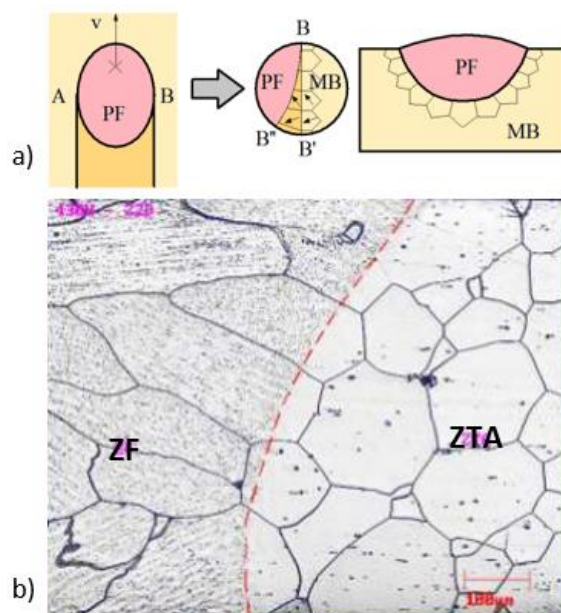
2.4.3 Características da Zona Fundida (ZF)

A zona fundida (ZF) é constituída pelo volume fundido do metal base e metal de adição e a proporção de cada componente químico em sua composição é obtida através da equação da diluição (GIAROLLO, 2018).

A microestrutura da zona fundida é consequência do crescimento epitaxial de grão (Figura 20), sendo que neste caso os grãos não são formados pela nucleação de novos grãos, mas pelo prolongamento dos grãos do metal base. O crescimento epitaxial é seguido pelo crescimento competitivo, o qual é determinado pela direção $\langle 100 \rangle$ do reticulado cristalino e pela direção do gradiente de extração de calor. Além disso a

microestrutura sofre influência do estado inicial da austenita, da presença de elementos de liga e condições de aquecimento e resfriamento. O crescimento epitaxial ocorre na zona fundida, pois as condições da poça de fusão como elevado gradiente térmico e o contato do metal líquido da poça com metal sólido dificultam a nucleação no metal líquido, favorecendo assim o crescimento de grãos a partir da zona termicamente afetada em contato com o metal fundido, resultando em grãos de largura e orientação semelhantes entre a zona fundida e a zona termicamente afetada (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; WAINER; BRANDI; HOMEM DE MELLO, 2014; GIAROLLO, 2018).

Figura 20 - Crescimento epitaxial dos grãos: a) Solidificação da poça de fusão, vista de cima e corte transversa; b) Fronteira entre a ZTA e a ZF conforme linha pontilhada.



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012).

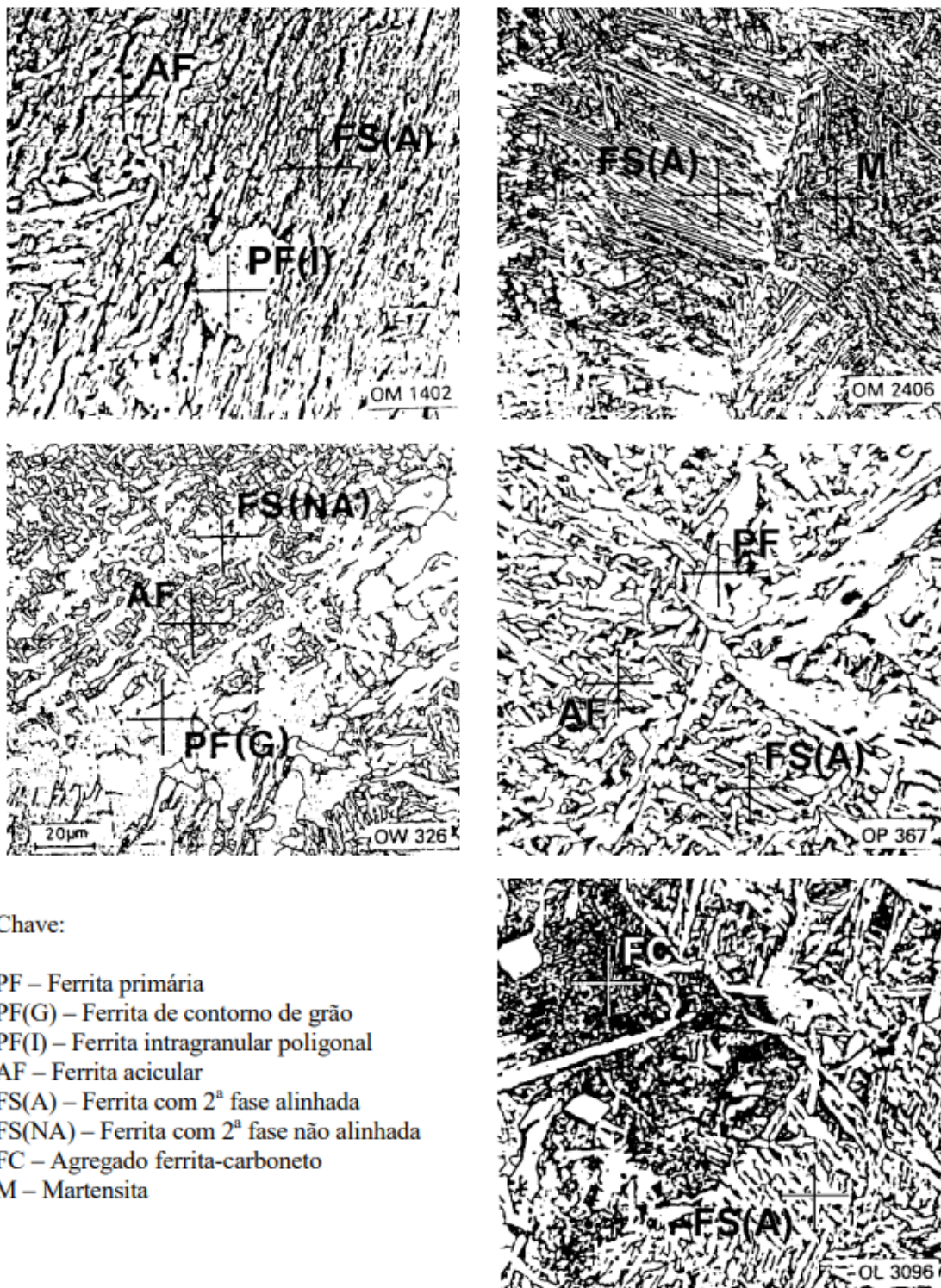
A microestrutura da zona fundida em soldas de um único passe é formada pelos produtos da decomposição da austenita em carbeto, martensita e ferrita, a qual pode apresentar diversas morfologias em função da taxa de resfriamento e da composição química do metal de base e de adição. Baseado em observações com microscópio ótico, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) propôs em 1988 a classificação mais aceita atualmente, denominando os constituintes mais comuns conforme a Tabela 4 e ilustrado na Figura 21 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Tabela 4 - Constituintes da zona fundida de aços ferríticos observados ao microscópio ótico, segundo o sistema do IIW.

Constituinte	Código	Descrição
Ferrita de Contorno de Grão	PF(G)	Veios de grãos poligonais associados com os contornos austeníticos prévios.
Ferrita Primária	PF(I)	Grãos de ferrita usualmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios e mais 3 vezes maiores do que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita.
Ferrita Acicular	FA (ou AF)	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos austeníticos prévios. Uma região de AF comumente inclui placas isoladas de grande razão de forma (relação entre o maior e o menor eixo).
Ferrita com Segunda Fase Alinhada	FS(A)	Duas ou mais placas paralelas de ferrita. No caso de apenas duas placas, a razão de forma deve ser maior do que 4:1. Se o operador tiver segurança, este constituinte pode ser subclassificado como placa lateral de ferrita, bainita superior ou inferior, FS(SP), FS(UB) ou FS(LB)
Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada	FS(NA)	Ferrita envolvendo completamente ou (i) “microfases” aproximadamente equiaxiais ou distribuídas aleatoriamente ou (ii) lâminas isoladas de AF
Agregado Ferrita Carboneto	FC	Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos “interfásicos” e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC(P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.
Martensita	M	Colônias de martensita maiores que as lâminas adjacentes de ferrita. Se o operador estiver seguro, o constituinte pode ser classificado como martensita laminar ou maclada, M(L) ou M(T).

Fonte: Adaptado de Modenesi, Marques e Santos (2012).

Figura 21 - Microestrutura do metal de solda mostrando diferentes constituintes microestruturais.



Fonte: Modenesi (2014).

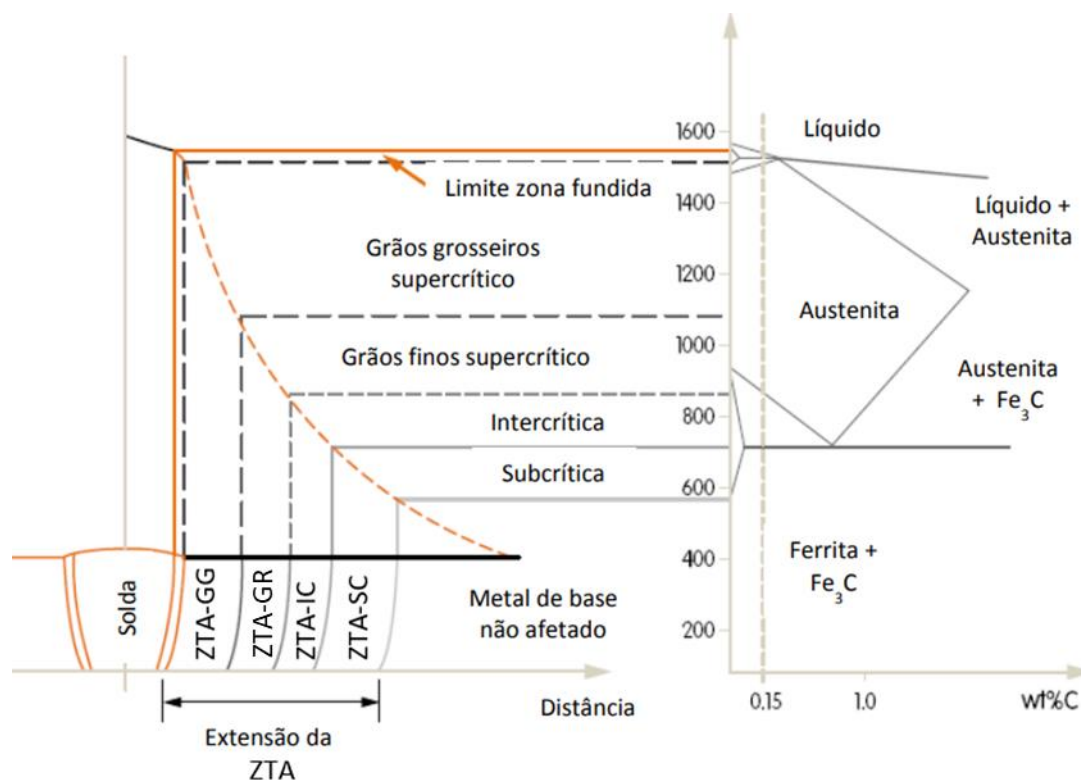
O primeiro constituinte a se formar pela decomposição da austenita durante o resfriamento é a ferrita de contorno de grão, PF(G), a qual nucleia-se nos contornos de

grão austeníticos em temperaturas por volta de 800 a 850°C. A ferrita poligonal intragranular, PF(I), se forma quando o tamanho de grão da austenita é muito maior em relação à ferrita sendo formada em seus contornos de grão e há espaço para nucleação intragranular, formada de ferrita proeutetóide nucleada em temperaturas inferiores as temperaturas de formação da PG(F) e PF(I). A ferrita com segunda fase alinhada, FS(A), engloba a bainita superior e a ferrita de Widmanstätten, uma forma de ferrita pró-eutetóide que nucleia-se com formato de placas nos contornos de grãos da austenita, também denominada por alguns autores como placas laterais de ferrita e constituinte lamelar. A ferrita de segunda fase não alinhada, FS(NA), é formada por ferrita envolvendo completamente as microfases, como carbeto ou constituinte da AM (martensita-austenita retida) distribuídos de forma aleatória e equiaxial, ou grãos de ferrita acicular. Nucleada de forma heterogênea nos grãos austeníticos em regiões com precipitados, inclusões e outras irregularidades, a ferrita acícula, FA, consiste em placas de ferritas orientadas em diferentes direções e é a ferrita de ocorrência mais frequente. Os agregados ferrita-carbonetos, FC, formam-se na decomposição da austenita rica em carbono e abrangem a perlita, bainita inferior e o constituinte AM. Na soldagem de aços com teores de carbono ou elementos de liga elevados e com velocidades de resfriamento maiores a nucleação da ferrita pode ser total ou parcialmente suprimida, permitindo a formação da zona fundida de estrutura martensítica, M, em contra partida aços de baixo teor de carbono tendem a formar ferrita de contorno de grão e ferrita acicular no interior do grão austenítico, devido à elevada taxa de resfriamento e a presença de elementos de liga como o manganês. (LINNERT, 1994; BRAZ, 1999; MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; TRINDADE, 2017; SCHWANKE, 2017; GIAROLLO 2018).

2.4.4 Características da Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Aços carbono e aços de baixa e média liga utilizados em estruturas soldadas, são considerados como ligas transformáveis. As ligas transformáveis apresentam uma zona termicamente afetada (ZTA) com uma considerável complexidade na qual subdivide-se em região de crescimento de grão ou grãos grosseiros (ZTA-GG), região de refino de grão (ZTA-GR), região intercrítica (ZTA-IC) e região subcrítica (ZTA-SC) conforme ilustrado na Figura 22 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; GIAROLLO 2018).

Figura 22 - Representação esquemática com a localização das sub-regiões da ZTA



Fonte: Adaptado de MARON (2018).

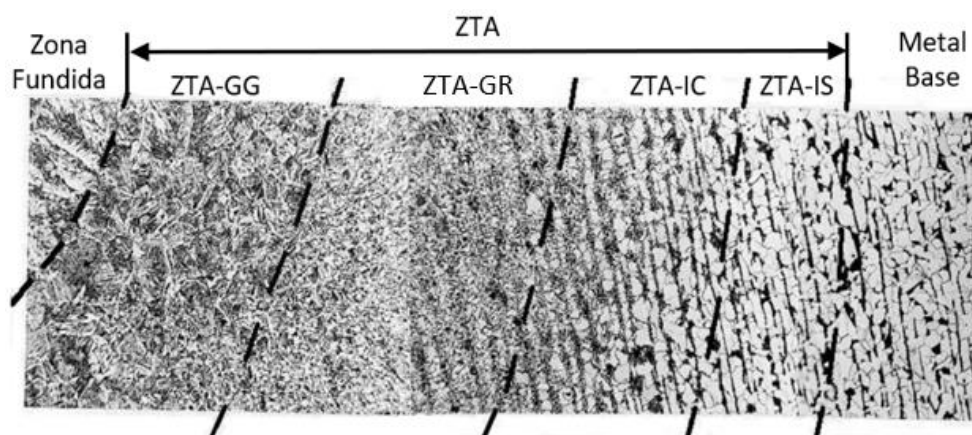
Localizada na região adjacente à região fundida, a ZTA-GG, experimenta temperaturas entre 1100 e 1500 °C durante a soldagem e é caracterizada pelo grande tamanho de grão austenítico. A morfologia resultante na ZTA-GG é influenciada pela taxa de resfriamento, teor de carbono e de elementos de liga presentes no metal de base.

O aumento do tamanho de grão austenítico aumenta a temperabilidade da região, resultando na formação de ferrita de contorno de grão como principal constituinte em aços de baixo carbono equivalente. A adição de elementos de liga, aumenta consequentemente o carbono equivalente e a temperabilidade do material, o que favorece a formação de constituintes como ferrita de Widmanstam e constituintes aciculares como a bainita. A ZTA-GR, encontra-se também no campo austenítico, no entanto em temperaturas na faixa de 900 a 1100°C, faixa na qual o crescimento de grão não é significativo, por localizar-se em uma região distante o suficiente da poça de fusão para que a taxa de resfriamento permita a difusão do carbono ao longo da microestrutura não ocasionado alterações de fases significativas, sua granulação assemelha-se ao material normalizado, não representando região problemática para a soldagem de aços. Localizada relativamente distante da região de fusão, a ZTA-IC, também denominada

como região parcialmente transformada, é submetida a temperaturas entre 700 e 900°C, onde não ocorre a austenitização completa do material, tornando-se uma região preocupante para a soldagem apenas em regimes de resfriamento elevados, onde a microestrutura resultante na temperatura ambiente, dependendo da composição química, pode ser constituída por martensita e austenita retida, gerando fragilidade na soldagem. No entanto em condições de resfriamento normal a ZTA-IC não consiste em região crítica. A ZTA-SC corresponde ao material aquecido com temperatura de pico inferior à 700°C, onde não ocorre austenitização, podendo resultar em uma região revenida e, conseqüentemente, apresentar queda na resistência ou dureza em relação ao metal de base. (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006; SILVA, 2010; MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; SCHWANKE, 2017; GIAROLLO, 2018).

A Figura 23 apresenta a microestrutura formada em cada região da ZTA em uma soldagem de aço com baixo teor de carbono.

Figura 23 - Microestrutura da ZTA para soldagem de aço com baixo carbono.



Fonte: Adaptado de Modenesi, Marques e Santos (2012).

2.5 PROJETO DE EXPERIMENTO (DOE) – TAGUCHI

O projeto de experimento, do inglês *Design of Experiments* (DOE), foi inicialmente introduzido em 1935 por Fisher na Inglaterra e tem o objetivo de correlacionar alterações propositais nas variáveis de entrada com as variações identificadas nas variáveis de saída, possibilitando determinar os fatores mais relevantes para otimização dos resultados desejados (VASCONCELOS, 2004; SCHNEIDER, 2014; MAUSSION, 2017).

O método de Taguchi, também conhecido como projeto robusto de Taguchi, consiste em uma ferramenta estatística de planejamento de experimentos que visa concepção de sistemas de alta qualidade com custos reduzidos. Os principais fatores que conduzem a seleção do método de Taguchi no projeto de experimentos são a redução considerável do número de experimentos necessários para otimização de um processo ou produto, e a possibilidade de identificar os fatores de maior influência sobre os resultados, suportando assim a tomada de decisão sobre as mudanças necessárias para atingimento dos resultados esperados (DESHMUKH; SORTE, 2013; KNEBELKAMP, 2016).

A redução do número de experimentos necessários ocorre pois o método de Taguchi utiliza um projeto de matrizes ortogonais especial, em substituição ao método do fatorial completo. Em uma matriz ortogonal todos os fatores são igualmente ponderados, permitindo assim que cada fator seja avaliado independentemente e seus efeitos não afetem as estimativas entre si, deste modo reduz-se expressivamente o número de experimentos necessários (MINITAB, 2021).

Reconhecendo que nem todos os fatores que causam variabilidade podem ser controlados, o método de Taguchi divide-os em duas categorias, fatores de controle e fatores de ruído. Os fatores de controle são todos os fatores controláveis do processo, ou seja, as variáveis de entrada. Os fatores de ruído são classificados como os fatores que não podem ser controlados, mas causam variabilidade no desempenho do processo (MINITAB, 2021).

O método de Taguchi utiliza a razão sinal/ruído (S/N) para avaliação dos desvios das respostas obtidas nos experimentos realizados com repetições. A razão sinal/ruído permite identificar as variáveis de entrada ótimas para atingimento do resultado de saída desejado, seja este maximizar, minimizar ou centralizar a saída em um valor alvo. A interpretação dos valores da razão sinal/ruído sempre considerará quanto maior o sinal do ruído melhor, independentemente se o objetivo é minimizar, centralizar ou maximizar a variável de saída avaliada (MOITA, 2007).

Cada variável de saída ou reposta deve ser escolhida entre as condições, menor é melhor (minimização), nominal é melhor (centralização) ou maior é melhor (maximização), a Tabela 5 apresenta a relação entre a razão S/N, as características dos dados, o objetivo do experimento e as equações para obtenção do resultado de S/N (MINITAB, 2021).

Tabela 5 - Relação entre razão S/N, objetivo do experimento, características dos dados e equações.

Razão sinal-ruído (S/N)	Objetivo do experimento	Características dos dados	Fórmulas da razão sinal-ruído
Quando maior, melhor	Maximizar a resposta	Positivos	$S/N = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$
Nominal é melhor	Criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído somente em desvios padrão	Positivo, zero ou negativo	$S/N = -10 \times \log(\sigma^2)$
Nominal é melhor (padrão)	Criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído somente nas médias e em desvios padrão	Não-negativa com um "zero absoluto", em que o desvio padrão é igual a zero quando a média é zero	$S/N = -10 \times \log\left(\frac{\gamma^2}{\sigma^2}\right)$
Quanto menor melhor	Minimizar a resposta	Não negativos com valor alvo zero	$S/N = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$

Fonte: Adaptado de MINITAB (2021).

2.6 HISTÓRICO DE PESQUISAS SOBRE CALORIMETRIA E MÉTODO DE TAGUCHI APLICADOS AO PROCESSO DE SOLDAGEM

Nesta seção são apresentadas algumas referências de trabalhos anteriores relacionados à aplicação da calorimetria na avaliação da eficiência térmica de soldagem e à aplicação do método de Taguchi em projetos de experimentos.

2.6.1 Aplicação da Calorimetria na Avaliação da Eficiência Térmica de Soldagem

Como referências para o presente trabalho foram levantados estudos anteriores que utilizaram da calorimetria para avaliação de eficiência térmica de soldagem. A Tabela 6 consiste em um complemento à apresentada no trabalho de Sgarbi (2013) e compila os parâmetros de soldagem utilizados e as respectivas eficiências térmicas.

Tabela 6 - Valores obtidos em estudos anteriores para eficiência térmica de soldagem.

(Continua)

Autor(es) e princípio do calorímetro	Ano	Gás de Proteção	U [V]	I [A]	vs [mm/s]	va [m/min]	n [%]
Essers e Walter, Banho de água continuamente agitada	1981	93% Ar / 7% CO ₂	-	275	-	-	71
			19,4	78	10,2	2,5	83
Lu e Kou, Fluxo de água contínuo	1989	100% Ar	22,6	128	10,2	3	81
			27,8	176	10,2	4	81
			28,2	251	10,2	5,8	80
Giedt et al., Princípio de Seebeck	1989	100% Ar	27	230	15	-	84
Bosworth, Imersão do corpo de prova em recipiente com água	1991	82% Ar / 18% CO ₂	35,4	292	5	9,9	76
			283	148	5	4	79
	1991	95% Ar / 5% CO ₂	27,5	243	5	9,9	78
			20,3	148	5	4	80
	1991	75% Ar / 25% CO ₂	34,6	307	5	9,9	83
		16,8	170	5	5,9	86	
DuPont e Marder, Princípio de Seebeck	1995	100% Ar	27	230	15	7,2	87
			35	375	15	7,2	85
Arévalo, Fluxo d'água contínuo	2011	75% Ar / 25% CO ₂	19	122	5	4	71
			29	287	5	8,5	67
Arévalo, Imersão do corpo de prova em recipiente Dewar com N ₂ L	2011	75% Ar / 25% CO ₂	19	128	6,7	3	77
			19	122	5	4	82
			29	286	5	8,5	79
Sgarbi, Fluxo d'água contínuo	2013	90% Ar / 10% CO ₂		125	5	2,9	76
				250	5	7,7	72
				340	10	11,9	71
			20	250	5	7,7	66
				125	5	2,9	50
				340	10	11,9	59
	350	5	12,4	66			

Fonte: Adaptado de Sgarbi (2013).

Tabela 6 – Valores obtidos em estudos anteriores para eficiência térmica de soldagem.

(conclusão)

Autor(es) e princípio do calorímetro	Ano	Gás de Proteção	U [V]	I [A]	vs [mm/s]	va [m/min]	n [%]		
Antoni, Fluxo contínuo de água	2014	100% Ar	21	147	133	8	5	73	
						10	5	74	
						12	5	74	
						8	5,5	74	
						10	5,5	75	
						12	5,5	75	
					8	6	77		
					10	6	77		
					12	6	77		
					8	5	65		
					10	5	62		
					12	5	63		
					8	5,5	69		
					10	5,5	62		
					12	5,5	64		
Hackenhaar, 2016 Fluxo contínuo de água	2016	75% Ar / 25% CO ₂	18	156	163	8	6	70	
						10	6	65	
						12	6	65	
						8	6	65	
						10	6	65	
						12	6	65	
					20	190	5,5	4,5	77
					20	170	4	3,5	77
					22	190	7	4,5	74
					20	190	5,5	4,5	75
					20	158	7	3,5	76
					22	215	5,5	5,5	75
					22	189	4	4,5	77
					18	186	7	4,5	79
					18	215	5,5	5,5	79
22	157	5,5	3,5	76					
20	187	5,5	4,5	78					
20	214	7	5,5	75					
20	215	4	5,5	78					
18	187	4	4,5	82					

Fonte: Adaptado de Sgarbi (2013).

2.6.2 Aplicação do método de Taguchi em Projetos de Experimentos

A aplicação do método de Taguchi não se limita apenas aos processos de soldagem, esta abordagem estatística pode ser aplicada a qualquer problema complexo. A

Tabela 7 apresenta algumas referências de aplicações do método de Taguchi em diversos processos, dentro e fora da indústria.

Tabela 7 - Referências de aplicação do método de Taguchi.

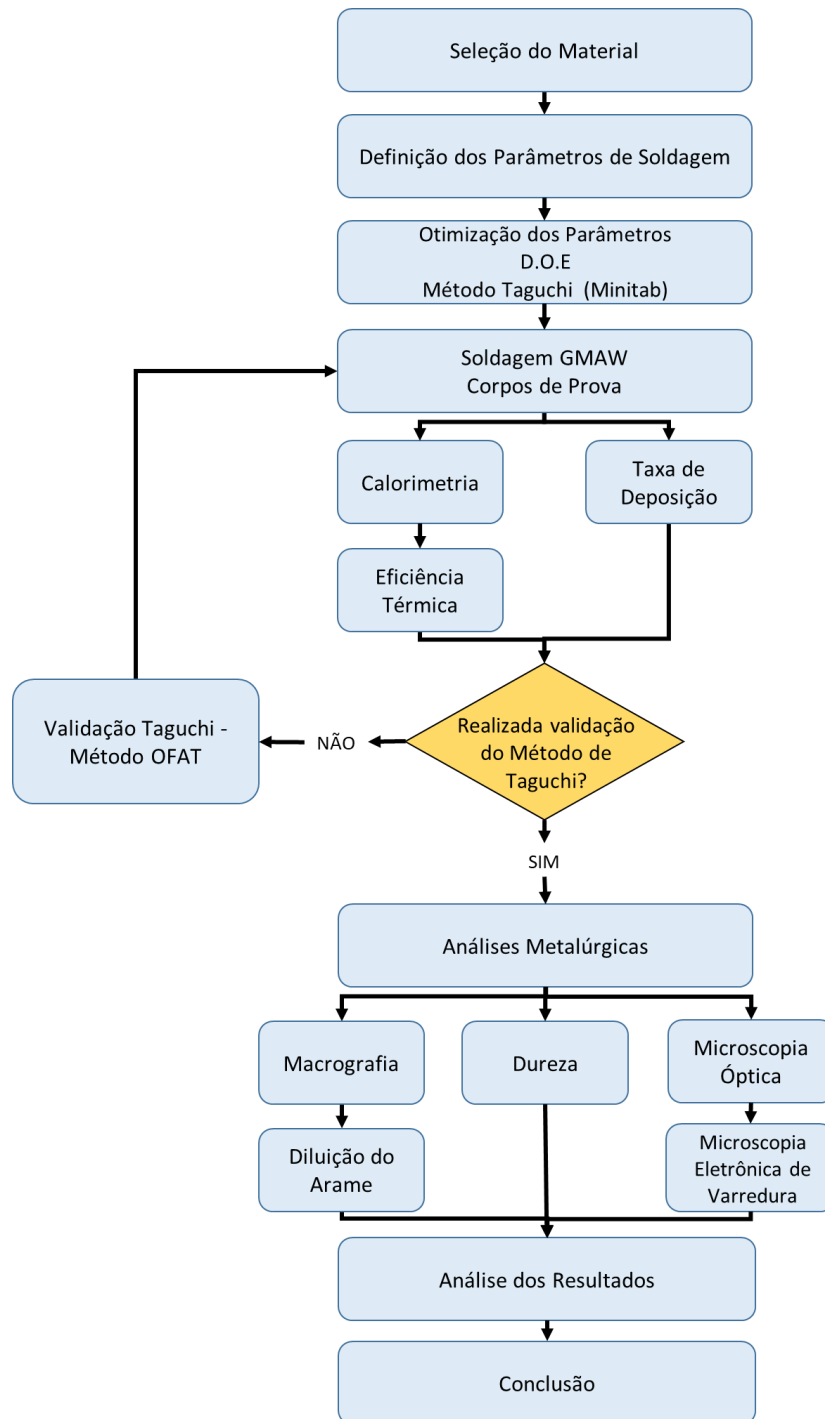
Autor(es)	Ano	Aplicação e modelo ortogonal
Moita	2007	Testes de moldes para injeção de plásticos, utilizando os modelos ortogonais L9, L12 e L6
Toto	2001	Aplicou o método no Instituto de Saúde como ferramenta para quantificar e hierarquizar problemas gerenciais
Bruno <i>et al.</i>	2002	Otimizar os parâmetros que influenciam o acabamento superficial em peças usinadas, utilizando o modelo ortogonal L9.
Pessoa <i>et al.</i>	2010	Otimizar os processos de soldagem de revestimento em ligas de níquel soldadas pelo processo GMAW, utilizando o modelo ortogonal L9.
Schneider	2014	Otimizar o processo de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG (GTAW-GMAW), utilizando o modelo ortogonal L27.
Fischer	2015	Otimizar o processo de soldagem a ponto por fricção entre a liga de alumínio 5052H32 e o aço 5052H32, utilizando o modelo ortogonal L9.
Knebelkamp	2016	Otimização dos parâmetros utilizados em soldagem de liga de alumínio 5052H32 pelo processo GMAW, utilizando o modelo ortogonal L36.
Aita	2017	Otimizar processo de soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica (FSSW) em liga AA6060-T5, utilizando o modelo ortogonal L9.
Pereira, Ribeiro e Queijo	2018	Otimização de parâmetros de fresagem, utilizando o modelo ortogonal L18.
Teodósio	2019	Otimizar parâmetros de Eletroerosão de penetração, utilizando o modelo ortogonal L18.

Fonte: Próprio autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para realização das soldagens, preparação dos corpos de prova e análises propostas. O fluxograma da Figura 24 apresenta as etapas do procedimento experimental.

Figura 24 - Fluxograma de etapas do experimento



Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na Figura 24, inicialmente definiu-se o material base a ser utilizado nos experimentos, em seguida definiram-se os parâmetros variáveis de soldagem que seriam utilizados como objeto de estudo, a definição ocorreu com base nos processos de soldagem GMAW implementados na indústria metalmeccânica incentivadora do estudo. Os parâmetros de soldagem foram otimizados com base no método estatístico de Taguchi para design robusto de experimentos. Após as definições das melhores condições, o método foi validado passando os corpos de prova para etapa de validação pelos demais ensaios metalúrgicos.

A empresa Bruning Tecnometal forneceu todos os materiais utilizados nos ensaios e a preparação dos corpos de prova, bem como a realização das soldagens, ensaios de dureza e macrografia foram realizados nos laboratórios de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação e Laboratório de Engenharia de Soldagem da referida empresa, já os ensaios de microscopia ótica foram realizados no laboratório de materiais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.1 MATERIAIS

No presente tópico são apresentados os materiais utilizados para realizar os ensaios de soldagem.

3.1.1 Metal de Base

O material utilizado no estudo foi o aço DIN EN10025-2-04 S275JR-AR extraídos de uma bobina com 6,3 mm de espessura e 1700 mm de largura não oleada. A composição química do material é apresentada na Tabela 8, conforme norma DIN EN 10025-2 (2004), a qual determina os valores máximos de cada elemento químico permitido no material e conforme certificado de inspeção do fornecedor, o qual encontra-se no anexo A.

Tabela 8 - Composição química dos corpos de prova.

Documento	Composição Química [%]						
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu
DIN EN 10025-2 (2004) [% Máx. Permitido]	0,21	-	1,5	0,035	0,035	0,012	0,55
Certificado de Inspeção [% Real]	0,12	0,01	0,86	0,021	0,009	0,003	0,01

Fonte: Adaptado de norma DIN EN 10025-2 (2004) e de USIMINAS (2019).

As propriedades mecânicas do metal de base, conforme certificado de inspeção (anexo A), são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas metal de base conforme certificado de inspeção.

Amostra	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	Alongamento [%]
1	342	448	35
2	313	432	36
Média	327,5	440	35,5

Fonte: Adaptado USIMINAS (2019).

3.1.2 Metal de Adição

O metal de adição, usualmente chamado de arame de solda, utilizado na soldagem dos corpos de prova foi o ER 70S-6 com 1,2 milímetros de diâmetro. As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam, respectivamente, a composição química e os valores mínimos para as propriedades mecânicas do metal de adição.

Tabela 10 - Composição química do arame de solda ER70S-6.

Fonte	Composição Química [%]										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
Esp. AWS	0,06- 0,15	0,80- 1,15	0,04- 0,85	≤0,025	≤0,035	≤0,15	≤0,15	≤0,15	≤0,03	≤0,5	-

Fonte: Adaptado de AWS 5.10 (2012).

Tabela 11 - Valores mínimos para propriedades mecânicas do ER 70S-6 conforme AWS 5.18.

Material	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	Alongamento [%]
ER 70S-6	480	400	22

Fonte: Adaptado de AWS 5.18 (2005).

3.1.3 Gases de Proteção

A Tabela 12 apresenta a composição das 3 misturas de gases de proteção utilizados neste estudo, os quais foram selecionados visto sua utilização nos processos de soldagem GMAW realizados atualmente pela empresa Bruning Tecnometal®.

Tabela 12 - Nomenclatura e composição química dos gases de proteção utilizados.

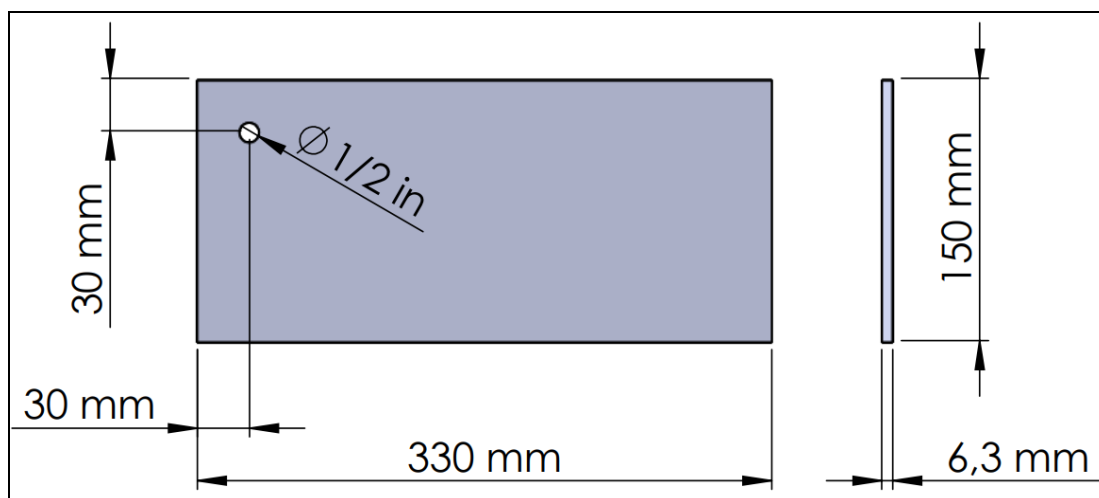
Especificação	Composição
C10	90% Ar / 10% CO ₂
C25	75% Ar / 25% CO ₂
F36	95% Ar / 5% O ₂

Fonte: Próprio autor.

3.1.4 Preparação dos Corpos de Prova

As chapas para soldagem foram confeccionadas com as dimensões conforme a Figura 25, sem chanfros na região de soldagem, tendo como única preparação após o corte a realização de um furo roscado de ½ polegada para conexão da saída de água utilizada na preparação do experimento para garantir a saída do ar ambiente fazendo com que todo o volume interno do calorímetro esteja preenchido com água.

Figura 25 - Dimensões dos corpos de prova para soldagem.



Fonte: Próprio autor.

3.2 EQUIPAMENTOS

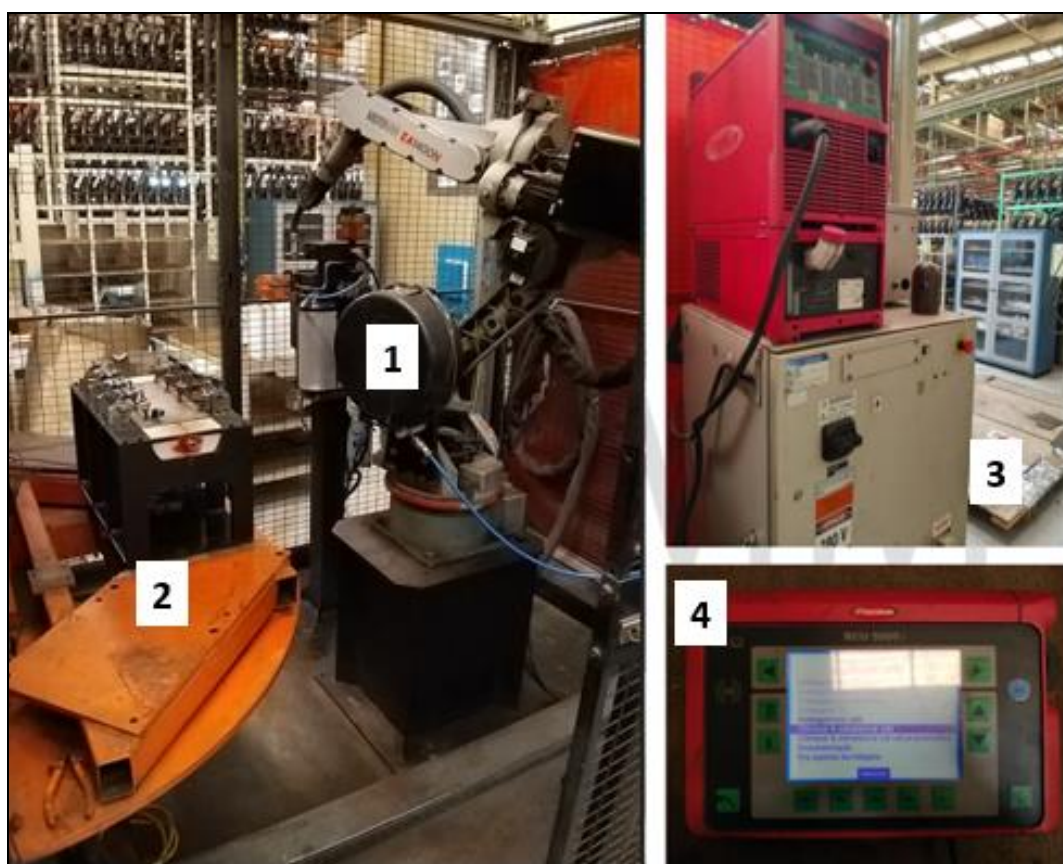
Neste tópico são detalhados os equipamentos de soldagem e o calorímetro utilizado no estudo.

3.2.1 Equipamento de Soldagem

A soldagem foi realizada pelo processo GMAW com atmosfera protetiva ativa, também denominado processo MAG, em uma célula de soldagem, conforme apresentada na Figura 26, composta pelos seguintes equipamentos.

- 1 Robô de soldagem, marca Motoman, modelo YR-EA 1400N;
- 2 Mesa de soldagem robotizada;
- 3 Fonte de soldagem, marca Fronius, modelo TPS 5000;
- 4 Controle remoto, marca Fronius, modelo RCU 5000i.

Figura 26 - Célula de solda.



Fonte: Próprio autor.

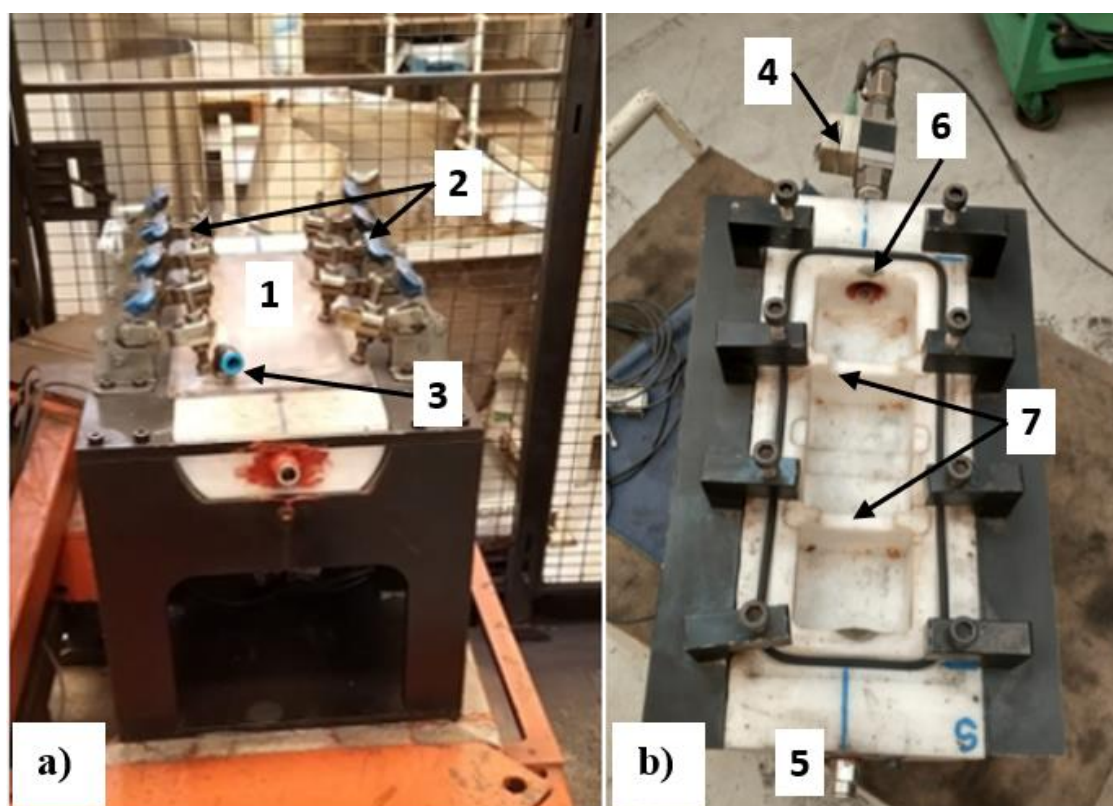
3.2.2 Calorímetro

Para avaliar o aporte térmico durante a soldagem foi definido como padrão um cordão de solda de 250 milímetros de comprimento depositado sobre a chapa, tendo sido utilizado no ensaio o calorímetro de fluxo contínuo de água desenvolvido por Kuntz (2017) o qual possui termopares para medição da temperatura de entrada e saída

da água e divisórias internas para eliminar a ocorrência de gradiente de temperatura no sentido transversal ao fluxo de água. Para os ensaios a vazão de água adotada foi de 2,3 litros por minuto.

O calorímetro foi fixado e nivelado sobre uma base para garantir a estabilidade da soldagem, além de contar com grampos de fixação para impedir a movimentação dos corpos de prova durante a soldagem. A Figura 27 apresenta uma imagem do calorímetro utilizado no estudo com um corpo de prova posicionado, o detalhamento construtivo está disponível no trabalho realizado por Kuntz (2017).

Figura 27 - Calorímetro.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 27a mostra o calorímetro com o corpo de prova posicionado (1) e fixado por grampos, onde é possível visualizar a conexão de 1/2 polegada para retirada completa do ar do sistema (3). A Figura 27b mostra maiores detalhes sobre a estrutura do calorímetro, onde é possível identificar o sensor de medição de temperatura (4), ponto de entrada (5) e saída de água (6) além das divisórias internas (7).

3.3 PARAMETROS DE SOLDAGEM

Foram avaliados neste trabalho 5 parâmetros de soldagem, 4 com 3 níveis de variação e 1 com 2 níveis de variação, sendo eles a composição e a vazão do gás de proteção, a velocidade de soldagem, velocidade de alimentação de arame e o *stick-out*.

O trabalho foi desenvolvido em ambiente fabril, deste modo, os níveis de variação de cada parâmetro foram previamente definidos a partir de parâmetros já utilizados no processo GMAW na empresa metalmeccânica onde o estudo foi realizado, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros variáveis utilizados no estudo.

Níveis [esp.]	Gás de proteção [esp.]	Vazão do Gás [l/min]	Vel. de Soldagem [mm/min]	Vel. de Alimentação [m/min]	Stick-out [mm]
I	C10	15	250	7	15
II	C25	20	300	9	20
III	F36		350	11	25

Fonte: Próprio autor.

O fato da corrente de soldagem não ser um parâmetro de entrada avaliado, deve-se à forma que a operação de soldagem ocorre nas linhas de produção, onde a fonte realiza a compensação dos parâmetros com base nas variações dos parâmetros conforme realizado no presente estudo.

3.4 PROJETO DE EXPERIMENTO (DOE)

O projeto de experimento foi realizado em duas etapas, inicialmente utilizou-se o método de Taguchi através do software Minitab® para otimização do experimento e posteriormente utilizou-se do método OFAT, do inglês *One Factor At a Time* ou Um Fator Por Vez, para comprovação da eficiência do método de Taguchi.

3.4.1 Método de Taguchi

Para utilização do método de Taguchi é preciso definir qual matriz ortogonal utilizar, a Tabela 14 apresenta algumas das possibilidades de matrizes ortogonais em função do número de fatores e níveis destes fatores.

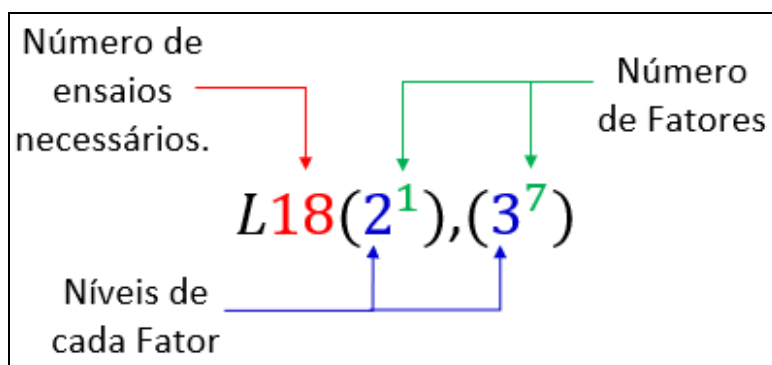
Tabela 14 - Combinações para matriz ortogonal.

Matriz	Combinações
L4	(2^3)
L8	$(2^7); (2^4), (4^1)$
L9	(3^4)
L12	(2^{11})
L16	$(2^{15}); (2^{12}), (4^1); (2^9), (4^2); (2^6), (4^3); (2^3), (4^4); (4^5); (8^1), (2^8)$
L18	$(2^1), (3^7); (6^1), (3^6)$
L25	(5^6)
L27	(3^{13})
L32	$(2^{31}); (2^1), (4^9)$
L36	$(2^{11}), (3^{12}); (2^3), (3^{13})$
L54	$(2^1), (3^{25})$

Fonte: Adaptado de Minitab (2021).

A interpretação das combinações é explicada na Figura 28, a qual apresenta a possibilidade de estudar até 7 variáveis com 3 níveis e 1 variável com 2 níveis (Minitab, 2021). Visto que o presente estudo busca avaliar a influência de 4 variáveis de 3 níveis e 1 variável com 2 níveis sobre a eficiência térmica de soldagem a matriz selecionada foi a mesma do exemplo dado, considerando a configuração $L18(2^1), (3^4)$, sendo esta chamada apenas de L18 no presente estudo.

Figura 28 - Interpretação da notação das matrizes ortogonais.



Fonte: Próprio autor.

A utilização da matriz ortogonal L18 no presente estudo representa uma grande otimização expressiva de tempo e custo, visto que a combinação por fatorial completo resultaria em 162 experimentos frente aos 18 determinados pela utilização do método de

Taguchi, essa redução é ainda mais relevante visto o estudo utilizar 3 repetições de soldagem para cada combinação, reduzindo o número de corpos de prova soldados de 486 para 54. As condições experimentais com as combinações de fatores obtidas são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Condições experimentais.

L [nº do exp.]	Vazão do Gás [l/min]	Gás de proteção [esp.]	Vel. de Solda [mm/min]	Vel. de Alimentação [m/min]	Stick-out [mm]
1	15	C10	250	7	15
2	15	C10	300	9	20
3	15	C10	350	11	25
4	15	C25	250	7	20
5	15	C25	300	9	25
6	15	C25	350	11	15
7	15	F36	250	9	15
8	15	F36	300	11	20
9	15	F36	350	7	25
10	20	C10	250	11	25
11	20	C10	300	7	15
12	20	C10	350	9	20
13	20	C25	250	9	25
14	20	C25	300	11	15
15	20	C25	350	7	20
16	20	F36	250	11	20
17	20	F36	300	7	25
18	20	F36	350	9	15

Fonte: Próprio autor.

3.4.2 Método OFAT

O método OFAT (*One Factor At a Time*), Um Fator Por Vez, foi utilizado para comprovação da eficiência do método de Taguchi na otimização dos parâmetros de soldagem, neste método um fator é alterado a cada nova condição de experimento. O método foi aplicado considerando a hierarquia de influência entregue pelo método de Taguchi, fixando o fator e o nível de maior influência e variando os demais fatores, seguindo a mesma hierarquia de priorização, do mais influente para o menos influente, sempre fixando o parâmetro avaliado no nível de maior influência para a sequência do método.

Como exemplificação da utilização do método OFAT a Tabela 16 exemplifica a testagem de 2 parâmetros de 2 níveis (A e B) e um de 3 níveis (C) sendo o parâmetro de maior influência o A no nível 1, seguido pelos parâmetros B e C, com nível de maior influência à definir ou comprovar. No exemplo as saídas são consideradas como $Y4 > Y3 > Y1 > Y2$, e o fator com nível em negrito apresentou a melhor resposta. A matriz OFAT obtida após o método de Taguchi é apresentada na análise dos resultados.

Tabela 16 - Exemplo de aplicação do Método OFAT.

Condição Experimental	Fator A	Fator B	Fator C	Saída
1	A1	B1	C1	Y1
2	A1	B2	C1	Y2
3	A1	B1	C2	Y3
4	A1	B1	C3	Y4
Melhor resposta	A1	B1	C3	Y4

Fonte: Próprio autor.

3.5 MÉTODO DE ANÁLISE

Neste tópico são apresentados os procedimentos de análise realizados no presente trabalho.

3.5.1 Taxa de Deposição

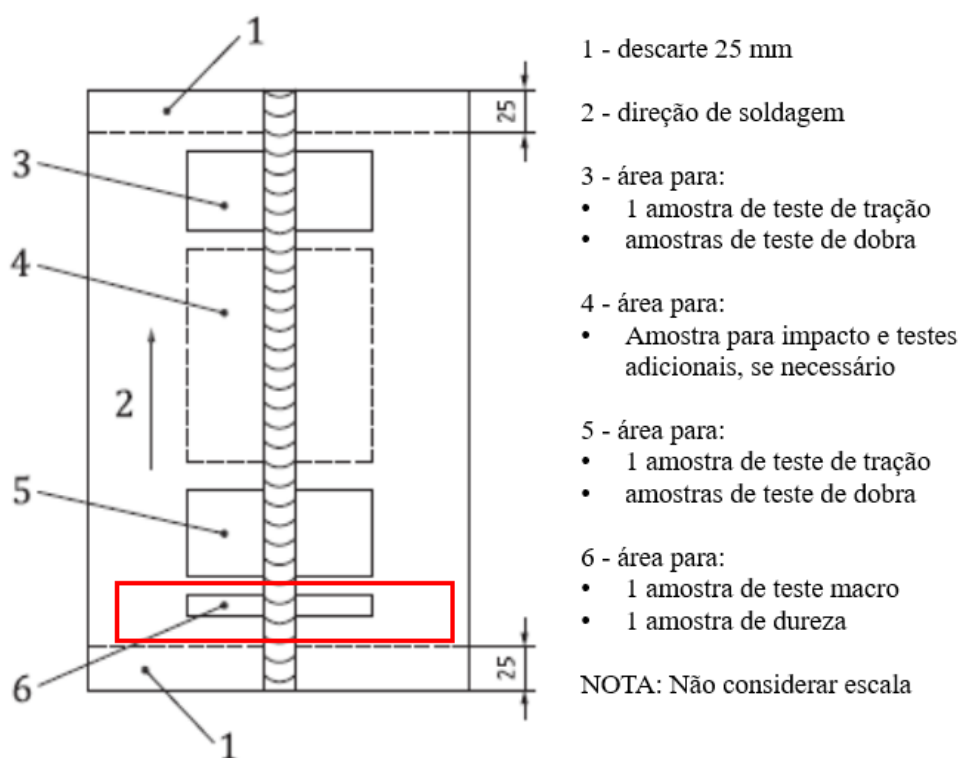
Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a taxa de deposição de arame mensura a massa depositada de arame por unidade de tempo, conforme expresso na Equação 5. Para verificação da massa antes e após soldagem foi utilizada uma balança eletrônica modelo 3400/3 fabricada pela Toledo do Brasil com precisão de 1g.

3.5.2 Ensaio de Dureza

Para realização do ensaio de dureza foi realizado o corte de uma seção transversal a região soldada, com o objetivo de avaliar a influência do aporte térmico e do metal de adição sobre a dureza do material.

Os corpos de prova para os ensaios de dureza foram obtidas de acordo com a norma ISO 15614-1 (2017), conforme apresentado na Figura 29, e foram cortadas das chapas soldadas através do processo de corte eletro a fio com a máquina Charmilles Robofil 290. Este processo foi escolhido pois o aporte térmico do processo de corte e o acabamento superficial reduz a possibilidade de aumento de dureza por encruamento e pelo aquecimento causado pelo atrito. Os corpos de prova foram cortados com 10 mm de largura e 50 mm de comprimento, sendo 25 mm para cada lado partindo do centro do cordão de solda.

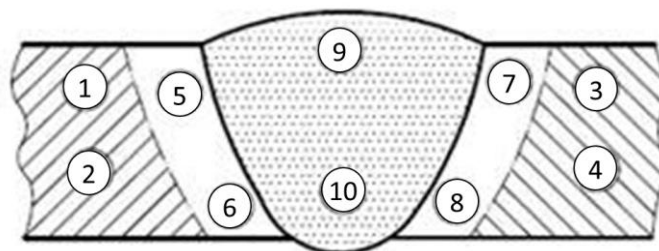
Figura 29 - Localização dos corpos de prova para uma junta de topo.



Fonte: Adaptado de ISO 15614-1 (2017)

Após o corte dos corpos de prova a dureza Vickers foi medida em 10 pontos distintos (Figura 30) conforme norma DIN EN ISO 9015-1 (2011) através do microdurômetro Emco-Test Duracan 20, aplicando uma força de 50N (5kgf), durante um intervalo de 10 segundos (padrão de carga HV5).

Figura 30 - Exemplos de regiões para teste de dureza.



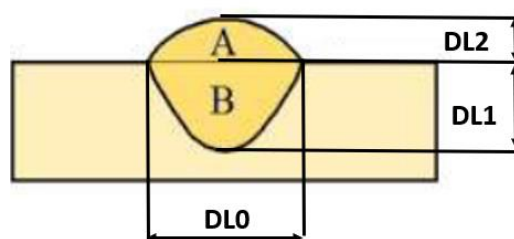
Fonte: Adaptado de DIN EN ISO 9015-1 (2011)

3.5.3 Macrografia e Diluição

As análises macrográficas foram realizadas no microscópio estereoscópio do fabricante Topcon, com sistema Metalab e software Inspetor de Solda integrado, sendo utilizados neste ensaio os mesmos corpos de prova utilizados para os ensaios de microdureza. Os principais objetivos da realização das macrografias foram a medição das dimensões da solda para o cálculo da diluição e para visualizar com maior nitidez a zona fundida (ZF) e termicamente afetada (ZTA).

A diluição como visto anteriormente pode ser obtida através da relação entre as áreas do material diluído (B) e do reforço (A), onde as medidas DL0, DL1 e DL2 representam respectivamente a largura, penetração e reforço do cordão de solda, conforme Figura 31.

Figura 31 - Áreas e dimensões para cálculo da diluição.



Fonte: Adaptado de Modenesi, Marques e Santos (2012).

Assumindo-se as geometrias das áreas como semi-elipses, as áreas das regiões A e B podem ser obtidas através das Equações 8 e 9 e assim a Equação 7 pode ser utilizada para obter a diluição.

$$A = \frac{\pi * DL0 * DL2}{4} \quad (8)$$

$$B = \frac{\pi * DL0 * DL1}{4} \quad (9)$$

3.5.4 Microscopia Ótica

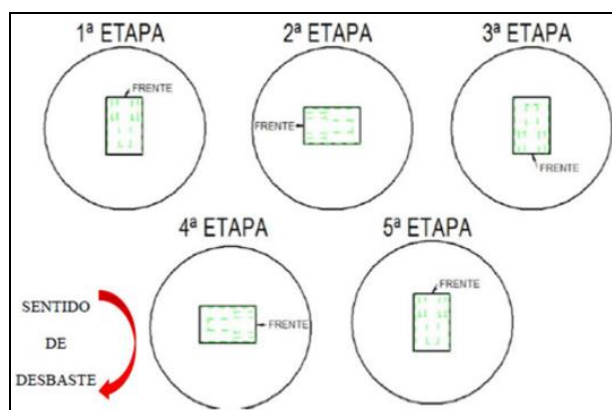
Para realização da caracterização por microscopia ótica os corpos de prova passaram inicialmente pelo processo de embutimento. O embutimento tem relevante importância para a análise de corpos de prova de pequeno tamanho e geometria complexa, visto facilitar o manuseio durante o lixamento e polimento, podendo ser realizado à quente ou a frio. No presente trabalho optou-se pelo embutimento à quente visto a disponibilidade da prensa de embutimento e da resina, baquelite, no laboratório de engenharia de soldagem da empresa. O embutimento foi realizado em uma prensa de embutimento modelo Panambra Tempo Press.

Após o processo de embutimento, os corpos de prova passaram pelo processo de lixamento e polimento para planificação da superfície e retirada de irregularidades superficiais oriundas do processo de corte, manuseio e ensaios anteriores. Esta etapa da preparação foi realizada utilizando a lixadeira e politriz metalográfica AROPOL VV-PUD.

Foram utilizadas para o lixamento lixas d'água com granulometria de 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 com refrigeração por água. O polimento foi realizado utilizando pano de polimento com aplicação de alumina 1 micra.

Tudo foi orientado pela norma técnica NBR 13284, a qual recomenda mudança de orientação de 90° entre lixas e a limpeza frequente para retirada de impurezas para evitar a contaminação dos abrasivos, conforme exemplificado na Figura 32.

Figura 32 - Procedimento de mudança de orientação durante o lixamento.

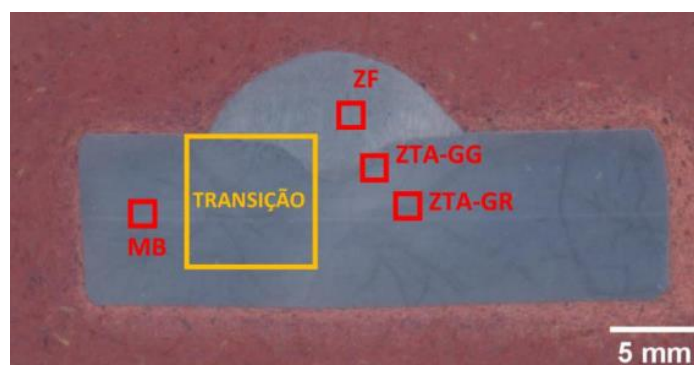


Fonte: Próprio autor.

O ataque químico para revelar a microestrutura do material foi realizado conforme norma técnica NBR 8108 através da imersão em Nital 5% pelo tempo de 5 segundos, com a finalidade de evidenciar os contornos de grão e a diferenciação entre os microconstituintes.

Com objetivo de avaliar a influência do aporte térmico sobre a morfologia da microestrutura do aço, foram definidas três regiões principais de análise, estando localizados em cada uma das principais regiões de soldagem: metal base (MB), zona fundida (ZF), zona termicamente afetada de grãos grosseiros (ZTA-GG) e de grãos refinados (ZTA-GR), além de uma zona de transição. A Figura 33 apresenta as regiões de análise.

Figura 33 - Pontos de avaliação da microestrutura



Fonte: Próprio Autor.

As imagens de microscopia ótica foram obtidas através do microscópio Olympus BX60M, o qual permite ampliações de 25 a 1000 vezes, sendo utilizadas no presente trabalho ampliações de 25 a 200 vezes.

3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com a finalidade de identificar as fases presentes na microestrutura de cada zona de interesse anteriormente identificadas, realizaram-se análises macrográficas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Tescan, modelo VEGA LM 3.

A amostra para a análise foi retirada da baquelite e preparada novamente com o mesmo procedimento realizado para a realização das imagens em microscopia ótica, as em microscopia eletrônica de varredura foram realizadas usando um detector de elétrons secundários (SE) aplicando-se ampliações de 5.000 e 10.000 vezes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

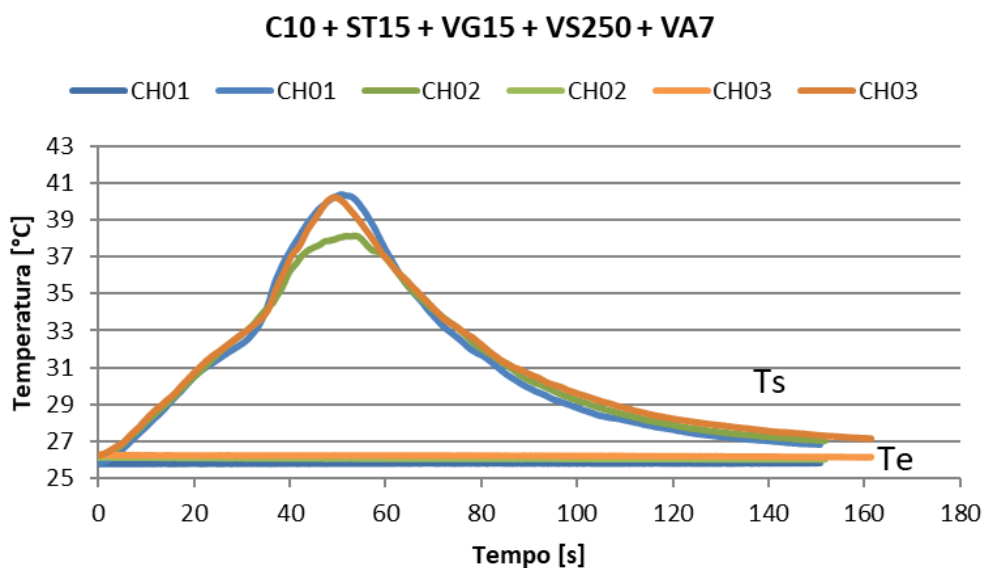
No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho para o aporte térmico e análise metalúrgica.

4.1 APORTE TÉRMICO

Com base na combinação de experimentos obtida com auxílio do software Minitab® foram realizadas as soldagens de três corpos de prova para cada uma das 18 condições expressas na Tabela 15.

Com o auxílio do calorímetro as curvas de temperatura da água na entrada e saída do calorímetro foram obtidas, conforme exemplificado na Figura 34, onde o título do gráfico corresponde aos parâmetros de soldagem utilizados, respectivamente, composição do gás (C10), *Stick-out* (15 mm), vazão do gás (15 l/min), velocidade de soldagem (250 mm/min) e velocidade de alimentação de arame (7 m/min), resultando no título C10 + ST15 + VG15 + VS250 + VA7. De modo similar a legenda com a nomenclatura CH01, CH02, CH03 referem-se respectivamente à primeira, segunda e terceira chapa soldada neste estudo. O mesmo padrão é mantido em todo o trabalho e apêndices.

Figura 34 - Curvas de temperatura de entrada e saída de água.

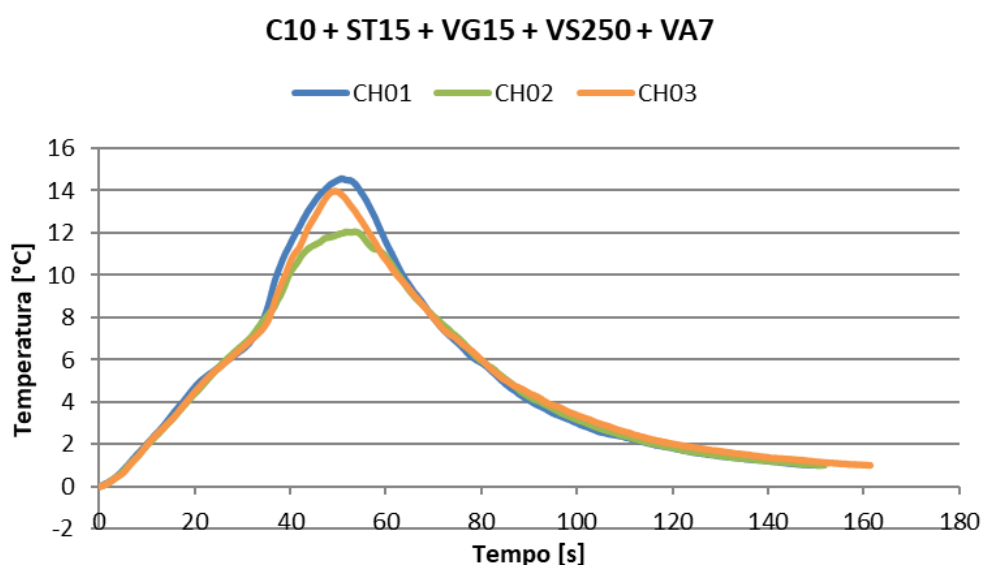


Fonte: Próprio autor.

A figura anterior mostra as curvas de temperatura para condição C10 + ST15 + VG15 + VS250 + VA7, sendo possível observar um aumento de temperatura até o instante de tempo aproximado de 55 segundos, correspondente ao tempo de aquecimento. Após esse período a temperatura decai até o momento em que a diferença de temperatura atinja o ponto de corte, na figura o tempo de resfriamento médio foi de 156 segundos. Essas curvas são semelhantes as apresentadas por SGARBI (2013), ANTONI (2014) HACKERNHAAR (2016) e GIAROLLO (2018).

Para fins de controle um ponto de corte no instante em que a temperatura da entrada e da saída diferiam em 1,0°C foi adotado. As curvas de temperatura foram subtraídas gerando as curvas do ciclo térmico de soldagem, conforme apresentado na Figura 35 para o mesmo caso da figura anterior. O compilado das curvas de temperaturas de soldagem para cada condição soldada são apresentadas nos apêndices A (Taguchi) e B (OFAT).

Figura 35 - Curva de variação da temperatura durante a soldagem para condição 1.



Fonte: Próprio autor.

O aporte térmico foi calculado com base nos resultados das curvas de temperatura, assumindo a densidade (ρ) da água em temperatura ambiente (25°C) como 997 kg/m³ e o calor específico (c_p) com valor de 4.187 J/kg.K. Com os dados do aporte térmico a eficiência térmica de cada soldagem foi obtida, gerando os resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados de aporte térmico e eficiência térmica calculada

(continua)

Condição	CP	Qa (calor aportado) [J]	Energia de soldagem [J/mm]	Eficiência Calculada	Aporte térmico [J/mm]	Média eficiência	Desv. Pad.
1	1	126416	722	0,7	483,9	0,7	0
	2	119894	721,1	0,6	458,9		
	3	126636	720,7	0,7	485,5		
2	16	103200	564	0,7	389,4	0,7	0
	17	97839,6	567,8	0,7	369,9		
	18	100610	603,6	0,6	380,4		
3	4	130902	841	0,6	494	0,6	0
	5	145308	841	0,7	547,3		
	6	152913	848,6	0,7	577		
4	13	123197	701,5	0,7	459,1	0,6	0
	14	117072	697,7	0,6	438,7		
	15	114652	709,7	0,6	427,2		
5	7	149969	848,1	0,7	557,7	0,6	0,1
	8	143170	848,6	0,6	532,4		
	9	122515	837,5	0,5	455,6		
6	10	165176	1231,3	0,5	622,1	0,6	0,1
	11	192668	1236,4	0,6	731,6		
	12	198867	1247,3	0,6	757,5		
7	19	147771	1118,4	0,5	554,3	0,5	0
	20	161851	1118,4	0,5	605,8		
	21	171124	1118,4	0,6	640,5		
8	34	100129	1349,1	0,3	379,3	0,3	0
	35	110078	1349,1	0,3	417		
	36	132540	1403,7	0,4	502		
9	22	124885	727,2	0,7	496,2	0,7	0
	23	126098	734,8	0,7	501		
	24	111213	734,8	0,6	441,9		

Fonte: Próprio autor.

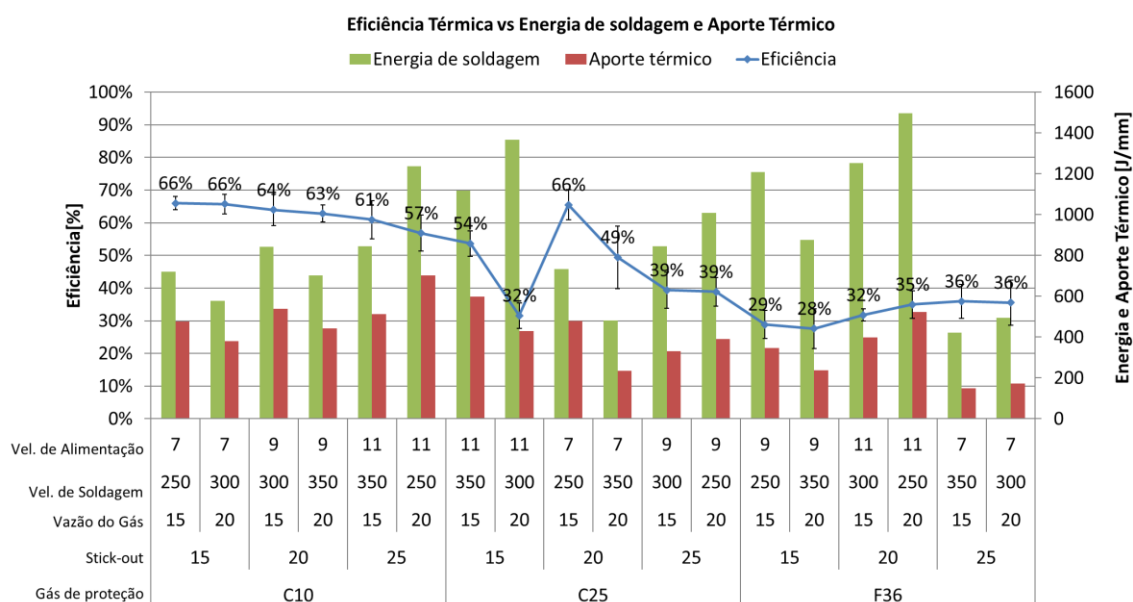
Tabela 15 - Resultados de aporte térmico e eficiência térmica calculada
(conclusão)

Condição	CP	Qa (calor aportado) [J]	Energia de soldagem [J/mm]	Eficiência Calculada	Aporte térmico [J/mm]	Média eficiência	Desv. Pad
10	31	76290,5	482	0,6	289,3	0,5	0,1
	32	60623,4	482	0,5	226,4		
	33	53146,5	479,6	0,4	198,5		
11	25	93766	848,5	0,4	350,5	0,4	0,1
	26	74233,2	841,3	0,3	278,5		
	27	98408,8	844,9	0,4	369,3		
12	28	90706,4	1016,5	0,3	343,4	0,4	0
	29	110987	999,6	0,4	420,8		
	30	108390	1010,9	0,4	411,6		
13	52	77530	1197,8	0,2	291,2	0,3	0
	53	94654,5	1214,1	0,3	359,4		
	54	105027	1213,8	0,3	397		
14	37	49235,8	871,5	0,2	184,7	0,3	0,1
	38	65574,9	875,3	0,3	246		
	39	78779,1	883,3	0,3	295,5		
15	49	104345	1250	0,3	396	0,3	0
	50	98504,4	1250	0,3	373,8		
	51	111696	1260	0,3	423,9		
16	40	154496	1487,9	0,4	589,5	0,4	0
	41	122703	1494	0,3	468,2		
	42	134978	1512	0,3	515		
17	46	34027,6	419,1	0,3	127,1	0,4	0,1
	47	45348,8	420,2	0,4	169,7		
	48	42393,5	425,7	0,4	158		
18	43	52691,7	492,8	0,4	198,8	0,4	0,1
	44	36299,6	494,1	0,3	136,7		
	45	51141,6	499,2	0,4	192,6		

Fonte: Próprio autor.

Para melhor visualização dos resultados o gráfico da Figura 36 apresenta a comparação entre a energia de soldagem, aporte térmico e a eficiência térmica.

Figura 36 - Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico (Taguchi).



Fonte: Próprio autor.

No eixo horizontal do gráfico da Figura 43 constam os parâmetros de soldagem utilizados, já na vertical encontram-se os valores obtidos para eficiência térmica, aporte térmico e energia de soldagem.

4.1.1 Resultados Taguchi

Os resultados obtidos para a eficiência térmica foram inseridos novamente no minitab® como resposta ao método de Taguchi para condições propostas, onde os valores são transformados em médias e razão sinal/ruído (S/N). As médias consistem nas médias aritméticas dos valores obtidos experimentalmente e a razão S/N consiste em uma ferramenta analítica do método de Taguchi, a qual mensura o desvio na resposta (sinal) causado pelas variáveis externas do processo (ruído) em relação aos valores desejados (FISCHER, 2015).

Com o objetivo de maximizar a eficiência térmica do processo de soldagem selecionou-se o critério “maior é melhor” para a razão S/N. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18, onde o índice delta mensura a intensidade da variação na resposta mediante alterações individuais em cada um dos parâmetros avaliados e a linha

posto apresenta, em ordem crescente, a influência de cada parâmetro sobre a eficiência térmica do processo, onde o parâmetro com maior influência está referenciado com o posto 1 e o de menor influência com o posto 5.

Tabela 18 - Resultados das Médias e Razão Sinal conforme Taguchi.

Nível	Vazão do Gás [l/min]		Gás de proteção [esp.]		Vel. de Soldagem [mm/min]		Vel. de Alimentação [m/min]		Stick-out [mm]	
	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N
1	0,4956	-6,512	0,6272	-4,064	0,4851	-6,718	0,5304	-5,819	0,4558	-7,44
2	0,4493	-7,357	0,4641	-6,917	0,4465	-7,413	0,4358	-7,7	0,5142	-6,132
3			0,3245	-9,823	0,4841	-6,655	0,4496	-7285	0,4458	-7,231
Delta	0,0473	0,845	0,3227	5,759	0,0386	0,776	0,0946	1,882	0,0684	1,309
Posto	4		1		5		2		3	

Fonte: Próprio autor.

Observa-se o maior valor de delta, ou seja, maior amplitude de variação nos resultados das médias e razão S/N para a composição do gás de proteção (posto 1), sendo este o parâmetro com maior influência nas variações da eficiência térmica, seguido pela velocidade de alimentação de arame (posto 2), *stick-out* (posto 3), vazão do gás de proteção (posto 4) e com menor influência a velocidade de soldagem (posto 5).

Após a determinação da ordem de influência dos valores realizou-se a análise de variância (ANOVA), visando determinar a influência relativa dos parâmetros de soldagem sobre a eficiência térmica do processo. A Tabela 19 apresenta a soma dos quadrados dos resultados (SQ) com base na qual obtêm-se o percentual de contribuição de cada variável. A tabela apresenta ainda o “Valor-P” que consiste na medida estatística de validação da confiabilidade, se o Valor-P obtido para um determinado parâmetro de soldagem for inferior à 0,05 ($\alpha = 5\%$), não se pode afirmar com confiabilidade de 95% que o parâmetro exerça influência sobre a eficiência térmica de soldagem. Do mesmo modo, quanto menor for o valor-P obtido maior a confiabilidade de que o parâmetro tenha influência relevante sobre a variável de saída.

Tabela 19 - Análise de variância (ANOVA).

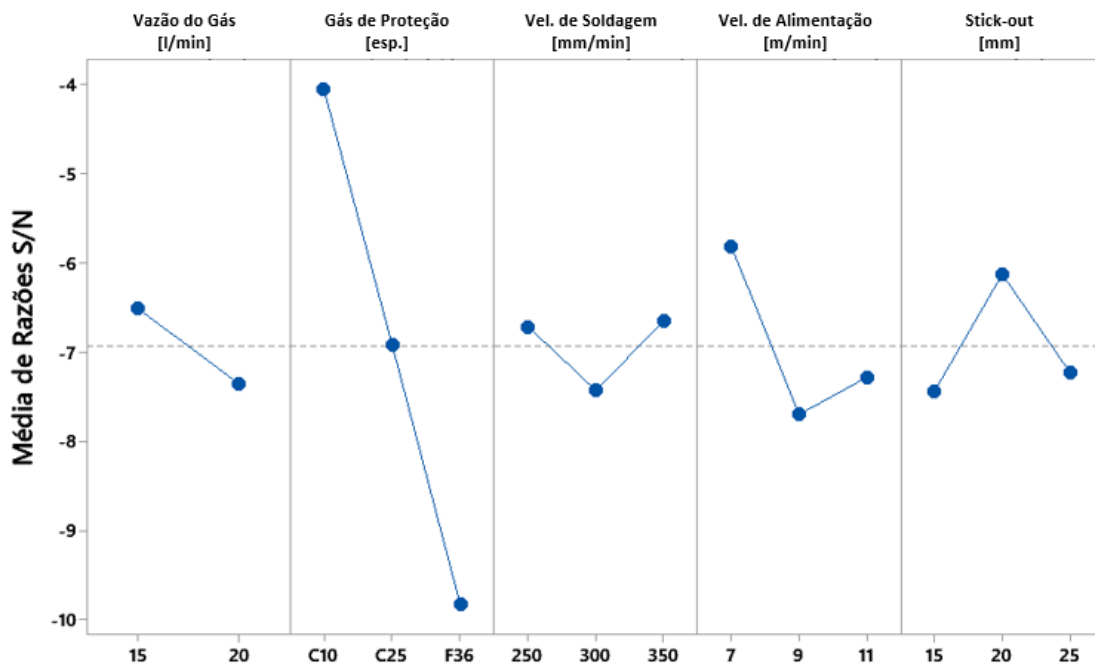
Parâmetros	GL	SQ	Contribuição [%]	Valor-P
Vazão do Gás [l/min]	1	0,010081	2,78	0,1055835
Gás de proteção [esp.]	2	0,275417	75,83	0,0000428
Vel. de Soldagem [mm/min]	2	0,005802	1,60	0,4238402
Vel. de Aliment. de Arame [m/min]	2	0,031305	8,62	0,0362642
<i>Stick-out</i> [mm]	2	0,016367	4,51	0,1269689
Erro	8	0,024238	6,67	
Total	17	0,363211	100,00	

Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados observa-se que a composição do gás de proteção é responsável por 75,83% da oscilação na eficiência térmica medida, seguida pela velocidade de alimentação de arame, responsável por 8,62% das oscilações. Pode-se observar também que a composição do gás de proteção e velocidade de alimentação apresentaram valor-P inferior à 0,05, deste modo, pode-se afirmar que estes parâmetros exercem influência relevante na eficiência térmica, em contrapartida, os parâmetros com menores percentuais de influência apresentaram valor-P superior a 5%, sendo assim, não é possível afirmar com 95% de confiabilidade que estas variáveis exerçam influência relevante na eficiência térmica de soldagem.

Por fim, a otimização dos parâmetros de soldagem se dá na maximização da razão S/N conforme gráfico da Figura 37, no qual também é possível observar o nível de influência de cada parâmetro, visto que quanto maior a inclinação da reta do parâmetro analisado, maior a magnitude de efeito de sua alteração. Deste modo é possível observar graficamente a mesma relação de influência: composição do gás de proteção > velocidade de alimentação de arame > *stick-out* > vazão do gás > velocidade de soldagem.

Figura 37 - Razão S/N da eficiência térmica para os parâmetros de soldagem analisados.



Sinal-ruído: Maior é melhor

Fonte: Próprio autor.

A otimização da eficiência térmica de acordo o resultado do método de Taguchi consiste na combinação dos parâmetros analisados nos níveis que apresentaram valores mais elevados para as médias da razão S/N (pontos mais altos no gráfico), a Tabela 20 apresenta a combinação ótima.

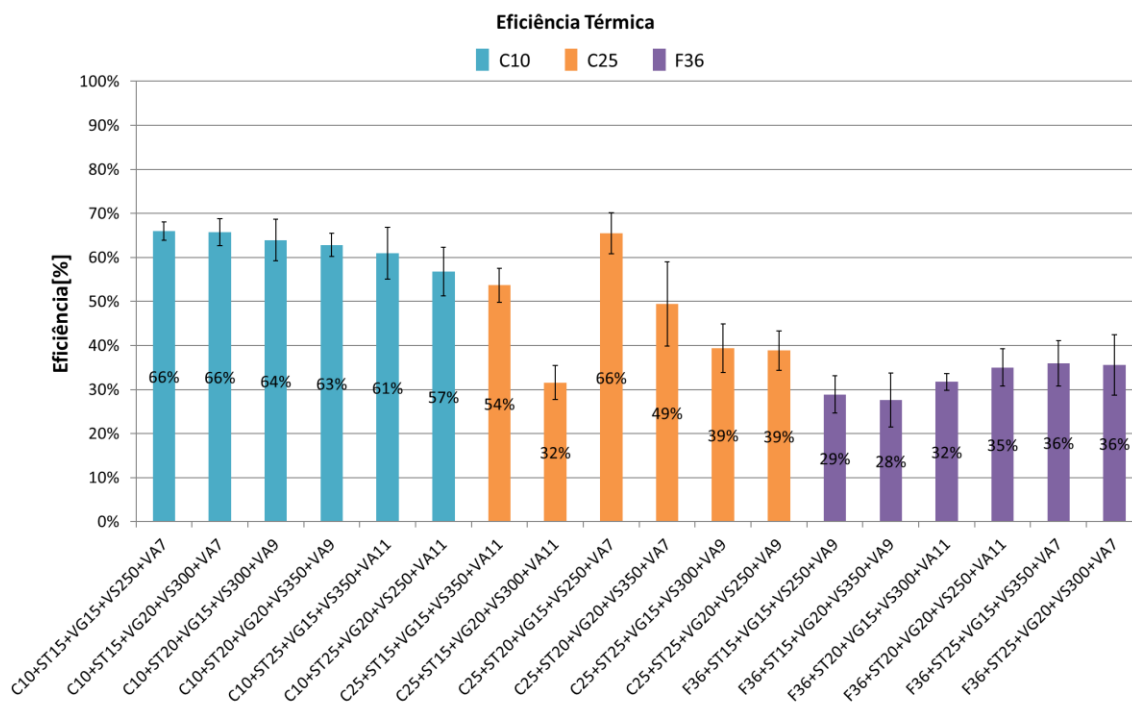
Tabela 20 - Melhor combinação de parâmetros para máxima eficiência térmica.

Vazão do Gás [l/min]	Gás de proteção [esp.]	Vel. de Soldagem [mm/min]	Vel. de Alimentação [m/min]	Stick-out [mm]
15	C10	350	7	20

Fonte: Próprio autor.

A influência predominante da composição do gás de proteção tendo como nível ótimo a composição C10 pode ser observada através da reorganização do gráfico de energia de soldagem em função da composição, conforme apresentado na Figura 38

Figura 38 - Eficiência térmica de soldagem em função da composição do gás.



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar com base no gráfico de eficiência térmica que as soldagens realizadas utilizando o gás de proteção C10 apresentaram maior estabilidade nos resultados, além maiores valores médios para todas as soldagens realizadas com esta composição de gás. Estes resultados estão alinhados com os obtidos por BOHRER (2013), o qual comprovou que apesar de misturas ricas em dióxido de carbono proporcionarem uma maior transferência de calor ocasionada pela recombinação, a proporção utilizada no gás C25 apresentou resultados inferiores aos obtidos para gases de proteção com composição de 10% (C10) e 100% dióxido de carbono. Além disso observa-se grande instabilidade nos resultados de eficiência térmica com a utilização do gás C25, oscilando na faixa de 32 a 66%.

4.1.2 Resultados OFAT

A validação do método de Taguchi foi realizada pelo método OFAT, o qual consiste em variar um parâmetro por vez. Como a melhor condição para a composição do gás representou mais de 75% de relevância, sendo comprovada pela análise de variância e pelos resultados expressos no gráfico da Figura 38, a composição do gás foi mantida fixa nesta etapa da comprovação. O procedimento considerou a hierarquia de

influência definida pelo método de Taguchi, onde a variação de um fator por vez ocorreu do fator com menor influência (posto 5) até o segundo fator com maior influência (posto 2). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 21.

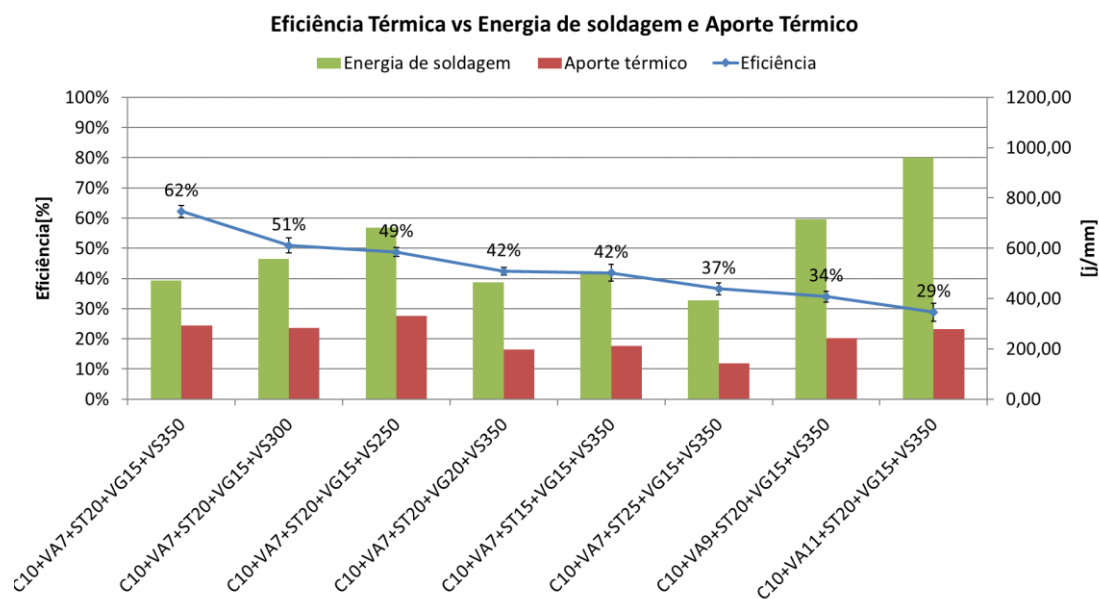
Tabela 21 - Resultados obtidos pelo método de validação OFAT.

Condição	Gás de proteção [esp.]	Vel. de Alimentação [m/min]	Stick-out [mm]	Vazão do Gás [l/min]	Vel. de Soldagem [mm/min]	Média eficiência [%]
1	C10	7	20	15	350	62 ± 2
2	C10	7	20	15	300	51 ± 2
3	C10	7	20	15	250	49 ± 1
4	C10	7	20	20	350	42 ± 1
5	C10	7	15	15	350	42 ± 3
6	C10	7	25	15	350	37 ± 2
7	C10	9	20	15	350	34 ± 2
8	C10	11	20	15	350	29 ± 3
Posto	1	2	3	4	5	

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que na validação a melhor eficiência térmica de soldagem foi obtida para a primeira condição soldada no método OFAT, sendo esta a combinação de parâmetros sugerida pelo método de Taguchi conforme mostrado na Tabela 18. A Figura 39 apresenta graficamente este resultado.

Figura 39 - Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico.

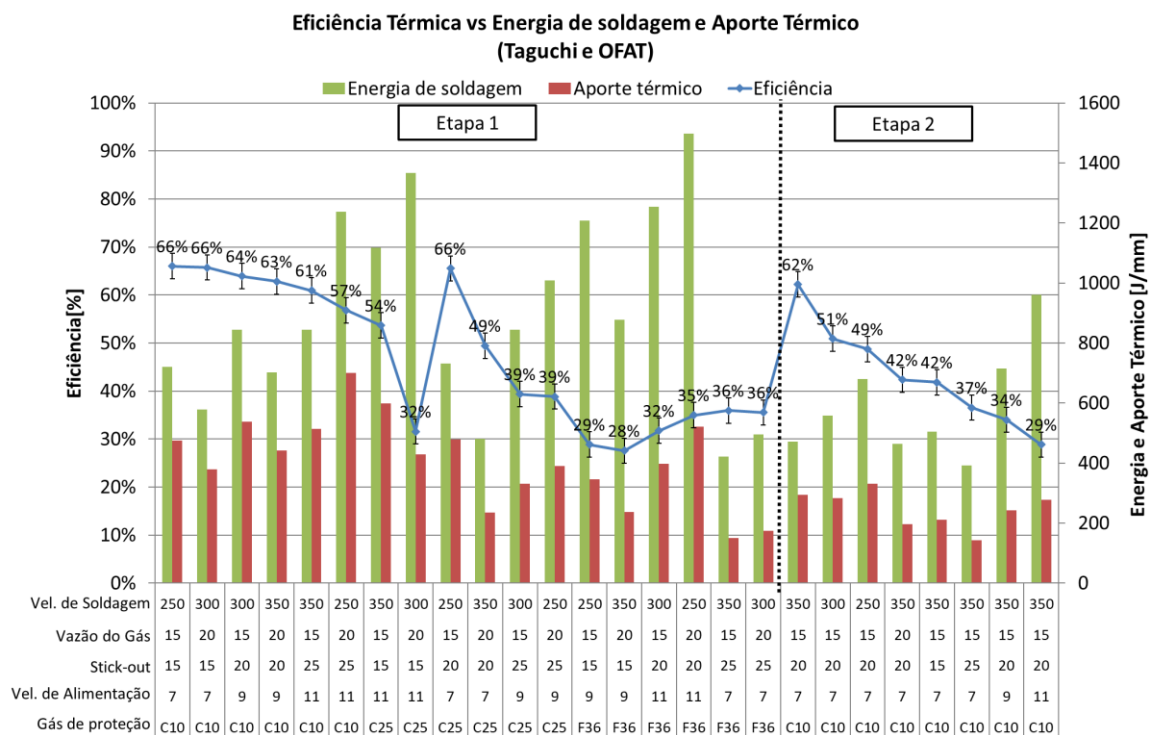


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 46 nota-se que a combinação de maior eficiência foi a combinação indicada pelo método de Taguchi, C10 + VA7 + ST20 + VG15 + VS350, decaindo com o aumento da velocidade de alimentação de arame de 7 para 11 m/min. Esse efeito foi observado também no trabalho de SGARBI (2013), onde a queda na eficiência térmica é ocasionada pelo aumento da corrente de soldagem para garantir a fusão de uma maior massa de arame por unidade de tempo.

Realizando a comparação dos resultados experimentais do método de Taguchi (Etapa 1) com os resultados da validação OFAT (Etapa 2), observa-se que a eficiência térmica obtida nos primeiros ensaios apresentou alguns resultados mais elevados. No entanto, na segunda etapa tem-se um resultado decrescente na eficiência térmica à medida que afasta-se da condição otimizada, conforme apresentado na Figura 40. Portanto, pode-se creditar o resultado inferior obtido através da solução otimizada à fatores não controlados neste estudo, como por exemplo temperatura e umidade relativa do ar ambiente, que tem influência sobre a troca de calor por convecção na parte superior da chapa soldada.

Figura 40 - Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico (Taguchi vs OFAT).



Fonte: Próprio autor.

Pode-se concluir que a não obtenção da máxima eficiência térmica com a utilização dos parâmetros otimizados é causada por parâmetros não avaliados e/ou fatores externos, como umidade e temperatura do ar ambiente, fatores que exercem influência sobre a troca de calor por convecção na superfície livre da chapa soldada, tendo em vista que os parâmetros que exercem influência relevante, conforme análise ANOVA, não sofrem alteração nos ensaios que apresentaram maior eficiência medida no método de Taguchi e na condição otimizada utilizada no primeiro ensaio do método OFAT.

4.2 ANÁLISES METALÚRGICAS

As análises metalúrgicas concentraram-se nos corpos de prova resultantes do método OFAT.

4.2.1 Taxa de Deposição

A Tabela 22 apresenta os resultados médios para a taxa de deposição de arame e rendimento depositado para cada uma das 8 condições de soldagem utilizadas no método OFAT.

Tabela 22 - Taxa de deposição de arame e rendimento depositado.

Cond.	Nome	Massa inicial [kg]	Massa final [kg]	Dif. Massa [kg]	Comp. Cordão [mm]	Consumo de Arame [m]	Taxa de Deposição [kg/h]	ηd (rendimento depositado) [%]
1	C10+VA7+ST20+VG15+VS350	2,11	2,15	0,04	250	5,28	3,21	88,61
2	C10+VA7+ST20+VG15+VS300	2,11	2,16	0,05	250	6,06	3,14	86,75
3	C10+VA7+ST20+VG15+VS250	2,12	2,17	0,05	250	7,26	3,16	87,41
4	C10+VA7+ST20+VG20+VS350	2,11	2,15	0,04	250	5,29	3,1	85,62
5	C10+VA7+ST15+VG15+VS350	2,1	2,14	0,04	250	5,27	3,11	85,81
6	C10+VA7+ST25+VG15+VS350	2,11	2,15	0,04	250	5,32	3,05	84,33
7	C10+VA9+ST20+VG15+VS350	2,1	2,15	0,05	250	6,83	4,19	90,1
8	C10+VA11+ST20+VG15+VS350	2,11	2,17	0,06	250	8,34	5,12	89,95

Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados é possível observar que todas as condições apresentaram um bom rendimento depositado, bem como a condição otimizada proposta pelo método de Taguchi para maior eficiência térmica apresentou um rendimento

apenas 1,49% inferior ao obtido com a combinação 8, melhor resultado de rendimento depositado obtido no ensaio OFAT.

Pode-se observar também, que a velocidade de alimentação possui influência relevante no rendimento depositado, sendo que apenas o aumento da velocidade de alimentação proporcionou resultados superiores ao da condição otimizada. Considera-se satisfatória a condição proposta por Taguchi visto a otimização da eficiência térmica proporcionar bom rendimento depositado.

4.2.2 Diluição

As análises de diluição de soldagem foram realizadas antes dos ensaios de dureza em função da disponibilidade dos equipamentos em laboratório. Para esta análise foram utilizados os mesmos corpos de prova confeccionados para as análises de dureza.

A Tabela 23 apresenta as imagens dos três ensaios (M1, M2 e M3) realizados para cada uma das condições de soldagem do método OFAT com as respectivas medidas relevantes para o cálculo da diluição.

Tabela 23 - Macrografias das 8 condições de soldagem do método OFAT.

(continua)

Condição	Nome	M1	M2	M3
1	C10 + VA7 + ST20 + VG15 + VS350	<p>DL2 L=3.112 mm DL0 L=9.481 mm DL1 L=1.737 mm</p>	<p>DL2 L=3.076 mm DL0 L=9.735 mm DL1 L=1.990 mm</p>	<p>DL2 L=3.222 mm DL0 L=9.889 mm DL1 L=1.737 mm</p>
2	C10 + VA7 + ST20 + VG15 + VS300	<p>DL2 L=3.293 mm DL0 L=10.278 mm DL1 L=1.846 mm</p>	<p>DL2 L=3.257 mm DL0 L=10.169 mm DL1 L=2.063 mm</p>	<p>DL2 L=3.293 mm DL0 L=10.495 mm DL1 L=1.774 mm</p>
3	C10 + VA7 + ST20 + VG15 + VS250	<p>DL2 L=3.620 mm DL0 L=11.182 mm DL1 L=2.027 mm</p>	<p>DL2 L=3.547 mm DL0 L=11.075 mm DL1 L=1.882 mm</p>	<p>DL2 L=3.619 mm DL0 L=11.291 mm DL1 L=1.846 mm</p>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 24 - Macrografias das 8 condições de soldagem do método OFAT.

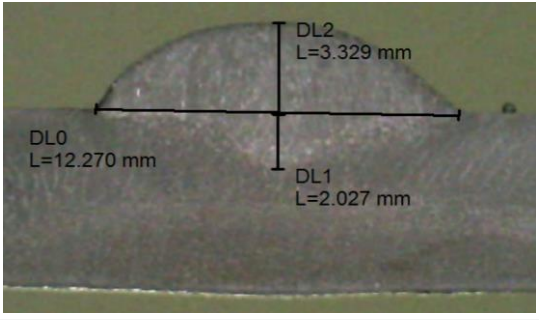
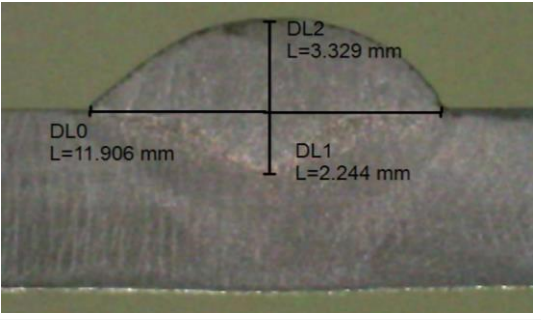
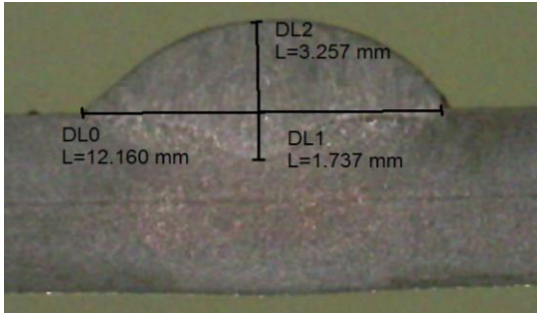
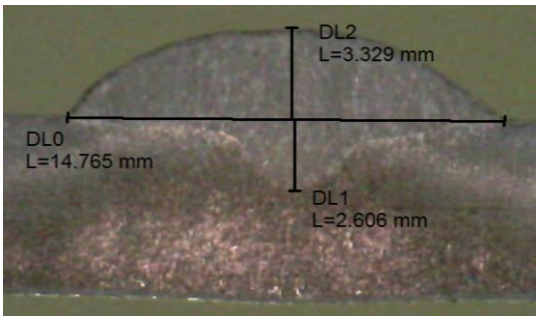
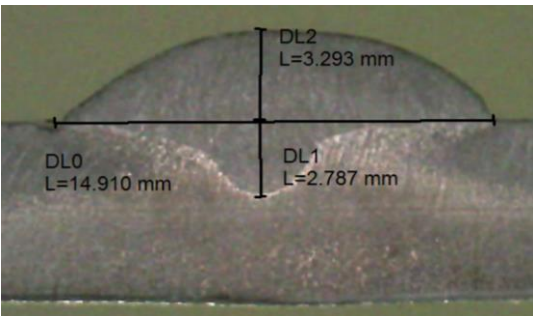
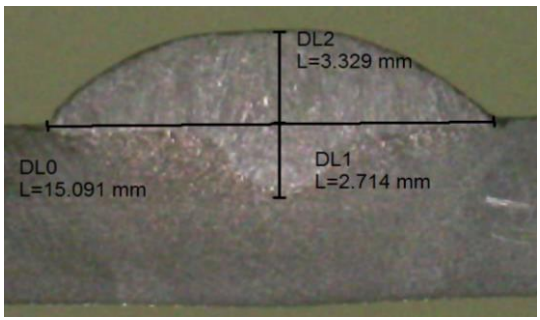
(continuação)

Condição	Nome	M1	M2	M3
4	C10 + VA7 + ST20 + VG20 + VS350	<p>DL0 L=9.337 mm</p> <p>DL2 L=3.112 mm</p> <p>DL1 L=1.592 mm</p>	<p>DL0 L=9.341 mm</p> <p>DL2 L=3.148 mm</p> <p>DL1 L=1.592 mm</p>	<p>DL0 L=9.448 mm</p> <p>DL2 L=3.112 mm</p> <p>DL1 L=1.846 mm</p>
5	C10 + VA7 + ST15 + VG15 + VS350	<p>DL0 L=9.989 mm</p> <p>DL2 L=3.149 mm</p> <p>DL1 L=1.701 mm</p>	<p>DL0 L=9.808 mm</p> <p>DL2 L=3.076 mm</p> <p>DL1 L=1.847 mm</p>	<p>DL0 L=10.097 mm</p> <p>DL2 L=3.004 mm</p> <p>DL1 L=2.135 mm</p>
6	C10 + VA7 + ST25 + VG15 + VS350	<p>DL0 L=8.723 mm</p> <p>DL2 L=3.293 mm</p> <p>DL1 L=1.339 mm</p>	<p>DL0 L=8.685 mm</p> <p>DL2 L=3.366 mm</p> <p>DL1 L=1.556 mm</p>	<p>DL0 L=8.471 mm</p> <p>DL2 L=3.004 mm</p> <p>DL1 L=1.375 mm</p>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25 - Macrografias das 8 condições de soldagem do método OFAT.

(conclusão)

Condição	Nome	M1	M2	M3
7	C10 + VA9 + ST20 + VG15 + VS350	 Macrografia M1 para a condição 7. O soldo apresenta uma forma arredondada. As dimensões são: DL0 = 12.270 mm, DL1 = 2.027 mm e DL2 = 3.329 mm.	 Macrografia M2 para a condição 7. O soldo apresenta uma forma arredondada. As dimensões são: DL0 = 11.906 mm, DL1 = 2.244 mm e DL2 = 3.329 mm.	 Macrografia M3 para a condição 7. O soldo apresenta uma forma arredondada. As dimensões são: DL0 = 12.160 mm, DL1 = 1.737 mm e DL2 = 3.257 mm.
8	C10 + VA11 + ST20 + VG15 + VS350	 Macrografia M1 para a condição 8. O soldo apresenta uma forma arredondada. As dimensões são: DL0 = 14.765 mm, DL1 = 2.606 mm e DL2 = 3.329 mm.	 Macrografia M2 para a condição 8. O soldo apresenta uma forma arredondada. As dimensões são: DL0 = 14.910 mm, DL1 = 2.787 mm e DL2 = 3.293 mm.	 Macrografia M3 para a condição 8. O soldo apresenta uma forma arredondada. As dimensões são: DL0 = 15.091 mm, DL1 = 2.714 mm e DL2 = 3.329 mm.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos para a diluição para cada combinação de parâmetros utilizada no método OFAT.

Tabela 26 - Resultados obtidos para diluição.

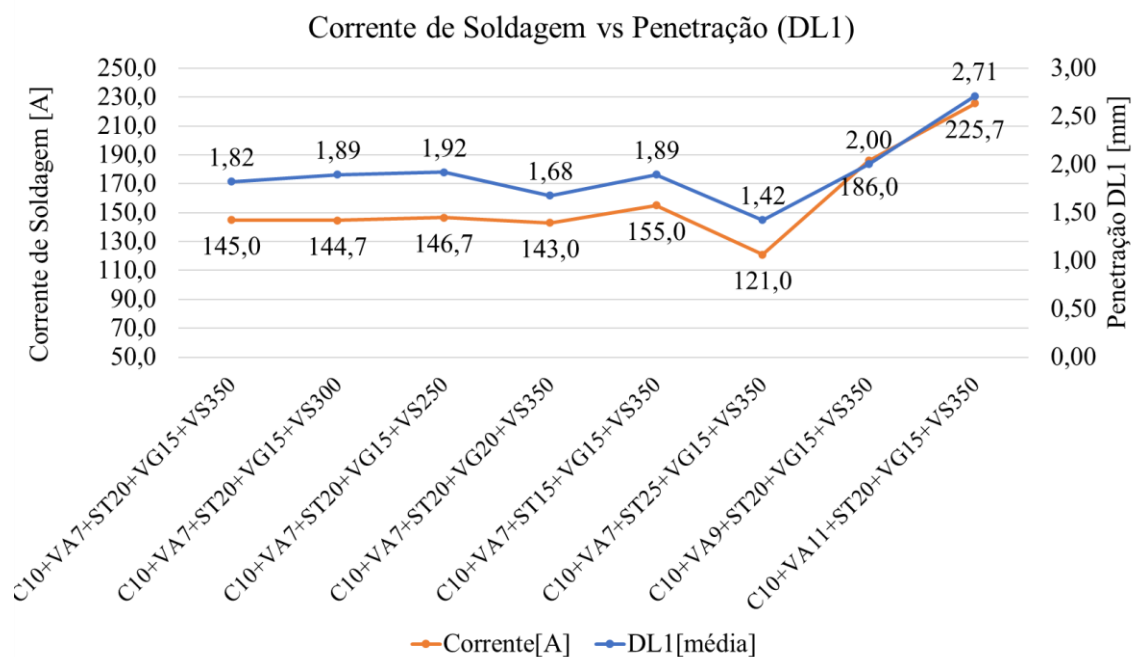
Combinação	Diluição [%]	
	Média	Desvio Padrão
C10+VA7+ST20+VG15+VS350	36,7	2,3
C10+VA7+ST20+VG15+VS300	36,6	2,0
C10+VA7+ST20+VG15+VS250	34,8	1,1
C10+VA7+ST20+VG20+VS350	34,9	2,0
C10+VA7+ST15+VG15+VS350	38,0	3,3
C10+VA7+ST25+VG15+VS350	30,6	1,5
C10+VA9+ST20+VG15+VS350	37,6	2,7
C10+VA11+ST20+VG15+VS350	45,0	1,0

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 21 pode-se observar que a última combinação testada, a qual utilizou o parâmetro de velocidade de alimentação de arame igual 11 m/min proporcionou uma diluição de 45%, valor consideravelmente maior que a obtida pela combinação otimizada para eficiência térmica proposta pelo método de Taguchi, a qual apresentou diluição de 36,7%.

A influência da velocidade de alimentação sobre a taxa de deposição também é vista na penúltima combinação, a qual utilizou a velocidade de alimentação de 9 m/min resultando em uma diluição de 37,6%. A maior diluição é resultado de uma maior profundidade de penetração proporcionada pelo aumento na corrente elétrica necessária para fundir o arame de solda em uma velocidade de alimentação maior. A Figura 41 apresenta um gráfico com os resultados obtidos para corrente de soldagem e profundidade de penetração (DL1) para cada uma das condições testadas.

Figura 41 - Correlação entre corrente de soldagem e profundidade de penetração (DL1).

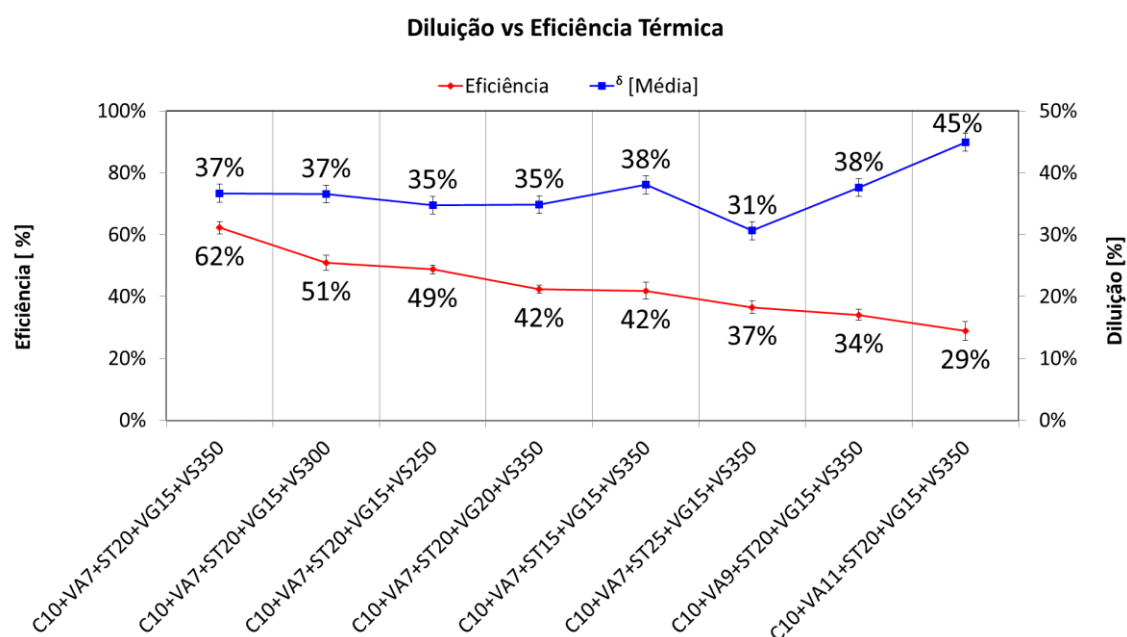


Fonte: Próprio autor.

A variação do *stick-out* de 20mm pra 15mm também proporcionou uma diluição de 38%, do mesmo modo que o aumento da velocidade, a redução do comprimento do eletrodo ocasiona um aumento da corrente necessária para fusão, no entanto esta condição apresentou o maior desvio padrão dentre os resultados obtidos.

A Figura 42 apresenta um gráfico com a correlação entres os resultados da diluição (linha azul) e os resultados da eficiência térmica (linha vermelha) para cada combinação.

Figura 42 - Comparativo entre Eficiência Térmica e Diluição.



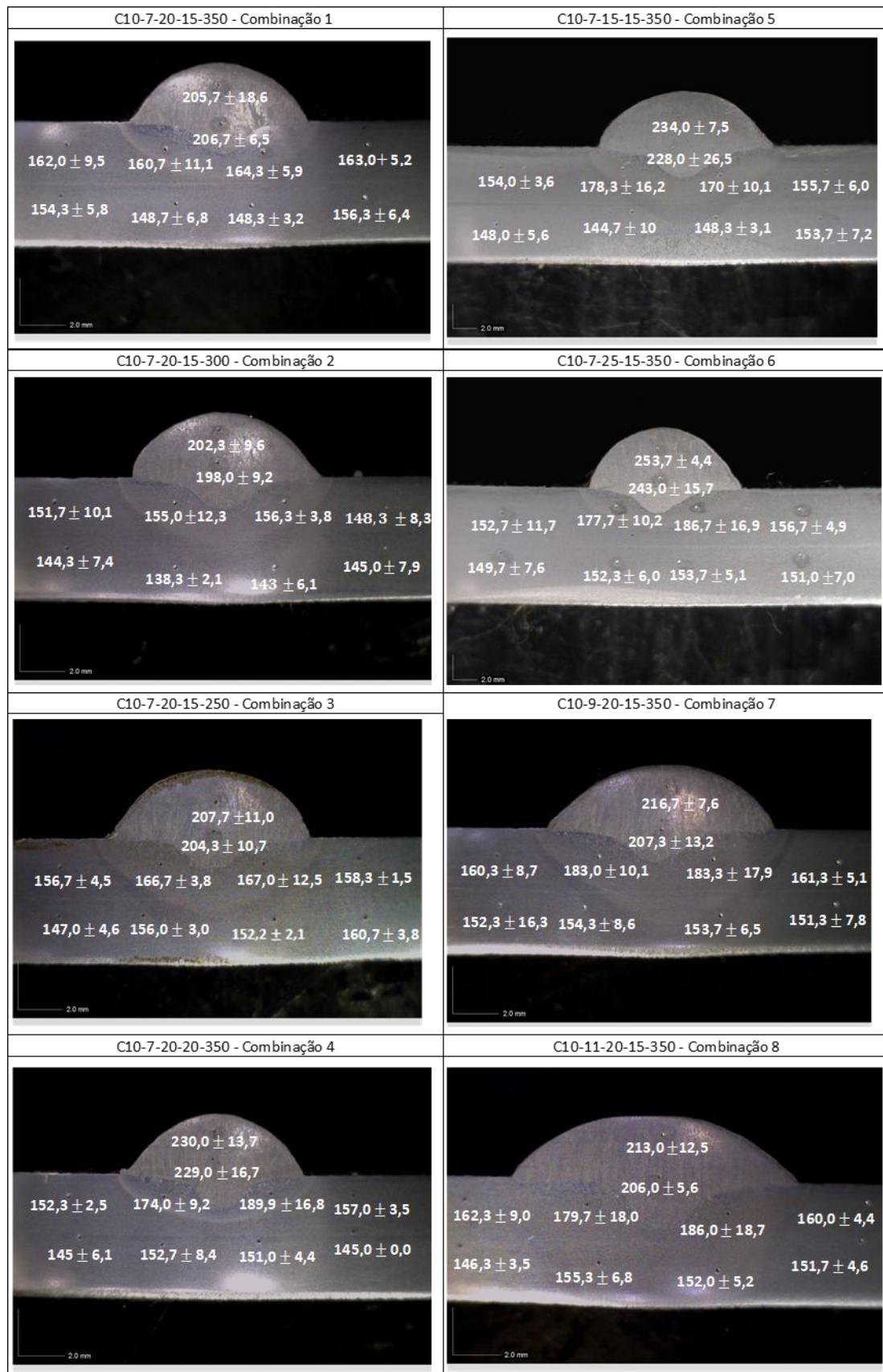
Fonte: Próprio autor.

A análise gráfica do comparativo entre os resultados de eficiência térmica e diluição confirmam que o melhor par de resultados é proporcionado pela combinação otimizada proposta por Taguchi, a qual proporcionou 62,2% de eficiência térmica e 36,7% de diluição, já as combinações que apresentaram melhores resultados para a diluição apresentaram em contrapartida resultados de eficiência térmica consideravelmente inferiores. Por conta do modo de soldagem utilizado no estudo ser a deposição sobre chapa, os valores elevados de diluição, obtidos em baixas eficiências térmicas, são resultado de um maior reforço e menor penetração do cordão de solda.

4.2.3 Ensaio de Dureza

A Figura 43 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de dureza Vickers para cada ponto analisado em cada uma das oito combinações de parâmetros testadas no método OFAT.

Figura 43 - Dureza HV5 para cada condição de soldagem.

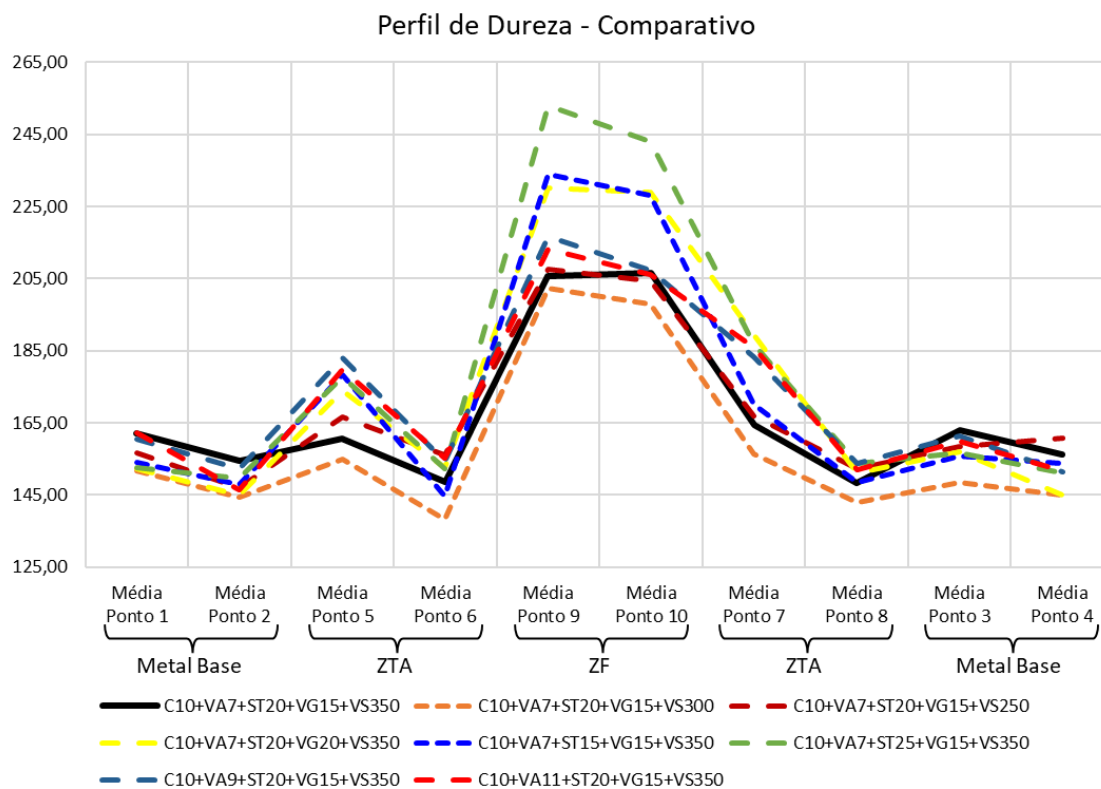


Fonte: Próprio autor.

A Figura 44 apresenta o gráfico comparativo das durezas para os pontos analisados em cada uma das combinações. É possível observar um decréscimo na dureza da zona fundida para o metal de base. A maior dureza observada nos pontos 5 e 7, pontos de análise da ZTA mais próximos da poça de fusão, está relacionada a uma elevada taxa de resfriamento a qual a região foi submetida. Este fato favorece o surgimento de fases na microestrutura que proporcionam maior dureza, aumentando assim resistência, conforme apresentado por Moreira (2008), Soares (2015) e Duarte *et al* (2020). Os pontos 6 e 8 constituem a região avaliada da ZTA com maior profundidade, portanto mais distante do cordão de solda realizado sobre a chapa, apresentaram queda considerável na dureza.

Conforme AWS (2010) trincas na ZTA ocasionadas pela fragilização induzida por hidrogênio, são evitadas desde que a dureza seja mantida abaixo de 350 HV, com base em testes laboratoriais. Deste modo, pode-se afirmar com base nos resultados que nenhuma das condições soldadas apresenta risco de falha ocasionadas por trincas a frio.

Figura 44 - Comparativo do perfil de dureza de cada ponto para as 8 combinações



Fonte: Próprio autor.

A combinação proposta pelo método de Taguchi obteve um resultado mediano para o perfil de dureza, não apresentando os maiores picos na zona fundida (ZF) nem os resultados mais baixos para os pontos críticos da zona termicamente afetada (ZTA), conforme observado pela linha preta contínua no gráfico acima.

Com o objetivo de normalizar os resultados, subtraíram-se dos valores obtidos para a ZTA e ZF as respectivas médias de dureza dos pontos do metal base, eliminando assim qualquer oscilação de dureza pontual oriunda do processo de fabricação do metal base, os resultados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Comparativo das variações na dureza em relação ao metal base.

Combinação	Variação de dureza [HV]					
	ZTA		ZF		ZTA	
	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 7	Ponto 8
C10+VA7+ST20+VG15+VS350	1,75	-10,25	46,75	47,75	5,42	-10,58
C10+VA7+ST20+VG15+VS300	7,67	-9,00	55,00	50,67	9,00	-4,33
C10+VA7+ST20+VG15+VS250	11,00	0,33	52,00	48,67	11,33	-3,33
C10+VA7+ST20+VG20+VS350	24,17	2,83	80,17	79,17	39,50	1,17
C10+VA7+ST15+VG15+VS350	25,50	-8,17	81,17	75,17	17,17	-4,50
C10+VA7+ST25+VG15+VS350	25,17	-0,17	100,50	90,50	34,17	1,17
C10+VA9+ST20+VG15+VS350	26,67	-2,00	60,33	51,00	27,00	-2,67
C10+VA11+ST20+VG15+VS350	24,58	0,25	57,92	50,92	30,92	-3,08

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 27 observa-se que em geral a maioria dos corpos de prova tiveram perda de dureza nos pontos 6 ou 8 como mostra os valores negativos, sendo esses pontos de maior profundidade de análise de dureza na ZTA. Este comportamento também foi observado por Silva (2010), o qual identificou redução na dureza do metal de base nas regiões subcríticas. Dentre todas as combinações testadas, a combinação proposta pelo método de Taguchi para maior eficiência térmica apresentou o maior enfraquecimento da ZTA nos pontos 6 e 8, resultados alinhados com os encontrados por Maron (2018), onde o mínimo valor do perfil de dureza foi obtido para o maior aporte térmico, 34% inferior ao metal base.

A combinação proposta por Taguchi, no entanto, apresentou maior estabilidade nos resultados apresentados para a zona fundida bem como um baixo desvio padrão nos resultados comparativos dos pontos de mesma profundidade de medição, conforme expresso na Tabela 28.

Tabela 28 - Desvio padrão da perda de dureza para regiões equivalentes.

Combinação	Desvio padrão [HV]		
	pontos 5 e 7	pontos 6 e 8	pontos 9 e 10
C10+VA7+ST20+VG15+VS350	1,83	0,17	0,50
C10+VA7+ST20+VG15+VS300	0,67	2,33	2,17
C10+VA7+ST20+VG15+VS250	0,17	1,83	1,67
C10+VA7+ST20+VG20+VS350	7,67	0,83	0,50
C10+VA7+ST15+VG15+VS350	4,17	1,83	3,00
C10+VA7+ST25+VG15+VS350	4,50	0,67	5,00
C10+VA9+ST20+VG15+VS350	0,17	0,33	4,67
C10+VA11+ST20+VG15+VS350	3,17	1,67	3,50

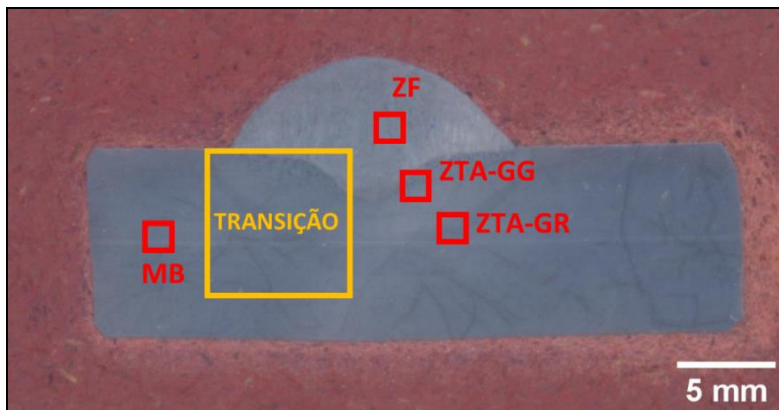
Fonte: Próprio autor.

O resultado do desvio padrão da perda de dureza nos pontos mais críticos da ZTA (6 e 8) bem como para a ZF (9 e 10) para a combinação de parâmetros proposta pelo método de Taguchi foram os menores obtidos nos ensaios. Deste modo apesar da perda considerável de dureza essa combinação apresentou uma boa estabilidade nos resultados, fator de grande relevância para processos de soldagem em escala industrial.

4.2.4 Metalografia: Macrografia e Microscopia Óptica

Após as análises de dureza os corpos de prova foram preparados para as análises de macrografia e microscopia óptica. Através das macrografias realizadas definiram-se 4 regiões de interesse para a realização da microscopia óptica, sendo elas a zona fundida (ZF), zona termicamente afetada de grãos grosseiros (ZTA-GG) e de grão refinados (ZTA- GR) além do metal de base (MB), conforme expresso na Figura 45.

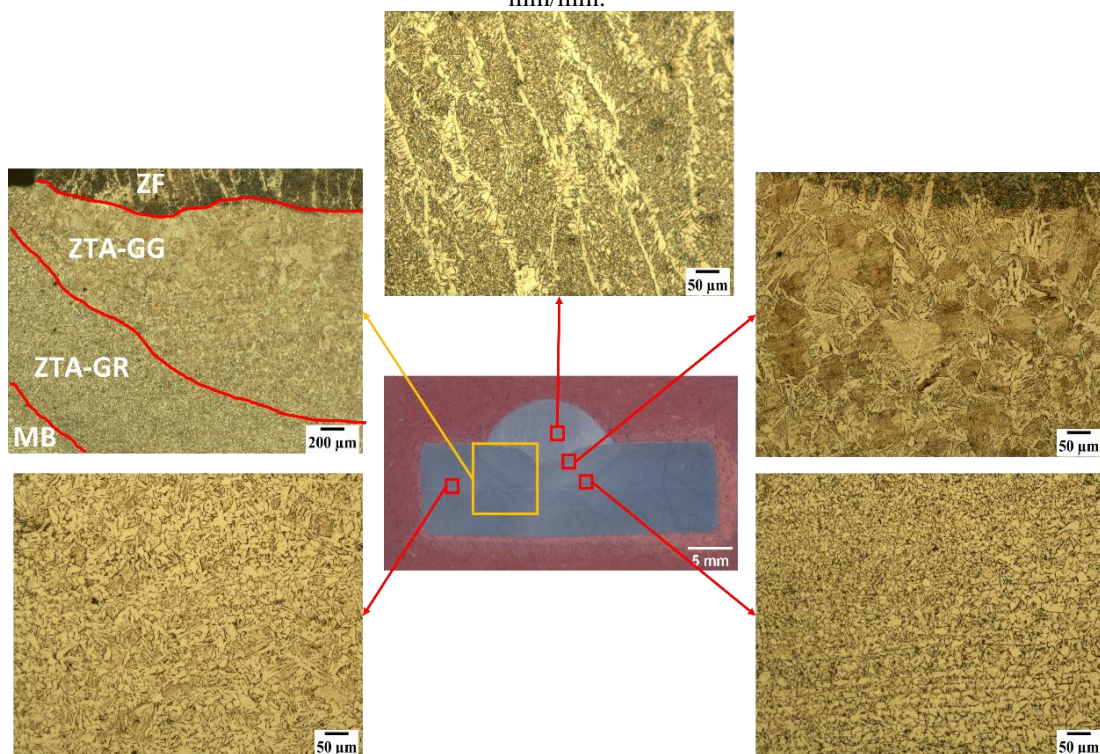
Figura 45 - Identificação das regiões de realização da microscopia ótica.



Fonte: Próprio autor

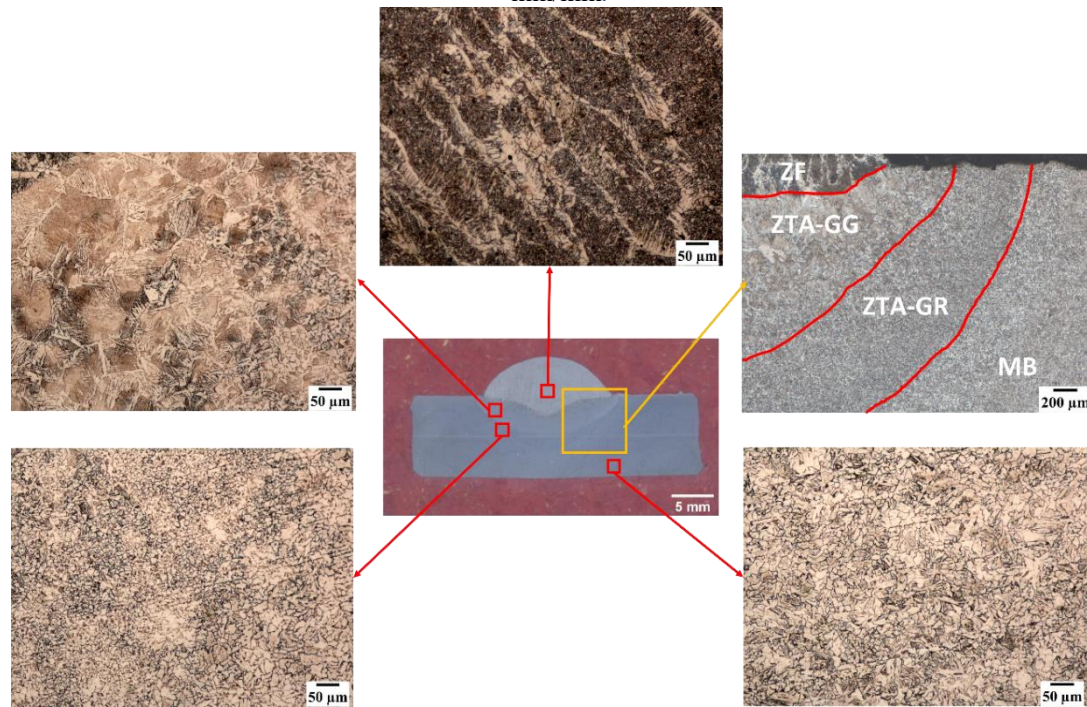
As Figura 46 a Figura 53 apresentam as imagens metalográficas com ampliação de 25, 50 e 200 vezes para o corpo de prova todo, transições entre regiões e regiões de interesse respectivamente.

Figura 46 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 1: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; *Stick-out* = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.



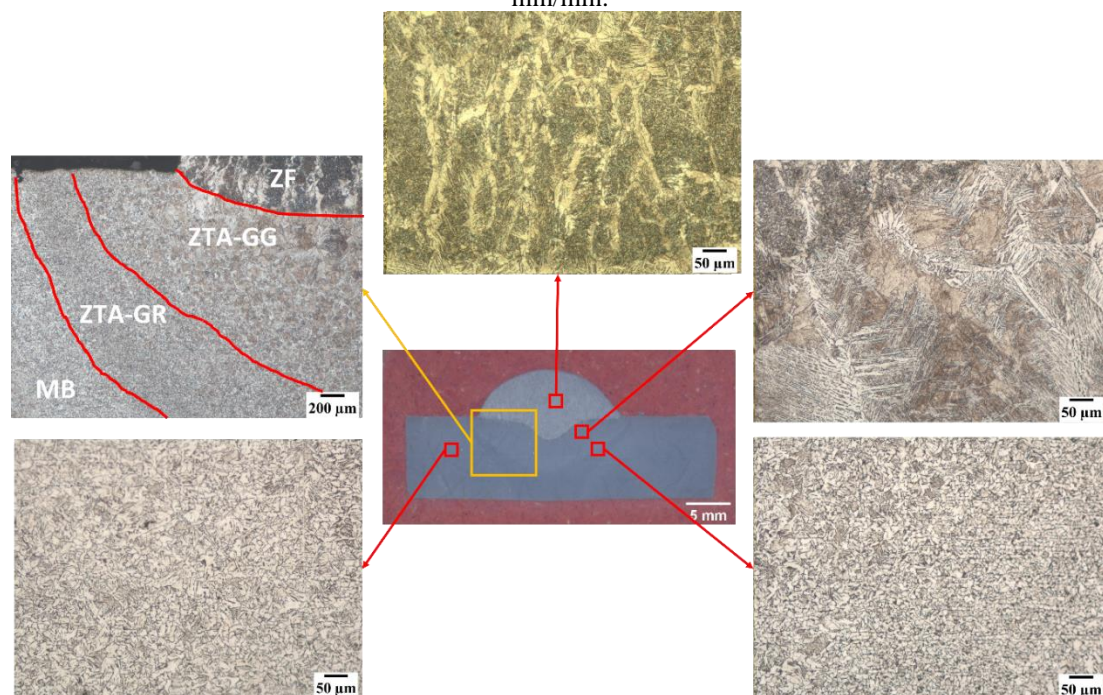
Fonte: Próprio autor.

Figura 47 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 2: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; *Stick-out* = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 300 mm/min.



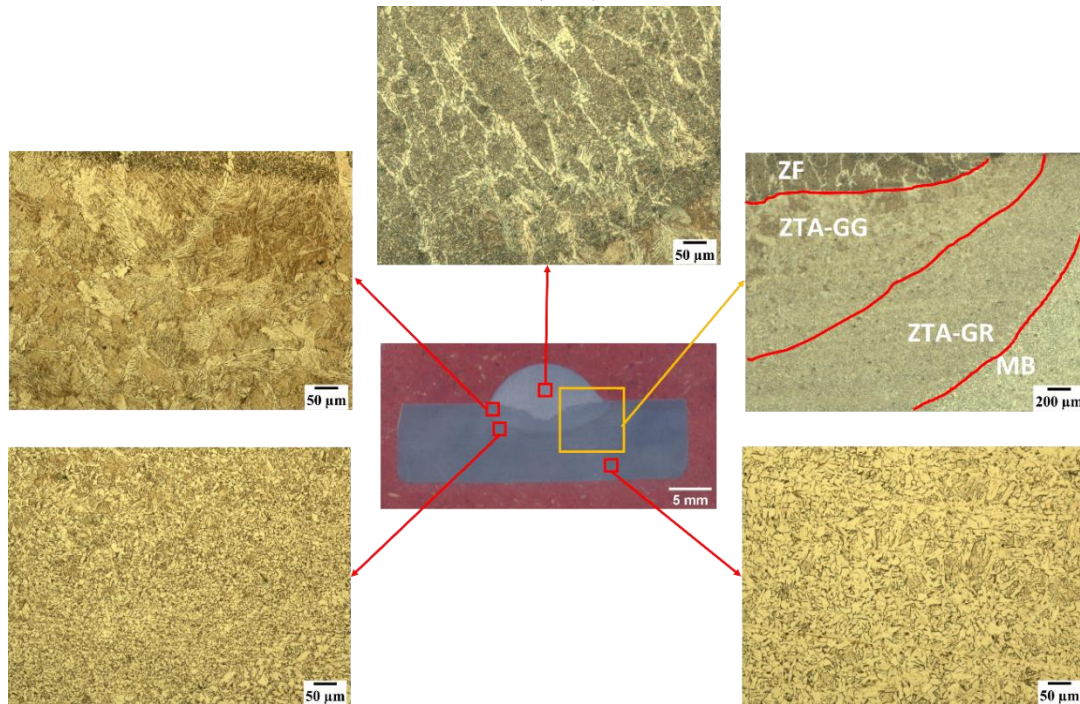
Fonte: Próprio autor.

Figura 48 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 3: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; *Stick-out* = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 250 mm/min.



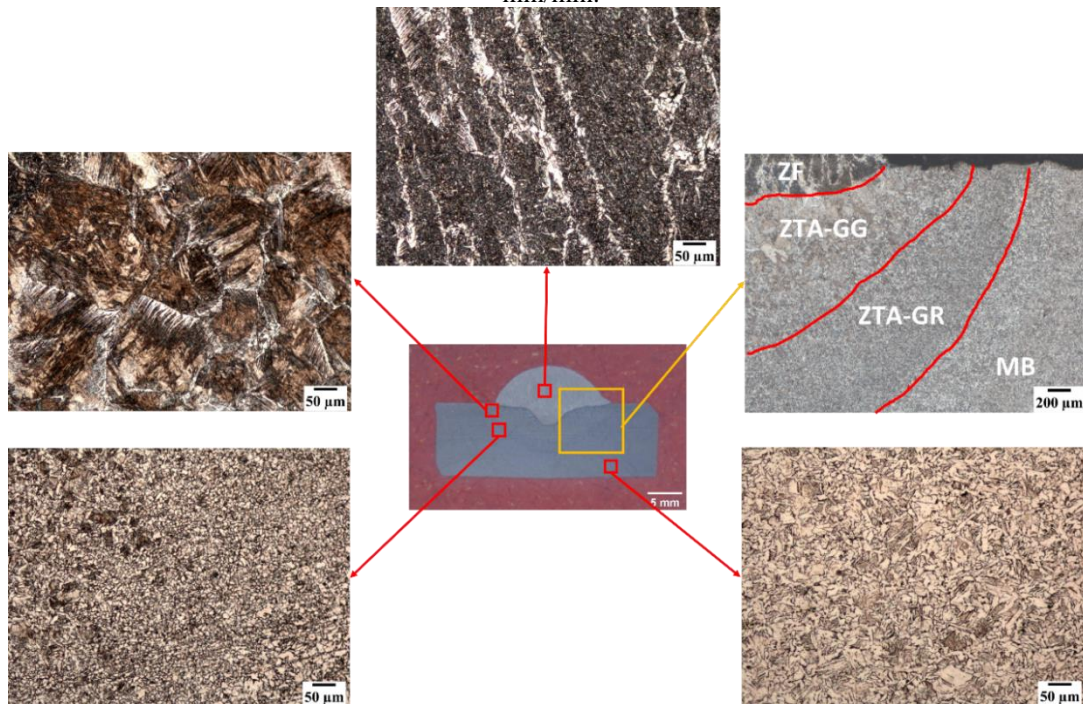
Fonte: Próprio autor.

Figura 49 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 4: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 20 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.



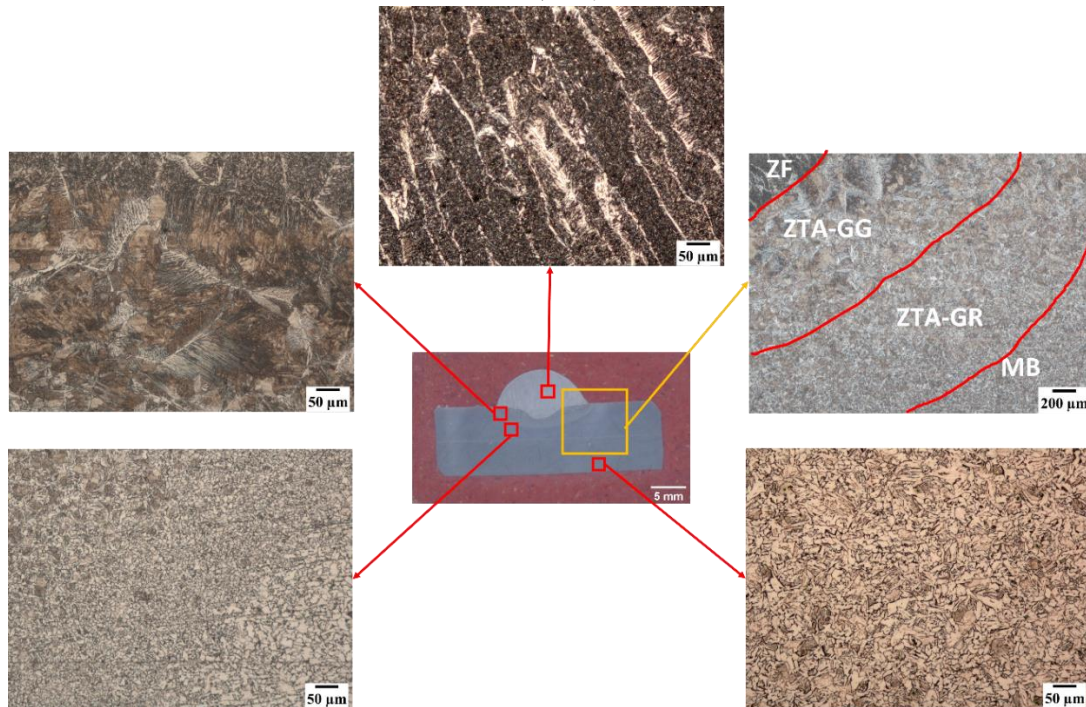
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 5: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 15 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.



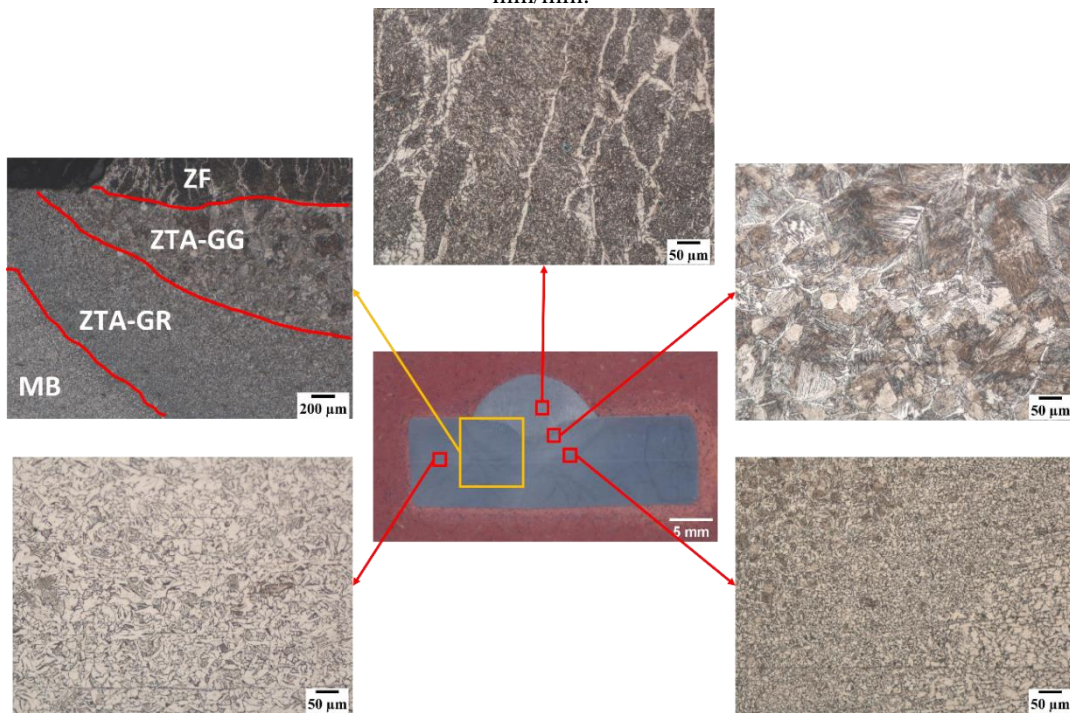
Fonte: Próprio autor.

Figura 51 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 6: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stick-out = 25 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.



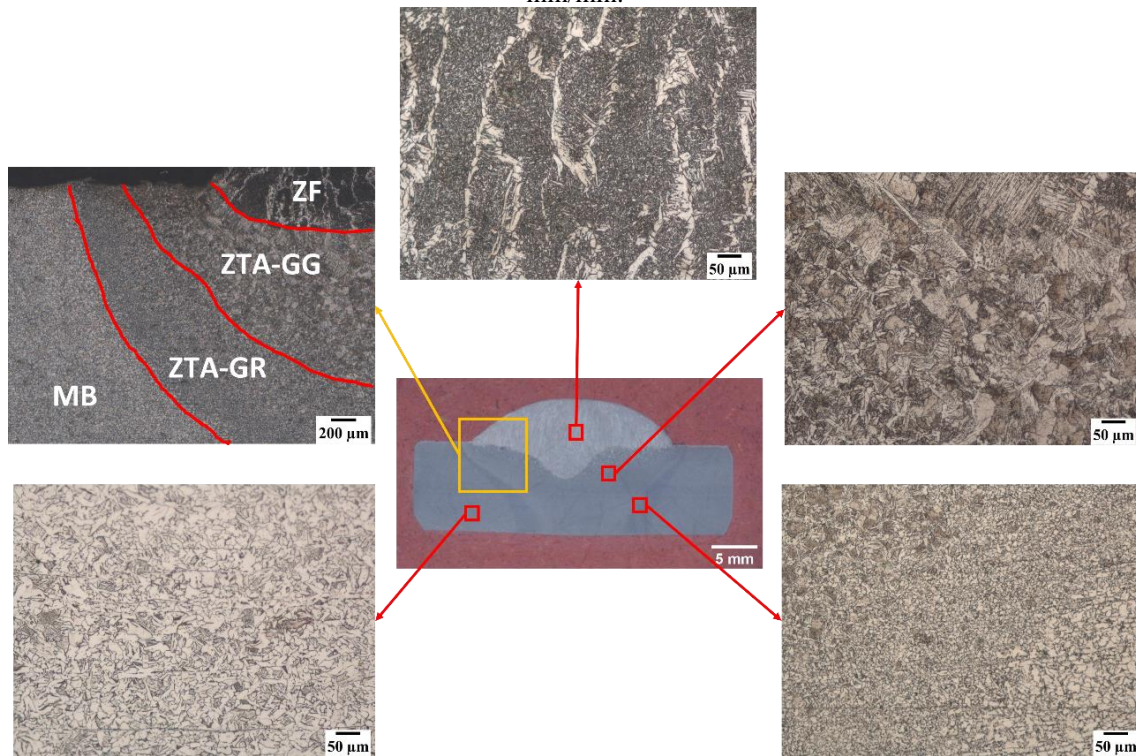
Fonte: Próprio autor.

Figura 52 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 7: Gás = C10; Vel. Alim. = 9 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 53 - Macrografia e micrografia. Condição de soldagem 8: Gás = C10; Vel. Alim. = 11 m/min; Stick-out = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 mm/min.



Fonte: Próprio autor.

Através das imagens pode-se comprovar a formação durante a solidificação de uma morfologia de perfil alongado dos grãos nas zonas fundidas (ZF), bem com orientação alinhada com o gradiente de temperatura proporcionado durante a soldagem.

Além disso é possível perceber que a microestrutura difere de uma região para outra. Para uma identificação mais precisa das fases constituintes em cada zona uma ampliação maior foi necessária, demandando a realização da caracterização utilizando microscopia eletrônica de varredura.

Como as 8 condições do OFAT foram soldadas com o mesmo arame de soldagem, mesmo metal base e mesma composição do gás, os microconstituintes formados tendem à ser os mesmos, conforme evidenciado nas Figura 46 a Figura 53. Sendo assim, realizar a caracterização por MEV em apenas uma amostra seria o suficiente. A condição 1, combinação otimizada de parâmetros proposta pelo método de Taguchi, foi selecionada.

4.2.5 Metalografia: Microscopia Eletrônica de Varredura

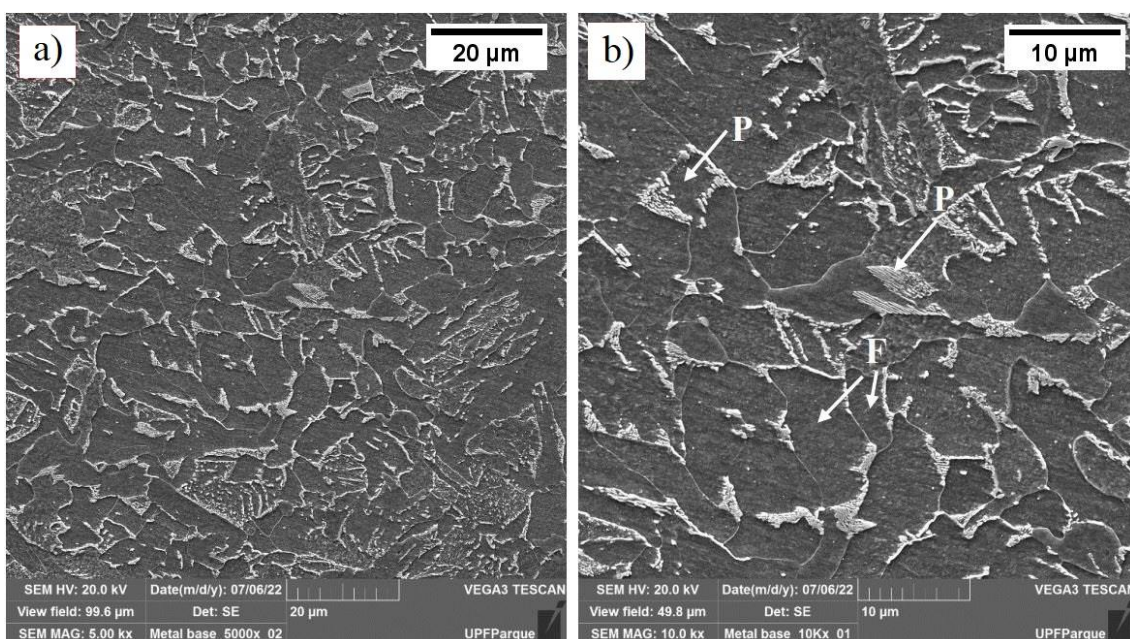
Através das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível identificar que o metal base (MB) apresenta uma estrutura morfológica constituída predominantemente por uma matriz ferrítica, com grãos de perlita dispersos ao longo da matriz, conforme apresentado na Figura 54.

A morfologia da microestrutura da zona termicamente afetada pelo calor de grãos refinados (ZTA-GR) não apresentou modificação relevantes em relação as fases presentes, onde foram identificados grãos de ferrita (F) e grãos de perlita (P), conforme apresentado na Figura 55.

Na zona termicamente afetada pelo calor de grão grosseiro (ZTA-GG), conforme apresentado na Figura 56, ocorreram variações microestruturais significativas, onde foi possível observar um crescimento de grão, a formação de ferrita de segunda fase alinhada (FS (A)), com alguns pequenos carbonetos dispersos, grãos de bainita granular (BG) e ferrita de widmanstätten intragranular (FN) em algumas regiões.

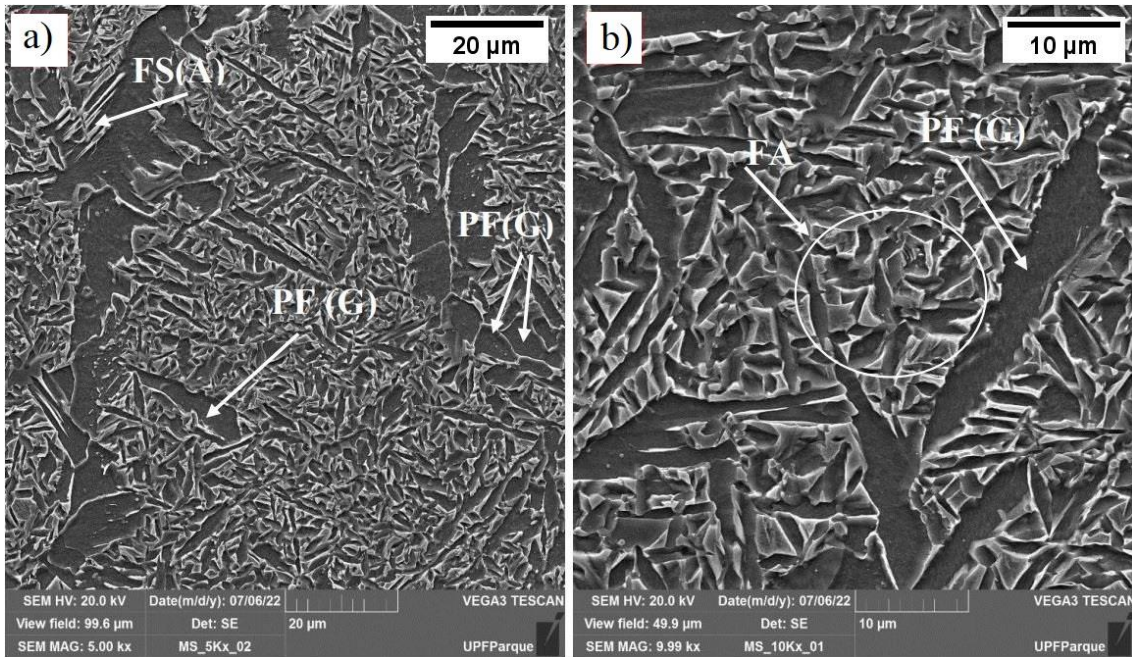
Conforme é apresentado na Figura 57 a zona fundida (ZF) apresentou uma estrutura de grão colunares, com a presença de regiões de ferrita de contorno de grão (PF (G)), com grãos colunares, áreas de ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e regiões de ferrita acicular (FA)

Figura 54 - MEV do metal base (MB). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.



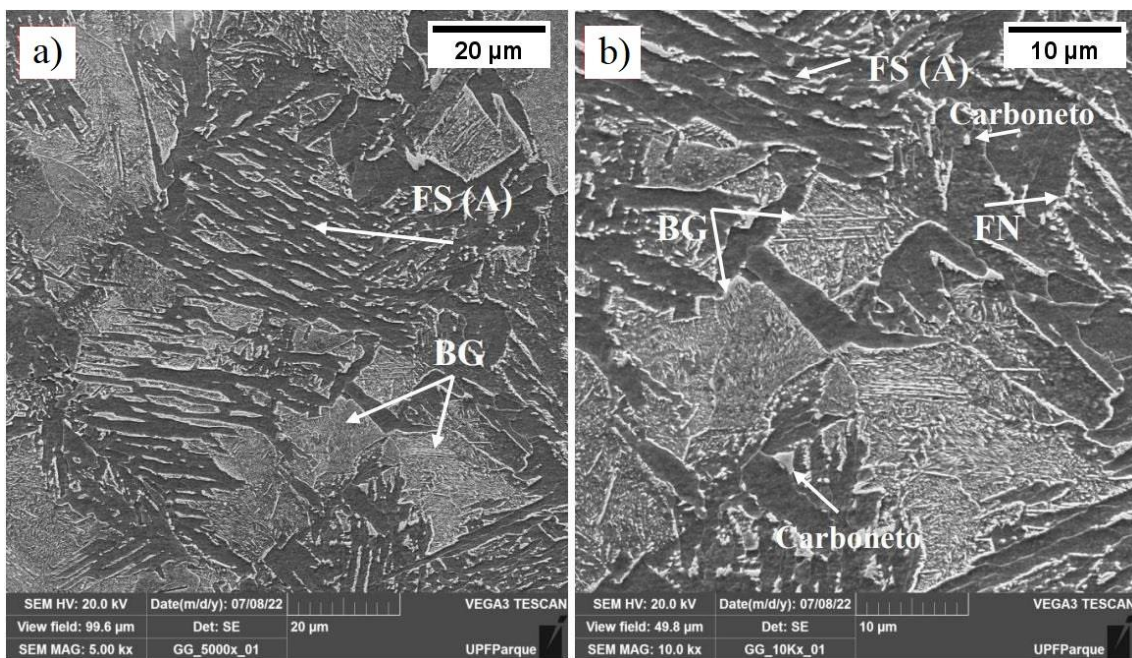
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 - MEV da ZTA de grãos refinados (ZTA-GR). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.



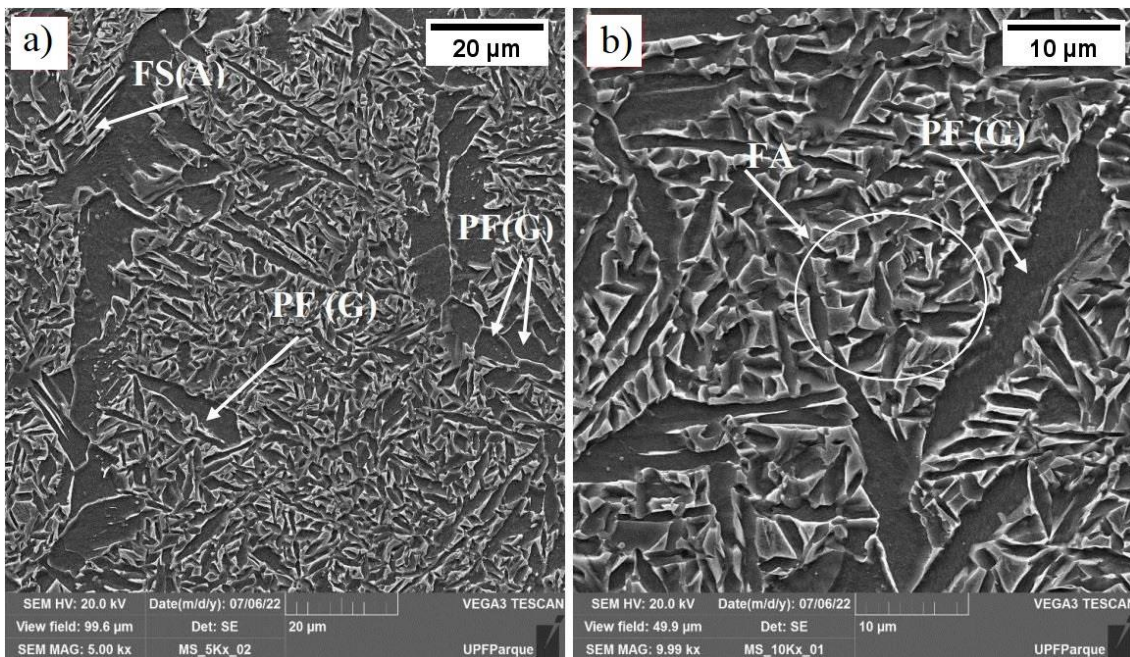
Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - MEV da ZTA de grãos grosseiros (ZTA-GG). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.



Fonte: Próprio autor.

Figura 57 - MEV da zona fundida (ZF). a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a zona fundida (ZF) não apresenta ocorrência de perlita devido à taxa de resfriamento elevada à qual a região é submetida após a soldagem impedir a difusão do carbono na austenita, favorecendo a formação de ferrita de contorno de grão e ferrita acicular no interior do grão austenítico, a ocorrência destas fases também é favorecida pelo teor em massa de manganês presente no metal de base. Tratando-se de propriedades mecânicas a ocorrência de ferrita acicular confere ao material maior resistência mecânica, já a ferrita de contorno de grão melhora a tenacidade do material (LINNERT, 1994; BRAZ, 1999; TRINDADE, 2017; SCHWANKE, 2017).

O aço S275JR-AR possui baixo teor de carbono e adição de 0,86% de manganês como elemento de liga em sua composição, conforme apresentado na revisão bibliográfica estes fatores combinados induzem a formação de ferrita de widmanstätten e bainita na ZTA-GG. Segundo Abdalla *et al* (2006) a ocorrência de bainita proporciona ao material nesta região um aumento no limite de resistência sem comprometimento da ductilidade, conforme apresentado.

A ZTA-GR não apresentou mudanças de fases significativas, mantendo uma estrutura constituída de ferrita e perlita, porém com um considerável refino de grão em relação ao metal de base (MB), o que proporciona um aumento na tenacidade da região (CALLISTER JR 2002; NOGUEIRA, 2013; LIMA, 2019).

5 CONCLUSÕES

A utilização do método de Taguchi para otimização do experimento, aliado ao método OFAT para validação dos resultados, permitiu reduzir de 486 para 54 os corpos de prova soldados em comparação ao método do fatorial completo.

Como combinação otimizada de parâmetros para maior eficiência térmica obteve-se a composição do gás C10, velocidade de alimentação de 7 m/min, *stick-out* de 20 mm, vazão do gás de 15 l/min e velocidade de soldagem de 350 mm/min, obtendo 62% de eficiência.

A composição do gás de proteção e a velocidade de alimentação, são os dois parâmetros avaliados que exercem influência relevante nos resultados de eficiência térmica. Conforme análise de variância ANOVA, a composição do gás representa 75,83% de influência sobre a eficiência, seguido pela velocidade de alimentação de arame com 8,62%. Os demais parâmetros não exercem influência relevante com a confiabilidade adotada de 95%.

A combinação de parâmetros otimizada foi comprovada através do método OFAT no qual nenhuma outra combinação apresentou resultados superiores, no entanto alguns experimentos da fase inicial obtiveram 66% de eficiência, o que leva a conclusão de que há outros fatores de influência que não foram abordados e monitorados neste estudo.

A combinação otimizada apresentou um resultado de 88,6% para a taxa de deposição, terceiro melhor resultado. Já para a diluição o resultado obtido foi de 36,7%, deste modo a combinação otimizada apresentou a melhor combinação entre eficiência térmica e diluição.

Apesar do baixo desvio padrão e estabilidade de resultados entre pontos equivalentes nas medições de dureza, o maior enfraquecimento na ZTA foi observado na combinação otimizada, a qual conferiu o maior aporte térmico durante a soldagem.

Através das análises metalográficas evidenciaram-se as características das regiões de interesse da combinação otimizada pelo método de Taguchi e validade através do método OFAT. Nesta combinação não ocorreu a formação de martensita, indicando uma taxa de resfriamento suficiente para o surgimento de ferrita acicular na ZF e de bainita em detrimento da martensita na ZTA-GG. Já para a ZTA-GR a estrutura observada manteve-se sendo perlita e ferrita, mas com um refino de grão que é um indicativo de endurecimento e de melhora na tenacidade em relação ao MB.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros pode-se considerar:

- A realização de soldagem de união de duas chapas para avaliação do comportamento em ensaios mecânicos de torção, tração e dobramento para as combinações de parâmetros utilizadas neste estudo.
- A investigação de outros parâmetros de influência que não foram mensurados e controlados no estudo, como por exemplo a temperatura e umidade do ar ambiente.
- Estudar a influência dos parâmetros de soldagem nas tensões residuais geradas no processo de soldagem, buscando otimizar os parâmetros.
- Realizar esse mesmo estudo em juntas de ligas de alumínio ou materiais dissimilares para otimizar os parâmetros de soldagem.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. J. *et al.* **Formação da Fase Bainítica em Aços de Baixo Carbono.** Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 25, n. 3, 175-181, 2006.
- AITA, C. A. G. **Estudo do Desempenho Mecânico de Juntas Soldadas Pelo Processo de Soldagem a Ponto Por Fricção e Mistura Mecânica (FSSW) da Liga Aa6060-T5.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) UNIPAMPA, Alegrete. 2017.
- ALMEIDA, D. T *et al.* **Influência Do Gás De Proteção Sobre a Quantidade De Escória De Solda e Propriedades Mecânicas De Juntas De Aço Carbono Soldadas Pelo Processo Mag.** *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 333-340, 2018.
- ALMEIDA, D. T *et al.* **Seleção de Parâmetros Através do Método de Taguchi para Soldagem de Liga de Alumínio 5052H32 pelo Processo MIG.** *HOLOS*, Ano 35, v.6, e7121, 2019.
- ALMEIDA, D. T. **Análise Microestrutural e Avaliação mecânica de Juntas Soldadas por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) da Liga de Alumínio 5182-O.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) UFRGS, Porto Alegre. 2015.
- ALVES, S. J. F. **Estudo Dos Fumos e Gases Gerados no Processo de Soldagem Gás Metal Arc Welding (GMAW) em Duas Empresas do Segmento Metal Mecânico de Pernambuco.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFPE, Recife. 2016.
- ALVES, V. J. **Desenvolvimento de Envelopes Operacionais Para Processo MIG/MAG Robotizado com Diferentes Gases de Proteção.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). UFRGS, Porto Alegre. 2009.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M: Structural welding code – steel.** American Welding Society, Miami, EUA, 2010.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.10/A5.10M:2012 – Welding Consumables – Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum Alloys - Classification.** American Welding Society, Miami, EUA, 2012.

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

ANTONI, H. **Avaliação da Influência dos Parâmetros e Geometria do Corpo de Prova Sobre o Rendimento Térmico na Soldagem de Alumínio Pelo Processo MIG.** Monografia (Engenharia Mecânica). UFRGS, Porto Alegre, 2014.

ÁQUILA, V. **Apostila MIG-MAG e Arame Tubular.** Escola de soldagem L&A - Centro de Formação de Soldadores. Salvador, 2012.

ARÉVALO, H. D. H. **Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) para Processos de Soldagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFU, Uberlândia, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284.** Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8108.** Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas – Procedimento. 1983.

BELTRAN, J. H. D. **Influência do Metal de Adição e do Gás de Proteção na Soldagem MAG de Chapas de Aço SAE 1020.** Monografia (Engenharia Mecânica). UFRGS, Porto Alegre. 2019.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels Microstructure and Properties.** Published by Elsevier Ltd., USA, 3 ed. 2006.

BOHRER, C.B. **Influência do Gás de Proteção Sobre o Aporte de Energia na Soldagem MIG/MAG de Aços ao Carbono.** Monografia (Engenharia Mecânica). UFRGS, Porto Alegre. 2013.

BRAZ, M. H. P. **Propriedade de Fadiga de Soldagem de Alta Resistência e Baixa Liga Com Diferentes Composições Microestruturais.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). USP, São Paulo. 1999.

BRUNO, E.P. *et al.* **Aplicação do Método Estatístico de Taguchi no Processo de Usinagem em Aços ABNT 1045.** CBECIMAT. Natal. 2002.

BÚRIGO, B.A. *et al.* **Aquisição do ciclo térmico de soldagem.** Faculdade SATC. 2009
Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAAQg0AC/artigo-ciclo-termico-soldagem>>. 2020.

CALLISTER JR. W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5a Ed. LTC Editora. Rio de Janeiro, 2002.

CANTIN, G. M. D.; FRANCIS, J. A. **Arc Power and Efficiency in Gas Tungsten Arc Welding of Aluminium, Science and Technology of Welding and Joining**, v. 10, p. 200-210, 2005.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), UNIFEI, Itajubá, 2004.

DESHMUKH, P.; SORTE, M. B. **Optimization of Welding Parameters Using Taguchi Method for Submerged Arc Welding On Spiral Pipes.** International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Dehli, India, v. 2, n. 5, Nov. 2013.

DIN EN 1011-1. **Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 1: General guidance for arc welding.** 2009.

DIN EN ISO 9015-1. **Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness testing - Part 1: Hardness test on arc welded joints.** 2011.

DOS SANTOS, C. E. F. **Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança.** Editora Erica, São José dos Campos. 2015.

DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes.** Welding Journal, v. 74, p. 406s-416s, 1995.

EASTERLING, K., **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, second edition.** Butterworth-Heinemann Ltd. Linacre House, Jordan Hill, Oxford, p. 126-190, 1992.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. 2005.

ESSERS, W. G.; WALTER, R. **Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding**, *Welding Journal*, v. 60, p.37s-42s, 1981

FERREIRA, A. C. M. **Estudo de Soldas Obtidas Pelo Processo GMAW Empregando o Modo de Transferência Metálica por Spray com Misturas de Proteção Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UENF, Rio de Janeiro. 2018.

FERREIRA, D. F. **Influência do Tipo de Gás de Proteção da Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável**. 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. ABCM, 2007.

FISCHER, A. **Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de soldagem GMAW - Arco Pulsado**. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica). UFMG, Belo Horizonte. 2011.

FOGLIATTO, A. A. B. **Influência dos Parâmetros do Processo MIG/MAG com Curto-Circuito Controlado Sobre a Geometria do Cordão de Solda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre. 2013.

FUERSCHBACH, P.W. & KNOROVSKY, G.A., **A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding**. *Welding Journal*, Research Supplement, Nov 1991, 287s-297s

GIAROLLO, D. F. **Influência do Metal de Adição na Resistência ao Desgaste Abrasivo de Dois Aços Estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFRGS, Porto Alegre. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15614-1:2017. **Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test**. Geneva, Switzerland: ISO, 2017.

JOSEPH, A. P. **Assessing the Effects of GMAW-Pulse Parameters on Arc Power and Weld Heat Input**, Tese (Master of Science) – Ohio State University, Ohio, 2001.

KENNEY, K. L.; MILLER, K. S.; SMARTT, H. B. **Heat Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding**, Proceedings to 5th International Conference for Trends in Welding Research, p. 357-361, 1998

KNEBELKAMP, S. R. **Seleção de Parâmetros Através do Método de Taguchi Para Soldagem de Liga de Alumínio 5052h32 Pelo Processo MIG**. Monografia (Engenharia Mecânica). Unijuí, Panambi. 2016.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. Second Edition. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2003.

KUNTZ, A. A. K. **Simulação Numérica e Verificação Experimental de Um Calorímetro Para Medição da Eficiência Térmica Nos Processos de Soldagem**. Monografia (Engenharia Mecânica). Unijuí, Panambi. 2017.

LIMA, R. B. E. **Influência da Mistura de Gases de Proteção no Perfil Geométrico na Microestrutura e na Corrente de Transição na Soldagem MIG/MAG**. Monografia (Engenharia Metalúrgica). UFC, Fortaleza. 2019.

LINDE. **Rendimento máximo através da inovação e competência. Os gases de soldadura Linde**. Disponível em: <http://www.linde-gas.com>. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.

LINNERT, G. E. **Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels**. 4ª ed. Miami, ASM International, 1994.

LU, J.; KOU, S. **Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminum – Part 2**. Welding Journal, n. 11, p. 452s-456s, 1989.

MARON, D. S. **Estudo da Influência do Aporte Térmico no Processo de Soldagem MAG Robotizada do Aço Docol 1000DP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). UFRS, Porto Alegre. 2018.

MARQUES, P.V; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª Edição. UFMG, Belo Horizonte. 2011.

MAUSSION, P. **Design of Experiments in electrical engineering: Applications in control and modeling**. IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Nottingham, 2017, pp. 179-186

MINITAB. **Suporte ao Minitab® 19**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/>. Acesso em: 21 de abril de 2021.

MODENESI, P. J., 2004, **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). UFMG, Belo Horizonte, 2004.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D. S. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. UFMG, Belo Horizonte. 2006.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. UFMG, Belo Horizonte, 2012.

MOITA, N. F. V. C. **Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). ULisboa, Lisboa. 2007.

MONTEIRO, J. L. D. **Influência do procedimento de soldagem na relação tenacidade/microestrutura de metal de solda de aços de alta resistência obtido pelo processo GMAW**. CEFET, Rio de Janeiro, 2014.

MOREIRA, A. F. **Influência da Atmosfera Protetora no Cordão de Solda Obtido Através dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UNESP, Ilha Solteira. 2008.

NOGUEIRA, R. C. **Caracterização Mecânica e Análise Microestrutural Com a Utilização Dd Técnica de Tríplice Ataque do Aço Multifásico AISI 4350**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) UNESP, Guaratinguetá. 2013.

OLYMPUS LIFESCIENCE. **BX Series**. Disponível em: https://www.olympus-lifescience.com/pt/technology/museum/micro/1993_02/. Acesso em: 19 de março de 2022.

PEPE, N. V. C. **Advances in Gas Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes**. Tese (PHD School of Applied Sciences). Cranfield University, Cranfield. 2010.

PEREIRA D.; RIBEIRO, J.; QUEIJO,. **Otimização de parâmetros de fresagem usando o método de Taguchi com a análise relacional de Grey**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, vol. 10, nº 19, pp. 56-70, 2018.

PESSOA, A. R. *et al.* **Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG**. Soldagem e Inspeção, vol. 15, nº 4. 2010.

PETRACHI, L. M. **Avaliação da Influência da Distância Entre o Bico de Contato e a Peça na Taxa de Fusão no Processo de Soldagem MIG/MAG**. Monografia (Engenharia Mecânica). UFU, Uberlândia. 2021.

REIS, R. P; SCOTTI, A. **Fundamentos e Prática da Soldagem A Plasma**. Editora Artliber, São Paulo. 2007.

SCHEIDMANDEL, N. A. **A influência dos Parâmetros de Soldagem GMAW em Juntas de Aço ARBL S 700 MC**. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação). UPF, Passo Fundo. 2013.

SCHNEIDER, C. F. **Otimização de Um Processo de Soldagem Híbrida TIG-MIG/MAG Utilizando o Método Taguchi**. Monografia (Engenharia Mecânica). FAHOR, Horizontina. 2014.

SCHWANKE, R. G. L. **Influência do Metal de Adição e da Energia de Soldagem na Microestrutura e Resistência à Fadiga de Juntas Soldadas de Aço de Alta Resistência d Baixa Liga DIN S700MC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e dos Ciências de Materiais). UCS, Caxias do Sul. 2017.

SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG Melhor Entendimento Melhor Desempenho**. 2ª Ed. Editora Artliber, São Paulo. 2008.

SGARBI, P. V. **Construção e Validação de um Calorímetro com Vazão Contínua de Água para Avaliação do Rendimento Térmico em Processo de Soldagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre. 2013.

SHRIVER, D.F.; ATKINS, P.W. **Química Inorgânica.** Bookman, Porto Alegre. 2003.

SILVA, R. F. **Caracterização da Zona Termicamente Afetada de Aço Produzido Via Resfriamento Acelerado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). UFMG, Belo Horizonte. 2010.

SOARES, G. G. **Caracterização da Junta Dissimilar em Solda de Materiais do Tipo Estrutural e ARBL.** Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação). UPF, Passo Fundo. 2015.

TATAGIBA, L. C. S. **Formulação de Gases De Proteção Com Adições de Gases Redutores Para a Soldagem MIG-MAG.** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). UENF, Campos dos Goytacazes. 2015.

TEIXEIRA, G. S. **Análise da Influência dos Parâmetros de Soldagem Sobre a Geometria do Cordão de Solda Depositado Pelo Processo de Soldagem TIG-MAG em Tandem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre. 2011.

TEODÓSIO, J. C. F. **Otimização de parâmetros de Eletroerosão de Penetração por Métodos de Taguchi.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UNL, Lisboa. 2019.

TOTO, L. L. **Aplicação do Método de Taguchi em Instituição Pública.** Tese (Doutorado em Administração). FGV/EASP. São Paulo. 2001.

TRINDADE, V. B. *et al.* **Características Microestruturais e Mecânicas ao Longo da Seção Transversal de Juntas Soldadas em Multipasses pelo Processo GMAW de um Aço API 5L X65Q.** Soldagem e Inspeção, vol. 22, nº 2. 2017.

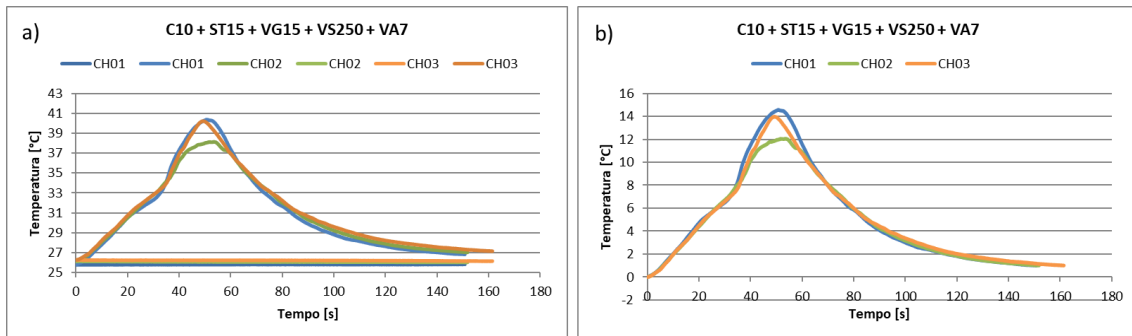
USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. (USIMINAS). **Certificado de Inspeção.** Nº Certificado 4854183. Certificado recebido em 7 mai. 2019.

VASCONCELOS, E. C. **Uma aplicação da metodologia Projeto e Análise de Experimentos na construção de matrizes QFD.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). UNIFEI, Itajubá. 2004.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; HOMEM DE MELLO. F. D. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** Edgard Blücher. São Paulo, 2004.

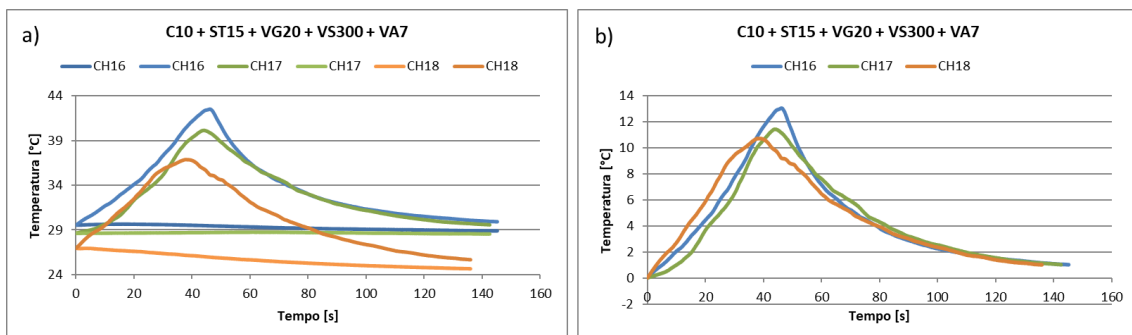
APÊNDICE A - GRÁFICOS DE TEMPERATURA – MÉTODO TAGUCHI

Figura 58 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 1 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



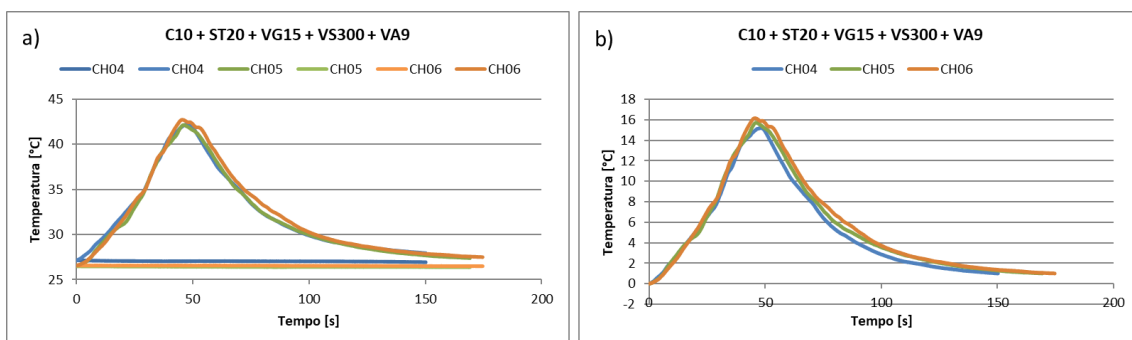
Fonte: Próprio autor.

Figura 59 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 2 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



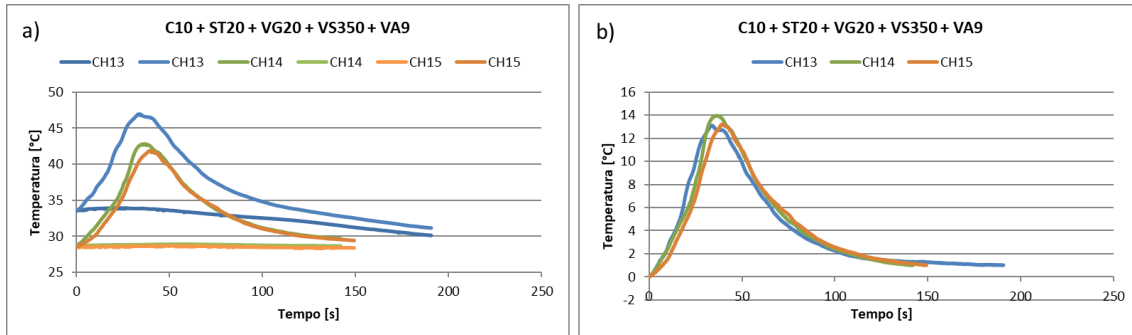
Fonte: Próprio autor.

Figura 60 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 3 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



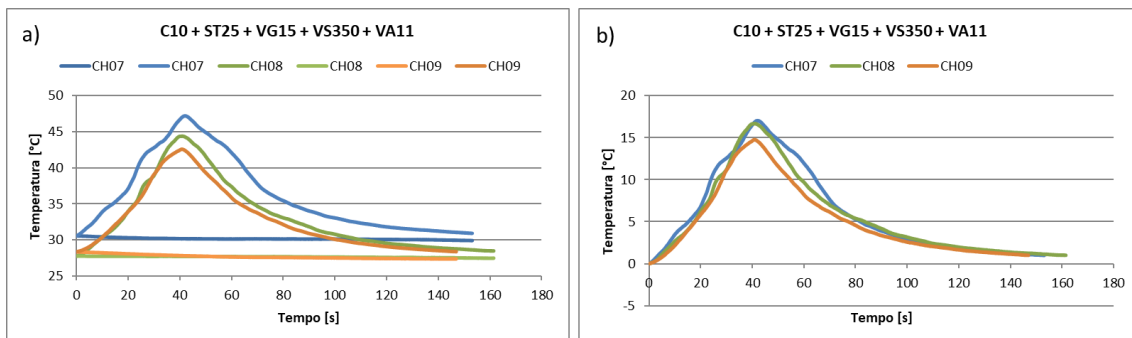
Fonte: Próprio autor.

Figura 61 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 4 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



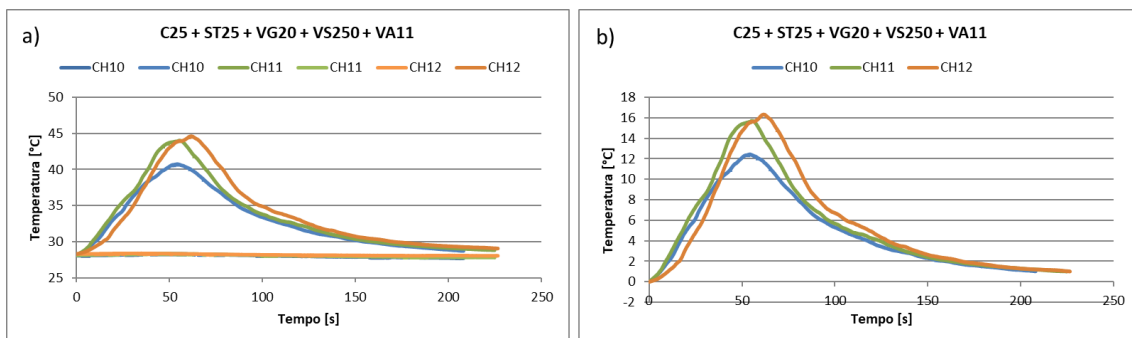
Fonte: Próprio autor.

Figura 62 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 5 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



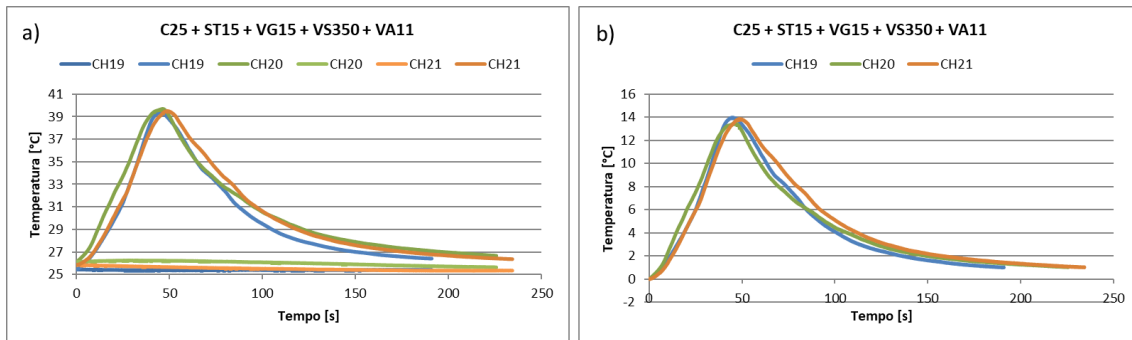
Fonte: Próprio autor.

Figura 63 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 6 - Método de Taguchi: Gás de proteção C10; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



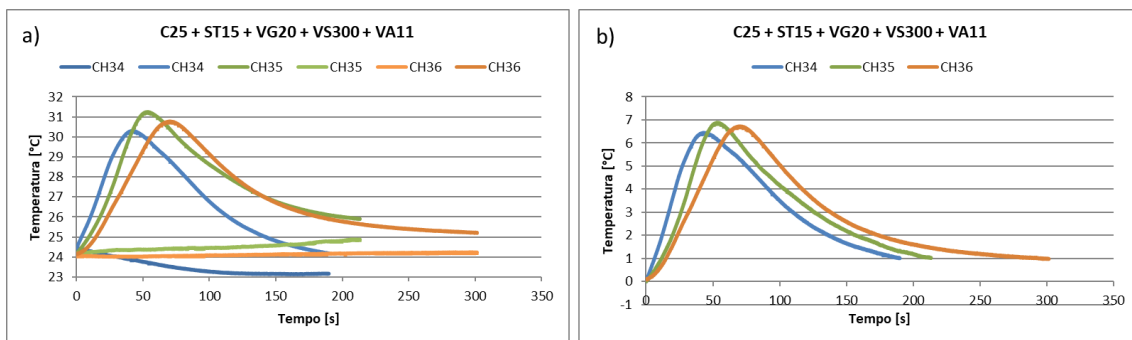
Fonte: Próprio autor.

Figura 64 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 7 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



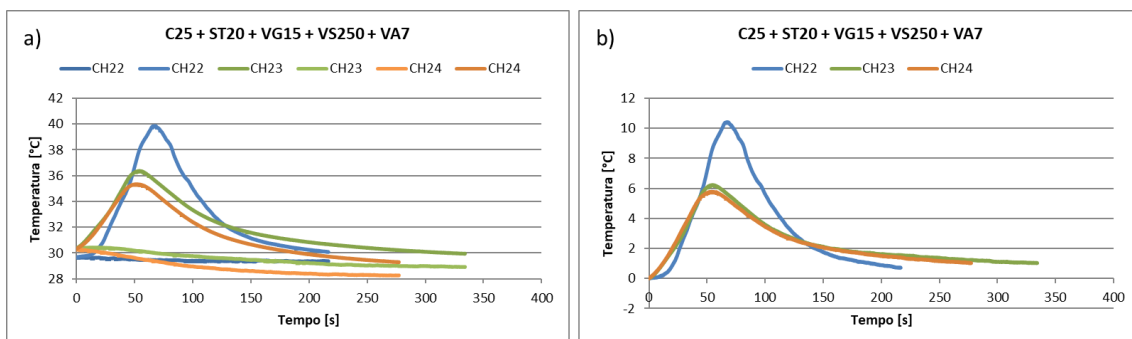
Fonte: Próprio autor.

Figura 65 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 8 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



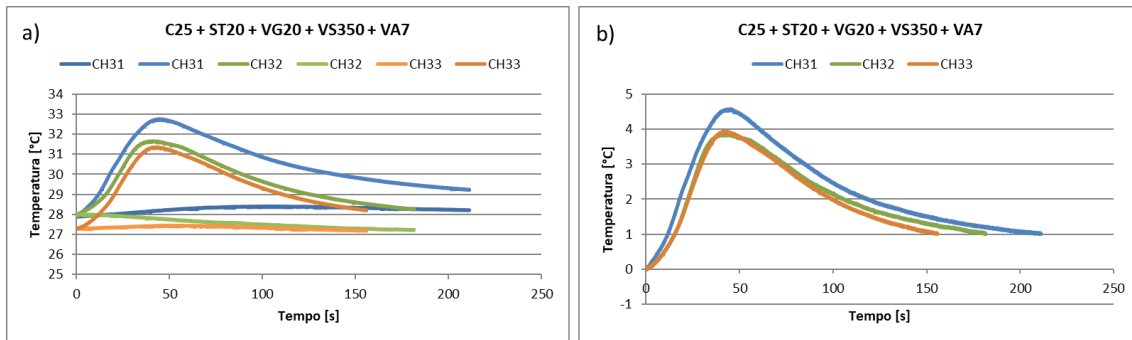
Fonte: Próprio autor.

Figura 66 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 9 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



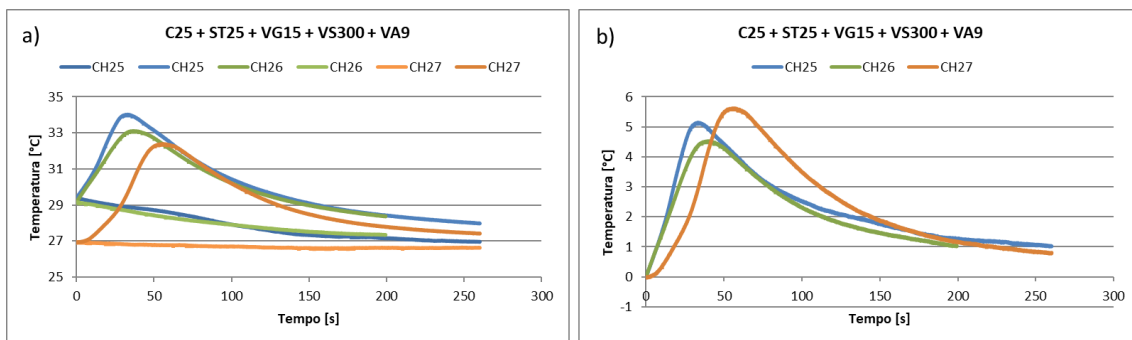
Fonte: Próprio autor.

Figura 67 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 10 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



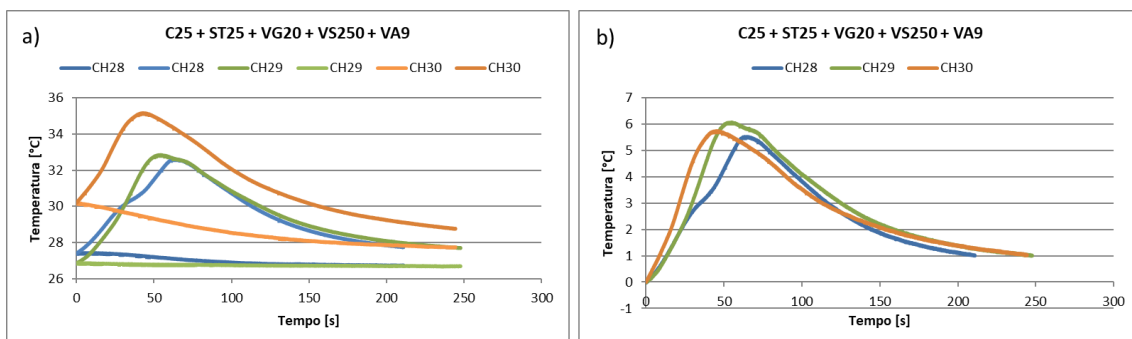
Fonte: Próprio autor.

Figura 68 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 11 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



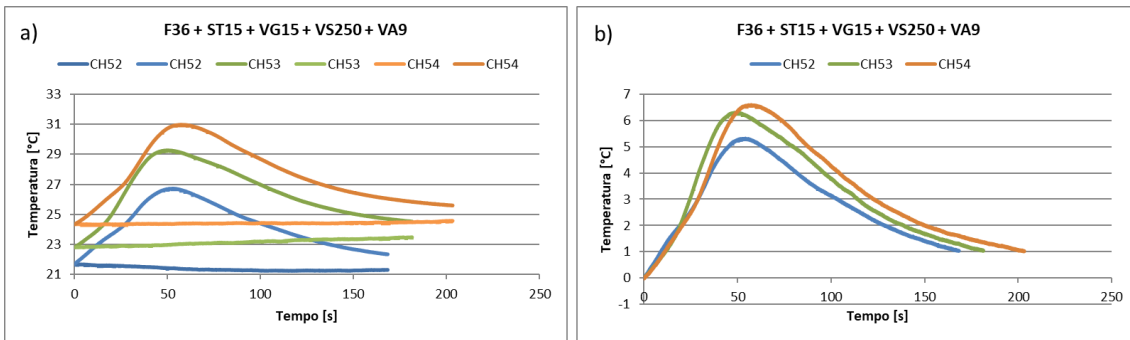
Fonte: Próprio autor.

Figura 69 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 12 - Método de Taguchi: Gás de proteção C25; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



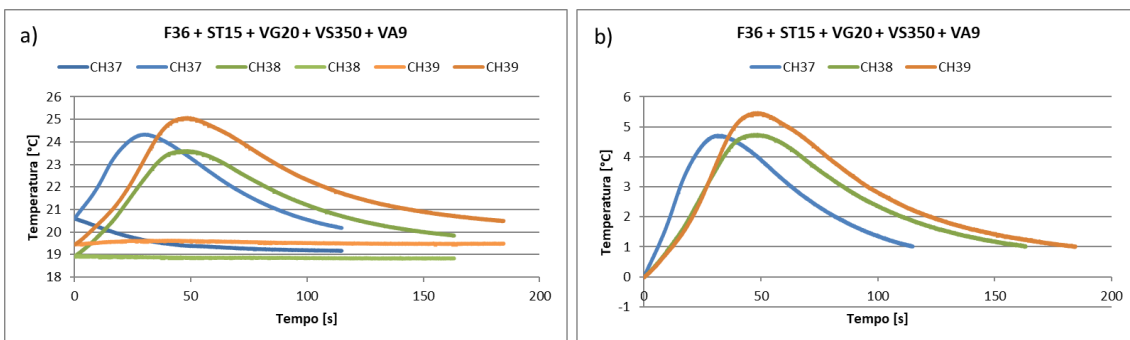
Fonte: Próprio autor.

Figura 70 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 13 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



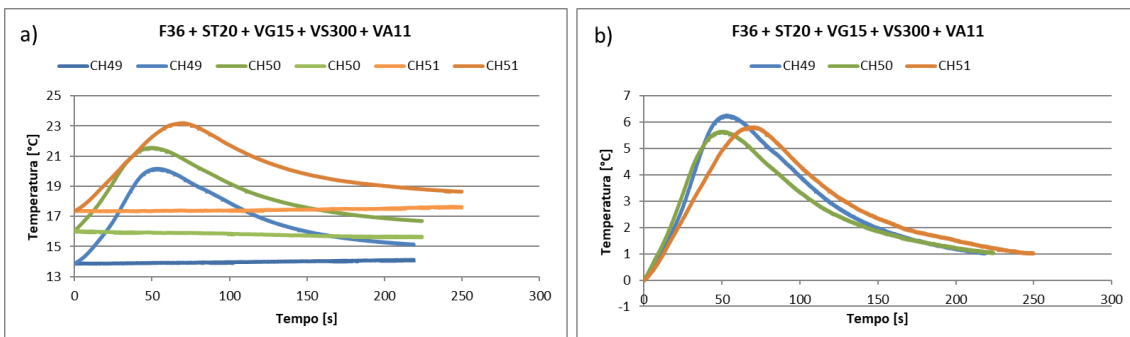
Fonte: Próprio autor.

Figura 71 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 14 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



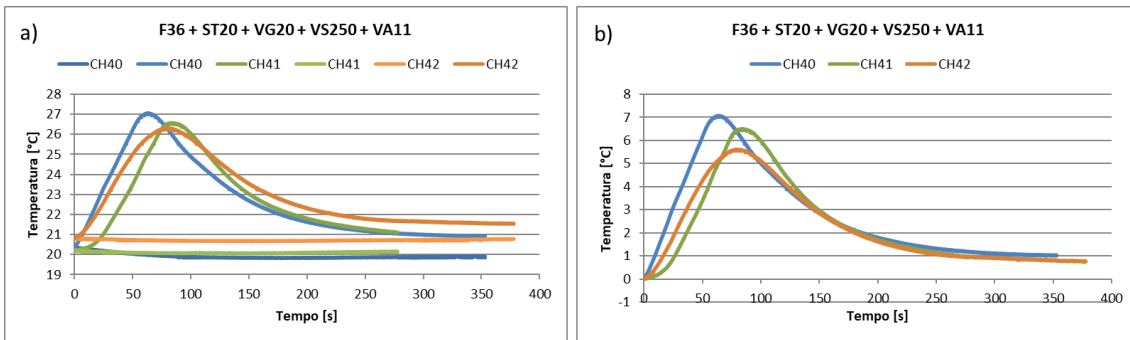
Fonte: Próprio autor.

Figura 72 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 15 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



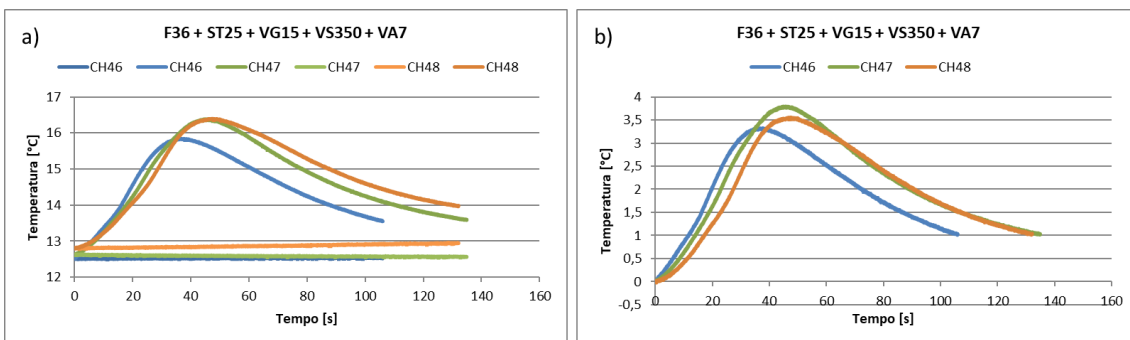
Fonte: Próprio autor.

Figura 73 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 16 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



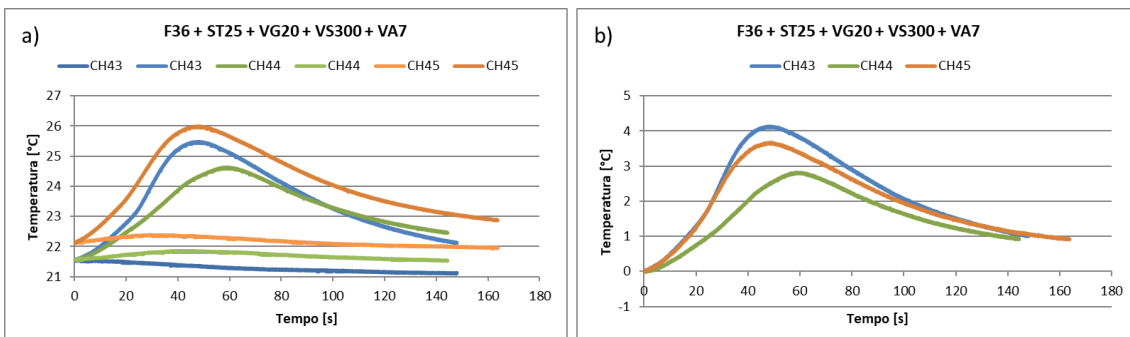
Fonte: Próprio autor.

Figura 74 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 17 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



Fonte: Próprio autor.

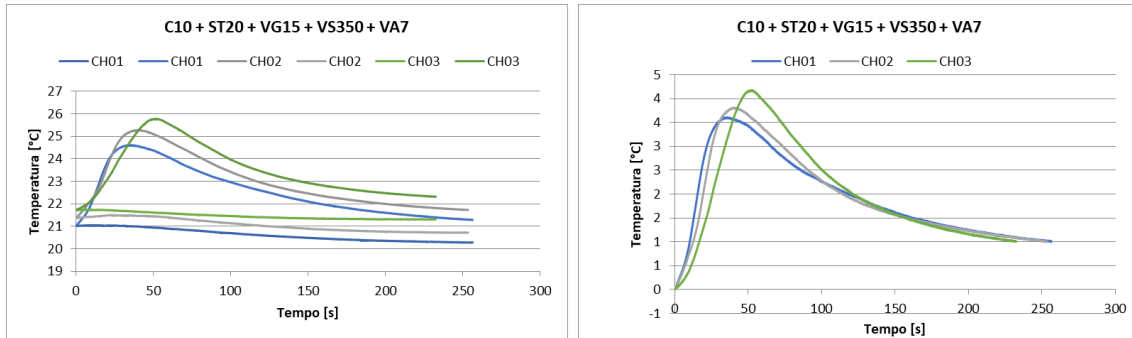
Figura 75 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 18 - Método de Taguchi: Gás de proteção F36; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



Fonte: Próprio autor.

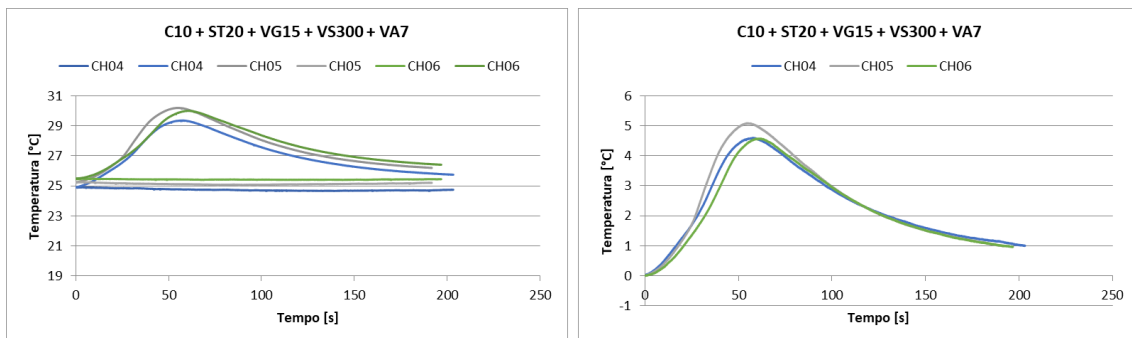
APÊNDICE B - GÁFICOS DE TEMPERATURA - MÉTODO OFAT

Figura 76 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 1 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



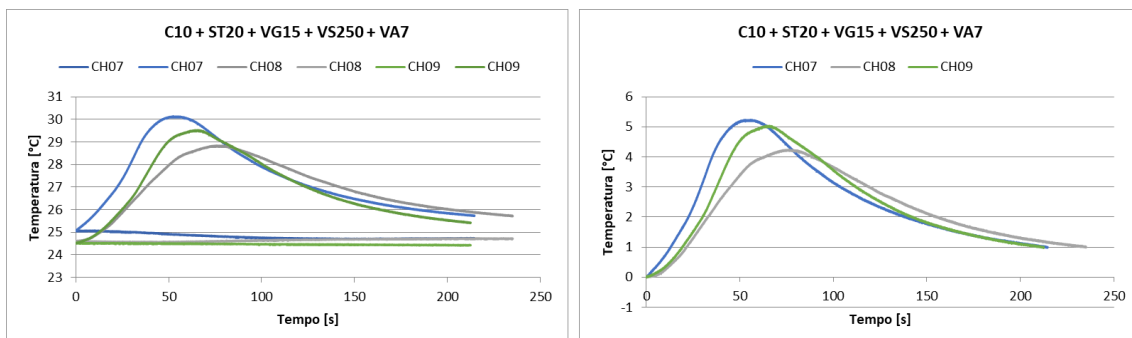
Fonte: Próprio autor.

Figura 77 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 2 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 300 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



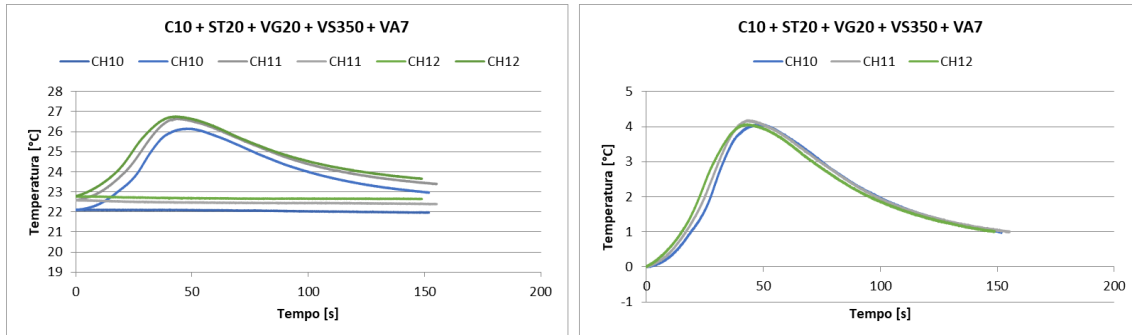
Fonte: Próprio autor.

Figura 78 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 3 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 250 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



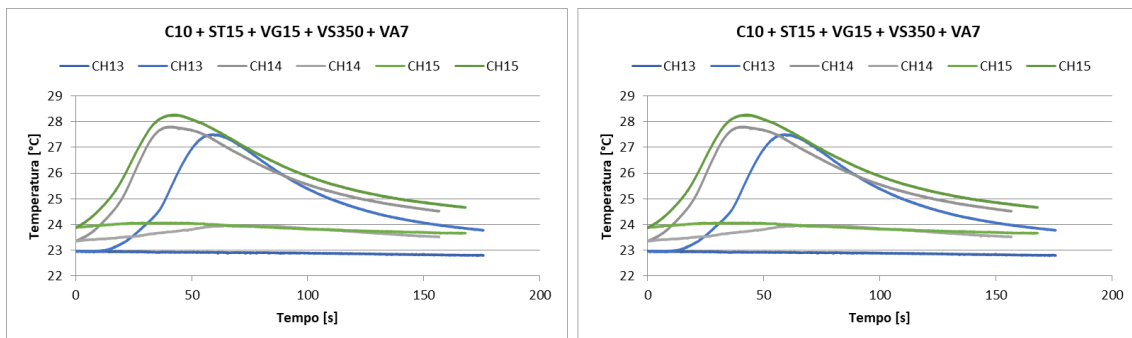
Fonte: Próprio autor.

Figura 79 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 4 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 20 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



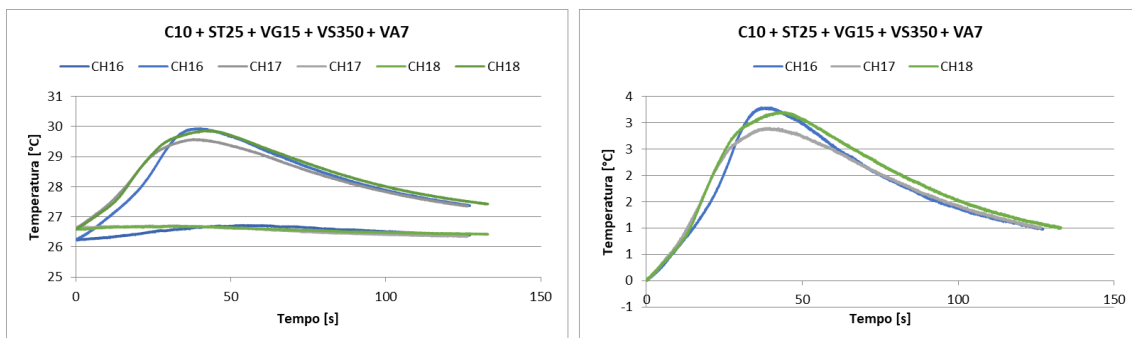
Fonte: Próprio autor.

Figura 80 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 5 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 15 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



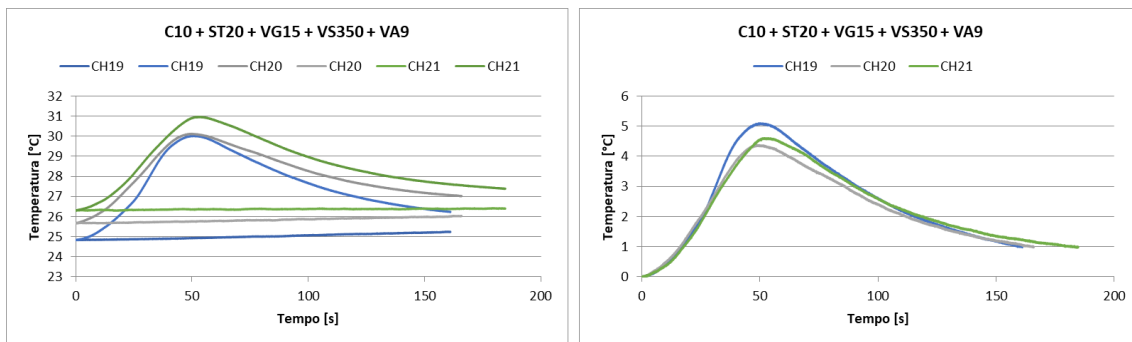
Fonte: Próprio autor.

Figura 81 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 6 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 25 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 7 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



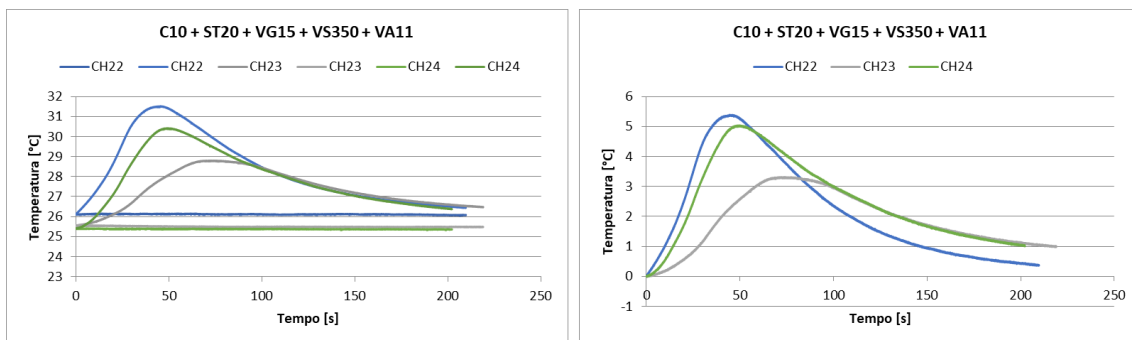
Fonte: Próprio autor.

Figura 82 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 7 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 9 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



Fonte: Próprio autor.

Figura 83 - Curvas de Temperatura condição de soldagem 8 - Método OFAT: Gás de proteção C10; *Stick-out* 20 mm; Vazão do Gás 15 l/mm; Velocidade de Soldagem 350 mm/min; Velocidade de Alimentação 11 m/min. a) Te e Ts. b) Variação de T.



Fonte: Próprio autor.

ANEXO A – CERTIFICADO DE INSPEÇÃO DE MATÉRIA PRIMA

Figura 84 - Certificado de Inspeção de matéria prima: aço DIN EN 10025-2.

USIMINAS SIDERURGICAS DE MINAS GERALS S.A.		CERTIFICADO DE INSPEÇÃO		Cliente-Customer: BRUNNINGTECNOLOGIA LTDA																																																																											
<p>USIMINAS</p> <p>USINA INTERMEDIATE CAMARÁ - IPATINGA/MG/BRASIL SEDE: BELO HORIZONTE - MG - BRASIL R. A. BRUNNING, 100 - JARDIM BOM DIA - BR 380 CEP: 31310-260 FONE: (51) 3609.8473 FAX: (51) 3609.8473 E-MAIL: vendas@usiminas.com.br INSCRIÇÃO ESTADUAL: 313.00022/0720</p>		<p>INSPECTION CERTIFICATE</p> <p>BOBINA GROSSA HOT ROLLED STEEL COIL</p>		<p>Tolerâncias - Tolerances</p> <p>Espessura-Thickness 0,25/±0,25 mm Largura-Width 0,00/+38,00mm</p>																																																																											
<p>EN-10025-2-04-S275JR-AR</p>		<p>Quantidade - Steel 6,30 X 1700 mm</p>		<p>Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 6,30 X 1700 mm</p>																																																																											
<p>Placa Volume Peças por Volume Massa Líquida Massa Bruta</p> <p>Slab Package Peças por Packages Net Mass Gross Mass</p> <p>221 845376096+ 1 20420 20424</p> <p>Massa Líquida Real Total-Total Actual Net Mass = 40.910 t</p> <p>Massa Bruta Real Total-Total Actual Gross Mass = 40.918 t</p>		<p>Corrida Amostra Heat Sample</p> <p>147899 33827164</p> <p>Peças-Pieces = 2</p>		<p>Placa Volume Peças por Volume Massa Líquida Massa Bruta</p> <p>Slab Package Peças por Packages Net Mass Gross Mass</p> <p>211 845387037+ 1 20490 20494</p> <p>Volume = 2</p>																																																																											
<p>Ensaio de Tracção - Tensile Test</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos Dir</th> <th>IE</th> <th>IR</th> <th>IE/IR (%)</th> <th>AL (%)</th> </tr> <tr> <td>Sampla</td> <td>Y3</td> <td>YS</td> <td>YS</td> <td>YS/YS</td> <td>EL</td> </tr> <tr> <td>33827162</td> <td>T4</td> <td>C</td> <td>448</td> <td>76</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>33827164</td> <td>T4</td> <td>C</td> <td>313</td> <td>432</td> <td>38</td> </tr> </table> <p>Unidade-Unit = N/mm² Método de Ensaio IE-Test Method Y3 = 0,2% EM = 5,65A1/2 mm Larz <= 8E mm S = Retangular</p>		Amostra	Pos Dir	IE	IR	IE/IR (%)	AL (%)	Sampla	Y3	YS	YS	YS/YS	EL	33827162	T4	C	448	76	32	33827164	T4	C	313	432	38	<p>Ensaio de Dobramento - Bend Test</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos Dir</th> <th>Resultado</th> </tr> <tr> <td>Sampla</td> <td>T4</td> <td>Result</td> </tr> <tr> <td>33827162</td> <td>T4</td> <td>BOM/GOOD</td> </tr> <tr> <td>33827164</td> <td>T4</td> <td>BOM/GOOD</td> </tr> </table> <p>Ângulo-Angle = 180° Diâmetro do Pino-Diameter of Mandril = 1,5 Esp</p>		Amostra	Pos Dir	Resultado	Sampla	T4	Result	33827162	T4	BOM/GOOD	33827164	T4	BOM/GOOD	<p>Composição Química (%) - Chemical Composition (%)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Corrida Analyse</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Al</th> <th>Cu</th> <th>Nb</th> <th>V</th> <th>Ti</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Sn</th> <th>N</th> <th>B</th> <th>Sb</th> <th>Ceod</th> </tr> <tr> <td>147899</td> <td>0,12</td> <td>0,01</td> <td>0,98</td> <td>0,021</td> <td>0,009</td> <td>0,042</td> <td>0,01</td> <td>0,001</td> <td>0,001</td> <td>0,000</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> <td>0,000</td> <td>0,0030</td> <td>0,0002</td> <td>0,001</td> <td>B:0,27</td> </tr> </table> <p>Formula do Carbono Equivalente - Carbon Equivalent Formula B = C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15</p>		Corrida Analyse	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Sb	Ceod	147899	0,12	0,01	0,98	0,021	0,009	0,042	0,01	0,001	0,001	0,000	0,01	0,01	0,00	0,000	0,0030	0,0002	0,001	B:0,27
Amostra	Pos Dir	IE	IR	IE/IR (%)	AL (%)																																																																										
Sampla	Y3	YS	YS	YS/YS	EL																																																																										
33827162	T4	C	448	76	32																																																																										
33827164	T4	C	313	432	38																																																																										
Amostra	Pos Dir	Resultado																																																																													
Sampla	T4	Result																																																																													
33827162	T4	BOM/GOOD																																																																													
33827164	T4	BOM/GOOD																																																																													
Corrida Analyse	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Sb	Ceod																																																													
147899	0,12	0,01	0,98	0,021	0,009	0,042	0,01	0,001	0,001	0,000	0,01	0,01	0,00	0,000	0,0030	0,0002	0,001	B:0,27																																																													
<p>Abreviações - Abbreviations</p> <p>* = Volume Aquecido-Mother plate IE = Limite Elástico - Yield strength AL = Alongamento - El = Elongation C = Transversal-Transverse T4 = Topo a um quarto da largura-Top at a quarter width Larz = largura-Width Diam = Diâmetro-Diameter P = Panela-Table</p>		<p>Abreviações - Abbreviations</p> <p>Esp = Espessura-Thickness Dir = Direção-Direction Pos = Posição de Amostragem-Sampling Position EM = Base Medida-Gauge Length S = Seção Transversal-Cross Section Al = Alumínio Total-Aluminum</p>		<p>Abreviações - Abbreviations</p> <p>Esp = Espessura-Thickness Dir = Direção-Direction Pos = Posição de Amostragem-Sampling Position EM = Base Medida-Gauge Length S = Seção Transversal-Cross Section Al = Alumínio Total-Aluminum</p>																																																																											
<p>Certificado do tipo 3.1 da norma EN-10204. Certificate of the type 3.1 of the EN-10204. Certificamos que este material foi inspecionado e possui nível de radiação abaixo de 1 kBq/Kg. We certify that this material has been inspected and the radiation level is less than 1 kBq/Kg.</p>																																																																															
<p>Observações - Remarks</p> <p>12703.2 4500028773</p>																																																																															
<p>FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet available at Usiminas Extranet</p>																																																																															
<p>GERENTE GERAL CONTROLE INTEGRADO DE QUALIDADE INTERMEDIATE QUALITY CONTROL SYSTEM MANAGER</p>		<p>Nota Fiscal Commercial Invoice</p> <p>00458394 5</p>		<p>Data de Emissão Date of Issue</p> <p>07/05/2019</p>																																																																											
<p>Helber Luiz Oliveira Ribeiro helber.ribeiro@usiminas.com +55 031 3829-3215</p>		<p>Ordem de Venda Sale Order</p> <p>L 000033269 1</p>		<p>Nº Certificado Certificate Nº</p> <p>4854183</p>																																																																											
<p style="text-align: center;">Sistema de Gestão Certificado pelas normas: Management System certified according to the standards: ISO 9.001 ISO 14.001 IATF 16.949 OHSAS 18.001</p> <p style="text-align: center;">Produto Conforme RohS&ELV Compliant Product 100% Recyclable Product</p>																																																																															

Fonte: adaptado de Usiminas (2019).