



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE GÁS DE PROTEÇÃO E DA
INCLINAÇÃO DA TOCHA NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM TIG

GLAUBER BUENO SOARES

Uberlândia-MG

2018

GLAUBER BUENO SOARES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE GÁS DE PROTEÇÃO E DA
INCLINAÇÃO DA TOCHA NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM TIG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como requisito para a obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia-MG

2018

GLAUBER BUENO SOARES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE GÁS DE PROTEÇÃO E DA
INCLINAÇÃO DA TOCHA NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM TIG

Trabalho conclusão de curso **APROVADO** para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela banca
examinadora formada por:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Universidade Federal de Uberlândia

Me. Diego Costa Correia Silva

Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo

Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda sabedoria e saúde ao longo dos anos de estudos.

Aos meus pais, Antônio Tadeu e Suely, por todo o suporte e incentivo dados aos meus estudos. A toda a minha família pelo apoio dado.

Ao professor e orientador Volodymyr Ponomarov, por toda disposição e conhecimento dado para a realização do trabalho.

Ao doutorando Diego Costa Correia Silva, por toda disponibilidade e dedicação oferecidos para a realização dos ensaios em laboratório.

Aos meus colegas de trabalho Kaio Guilherme Ferraz Pires, Pedro Henrique Cunha e Pedro Henrique Rodrigues Leite, pelo companheirismo e trabalho em conjunto para o sucesso deste trabalho.

Ao LAPROSOLDA, pela disponibilização dos materiais e equipamentos necessários para realização do trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivos a análise da influência da vazão de gás de proteção e inclinação da tocha de soldagem na eficiência térmica do processo de soldagem TIG. Foram usadas diferentes vazões de gás de proteção e inclinação da tocha, mantendo-se constantes os parâmetros de tensão e corrente (potência). Foram utilizados três valores distintos de vazão de gás 5 l/min, 8 l/min e 10 l/min com tocha perpendicular à peça de trabalho e inclinada em -30° e $+30^\circ$. Observou-se que, para tocha perpendicular à peça de trabalho, o melhor valor médio de eficiência térmica, de 69,22%, foi atingido com a menor vazão de gás de proteção utilizada, de 5 l/min, e que, para esta mesma vazão de gás, o melhor valor médio de eficiência térmica, de 70,66%, foi atingido em inclinação -30° , pela técnica puxando.

Palavras chave: Soldagem TIG; Eficiência Térmica; Vazão de Gás de Proteção; Inclinação da Tocha de Soldagem;

ABSTRACT

The objectives of the present work are the analysis of the influence of the shielding gas flow and inclination of the welding torch on the thermal efficiency of the TIG welding process. Different shielding gas flow rates and the inclination of the torch were used, keeping the voltage and current (power) parameters constant. Three different values of gas flow, 5 l/min, 8 l/min and 10 l/min, were used with torch in vertical position and inclinations at -30° and $+30^\circ$. It was observed that, for torch in vertical position the best average value of thermal efficiency of 69.22% was reached with the lowest shielding gas flow rate of 5 l/min and that, for this same gas flow, the best average value of thermal efficiency, of 70.66%, was reached in slope of -30° , by the pulling technique.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Representação da soldagem TIG (Martins & Industriais, 2015.).	2
Figura 2.2 - Representação da soldagem TIG. (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Volodymyr Ponomarov).	3
Figura 2.3 – Influência da inclinação da tocha de soldagem (ÁQUILA, V., 2012).	7
Figura 2.4 – Estrutura do arco elétrico.	8
Figura 2.5 – A estrutura do arco como um gerador de calor.	8
Figura 2.6 - Apresentação esquemática da entrada e da saída do calor na chapa durante soldagem (Hurtig. et al. ,2016).	10
Figura 2.7. Esquema do calorímetro de água (Esser, 1981).	14
Figura 2.8 – Esquema apresentando o calorímetro de fluxo contínuo de água com uma placa sendo soldada (Adaptado de Lu e Kou, 1989).	15
Figura 2.9. Esquema calorímetro fluxo contínuo de água (Lu e Kou, 1989).	16
Figura 3.1 – Recipiente de Armazenamento de água.	19
Figura 3.2 – Montagem da bancada de testes.	19
Figura 3.3 – Bolha de ar retido dentro do calorímetro.	20
Figura 3.4 – Sensor Hall e receptor de sinal elétrico de tensão.	21
Figura 3.5 – Placa de aquisição de temperatura.	22
Figura 3.6 - Fonte de Soldagem Multiprocesso Inversal 450.	22
Figura 3.7 - Escolha dos valores das variáveis do processo TIG por Professor Dr. Volodymyr Ponomarov.	24
Figura 3.8 - Gráfico de aquisição de tensão e corrente.	25
Figura 3.9 – Gráfico de aquisição de temperaturas.	26
Figura 3.10 – Cortadora Metalográfica.	27
Figura 3.11 – Macrografia de cordão de solda.	27
Figura 4.1 - Posicionamento perpendicular da tocha de soldagem.	29
Figura 4.2 - Posicionamento da tocha de soldagem para técnica puxando.	32
Figura 4.3 - Posicionamento da tocha de soldagem para técnica empurrando.	32
Figura 4.4 - Corte de seções transversais dos cordões.	35
Figura 4.5 - Cordão de solda obtido pela técnica puxando.	35
Figura 4.6 - Cordão de solda obtido pela técnica empurrando.	35

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Eficiências térmicas (k) de diferentes processos de soldagem (valores determinados de maneira experimental).	11
Tabela 2.2. Eficiência térmica (k) de processos de soldagem (conforme a Norma EN 1011-1).	17
Tabela 3.1 - Dados Técnicos da Fonte.....	23
Tabela 3.2 – Planejamento de dados com variação de vazão de gás de proteção.	28
Tabela 3.3 – Planejamento de dados com variação da inclinação da tocha.	28
Tabela 4.1 – Valores atingidos em soldagem TIG, com variação de vazão de gás de proteção.	30
Tabela 4.2 - Valores médios de eficiência térmica para cada vazão de gás.....	30
Tabela 4.3 – Valores médios atingidos de geometria dos cordões, com variação de vazão de gás de proteção.....	31
Tabela 4.4 – Valores obtidos em soldagem TIG, com variação da inclinação da tocha.....	33
Tabela 4.5 – Valores médios obtidos em soldagem TIG, com variação da inclinação da tocha.	33
Tabela 4.6 – Valores médios obtidos da geometria dos cordões, com variação da inclinação da tocha.	34

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
AWS	Sociedade Americana de Soldagem
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DEP	Distância Eletrodo Peça
EN	Norma Europeia
EPS	Especificações de Procedimento de Soldagem
ER	Eletrodo Revestido
MIG/MAG	Metal Inert Gas/Metal Active Gas
SAW	Submerged Arc Welding (Arco Submerso)
TIG	Tungsten Inert Gas (Tungstênio Inerte Gás)
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SÍMBOLOS

k	Eficiência térmica, %
I	Corrente, A
U	Tensão, V
P	Potência, W
E_s	Energia de soldagem, J
CI	Calor imposto, J/mm
ρ	Densidade, kg/m ³
v	Velocidade de soldagem, mm/s
C_{pw}	Calor específico, kJ/Kg .°C
t	Tempo, s
W	Fluxo mássico de alimentação de água, kg/s
T_w	Temperatura da água, °C

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Processo de soldagem TIG	2
2.2	Variáveis de operação	4
2.2.1	Gás de proteção	5
2.2.2	Vazão do gás de proteção.....	6
2.2.3	Inclinação da tocha TIG	7
2.3	Arco Elétrico	7
2.4	Perdas de Calor do Processo de Soldagem.....	9
2.5	Potência do Arco Elétrico e Eficiência Térmica de soldagem	11
2.5.1	Cálculo do Calor Absorvido na Soldagem.....	12
2.6	Calorimetria.....	14
2.6.1	Calorímetro de Fluxo Contínuo de Água.....	14
2.7	Normas Internacionais para o cálculo do Calor Imposto	16
3	METODOLOGIA.....	18
3.1	Descrição da bancada de testes e equipamentos.....	18
3.1.1	Sistema de Alimentação de água	18
3.1.2	Bancada	19
3.1.3	Sistema de aquisição de dados do calorímetro	21
3.2	Fonte de Soldagem.....	22
3.3	Metodologia de cálculos	23
3.3.1	Parâmetros definidos.....	23
3.3.2	Cálculo da energia de soldagem	24
3.3.3	Cálculo do calor absorvido.....	25
3.3.4	Cálculo da eficiência térmica	26

3.4	Análise geométrica do cordão	27
3.5	Planeamento experimental	28
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	29
4.1	Variação de gás de proteção	29
4.2	Variação da inclinação da tocha	32
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

Na soldagem por fusão a arco elétrico, o fenômeno da transferência de calor para o metal de base determina quase todas as características e propriedades da junta soldada:

- ✓ A geometria do cordão, influenciando na penetração e reforço;
- ✓ A microestrutura resultante do metal de junta soldada (o calor pode alterar a microestrutura principalmente na zona afetada pelo calor - ZAC);
- ✓ As propriedades da junta.

As propriedades mecânicas da junta, como a resistência e a tenacidade, dependem de vários fatores metalúrgicos que são alterados durante o processo de soldagem, devido as transformações de fase durante o ciclo térmico sofrido.

Existem grandes dificuldades de previsão dos resultados de soldagem, pois embora o calor gerado pelo arco seja de fácil quantificação, o calor absorvido pelo metal de base ainda é uma incógnita de difícil avaliação, sabendo que apenas uma parte do calor é aproveitada para criar a solda. Há muitas perdas de calor para o meio ambiente no caminho “arco – metal base”. Essas perdas de calor podem ocorrer por convecção, radiação e condução. A razão entre o calor absorvido pela peça de trabalho e a energia elétrica total gerada pelo arco é usada como um indicativo da eficiência térmica do processo (k).

O índice da eficiência térmica do processo é usado no cálculo de outro índice importante na caracterização do processo de soldagem, a saber, o Calor Imposto (CI). O CI é definido pela Sociedade Americana de Soldagem (AWS, 2001), como a energia entregue para a peça. Mas, muitas vezes o termo é usado para “energia de soldagem” e vice-versa (LISKEVYCH O., 2014). Infelizmente, o CI calculado conforme recomendado pelas normas vigentes, utilizando um valor fixo do k (EN 1101-1), pode ser bem diferente do valor real do CI, logo o benefício dele para a avaliação do processo de soldagem é duvidoso (SILVA, D., 2018).

O objetivo deste trabalho direcionou-se ao estudo da “robustez” do valor da eficiência térmica (k) no processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), variando os parâmetros do processo TIG considerados como não essenciais como a vazão de gás de proteção e inclinação da tocha de soldagem buscando saber se há ou não influência da variação destes parâmetros sobre o valor do índice k .

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de soldagem TIG

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) é realizado utilizando-se eletrodos de tungstênio não consumíveis, na qual a união de peças metálicas ocorre por fusão a arco elétrico do metal de base, sob atmosfera protetora inerte (Figura 2.1). O calor gerado pelo arco provoca a fusão da peça de trabalho formando uma poça de fusão. A atmosfera protetora adequada para o processo é obtida através de um gás inerte, podendo ser argônio ou hélio, ou até mesmo uma mistura entre os gases, responsável pela proteção do eletrodo e da poça de fusão contra efeitos de oxidação e contaminações externas.

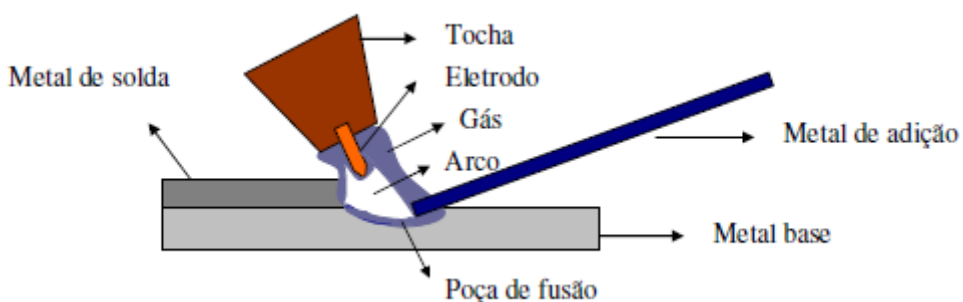


Figura 2.1 – Representação da soldagem TIG (Martins & Industriais, 2015.).

Apesar de não haver consumo do eletrodo de tungstênio, no processo TIG pode ser realizado com metal de adição, em que a adição é realizada manualmente pelo soldador através de uma vareta ou automaticamente através de um alimentador, que fornece arame necessário para a adição.

O conjunto de equipamentos necessários para a soldagem TIG é composto pela fonte de energia, a tocha de soldagem, uma fonte de gás de proteção, eletrodo, e cabos de soldagem (Figura 2.2).

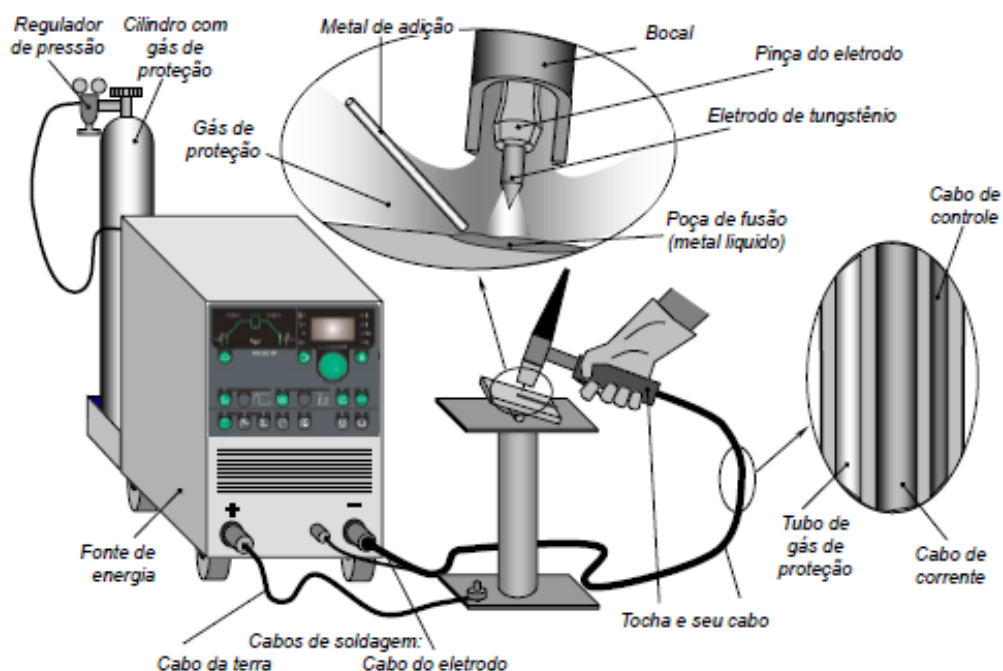


Figura 2.2 - Representação da soldagem TIG. (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Volodymyr Ponomarov)

A fonte de energia utilizada deve apresentar característica estática do tipo corrente constante. Neste caso, a corrente é ajustada diretamente na fonte, entre uma faixa de valores determinado pelos termos de projeto, e a fonte deve fornecer um valor médio aproximadamente constante para qualquer tensão de soldagem.

A tocha de soldagem é um componente importante para o processo, pois atua na sustentação do eletrodo de tungstênio, este responsável pela abertura do arco de soldagem, e o bocal, com a função de direcionar o gás de proteção para a poça de fusão. Por estar próxima ao arco elétrico, é necessária a refrigeração da tocha devido à recepção de calor que é dissipado no processo. É possível fazer a refrigeração da tocha através de gás, até mesmo do próprio gás de proteção, mas também utilizando água. Os cabos de soldagem conectam a tocha à fonte de energia, à fonte de gás de proteção e ao sistema de refrigeração.

Como material de eletrodo utiliza-se o tungstênio, para condução de corrente até o arco elétrico. A composição do eletrodo pode variar em tungstênio puro ou com adição de óxido de tório, lantânio ou zircônio, elementos adicionados com o intuito de amplificar a capacidade de condução elétrica. O diâmetro do eletrodo determina a faixa de corrente de trabalho. O ângulo

de afiação da ponta do eletrodo garante melhor emissão de elétrons por gerar arco mais estável influenciando no formato do cordão de solda.

O bocal é uma peça cerâmica ou metálica fixada na extremidade da tocha de soldagem, produzido em diversos tamanhos, com a função de direcionar o gás de proteção em regime laminar. O comprimento e diâmetro do bocal são determinados pelo diâmetro do eletrodo, pelo nível de corrente de trabalho e pela vazão de gás de proteção.

A alimentação de gás de proteção geralmente é feita por cilindros de alta pressão com regulador de vazão. A vazão de gás depende da velocidade de soldagem, das condições de ventilação no local de trabalho da distância do bocal à peça e do material do metal de base. A função do gás é proteger toda a extensão da região de soldagem, garantindo eliminação de contaminantes presentes em atmosfera e evitando a oxidação do eletrodo.

2.2 Variáveis de operação

As variáveis de operação no processo TIG são a corrente de soldagem, diâmetro e ângulo de afiação do eletrodo, comprimento do arco, velocidade de soldagem, tipo e vazão do gás de proteção, polaridade da corrente (dependendo do tipo da fonte pode escolher entre CC-, CA ou pulsada) e alimentação do metal de adição.

A soldagem TIG em corrente contínua de polaridade direta provoca um fluxo de elétrons no sentido do eletrodo para o metal de base e um fluxo de íons positivos em direção ao eletrodo, levando a fusão do metal. O ajuste da corrente de soldagem feito é diretamente na fonte de energia, devido a característica estática do processo TIG ser de corrente constante.

Em corrente contínua de polaridade reversa, o fluxo de elétrons passa a seguir no sentido da peça de trabalho para o eletrodo e os íons positivos na direção à peça. Neste caso, com a polaridade do eletrodo invertida, o fluxo de elétrons aquece o eletrodo, sendo necessário maior diâmetro para que não haja fusão do mesmo. O fluxo de íons positivos apresenta um papel interessante nesta ocasião, pois eliminam camadas de óxidos presentes na superfície da peça quando os íons entram em contato com a mesma, fenômeno conhecido por limpeza catódica.

O comprimento do arco, distância entre a extremidade do eletrodo e a peça de trabalho, é um parâmetro determinado pela tensão do arco elétrico. A tensão é uma variável importante

na soldagem TIG, pois quanto maior o comprimento do arco elétrico, maior o valor da tensão, causando um aumento na energia gerada pelo arco. Em relação a geometria do cordão de solda, para um arco mais longo, maior o acoplamento arco – peça, aumentando a largura do arco, tornando-o menos concentrado, o que reduz penetração e reforço. Porém, arcos mais longos sofrem maiores perdas de calor para o meio ambiente.

A velocidade de soldagem está associada à qualidade geométrica da solda, somado aos custos de produtividade do processo. Quanto maior a velocidade de soldagem, melhor a produtividade de operação, porém, ocasiona alterações no cordão de solda. A velocidade limita o tamanho da área fundida, uma vez que, velocidades maiores restringem o tamanho da área fundida, ocasionando em perda de nível de penetração e largura do cordão. Há riscos de ocorrência de defeitos, como falta de penetração e mordeduras. Portanto, geralmente a velocidade de soldagem é determinada pela qualidade desejada da geometria do cordão de solda

Parâmetros como vazão de gás de proteção e inclinação da tocha de soldagem são dados como não essenciais para a soldagem quando comparados com os parâmetros elétricos tensão e corrente. Neste trabalho será dada maior atenção aos parâmetros de gás de proteção, vazão de gás e inclinação da tocha de soldagem, discutidos a seguir.

2.2.1 Gás de proteção

Os gases de proteção utilizados no processo TIG têm a função de formar e estabilizar o arco elétrico, proteger tanto o eletrodo de tungstênio da oxidação (o eletrodo, se oxidado, perde a sua propriedade de alta emissividade eletrônica desestabilizando o arco elétrico), mas também a poça de fusão de contaminantes atmosféricos, e também atuar como gás de purga, protegendo o lado contrário da solda dos efeitos de oxidação.

Os gases utilizados neste processo devem ser inertes, sendo mais utilizados argônio e hélio, podendo haver até mesmo mistura destes, e em alguns casos, mistura entre argônio e hidrogênio.

O argônio utilizado neste processo apresenta algumas vantagens em relação ao hélio, se sobressaindo em características como custo reduzido, ótima abertura e estabilidade do arco, maior resistente às correntes de ar laterais, apresenta uma melhor ação de limpeza e, por possuir uma alta densidade relativa, fornece uma boa proteção ao eletrodo, ao arco e à poça de fusão a

menores vazões em relação ao gás hélio, o que afeta no maior consumo de hélio, gerando maiores custos. Apesar de proporcionar uma penetração de solda satisfatória, a penetração é menor em relação à utilização do hélio. Neste caso, a menor penetração torna-se útil na soldagem de materiais de menor espessura, ou até mesmo em soldagens verticais ou sobre cabeça.

O gás hélio possui alta condutividade térmica, bem superior ao argônio, favorecendo maior geração e transferência de calor para a peça de base e à poça de fusão, proporcionando soldas com boa penetração e molhabilidade. Sua aplicação torna-se mais propícia para soldagem de peças de maior espessura ou materiais de alta condutividade térmica, como o cobre. Entretanto, utilizá-lo puro apresenta desvantagens relacionadas ao seu alto custo e à baixa densidade relativa, necessitando de maiores vazões, elevando ainda mais os custos da soldagem.

Como alternativa, a mistura de gases argônio e hélio fornece características intermediárias entre os dois gases, podendo ser esta a melhor escolha de gás de proteção para determinadas aplicações. O hidrogênio, apesar de não ser um gás inerte, tem característica redutora podendo ser adicionado ao argônio em quantidades reduzidas, menores que 5%, afim de aumentar a penetração de solda e a velocidade na soldagem automatizada de aços inoxidáveis, por exemplo.

2.2.2 Vazão do gás de proteção

A vazão do gás de proteção atua na qualidade e custo da solda. Vazões muito baixas podem não fornecer uma proteção adequada, ocasionando a oxidação do cordão de solda e formação de porosidade, entre outros defeitos. Vazões muito altas favorecem a ocorrência de fluxo turbulento, com riscos de causarem os mesmos defeitos da baixa vazão, além de encarecem o processo pelo alto consumo de gás.

Em literatura, não é muito abordada a relação entre a vazão do gás de proteção e eficiência térmica nos processos de soldagem.

2.2.3 Inclinação da tocha TIG

A inclinação da tocha de soldagem em relação à direção de deslocamento influencia diretamente na forma do banho de solda e no nível de penetração que pode ser obtido. Para velocidade de deslocamento constante, é possível obter cordões de solda mais homogêneos e limpos em relação à tocha perpendicular à peça de trabalho.

Existem 3 formas de posicionamento da tocha, conforme ilustra a Figura 2.3.

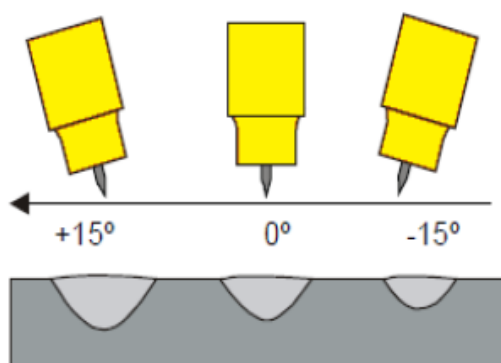


Figura 2.3 – Influência da inclinação da tocha de soldagem (ÁQUILA, V., 2012)

Em relação aos sinais positivo e negativo, há divergências entre autores quanto a sinalização, visto que não existe uma padronização para determinar se o ângulo de inclinação da tocha pelas técnicas puxando e empurrando são definidos pela Figura 2.3.

2.3 Arco Elétrico

O arco voltaico é caracterizado por complexos fenômenos físico-químicos que resultam na geração de grande quantidade de calor e luz. Pode-se dizer que o arco elétrico se representa um perfeito conversor da energia elétrica em energia térmica (perdendo energia apenas na forma de luz visível e de som). Os processos de soldagem, tais como por Eletrodo Revestido (ER), TIG, MIG/MAG, Arco Submerso (SAW), etc., se utilizam do calor produzido para fundir (dependendo do tipo de processo) o eletrodo consumível, o fluxo, o revestimento do eletrodo e o metal de base. O eletrodo de tungstênio no processo TIG também precisa ser aquecido para providenciar a emissão termiônica de elétrons.

O arco elétrico é composto pelas três zonas: zona anódica, zona catódica e a coluna do próprio arco, conforme Figura 2.4, com o calor gerado pelo arco “parcelado” entre elas.

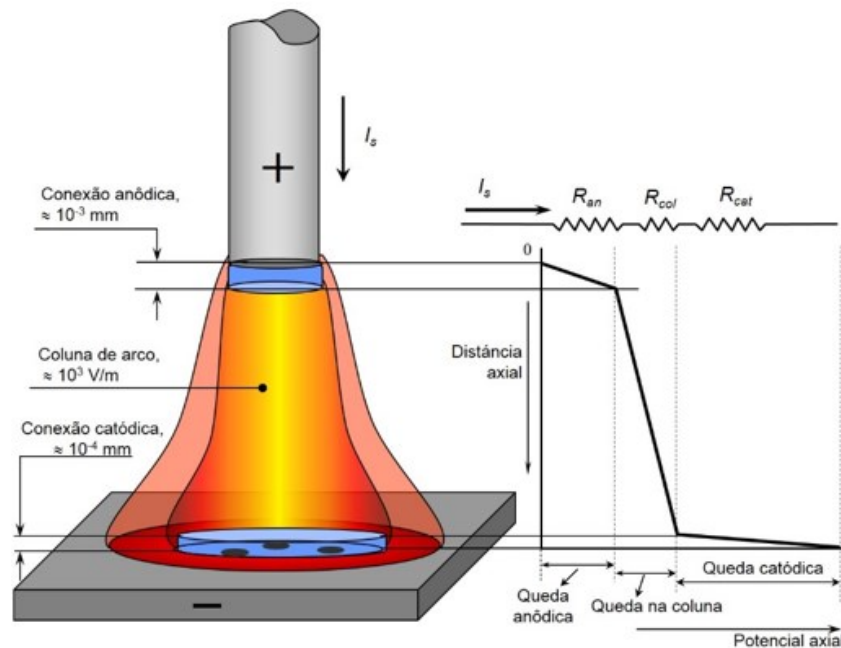


Figura 2.4 – Estrutura do arco elétrico

O calor gerado nas zonas anódica e catódica é aplicado exatamente onde é necessário, a saber, na ponta do eletrodo e na superfície de metal base. Levando em consideração que essas zonas representam películas com espessuras desprezíveis, quase todo o calor gerado nelas é aproveitado para fundir o metal de base e o eletrodo consumível (ou para aquecer o eletrodo não consumível), como ilustrado na Figura 2.5. Boa parte do calor gerado na coluna de arco é perdida na forma de radiação e convecção para o ambiente.



Figura 2.5 – A estrutura do arco como um gerador de calor.

2.4 Perdas de Calor do Processo de Soldagem

Nos processos de soldagem, sabe-se que uma parte da energia gerada pelo arco é dissipada. Esta parcela de energia é perdida através de fenômenos de transferência de calor, como condução, convecção e radiação. Há também perdas por geração de vapores metálicos e respingos. Embora seja um processo complexo quantificar o calor que é cedido a atmosfera durante abertura e fechamento do arco elétrico, pesquisas foram realizadas para conhecer melhor as fontes de perda.

Neste contexto, Pépe (2010) em sua pesquisa, concluiu que a transferência de calor por condução é o mecanismo mais presente na energia real imposta na peça durante a soldagem a arco. Segundo DuPont e Marder (1995), a maior parte da energia total gerada pelo processo é fornecida pelo arco elétrico e apenas uma pequena parte é fornecida pelo eletrodo. A energia total (energia fornecida pelo eletrodo somada com a do arco) é transferida em parte para a peça, enquanto o restante perde-se para o meio. Os autores observaram que as perdas energéticas são aproximadamente 1% da energia total do arco. Do calor que é entregue na peça, uma parte dela é utilizada na fusão do metal e a outra é transferida por condução aumentando a sua temperatura.

As perdas entre a energia de soldagem e o calor aportado não são dependentes somente do processo de soldagem, mas dos parâmetros do processo e de características do material de base, o que não permite o uso de um único valor de rendimento térmico para um dado processo como valor absoluto (SCOTTI *et al.*, 2012).

A transferência de calor no processo de soldagem ocorre de três maneiras segundo Scotti *et al.*, 2012. A primeira maneira ocorre na conexão arco-peça (o calor gerado na espessura anódica ou catódica), a transferência do calor gerado nessa conexão é por condução contribuindo para a formação da poça de fusão (Figura 2.6). Quanto maior é a corrente, mais calor é transferido para a superfície da chapa (pois um aumento na corrente favorece a geração de calor nas três zonas do arco elétrico).

A segunda maneira de transferência ocorre, pois, uma parcela do calor que é gerada no acoplamento arco-eletrodo é transferido para a chapa é através das gotas do eletrodo consumível (Figura 2.6) que caem sobre a poça de fusão. Soderstrom *et al.* encontrou esta quantidade do calor como sendo 20 a 30% da energia total de soldagem, dependendo do material e tipo da transferência metálica. Em processos como TIG, o calor gerado no acoplamento arco-eletrodo

2.5 Potência do Arco Elétrico e Eficiência Térmica de soldagem

A eficiência térmica da soldagem TIG, conforme Stenbacka *et al.* 2012, apresenta um papel importante na avaliação e estimativa do desempenho do processo, no cálculo de taxas e tempos de resfriamento, e também na modelagem de características de fusão.

Diversos métodos vêm sendo desenvolvidos, para o estudo do calor gerado pelo arco que é efetivamente absorvido pela peça. Essa quantificação do calor pode ser feita por métodos teóricos (analíticos e numéricos) ou por métodos empíricos (calorimetria). Existe uma grande dispersão dos resultados publicados sobre o aproveitamento do calor gerado pelo arco elétrico em processos de soldagem, obtidos tanto por métodos teóricos, como experimentais.

O valor das perdas de calor depende das características de cada processo de soldagem a arco, cada processo apresenta valores de eficiência térmicas (k) diferentes como mostrado na Tabela 2.1. Tal discrepância pode ser explicada tanto por erros experimentais, como pela dependência do valor da eficiência térmica do processo para cada parâmetro elétrico do arco, a saber, para corrente e para tensão.

Tabela 2.1 – Eficiências térmicas (k) de diferentes processos de soldagem (valores determinados de maneira experimental).

ER	TIG	MIG/MAG	SAW	Fonte
70 - 80%	20 - 50%	70 - 85%	90 - 99%	DUTTA, 1994. DuPONT e MARDER, 1995.
90%	30 - 60%	70 - 80%	90%	NILES e JACKSON, 1975. MISHRA e DEBROY, 2005.
75%	60 - 80%	85%	90%	BAG e DE, 2010.

Para determiná-la, é necessário conhecer outros parâmetros, como a potência do arco elétrico, energia de soldagem e o calor efetivamente absorvido pelo metal de base.

A potência instantânea média é calculada a partir do somatório do produto da corrente e da tensão em cada instante, dividido pelo número de pontos adquiridos pelo processo de soldagem, conforme Equação 2.1.

$$\bar{P}_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i * I_i)}{n} \quad (2.1)$$

Onde tensão de soldagem (U_i) é dada em Volt, (v) e corrente de soldagem (I_i) em Ampere [A].

No trabalho de Nascimento *et al.* (2007), verificou-se diferentes métodos para o cálculo da energia do arco. Utilizando o teorema da esperança os autores demonstraram que os métodos mais apropriados são o do cálculo da potência instantânea média e da potência instantânea quadrática média, uma vez que estes podem ser utilizados nos casos em que a tensão e a corrente de soldagem são dependentes, (Sgarbi, 2013).

A energia de soldagem é então calculada conforme Equação 2.2, sendo a razão entre a potência elétrica a instantânea, e v a velocidade de deslocamento da tocha de soldagem.

$$E_s = \frac{\bar{P}_{inst}}{v_s} \quad (2.2)$$

Onde a energia de soldagem (E_s) é dada em Joule por milímetro (J/mm) e a velocidade de soldagem (v_s) em milímetro por segundo [mm/s].

A eficiência térmica k , então, pode ser calculada, a partir das Equações 2.1 e 2.2, como apresentado pela Equação 2.3.

$$k = \frac{Q_a}{\bar{P}_{inst} * t_s} \quad (2.3)$$

Onde o calor que chega até a peça (Q_a) é dado em Joule (J), a potência em Watts (W) e o tempo de solda (t_s) em segundo (s).

2.5.1 Cálculo do Calor Absorvido na Soldagem

O aporte térmico que ocorre durante o processo de soldagem tem sido estudado por diferentes pesquisadores. Rosenthal (1941) um dos primeiros ao estudar a transferência de calor durante os processos de soldagem desenvolveu um modelo teórico apresentando as seguintes considerações:

As propriedades físicas do material de base se mantêm constantes durante o processo de soldagem;

- A fonte de calor é considerada pontual;
- Não ocorre troca de calor por convecção na poça de fusão;
- O fluxo de calor em uma peça com comprimento supostamente infinito é considerado estacionário ou quase-estacionário;
- Perdas de calor para atmosfera são desconsideradas;
- O calor proveniente do metal de adição não é levado em conta nos cálculos.

Através de suas deduções, o autor obteve a Equação 2.4, que demonstra o fluxo de calor durante a soldagem de placas finas, considerando largura infinita e fonte de calor pontual em Joule (J), e com velocidade em metros por segundo (m/s):

$$T - T_0 = \frac{Q_f}{2\pi k g} * \exp(-\varphi * v * x) * K_0 * (\varphi * v * r) \quad (2.4)$$

Onde T é a temperatura do ponto e T_0 é a temperatura inicial, e os dois valores em Kelvin (K), condutividade do corpo é dado em (W/m·K), espessura em metro, difusividade térmica do corpo em [m²/s], distância do ponto até a origem em metro (m).

Kou e Le (1984), foram um dos primeiros a desenvolver modelos computadorizados. O modelo desenvolvido foi utilizado no estudo do fluxo de calor na soldagem TIG de tubos, no caso de três dimensões e estático, foi conseguido resultados de ciclos térmicos e de região de fusão próximos aos que foram obtidos experimentalmente.

Mais recentemente, Scotti *et al.*, 2012, propuseram um modelo descritivo mais abrangente para melhor entender os efeitos do fluxo de calor nos processos soldagem. Ele foi dividido em duas partes: a primeira considerando o balanço de energia no arco elétrico e a segunda descrevendo o fluxo de calor no metal de base. Com o uso dos modelos desenvolvidos, eles verificaram a imprecisão das simplificações realizadas nos modelos analíticos. No estudo, os autores também propõem o uso do termo “calor imposto efetivo”, o qual está relacionado com o calor imposto que realmente afeta a velocidade de resfriamento nas regiões aquecidas do metal de base. Este termo seria uma maneira mais adequada de se correlacionar a energia de soldagem com as transformações metalúrgicas que ocorrem durante os processos de soldagem. Conforme o proposto por Scotti *et al.*, 2012, para o mesmo calor imposto obtido através de experimentos com calorimetria, o calor imposto efetivo pode ser diferente.

2.6 Calorimetria

Métodos calorimétricos em soldagem são procedimentos experimentais que determinam a parcela da energia de soldagem que foi transferida para a peça devido à soldagem (LISKEVYCH, 2014).

Os calorímetros são utilizados para o estudo empírico (experimental) da eficiência térmica durante o processo de soldagem, consiste em um sistema que promove a medição de transferência de calor. Segundo Sgarbi (2003), os resultados que são obtidos empregando os métodos calorimétricos experimentais, mostram grande nível de satisfação, pelo fato de nelas estarem contidas as principais variáveis do processo de soldagem e os métodos numéricos e analíticos são muito limitados ao modelo utilizado e às aproximações realizadas.

2.6.1 Calorímetro de Fluxo Contínuo de Água

O processo mais utilizado para a quantificação da eficiência em processos de soldagem é o calorímetro de água. Os primeiros a fazer esse tipo de experimento foram Essers e Walter (1981). A transferência de calor total é medida em uma placa submersa com apenas a superfície superior descoberta para receber um cordão de solda que será depositado, registrando assim a variação de temperatura da água. Uma constante homogeneização da água é, às vezes, garantida através de um misturador, como pode ser observado na Figura 2.7.

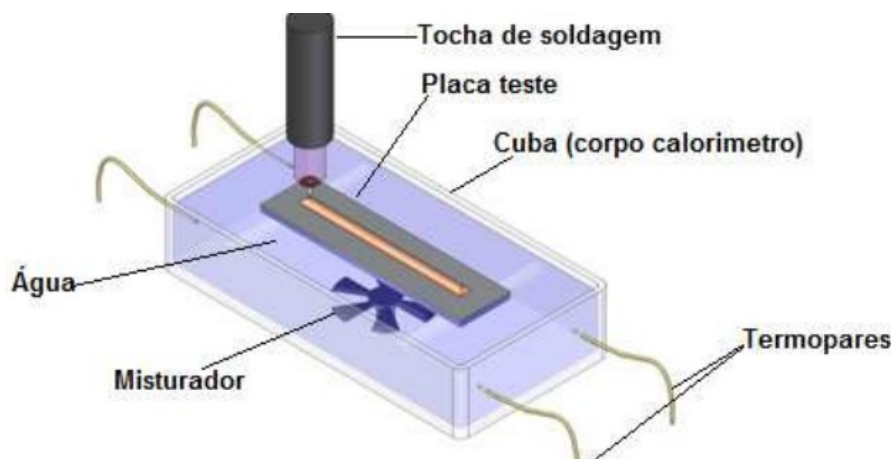


Figura 2.7. Esquema do calorímetro de água (Esser, 1981)

É utilizado um termopar do tipo K para a medida da temperatura, uma junta fria de referência e um voltímetro. O aporte térmico foi calculado pela lei de resfriamento de Newton, depois de esperar 15 segundos depois de finalizar o processo de soldagem.

Outro tipo de calorímetro utilizado na medição da eficiência térmica e aporte térmico é o de fluxo contínuo de água. Nesse calorímetro, um fluxo constante de água passa pelo um tubo que contém uma resistência elétrica localizada ao longo do eixo longitudinal. A potência é regulada pela tensão e corrente da resistência elétrica. O fluxo tem um aumento de temperatura quando passa pela resistência elétrica, as temperaturas são medidas por dois termopares na entrada (T_1) e na saída (T_2), a Figura 2.8 mostra o funcionamento desse tipo de calorímetro.

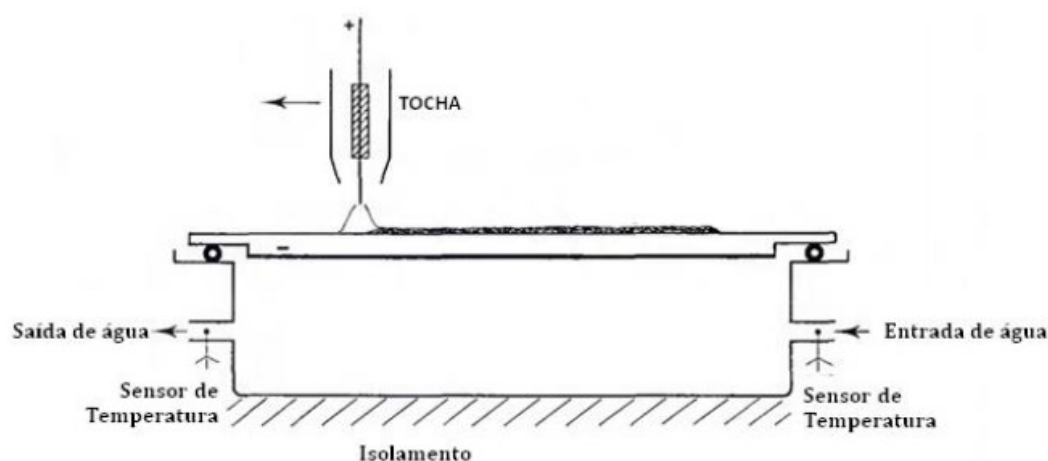


Figura 2.8 – Esquema apresentando o calorímetro de fluxo contínuo de água com uma placa sendo soldada (Adaptado de Lu e Kou, 1989).

Lu e Kou (1989) utilizaram um calorímetro do tipo fluxo contínuo para determinar o aporte térmico em processo de soldagem como mostrado na Figura 2.9. O calorímetro consistia em um corpo de aço inoxidável, chapa teste, selo de vedação (entre a placa de teste e o corpo do calorímetro), termopares na entrada e saída e um sistema de alimentação que garanta a mesma vazão. Os termopares são utilizados para medir a variação de temperatura entra entrada e saída a cada instante, causada pela troca de calor entre a chapa durante o processo de soldagem em contato com a água.

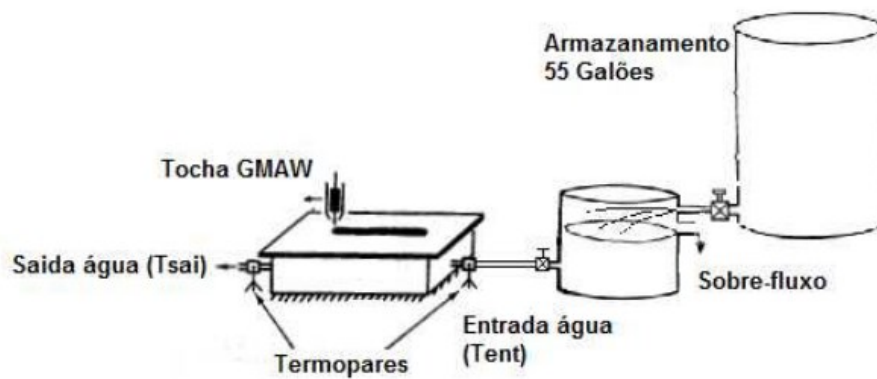


Figura 2.9. Esquema calorímetro fluxo contínuo de água (Lu e Kou, 1989)

2.7 Normas Internacionais para o cálculo do Calor Imposto

O calor repassado para a solda é avaliado pelo índice chamado Calor Imposto (CI), calculado conforme Equação 2.5 (Norma EN 1011-1:2009 Soldagem - Recomendações para soldagem de materiais metálicos - Parte 1: orientação geral para soldagem a arco) ou conforme Equação 2.6 (Norma ASME IX-2013 e outras normas do AWS):

$$CI = k \frac{U_a \times I_s}{v} \quad (2.5)$$

$$CI = \frac{U_a \times I_s}{v} \quad (2.6)$$

Onde: CI – Calor Imposto em J/mm, k – fator de eficiência térmica do processo, U_a – tensão do arco, I_s – corrente de soldagem, v – velocidade de soldagem em mm/s.

A norma ASME IX não leva em consideração a eficiência térmica do processo (k) e o índice CI deveria ser chamado “energia de soldagem por unidade do comprimento de solda”.

A Norma EN 1011-1, embora aceite o fato que o calor repassado para o metal de base representa apenas uma parte de todo o calor gerado pelo arco, considera que o valor do índice k é constante para cada processo, como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Eficiência térmica (k) de processos de soldagem (conforme a Norma EN 1011-1).

Process No	Process	Factor k
121	Submerged arc welding with wire electrode	1,0
111	Metal-arc welding with covered electrode	0,8
131	MIG welding	0,8
135	MAG welding	0,8
114	Flux-cored wire metal-arc welding without gas shield	0,8
136	Flux-cored wire metal-arc welding with active gas shield	0,8
137	Flux-cored wire metal-arc welding with inert gas shield	0,8
138	Metal-cored wire metal-arc welding with active gas shield	0,8
139	Metal-cored wire metal-arc welding with inert gas shield	0,8
141	TIG welding	0,6
15	Plasma arc welding	0,6

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da bancada de testes e equipamentos

A eficiência térmica foi avaliada utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água para (que quantifica o calor absorvido). Foram usadas diferentes vazões de gás de proteção e inclinação da tocha, mantendo-se constantes os parâmetros de tensão e corrente (potência).

Os componentes da bancada de teste essenciais para a realização do trabalho podem ser divididos em três categorias: o sistema de alimentação de água, a bancada para fixação do calorímetro e tocha TIG, e o sistema de aquisição e condicionamento de sinais para a coleta dos dados.

3.1.1 Sistema de Alimentação de água

O sistema de alimentação é composto por um recipiente de armazenamento de água de acrílico, com capacidade de 30 litros, apresentando três orifícios para entrada e saída da água, e uma válvula para regular a saída de água destinada ao calorímetro.

Como apresentado pela Figura 3.1, há uma mangueira responsável pela alimentação principal, e duas mangueiras para retirada e saída de água. Enquanto a válvula de regulação de saída de água é responsável pelo controle de vazão de água que passará pelo calorímetro, uma outra mangueira é necessária para controlar o nível de água armazenada, para que permaneça em aproximadamente 30 litros durante todos os ensaios realizados, para garantir maior confiabilidade na aquisição de dados.

A medição da vazão de água foi realizada na extremidade final da mangueira de saída, mantendo-a aproximadamente em uma mesma altura, para que o fluxo de água se mantivesse constante em todos os ensaios realizados. Após a fixação da altura da extremidade final da mangueira, a vazão de água para o experimento foi definida como 4,3 l/min.

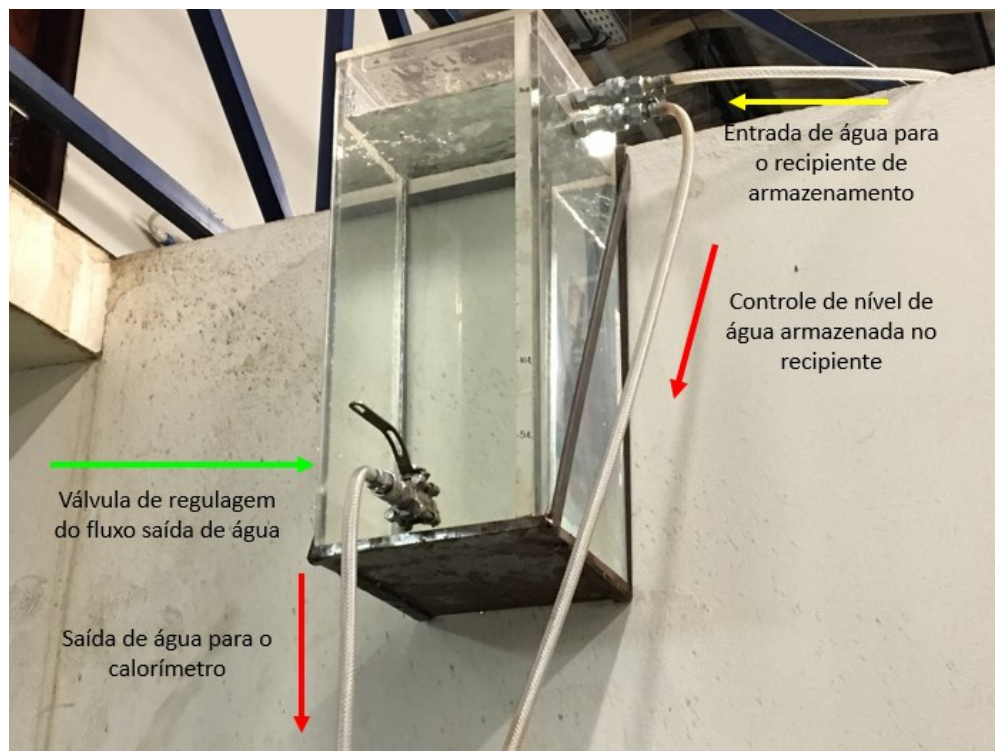


Figura 3.1 – Recipiente de Armazenamento de água.

3.1.2 Bancada

A bancada de testes em que os ensaios foram realizados apresentava os seguintes equipamentos: calorímetro de fluxo contínuo de água, tocha TIG e as placas de teste em que foram realizadas as soldas, como ilustrado pela Figura 3.2.

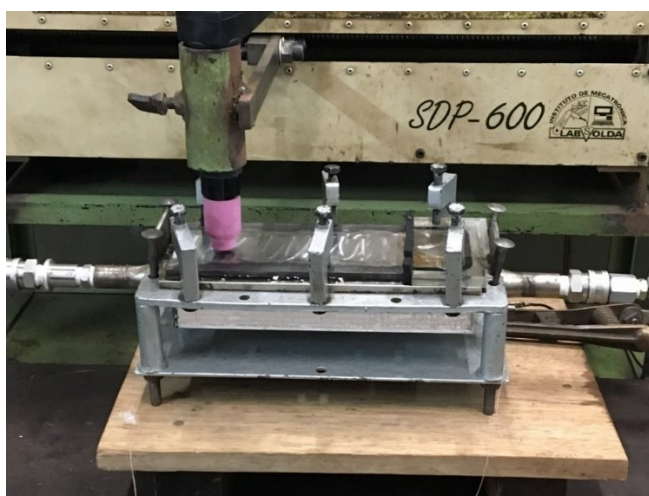


Figura 3.2 – Montagem da bancada de testes.

3.1.2.1 Descrição do calorímetro

O calorímetro de fluxo contínuo de água utilizado contém uma entrada para entrada de água vinda do recipiente de armazenamento, e uma saída para que a água esteja sempre renovando dentro do calorímetro durante os ensaios. A placa de teste é fixada, em contato com um selo de vedação para que não haja vazamento de líquido, sobre o calorímetro através de quatro parafusos de 8 mm presentes em suportes fixados nas laterais do calorímetro.

Na extremidade direita do calorímetro, próximo à saída de água, é fixada uma placa de acrílico através dos dois parafusos restantes, para auxiliar na vedação do calorímetro. A utilização desta placa é essencial para o sucesso do experimento. A presença de ar retido dentro do calorímetro dificulta a troca de calor entre água e placa de teste durante a soldagem. Desta forma, a placa de acrílico permite visualizar se há presença de ar retido no calorímetro e removê-lo, garantindo o total contato da placa com a água em circulação no interior do calorímetro. A Figura 3.3 ilustra esta situação.



Figura 3.3 – Bolha de ar retido dentro do calorímetro.

3.1.2.2 Descrição da tocha TIG

Foi utilizada uma tocha TIG automática, modelo 27A-28B, fabricada pela Binzel, fixada a uma mesa de coordenada X, que permite ajustar a velocidade de soldagem dos ensaios. A velocidade de soldagem estabelecida para todos os testes foi de 20 cm/min.

3.1.3 Sistema de aquisição de dados do calorímetro

O sistema de aquisição é responsável pela recepção dos dados de corrente, tensão e temperaturas inicial e final.

Para a recepção de dados de corrente utilizou-se um sensor Hall, posicionado no cabo terra da fonte de soldagem. Para a recepção de dados de tensão, utilizou-se um receptor na tocha de soldagem, que capta o sinal elétrico de tensão do arco. O sensor Hall e o receptor enviam os sinais de corrente e tensão para uma placa condicionadora de sinal, que por sua vez é ligada a uma placa de aquisição de dados. Por meio de uma conexão USB, a leitura dos sinais pode ser realizada em computador, através do programa LabVIEW. A Figura 3.4 ilustra os equipamentos utilizados.

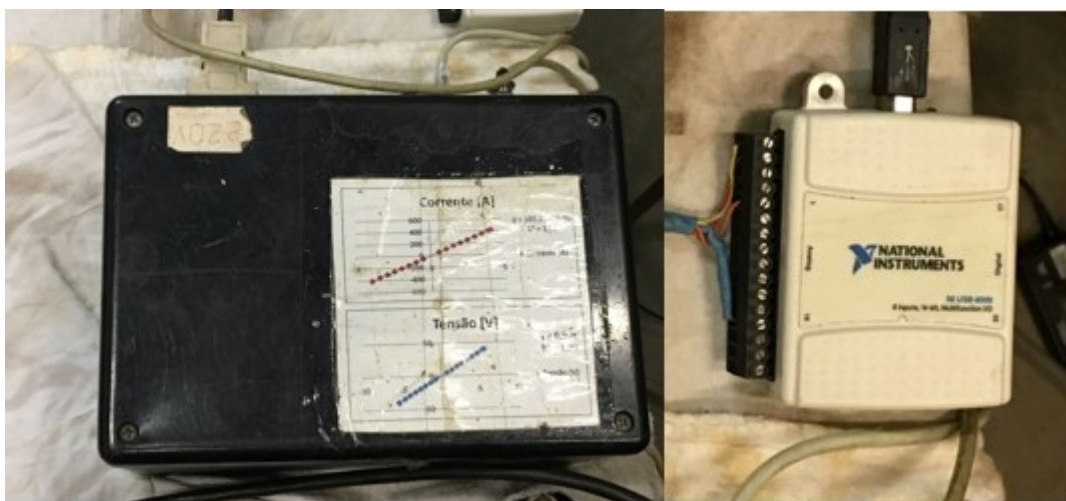


Figura 3.4 – Sensor Hall e receptor de sinal elétrico de tensão.

O monitoramento das temperaturas de entrada e saída foi feito por meio de termopares tipo T, através de uma placa de aquisição com interface direta com o computador, por meio de

conexão USB, de acordo com Figura 3.5. A leitura dos dados de temperaturas também é realizada através do programa LabVIEW.



Figura 3.5 – Placa de aquisição de temperatura.

3.2 Fonte de Soldagem

Como fonte de energia para os ensaios foi utilizada a Fonte de Soldagem Multiprocesso Inversal 450 do fabricante IMC, conforme Figura 3.6. A Tabela 3.1 apresenta as características da fonte, de acordo com o fabricante.



Figura 3.6 - Fonte de Soldagem Multiprocesso Inversal 450.

Tabela 3.1 - Dados Técnicos da Fonte

Tensão de alimentação	220,380,440 V Trifásica
Tensão em vazio	68 V
Corrente	Contínua ou alternada (Constante ou pulsada)
Fator de potência	0,95
Circuito de arrefecimento	3,5 litros de água destilada
Corrente nominal	280 A
Corrente máxima	450 A
Corrente a 100 % Fc	280 A /35V
Potência nominal	13 KVA

3.3 Metodologia de cálculos

3.3.1 Parâmetros definidos

Os ensaios foram realizados com parâmetros definidos de tensão e corrente em 12 V e 150 A respectivamente, com tempo de soldagem de aproximadamente 20 segundos. O trabalho foi embasado na avaliação da eficiência térmica de soldagem variando-se a vazão do gás de proteção e a posição da tocha. Foram utilizados três valores distintos de vazão de gás 5 l/min, 8 l/min e 10 l/min com tocha perpendicular à peça de trabalho e inclinada em -30° e +30°.

As outras variáveis de processo foram determinadas conforme Figura 3.7. A partir da corrente estabelecida, os ensaios foram realizados utilizando-se eletrodo de tungstênio toriado (2%) de 3,2 mm de diâmetro e ângulo de afiação da ponta do eletrodo de 60°. O bocal utilizado foi de números 8 e A velocidade de soldagem foi constante de 20 cm/min.

Todos os testes foram feitos sobre chapas de aço carbono ABNT 1020 com as dimensões de 200 x 100 x 6,3 mm.

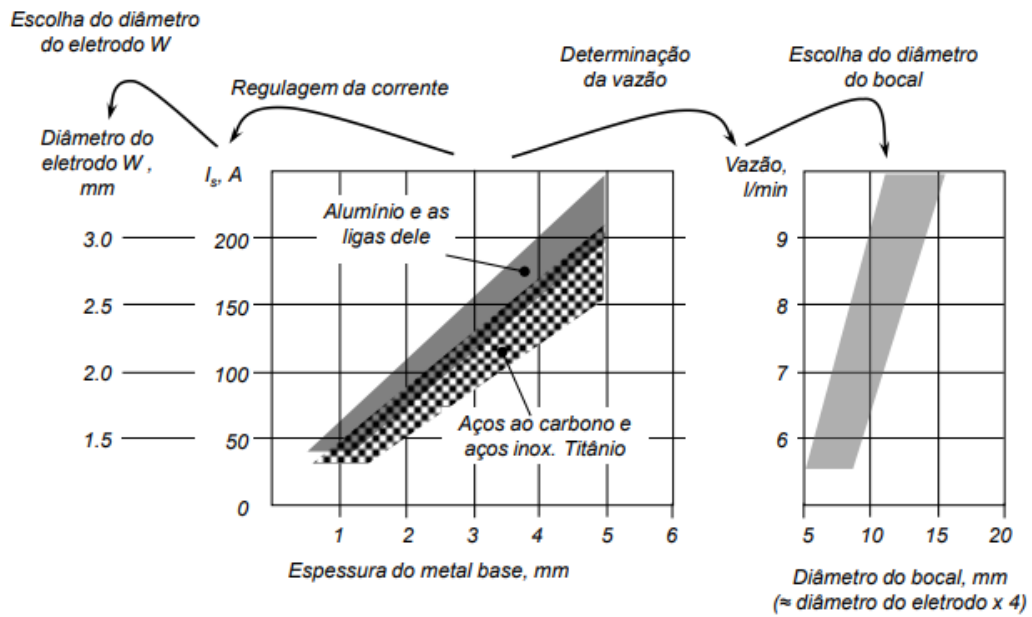


Figura 3.7 - Escolha dos valores das variáveis do processo TIG por Professor Dr. Volodymyr Ponomarov.

3.3.2 Cálculo da energia de soldagem

Para cálculo da energia de soldagem utilizou-se a potência instantânea, conforme Equação 2.1. A potência instantânea foi calculada pelo somatório dos produtos entre tensão e corrente em cada instante de tempo, a partir dos dados coletados pelo sistema de aquisição de sinais.

Como ilustrado pela Figura 3.8, o tempo de soldagem, a tensão e corrente mantiveram-se próximos aos valores estabelecidos anteriormente. Nota-se na curva de corrente que as regiões de abertura e fechamento também foram consideradas para os cálculos de potência.

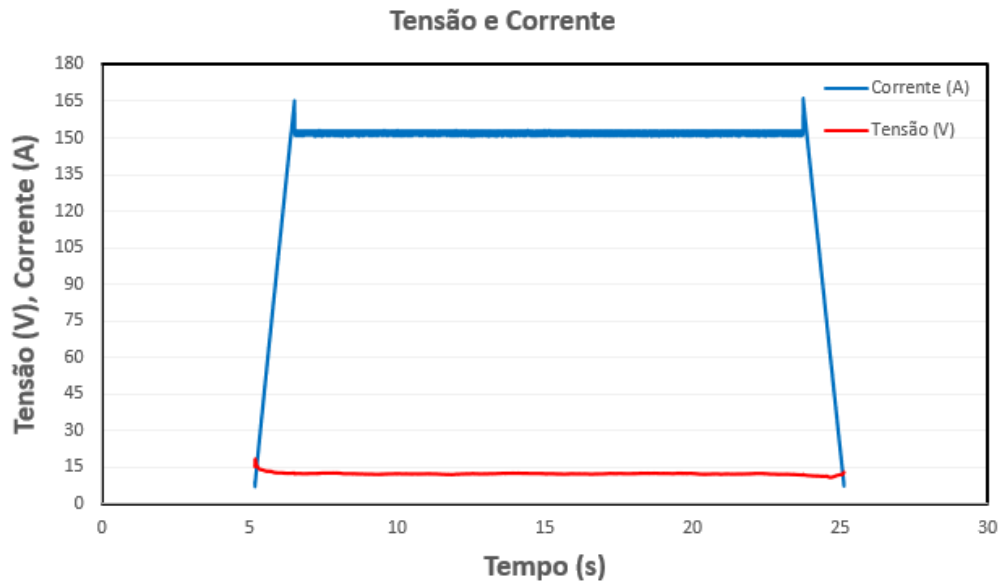


Figura 3.8 - Gráfico de aquisição de tensão e corrente.

3.3.3 Cálculo do calor absorvido

O calor absorvido pelas placas de teste foi calculado através dos princípios de calorimetria. O cálculo foi realizado conforme Equação 3.1, utilizando-se os dados de temperatura obtidos pelo sistema de aquisição, como ilustrado pela Figura 3.9.

$$C_{absorvido} = \int_0^{\infty} V_{H_2O} * \rho * C_{pw} * (T_{2w} - T_{1w}) * dt \quad (3.1)$$

Onde V_{H_2O} é a vazão volumétrica de água que passa dentro do calorímetro durante o processo de soldagem é dada em $[m^3/s]$, ρ é a massa específica da água, dada em kg/m^3 , o C_{pw} é o calor específico da água $[J/Kg \cdot ^\circ C]$, T_{1w} e T_{2w} são as temperaturas de entrada e saída de água no calorímetro, respectivamente, dadas em $[^\circ C]$.

Para simplificação dos cálculos, foi utilizada a temperatura de entrada da água para encontrar as propriedades termodinâmicas que variam de acordo com a temperatura da mesma. A densidade (ρ) e o calor específico (C_{pw}) utilizados foram de, respetivamente, $997 [kg/m^3]$ e $4176 [J/(Kg \cdot ^\circ C)]$. O calor absorvido é calculado pela Equação 3.1.

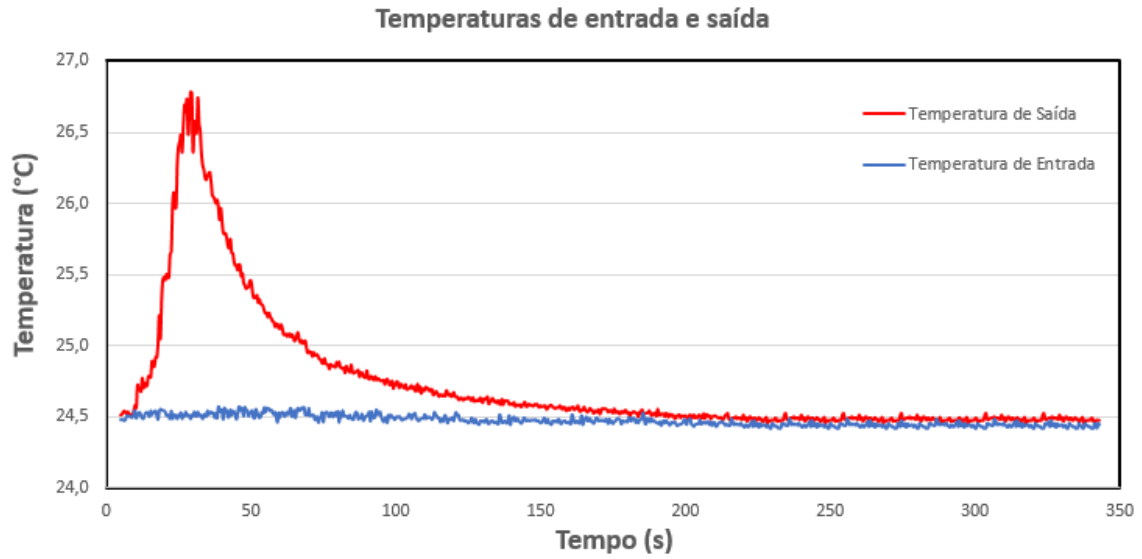


Figura 3.9 – Gráfico de aquisição de temperaturas.

3.3.4 Cálculo da eficiência térmica

A eficiência térmica do processo de soldagem é definida como a porção quantitativa de energia do arco transferida para o material de base e de acordo com Dupont e Marder (1995) pode ser calculada pela Equação 3.2.

$$k = \frac{\int_0^{\infty} W * C_{pw} * (T_{2w} - T_{1w}) dt}{U_a * I_s * t} \quad (3.2)$$

Onde W é o fluxo mássico de alimentação de água em [kg/s], C_{pw} o calor específico da água em [Kj/Kg · °C], T_{1w} e T_{2w} as temperatura da água nos pontos de entrada e saída, respectivamente, em [°C], t é o empo de soldagem em segundo [s], U_a a tensão de soldagem em volts [V] e I_s a corrente de soldagem em ampere [A].

3.4 Análise geométrica do cordão

Para a análise geométrica dos cordões, foi realizado um corte transversal em cada cordão nas placas de teste utilizando uma cortadora metalográfica conforme Figura 3.10. Cada seção transversal foi tratada utilizando lixas de granulometrias de 220, 320, 400 e 600 mesh. Em seguida, um ataque químico foi feito em cada seção transversal utilizando-se Nital 10%.



Figura 3.10 – Cortadora Metalográfica.

Para a medição dos parâmetros geométricos dos cordões, as amostras foram ampliadas em um estereoscópio digital, presente no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), e posteriormente analisadas no software de tratamento de imagem. O programa permite calcular parâmetros de largura do cordão de solda, área fundida e penetração a partir da base da placa de teste, utilizada como referência para a medição dos outros parâmetros, conforme Figura 3.11.

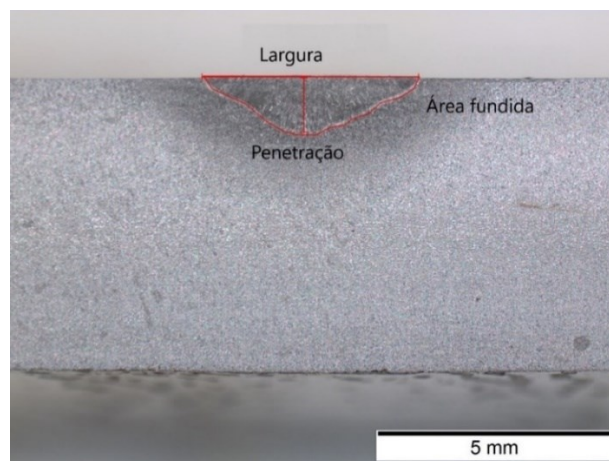


Figura 3.11 – Macrografia de cordão de solda.

3.5 Planeamento experimental

Primeiramente a tocha foi posicionada perpendicularmente à placa de teste e a vazão de gás de proteção foi variado entre 5, 8 e 10 l/min. Posteriormente, a vazão de gás de proteção foi mantida constante em 5 l/min e a avaliação de eficiência térmica de soldagem foi realizada com a tocha inclinada em -30° e $+30^\circ$.

Os experimentos corresponderam a 5 situações distintas de soldagem, e considerando repetições, totalizaram 13 soldas obtidas, conforme Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 – Planeamento de dados com variação de vazão de gás de proteção.

Ensaio	Vazão de gás (l/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo (s)	E_s (J)	C_{abs} (J)	k (%)
1	10							
2								
3								
4	8							
5								
6								
7	5							
8								
9								

Tabela 3.3 – Planeamento de dados com variação da inclinação da tocha.

Ensaio	Inclinação da tocha	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo (s)	E_s (J)	C_{abs} (J)	k (%)
10	$+30^\circ$ (Empurrando)							
11								
7	0°							
8								
9								
12	-30° (Puxando)							
13								

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Variação de gás de proteção

Com a tocha posicionada perpendicularmente à peça de trabalho, conforme Figura 4.1, foram avaliadas 3 vazões de gás de proteção utilizando-se argônio em cada ensaio realizado. Os parâmetros corrente e tensão foram mantidos constantes, tentando atingir a potência elétrica de 1800 W.

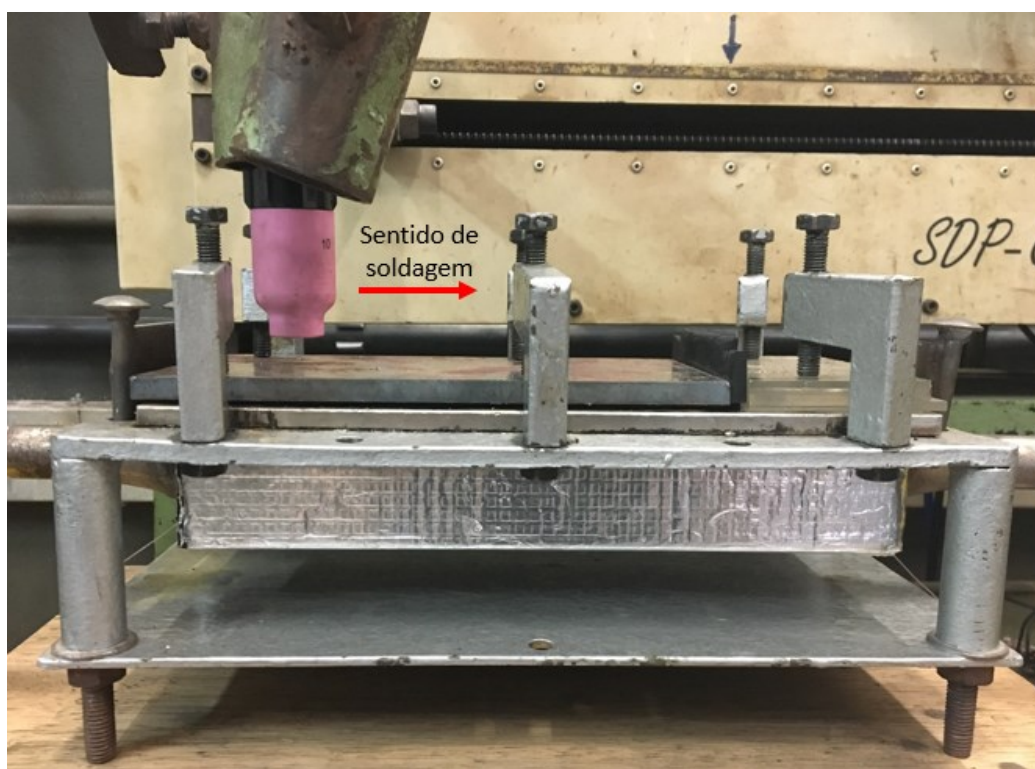


Figura 4.1 - Posicionamento perpendicular da tocha de soldagem.

Os resultados obtidos e valores médios de energia gerada pelo arco, calor absorvido pelo metal de base e eficiência térmica de cada ensaio estão ilustrados nas Tabela 4.1 e 4.2 respectivamente.

Tabela 4.1 – Valores atingidos em soldagem TIG, com variação de vazão de gás de proteção.

Ensaio	Vazão de gás (l/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo (s)	E _s (J)	C _{abs} (J)	k (%)
1	10	145,52	11,92	1735,26	21,25	36876,30	23738,29	64,37
2		145,33	11,92	1732,99	20,66	35796,99	22245,01	62,14
3		145,44	12,20	1774,61	20,68	36700,36	22815,14	62,17
4	8	145,99	12,02	1755,00	22,14	38852,96	25153,07	64,74
5		147,98	11,82	1749,23	20,78	36341,92	23522,35	64,73
6		147,80	11,67	1725,43	20,50	35373,37	22779,88	64,40
7	5	147,05	12,04	1770,02	21,51	38079,14	26228,84	68,88
8		146,93	12,27	1802,23	20,83	37536,04	26142,98	69,65
9		147,35	11,89	1751,62	20,12	35244,09	24361,97	69,12

Tabela 4.2 - Valores médios de eficiência térmica para cada vazão de gás.

Vazão de gás (l/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo (s)	E _s (J)	C _{abs} (J)	k (%)
10	145,43	12,02	1747,62	20,86	36457,88	22932,82	62,89
8	147,25	11,84	1743,22	21,14	36856,08	23818,43	64,62
5	147,11	12,06	1774,62	20,82	36953,09	25577,93	69,22

Pelas Tabelas 4.1 e 4.2, verifica-se a influência da variação de gás nos valores de eficiência térmica da soldagem TIG. Uma redução em 50% na vazão de gás de proteção resultou em uma melhoria de até 7% nos valores de eficiência de soldagem.

É possível perceber que a eficiência térmica apresenta comportamento crescente com a diminuição da vazão de gás de proteção. Para uma mesma energia de soldagem, o aumento da eficiência é resultado de uma ligeira elevação do calor absorvido pelo metal de base. A vazão de gás de proteção, apesar de ser essencial para a boa qualidade da solda, pode então ser avaliado como uma fonte de dissipação de calor que é entregue ao metal de base.

A dissipação ocorre por mecanismos de transferência de calor, como convecção e condução. O gás argônio não sendo um bom condutor de calor dificulta a troca de calor com a

placa de teste. Há a possibilidade de o fluxo de gás absorver e dissipar parte do calor da própria placa de teste, mas também do arco elétrico, causando a redução do calor absorvido. Somado a isso, para vazões maiores, a velocidade de saída do gás pelo bocal aumenta, fazendo com que, o tempo de contato com o metal de base seja menor, reduzindo as trocas de calor.

Além do mais, maior vazão aumenta os riscos de gerar turbulências no fluxo de gás, podendo afetar não apenas as trocas térmicas, mas também a proteção da poça de fusão. O bocal deve apresentar uma largura que esteja de acordo com o volume de gás de proteção utilizado, isto é, vazões maiores requerem bocais de maiores dimensionamentos. Utilizando-se bocal número 8, a redução da vazão de gás permitiu um fluxo mais laminar e suave, evitando geração de turbulência e consequentemente, maior aproveitamento do calor fornecido.

Em seguida, por meio da macrografia, foram analisadas as variações nos parâmetros da geometria dos cordões, sendo largura do cordão, penetração e a área fundida. A Tabela 4.3 abaixo ilustra os resultados obtidos.

Tabela 4.3 – Valores médios atingidos de geometria dos cordões, com variação de vazão de gás de proteção.

Vazão de gás (l/min)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área (mm ²)
10	3,812	1,223	3,182
8	4,025	1,541	3,233
5	4,242	1,632	3,831

Analisando a Tabela 4.3, observa-se um crescimento nos parâmetros geométricos médios do cordão de solda após a redução da vazão de gás. A menores vazões, há maior quantidade de calor sendo absorvido pela placa de teste. Para o mesmo comprimento do arco elétrico, a área fundida, largura e penetração são crescentes em virtude da redução de perdas de calor para o meio ambiente, resultado da diminuição da vazão de gás de proteção.

4.2 Variação da inclinação da tocha

Posteriormente, para a realização dos ensaios, fixou-se a vazão de gás em 5 l/min, mantendo-se os mesmos parâmetros de tensão e corrente anteriores. A tocha foi inclinada em 30° em relação à posição perpendicular para realização dos novos ensaios pelas técnicas puxando e empurrando, conforme Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente.



Figura 4.2 - Posicionamento da tocha de soldagem para técnica puxando.

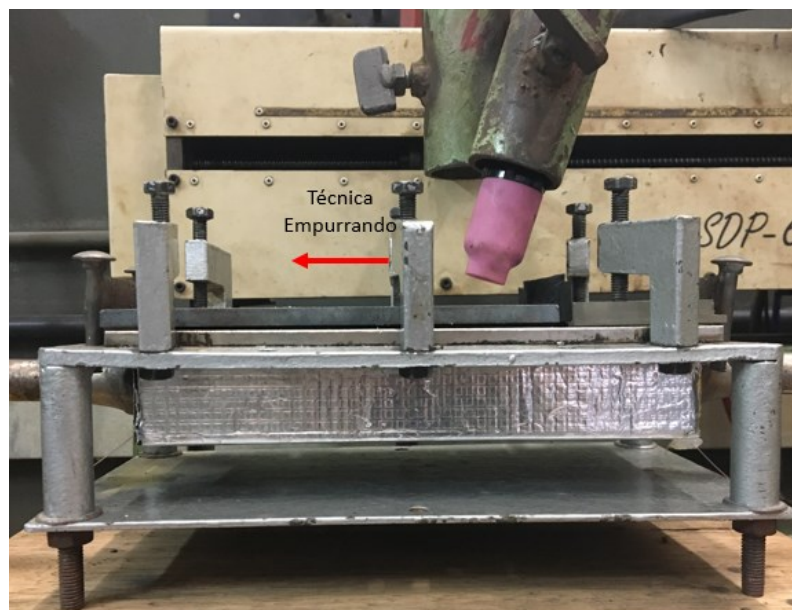


Figura 4.3 - Posicionamento da tocha de soldagem para técnica empurrando.

As Tabela 4.4 e 4.5 apresentam os dados coletados e valores médios dos ensaios, respectivamente, considerando também os dados adquiridos com tocha em posição perpendicular à peça de trabalho. A vazão de gás utilizada para todos os testes foi de 5 l/min.

Tabela 4.4 – Valores obtidos em soldagem TIG, com variação da inclinação da tocha.

Ensaio	Inclinação da tocha	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo (s)	E _s (J)	C _{abs} (J)	k (%)
1	+30°	143,06	12,37	1769,05	19,65	34763,16	22702,41	65,31
2	(Empurrando)	143,04	12,27	1755,65	19,82	34791,66	23131,12	66,48
3	0°	147,05	12,04	1770,02	21,51	38079,14	26228,84	68,88
4		146,93	12,27	1802,23	20,83	37536,04	26142,98	69,65
5		147,35	11,89	1751,62	20,12	35244,09	24361,97	69,12
6	-30°	143,12	12,29	1759,17	20,01	35204,83	24180,61	68,69
7	(Puxando)	143,34	12,30	1763,70	19,93	35157,55	25535,75	72,63

Tabela 4.5 – Valores médios obtidos em soldagem TIG, com variação da inclinação da tocha.

Inclinação da tocha	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo (s)	E _s (J)	C _{abs} (J)	k (%)
+30° (Empurrando)	143,05	12,32	1762,35	19,73	34777,41	22916,77	65,90
0°	147,11	12,06	1774,62	20,82	36953,09	25577,93	69,22
-30° (Puxando)	143,12	12,31	1761,98	19,83	34938,92	23693,33	70,66

A inclinação da tocha ocasiona pequenas variações na eficiência térmica da soldagem, porém importantes. Analisando a Tabela 4.4, percebe-se que, quanto mais próxima da direção de deslocamento da tocha, menor é a eficiência térmica do processo.

Pela técnica puxando, em virtude de o arco estar mais concentrado no banho de fusão, a eficiência térmica média é levemente mais elevada em relação à posição perpendicular, com variação de menos de 1%, favorecendo uma maior absorção de calor pela chapa. A técnica empurrando apresentou o menor valor médio de eficiência térmica, variando em até 3% em

relação aos valores obtidos em tocha perpendicular à peça, indicando maiores perdas de calor durante o processo.

Em seguida, por meio da macrografia, foram analisadas as variações nos parâmetros da geometria dos cordões. A Tabela 4.6 abaixo ilustra os resultados médios obtidos.

Tabela 4.6 – Valores médios obtidos da geometria dos cordões, com variação da inclinação da tocha.

Inclinação da tocha	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área (mm ²)
+30° (Empurrando)	4,179	1,715	2,791
0°	4,242	1,632	3,831
-30° (Puxando)	4,777	1,918	3,959

Observa-se na Tabela 4.6 que quando a tocha é inclinada na direção oposta à direção de soldagem, pela técnica puxando, a energia do arco é concentrada no banho de fusão, produzindo maior penetração, largura e área fundida. Conforme a inclinação se antepõe à direção de deslocamento da tocha, menores são os parâmetros de penetração e área fundida, e também menores os valores de largura, diferentemente do que era esperado.

Quando a tocha é orientada na direção do avanço, pela técnica empurrando, obtém-se um banho de fusão com menor penetração e largura, destacando a acentuada redução da área fundida, embora exista pequena diferença de calor absorvido em relação às outras inclinações. Neste caso, pode-se supor que o calor é de fato recebido pelo metal de base, porém não é concentrado, sendo distribuído para área maior da placa de teste, ocasionando redução da área fundida, conforme apresentado pela Figura 4.4.

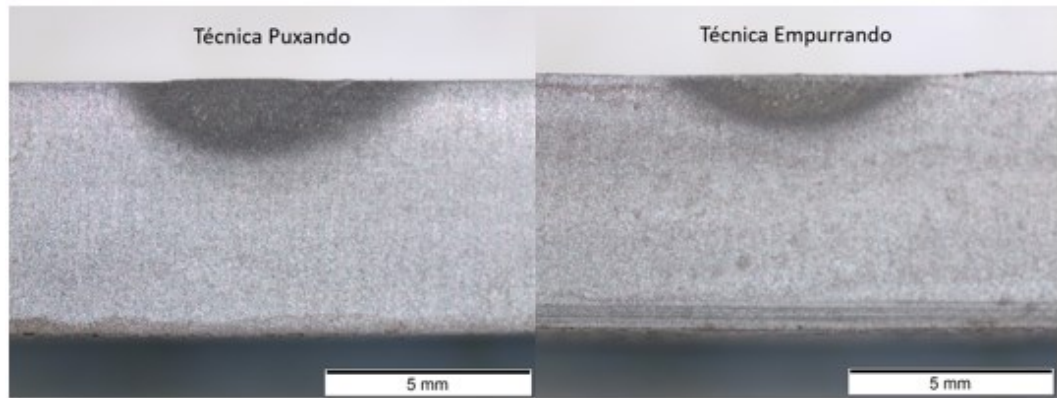


Figura 4.4 - Corte de seções transversais dos cordões.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os cordões de solda obtidos pelas técnicas puxando e empurrando, respectivamente.



Figura 4.5 - Cordão de solda obtido pela técnica puxando.

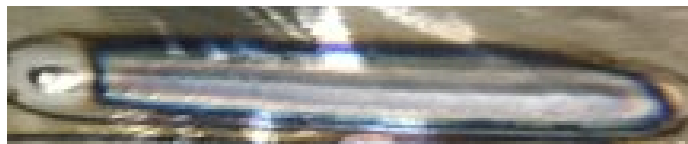


Figura 4.6 - Cordão de solda obtido pela técnica empurrando.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que, a redução da vazão de gás implica no aumento da eficiência térmica do processo. O aumento sofrido pela eficiência térmica ocorre em virtude de menores perdas de calor pelo gás de proteção. Apesar da carência de informações sobre a influência da vazão de gás de proteção na literatura por ser um parâmetro considerado não essencial na soldagem TIG, reduzir a vazão de gás em 50%, resultou em uma melhoria de 7% nos valores de eficiência térmica, proporcionando maior transferência de calor para a peça, confirmado tanto por calorimetria como pela metalografia.

A inclinação da tocha é outro parâmetro não essencial que gerou mudanças na eficiência térmica do processo, obtendo-se maiores valores pela técnica puxando. Embora a diferença entre eficiências térmicas seja pequena, a geometria dos cordões apresentou grande variação, em destaque para a área fundida. Supõe-se que o calor absorvido pela chapa é mais distribuído pela placa de teste, não havendo concentração de calor para fusão do metal de base.

O calor imposto calculado pela recomendação da Norma ASME IX não leva em consideração a eficiência térmica do processo, representando apenas “a energia do arco por unidade do comprimento do cordão” e não o Calor Imposto propriamente dito.

O cálculo do Calor Imposto, prescrito pela Norma EN ISO 1011-1, apresenta valores constantes para a eficiência térmica de cada processo, fato que pode gerar resultados duvidosos em relação ao calor imposto propriamente dito. Conforme demonstrado neste trabalho, a variação de vazão de gás e inclinação da tocha de soldagem influenciam no valor de eficiência térmica e na geometria do cordão de solda, oferecendo valores mais confiáveis ao calor imposto.

O trabalho comprova que os parâmetros elétricos podem ser usados para cálculo da energia gerada pelo arco, porém não servem para determinar o calor imposto, visto que o valor de eficiência térmica k sofre influência de outros parâmetros, como vazão de gás e inclinação da tocha de soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications. **Qualification Standard for Welding**, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators. QW-409 Electrical Characteristics. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Welding, Brazing, and Fusing. Two Park Avenue, New York, NY, 10016 USA, 2013, p. 418.

AWS, *Standard Welding: Terms and Definitions*, Standard AWS, A3.0:2001, Jul 2001.

DIN EN 1011-1 (2009) Welding—recommendations for welding of metallic materials—Part 1: **“General guidance for arc welding”**; German version EN 1011-1.

NILES, R-W. & JACKSON, C.E., **Weld thermal efficiency of the GTAW process**. Welding Journal 1975, 54 (1), pp. 26s - 32s.

DUPONT, J.N. & MARDER, A.R., **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes**, Welding Journal, Research Supplement, Dec 1995, 406s – 416s.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

LU, M. J.; KOU, S. **Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminum - Part 2**, Welding Journal, v. 68, p. 452s-456s, 1989.

NASCIMENTO, S. A.; BATISTA, A. M.; NASCIMENTO, C. V.; 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, p. 97-106, 2007.

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

ROSENTHAL, D. 1941. **Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting**. *Welding Journal* 20(5):220-s to 234-s.

SCOTTI, A.; REIS R.P.; LISKEVYCH O., “**Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo**”, *Soldag. e Insp.* São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.166-172, Abr/Jun 2012.

DUTTA, P., JOSHI, Y. & FRANCHE, C., **Determination of gas tungsten arc welding efficiencies**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 1, Issue 1, July 1994, pp. 80-89.

STENBACKA, N., “**Review of Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding**”, IIW Commission IV-XII-SG212 Intermediate Meeting BAM, Berlin, Germany 18-20 April, 2012.

HURTIG, K., CHOQUET, I., SCOTTI, A. & SVENSSON, L.-E. **A critical analysis of weld heat input measurement through a water-cooled stationary anode calorimeter**, *Science and Technology of Welding and Joining*, 21:5, 339-350, March, 2016.

LISKEVYCH O. **Calor Imposto Líquido: Um Novo Conceito Para Quantificação do Aporte Térmico em Soldagem a Arco** [Tese de doutorado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2014.

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

ÁQUILA, V. **Processo de soldagem TIG**. Salvador, 2012. (Apostila)

SILVA, D.C.C, PONOMAROV, V., LEITE, P.H.R, **Contribuição de cada Parâmetro Elétrico no Calor Imposto na Soldagem a Arco**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2018

SODERSTROM, E.J.; SCOTT, K.M.; MENDEZ, P.F.; **“Calorimetric Measurement of Droplet Temperature in GMAW”**, Welding Journal, AWS, Apr 2011, 90 (1), pp. 1s-8s