

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA E DE FUSÃO NA SOLDAGEM MAG EM
DIFERENTES GEOMETRIAS DE JUNTAS

Por

William Hackenhaar

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, fevereiro de 2016

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA E DE FUSÃO NA SOLDAGEM MAG EM
DIFERENTES GEOMETRIAS DE JUNTAS

por

William Hackenhaar
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Aprovada por:

Prof. Dr. Aleir Antônio Fontana de Paris, DEM/UFSM

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, PROMEC/UFRGS

Prof^ª. Dr^ª. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 29 de fevereiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor orientador José A. E. Mazzaferro pela orientação, dedicação, amizade, ideias, incentivo, paciência, experiência e conhecimentos compartilhados.

Ao professor Arnaldo Ruben Gonzalez pela ajuda durante o trabalho, pelos conhecimentos em projeto de experimentos, pela paciência, experiência, amizade e disposição.

Aos amigos, aos colegas de disciplinas e a equipe do Laboratório de Soldagem pela parceria, momentos de descontração, ajuda e aprendizado durante o trabalho.

À minha querida Carolina pelo apoio incondicional, paciência, compreensão e estímulo durante a realização deste trabalho. Também à minha família pelo apoio e incentivo.

Ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) pela infraestrutura, ambiente, equipamentos e consumíveis utilizados neste trabalho.

À UFRGS e ao PROMEC pela infraestrutura, recursos e apoio na elaboração desta dissertação.

O autor ainda agradece à Coordenação de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado que lhe foi concedida.

RESUMO

O presente trabalho objetiva estudar a eficiência térmica do arco elétrico e de fusão para o processo de soldagem MAG, do inglês *Metal Active Gas*, em diferentes geometrias de juntas soldadas. As soldas foram feitas inicialmente em um calorímetro de fluxo contínuo de água, seguidas de deposição de cordão sobre chapa e soldagem de juntas em ângulo “T”, sempre em aço carbono. A metodologia de projeto de experimentos Box-Behnken foi empregada para a avaliação da influência da variação dos parâmetros de soldagem (tensão, velocidade de alimentação do eletrodo e velocidade de soldagem) nas eficiências, dentro do modo de transferência metálica por curto circuito. Diferentes equações propostas na literatura para o cálculo da eficiência de fusão são comparadas. Para a adequada aquisição da eficiência térmica pelo calorímetro, preliminarmente é avaliada a influência da vazão de água e da geometria na entrada de um calorímetro de fluxo contínuo sobre a eficiência térmica do arco. O procedimento experimental consiste em testar diferentes vazões de água e três configurações geométricas na região de entrada de água no calorímetro: com rolha reta, com difusor cônico e com obstáculo. Os experimentos foram planejados e os resultados avaliados com base na análise de variância estatística de um único fator, no caso, a vazão de água na entrada do calorímetro. A maior eficiência térmica média de 80,5% foi obtida para a vazão de 4 l/min, com baixo erro estatístico, utilizando rolha de entrada com geometria de difusor cônico. O modelo em que o fluxo entra diretamente no tubo apresentou todos os valores de eficiência térmica do arco com pequeno decréscimo numérico se comparados com o difusor cônico, enquanto a rolha com obstáculo apresentou elevado erro estatístico. Com base nos resultados descritos, a eficiência térmica do arco elétrico foi avaliada com a vazão de 4 l/min para o projeto de experimentos Box-Behnken, os valores obtidos estão na faixa de 72 a 82% conforme a combinação dos parâmetros de soldagem. A velocidade de soldagem e a tensão do arco se mostraram como os parâmetros de maior influência na eficiência térmica do arco. Os resultados relativos à eficiência de fusão indicam maiores valores nas soldas realizadas no calorímetro e por simples deposição sobre chapa. A junta T apresentou os menores valores de eficiência de fusão e de diluição para todos os casos. O parâmetro de maior influência na eficiência de fusão foi a corrente de soldagem.

Palavras-chave: *Eficiência de Fusão. Calorímetro. Eficiência térmica do arco. MAG. Box-Behnken.*

ABSTRACT

The main aim of the present work is to study arc thermal efficiency and fusion efficiency to Gas Metal Arc Welding – GMAW, using different joint geometries. At first, the welds were performed in a continuous water flow calorimeter, followed by bead on plate and T – joint deposits. The Box-Behken design of experiments methodology was used to analyze the effect of welding parameters (arc voltage, wire feed speed and welding speed) on the efficiencies, when using short circuit metal transfer. The results of the fusion efficiency calculation were compared using different equations found in the literature. To correctly evaluate the thermal efficiency, it was necessary to analyze the influence of water flow rate and calorimeter inlet geometry. The experimental procedure consists of varying water flow rate and testing three different calorimeter inlet seal geometries: straight seal, conical diffuser seal and seal with water flux obstacle. The experiments were designed and the results evaluated based in a one-factor statistical analysis of variance, in this case the inlet calorimeter water flow. The highest average thermal efficiency is 80.5% to water flow of 4 l/min, with a low statistical error, using the conical diffuser seal inlet geometry. The inlet with straight seal model shown all the arc thermal efficiency values with slightly lower numerical values compared with conical diffuser, while the seal with flux obstacle exhibited high statistical error. Based on these results, the arc thermal efficiency was evaluated using 4 l/min water flow to the Box-Behnken Design, resulting values in the 72 to 82% range, depending on the welding parameters. The welding speed and arc voltage were the parameters that significantly affect arc thermal efficiency. The fusion efficiency results of the welds performed on the calorimeter and bead on plate were. The welds performed in T joints exhibit lowest fusion efficiency and dilution to each welding parameters combination tested. The fusion efficiency is strongly affected by the welding current.

Key-words: *Fusion efficiency. Calorimeter. Arc thermal efficiency. GMAW, Box-Behnken Design.*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 Eficiência de fusão.....	11
3.2 Diluição	14
3.3 Processo de soldagem MAG.....	15
3.4 Projeto de experimentos Box-Behnken	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1 Avaliação da geometria de entrada e vazão no calorímetro	26
5.2 Eficiência do arco e de fusão pelo projeto de experimentos Box-Behnken	33
6. CONCLUSÕES.....	56
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
APÊNDICE A.....	62
APÊNDICE B.....	65
APÊNDICE C.....	67
APÊNDICE D.....	68
APÊNDICE E.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - a) Densidade de potência para junta de topo ou cordão sobre chapa. b) Densidade de potência para junta tipo filete, distribuição de energia diferente do primeiro caso [Adaptado de Tusek et al., 2003].....	6
Figura 3.2 - a) Extração do calor em 2,5D ou simplificado para 2D [Adaptado de Machado, 2000]. b) Extração de calor 3D para a junta T [Adaptado de Tusek et al., 2003].....	7
Figura 3.3 - Modelo de transferência de calor em soldagem MAG com penetração parcial [Quintino et al., 2013].	8
Figura 3.4 - a) Eficiência do arco versus relação entre a potência do arco e a vazão de água, comprimento do arco de 5 mm. b) Eficiência do arco versus corrente para o processo TIG [Adaptado de Nasiri et al., 2014].	9
Figura 3.5 - Eficiência de fusão x velocidade de soldagem [Adaptado de Dupont e Marder, 1995].	13
Figura 3.6 - Áreas do metal de adição e metal base para o cálculo da diluição [Adaptado de AWS, 2001].	15
Figura 3.7 - Vista geral do processo de soldagem MAG [Adaptado de AWS, apud Linnert, 2001].	15
Figura 3.8 - Projeto de experimentos Box-Behnken para três fatores [Montgomery, 2012]..	18
Figura 4.1 - Vista de uma seção longitudinal do calorímetro [Adaptado de Sgarbi, 2013]...	19
Figura 4.2 - a) Rolha com difusor cônico usinado internamente. b) Rolha reta. c) Vista isométrica. d) Rolha com obstáculo do fluxo de entrada com vista isométrica.....	20
Figura 4.3 - a) Vista do experimento com o calorímetro. b) Exemplos dos cordões soldados nos tubos.	25
Figura 4.4 – a) exemplo de cordão sobre chapa com refratário na base. b) sistema de aquisição de temperatura (esquerda) e tensão e corrente (direita).....	25
Figura 5.1 - Ensaio inicial com baixas vazões, rolha cônica.....	26
Figura 5.2 - Linhas de fluxo do escoamento da água para a rolha com obstáculo e vazões de 2 a 5 l/min.	28
Figura 5.3 - Linhas de fluxo do escoamento da água para a rolha reta e vazões de 2 a 5 l/min.	29

Figura 5.4 - Linhas de fluxo do escoamento da água para rolha cônica e vazões de 2 a 5 l/min.	30
Figura 5.5 - Eficiência térmica versus Vazão, para as diferentes vazões e rolhas de entrada.	31
Figura 5.6 - Gráfico com a comparação da massa depositada entre os três ensaios.....	35
Figura 5.7 - Gráficos de contorno para o calorímetro com os resultados de velocidade de alimentação do eletrodo versus velocidade de soldagem x resultados da macrografia.....	37
Figura 5.8 - Gráficos de contorno com os resultados para a eficiência térmica do arco e calor transferido segundo a matriz de parâmetros do Box-Behnken.....	39
Figura 5.9 - Gráfico comparativo entre eficiência térmica do arco e penetração no calorímetro.	40
Figura 5.10 - Gráficos de contorno para as macrografias da solda cordão sobre chapa.....	41
Figura 5.11- Gráficos de contorno para a junta T.....	43
Figura 5.12 - Comparativo da diluição x eficiência do arco para as três soldas.....	44
Figura 5.13 - Eficiência de fusão e diluição, calculada pela Equação 6 para o calorímetro e cordão sobre chapa.	46
Figura 5.14 – Eficiência de fusão e diluição para junta T calculada pela Equação 3.6.....	47
Figura 5.15 - Eficiência de fusão calculada pela Equação 3.7 e diluição para o calorímetro e cordão sobre chapa.	48
Figura 5.16 – Eficiência de fusão pela Equação 3.7 e diluição para Junta T.....	49
Figura 5.17 - Eficiência de fusão 2D Equação 3.9 e diluição para o calorímetro e cordão sobre chapa.	50
Figura 5.18 – Eficiência de fusão 3D para a junta T segundo a Equação 3.10, e diluição.	51
Figura 5.19 - Gráfico comparativo entre as energias obtidas: nominal, considerando a eficiência térmica e através do coeficiente 0,66.....	53
Figura 5.20 - Eficiência de fusão Equações 6, 7 e 9 para o calorímetro versus a influência da corrente.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Parâmetros de soldagem para o estudo da vazão.....	21
Tabela 4.2- Planejamento do ensaio com vazão (l/min) e número de réplicas sem aleatorização.	22
Tabela 4.3- Exemplo do ensaio com rolha cônica, representando a sequência de ensaio com respectivos valores aleatorizados, dados adquiridos e eficiência térmica resultante.....	22
Tabela 4.4– Janela de trabalho com os limites e valor médio dos parâmetros variados durante a soldagem utilizados na matriz do Box-Behnken.	23
Tabela 4.5– Matriz de ensaio gerada pelo planejamento de experimentos Box-Behnken.....	23
Tabela 5.1- Comparação estatística Eficiência versus Vazão.....	32
Tabela 5.2– Médias das três medições de Potência, Corrente e Tensão realizadas durante a soldagem no Calorímetro, Cordão sobre chapa e Junta T com o respectivo desvio padrão..	34
Tabela 5.3– Variação da massa antes e após a soldagem para os casos com o Box-Behnken.	35
Tabela 5.4– Média das medições das macrografias do calorímetro.....	36
Tabela 5.5– Resultados de energia, calor transferido e eficiência térmica do arco para o calorímetro segundo os parâmetros do Box-Behnken.....	38
Tabela 5.6– Média das medições da macrografia para o cordão sobre chapa.....	41
Tabela 5.7– Média das medições das macrografias para a junta T.....	42
Tabela 5.8– Eficiência térmica do arco e eficiência de fusão, esta calculada pela Equação 3.6.	45
Tabela 5.9– Eficiência térmica do arco elétrico e eficiência de fusão, esta calculada pela Equação 3.7.	48
Tabela 5.10 Eficiência térmica do arco elétrico e eficiência de fusão 2D - Equação 3.9, e 3D - Equação 3.10.	50
Tabela 5.11– Energia para junta T, comparação entre a eficiência do arco (calorímetro) e com fator 0,66.	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
CC+	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
LS&TC	Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas - UFRGS
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NBR	Norma Brasileira
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
SCH	<i>Schedule</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia total ou nominal, J/mm
E_l	Energia líquida, J/mm
U	Tensão do arco elétrico, V
I	Corrente de soldagem, A
v	Velocidade de soldagem, mm/s
W	Velocidade de alimentação do eletrodo, m/min
η_a	Eficiência térmica do arco
Q_a	Calor transferido pelo arco, W
t_s	Tempo de soldagem ou arco aberto, s
P_{inst}	Potência média, W
n	Número de amostras
2D	Extração do calor em duas dimensões ou sentidos
2,5D	Extração do calor em duas dimensões/sentidos e meia
3D	Extração do calor em três dimensões ou sentidos
V	Vazão da água, m ³ /s
C_p	Calor específico, J/Kg·K
T_s	Temperatura de saída, K
T_e	Temperatura de entrada, K
ρ	Massa específica, Kg/m ³
Δt	Diferença entre tempos, s
η_m	Eficiência de fusão
Q	Entalpia de fusão, J/mm ³
A_w	Área da seção transversal do metal de solda, mm ²
E_{ma}	Calor latente de fusão do metal de adição, J/mm ³
E_{mb}	Calor latente de fusão do metal base, J/mm ³
V_{ma}	Volume depositado de metal de adição, mm ³
V_{mb}	Volume do metal base fundido, mm ³
T_f	Temperatura de fusão, °C
η_{m2D}	Eficiência de fusão em duas dimensões
η_{m3D}	Eficiência de fusão em três dimensões

α	Difusividade térmica, mm ² /s
ω	Largura do cordão de solda, mm
A	Área do metal de adição, mm ²
B	Área fundida do metal base, mm ²
A+B	Área total da solda, mm ²
k	Número de fatores Box-Behnken
C_0	Número de pontos centrais Box-Behnken
x	Valor de uma amostra
\bar{x}	Valor da média das amostras
P	Potência medida pelo SAP
Δ Massa	Diferença da massa, g
R^2	Coefficiente de determinação do ajuste estatístico

1. INTRODUÇÃO

Um dos primeiros problemas que surgem quando se analisa características e propriedades de uma junta soldada é a correta definição da energia utilizada. A parcela do calor que realmente é transferida para a peça é menor que o calor nominal imposto ou gerado pela fonte, pois ocorre a dissipação de parcela da energia, como, por exemplo, para o ambiente ou através do metal de base adjacente antes da sua difusão para a poça de fusão. A determinação da verdadeira parcela do calor transferido para a peça leva em consideração algumas perdas inerentes a cada processo de soldagem, como por exemplo, perdas por salpicos, condução, convecção, radiação, aquecimento do bocal da tocha e também o processo de soldagem que determina o fenômeno físico de transferência de calor e metal de adição, quando não autógeno, da tocha para a peça.

A determinação da região de contato entre o arco elétrico e o metal base tem-se mostrado um desafio para pesquisadores da área, pois a variação dos parâmetros de soldagem como corrente, tensão e velocidade de soldagem, gás de proteção/vazão, modo de transferência metálica, ângulo de trabalho e avanço, tipo de material e composição química, pré e pós aquecimento, são alguns dos fatores que podem alterar o calor recebido pelo metal base proveniente do arco elétrico. Portanto inúmeras combinações de parâmetros são possíveis para atender os requisitos da junta em questão, introduzindo-se a questão do verdadeiro valor a ser adotado para a eficiência térmica do arco elétrico para o cálculo da energia de soldagem.

A eficiência térmica do arco elétrico é de grande importância na determinação do verdadeiro calor transferido do arco para o metal base. Como observado por [Quintino et al., 2013] se o calor transferido para o substrato é maior que o considerado, ocorre aumento no tempo de solidificação e de resfriamento, ambos levam ao aumento do tamanho de grão e alteram a temperabilidade do material. Como consequência, afetando a zona afetada pelo calor (ZAC) e propriedades mecânicas da junta soldada, como dureza e resistência à tração.

Baseado na problemática exposta, neste trabalho é avaliada a influência da vazão de água e geometria de entrada num calorímetro de fluxo contínuo na eficiência do arco. A metodologia estatística empregada é a análise de variância de um único fator. Além disso, é estudada a alteração da eficiência do arco e de fusão através da combinação de diferentes parâmetros de soldagem. O modo de transferência metálica é mantido em curto circuito, e a combinação dos parâmetros é determinada pela matriz do projeto de experimentos Box-Behnken.

2. OBJETIVOS

Um dos objetivos do presente trabalho é avaliar a influência de diferentes vazões de água em um calorímetro de fluxo contínuo, assim como a alteração do escoamento através da variação da geometria de entrada do fluxo de água no sistema, sobre a eficiência térmica medida para o processo de soldagem MAG. Assim, pretende-se melhor entender o fenômeno de transferência de calor do arco para a peça, adotando valores mais próximos aos da realidade para a eficiência do arco.

Outro objetivo é a comparação da eficiência de fusão pela variação da geometria da junta soldada, como cordão sobre chapa, junta filete “T” e reprodução no tubo do calorímetro baseados no projeto de experimentos Box-Behnken para a avaliação da influência dos parâmetros de soldagem como velocidade de alimentação do arame (corrente), tensão e velocidade de soldagem nas características do cordão obtido, como penetração, largura, área total e fundida, diluição e massa de metal depositado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da transferência de calor em soldagem compreende o entendimento de fatores como o calor imposto pelo arco, que representa a quantidade de energia entregue para a peça durante a soldagem, sua taxa é dada por unidade de comprimento do cordão em (J/mm). Os ciclos térmicos do substrato são dependentes dessa transferência de calor que determina a taxa de resfriamento da junta e, portanto, as transformações de fases, propriedades mecânicas, distorções, etc. Segundo [AWS, 2001], a energia de soldagem é definida como a razão entre a potência da fonte de energia em Watts (J/s), e a velocidade de soldagem (mm/s), Equação 3.1.

$$E = \frac{U \cdot I}{v} \left(\frac{J}{mm} \right) \quad (3.1)$$

Onde E é a energia total ou nominal, U é a tensão do arco elétrico em Volts, I é a corrente do arco elétrico em Amperes, e v é a velocidade de soldagem.

Na avaliação da eficiência térmica para o processo MAG controlado em calorímetros de nitrogênio líquido e caixa isolada [Pépe et al., 2011], considerou-se que o calor não transferido para a peça é perdido nas formas de radiação, sublimação do metal de soldagem, convecção ou condução da tocha de soldagem. Diferentes modelos para as perdas são encontrados na literatura com suas respectivas considerações e simplificações para permitir a melhor compreensão ou modelagem dos fenômenos. Segundo [Scotti et al., 2012], entre os fatores que influenciam o calor imposto efetivo na peça estão a condutividade térmica, comprimento do arco elétrico, gás de proteção, energia de soldagem (parâmetros), formato da poça fundida resultante e ressalta-se a espessura devido a sua importância na quantidade de calor que é difundida pela chapa, difusão essa, sugerida por [Scotti et al., 2012], que dependendo da espessura e do coeficiente de condutividade térmica do material pode ocorrer de três maneiras principais: a) perdas por convecção natural a temperatura baixa se o material tiver espessura suficiente de maneira que a superfície não seja aquecida significativamente para uma dada energia do arco. b) para chapas finas, em que o lado contrário da chapa é aquecido até a temperatura de fusão, as perdas são por radiação e convecção da poça na raiz em alta temperatura, e perdas por convecção na raiz do cordão solidificado. c) para chapas de espessura intermediária, ocorre a convecção natural em temperatura média. A consideração de diferentes mecanismos de resfriamento com a variação da espessura da chapa fortalece a ideia de que a energia perdida para o ambiente depende de aspectos específicos de cada junta e do processo

de soldagem. Nesse contexto, é inserido o coeficiente adimensional que representa a eficiência térmica do arco η_a para cada processo de soldagem, cuja correta determinação é fundamental para o correto uso dos modelos de transferência de calor em soldagem, pois afeta diretamente a potência ($\eta_a \cdot U \cdot I$). O cálculo da energia líquida (E_l) com a consideração desse fator é dado pela Equação 3.2, adaptada de [AWS, 2001].

$$E_l = \eta_a \frac{U \cdot I}{v} \left(\frac{J}{mm} \right) \quad (3.2)$$

A eficiência do arco elétrico representa o calor que foi realmente transferido para a peça dividido pelo calor total gerado pela fonte de soldagem no período de tempo com arco aberto, portanto $\eta_a < 1$. A Equação 3.3, adaptada de [Dupont e Marder, 1995], representa o cálculo da eficiência do arco elétrico. Segundo [Scotti et al., 2012] as perdas entre a energia de soldagem e o calor imposto dependem dos vários parâmetros do processo de soldagem considerado, o que não permite o uso de um único valor absoluto para o rendimento térmico.

$$\eta_a = \frac{Q_a}{P_{inst} \cdot t_s} \quad (3.3)$$

Onde o calor transferido pelo arco elétrico Q_a pode ser medido por calorimetria, representando a taxa real de transferência de calor da fonte para a peça com as perdas descontadas, o tempo de soldagem em segundos é t_s ou tempo de arco aberto e, a potência média P_{inst} é a média dos valores instantâneos medidos durante a soldagem [Nascimento et al., 2007], conforme Equação 3.4, na qual o número de amostras da aquisição é representado por n .

$$P_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)}{n} \quad (3.4)$$

Nos processos que utilizam eletrodo consumível, o metal de adição deve ser fundido pela fonte de calor à medida que é incorporado à junta, e o calor recebido pelo arame/eletrodo é novamente transferido para a peça através das gotas de metal [Kou, 2003]. A transferência de calor em um eletrodo consumível, que possibilita sua fusão, provém principalmente do aquecimento resistivo do eletrodo e da absorção de elétrons na ponta do eletrodo originados pelo arco elétrico [Dupont e Marder, 1995]. No modelo descritivo proposto por [Scotti et al., 2012], o fluxo de calor no processo MAG ocorre de três maneiras principais: Primeiro, na conexão arco-peça em que o calor é transferido por condução para a peça gerando a poça de

fusão, estima-se que mais de 80% de toda tensão do arco seja consumida na conexão entre arco-peça e arco-eletrodo. Segundo, através do calor carregado pelas gotas em transferência do eletrodo para a poça de fusão (metal de adição), onde uma porcentagem do calor é perdida para o ambiente como consequência da evaporação do metal e salpicos. Terceiro, através da energia da coluna de plasma que é transferida para a chapa (radiação e convecção). Entre as perdas, uma parte da energia imposta na superfície e que não é difundida para dentro da peça se perde para o ambiente por radiação através da superfície do cordão que acabou de solidificar.

Segundo [Dupont e Marder, 1995], para o processo MAG as gotas de metal superaquecidas contribuem com aproximadamente 38 a 42% do calor transferido do eletrodo para o metal base. Ainda, é esperado que a eficiência do arco permaneça aproximadamente constante com a variação da corrente, pois teoricamente o calor fornecido pela gota para a potência total transferida para a peça não varia significativamente com o aumento da corrente. No entanto, as perdas por radiação do arco elétrico, dissipação de calor no metal base que não contribui para a formação do metal de solda e, perdas por convecção natural para o ambiente devido a indução de correntes de convecção são alguns dos fatores que podem levar a diferentes valores de eficiência do arco (mesmo sutis) para o processo MAG. Diferenças estas resultantes da variação da densidade do ar gerada pela diferença de temperatura mais elevada quando comparada à potências menores.

A distribuição da densidade da energia pelo arco elétrico, numa dada área, em diferentes tipos de juntas soldadas é desigual segundo [Tusek et al., 2003], assim como os padrões de extração de calor do local de soldagem. As hipóteses consideradas são que a espessura e o material das peças soldadas sejam as mesmas, além do comprimento do arco constante. A principal influência na eficiência de soldagem é atribuída à posição das peças a serem soldadas, por exemplo, o ângulo formado entre as partes do metal base e também entre a tocha e o metal base, pois influenciam na extração de calor da junta soldada. Ainda, a área de contato (acoplamento) entre arco e a peça para cada tipo de junta pode ser diferente, como mostrado na Figura 3.1, e conseqüentemente a concentração de energia. No trabalho referido foi utilizado o processo TIG autógeno em chapas de 1 mm de espessura de aço inoxidável ferrítico e aço carbono sem elementos de liga, com corrente de 45 A e tensão de 12V para quatro tipos de junta variando a velocidade entre elas. A energia imposta necessária para produzir cordões de boa qualidade foi menor para a junta de canto, e aumentou-se para a junta de topo, sobreposta e T, respectivamente, sendo necessário quatro vezes mais energia para junta T quando comparada com a de canto, seguindo as hipóteses inicialmente propostas. Dos trabalhos consultados, observa-se que a eficiência térmica do arco é baseada na condição da Figura 3.1(a).

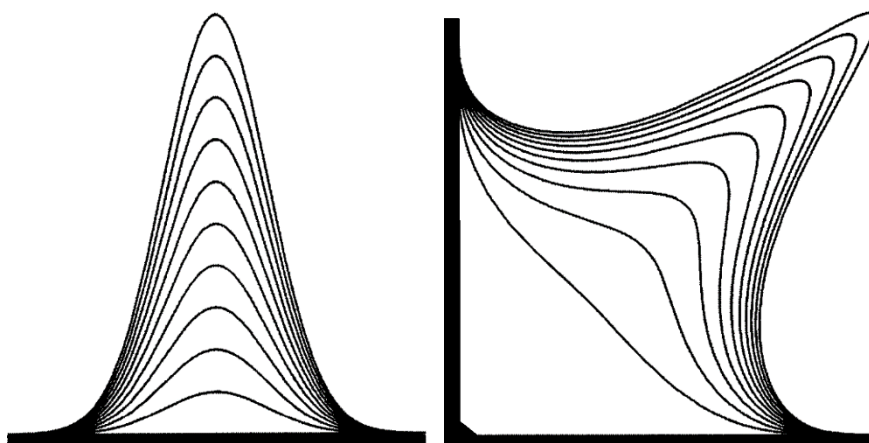


Figura 3.1 - a) Densidade de potência para junta de topo ou cordão sobre chapa. b) Densidade de potência para junta tipo filete, distribuição de energia diferente do primeiro caso [Adaptado de Tusek et al., 2003].

A densidade de energia da fonte de calor deve ser suficiente para gerar a fusão local do material, e geralmente é representada como a potência entregue por unidade de área (W/mm^2). A distribuição do calor na superfície da peça normalmente é idealizada conforme modelos matemáticos, entre eles estão o duplo elipsoide de Goldak e o de Gauss, este com formato de “sino”, onde no centro do arco encontram-se as maiores intensidades de calor e na região circundante a intensidade decresce no sentido centro-periferia. No entanto, os modelos de transferência de calor devem ser avaliados com cuidado, pois quando se considera juntas não planas como a “T” ou sobreposta, que oferecem obstáculos como as arestas das chapas ou o ângulo das partes que formam a junta, altera-se a região de contato arco-peça provocando a descentralização da energia do arco, ou seja, da distribuição do calor na peça. Segundo [Hirata et al., 2014] quanto maior o comprimento do arco, maior a área de acoplamento, diminuindo a concentração do calor e também o rendimento de fusão.

Segundo [Tusek et al., 2003] avaliando diferentes tipos de juntas soldadas, como “T”, de topo, de canto e sobreposta encontrou-se principalmente dois fenômenos que exercem influência no volume de metal fundido do metal base. Primeiro, a extração de calor da junta soldada apresenta diferentes padrões segundo cada tipo de junta, logo diferentes valores de energia são necessários. O segundo ponto é a variação da região de contato do arco com a peça. Por exemplo, em uma junta de topo o arco pode estabelecer contato com as superfícies planas e não sofrer grande deflexões, porém, no caso de uma junta “T” pode ocorrer o contato com as laterais da chapa (alma e aba da junta) alterando a distribuição de calor fornecida pelo arco ou a forma da curva de distribuição Gaussiana da energia.

A extração de calor em soldagem varia com a geometria e espessura da junta soldada. A extração do calor na junta pode ser em duas dimensões (2D), duas dimensões e meia (2,5D) ou três dimensões (3D), dependendo da geometria e espessura da junta em relação à energia transferida pelo arco elétrico. Para situações em que o metal base possui elevada espessura a extração do calor ocorre em 2,5D ou 3D, mesmo para juntas de topo ou soldas cordão sobre chapa. Na Figura 3.2 são apresentados dois exemplos de seção transversal que correspondem aos estudados neste trabalho. No primeiro caso, Figura 3.2(a), a penetração da solda é incompleta, portanto com diferença entre a temperatura das superfícies superior e inferior do metal base, porém, com aquecimento das duas. No segundo caso, Figura 3.2(b), a extração do calor para a junta T ocorre através da aba (dois sentidos) e da alma (1 sentido) resultando em 3D, portanto, com maior intensidade. Estima-se que o erro no cálculo do fluxo térmico é de no máximo 20% ao utilizar modelos 2D, ou 3D para situações de regimes 2,5D [Machado, 2000].

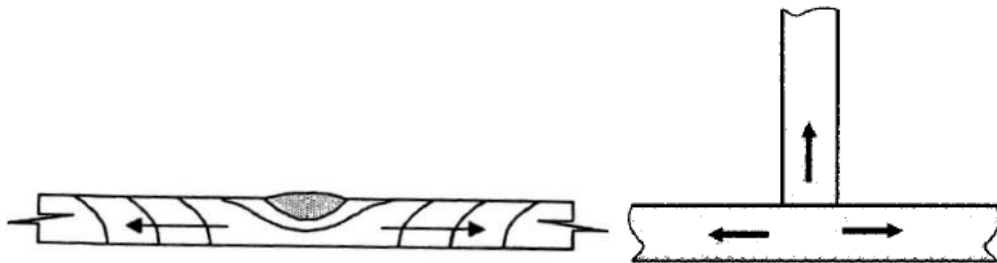


Figura 3.2 - a) Extração do calor em 2,5D ou simplificado para 2D [Adaptado de Machado, 2000]. b) Extração de calor 3D para a junta T [Adaptado de Tusek et al., 2003].

A extração de calor para soldas com penetração completa e parcial para o processo MAG foi investigada por [Quintino et al., 2013], na Figura 3.3 é representado o modelo de extração de calor com penetração parcial, que é o caso das soldas cordão sobre chapa e de maneira aproximada do calorímetro usado neste trabalho. A numeração da Figura 3.3 indica que a transferência do calor ocorre da seguinte maneira: 1) convecção natural (superfícies do substrato), 2) radiação (cordão recém soldado) e 3) difusão do calor no metal base por condução (interior do substrato). Em soldas com penetração completa, a região oposta do substrato relativa ao cordão depositado, troca calor por radiação com o meio (3 a 12% do calor realmente absorvido pelo substrato), portanto aumentando a perda de calor e conservando menos energia que juntas com penetração parcial. Logo, juntas com penetração parcial apresentam maior eficiência térmica de soldagem.

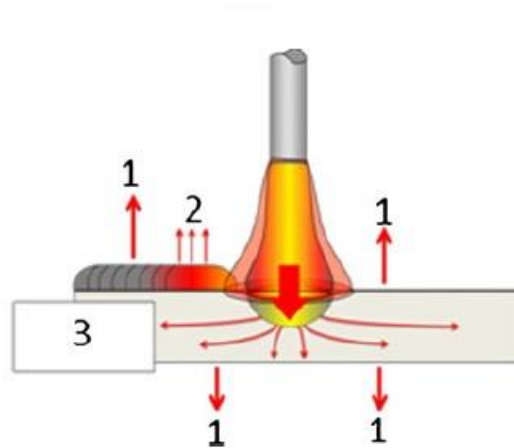


Figura 3.3 - Modelo de transferência de calor em soldagem MAG com penetração parcial [Quintino et al., 2013].

A estimativa da eficiência de soldagem teórica e experimental vem sendo realizada de diversas maneiras, dentre elas pode-se destacar: o calorímetro de nitrogênio líquido que mede a perda de massa por vaporização [Arevalo e Vilarinho, 2012], o calorímetro de efeito Seebeck [Giedt et al., 1989] que mede a diferença de potencial gerada pela junção de dois materiais diferentes submetidos a diferentes temperaturas, o calorímetro que mede o aumento da temperatura da água de um recipiente após a imersão do corpo de prova [Bosworth, 1991], e, ainda, o calorímetro de fluxo contínuo de água [Lu e Kou, 1989].

O calorímetro de fluxo contínuo utilizado no presente trabalho segue o princípio daquele proposto por [Lu e Kou, 1989], porém, com modificações geométricas. A concepção do funcionamento deste tipo de calorímetro é que através do escoamento contínuo de água com vazão controlada e constante no interior de um tubo extrai-se o calor da peça que recebe do arco elétrico, gerando o aumento da temperatura da água. Segundo [Çengel e Boles, 2013], calor é definido como a forma de energia transferida entre dois sistemas (ou entre um sistema e sua vizinhança) em virtude da diferença de temperatura, a transferência de calor para um sistema também é chamada de adição ou fornecimento de calor. Essa diferença de temperatura é medida na saída do tubo por termopares durante o período de tempo suficiente para o aquecimento da água pela passagem do arco elétrico e seu posterior resfriamento até retornar à temperatura ambiente ou de entrada. A quantidade de calor aportado à peça (Q_a), é calculada pela Equação 3.5, adaptada de [Kou, 2003].

$$Q_a = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \sum_{i=0,1}^n (T_s - T_e) \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

Onde V é a vazão de água (m^3/s), C_p o calor específico da água em ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), T_s a temperatura de saída (K), T_e temperatura de entrada (K), ρ é a massa específica (kg/m^3) e Δt é o período de tempo de aquisição relativo à frequência configurada no sistema de aquisição de dados, em segundos.

Entre os cuidados com esse tipo de calorímetro está a adequada escolha da vazão da água, que deve ser relacionada com a potência de soldagem. Baixas velocidades de escoamento poderiam produzir a ebulição da água. Por outro lado, segundo [Nasiri et al., 2014], o uso de altas vazões relativas à potência de soldagem poderia incrementar a retirada de calor da superfície da peça, diminuindo a temperatura da superfície de soldagem e também reduzindo o tamanho da poça de fusão. Nessa situação, podem resultar valores de eficiência artificialmente maiores, pois aumenta-se a transferência de calor para a peça devido ao arrefecimento acelerado da superfície.

No trabalho de [Nasiri et al., 2014], afirma-se que a eficiência do arco é independente da vazão de água de resfriamento, desde que a relação entre a potência do arco e a vazão de água estejam acima do limite mínimo de 80 Joule horas por litro ($\text{J}\cdot\text{h}/\text{l}$). Para valores abaixo dessa relação ocorreria o aumento artificial na eficiência do arco, Figura 3.4(a). Seguindo essa relação os autores encontraram valores de 65-70% para a eficiência térmica do arco elétrico para o processo TIG, que permanecem dentro dessa faixa mesmo com o aumento da corrente até o valor de 160 A, Figura 3.4(b).

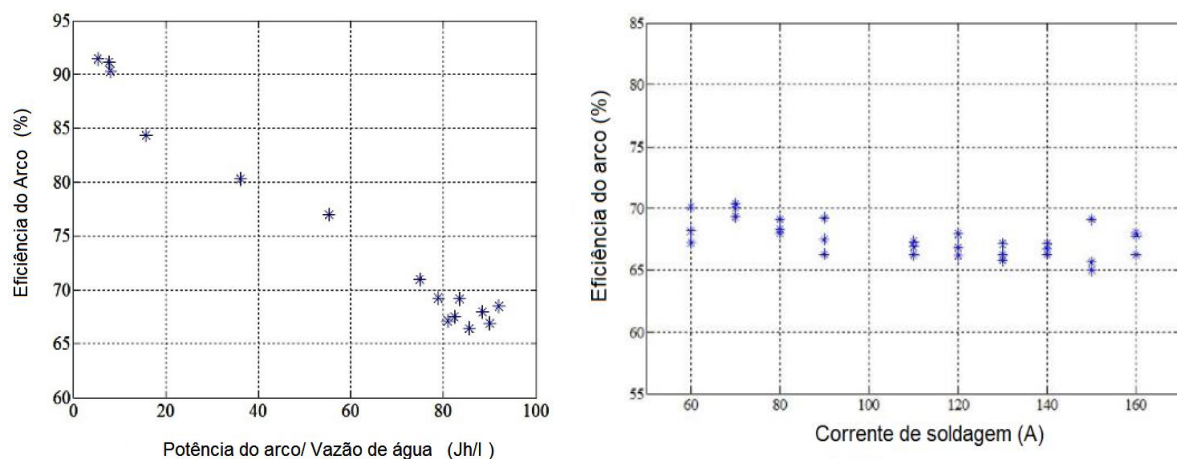


Figura 3.4 - a) Eficiência do arco versus relação entre a potência do arco e a vazão de água, comprimento do arco de 5 mm. b) Eficiência do arco versus corrente para o processo TIG [Adaptado de Nasiri et al., 2014].

As diferenças no rendimento térmico entre os processos TIG e MAG são objeto de investigação por pesquisadores da área. Entre as justificativas para esta diferença, encontra-se

o aquecimento do eletrodo no processo MAG, onde grande parte dessa energia é transferida para a peça, o que não acontece no processo TIG, pois calor é perdido para a tocha onde o eletrodo não é consumível. Também existe diferença na temperatura do arco entre os dois processos, [Zielińska et al., 2007] encontraram temperaturas de pico para o processo MAG em torno de 13000 K no arco elétrico, diferente dos 20 000 K que geralmente são considerados para ambos os processos. Esta diferença de temperatura foi entendida como efeito do resfriamento pelo vapor de metal do arame, gerando menores perdas por radiação devido a menor temperatura do arco, contribuindo para o entendimento da diferença na eficiência entre os dois processos.

No trabalho de [Dutta et al., 1994] foi desenvolvida uma técnica para estimar teoricamente a eficiência do processo TIG pelo formato e tamanho da poça de fusão. Foram encontrados valores médios de rendimento térmico de 72% em juntas de topo, e para cordão sobre chapa valores mínimos de 62% e máximos de 85%. Utilizou-se o aço HY-80 em amostras de 304 x 152,4 x 25,4 mm com chanfros de 1,59 x 1,59 mm e Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) de 3 a 5 mm. Quando comparadas juntas com e sem chanfro para faixas semelhantes de velocidade e energia imposta, não se verificaram diferenças significativas nos valores de eficiência. Porém, a proporção entre a espessura da amostra e o tamanho do chanfro deste trabalho são relativamente baixas, e dessa maneira, a afirmação de que o chanfro não altera a eficiência poderia ser considerada válida para este caso específico, pois sua generalização carece de ensaios experimentais. Ainda, em ambos os casos, o aumento da potência de entrada levou ao decaimento da eficiência, para a faixa de potência 2500 a 4500 W e velocidades de soldagem de 1,3 a 2,1 mm/s, onde possivelmente as perdas por radiação e convecção para o ambiente aumentaram. Também em menores velocidades observaram maiores valores de eficiência, ligados às menores perdas por convecção pela superfície. Estes autores não observaram que o menor gradiente de temperatura no entorno da poça de fusão e à sua frente para baixas velocidades de soldagem favorece o aproveitamento do calor e, logo, aumenta a eficiência térmica do arco.

A influência do chanfro para o processo MAG em chapas de aço carbono também foi investigada por [Pépe et al., 2011]. Realizou-se soldas tipo cordão sobre chapa num metal de base com dimensões de 250 x 50 x 5 mm e comparou-se com amostras de 250 x 50 x 12 mm, porém estas com um rasgo retangular em seu centro com largura de 10 mm x 7,5 mm de profundidade. A comparação foi feita em calorímetro tipo caixa isolada, onde a eficiência para a chapa com o chanfro (ranhura) se apresentou de 7-9% mais elevada do que a solda com o cordão apenas depositado. Esta diferença significativa na eficiência térmica foi entendida pelos

autores como resultado da diferença nas perdas por radiação, onde as laterais das paredes da chapa com o rasgo absorveram esta energia que seria perdida.

A influência da vazão do gás de proteção foi investigada por [Nasiri et al., 2014]. Verificou-se que a vazão não desempenha um papel importante no transporte de calor por convecção pelo plasma quente. Foram verificadas vazões de (10, 20 e 25) litros por minuto (l/min), em quatro faixas de corrente (60, 100, 140 e 180 A) para o processo TIG em amostras de aço de carbono com dimensões de 200x150x5 mm e gás de proteção argônio. Devido à pequena variação da eficiência nestas faixas, concluiu-se que para a vazão do gás de proteção em questão, os efeitos não são significativos na eficiência do arco.

A influência do acabamento superficial das chapas em aço carbono foi avaliada por [Pépe et al., 2011], em um calorímetro tipo caixa isolado. Foram comparadas superfícies jateadas com areia com superfícies apenas laminadas (condição da aciaria) em chapas de 100 x 200 x 2 mm. A diferença encontrada entre os acabamentos superficiais para o calor imposto e para a média da potência instantânea não foi significativa, concluindo-se que a condição da superfície exerce pouca influência no aumento da absorção. Os autores consideram o resultado como esperado, pois a temperatura de soldagem gera a oxidação da superfície nas proximidades do arco.

3.1 Eficiência de fusão

O termo eficiência de fusão (η_m) significa a fração de energia líquida imposta e que efetivamente funde o metal. Ela está ligada tanto às características da fonte de calor, ou seja, da eficiência do arco, processo de soldagem, como a maneira que o calor é transferido aos materiais a serem unidos [AWS, 2001]. Pode ser determinada pela medição da área do cordão, tipo de material e energia líquida imposta. A área fundida do metal base, área total, penetração, reforço, largura do cordão e zona afetada pelo calor podem ser determinadas através da análise macrográfica da seção transversal do cordão de solda, que constitui na preparação da amostra através da abrasão em lixas de granulometria crescente, ataque químico com ácido e visualização em lupa.

A porção de metal fundido necessária para a produção de determinado comprimento do cordão de solda é orientada pela espessura do material a ser unido e pelo processo de soldagem. Considerando os requisitos metalúrgicos, normalmente procura-se fundir o mínimo volume possível de material e com a menor energia possível [AWS, 2001]. Assim, reduz-se distorções, zona afetada pelo calor e, diminuindo o desperdício de energia.

Segundo [Dupont e Marder, 1995] a eficiência de fusão depende fortemente da velocidade de soldagem e da potência do arco. Ainda, arcos elétricos com baixa eficiência térmica limitam o valor atingido pela eficiência de fusão, pois a energia não pode ser transferida para o metal base em taxas elevadas, limitando também a velocidade máxima de avanço para cada processo de soldagem. A velocidade com que ocorre o aporte térmico para a fusão do metal base concorre com a dissipação do calor por condução e perdas para o ambiente, ou seja, aumenta-se o desperdício de calor que não é utilizado para fusão e uma maior zona afetada pelo calor. Nesse contexto, busca-se a menor potência do arco e a maior velocidade permitida pelo processo de soldagem em questão, desde que resulte num cordão que atenda as especificações requeridas.

A eficiência de fusão relacionada a um passe de solda segundo [AWS, 2001] pode ser representada pela Equação 3.6, onde é relacionada a quantidade de calor necessária para fundir o cordão depositado por unidade de comprimento, dividido pela potência, para um processo a arco.

$$\eta_m = \frac{Q \cdot A_w \cdot v}{U \cdot I} \quad (3.6)$$

Onde Q representa a entalpia de fusão, e A_w a área da seção transversal do metal soldado em mm^2 .

A entalpia de fusão (Q) determina a quantidade teórica de calor necessária para fundir um dado volume de metal, considerado inicialmente na temperatura ambiente até seu ponto de fusão, sendo de $10,5 \text{ (J/mm}^3\text{)}$ para aços comuns. A área da seção transversal (A_w) é representada pela soma da região fundida com o reforço do cordão (área total). Quando o processo é autógeno, é considerado apenas a área fundida.

Outra maneira para o cálculo da eficiência de fusão foi sugerida por [Dupont e Marder, 1995] através da Equação 3.7. O comportamento da eficiência de fusão com a variação da velocidade de soldagem encontrado nesse trabalho é exposto na Figura 3.7.

$$\eta_m = \frac{E_{ma} \cdot V_{ma} + E_{mb} \cdot V_{mb}}{\eta_a \cdot U \cdot I \cdot t_s} \quad (3.7)$$

Onde E_{ma} e E_{mb} representam a energia necessária para alcançar o ponto de fusão (calor latente de fusão) do metal de adição e do metal de base, respectivamente. V_{ma} representa o volume de metal de adição depositado e V_{mb} o volume do metal base fundido. Por exemplo, a

E_{mb} para o aço carbono comum é de $10,5 \text{ (J/mm}^3\text{)}$. A temperatura de fusão para o eletrodo ER70S-6 segundo [Soderstrom, apud Villeminot, 2011] é de 1538 K , logo a entalpia de fusão Q pode ser calculada pela Equação 3.8, adaptada de [AWS, 2001].

$$Q = \frac{T_f^2}{300000} \quad (3.8)$$

Onde T_f é a temperatura de fusão em graus Celsius. Logo, a entalpia de fusão do eletrodo ER70S-6 é de $7,88 \text{ (J/mm}^3\text{)}$.

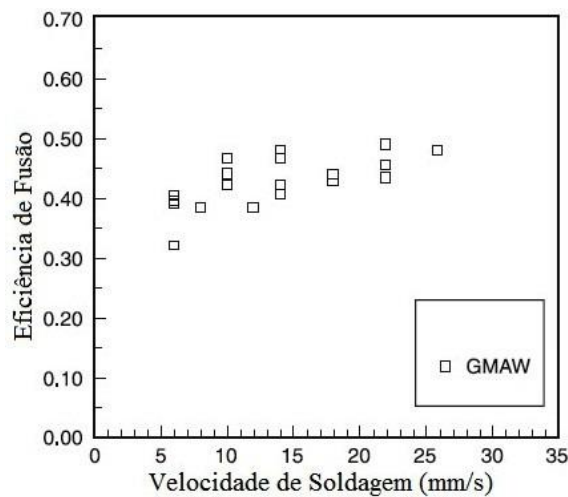


Figura 3.5 - Eficiência de fusão x velocidade de soldagem [Adaptado de Dupont e Marder, 1995].

Outra maneira de prever a eficiência de fusão foi proposta por [AWS, apud Wells, 2001] através da Equação 3.9, para escoamento de calor em duas dimensões 2D em placas finas. Analisando essa equação nota-se que a eficiência de fusão aumenta com maiores velocidades, bem como materiais com maiores difusividades térmicas apresentam eficiência de fusão menor, sendo seu valor máximo de 0,50 pois o calor é dissipado mais rapidamente.

$$\eta_{m2D} = \frac{1}{\left(\frac{8 \cdot \alpha}{5 \cdot v \cdot \omega}\right) + 2} \quad (3.9)$$

Onde η_{m2D} representa a eficiência de fusão 2D proposta por [AWS, apud Wells, 2001], α a difusividade térmica do metal de base em (mm^2/s) que é de $18,8 \text{ (mm}^2/\text{s)}$ para aço carbono comum como o aço AISI 1010 segundo [Bergman, 2015], e ω a largura do cordão de solda em (mm) .

Para o caso em que a transferência do calor ocorre em três dimensões 3D e que a penetração do cordão é de uma parcela da espessura do metal base, a Equação 3.10 adaptada de [AWS, apud Okada, 2001] representa a eficiência de fusão nesse caso.

$$\eta_{m3D} = \frac{1}{1,35 \cdot \left(1 + \left(1 + \frac{10,4 \cdot \alpha^2}{(v \cdot \omega)^2} \right)^{1/2} \right)} \quad (3.10)$$

As relações entre os parâmetros apresentadas pelas Equações 3.9 e 3.10 sugerem que a velocidade de soldagem governa a eficiência de fusão [AWS, 2001], relação também encontrada por [Fuerschbach e Knorovsky, 1991] na investigação da eficiência de fusão para o processo TIG. As equações ainda evidenciam que a eficiência de fusão é de no máximo 0,50 e 0,37 para extração do calor em 2D e 3D, respectivamente. Ainda, a difusividade térmica varia para cada material, materiais com maior α apresentam menor eficiência de fusão devido a condução do calor para longe da zona de fusão se dar com maior velocidade [AWS, 2001]. É importante ressaltar que α influencia a escolha da velocidade de soldagem devido à maior ou menor condutividade do calor no metal base.

A relação entre o ângulo de ataque (neutro, empurrando e puxando) e o efeito mecânico (pressão do jato de plasma e do momentum das gotas sobre a poça fundida) foi investigada por [Hirata et al., 2014]. A tocha foi inclinada em $\pm 15^\circ$ para as soldas puxando e empurrando, mas essa variação não resultou em mudanças na área da seção transversal e, também, não se verificou um efeito claro do ângulo de ataque sobre o rendimento bruto de fusão.

3.2 Diluição

O cálculo da diluição de soldagem é a relação entre a área do metal depositado que é diluído no metal base (B) e a área do metal de adição (A). A Figura 3.6 apresenta a relação entre as áreas para o cálculo da diluição, que é calculada através da Equação 3.11, segundo [AWS, 2004].

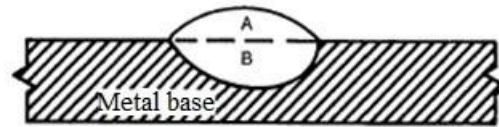


Figura 3.6 - Áreas do metal de adição e metal base para o cálculo da diluição [Adaptado de AWS, 2001].

$$\% \text{ Diluição} = \frac{B}{A + B} * 100 \quad (3.11)$$

Onde a porcentagem do metal de metal base (B) na área total da solda (A+B) representa a porcentagem de diluição do metal de adição.

3.3 Processo de soldagem MAG

Dentro dos processos de soldagem, encontra-se o MAG, do inglês “Metal Active Gas”, ou seja, com gás de proteção ativo. Nesse processo são regulados os parâmetros como velocidade de alimentação de arame W em (m/min), tensão (V), distância bico de contato peça (DBCP), ângulo de deslocamento e trabalho, etc. A curva característica da fonte é tensão constante, na soldagem de aços geralmente se utiliza corrente contínua com eletrodo positivo (CC+). O metal de adição deve ser fundido pela fonte de calor na medida em que é entregue à junta. Diferente do processo TIG, o calor recebido pelo eletrodo pode ser novamente transferido para a peça através das gotas de metal [Kou, 2003], aumentando a eficiência. Uma vista geral do processo é apresentada na Figura 3.7, adaptado de [AWS, apud Linnert, 2001].

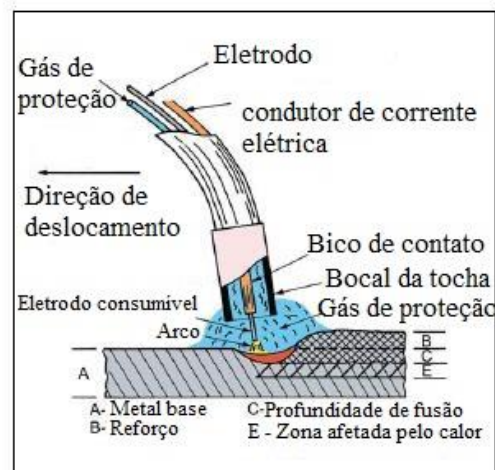


Figura 3.7 - Vista geral do processo de soldagem MAG [Adaptado de AWS, apud Linnert, 2001].

Dentro dos modos de transferência metálica possíveis, encontra-se a transferência por curto-circuito, em que ocorre o contato da gota com a poça antes do destacamento, onde a principal força governante neste modo é a tensão superficial junto ao efeito “*Pinch*” [Scotti e Ponomarev, 2008]. O modo de transferência está relacionado aos parâmetros de soldagem, dentre eles destacam-se a corrente, tensão e comprimento do arco, ainda o tipo de gás exerce alguma influência. O modo de transferência por curto-circuito ocorre geralmente quando aqueles são de pequena ordem, pois a mudança para outros modos de transferência como globular ou goticular (spray) acontece principalmente quando a energia e/ou comprimento do arco são elevados. Através dos oscilogramas de tensão e corrente é possível analisar as curvas para os parâmetros utilizados, onde de forma geral, segundo [Scotti e Ponomarev, 2008], se busca que a taxa de subida da corrente de curto-circuito seja elevada o suficiente para promover a transferência da gota, porém baixa o suficiente para diminuir a geração de salpicos.

Os trabalhos de [Schwedersky et al., 2011] e [Joseph et al., 2003] analisam a diferença na eficiência para diferentes modos de transferência metálica, dos quais, o modo por curto-circuito apresenta os maiores valores, seguido pelo modo pulsado e então o goticular “spray”. A explicação para as diferenças entre os valores de eficiência é sugerida por [Schwedersky et al., 2011], o maior valor de eficiência para o curto-circuito deve-se ao arco mais curto, que leva a menores perdas por radiação quando comparado ao modo “spray”, que ocupa uma maior área. Ainda, no modo curto-circuito o aquecimento do eletrodo é maior ao longo do arame-eletrodo por efeito Joule devido ao maior “*stickout*”, calor este que é transferido para a peça.

3.4 Projeto de experimentos Box-Behnken

Os projetos de experimentos estão baseados em conceitos estatísticos, e são destinados a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. Seu uso possibilita a estruturação da sequência de ensaios, facilitando o entendimento dos objetivos preestabelecidos pela produção do máximo de informação com um gasto mínimo de tempo e recursos.

As etapas do projeto de experimentos consistem em estabelecimento do problema (definição dos objetivos), formulação das hipóteses, planejamento do experimento (variáveis de resposta, fatores controláveis, número de níveis para cada fator, restrições experimentais, modelo estatístico, etc), execução do experimento, análise dos resultados (gráficos, tabelas e análise de significância) e otimização do processo em estudo.

Dentro do projeto de experimentos, uma terminologia apropriada é utilizada, onde quatro importantes nomenclaturas importantes são:

- Parâmetros do processo: Todas as variáveis que podem ser alteradas e que talvez tenham um efeito sobre as variáveis de resposta.
- Fatores controláveis: São os parâmetros eleitos para serem estudados em vários níveis no experimento.
- Fatores constantes: São os parâmetros do processo que não são avaliados no experimento e que são mantidos constantes.
- Fatores não controláveis (ruído): Variáveis que podem influenciar o desempenho do sistema mas não são controláveis, como temperatura ambiente e cansaço. Também são responsáveis pelo erro experimental.

A metodologia de resposta de superfície envolve uma série de técnicas orientadas à análise de experimentos planejados de modo a gerar informações suficientes para a modelagem das respostas de interesse através de superfícies n-dimensionais [Ribeiro e Caten, 2003].

O projeto de experimentos foi proposto por Box & Behnken em 1960, consiste num projeto com três níveis fatoriais incompletos, são projetos de segunda ordem, rotacionalidade ou quase rotacional, com adequação à resposta de superfície e gráfico de contorno. Esses projetos são desenvolvidos pela combinação de 2^k fatores com blocagem do projeto incompleta [Montgomery, 2013]. A Figura 3.8 representa geometricamente o projeto de experimentos Box-Behnken, cuja combinação dos fatores está demonstrada ao longo do texto, na Tabela 4.5, nota-se pela Figura 3.8 que o projeto Box-Behnken é esférico, com todos os pontos inscritos em uma esfera com raio $\sqrt{2}$, ou seja, interna ao cubo com sua superfície limitada pelos pontos médios das arestas do cubo. O ensaio se dá com 15 experimentos, dos quais 12 são combinações dos fatores pesquisados e 3 são pontos centrais, dado por $2k(k-1) + C_0$. Ainda, este projeto de experimentos não contém pontos no vértice do cubo criados pelos valores máximos e mínimos das variáveis, logo, em nenhuma situação os três fatores, por exemplo, velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem e tensão, estarão em seus limites inferiores ou superiores no mesmo experimento. Um dos três fatores sempre está em seu valor médio, evitando assim combinações de todos os níveis nos valores máximos ou nos mínimos ao mesmo tempo, que poderiam causar danos ao experimento.

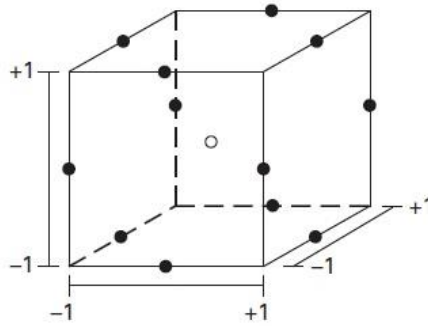


Figura 3.8 - Projeto de experimentos Box-Behnken para três fatores [Montgomery, 2012].

A repetitividade do experimento é testada através dos pontos centrais, que são a repetição do ensaio com as três variáveis em seus valores médios, em ordem aleatória por três vezes, então os valores são comparados e a confiança do experimento é determinada, condição inerente ao Box-Behnken. A aplicação do Box-Behnken na área da soldagem por fricção pode ser consultada no trabalho de [Alba, 2015].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O calorímetro utilizado neste trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) por [Sgarbi, 2013] e uma vista em corte da região de passagem da água pelo tubo é representada na Figura 4.1.

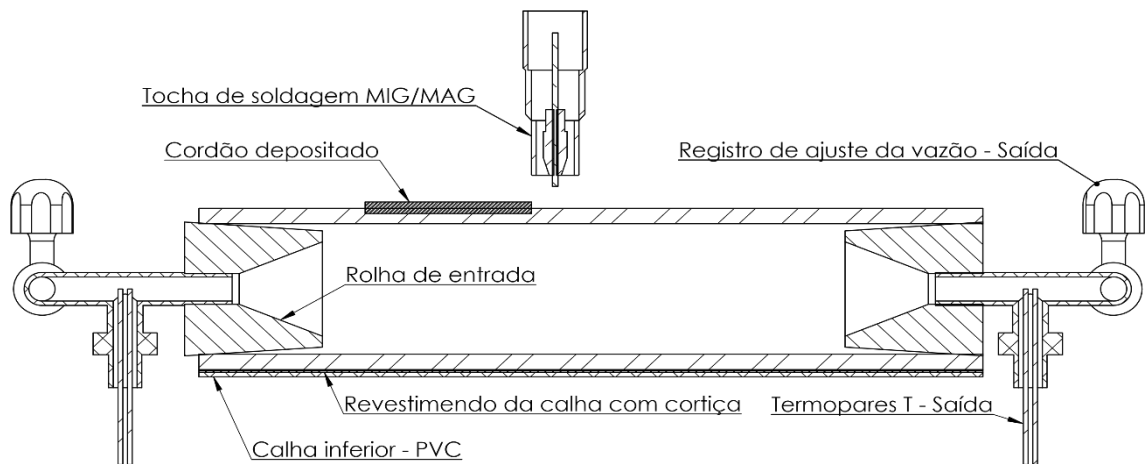


Figura 4.1 - Vista de uma seção longitudinal do calorímetro [Adaptado de Sgarbi, 2013].

O tubo de aço que forma o corpo do calorímetro contém rolhas de borracha butílica na entrada e na saída, com superfície externa cônica e orifícios que permitem a passagem da água. Tal geometria facilita a montagem do sistema e permite boa vedação e possibilidade de variação do diâmetro interno do tubo. Os tubos são isolados por calhas revestidas por cortiça, de maneira a diminuir a troca de calor com o ambiente. A calha inferior permanece fixa durante o experimento, enquanto a superior é colocada logo após o término do cordão.

A aquisição da temperatura da água é realizada por termopares tipo T acoplados nas conexões de entrada e saída do corpo do calorímetro, posicionados no centro do duto de passagem da água. São utilizados dois termopares para a saída (medida do aquecimento e resfriamento da água) e dois termopares na entrada que medem a temperatura ambiente da água. A faixa de operação dos termopares tipo T é de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, com sensibilidade de $50\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ e limite de erro de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os sinais de temperatura foram adquiridos com a frequência de 10 Hz.

Para verificar a influência do fluxo de água na eficiência térmica medida pelo calorímetro, para uma energia constante, foram propostas três variações da geometria interna das rolhas de entrada: rolha com difusor cônico (rolha cônica), cujas dimensões são mostradas na Figura 4.2(a); rolha com face de entrada reta (rolha reta), conforme Figura 4.2(b); rolha com obstáculo ao fluxo de água, cuja geometria está detalhada na Figura 4.2(d); e vista isométrica

da rolha reta na Figura 4.2(c). A rolha de saída para todos os ensaios foi a cônica, pois observou-se uma condição mais suave de afunilamento das linhas de fluxo com sua utilização, não ocorrendo choques ou turbulências na saída.

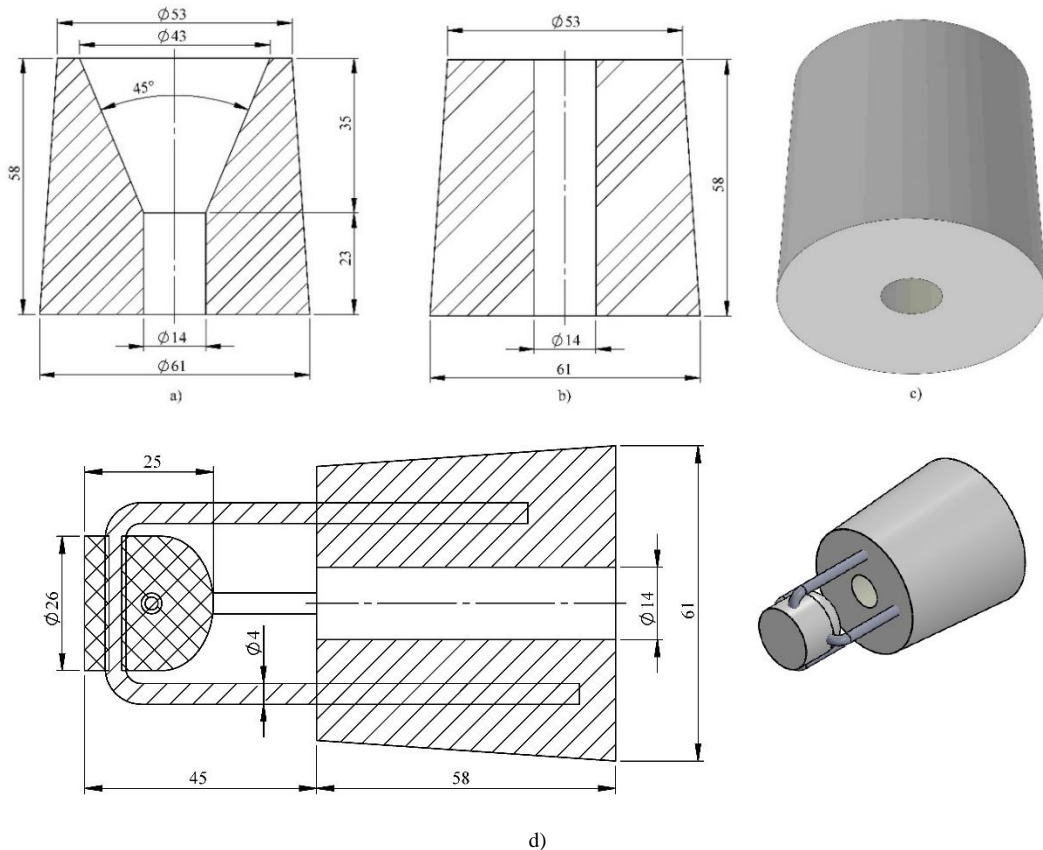


Figura 4.2 - a) Rolha com difusor cônico usinado internamente. b) Rolha reta. c) Vista isométrica. d) Rolha com obstáculo do fluxo de entrada com vista isométrica.

A avaliação criteriosa dos fenômenos envolvidos, no escopo da mecânica dos fluidos, para as três rolhas de entrada testadas, foge aos objetivos deste trabalho. Porém, de maneira superficial, observa-se que para um escoamento viscoso e incompressível em tubulação, os requisitos para avaliar fatores como perda de carga e o tipo de escoamento, laminar ou turbulento, não são satisfeitos, pois o comprimento de entrada é menor que o necessário para se estabelecer o escoamento completamente desenvolvido.

Segundo [Çengel e Boles, 2013], um difusor cônico, como o mostrado na Figura 4.2(a), é um dispositivo que aumenta a pressão de um fluido pela sua desaceleração. A velocidade do fluido na saída do difusor é menor que em sua entrada, levando ao aumento da pressão para balancear a variação na energia cinética. Os difusores pertencem ao grupo das perdas de carga menores para o escoamento de fluidos. Segundo [Fox et al., 2014], um difusor possui escoamento tipicamente turbulento, e o aumento da pressão estática na direção do escoamento

pode causar a separação do escoamento nas paredes, perdendo o contato entre o filme líquido e a superfície interna do tubo, se o projeto não for adequado.

A soldagem dos tubos foi realizada pelo processo MAG convencional (fonte em modo tensão constante) com polaridade CC+. Para a execução dos experimentos utilizou-se um sistema robotizado, composto pela fonte TransPuls Synergic 4000 R da marca Fronius e pelo robô MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics. A distância bico de contato peça (DBCP) foi de 15 mm com ângulo de deslocamento e trabalho neutros, o tempo de arco aberto foi de aproximadamente 40 segundos para os ensaios da influência da vazão no calorímetro resultando num cordão com 160 mm de comprimento e, os parâmetros de soldagem constantes, apresentados na Tabela 1. O metal de adição utilizado foi o arame AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. Para o gás de proteção usou-se a mistura Argônio + 25% de CO₂ com vazão de 15 l/min. Para os parâmetros utilizados, a transferência metálica ocorreu por curto-circuito, determinada em etapa preliminar aos ensaios descritos pela análise dos valores instantâneos de corrente e tensão coletados pelo Sistema de Aquisição Portátil SAP 4.01 (IMC Soldagem) para diversas combinações de tensão, corrente e velocidade de soldagem.

Tabela 4.1- Parâmetros de soldagem para o estudo da vazão.

W (m/min)	Média da Corrente (A)	U (V)	v (mm/s)
4,5	192	20	4

Os cordões de solda foram depositados sobre tubos de aço baixo carbono SCH 80 sem costura que atendem à norma NBR 5590 GRB com parede de 7,00 mm de espessura, 59,5 mm de diâmetro interno, 73,5 mm de diâmetro externo e 330 mm de comprimento para todas as amostras. A tensão de escoamento do material é de 332 MPa e o limite de resistência de 487 MPa, segundo o laudo fornecido pelo fabricante. O tempo de arco aberto (t_s) foi de 30 segundos para as soldas do Box-Behnken, logo, os cordões resultantes são de 120, 165 e 210 mm para as velocidades de soldagem de 4, 5,5 e 7 mm/s, respectivamente. O tempo de arco aberto é mantido o mesmo com o intuito de manter constante o tempo de transferência de calor do arco para a junta, evitando possíveis variações nos resultados devido ao não controle dessa variável.

A vazão de água foi medida na entrada do calorímetro através de um rotâmetro calibrado marca OMEL modelo 4T70903X12 para água; a incerteza de medição é de $\pm 0,5\%$ e faixa de atuação de 0 a 3,0 litros por minuto. Para os ensaios com vazões de 4 e 5 litros por minuto mediu-se a vazão pela cronometragem do tempo e coleta da água em recipiente graduado. A água utilizada nos ensaios é oriunda de um reservatório com capacidade de 150 litros, evitando a entrada de bolhas de ar e também mantendo o fluxo de água e pressão constantes no sistema.

O planejamento experimental foi realizado e avaliado através da análise de variância de um fator único fator (*ANOVA*), possibilitando a determinação da confiança do equipamento com embasamento estatístico. Dessa maneira, realizou-se três ensaios (réplicas) para cada vazão (fator único). A sequência dos experimentos foi aleatorizada para evitar variáveis do ensaio que possam causar variações nos resultados (ruídos) que sejam desconhecidos. A vazão foi variada de 0,5 a 3,0 l/min com acréscimo de 0,5 l/min para os ensaios iniciais e, após verificar-se os resultados inconsistentes, a nova faixa de vazão foi definida entre 2 e 5 l/min com incremento de 1 l/min. O planejamento do experimento para cada tipo de geometria da rolha de entrada é um planejamento com blocos completos aleatorizados, exemplificado na Tabela 4.2, com a indicação da faixa de vazões e respectivo número de réplicas sem aleatorização.

Tabela 4.2- Planejamento do ensaio com vazão (l/min) e réplicas sem aleatorização.

Réplicas	2 (l/min)	3 (l/min)	4 (l/min)	5 (l/min)
1	1	4	7	10
2	2	5	8	11
3	3	6	9	12

A Tabela 4.3 exemplifica o experimento para a rolha cônica, com a ordem de realização dos ensaios e aleatorizados. Ainda, dados como Potência, Calor gerado e tempo de soldagem para o cálculo da eficiência térmica. Para todas as vazões o número de pontos considerado para o cálculo de Q_a foi relativo ao tempo necessário para não haver diferença entre as temperaturas de entrada e saída, abrangendo todo o período de elevação e resfriamento da temperatura adquirida pelos termopares.

Tabela 4.3- Exemplo do ensaio com rolha cônica, dados adquiridos e eficiência térmica.

Sequência de ensaio	Sequência aleatorizada	Vazão (l/min)	Potência (W)	Calor gerado (kW)	Tempo de soldagem (s)	Eficiência (η_a)
1	3	2	3957	111,8	40,0	69,8
2	2	2	3963	110,3	40,0	69,6
3	4	3	3929	115,9	40,0	73,7
4	6	3	3912	114,6	39,9	73,4
5	9	4	3874	126,3	39,8	81,9
6	11	5	3892	103,4	40,0	66,4
7	12	5	3902	108,8	40,1	69,5
8	7	4	3887	122,1	40,0	78,5
9	5	3	3910	114,1	40,1	72,8
10	10	5	3912	105,7	40,1	67,4
11	1	2	3951	113,2	41,0	69,9
12	8	4	3917	127,7	40,2	81,1

Na sequência do trabalho, buscou-se avaliar a influência de três parâmetros de soldagem (velocidade de alimentação do arame, tensão e velocidade de soldagem) em três níveis cada, também é apresentado o valor da corrente média resultante relativo a cada velocidade de alimentação de arame, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4– Janela de trabalho com os limites e valor médio dos parâmetros variados durante a soldagem utilizados na matriz do Box-Behnken.

Valor Codificado	W (m/min)	Corrente Média (A)	U (V)	v (mm/s)
-1	3,5	160	18	4
0	4,5	188	20	5,5
1	5,5	215	22	7

Os ensaios foram executados segundo a ordem estabelecida na Tabela 4.5, que é o resultado da matriz gerada em programa estatístico para o planejamento de experimentos Box-Behnken, com 15 cordões para avaliar a influência dos três parâmetros em três situações; calorímetro, junta T e cordão sobre chapa. No calorímetro foi obtida a variação da temperatura para o cálculo da eficiência térmica do arco, além das macrografias e medida da massa antes e depois da soldagem, estas comum aos três ensaios.

Na Tabela 4.5 também é apresentada a sequência de soldagem aleatorizada, para evitar erros (ruídos) externos ou desconhecidos que possam influenciar os resultados do experimento. Os ruídos são fatores não controláveis, como variação da temperatura ambiente, cansaço, etc.

Tabela 4.5– Matriz de ensaio gerada pelo planejamento de experimentos Box-Behnken.

Sequência de soldagem	Sequência aleatorizada	W (m/min)	U (V)	v (mm/s)	W (m/min)	U (V)	v (mm/s)
1	14	0	0	0	4,5	20	5,5
2	5	-1	0	-1	3,5	20	4
3	12	0	1	1	4,5	22	7
4	15	0	0	0	4,5	20	5,5
5	7	-1	0	1	3,5	20	7
6	4	1	1	0	5,5	22	5,5
7	10	0	1	-1	4,5	22	4
8	1	-1	-1	0	3,5	18	5,5
9	11	0	-1	1	4,5	18	7
10	2	1	-1	0	5,5	18	5,5
11	3	-1	1	0	3,5	22	5,5
12	13	0	0	0	4,5	20	5,5
13	8	1	0	1	5,5	20	7
14	6	1	0	-1	5,5	20	4
15	9	0	-1	-1	4,5	18	4

As soldas da junta T foram realizadas na sequência apresentada na Tabela 4.5, com tempo de espera suficiente para a junta resfriar e atingir a temperatura ambiente. Os cordões são da corrida 1 a 8 num lado da junta, após de 9 a 15 no lado inverso, então os pares resultantes são 1 e 9, 2 e 10, 3 e 11, etc. O ângulo de deslocamento da tocha é neutro, e o de trabalho de 45°. A base das juntas é apoiada em seus extremos em dois refratários, com o intuito de permanecer a camada de ar na superfície inferior da chapa e não trocar calor por condução com a aba de apoio.

Os modelos para o cálculo da eficiência de fusão na literatura consultada para este trabalho, relativos à extração do calor, são para duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D). Sendo assim, é considerada como 2D a extração de calor das soldas realizadas no calorímetro e cordão sobre chapa, e como 3D para a junta T. Esta simplificação é devida à nenhuma das juntas ter apresentado penetração completa.

Foram realizadas três medidas de cada resultado obtido pela macrografia em programa computacional, conforme (APÊNDICE A), após as amostras serem preparadas em lixas de granulometria crescente de 80 a 600 “*mesh*” e então atacadas com Nital 10% para a observação da seção transversal do cordão em lupa digital. Após as medições, o cálculo do desvio padrão amostral foi realizado para testar a repetitividade e confiança das medidas, como penetração, área fundida do metal base, área fundida total, largura e reforço, no (APÊNDICE B) é apresentado o cálculo do desvio padrão para as macrografias. O desvio padrão é calculado com base em uma amostra, é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio (a média), calculado pela Equação 4.1 [Montgomery, 2013].

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.1)$$

Onde o valor da amostra é x_i , a média das amostras é \bar{x} , e o número de amostras é n .

O material utilizado para as chapas foi aço carbono comum 1010 com espessura de 6,35 mm. As chapas para as soldas tipo cordão sobre chapa e para a alma da junta T têm comprimento de 250 x 150 mm de largura, enquanto as chapas utilizadas na aba da junta T possuem comprimento de 250 x 300 mm de largura. A largura das chapas têm como objetivo permitir o fluxo de calor livremente durante a soldagem, não oferecendo obstáculos para a expansão das isothermas devido à relação entre a largura do cordão e a largura do metal base. As chapas utilizadas na aba da junta T possuem exatamente o dobro da largura da alma, assim proporcionando as mesmas condições para o fluxo do calor.

Os tubos utilizados nas soldas do projeto de experimentos foram usinados externamente para que a espessura seja igual à das chapas, também com o intuito de oferecer as mesmas condições para a condução do calor. A Figura 4.3(a); apresenta uma vista geral do experimento, com caixa d' água, rotâmetro, calorímetro, tubo com calha e robô. O tubo com exemplo dos cordões 11, 12 e 13 é apresentado na Figura4.3(b).



Figura 4.3 - a) Vista do experimento com o calorímetro. b) Exemplos dos cordões soldados nos tubos.

Para as soldas cordão sobre chapa é realizado um cordão de solda em cada chapa, evitando assim que as isotermas de um cordão interfiram no outro, caso houvesse mais de uma solda por chapa. Foi utilizado um refratário como base para o metal base, montagem esta comum a todas as soldas cordão sobre chapa e junta T, conforme mostra a Figura 4.4(a). O sistema de aquisição de temperatura com o programa de aquisição, e o SAP são demonstrados na Figura 4.4(b).

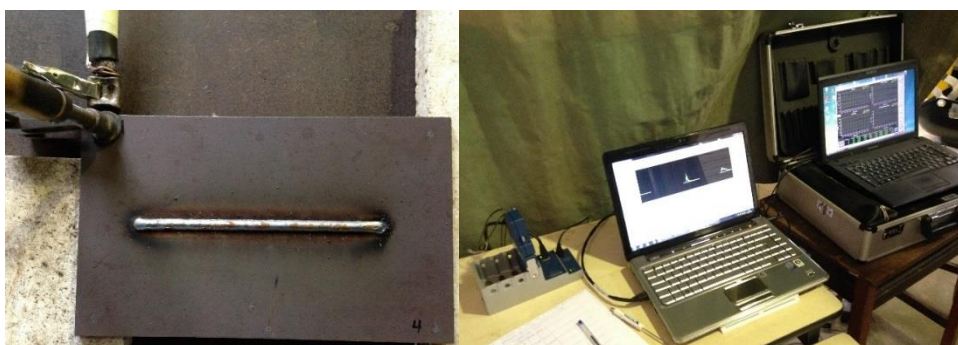


Figura 4.4 – a) exemplo de cordão sobre chapa com refratário na base. b) sistema de aquisição de temperatura (esquerda) e tensão e corrente (direita).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação da geometria de entrada e vazão no calorímetro

Inicialmente, buscou-se avaliar se diferentes vazões de água no calorímetro resultariam em alteração na variação de temperaturas medida pelos termopares e conseqüentemente na eficiência térmica. Como ponto de partida, seguiu-se a metodologia proposta por [Nasiri et al., 2014] que indica a relação mínima de $80 \text{ J}\cdot\text{h}^{-1}$ entre a potência do arco e a vazão de água. Observando essa proporção para os parâmetros de soldagem descritos anteriormente, obtém-se a vazão mínima recomendada de $0,6 \text{ l/min}$. Para verificar a adequação deste valor, foram feitos experimentos a partir da vazão de $0,5 \text{ l/min}$ com incrementos da mesma ordem até atingir o valor de 3 l/min . Os valores de eficiência térmica resultantes são mostrados na Figura 5.1.

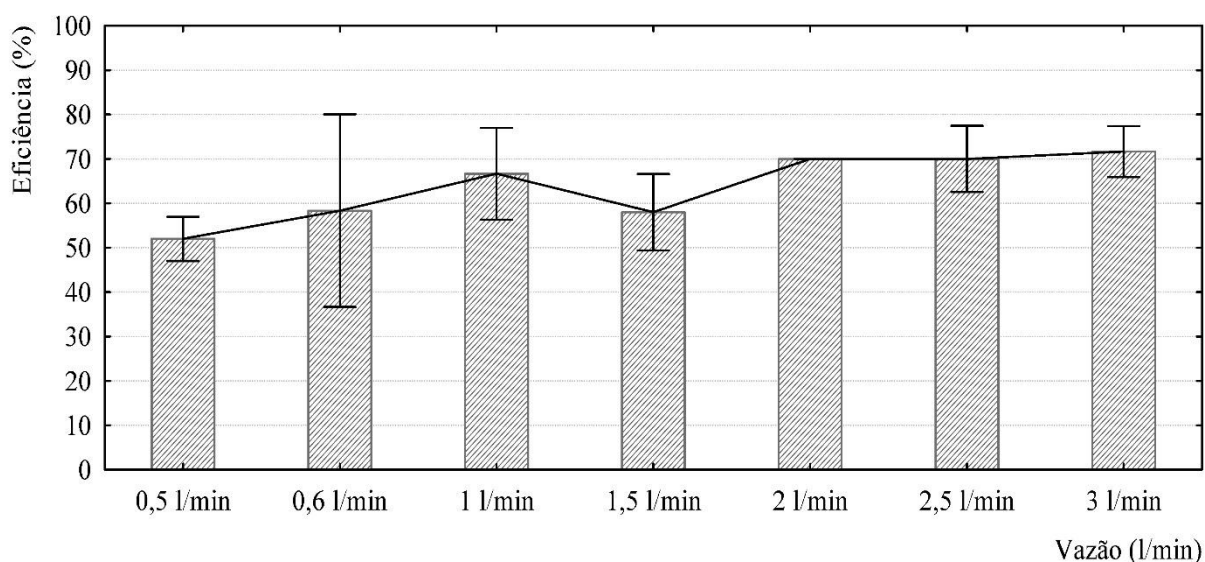


Figura 5.1 - Ensaio inicial com baixas vazões, rolha cônica.

Os resultados mostram valores de eficiência térmica inferiores àqueles encontrados na literatura para o processo MAG, particularmente para vazões inferiores a 2 l/min . Os ensaios foram aleatórios para a mesma potência, resultando valores de rendimento térmico sem repetitividade e com elevada dispersão (variabilidade). Uma possibilidade para a discrepância entre o valor da vazão sugerida por [Nasiri et al., 2014] e o comportamento observado nestes experimentos está relacionada à geometria e/ou dimensões do calorímetro. Enquanto que no presente trabalho os cordões de solda foram depositados sobre tubos circulares, [Nasiri et al., 2014] utilizou um calorímetro tipo caixa, analisando a eficiência para o processo TIG. Mesmo considerando os diferentes processos de soldagem como MAG e TIG, fisicamente a água

aquecida pelo calor do arco elétrico que então é medida pelos termopares não distingue a fonte do calor, sugerindo a hipótese de que para cada geometria de calorímetro, tipo de conexões, estanqueidade e montagem existe determinada vazão de água que é mais adequada para medir o calor imposto pelo arco elétrico. Então, ampliou-se a faixa de vazões estudada de 2 a 5 l/min com incremento de 1 l/min e testou-se as demais rolhas.

Para visualizar o efeito da variação da vazão para cada um dos três tipos de rolhas de entrada, o tubo de aço foi substituído por um tubo de acrílico incolor de dimensões semelhantes, no qual foi injetado corante (azul de metileno) para facilitar a visualização das linhas de fluxo e possibilitar a análise do escoamento em cada situação.

As linhas de fluxo com os respectivos gráficos da aquisição de temperaturas são apresentadas nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, juntamente com os valores de calor aportado (Q_a), potência medida (P) e eficiência térmica (η_a) resultantes, para cada tipo de rolha utilizada. A aquisição de temperatura pelos termopares durante o processo de soldagem dos tubos gerou os gráficos que estão ao lado das imagens do fluxo, nos quais, a área abaixo da curva determina o calor aportado pelo arco. Os gráficos mostrados nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são aqueles mais próximos do valor médio observado pelas três repetições.

As imagens da 5.2 mostram os escoamentos resultantes utilizando a rolha de entrada com obstáculo, com 20 mm de separação entre a saída de água e o início do domo. Este obstáculo foi utilizado para perturbar o fluxo de água no tubo e induzir vórtices, para causar turbulência generalizada, criando linhas de corrente com comportamento aleatório para a retirada do calor na parede e centro do tubo de forma homogênea. A análise dos valores para cada vazão evidencia os baixos valores e a grande variação das eficiências térmicas resultantes. Além disso, a comparação entre os três experimentos realizados para cada vazão demonstrou baixa repetitividade e, logo, grande erro associado. Ainda, pode-se observar a alternância dos valores de eficiência, ocorrendo um decaimento em 4 l/min e posterior aumento em 5 l/min, resultados estes que contrariam os obtidos para os outros dois tipos de rolhas de entrada testadas. Observando as linhas de fluxo é possível notar que, para todas as vazões estudadas, a introdução do obstáculo não foi efetiva para gerar turbulência que produzisse escoamento e extração de calor uniformes ao longo do tubo.

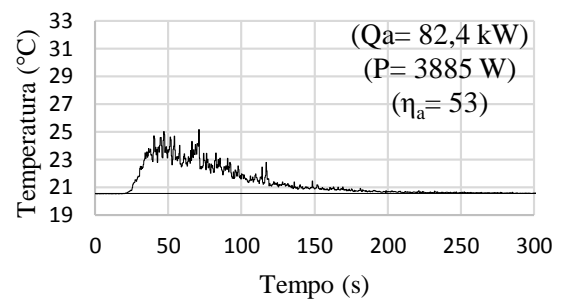
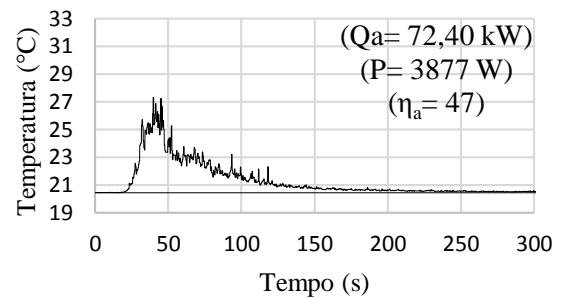
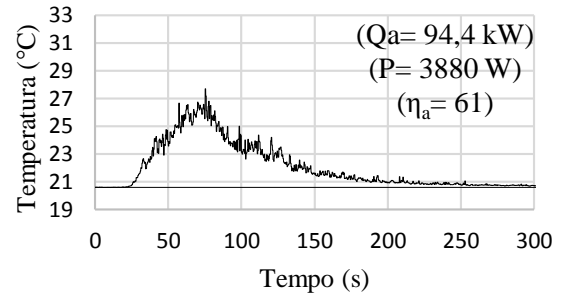
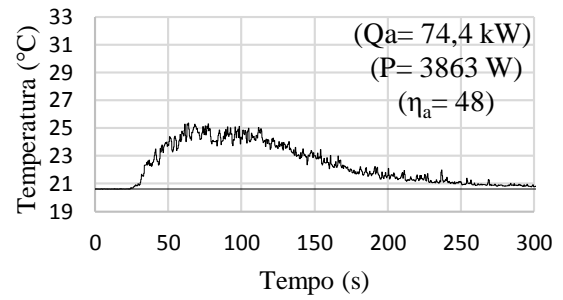
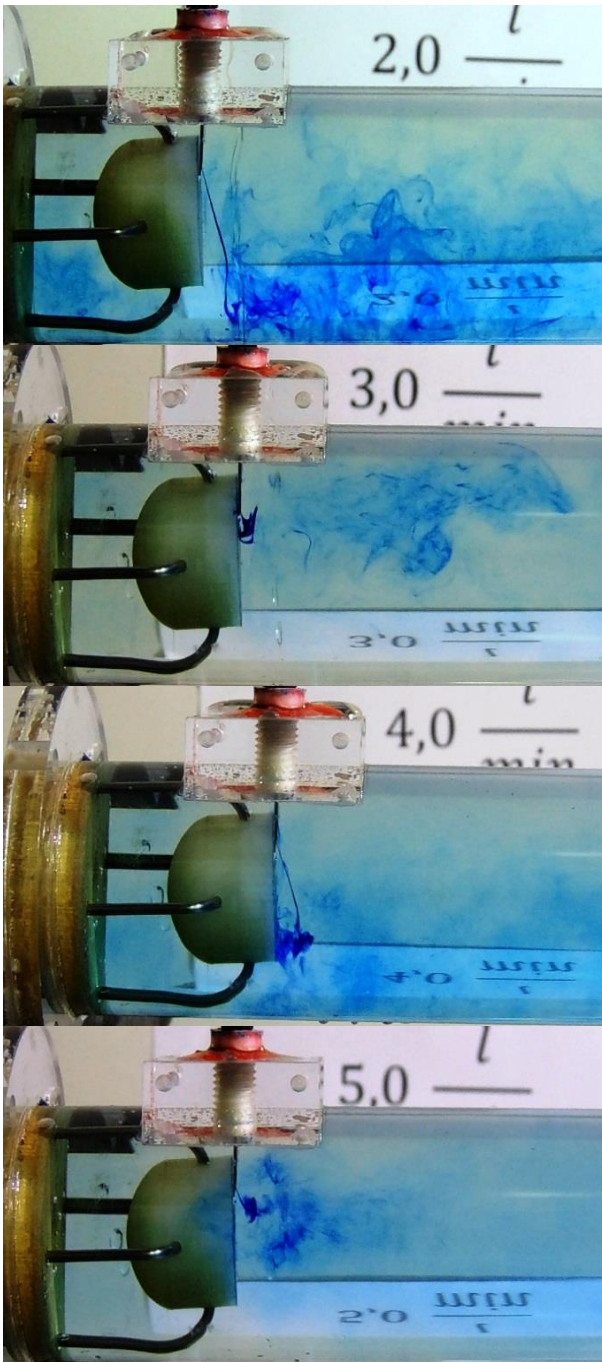


Figura 5.2 - Linhas de fluxo do escoamento da água para a rolha com obstáculo e vazões de 2 a 5 l/min.

A Figura 5.3 apresenta o resultado dos experimentos realizados com a rolha reta, que foi a configuração inicial proposta quando no projeto original do calorímetro. Neste caso, pode-se observar valores de eficiência térmica compatíveis com o processo de soldagem MAG. A análise do escoamento mostra que o fluxo se distribui uniformemente ao longo do tubo, logo após o ponto de injeção do corante.

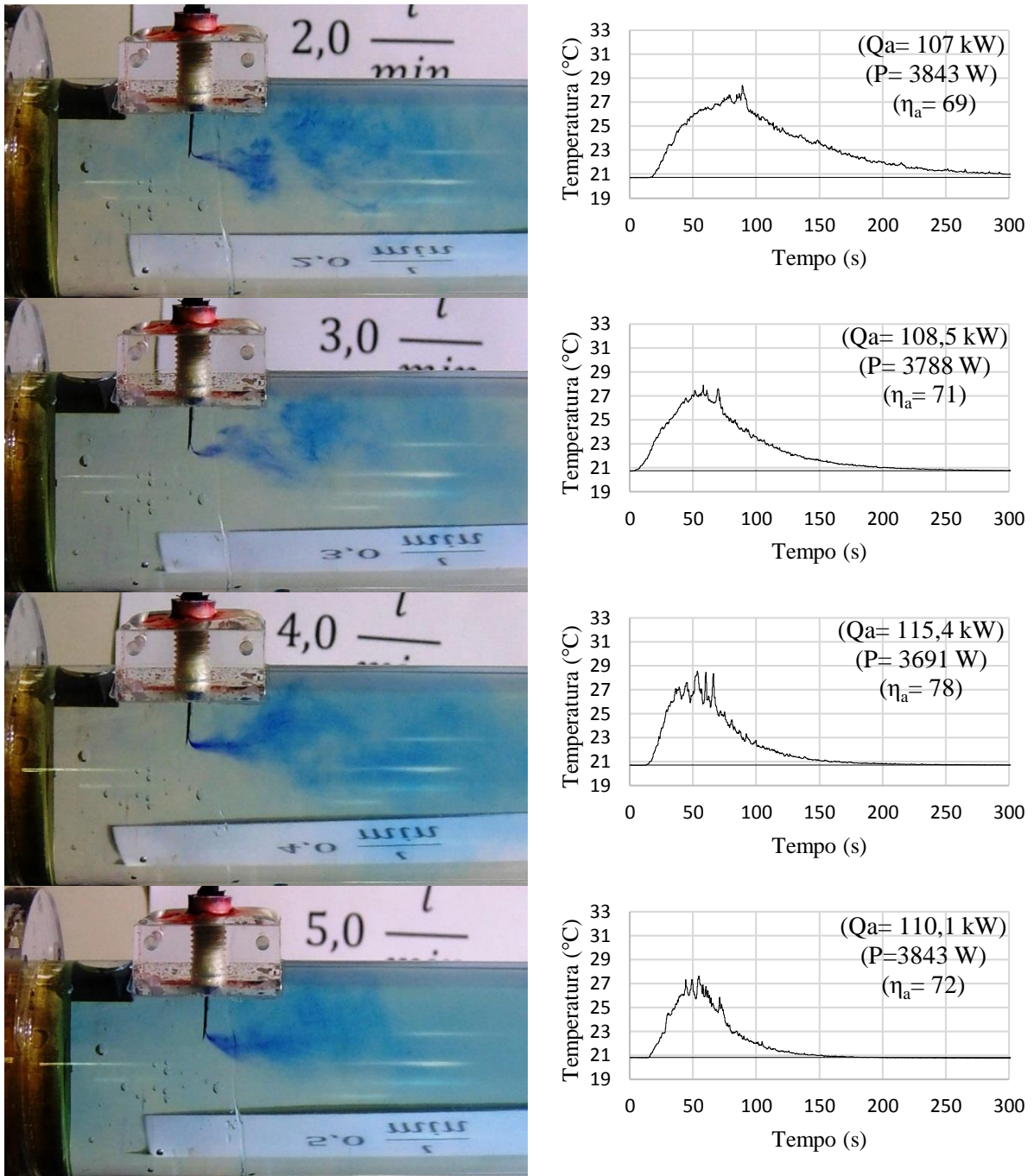


Figura 5.3 - Linhas de fluxo do escoamento da água para a rolha reta e vazões de 2 a 5 l/min.

A Figura 5.4 apresenta os resultados dos ensaios em que foi utilizada a rolha cônica. Os valores de eficiência térmica seguem a mesma tendência de aumento até a vazão de 4 l/min, caindo para a vazão de 5 l/min. Nesta situação os resultados numéricos são os mais próximos das eficiências térmicas para o processo MAG indicados na literatura, com baixo valor de desvio padrão. Com a vazão de 4 l/min se obteve o valor médio de 80,5% para a eficiência, sem diferenças sensíveis na geometria do cordão de solda, como penetração ou área fundida.

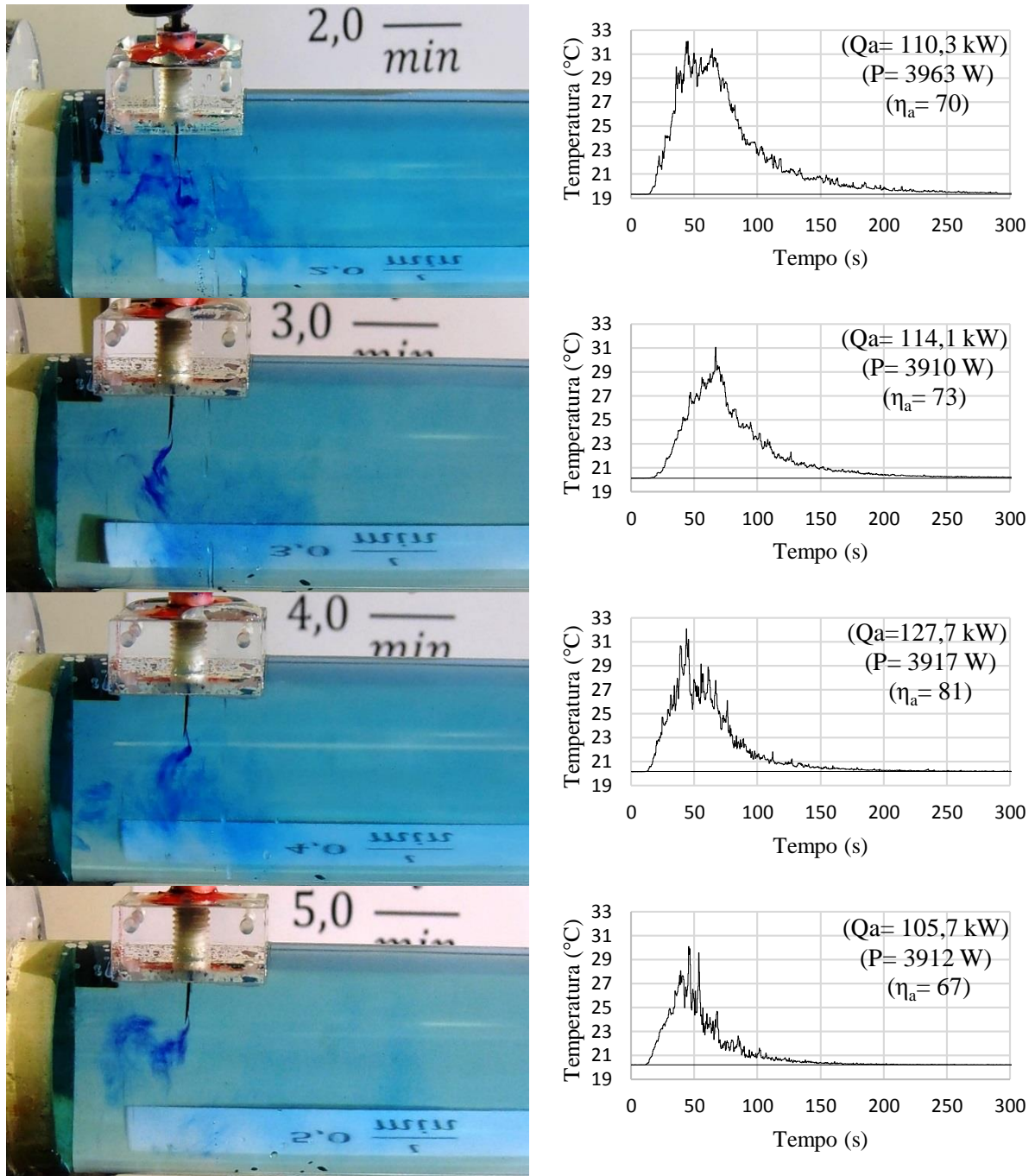


Figura 5.4 - Linhas de fluxo do escoamento da água para rolha cônica e vazões de 2 a 5 l/min.

Além das consequências da perda de carga devido ao difusor cônico, o aumento da pressão e diminuição da velocidade contribuem para o escoamento absorver o calor da parede do tubo de forma homogênea, efetiva e com menor dispersão dos resultados, quando comparada com as geometrias das outras rolhas. Tal constatação pode ser observada visualmente através das imagens do fluxo e dos gráficos de temperatura. Pode-se notar que a utilização da rolha cônica antecipa a região de escoamento uniforme para as vazões de até 4 l/min, sendo que a partir desse valor o aumento da vazão cria uma região de vorticidade que inverte o fluxo na

entrada do calorímetro, reduzindo sensivelmente a eficiência térmica medida. Figura 5.5 é apresentado um gráfico comparativo dos resultados de eficiência térmica medida em todos os experimentos. Os valores de eficiência com o uso da rolha com difusor cônico na entrada do calorímetro apresentaram os resultados mais elevados com vazão de 4 l/min sendo a média de 80,5% e, principalmente com baixa dispersão e erro estatístico.

Os resultados obtidos para a rolha reta também indicam repetitividade dos experimentos, com baixo erro estatístico. Os valores médios de eficiência térmica medidos foram ligeiramente inferiores àqueles apresentados pela rolha cônica, ainda assim, seguiram o mesmo padrão de comportamento para a relação entre eficiência térmica e vazão.

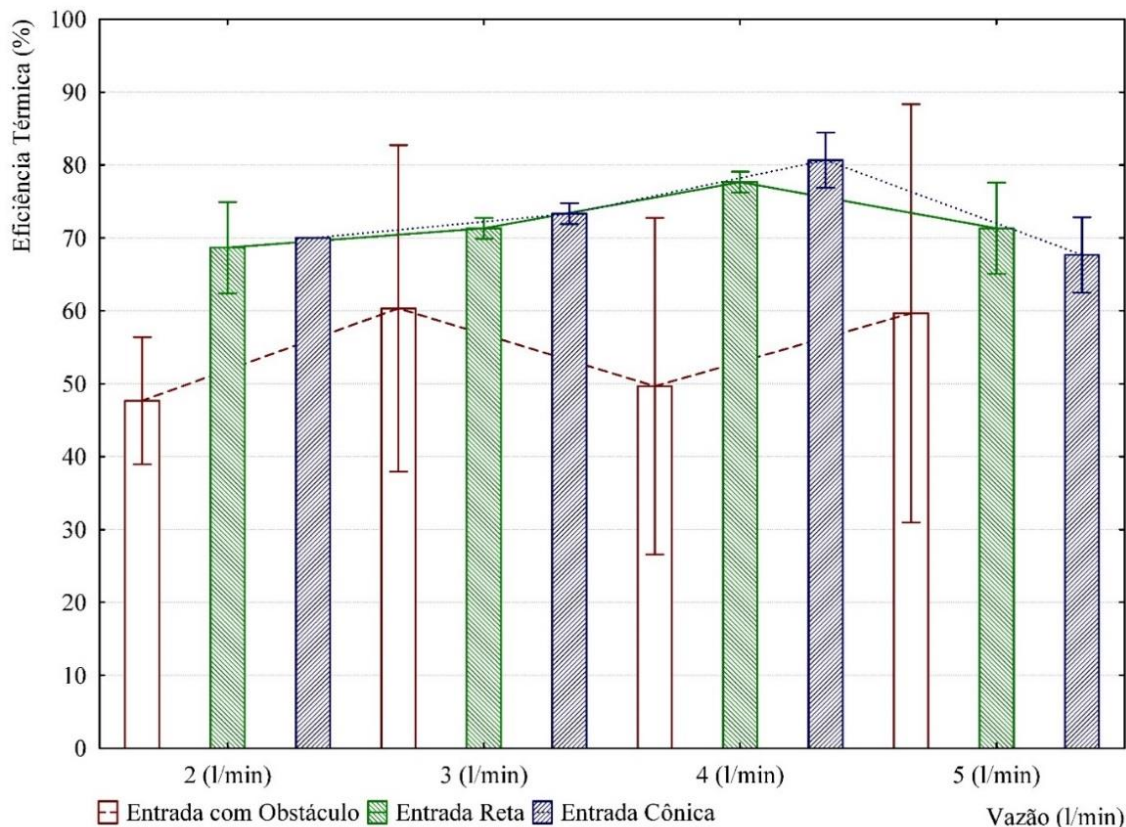


Figura 5.5 - Eficiência térmica versus Vazão, para as diferentes vazões e rolhas de entrada.

O uso da rolha com obstáculo produziu elevada dispersão, não permitindo estabelecer qualquer tendência de comportamento na relação vazão versus rendimento térmico. Na Tabela 5.1 são mostrados os valores dos parâmetros estatísticos da ANOVA para os três tipos de experimentos: teste F (média quadrática dos tratamentos dividida pela média quadrática dos erros), e nível de significância, p-valor. A comparação entre os valores calculados com os dados experimentais e aqueles tabelados mostra que há diferença significativa na eficiência térmica

medida com a alteração da vazão de água quando as rolhas cônica e reta são utilizadas, o que não acontece quando a rolha com obstáculo é usada.

Tabela 5.1- Comparação estatística Eficiência versus Vazão.

Tipo de rolha de entrada	F calculado		F tabelado	p calculado		p tabelado	Significância
Com obstáculo	1,67	<	4,07	0,2500	>	0,05	Não significativo
Reta	13,16	>	4,07	0,0018	<	0,05	Significativo
Cônica	55,03	>	4,07	0,00001	<	0,05	Significativo

O valor de eficiência térmica encontrado por [Dupont e Marder, 1995] para o processo MAG através de um calorímetro tipo Seebeck foi de $\eta_a = 0,84 \pm 0,04$. O material de base também foi aço de baixo carbono, porém, com espessura de 25 mm e diferente geometria, material de adição e tempo de arco aberto.

Os resultados foram próximos dos obtidos por [Arevalo e Vilarinho, 2012], em que foram encontrados valores de 78,6% para o processo MAG curto circuito convencional com calorímetro de nitrogênio líquido, e valores de 70,5% e 72,5% para o calorímetro de fluxo contínuo de água com vazão de 2,3 l/min, os quais são próximos dos valores encontrados por este trabalho para 2,5 l/min, Figura 3.4, com média de 70,15% para o uso da rolha cônica na entrada.

No trabalho de [Bosworth, 1991] para a investigação do calor imposto efetivo no processo MAG, o autor encontrou valores de eficiência acima daqueles obtidos nesse trabalho quando comparados velocidade de alimentação de arame, tensão, gás e velocidade de soldagem, porém, utilizando material base com maior espessura. O valor de eficiência foi de 94% para a potência do arco de 2,1 kW que é a mais próxima da média medida de 1 kW deste trabalho. Para 5,4, 6,76 e 8,86 kW [Bosworth, 1991] encontrou 85, 86 e 83% de eficiência, respectivamente. Como calorímetro, o autor utilizou um recipiente com água no qual a peça é imersa após a soldagem e então é monitorado o aumento da temperatura com termopares tipo K. A diferença entre os valores encontrados nos trabalhos pode estar na metodologia do cálculo para eficiência de [Bosworth, 1991], que usou a lei de Newton do resfriamento para calcular o calor recebido pela peça e, principalmente, na incerteza de $\pm 5\%$ para a eficiência devido ao tempo de transferência da peça soldada para o calorímetro. Ainda, a potência do arco elétrico foi calculada como a média aritmética da tensão e corrente, diferente da média da potência instantânea deste trabalho, método aconselhado por [Nascimento et al., 2007].

No estudo de [Lu e Kou, 1989] sobre a potência que incide na soldagem de alumínio pelo processo MAG, os valores encontrados estão de acordo com os obtidos nesse trabalho. Os valores de eficiência térmica encontrados foram de 80 % em geral para potências de até 7 kW, ainda os autores atribuíram o valor global como sendo composto por três partes individuais, das quais, 45% para radiação/convecção, 23% para as gotas do metal de adição e 12 % para o aquecimento do cátodo. Os valores individuais não foram verificados neste trabalho, no entanto, os fenômenos de transferência de calor estão de acordo com o previsto na literatura. É importante ressaltar que [Lu e Kou, 1989] utilizou alumínio como metal base com variação da espessura relativa à energia do arco elétrico, e em consequência ao modo de transferência metálica globular, mista e goticular (aerossol).

Os valores de eficiência encontrados por [Joseph et al., 2003], estiveram na faixa de 69 a 72% para o processo MAG em tensão constante. O calor foi medido através de um calorímetro de nitrogênio líquido, e o metal base das amostras foi aço baixo carbono com 12,7 mm de espessura, 6,35 mm de largura e 152 mm de comprimento. Foi considerada a P_{inst} para a obtenção da potência média. Pode-se explicar a diferença nos valores de eficiência devido ao tempo necessário para inserir a peça soldada no recipiente com nitrogênio, após a soldagem (1 – 3 segundos), quando perde calor para o ambiente e, ainda devido a pequena largura do corpo de prova, que pode levar à contenção do calor aportado e aumentar as perdas por radiação e convecção quando comparadas ao processo natural de resfriamento.

5.2 Eficiência do arco e de fusão pelo projeto de experimentos Box-Behnken

Na sequência do trabalho, avaliou-se a eficiência de fusão e eficiência térmica do arco elétrico para o calorímetro em soldas cordão sobre chapa e junta T através da matriz de ensaio gerada pelo projeto de experimentos Box-Behnken para a avaliação da corrente, tensão e velocidade de soldagem dentro da faixa de parâmetros pré-estabelecida. A média das medições de corrente, tensão e potência obtidas para as três soldas são apresentadas na Tabela 5.2, com os respectivos desvios padrões para cada caso.

Tabela 5.2– Médias das três medições de Potência, Corrente e Tensão realizadas durante a soldagem no Calorímetro, Cordão sobre chapa e Junta T com o respectivo desvio padrão.

Corrida	Média da Potência (W)	Desvio Padrão (W)	Média da Corrente (A)	Desvio Padrão (A)	Média da Tensão (V)	Desvio Padrão (V)
1	3873	115,08	190,33	5,51	20,77	0,06
2	3214	50,82	170,00	16,52	20,53	0,06
3	4119	246,68	189,67	1,15	22,07	1,18
4	3824	33,29	188,67	1,15	20,70	0,00
5	3164	33,15	157,33	1,53	20,53	0,06
6	4866	58,90	215,33	1,53	22,93	0,06
7	4226	44,55	188,67	1,53	22,73	0,06
8	2801	94,78	156,00	5,00	18,40	0,00
9	3362	31,80	185,67	1,15	18,60	0,00
10	3890	15,72	214,67	2,08	18,67	0,06
11	3504	93,84	157,33	3,79	22,60	0,00
12	3780	43,92	186,67	2,52	20,67	0,06
13	4365	62,50	213,67	2,08	20,87	0,06
14	4376	97,44	214,67	3,51	20,83	0,06
15	3362	47,86	187,00	1,00	18,57	0,06

Observa-se na Tabela 5.2 que o desvio padrão não é elevado, principalmente para a tensão e corrente que são valores obtidos diretamente pelo SAP durante a soldagem, demonstrando a boa repetitividade do ensaio. O desvio padrão para a potência pode ser atribuído ao tempo escolhido para o seu cálculo, que foi em 15 s, ou seja, metade do tempo de soldagem quando o arco está estável para todos os cordões que seguem o Box-Behnken. No entanto, essas diferenças não produzem efeito considerável no cálculo da eficiência térmica do arco elétrico. Os valores médios de potência, corrente e tensão para cada junta são apresentados no (APÊNDICE C).

A massa adicionada pelo metal de adição foi pesada antes e depois da realização do cordão para os três casos para avaliar a influência dos três parâmetros variados (corrente, tensão e velocidade de soldagem) na taxa de fusão do eletrodo. Os resultados são apresentados na Tabela 5.3. Para os cordões sobre chapa e calorímetro, a diferença é de poucas gramas em todos os casos, a diferença pronunciada para a junta T, nos cordões 1, 9, 11 e 15 pode ser atribuída à sensibilidade da balança digital utilizada para a junta T, que é de 5 milésimos de grama na terceira casa, já a balança digital utilizada nos tubos do calorímetro e cordão sobre chapa mede com sensibilidade de 1 milésimo de grama na terceira casa, porém a massa das juntas T excede o seu limite de trabalho, por isso o uso de balanças diferentes.

Tabela 5.3– Variação da massa antes e após a soldagem para os casos com o Box-Behnken.

Corrida	Cordão sobre chapa			Calorímetro			Junta T		
	Massa sem cordão (g)	Massa com cordão (g)	Δ Massa (g)	Massa sem cordão (g)	Massa com cordão (g)	Δ Massa (g)	Massa sem cordão (g)	Massa com cordão (g)	Δ Massa (g)
1	1836	1855	19	3822	3840	18	5695	5720	25
2	1874	1889	15	3840	3855	16	5720	5735	15
3	1838	1856	19	3855	3874	19	5770	5790	20
4	1835	1854	19	3874	3894	19	5610	5630	20
5	1871	1886	15	3894	3908	14	5655	5670	15
6	1879	1902	23	3908	3930	22	5740	5760	20
7	1878	1897	19	3930	3948	18	5740	5755	15
8	1880	1895	15	3948	4069	14	5765	5780	15
9	1845	1864	19	4069	3932	18	5695	5730	10
10	1916	1940	24	3932	3956	24	5720	5760	25
11	1874	1888	15	3956	3971	15	5770	5800	10
12	1845	1864	19	3971	3991	21	5610	5650	20
13	1836	1858	23	3991	4012	21	5655	5690	20
14	1855	1878	23	4012	4035	23	5740	5785	25
15	1850	1869	19	4035	4055	20	5740	5780	25

A comparação entre os valores medidos para a variação da massa de metal adicionado em cada tipo de junta, com os mesmos parâmetros de soldagem, pode ser observada na Figura 5.6. O parâmetro de forte influência na massa adicionada é a corrente de soldagem como pode ser observado o comportamento na Figura 5.6, a qual representa a média das três medidas da corrente.

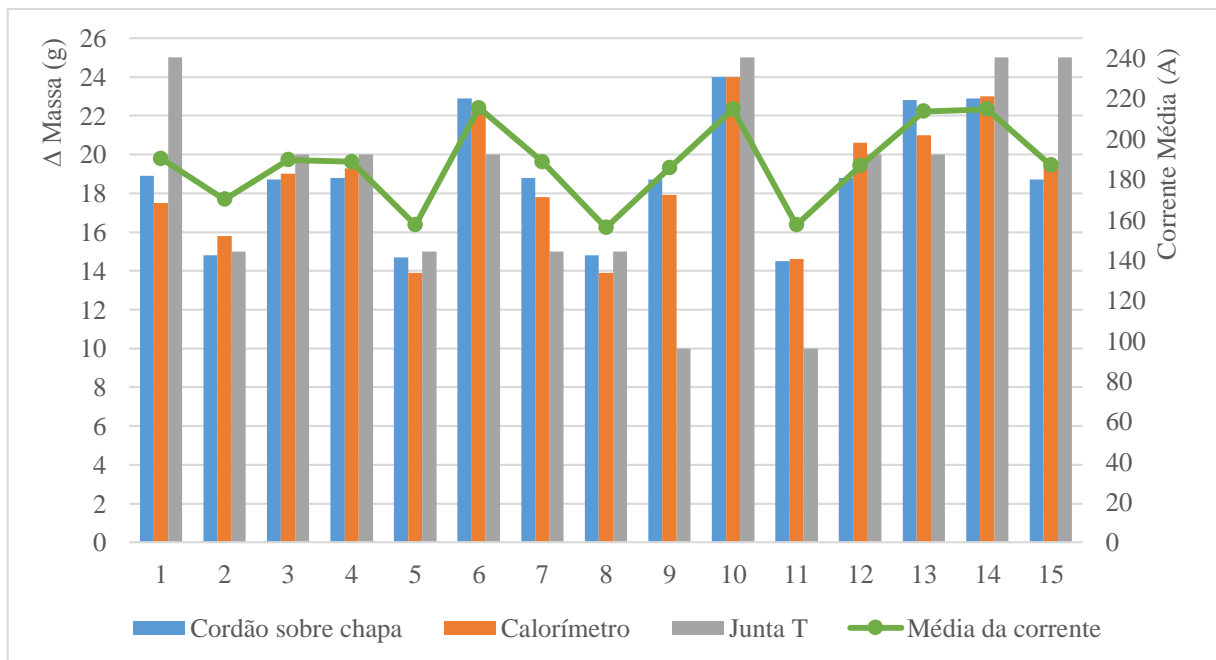


Figura 5.6 - Gráfico com a comparação da massa depositada entre os três ensaios.

As medidas realizadas através da macrografia dos tubos do calorímetro são apresentadas na Tabela 5.4. As macrografias das soldas para os três casos podem ser consultadas através do (APÊNDICE A).

Tabela 5.4– Média das medições das macrografias do calorímetro.

Corrida	E (J/mm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Diluição (%)	Área Fundida (mm ²)	Área total (mm ²)
1	713	2,4	2,6	8,9	42	11,2	26,3
2	797	2,4	2,7	8,6	35	8,6	24,8
3	606	2,2	2,3	8,6	44	9,2	20,8
4	692	2,4	2,6	8,5	41	10,4	25,1
5	453	1,9	2,0	7,1	42	6,5	15,5
6	878	2,8	2,7	9,8	45	14,0	31,4
7	1056	2,7	3,1	10,5	38	13,5	35,3
8	528	2,2	2,4	7,0	39	7,0	18,7
9	485	2,1	2,4	7,3	40	7,6	19,0
10	709	2,6	3,3	8,6	36	10,7	29,8
11	651	2,1	2,2	8,7	43	8,9	20,4
12	696	2,5	2,6	8,5	42	10,8	25,4
13	624	2,5	2,6	8,4	42	10,1	24,2
14	1097	3,0	3,4	10,7	35	14,2	40,4
15	849	2,6	3,3	9,0	34	10,7	31,7

A avaliação dos valores medidos na macrografia das amostras do calorímetro são apresentadas na Figura 5.7, os valores no eixo das ordenadas são da velocidade de alimentação do arame ou tensão, e no eixo das abscissas está a velocidade de soldagem e, como variáveis para a avaliação do comportamento estão: diluição, área fundida e largura. Algumas relações não são apresentadas pois seguem comportamento semelhante às demais combinações. O parâmetro que não é representado pelo gráfico é mantido em seu valor central em todos os gráficos de contorno, por exemplo, quando é plotado a velocidade de alimentação do eletrodo (m/min) versus velocidade de soldagem (mm/s), para avaliar a diluição, conforme Figura 5.7(a). A tensão (U) é mantida em 20 volts, que é o valor central do projeto de experimentos Box-Behnken para este parâmetro. O valor central para a velocidade de soldagem é de 5,5 mm/s, e a velocidade de alimentação do eletrodo média é de 4,5 m/min.

O coeficiente de determinação R^2 , que é a medida do ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, ou seja, representa como os fatores gerados pela ANOVA se ajustam aos valores observados, ficaram acima de 0,90 para todos os gráficos de contorno do trabalho, demonstrando baixo erro e boa confiança do modelo. Os gráficos de contorno para as três juntas objetivam analisar o comportamento físico, ou seja, a influência dos parâmetros variados em

determinado fenômeno. Assim, não são considerados os valores de (p-valor e F) para análise da significância linear, quadrática e de interação, pois não é apresentada a equação de regressão, a escala dos gráficos está dentro dos valores estudados e não foram avaliadas regiões que levam à maximização ou minimização de algum dos resultados neste trabalho.

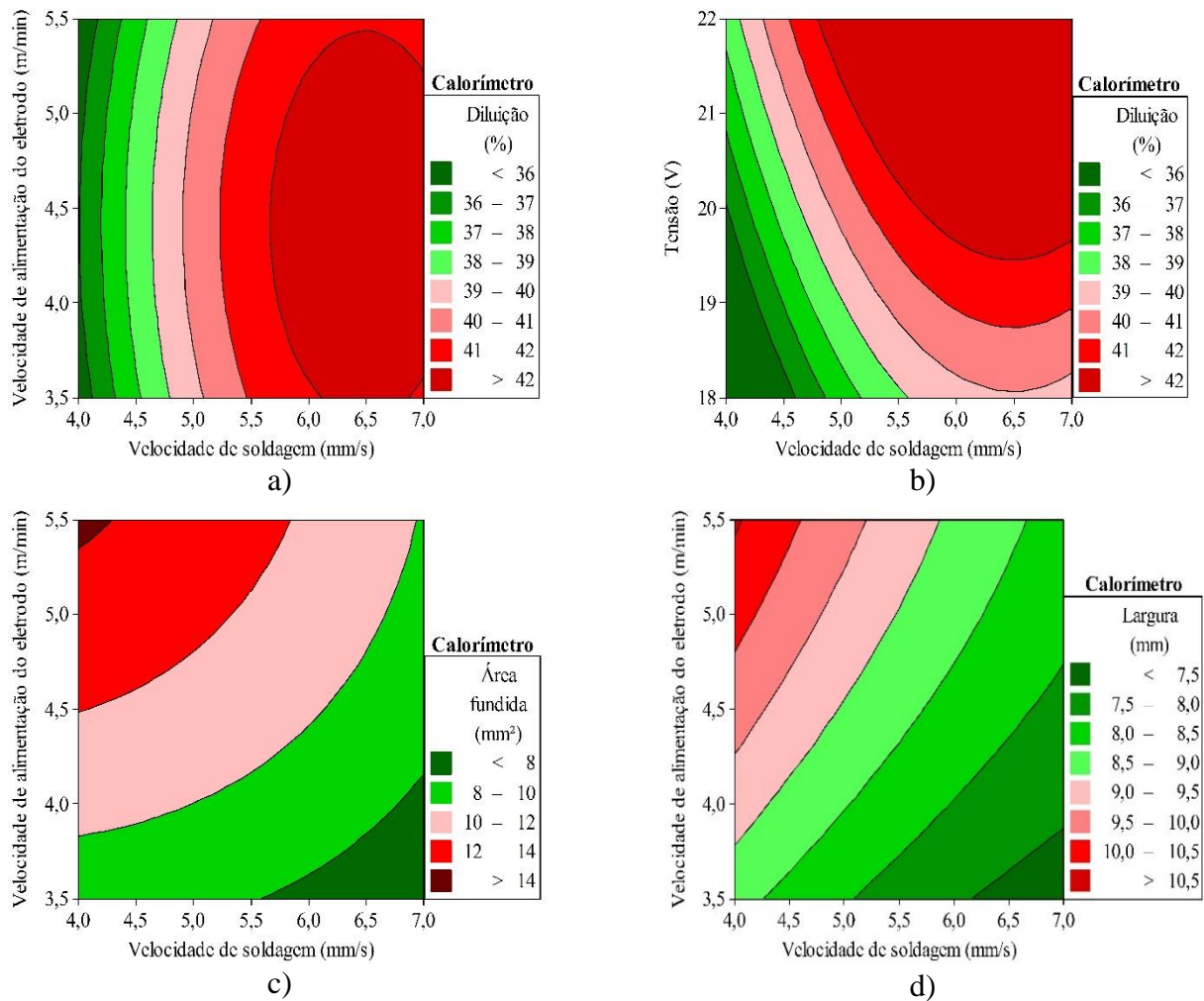


Figura 5.7 - Gráficos de contorno para o calorímetro com os resultados de velocidade de alimentação do eletrodo versus velocidade de soldagem x resultados da macrografia.

Os gráficos de contorno da Figura 5.7 permitem a elaboração de algumas observações sobre a influência dos três parâmetros variados no comportamento dos aspectos avaliados e principalmente suas tendências para o calorímetro. A diluição aumenta para maiores valores de velocidade de soldagem e também para maiores valores de tensão, Figura 5.7(a) e (b). Ainda, o aumento da diluição está sujeito à combinação entre a velocidade de soldagem e a tensão, conforme apresentado na Figura 5.7(b). Os maiores valores de diluição, acima de 40% ocorrem através da combinação dos parâmetros tensão e velocidade de soldagem acima de 19 V e 5,5 mm/s, respectivamente. A velocidade de alimentação do eletrodo exerce pouca influência na

diluição, principalmente quando considerada as regiões plotadas, que individualmente equivalem ao aumento de 1% na diluição, dentro da janela obtida pelas macrografias de 36 a 42 %.

Ainda, da Figura 5.7(c), é notável que a área fundida do cordão soldado (metal base), aumenta para maiores correntes e menores velocidades de soldagem. O comportamento da tensão foi similar ao da corrente, porém, com menor influência na diluição e o gráfico não foi plotado para não se tornar repetitivo. A área total (metal base + reforço) seguiu o mesmo comportamento perante a variação dos parâmetros que os da área fundida.

A largura do cordão é diretamente proporcional à energia (corrente e tensão) e inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Portanto, a largura aumenta para maiores energias e menores velocidades de soldagem, conforme gráfico da Figura 5.7(d).

Os gráficos com as aquisições de temperatura pelos termopares para o projeto de experimentos Box-Behnken são apresentados no (APÊNDICE D). As curvas de resfriamento do calorímetro são apresentadas pelos gráficos, que são o resultado das combinações dos parâmetros: corrente, tensão e velocidade de soldagem. Os valores de calor transferido (Q_a), potência (P) e eficiência térmica do arco (η_a) são apresentados junto a cada solda para facilitar a comparação entre a área abaixo da curva em cada caso, com vazão constante de 4 l/min.

Os valores da energia obtida pelo SAP, calor transferido para o tubo e eficiência térmica do arco obtida pelo calorímetro, com a vazão de 4 l/min e rolha cônica de entrada, segundo o projeto de experimentos Box-Behnken estão resumidos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5– Resultados de energia, calor transferido e eficiência térmica do arco para o calorímetro segundo os parâmetros do Box-Behnken.

Corrida	E (J/mm)	Q_a (kW)	η_a (%)
1	713	91,7	77
2	797	74,0	77
3	606	94,2	74
4	692	86,3	75
5	453	72,6	76
6	878	108,8	75
7	1056	97,1	77
8	528	70,5	81
9	485	81,4	79
10	709	93,1	79
11	651	81,7	76
12	696	90,2	78
13	624	98,3	75
14	1097	103,3	78
15	849	84,3	82

Os gráficos de contorno para os resultados apresentados na Tabela 5.5 são demonstrados na Figura 5.8, nos quais a eficiência térmica do arco elétrico é plotada em relação à velocidade de alimentação do eletrodo (corrente), tensão e velocidade de soldagem. Ainda, o calor transferido para a peça Q_a é plotado e a energia E não é apresentada, pois é diretamente proporcional a combinação dos três parâmetros que são variados.

Os valores de eficiência térmica do arco estão dentro do espectro de $(0,65 \text{ a } 0,85) \cdot 100$, sugerido por [Machado, 2000] para o processo MAG, ou seja, de $0,75 \pm 0,10$. Bem como de acordo com os demais trabalhos já citados nos resultados deste trabalho.

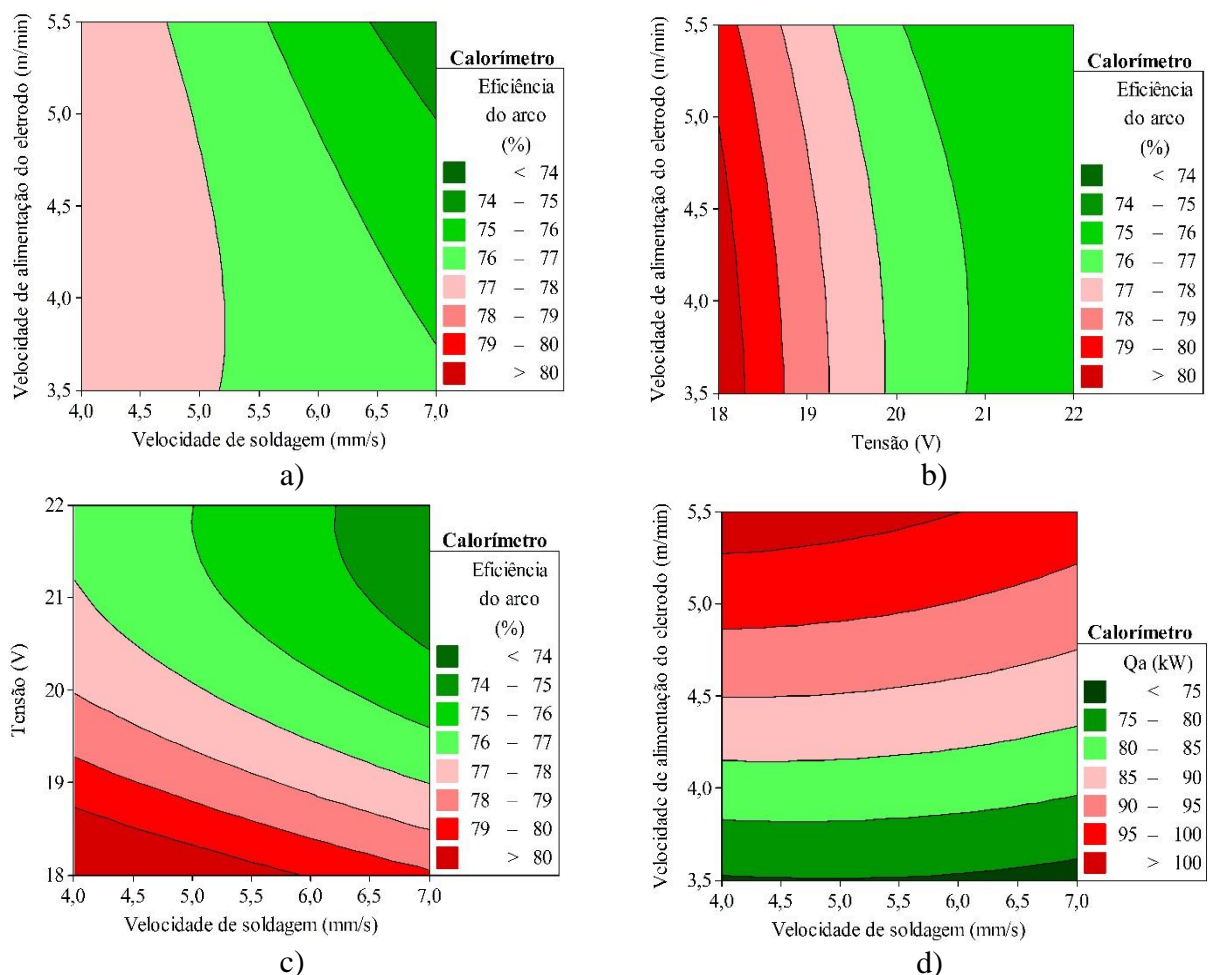


Figura 5.8 - Gráficos de contorno com os resultados para a eficiência térmica do arco e calor transferido segundo a matriz de parâmetros do Box-Behnken.

A eficiência térmica do arco elétrico obtida pelo calorímetro, como pode ser observado na Figura 5.8, depende da combinação dos parâmetros. Algumas tendências, para priorizar a eficiência podem ser delineadas dentro da janela de parâmetros deste trabalho. A Figura 5.8 mostra que a eficiência é maior nas seguintes situações: Figura 5.8(a), aumenta para menores velocidades de soldagem, a velocidade de alimentação do eletrodo exerce pouca influência

dentro dos limites considerados; Figura 5.8(b) e Figura 5.8(c), a eficiência do arco aumenta para maiores valores de tensão, na Figura 5.8(c), nota-se ainda leve dependência da eficiência com a velocidade de soldagem; O comportamento para essa faixa de corrente está de acordo com o encontrado por [Nasiri et al., 2014], Figura 3.4(b). Ainda, o calor transferido para o metal base (Q_a) é pouco alterado pela velocidade de soldagem, como mostra a Figura 5.8(d).

A relação entre a eficiência térmica do arco e a penetração (no calorímetro), está demonstrada na Figura 5.9, na qual se observa que a penetração não é maior para os valores de eficiência térmica mais altos, portanto, sua dependência forte é da corrente de soldagem, comportamento esse que se repete para as três juntas. Ainda, a penetração se mostrou inversamente proporcional ao aumento da velocidade de soldagem, nesse caso são necessárias combinações dos parâmetros para manter a penetração em altas velocidades de soldagem.

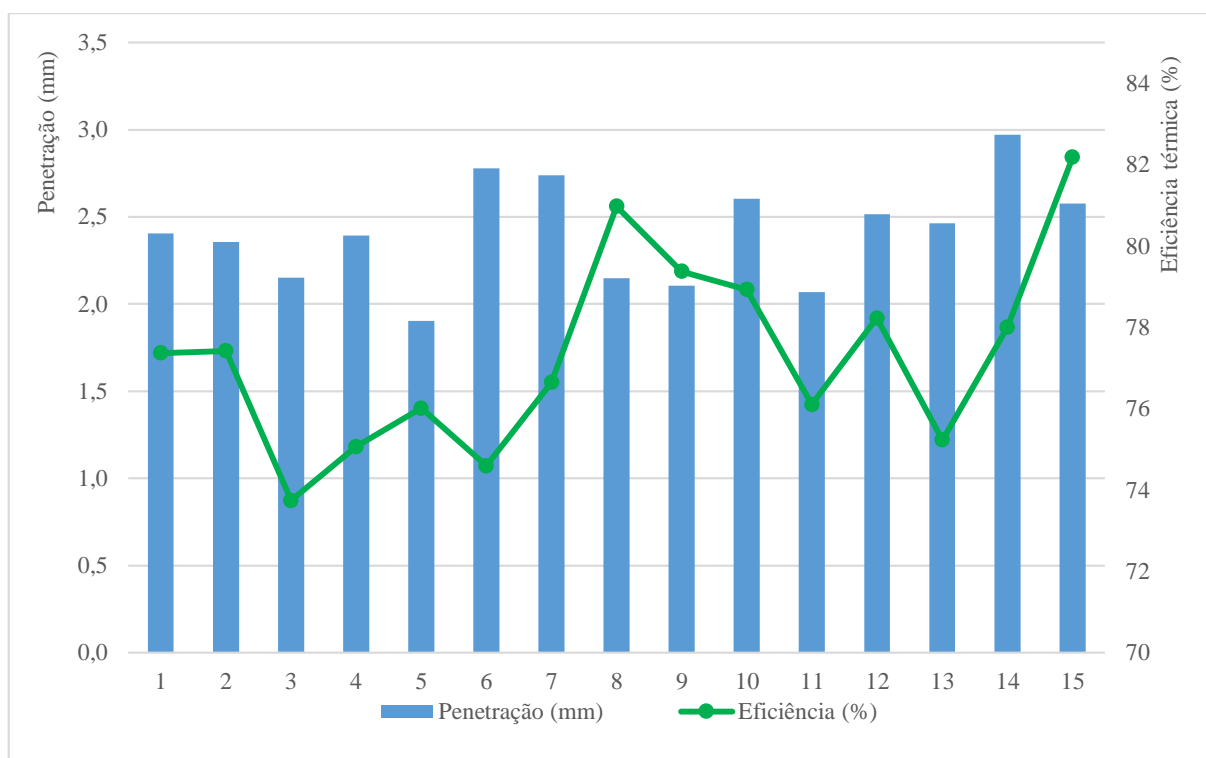


Figura 5.9 - Gráfico comparativo entre eficiência térmica do arco e penetração no calorímetro.

Os resultados das medições das soldas cordão sobre chapa, através das macrografias, são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6– Média das medições da macrografia para o cordão sobre chapa.

Corrida	E (J/mm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Diluição (%)	Área fundida (mm ²)	Área total (mm ²)
1	680	2,4	3,3	6,6	39	10,1	26,0
2	796	2,3	2,9	7,8	36	8,9	24,9
3	611	2,2	2,6	7,4	45	9,8	21,8
4	691	2,6	3,0	6,9	41	10,7	26,0
5	456	1,9	2,3	6,0	42	6,4	15,4
6	879	2,3	3,2	9,4	42	13,3	31,5
7	1046	2,4	3,1	10,0	39	12,8	32,9
8	507	1,9	2,7	6,0	35	6,1	17,4
9	476	2,3	2,9	6,0	40	7,6	19,0
10	704	2,3	3,4	7,2	32	8,6	26,7
11	643	1,9	2,7	7,5	42	8,5	20,3
12	686	2,6	3,2	7,0	40	10,3	25,6
13	615	2,5	3,1	7,3	41	10,7	25,8
14	1069	3,0	4,0	8,8	37	15,4	40,4
15	827	2,9	3,9	7,5	36	12,0	33,6

A avaliação dos resultados obtidos através das macrografias das soldas cordão sobre chapa são apresentados na Figura 5.10, através de gráficos de contorno.

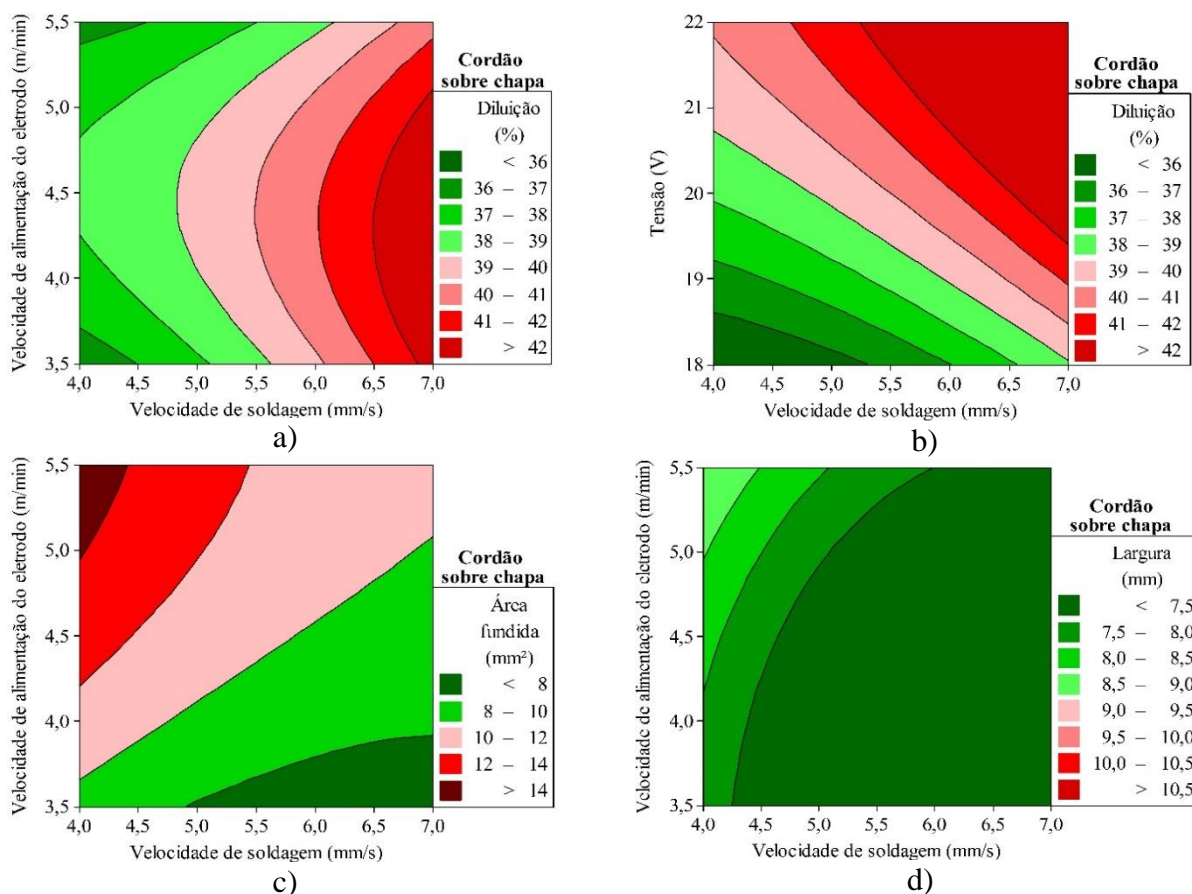


Figura 5.10 - Gráficos de contorno para as macrografias da solda cordão sobre chapa.

São avaliadas combinações de parâmetros iguais às realizadas no calorímetro e com a mesma faixa para as escalas na Figura 5.10. Os resultados avaliados foram diluição, área fundida e largura do cordão.

Algumas considerações podem ser delineadas através da análise da Figura 5.10. Da Figura 5.10(a), a diluição apresenta forte dependência da velocidade de soldagem, sendo diretamente proporcional esta relação; a velocidade de alimentação do eletrodo (corrente de soldagem) exerce leve influência na diluição, considerada a escala dos valores de diluição plotados de 1%. Da Figura 5.10(b), nota-se que a diluição aumenta para maiores valores de tensão. Da Figura 5.10(c), a área fundida aumenta diretamente para maiores valores de corrente, e também para menores velocidades de soldagem. Da Figura 5.10(d), a largura aumenta para maiores valores de corrente e tensão, e menores velocidades de soldagem.

Os resultados obtidos nas macrografias para a junta T são apresentados na Tabela 5.7. Os cordões 3, 5 e 11 não apresentaram penetração na raiz da junta, portanto são desconsiderados. O cordão da corrida número 5 e 11 ainda apresentaram mordedura na alma e aba, provavelmente devido à alta velocidade de soldagem para a energia utilizada.

Tabela 5.7– Média das medições das macrografias para a junta T.

Corrida	E (J/mm)	Área total (mm ²)	Área fundida (mm ²)	Diluição	Garganta teórica (mm)	Perna-Alma (mm)	Perna-Aba (mm)
1	719	24,0	7,7	32	3,8	4,9	5,8
2	818	24,9	8,2	33	3,8	6,1	4,7
3*	548	15,1	3,3	22	2,9	4,1	4,2
4	702	21,7	6,2	28	3,6	5,9	4,4
5*	447	10,5	2,0	19	2,6	3,8	3,3
6	897	26,7	7,3	27	4,0	5,1	5,4
7	1068	30,0	8,9	30	4,4	6,1	5,7
8	493	14,7	3,4	23	3,0	3,5	5,2
9	480	15,7	3,7	24	3,0	3,5	5,1
10	709	23,3	6,2	27	3,4	5,2	4,4
11*	618	15,9	4,4	28	3,1	4,5	5,5
12	680	21,7	5,7	26	3,5	4,2	6,1
13	632	18,8	5,9	31	3,5	4,4	5,3
14	1117	35,9	10,5	29	4,5	6,2	6,3
15	846	26,2	5,5	21	4,0	5,3	5,9

* Os cordões realizados nas corridas 3, 5 e 11 não obtiveram penetração na raiz para a junta T.

Os resultados da Tabela 5.7 para a junta T são avaliados através dos gráficos de contorno da 5.11. Os resultados plotados são diluição, área fundida e garganta teórica (não foi considerada a largura do cordão devido à sua geometria).

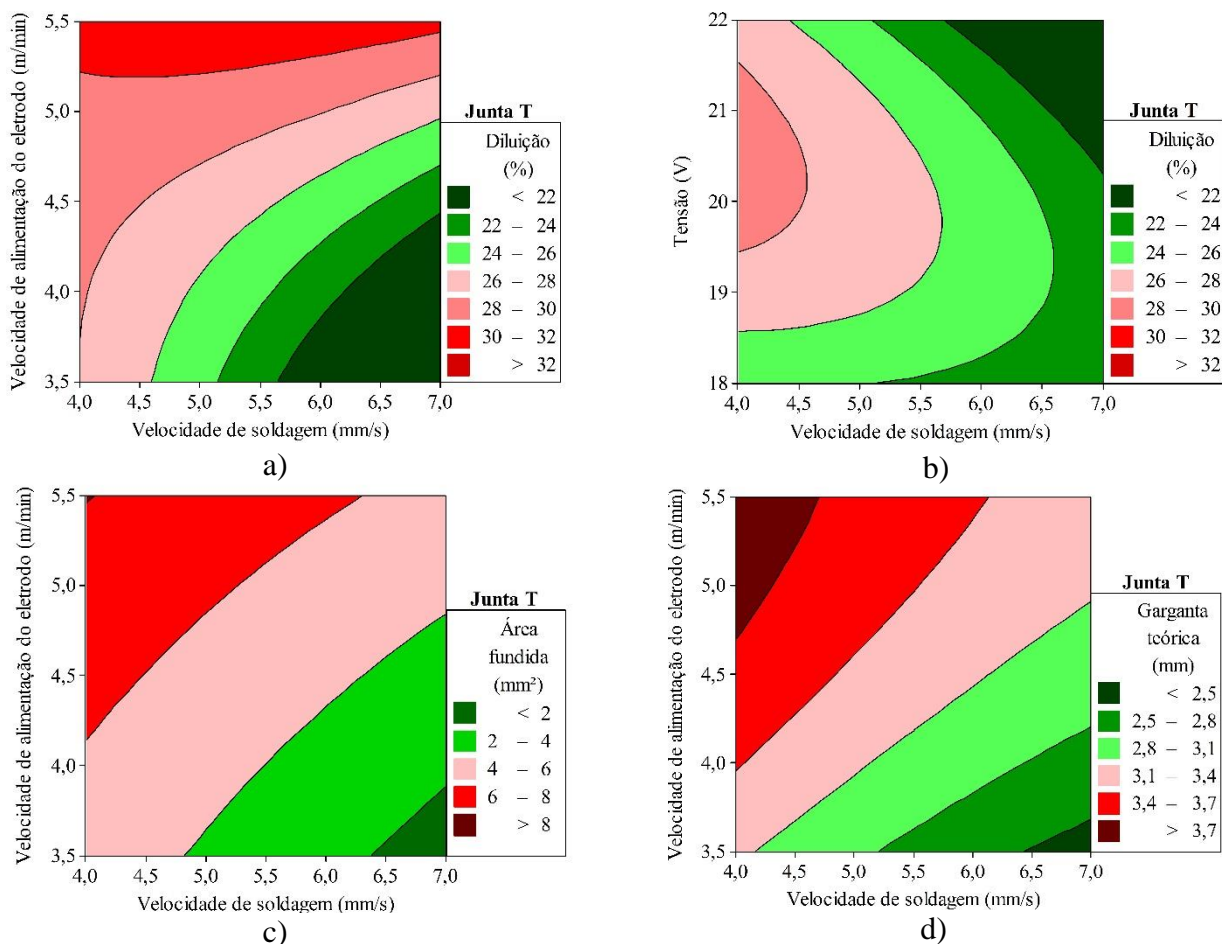


Figura 5.11- Gráficos de contorno para a junta T.

Na 5.11 são plotadas as relações entre velocidade de alimentação do eletrodo (corrente de soldagem), tensão e velocidade de soldagem.

Analisando o comportamento da diluição através da relação entre a corrente e a velocidade de soldagem, conforme 5.11(a), observa-se dependência da combinação destes dois parâmetros. O aumento da diluição ocorre para maiores correntes e menores velocidades de soldagem, comportamento diferente do apresentado pelo calorímetro e cordão sobre chapa. Para se obter maiores diluições em altas velocidades a corrente deve ser aumentada proporcionalmente.

A diluição na junta T é menor que nas outras juntas; seu valor máximo é em torno de 32%, enquanto que para o calorímetro e cordão sobre chapa a variação se dá entre 36 a 42%, reforçando o argumento do diferente modo de fluxo de calor na peça. Comparando-se a tensão com a velocidade de soldagem, na 5.11(b), nota-se que a diluição é maior no valor médio da tensão e menores velocidades de soldagem. Ainda, é importante ressaltar que mesmo

diminuindo a velocidade de soldagem é necessário manter a tensão acima de um patamar mínimo para aumentar-se a diluição.

A área fundida do metal base para a junta T é menor que nas outras duas juntas, conforme a 5.11(c), a faixa para junta T é de 2 a 8 mm², enquanto que para as demais juntas é de 8 a 14 mm², sugerindo razoável acréscimo no fluxo de calor transferido para as regiões mais frias da peça, provavelmente em três dimensões, pois os parâmetros de soldagem são os mesmos. Ainda, a tendência da área fundida é aumentar para maiores correntes e menores velocidades de soldagem.

A garganta teórica, conforme a 5.11(d), apresenta comportamento semelhante ao da largura do cordão para o calorímetro e deposição sobre chapa. A tendência da garganta teórica é aumentar para maiores valores de corrente de soldagem e menores velocidades de soldagem.

O comparativo para a diluição das três diferentes juntas soldadas é apresentado na Figura 5.12 junto com a eficiência térmica do arco obtida pelo calorímetro. A junta T apresenta menor diluição para todas as corridas, independente da eficiência térmica do arco elétrico.

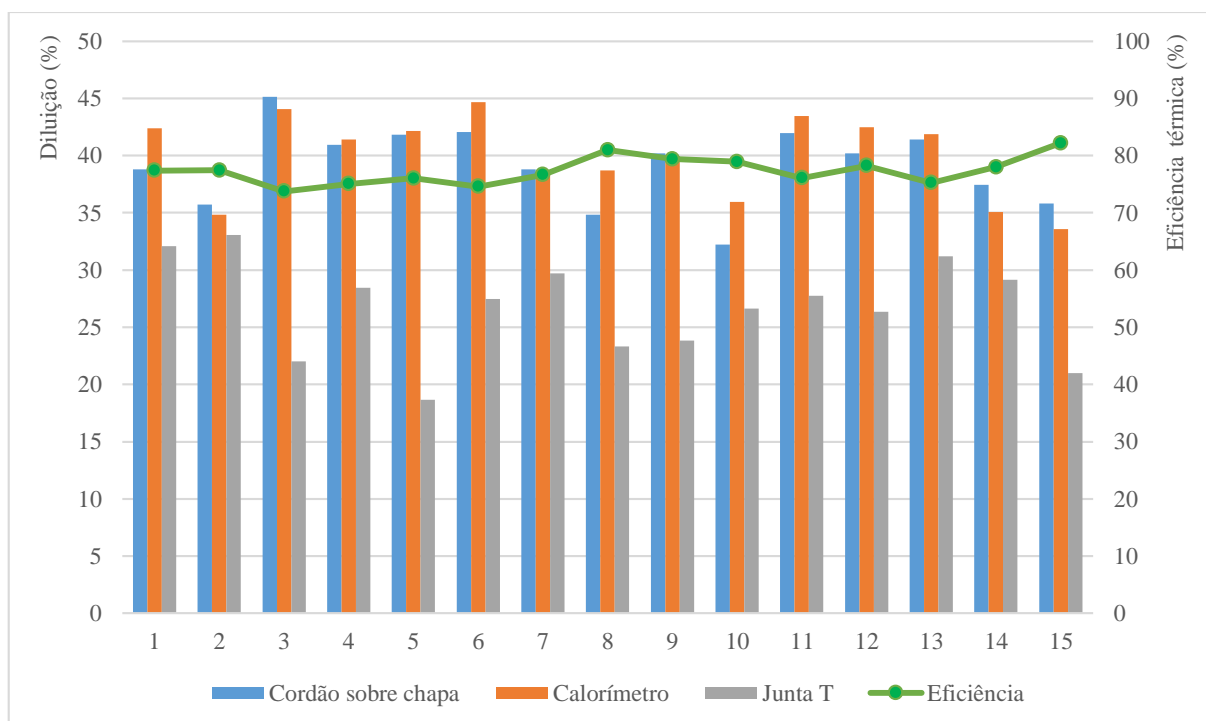


Figura 5.12 - Comparativo da diluição x eficiência do arco para as três soldas.

O comportamento da diluição comparado ao da eficiência térmica do arco não sugere uma correlação direta entre os dois resultados. A eficiência do arco que é consequência da diferença de temperatura medida pelos termopares devido ao calor transferido pelo arco elétrico depende principalmente dos parâmetros de soldagem. Dentre estes parâmetros destacam-se a

velocidade de soldagem e a tensão como fatores de maior influência na alteração da eficiência térmica do arco. Já a diluição está ligada diretamente à geometria da junta, devido aos diferentes modos de extração de calor gerados. Para o calorímetro e cordão sobre chapa, a diluição está diretamente ligada à velocidade de soldagem. Para a junta T, a diluição apresentou correlação com a corrente de soldagem, diferente do comportamento das outras duas juntas. O indicativo para esta diferença de comportamento está na maior extração do calor para a junta T, para aumentar a diluição se faz necessário a elevação da energia transferida pelo arco elétrico. A partir de um patamar de energia mais elevado, com espessura idêntica do metal base, o comportamento da diluição para a junta T poderia ser alterado, diminuindo a dependência da corrente, e compensando, assim, a maior extração de calor para esta geometria. Outra hipótese para explicar a diferença no comportamento da diluição é o contato do arco elétrico na junta T devido ao ângulo de trabalho da tocha em 45°, teoricamente, diminuindo a concentração do calor numa dada área. As duas hipóteses sugeridas não foram testadas neste trabalho e são indicadas para trabalhos futuros.

Os resultados do cálculo da eficiência de fusão através da Equação 3.6 são apresentados na Tabela 5.7. Nesse cálculo são comparados os valores da eficiência de fusão nas três juntas. Ainda, a tensão e a corrente consideradas são os valores individuais obtidos pelo SAP para cada solda. A área total é a média das três medições de cada seção para cada junta.

Tabela 5.8– Eficiência térmica do arco e eficiência de fusão, esta calculada pela Equação 3.6.

Sequência	η_m Fusão - Equação 3.6		
	Calorímetro	Cordão sobre chapa	Junta T
1	0,38	0,39	0,34
2	0,32	0,27	0,31
3	0,36	0,37	0,28
4	0,37	0,39	0,32
5	0,35	0,35	0,24
6	0,37	0,37	0,31
7	0,35	0,33	0,29
8	0,36	0,35	0,31
9	0,40	0,41	0,34
10	0,43	0,38	0,34
11	0,33	0,33	0,26
12	0,38	0,38	0,33
13	0,40	0,43	0,31
14	0,38	0,39	0,33
15	0,38	0,41	0,31

A eficiência de fusão para o calorímetro e a solda cordão sobre chapa de acordo com a Equação 3.6, proposta por [AWS, 2001] é apresentada na Figura 13. Observa-se na Figura 13 que o comportamento da eficiência de fusão é semelhante ao da diluição, com valores menores de eficiência de fusão em todos os casos para a junta T. Para o calorímetro e cordão sobre chapa, em geral, os valores são próximos, demonstrando a semelhança no fluxo de calor durante o resfriamento para esse tipo de junta. A eficiência de fusão apresenta forte dependência das possibilidades de extração (perda por difusão) ou aproveitamento do calor transferido pelo arco para prover a efetiva fusão do material. Além da geometria da junta, a eficiência de fusão também depende da concentração de calor do arco para uma determinada área, exemplificado na Figura 1, e da espessura e propriedades do material base. A diluição geralmente se apresenta como maior ou igual à eficiência de fusão calculada pela Equação 3.7, conforme pode ser visto na Figura 13. A diferença entre estes resultados não é constante, comportamento que pode ser explicado devido às variáveis envolvidas no cálculo da eficiência de fusão e da combinação dos parâmetros de soldagem.

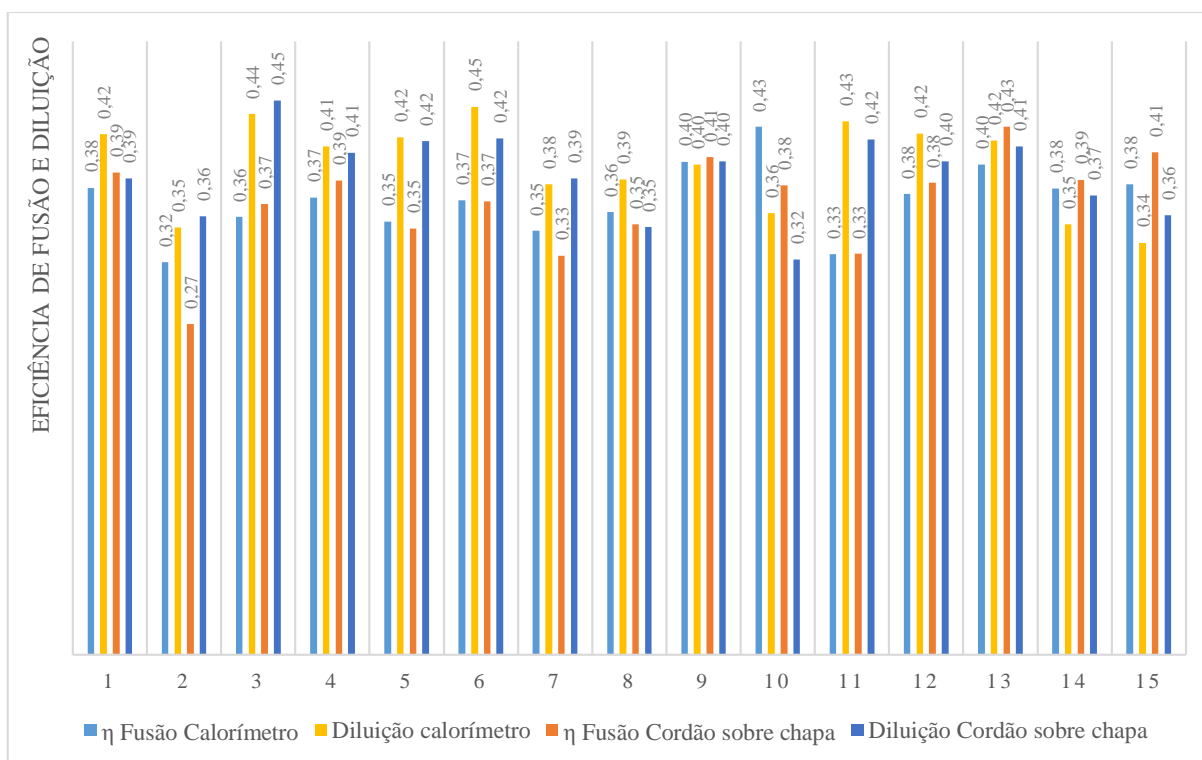


Figura 5.13 - Eficiência de fusão e diluição, calculada pela Equação 6 para o calorímetro e cordão sobre chapa.

A eficiência de fusão para a junta T segundo a Equação 3.6 é apresentada na Figura 5.14, também é plotado a diluição com o objetivo de comparar o comportamento através do gráfico de barras.

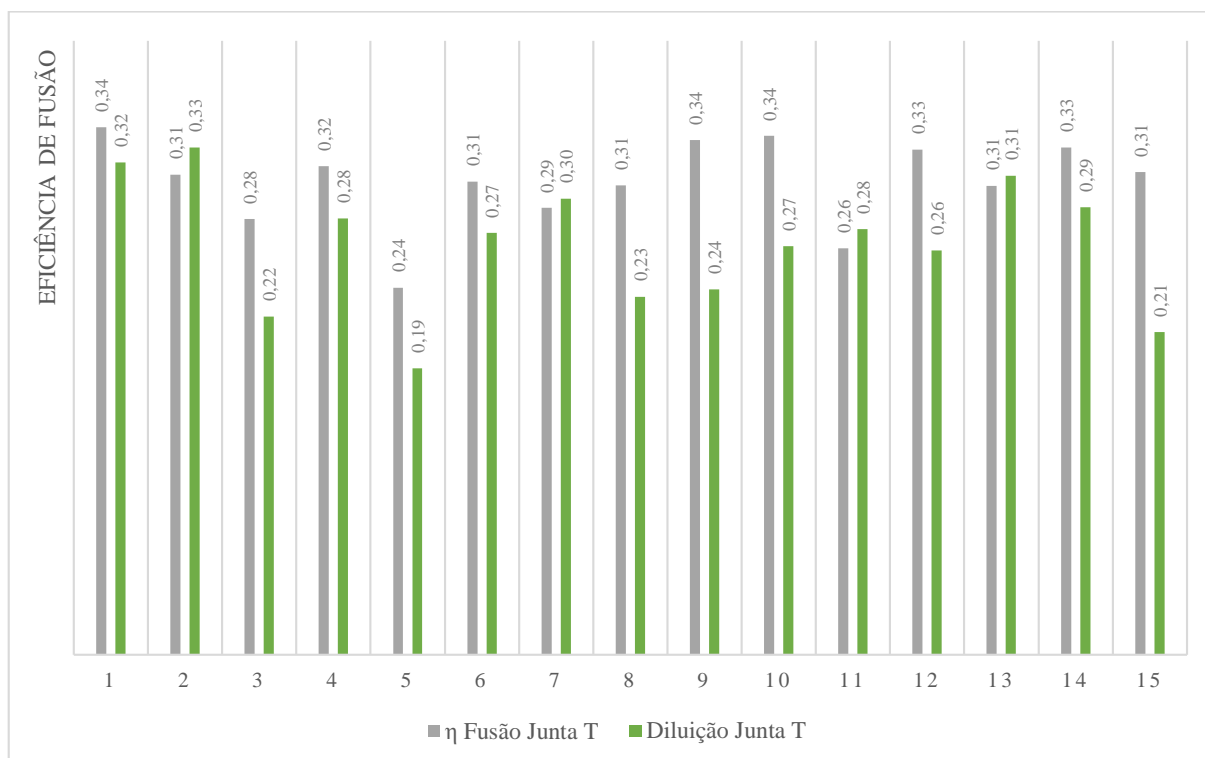


Figura 5.14 – Eficiência de fusão e diluição para junta T calculada pela Equação 3.6.

A diluição é menor ou igual à eficiência de fusão na maior parcela das soldas, conforme Figura 5.14. É notável que a diluição diminui fortemente para a junta T, em que a extração do calor é em 3D com maior intensidade. Os valores da eficiência de fusão também são menores do que no calorímetro e cordão sobre chapa. Para as soldas de número 2, 7 e 11 da Figura 5.14 o comportamento foi contrário aos demais cordões, para essas soldas a diluição foi menor que a eficiência de fusão. Além disso, a diferença entre a eficiência de fusão e a diluição não é constante durante os cordões, consequência da combinação dos parâmetros de soldagem que influenciam os resultados de maneira diferente.

O cálculo da eficiência de fusão segundo [Dupont e Marder, 1995] através da Equação 3.7 é apresentado na Tabela 5.7 para as três situações do trabalho. A eficiência do arco deste trabalho é considerada no cálculo.

Tabela 5.9– Eficiência térmica do arco elétrico e eficiência de fusão, esta calculada pela Equação 3.7.

	η_a Arco	η_m Fusão – Equação 3.7		
	Calorímetro	Calorímetro	Cordão sobre chapa	Junta T
1	77	0,42	0,43	0,37
2	77	0,35	0,29	0,34
3	74	0,42	0,43	0,31
4	75	0,42	0,44	0,35
5	76	0,40	0,39	0,25
6	75	0,43	0,42	0,34
7	77	0,38	0,36	0,31
8	81	0,38	0,36	0,31
9	79	0,43	0,43	0,34
10	79	0,46	0,40	0,35
11	76	0,37	0,37	0,29
12	78	0,41	0,42	0,34
13	75	0,45	0,49	0,34
14	78	0,41	0,42	0,35
15	82	0,39	0,42	0,31

Os resultados da Tabela 5.7 são demonstrados no gráfico da Figura 5.15.

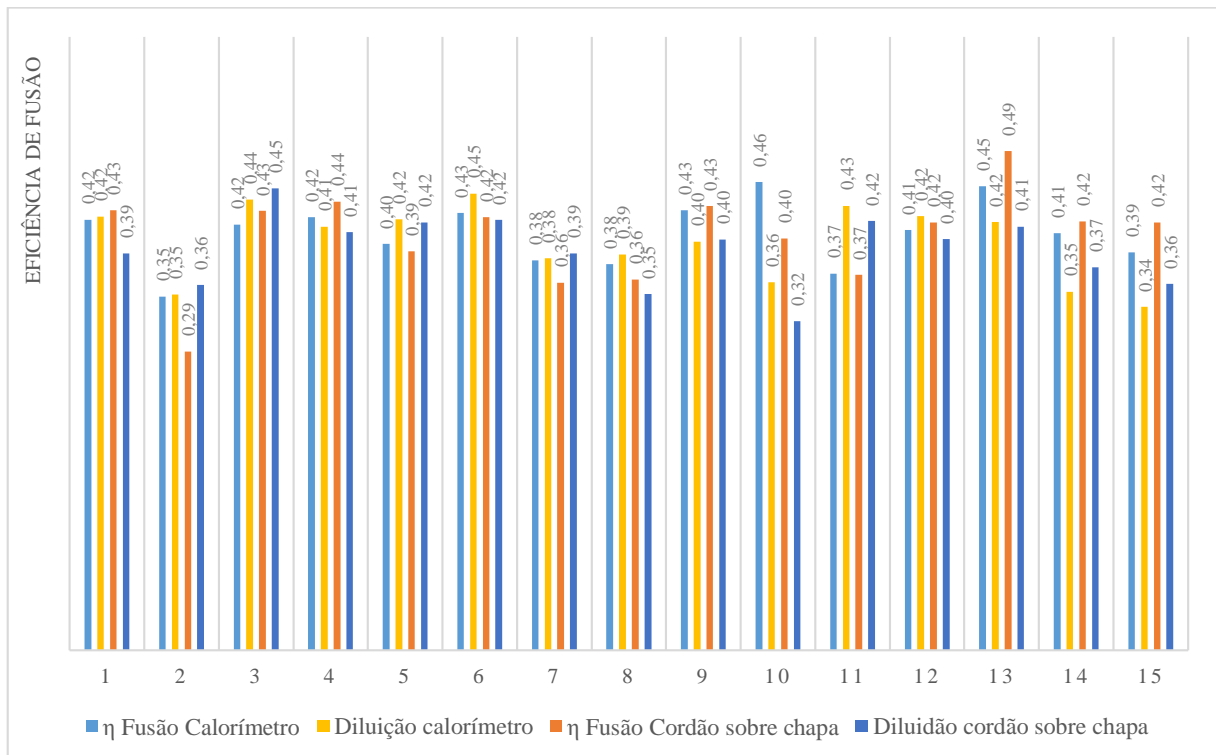


Figura 5.15 - Eficiência de fusão calculada pela Equação 3.7 e diluição para o calorímetro e cordão sobre chapa.

Os valores apresentados estão de acordo com os limites sugeridos por [AWS, 2001] de 0,50 para o escoamento de calor em 2D considerando o calorímetro e cordão sobre chapa, e de 0,37 para 3D no caso para junta T.

É possível observar pela Figura 5.15 a alternância entre os valores de eficiência de fusão obtidos pela Equação 3.7 e a diluição. Neste caso, a diferença entre os resultados se alterna, porém, é menor que a apresentada pela Equação 3.6. De maneira geral o comportamento da eficiência de fusão obtido pela Equação 3.7 está em concordância com a tendência da diluição.

A Figura 5.16 representa a eficiência de fusão segundo a Equação 3.7 para a Junta T, também é plotado a diluição. O comportamento da diluição é menor que a eficiência de fusão em todos os cordões, seguindo um padrão.

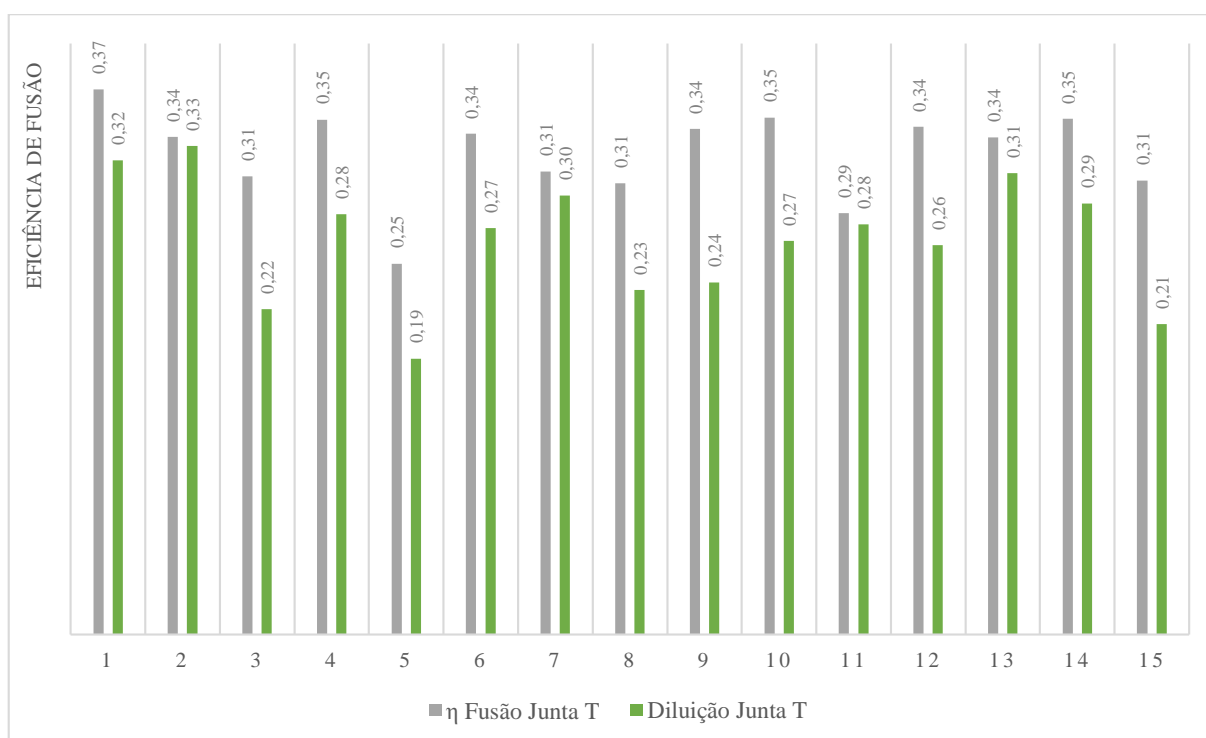


Figura 5.16 – Eficiência de fusão pela Equação 3.7 e diluição para Junta T.

Conforme a Figura 5.16, a diluição sempre é menor que a eficiência de fusão calculada pela Equação 3.7. Esta diferença não é sempre a mesma, pois depende da combinação dos três parâmetros que são variados segundo o projeto de experimentos Box-Behnken.

A eficiência de fusão calculada pela Equação 3.9 e Equação 3.10 é apresentada na Tabela 15. A Equação 9 é orientada ao cálculo da extração de calor em 2D, nesse caso, calorímetro e cordão sobre chapa. A Equação 10 é para 3D, logo, junta T. Destaca-se que as variáveis que são alteradas nas Equações 9 e 10 são a largura do cordão e a velocidade de soldagem.

Tabela 5.10 Eficiência térmica do arco elétrico e eficiência de fusão 2D - Equação 3.9, e 3D - Equação 3.10.

	η_m Fusão 2D		η_m Fusão 3D
	Calorímetro	Cordão sobre chapa	Junta T
1	0,38	0,35	0,27
2	0,35	0,34	0,23
3	0,40	0,39	0,27
4	0,38	0,36	0,26
5	0,38	0,37	0,25
6	0,39	0,39	0,27
7	0,37	0,36	0,24
8	0,36	0,34	0,25
9	0,39	0,37	0,27
10	0,38	0,36	0,26
11	0,38	0,37	0,26
12	0,38	0,36	0,27
13	0,40	0,39	0,28
14	0,37	0,35	0,25
15	0,35	0,33	0,23

Os resultados obtidos para a eficiência de fusão 2D através da Equação 3.9 para o calorímetro e soldas cordão sobre chapa pela são comparados com a diluição no gráfico da Figura 5.17.

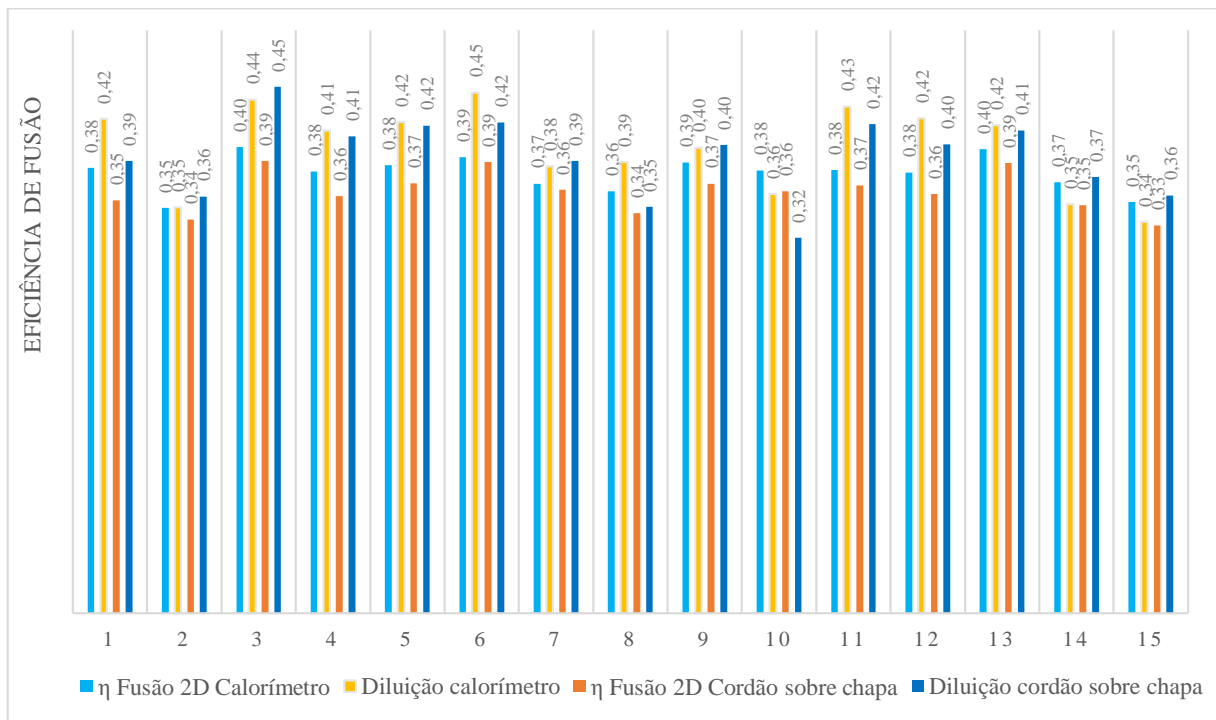


Figura 5.17 - Eficiência de fusão 2D Equação 3.9 e diluição para o calorímetro e cordão sobre chapa.

A eficiência de fusão é menor em praticamente todas as situações 2D, conforme Figura 5.17, do que nos casos anteriores. Comparando-se com os resultados das equações 3.6 e 3.7 é perceptível a alternância dos valores, comportamento que praticamente não ocorre com os resultados da Equação 3.9. Os valores da eficiência de fusão 3D apresentados na Figura 5.18 apresentam baixa alternância para todos os cordões, diferente do comportamento gerado pelas equações 3.6 e 3.7. A diluição e a eficiência de fusão 3D, segundo a Equação 3.10, não apresentam um comportamento padrão, como pode ser observado na Figura 5.18. É notável a mudança de comportamento entre os resultados representados pelas barras do gráfico.

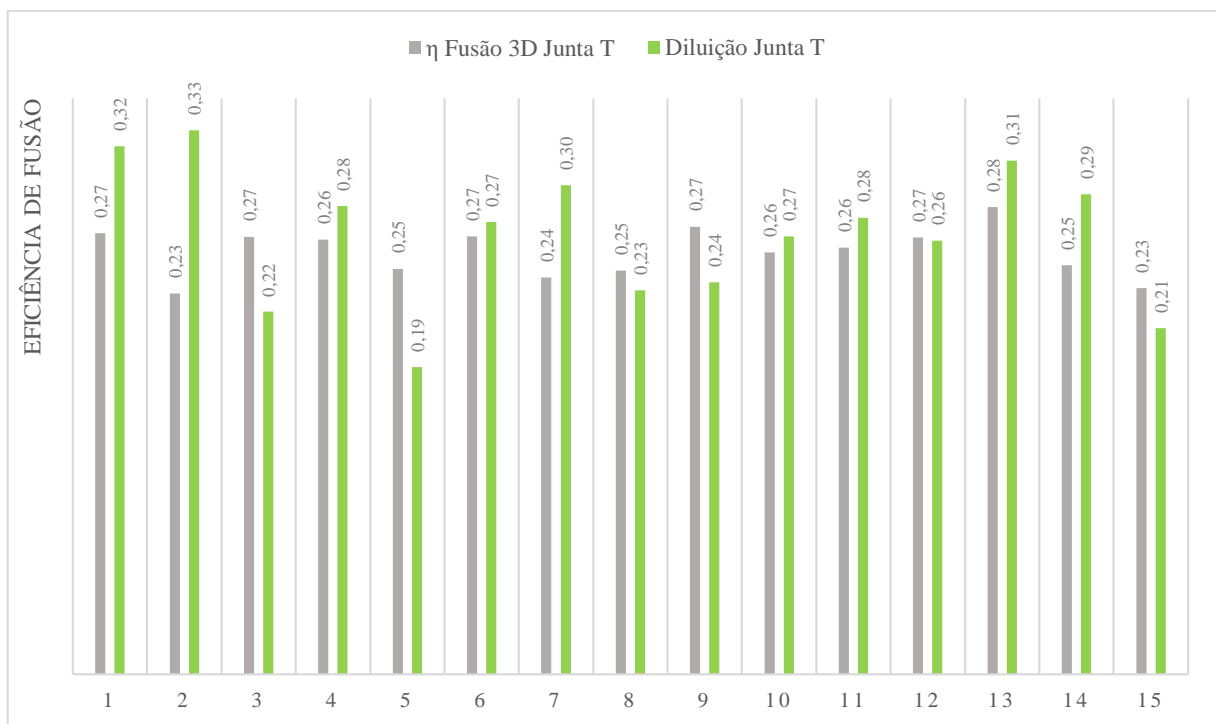


Figura 5.18 – Eficiência de fusão 3D para a junta T segundo a Equação 3.10, e diluição.

A escolha da equação a ser empregada para o cálculo da eficiência de fusão pode ser determinada de diferentes maneiras; neste trabalho são comparadas três dentro da literatura consultada. A comparação entre os resultados para cada junta e equação é apresentada no (APÊNDICE E). É importante salientar a diferença na abordagem do cálculo para cada equação, para o cálculo 2D e 3D as equações 3.9 e 3.10, respectivamente, possuem como variáveis a difusividade térmica, velocidade de soldagem e largura do cordão, além de coeficientes empíricos, portanto, os dados podem ser obtidos sem o uso de alguma das técnicas de calorimetria e macrografia. Para a Equação 3.6 leva-se em conta a entalpia de fusão do material, área total da seção transversal do cordão, velocidade de soldagem, eficiência térmica do arco elétrico (pode-se não considerar) e potência. Portanto, com importantes fatores envolvidos no

cálculo, necessitando da aquisição de potência durante a soldagem e posterior macrografia para obter a área total fundida. A Equação 3.7 leva em consideração o calor latente de fusão do metal de adição e metal base, volume de material fundido e de reforço, eficiência térmica do arco elétrico, potência e tempo de soldagem. Sendo assim, os resultados gerados pela Equação 3.7 parecem abordar uma situação específica de soldagem de uma determinada junta de maneira mais completa devido às variáveis consideradas, porém dependem do exato cálculo das mesmas, bem como de calorimetria para as juntas em questão e estabilidade do processo para o cálculo do volume do cordão.

Como observado no texto, um dos parâmetros que resulta no aumento da diluição é o aumento da velocidade de soldagem para o calorímetro e cordão sobre chapa, para a junta T existe uma faixa ótima, então da relação direta observada anteriormente entre a eficiência de fusão e a diluição, pode-se estender o efeito da velocidade de soldagem para a eficiência de fusão, o que está de acordo com o apresentado por [Dupont e Marder, 1995], na Figura 3.5.

Para juntas em ângulo, como T, um fator de correção pode ser adotado que considera a repartição da energia de soldagem no resfriamento da junta. Segundo [Machado, 2000] para juntas em ângulo, a energia é corrigida multiplicando a energia nominal por 0,66.

Tabela 5.11– Energia para junta T, comparação entre a eficiência do arco (calorímetro) e com fator 0,66.

	Potência (W)	η_a Arco	v (mm/s)	E (J/mm)	E (J/mm)	E (J/mm)
	Junta T	Calorímetro		Energia Nominal	η_a Térmica Calorímetro	η_a Térmica Coeficiente 0,66
1	3923	0,77	5,5	713	552	471
2	3186	0,77	4,0	797	617	526
3	4242	0,74	7,0	606	447	400
4	3807	0,75	5,5	692	520	457
5	3174	0,76	7,0	453	345	299
6	4831	0,75	5,5	878	655	580
7	4224	0,77	4,0	1056	809	697
8	2902	0,81	5,5	528	427	348
9	3396	0,79	7,0	485	385	320
10	3897	0,79	5,5	709	559	468
11	3579	0,76	5,5	651	495	429
12	3827	0,78	5,5	696	544	459
13	4365	0,75	7,0	624	469	412
14	4387	0,78	4,0	1097	855	724
15	3396	0,82	4,0	849	698	560

Através da consideração do coeficiente não se utiliza o coeficiente da eficiência térmica do arco e se obtém uma aproximação da energia transferida para a junta, para efeito de comparação na Tabela 5.9 apresenta-se a potência obtida pelo SAP multiplicada pela eficiência térmica do arco elétrico medida pelo calorímetro, e com os valores obtidos pelo coeficiente 0,66 para a junta T.

A comparação entre os valores de energia obtidos na Tabela 5.9 é apresentada na Figura 5.19. É notória a diferença entre os valores da energia nominal e as demais. A diferença segue um padrão constante, sendo que a consideração do coeficiente gerou valores um pouco abaixo daqueles obtidos pelo cálculo com eficiência térmica. Ainda, pode-se considerar que os resultados obtidos pela multiplicação da potência pelo coeficiente 0,66 estão dentro das faixas de valores para a eficiência térmica do arco indicadas pela maioria das referências citadas anteriormente, portanto, para situações em que valores aproximados satisfazem as exigências, no caso 3D, seu uso se mostra como uma alternativa rápida, simples e sem custos.

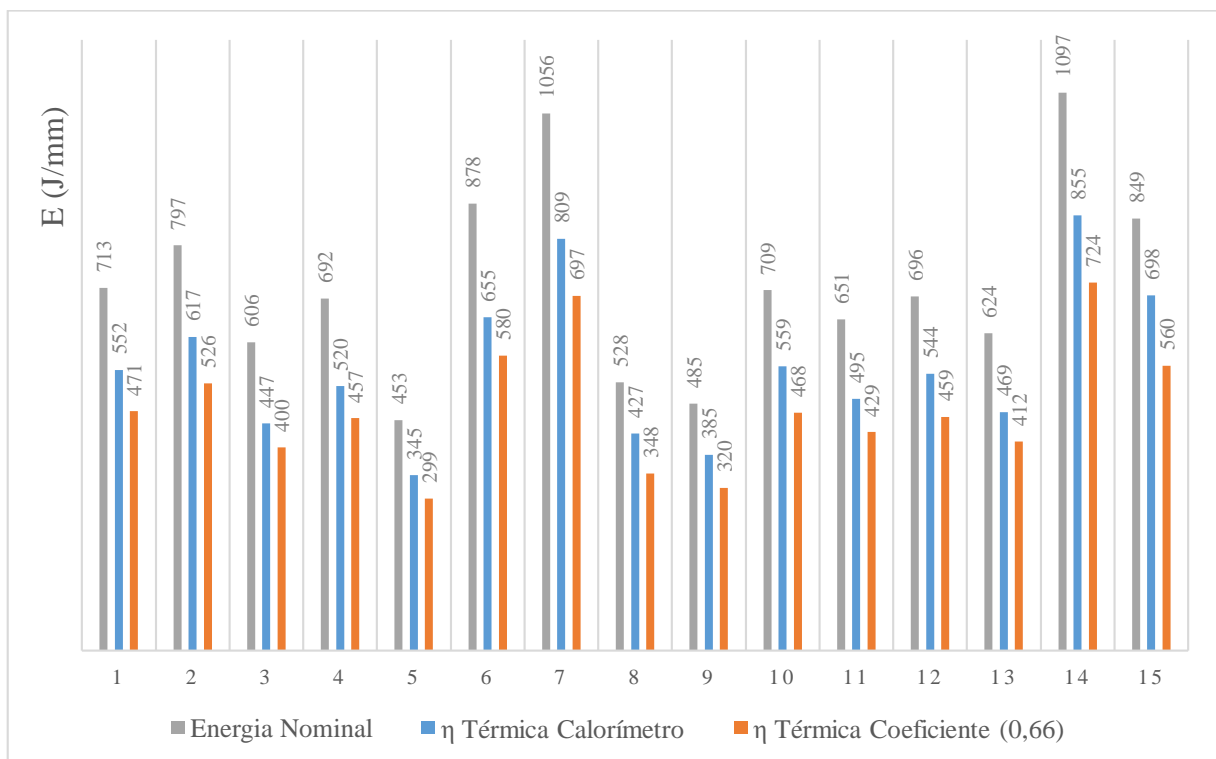


Figura 5.19 - Gráfico comparativo entre as energias obtidas: nominal, considerando a eficiência térmica e através do coeficiente 0,66.

Segundo [Fuerschbach e Knorovsky, 1991] uma possível solução para aumentar a eficiência de fusão em baixas velocidades é através de corrente pulsada, o efeito não se estende para altas velocidades pois já está maximizado.

A influência da corrente sobre a eficiência de fusão é mostrada na Figura 5.20. A eficiência de fusão é o resultado das Equações 5.6, 5.7 e 5.9 para o calorímetro. A corrente é a média obtida em todas as medições. É notória a dependência da eficiência de fusão com a corrente, esse comportamento se prolonga para as soldas cordão sobre chapa e junta T.

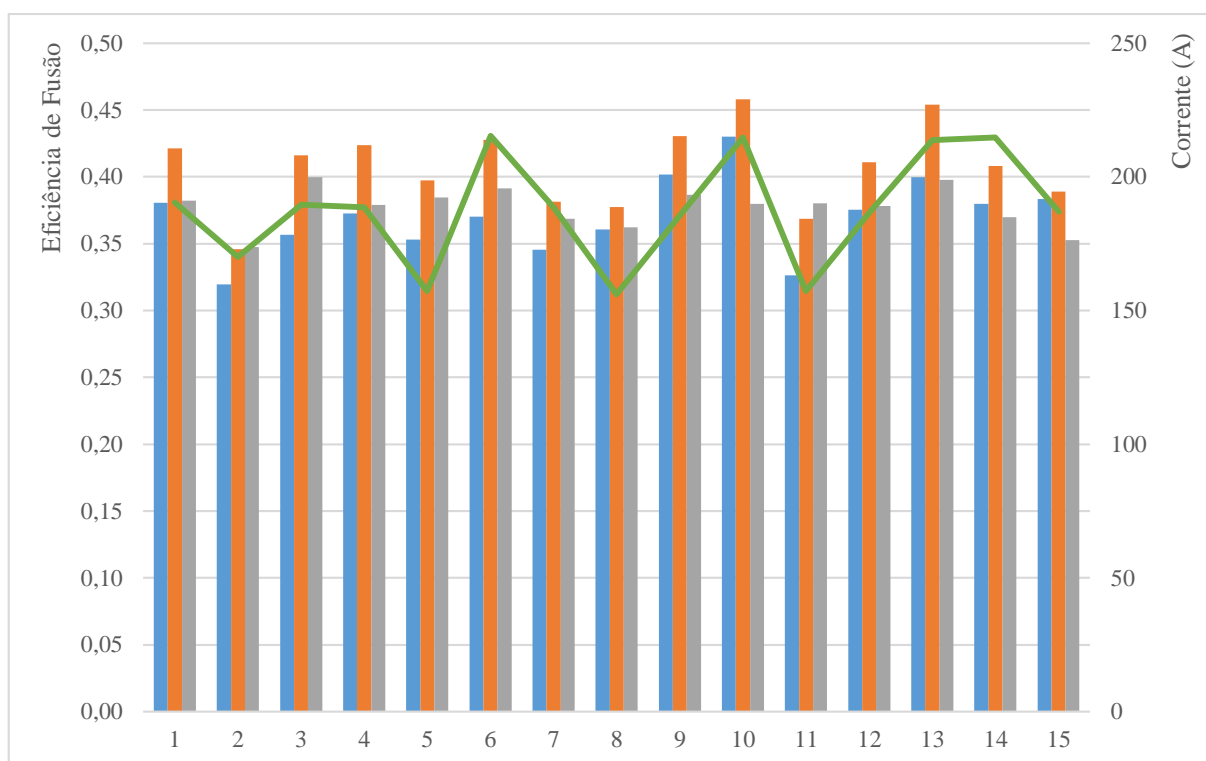


Figura 5.20 - Eficiência de fusão Equações 6, 7 e 9 para o calorímetro versus a influência da corrente.

No estudo de [Hirata et al., 2014] sobre o rendimento bruto de fusão com o processo MAG em chapas de espessura crescente de aço carbono 1020, usando a mesma classificação de eletrodo deste trabalho e soldas cordão sobre chapa, encontrou-se aumento na área do cordão, penetração e do rendimento bruto de fusão com o aumento da corrente de soldagem, portanto de acordo com este trabalho. A justificativa é de que ocorre a intensificação dos efeitos de redução da difusão térmica (contenção da dissipação do calor) com o aumento do calor imposto (saturamento térmico) principalmente em chapas de baixa espessura (2D). Em maiores correntes, o preaquecimento à frente e ao redor da poça é maior, facilitando o alcance da temperatura de fusão antes do calor dissipar pelo material. A relação direta entre o aumento do rendimento bruto de fusão pelo aumento da corrente de soldagem também foi encontrada por [Reis et al., 2011] para aço carbono, aço inoxidável e alumínio através do processo TIG.

O presente trabalho está de acordo com a afirmação de [Tusek et al., 2003] sobre as diferenças de extração de calor para diferentes tipos de juntas, fato comprovado pela diferença nos valores de eficiência de fusão e diluição menores para a junta T. A diferença na distribuição da densidade de energia (contato do arco com alma e aba da junta) não pôde ser comprovada neste trabalho, no entanto, este fenômeno parece estar associado à soldagens que ofereçam algum tipo de acoplamento ao arco elétrico que altere a sua forma (densidade de energia) e, talvez seja mais pronunciado em soldas autógenas (TIG) pois não contará com o calor adicionado pelas gotas de metal (MAG), hipótese não comprovada neste trabalho.

6. CONCLUSÕES

O estudo para avaliar diferentes geometrias de entrada e vazões de água em um calorímetro de fluxo contínuo para o processo MAG convencional, com modo de transferência metálica em curto circuito e espessura do metal base constante, foi realizado. Também foram avaliadas diferentes equações para o cálculo da eficiência de fusão e diluição pela metodologia do projeto de experimentos Box-Behnken para o calorímetro, solda cordão sobre chapa e junta T. Chegando-se às seguintes conclusões:

- Para o nível de energia de soldagem testado, a vazão de 4 l/min resultou no maior valor médio de eficiência térmica do arco, de 80,5%, com decaimento no valor de eficiência para vazões inferiores ou superiores.
- O calor aportado influencia diretamente o valor da eficiência térmica do processo de soldagem medida através de calorímetro de fluxo contínuo, sendo sensível ao tipo de entrada e de vazão da água.
- A análise estatística para as rolhas de entrada cônica e reta demonstrou baixo erro de repetitividade do experimento para todas as vazões, ao passo que para a rolha com obstáculo o erro estatístico foi elevado no intervalo de confiança considerado.
- A eficiência térmica do arco elétrico apresenta variações em seus valores na faixa de 72 a 82% para a faixa de energia utilizada nesse trabalho, com modo de transferência em curto circuito para o projeto de experimentos Box-Behnken. Demonstra-se a estabilidade da transferência de calor do arco elétrico para a junta, nesse caso o calorímetro, que extrai o calor igualmente através do escoamento interno da água para todos os casos.
- A diluição para o calorímetro e a solda cordão sobre chapa é similar, indicando que o fluxo de calor na junta ocorre pelos mesmos mecanismos. A junta tipo T apresenta menor diluição em todas as corridas, porém, com área total de metal depositado aproximada, sugerindo, portanto, a extração de calor mais alta, em três dimensões.
- Os valores obtidos para a eficiência de fusão através da Equação 7 estão em maior concordância com os limites teóricos de 0,50 (2D) para o calorímetro e cordão sobre chapa, e de 0,37 (3D) para a junta T.
- A eficiência de fusão mostra dependência direta da corrente de soldagem e da extração do calor na junta soldada, logo, da geometria da junta. A eficiência de fusão é menor para a

junta T, independente da equação para o seu cálculo, comportamento este confirmado pela diluição, a qual depende da velocidade de soldagem.

- A eficiência térmica do arco elétrico apresenta maior dependência da velocidade de soldagem (aumenta para menores velocidades) e tensão do arco elétrico (aumenta para menores tensões), também indica forte dependência do acoplamento do arco elétrico com a junta e do processo de soldagem.
- No presente trabalho, ainda buscou-se entender a relação entre a eficiência de fusão e a eficiência térmica do arco elétrico. Com os estudos realizados neste trabalho é possível “perceber” que existe interdependência entre os coeficientes, pois a determinação dos aspectos geométricos do cordão desejado, modo de transferência metálica, processo de soldagem, espessura do metal base, geometria da junta, tipo de material, etc, acabam por orientar a escolha dos parâmetros de soldagem, resultando num valor de eficiência em cada situação. Portanto, estudos mais abrangentes e aprofundados são necessários para o melhor entendimento da relação entre as eficiências.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Reproduzir as soldas com os parâmetros indicados pelo projeto de experimentos para maiores eficiências e verificar os resultados através da equação de regressão gerada a partir do projeto de experimentos Box-Behnken.
- Simular a alma de uma junta T no tubo do calorímetro para medir a eficiência térmica do arco da maneira e contribuir no entendimento das diferenças entre eficiência de fusão e eficiência térmica quando a geometria da junta soldada é diferente.
- Ampliar o tipo de juntas estudadas e avaliar o surgimento de descontinuidades para a mesma energia em diferentes juntas, e também as outras características, como penetração, diluição, área fundida, etc.
- Realizar experimentos com outros modos de transferência metálica e outras variantes do processo MAG, como MAG CCC e MAG pulsado.
- Utilizar simulação computacional para validar os modelos de transferência e extração do calor para os diferentes tipos de juntas, espessura e modos de transferência metálica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alba, D. R.. **Soldagem híbrida por difusão através de fricção (HFDB) para a união de tubos e flanges de alumínio**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Arevalo, H. D. H.; Vilarinho, L.O.. **Desenvolvimento e avaliação de calorímetros por Nitrogênio líquido e fluxo contínuo para medição de aporte térmico**. Soldagem e Inspeção, v. 17 (3), p. 236 – 250, São Paulo, Jul/Set 2012.

AWS, American Welding Society. **Welding Handbook – Welding Science and Technology**. Welding Handbook Committee, v. 1, ed. 9, USA, Miami, 2001.

AWS, American Welding Society. **Welding Handbook –Welding Processes, part 1**. Welding Handbook Committee, v. 2, ed. 9, USA, Miami, 2004.

Bergman, T. L. et al.. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**. LTC, ed. 7, Rio de Janeiro, 2015.

Bosworth, M. R., **Effective heat input in pulsed current gas metal arc welding with solid wire electrodes**. Welding Journal, USA, v. 70 (5), p. 111 – 117, Mai 1991.

Çengel, Y.; Boles, M. A.. **Termodinâmica**. AMGH Editora Ltda, ed. 7, Porto Alegre, 2013.

Dupont, J. N.; Marder, A.R., **Thermal efficiency of arc welding processes**. Welding Journal, v. 74, p. 406 – 416, 1995.

Dutta, P.; Joshi, Y.; Franche, C.. **Determination of Gas Tungsten Arc Welding Efficiencies**. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 9, p. 80 – 89, 1994.

Fuerschbach, P. W.; Knorovsky, G. A.. **A Study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding**. Welding Journal, v. 70, p. 287-297, November, 1991.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T.. **Introdução à mecânica dos fluidos**. LTC, ed. 8, Rio de Janeiro, 2014.

Giedt, W. H.; Tallerico, L. N.; Fuerschbach, W.. **Welding Efficiency: Calorimetric and temperature field measurements**. Welding Journal, v. 68 (1), p. 28-32, January 1989.

Hirata, E. K. et al.. **Influência da corrente sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem MIG/MAG**. Soldagem & Inspeção, v. 19 (2), p. 159 – 167, São Paulo, Abr/Jun 2014.

Joseph, A. et al.. **Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 8 (6), p. 400-406, 2003.

Lu, M. J.; Kou, S.. **Power inputs in gas metal arc welding of aluminum – Part 2**. Welding Journal, v. 60 (11), p. 452-456, November 1989.

Machado, I. G. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**. Imprensa livre, p. 119, Porto Alegre, 2000.

Montgomery, D. **Design and analysis of experiments**, John Wiley & Sons, Inc., ed.8, Arizona State University, 2013.

Nascimento, A. S.; Batista, M. A.; Nascimento, V. C.; Scotti, A. **Avaliação dos métodos de cálculo de potência elétrica em soldagem a arco e as consequências sobre as previsões geométricas, térmicas e metalúrgicas da junta**, Soldagem e Inspeção, v. 12 (2), p. 97 – 106, São Paulo, Abr/Jun 2007.

Nasiri, M. B. et al. **Investigation on the influence of various welding parameters on the arc thermal efficiency of the GTAW process by calorimetric method**, Journal of mechanical science and technology, v. 28 (8), p. 3255-3261, 2014.

Kou, Sindo. **Welding metallurgy**, Wiley Interscience, p. 461, 2003.

Pépe, N.; Egerland, S.; Colegrove, P. A.; Yapp, D.; Leonhartsberger, A.; Scotti, A. **Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes**, Science and technology of welding and joining, v. 16 (5), p. 412 – 417, 2011.

Quintino, L.; Liskevich, O.; Vilarinho, L.; Scotti, A. **Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW)**, Int. J. Adv. Manuf. Technol., (68), p. 2833 – 2840, 2013.

Reis, P. R. et al.. **Influência do material de base sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem a arco**. Soldagem & Inspeção, v. 16 (4), p. 369 – 376, São Paulo, Out/Dez 2011.

Ribeiro, J. L. D.; Caten, C. T., **Projeto de experimentos**, Apostila do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

Schwedersky, M. B., Dutra, J. C., **Um estudo da eficiência térmica dos principais processos de soldagem a arco**. XXXVII Consolda, Natal-RN, Out. 2011.

Scotti, A., Reis, R.P., Liskevych, O., **Modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco visando o conceito de calor imposto efetivo**, Soldagem e Inspeção, v. 17 (2), p. 166 – 172, São Paulo, Abr/Jun 2012.

Scotti, A.; Ponomarev, V.. **Soldagem MIG /MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**, Editora Artliber, São Paulo, 2008.

Sgarbi, Pedro. **Construção e validação de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Soderstrom, E. J.; Scott, K. M.; Mendez, P. F. **Calorimetric Measurement of Droplet Temperature in GMAW**, Welding Journal, v. 70, p. 77 – 84, April, 2011

Tsai, N. S., Eagar, T. W., **Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs.** Metallurgical Transactions B, v. 16B, p. 841 – 846, 1985.

Tusek, J. et al. **Influence of type of welded joint on welding efficiency.** Science and Technology of welding and Joint, v. 8 (3), p. 157 – 164, 2003.

Zielińska, S. et al.. **Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy.** Plasma sources Science and Technology, v. 16, p. 832 – 838, 2007.

APÊNDICE A

As macrografias das três juntas soldadas, calorímetro, cordão sobre chapa e junta T são apresentadas a seguir.

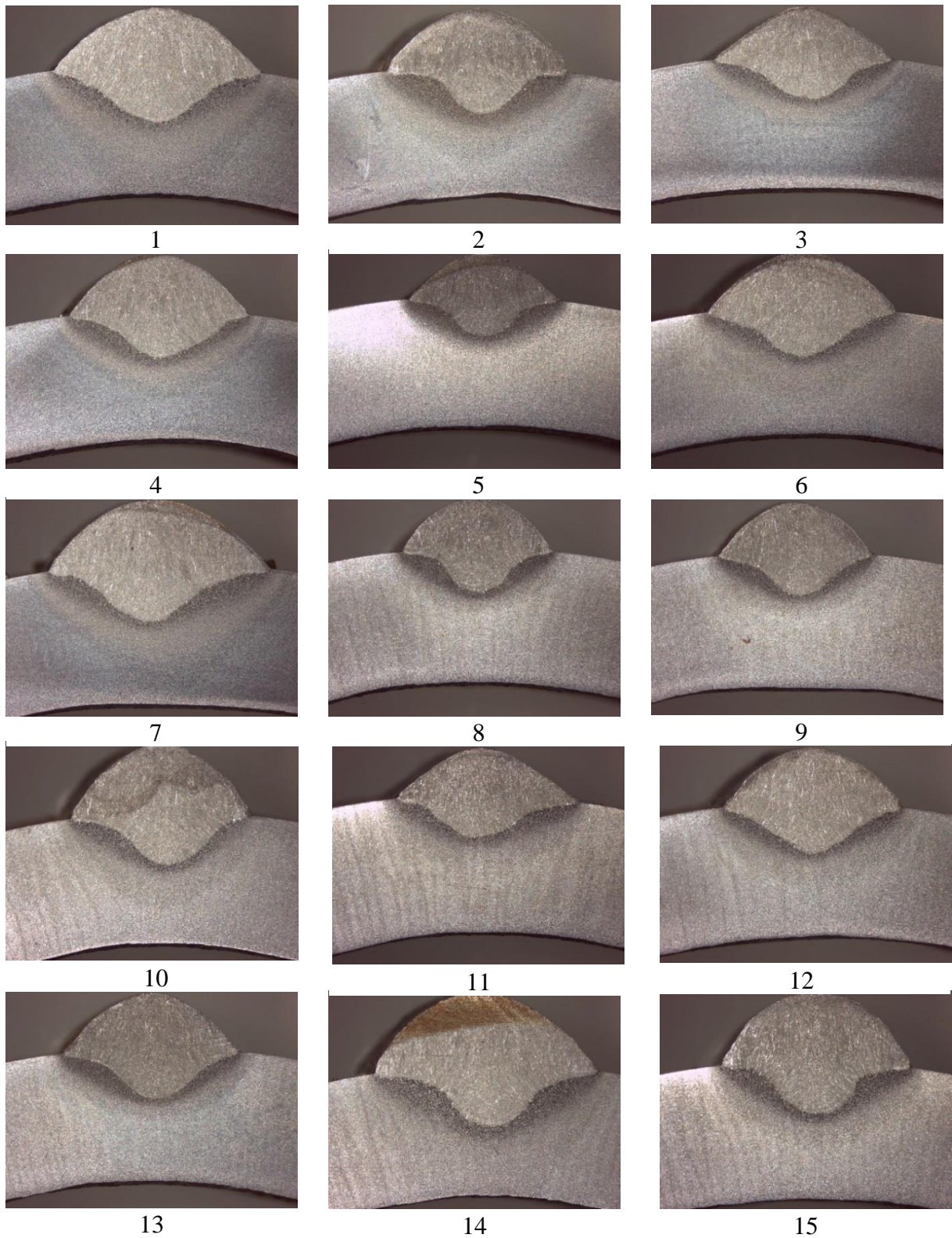


Figura A.1 - Macrografias das soldas no Calorímetro segundo os parâmetros do projeto de experimentos Box-Behnken na sequência de 1 a 15.

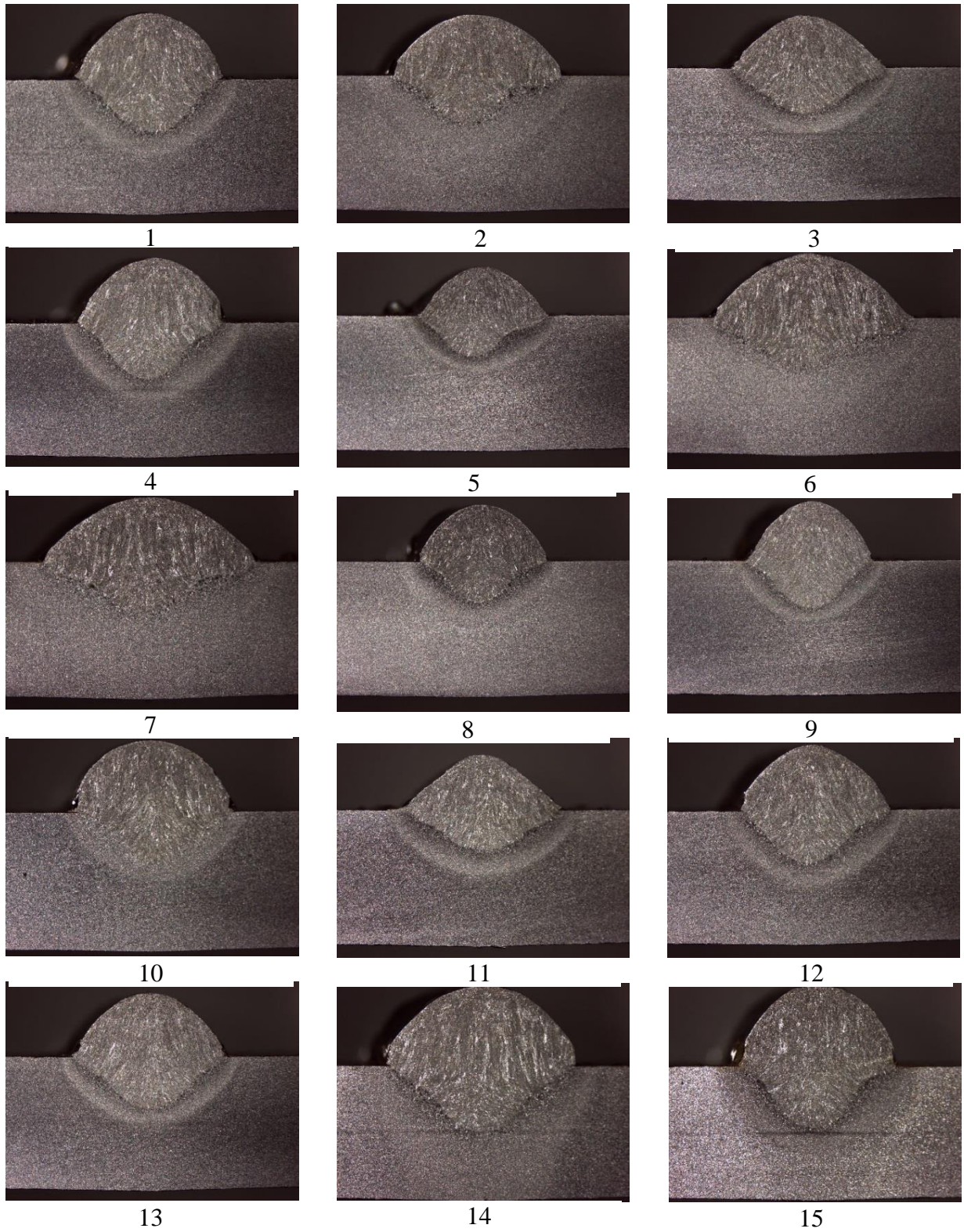


Figura A.2 - Macrografias das soldas cordão sobre chapa segundo os parâmetros do projeto de experimentos Box-Behnken na sequência de 1 a 15.

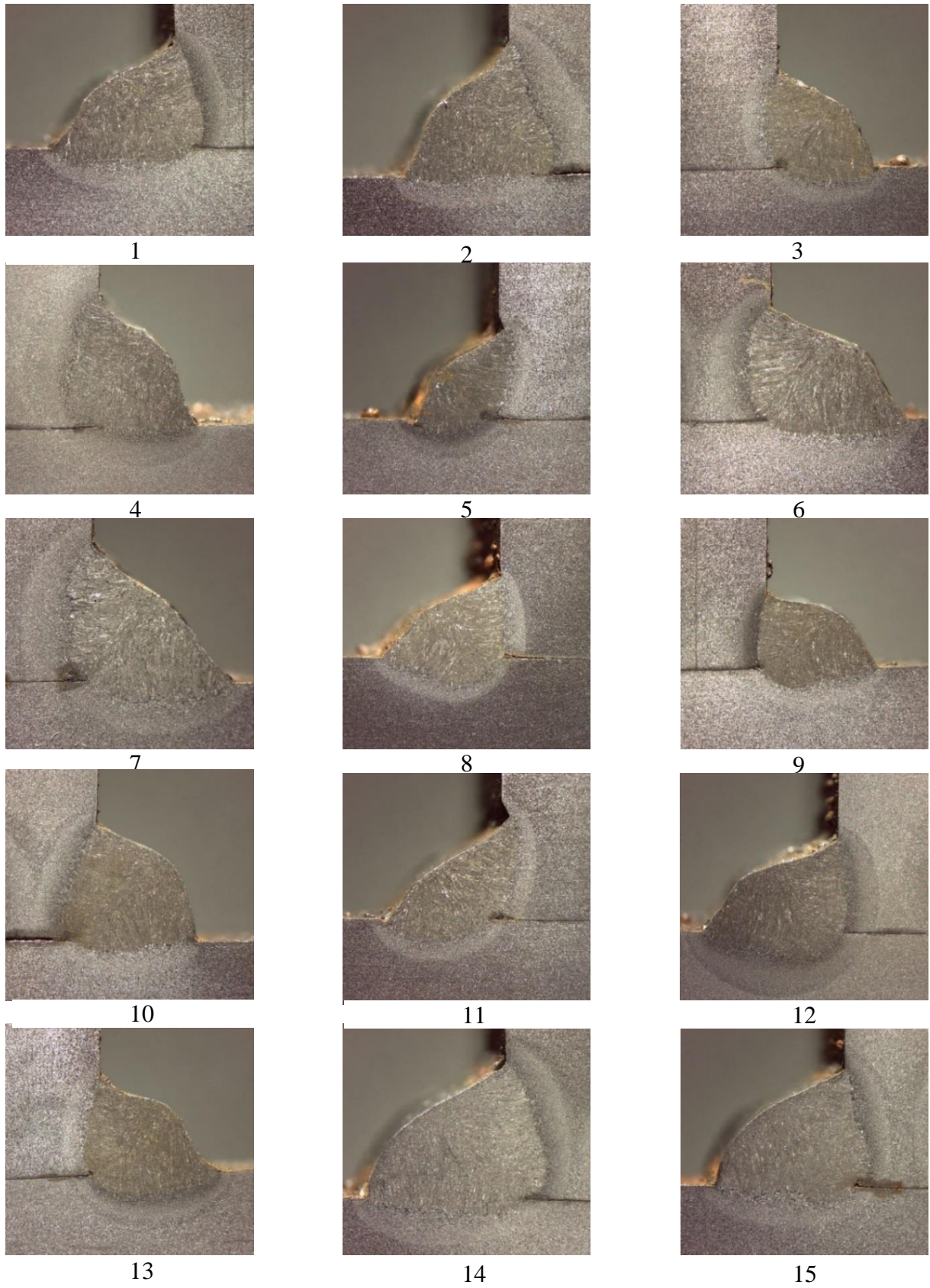


Figura A.3 - Macrografias das soldas em filete T segundo os parâmetros do projeto de experimentos Box-Behnken. A ordem é das figuras é numerada na sequência de ensaio, de 1 a 15.

APÊNDICE B

A seguir é apresentado o cálculo do desvio padrão das macrografias para as três juntas soldadas.

Tabela B.1 - Desvio padrão nas macrografias do calorímetro.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Área fundida MB (mm ²)	0,37	0,16	0,09	0,42	0,33	0,10	0,27	0,22	0,13	0,05	0,27	0,11	0,22	0,35	0,29
Área total (mm ²)	0,61	0,08	0,05	0,05	0,08	0,24	0,24	0,11	0,12	0,53	0,79	0,96	0,91	0,89	0,53
Diluição	0,51	0,57	0,52	1,72	1,89	0,27	0,70	0,98	0,88	0,78	0,41	1,22	1,10	1,45	1,15
Penetração (mm)	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03	0,02	0,04	0,03
Largura (mm)	0,10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,05	0,09	0,16	0,18	0,15	0,19	0,07
Reforço (mm)	0,02	0,05	0,03	0,07	0,04	0,03	0,04	0,02	0,04	0,06	0,04	0,12	0,07	0,09	0,05
Ref. + Pen. (mm)	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,05	0,07	0,10	0,08	0,12	0,04

Tabela B.2 - Desvio padrão nas macrografias da solda cordão sobre chapa.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Área fundida MB (mm ²)	0,04	0,08	0,12	0,13	0,03	0,08	0,14	0,12	0,03	0,07	0,10	0,07	0,04	0,06	0,03
Área total (mm ²)	0,06	0,09	0,15	0,13	0,06	0,11	0,14	0,07	0,04	0,13	0,12	0,09	0,11	0,32	0,14
Diluição	0,22	0,40	0,86	0,62	0,08	0,40	0,28	0,53	0,21	0,10	0,65	0,26	0,32	0,44	0,15
Penetração (mm)	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,09	0,01	0,01	0,05	0,05	0,02	0,00	0,02	0,01
Largura (mm)	0,07	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,11	0,04	0,03	0,08	0,00
Reforço (mm)	0,01	0,00	0,02	0,35	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
Ref. + Pen. (mm)	0,03	0,04	0,00	0,35	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,04	0,05	0,02	0,01	0,01	0,02

Tabela B.3 - Desvio padrão nas macrografias da junta T.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Área total (mm²)	0,13	0,05	0,04	0,08	0,14	0,01	0,34	0,08	0,15	0,03	0,06	0,12	0,11	0,11	0,18
Área reforço (mm²)	0,13	0,13	0,20	0,03	0,06	0,34	0,11	0,01	0,04	0,06	0,25	0,03	0,29	0,08	0,18
Área fundida MB (mm²)	0,06	0,18	0,19	0,05	0,19	0,35	0,23	0,07	0,18	0,08	0,30	0,10	0,20	0,14	0,00
Diluição	0,24	0,65	1,25	0,13	1,52	1,30	0,44	0,36	0,89	0,32	1,77	0,30	1,20	0,31	0,14
Garganta teórica (mm)	0,00	0,04	0,05	0,01	0,01	0,07	0,02	0,07	0,04	0,01	0,13	0,02	0,01	0,02	0,01
Perna na Alma (mm)	0,03	0,09	0,05	0,02	0,01	0,09	0,04	0,01	0,04	0,09	0,41	0,03	0,06	0,03	0,01
Perna na Aba (mm)	0,02	0,01	0,02	0,03	0,19	0,41	0,37	0,00	0,03	0,04	0,77	0,01	0,00	0,01	0,04
Garganta Efetiva (mm)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03	0,05

APÊNDICE C

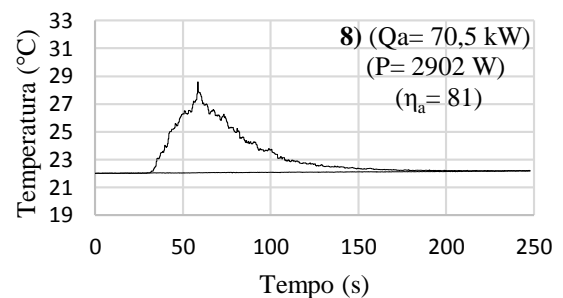
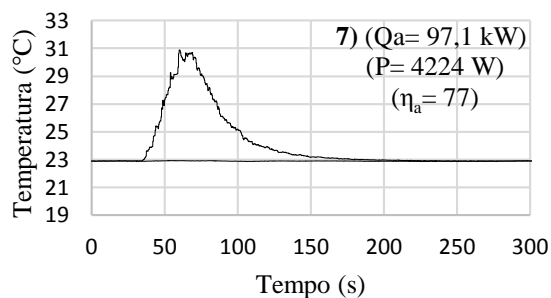
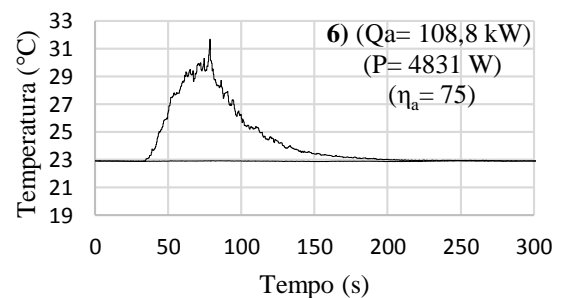
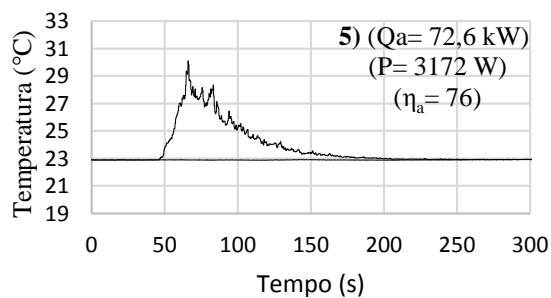
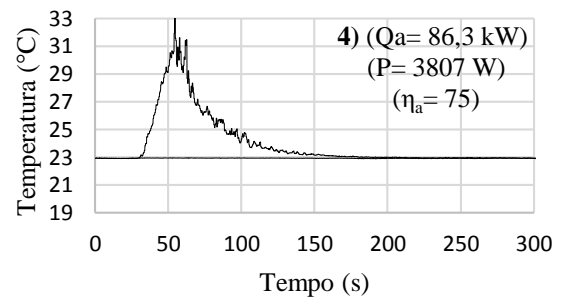
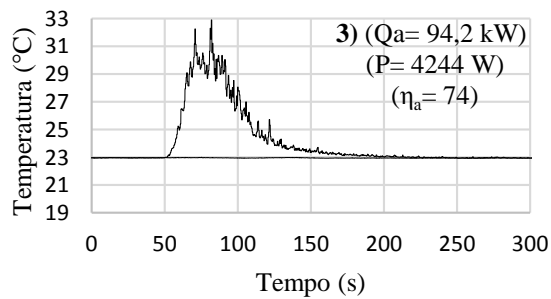
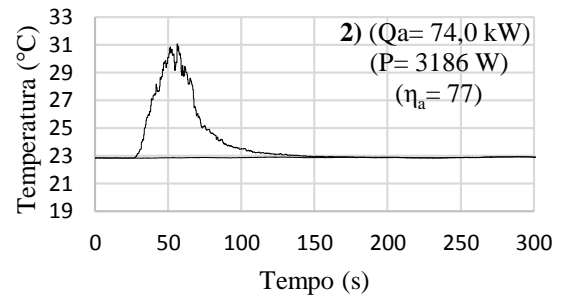
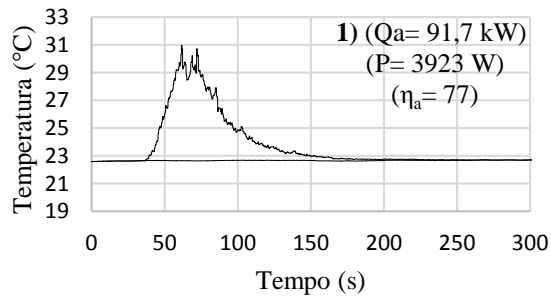
Os valores médios de potência, tensão e corrente são apresentados a seguir.

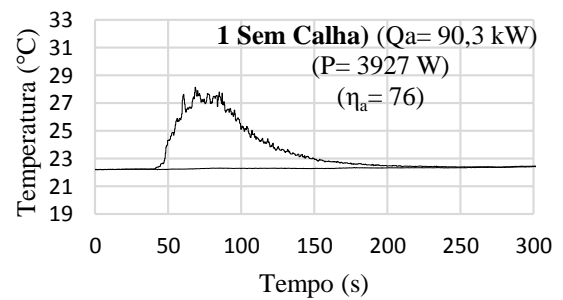
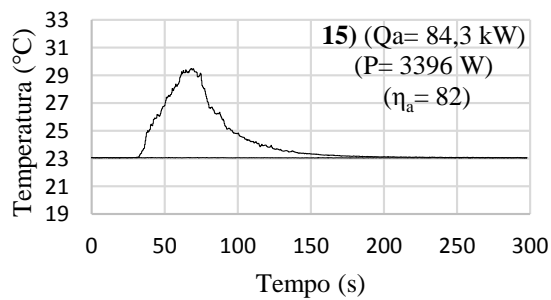
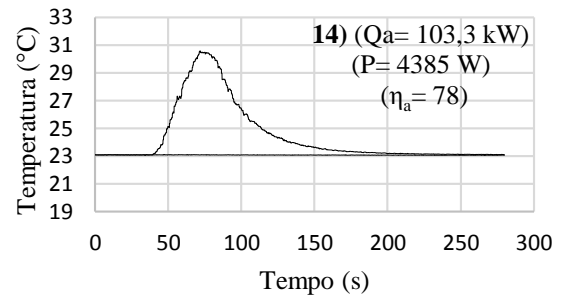
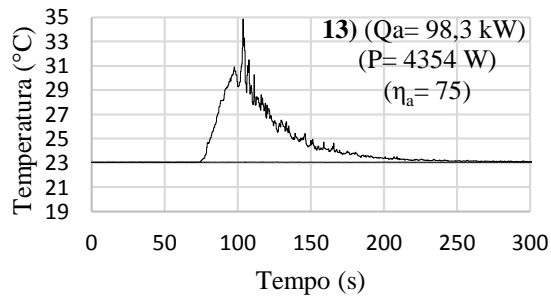
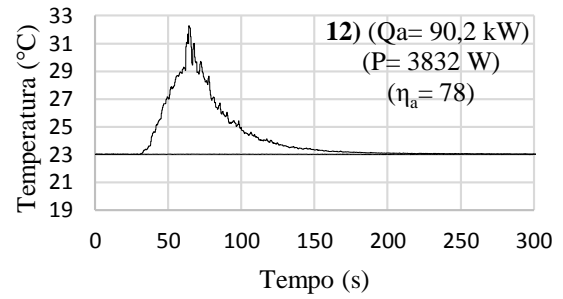
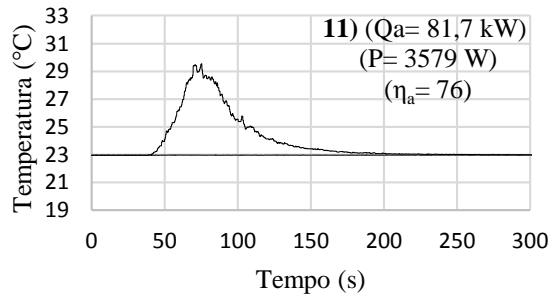
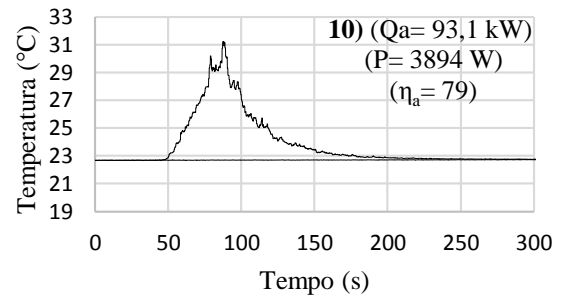
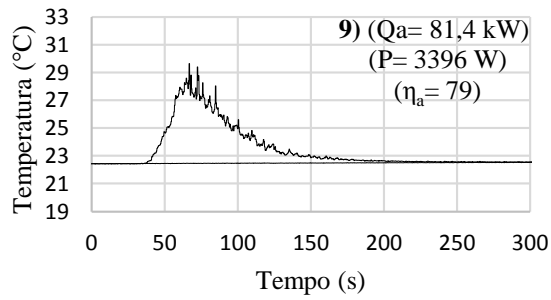
Tabela C.1 - Valores Médios de Potência, Corrente e Tensão adquiridos pelo Sistema de Aquisição de Potência (SAP) durante as soldas para o projeto de experimentos Box- Behnken.

	Calorímetro			Cordão sobre chapa			Junta T		
	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)
1	3923	193	20,7	3741	184	20,8	3954	194	20,8
2	3186	159	20,5	3184	189	20,5	3273	162	20,6
3	4242	189	22,7	4280	191	22,8	3835	189	20,7
4	3807	188	20,7	3802	188	20,7	3862	190	20,7
5	3174	157	20,5	3191	159	20,5	3127	156	20,6
6	4831	214	22,9	4833	215	22,9	4934	217	23
7	4224	189	22,7	4183	187	22,7	4272	190	22,8
8	2902	161	18,4	2787	156	18,4	2714	151	18,4
9	3396	187	18,6	3333	185	18,6	3357	185	18,6
10	3897	214	18,7	3872	217	18,6	3901	213	18,7
11	3579	160	22,6	3535	159	22,6	3399	153	22,6
12	3827	189	20,7	3773	187	20,6	3740	184	20,7
13	4365	213	20,9	4302	212	20,8	4427	216	20,9
14	4387	215	20,8	4274	211	20,8	4468	218	20,9
15	3396	187	18,6	3307	186	18,5	3382	188	18,6

APÊNDICE D

Gráficos da aquisição de temperatura para as soldas no calorímetro – Box-Behnken. O gráfico da solda 1, sem calha de proteção após a soldagem, é apresentado na última figura para comparar a influência de seu uso logo após o cordão ser soldado. A diferença é de 1,4 kW.





APÊNDICE E

Gráficos comparativos entre as eficiências de fusão.

