

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES LEITE

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO INVERTIDA DA
TENSÃO E CORRENTE NA EFICIÊNCIA TÉRMICA
DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES LEITE

Influência da variação invertida da tensão e corrente na eficiência térmica do processo de soldagem TIG.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia

2018

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES LEITE

Influência da variação invertida da tensão e corrente 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

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo

Me. Diego Costa

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e forças para seguir em frente em busca da minha tão desejada graduação.

Aos meus familiares, em especial meus pais, Adolfo Leite da Paixão e Maria do Carmo Rodrigues Leite, pela educação, amor, suporte e apoio, sempre sem medir esforços que foi fundamental para minha graduação.

Minha irmã, Priscila Rodrigues Leite, pelo apoio.

Agradeço também minha querida namorada, Ester de Faria Reis, por estar ao meu lado me dando incentivo e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov, por acreditar no trabalho, todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho, Glauber Soares, Kaio Guilherme, Pedro Cunha, pelo apoio, empenho e dedicação, para que o trabalho fosse realizado.

Ao doutorando Diego Costa, pela sua contribuição, que foi fundamental para que o trabalho fosse realizado.

A Universidade Federal de Uberlândia, por me proporcionar a infraestrutura necessária para a minha graduação em Engenharia Mecânica.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica, por todo aprendizado e experiências, vivenciadas durante a minha graduação.

Ao LAPROSOLDA (laboratório de pesquisa em soldagem), pela disponibilização dos materiais e equipamentos necessários para realização do trabalho.

LEITE, P. H. R.; **Influência da variação invertida da tensão e corrente na eficiência térmica do processo de soldagem TIG**. 2018. 48p. Projeto de Graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar a relação entre a energia gerada pelo arco e o calor absorvido pelo metal de base, ou seja, sua eficiência térmica (k), caso os parâmetros de soldagem (tensão e corrente) no processo de soldagem TIG (*tungstênio inerte gás*) sejam variados de maneira que a potência do arco seja mantida a mesma, utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água. Com os resultados do trabalho foi possível verificar a contribuição de cada parâmetro de soldagem (tensão e corrente) na eficiência térmica do processo e na geometria do cordão de solda. Neste trabalho foi mostrado que um acréscimo da tensão do arco aumenta a geração de calor no arco, mas não obrigatoriamente favorece à transferência de calor para a peça (ou seja, não aumenta o Calor Imposto - CI), pois o acréscimo do calor vai acontecer na coluna de arco e, logo, será perdido para o meio ambiente quase por completo. Já um acréscimo da corrente sempre vai acarretar um aumento da geração de calor no arco e, o que é mais importante, sempre vai favorecer à transferência de calor para a peça (ou seja, aumentar o CI). Isto acontece graças ao fato que o aumento da corrente provoca um aumento do calor em todas as três zonas do arco, e mesmo com a perda de calor pela coluna (por sinal, a menor parte das três), o CI vai crescer pois o calor gerado no acoplamento arco – metal de base será transferido para a peça quase por completo.

Palavras Chaves: Soldagem TIG, Energia de Soldagem, Eficiência Térmica, Calor Imposto.

LEITE, P. H. R.; **Influence of the inverted variation of voltage and current on the thermal efficiency of the TIG welding process**. 2018. 48p. Graduation Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the relationship between the energy generated by the arc and the heat absorbed by the base metal, that is, its thermal efficiency (η), if the welding parameters (voltage and current) in the TIG welding process (tungsten inert gas) would vary so that the arc power is maintained the same. A continuous water flow calorimeter was used. With the results of the work it was possible to verify the contribution of each welding parameter (voltage or current) on the thermal efficiency of the process and on the weld bead geometry. It was shown that an increase in arc voltage provokes a growth of the heat generation in the arc but does not necessarily favor the heat transfer to the workpiece (that is, this does not favor the heat input - HI), because the increase of heat will happen in the arc column and will be lost to the environment almost for full. On the other hand, an increase in the current will always lead to an increased generation of heat in the arc and, what is more important, will always favor the transfer of heat to the workpiece (increasing the HI). This happens due to the fact that the increase in current causes a growth of heat in all three zones of the arc, and even with the loss of heat by the column (by the way, the smallest part of the three), the HI will grow because the heat generated in the coupling arc – base metal will be transferred to the workpiece almost in full.

Key words: Welding TIG, Welding Energy, Thermal Efficiency, Heat Input.

LISTA DE IMAGENS

Figura 2.1. Esquema do processo de soldagem TIG (Modenesi <i>Et al.</i> , 2012)	2
Figura 2.2. Equipamentos para solda TIG (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)	2
Figura 2.3. Variação do comprimento do arco processo TIG.....	4
Figura 2.4. Variação da tensão com a DEP e Corrente (Modenesi, 2012)	4
Figura 2.5. Curva tensão / Corrente para fonte TIG (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)	5
Figura 2.6. Estrutura e a distribuição da tensão ao longo do arco elétrico	7
Figura 2.7. A estrutura do arco como um gerador de calor	7
Figura 2.8. Apresentação esquemática da entrada e da saída do calor na chapa durante soldagem (Hurtig. <i>Et al.</i> , 2016)	9
Figura 2.9. Esquema do calorímetro de água (Essers, 1981).....	10
Figura 2.10. Esquema calorímetro de fluxo contínuo (Overbeck e Palmer, 2009)	10
Figura 2.11. Esquema calorímetro fluxo contínuo de água (Lu e Kou, 1989)	11
Figura 3.1. Bancada experimental utilizada	14
Figura 3.2. Fonte utilizada IMC DIGIPlus A7	15
Figura 3.3. Tocha TIG	16
Figura 3.4. Calorímetro utilizado.....	17
Figura 3.5. Bolha de ar	17
Figura 3.6. Recipiente de água	18
Figura 3.7. Posição da extremidade	18
Figura 3.8. Sistema de aquisição de tensão e corrente (1) e temperatura (2)	19
Figura 3.9. Sensor Hall no cabo terra da fonte	19
Figura 3.10. Placa de aquisição de temperatura NI-9211	20
Figura 3.11. Aquisição de tensão e corrente no tempo (5 s o arco é aberto e em torno de 25 s é fechado)	21
Figura 3.12. Gráfico aquisição de temperatura.....	22
Figura 3.13. Cortadora Metalográfica	23
Figura 3.14. Características do cordão Penetração (P), Largura (L), Área fundida (Af)	24
Figura 3.15. Resistência acoplada a placa de acrílico dentro o calorímetro	25
Figura 4.1. Uma analogia do arco com resistências ôhmicas em série.....	27

Figura 4.2. Ilustração dos efeitos do aumento da tensão de arco de soldagem mantendo a corrente constante (a potência do arco vai crescer)	28
Figura 4.3. Comparação ilustrativa dos efeitos da regulação dos parâmetros de uma resistência ôhmica (acima) e de um arco de soldagem (abaixo) mantendo a mesma potência elétrica.	28
Figura 4.4. Ilustração qualitativa da influência da tensão do arco e da corrente de soldagem na eficiência térmica do processo (a) e no CI (b)	31
Figura 4.5. Valores médios da Eficiência térmica dos testes realizados	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Eficiência térmica (k) de processos de soldagem (conforme a Norma EN 1011-1).	12
Tabela 2.2. Eficiências térmicas (k) de diferentes processos de soldagem (valores determinados de maneira experimental).	13
Tabela 3.1. Características da fonte DIGIPlus A7 (IMC,2018).	15
Tabela 4.1. Eficiência térmica da soldagem TIG para diferentes combinações dos valores da tensão do arco, da corrente de soldagem.	30
Tabela 4.2. Valores médios das Características do cordão de solda.	32

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

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	Processo de soldagem Eletrodo Revestido
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> (Arco Submerso)
TIG	Soldagem <i>Tungsten Inert Gas</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SÍMBOLOS

k	[%]	Eficiência térmica
I	[A]	Corrente
U	[V]	Tensão
P	[W]	Potência
\bar{P}_{inst}	[W]	Potência Instantânea Média
Es	[J]	Energia de soldagem
CI	[J/mm]	Calor imposto
ρ	[kg/m ³]	Densidade
v	[mm/s]	Velocidade de soldagem
C_{pw}	[kJ/Kg · °C]	Calor específico
t	[s]	Tempo
W	[kg/s]	Vazão de fluxo de água no calorímetro
T_{1W}	[°C]	Temperatura de água no ponto de entrada do calorímetro
T_{2W}	[°C]	Temperatura de água no ponto de saída do calorímetro

SÚMARIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	2
2.1.	Processo de Soldagem TIG	2
2.1.1.	Equipamentos	3
2.1.2.	Parâmetros de soldagem TIG.....	3
2.1.3.	Característica Estática da corrente no processo TIG	4
2.2.	Arco Elétrico	6
2.3.	Transferência e Perdas do Calor Durante o Processo de Soldagem TIG.....	7
2.4.	Calorimetria	9
2.4.1.	Calorímetro de Água.....	9
2.5.	Normas Internacionais para o cálculo do Calor Imposto	12
2.6.	Faixas de Eficiências Térmicas Encontradas por Outros Autores	13
3.	EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA	14
3.1.	Bancada Experimental	14
3.2.	Equipamentos e Insumos	14
3.2.1.	Fonte de Soldagem	14
3.2.2.	Tocha TIG.....	15
3.2.3.	Mesa de coordenadas X	16
3.2.4.	Calorímetro utilizado	16
3.2.5.	Sistema de Alimentação de água e Controle de Vazão	18
3.2.6.	Sistema de aquisição de sinal	19
3.3.	Procedimento Experimental.....	20
3.4.	Cálculo da Energia de Soldagem	21
3.5.	Cálculo do Aporte Térmico	22
3.6.	Análise da geometria do Cordão	23
3.7.	Aferição do calorímetro	24

4.	RESULTADOS E ANÁLISE.....	26
4.1.	Comparação teórica do fenômeno da geração de calor numa resistência ôhmica e no arco elétrico	26
4.2.	Resultados dos testes para avaliar a influência da tensão do arco e da corrente de soldagem na eficiência térmica do processo de soldagem a arco e na geometria do cordão	29
5.	CONCLUSÕES	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

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: 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), alterando assim 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 após o resfriamento.

Há grandes dificuldades no que diz respeito a previsão destes 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, apenas uma parte do calor é utilizada na solda. Há muitas perdas de calor no caminho “arco – metal base”, essas perdas de calor para o meio ambiente podem ocorrer por convecção, radiação e condução. A razão entre o calor absorvido pela peça de trabalho e a energia elétrica gerada pelo arco é usada como um indicativo da eficiência térmica do processo.

Neste trabalho será realizado o estudo da eficiência térmica (k) no processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) variando os parâmetros de soldagem (tensão e corrente) tentando manter a mesma potência. Utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água para quantificar o calor absorvido. Também será realizada uma comparação teórica do fenômeno da geração de calor numa resistência ôhmica e no arco elétrico. O processo TIG foi escolhido para este trabalho por oferecer uma possibilidade de mudar tanto tensão do arco e a corrente de soldagem de maneira quase independente, graças a característica estática do tipo Corrente Constante.

O valor do Calor Imposto (CI), calculado conforme recomendado pelas normas vigentes, pode ser bem diferente do valor real do CI e o benefício dele para a avaliação do processo de soldagem é duvidoso. Um dos objetivos deste trabalho é comprovar que os valores dos parâmetros elétricos do processo de soldagem podem ser usados para o cálculo da energia e do calor gerado pelo arco, mas não servem para o cálculo do calor imposto, pois, o valor real do fator de eficiência térmica do processo k é desconhecido.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Processo de Soldagem TIG

O processo TIG consiste em um processo de soldagem a arco elétrico formado entre o eletrodo não consumível (de tungstênio) e a peça metálica, sob atmosfera protetora inerte. O calor gerado pelo arco elétrico é utilizado para promover o aquecimento e a fusão do metal de base e, caso usado, o metal de adição, possibilitando assim a união de peças metálicas (Figuras 2.1 e 2.2).

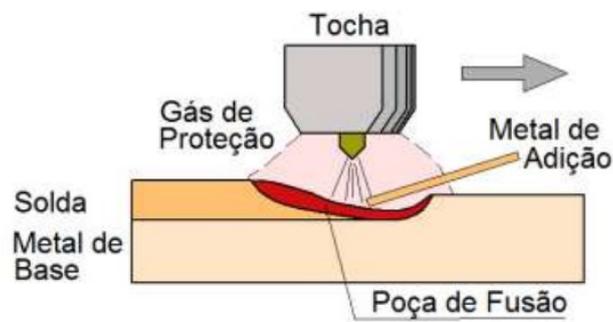


Figura 2.1. Esquema do processo de soldagem TIG (Modenesi *Et al.*, 2012)

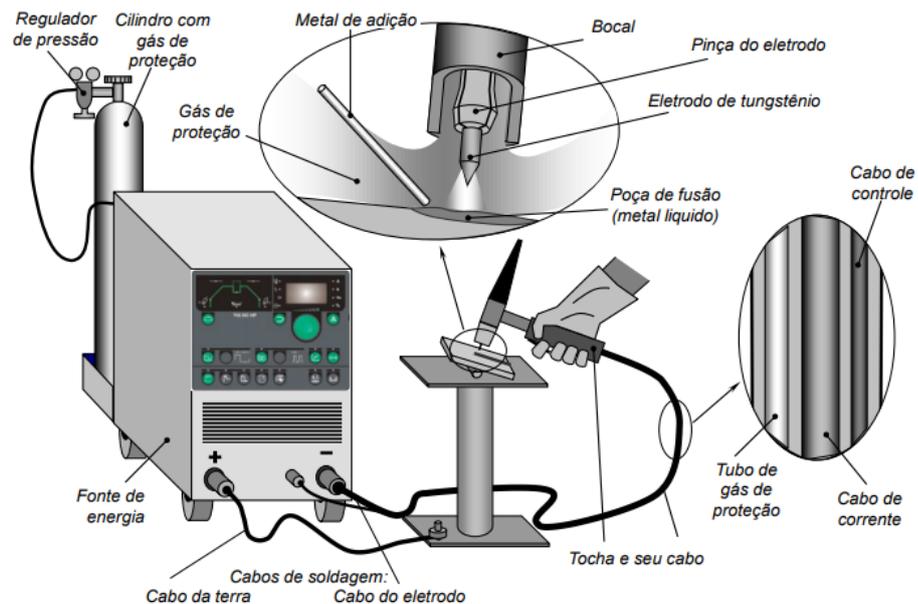


Figura 2.2. Equipamentos para solda TIG (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

O eletrodo de tungstênio é altamente reativo a altas temperaturas, por isso ele é protegido (contra oxidação) por um gás inerte (geralmente argônio, hélio ou uma mistura dos dois) que tem também a função de proteger a poça de fusão (contra contaminação atmosférica). A adição de metal para o preenchimento da solda pode ou não ser realizada.

2.1.1. Equipamentos

O equipamento básico necessário para soldar com TIG é (veja Figura 2.2):

- ✓ Fonte de energia (CA ou CC);
- ✓ Cabos e mangueiras;
- ✓ Tocha;
- ✓ Um dispositivo para abertura do arco elétrico;

2.1.2. Parâmetros de soldagem TIG

Os parâmetros de operação no processo TIG são a corrente de soldagem, diâmetro e forma (ângulo de afiação) do eletrodo, comprimento do arco, velocidade de soldagem, vazão do gás de proteção, tipo 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, sendo a tensão e a corrente em foco deste trabalho, logo apresentados abaixo em maiores detalhes.

Tensão

A tensão neste processo de soldagem determina o comprimento do arco que é a distância entre o eletrodo e a peça, e é uma variável muito importante pois, ela varia com o comprimento do arco, quanto maior a DEP (distância eletrodo peça) maior será a tensão do arco (Figura 2.4) e maior será o calor gerado pelo arco. Quanto maior o comprimento de arco mais largo é o acoplamento do arco - peça (Figura 2.3), perde-se penetração e o reforço tende a diminuir. Um arco muito curto ou muito longo será instável, podendo gerar descontinuidades no cordão de solda.

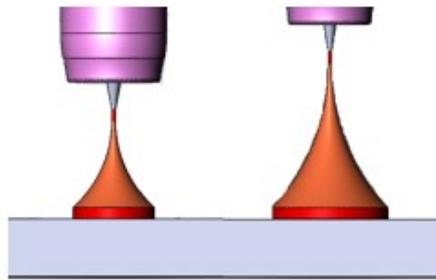


Figura 2.3. Variação do comprimento do arco processo TIG

Corrente

A corrente controla a penetração de forma proporcional, quanto maior corrente maior penetração. Logo, a corrente é ajustada conforme a espessura da peça a soldar. É óbvio que uma corrente maior vai aumentar também a largura do cordão. Também tem uma influência sobre a tensão do arco, se consideramos um mesmo comprimento de arco, quando a corrente aumenta a tensão tende a aumentar também. Observando a equação $U = R \cdot I$, para resistores ôhmicos, pode-se verificar que a influência da corrente na tensão é linear. No arco essa influência não se comporta de maneira ôhmica. Como mostrado na Figura 2.4 a tensão para a corrente de 150 [A] é apenas ligeiramente maior comparada a corrente de 100 [A].

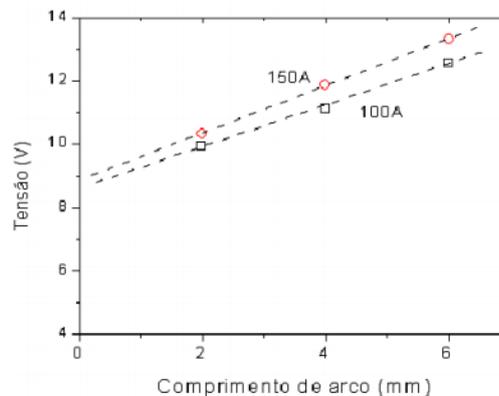


Figura 2.4. Variação da tensão com a DEP e Corrente (Modenesi, 2012)

2.1.3. Característica Estática da corrente no processo TIG

As fontes utilizadas no processo de soldagem TIG possuem característica estática do tipo corrente constante (Figura 2.5). O processo de soldagem pode ser do tipo, CA ou CC, algumas fontes de soldagem além dos tipos de correntes convencionais, possibilitam a utilização de correntes controladas de forma a melhorar a soldagem. As fontes para TIG apresentam tanto

uma resposta em queda (“drooping output”), para fontes do tipo com controle magnético, quanto resposta de saídas aproximadamente de corrente constante, para fontes controladas eletronicamente.

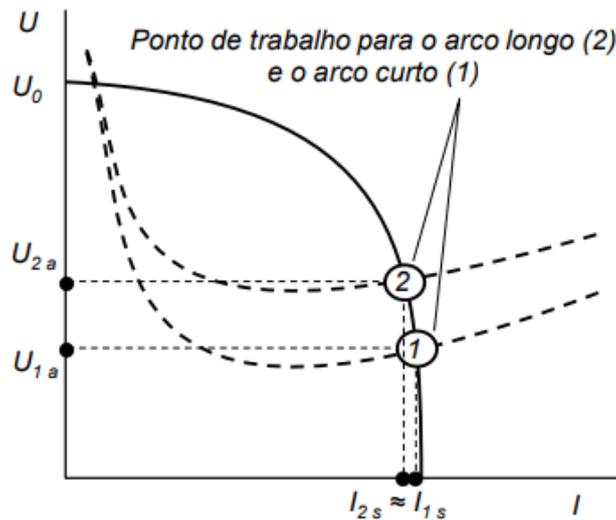


Figura 2.5. Curva tensão / Corrente para fonte TIG (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

As fontes eletrônicas têm suas vantagens para processos automatizados, devido ao seu melhor controle sendo um sistema que acontece em circuito fechado, estas fontes têm como característica uma maior precisão e repetibilidade das variáveis. Na sua maioria, o tempo de resposta dinâmica é muito baixo, o que as habilita a soldagem por pulso. Esse tipo de fonte apresenta algumas desvantagens como o elevado custo de manutenção e maior complexidade na operação.

O processo TIG foi escolhido para este trabalho por oferecer uma possibilidade de mudar tanto a tensão do arco e a corrente de soldagem de maneira quase independente, graças a característica estática da fonte ser do tipo Corrente Constante. Os parâmetros U , I e comprimento de arco (La) são dependentes, mas o nível de dependência varia, como nas situações hipotéticas apresentadas a seguir:

- ✓ Com um aumento da corrente, a tensão sofre um leve acréscimo e La se mantém constante.
- ✓ Com um aumento de La , a tensão tende crescer e corrente se mantém constante.

2.2. Arco Elétrico

Arco voltaico é a passagem de uma grande quantidade de corrente elétrica através de uma atmosfera inicialmente gasosa e/ou de vapores metálicos (gerados a partir dos eletrodos), posteriormente ionizada (virando o plasma), entre dois eletrodos submetidos a uma diferença de potencial, podendo produzir energia térmica suficiente para ser usada em soldagem, pela fusão localizada das peças a serem unidas e o metal de adição.

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 (perdendo energia só na forma de luz e 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.

Mas o arco voltaico tem uma particularidade ainda mais importante para a soldagem por fusão. Esta particularidade está ligada à sua estrutura. O arco elétrico é composto pelas três zonas: zona anódica, zona catódica e a coluna do próprio arco (Figura 2.6) com o calor gerado pelo arco “parcelado” entre elas. 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 2.7. Boa parte do calor gerado na coluna de arco é perdida na forma de radiação e convecção para o ambiente.

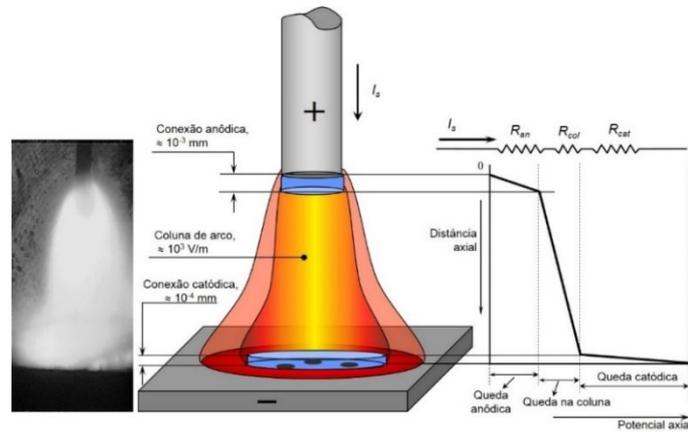


Figura 2.6. Estrutura e a distribuição da tensão ao longo do arco elétrico



Figura 2.7. A estrutura do arco como um gerador de calor

A Figura 2.7 mostra as parcelas do calor gerado em cada acoplamento, sendo a primeira imagem com o eletrodo com polaridade positiva e a segunda com o eletrodo com a polaridade negativa.

2.3. Transferência e Perdas do Calor Durante o Processo de Soldagem TIG

Na soldagem a arco sabemos que nem toda energia é realmente utilizada para promover a fusão do metal base, uma parte dessa energia gerada é perdida para o meio ambiente. A perda para o meio ambiente é dada pelos mecanismos de transferência de calor (convecção, condução, radiação), assim como respingos, aquecimento do eletrodo. 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.

Segundo Scotti *Et al.*, 2012, a eficiência térmica do processo é a fração da parcela do calor que realmente participa da fundição do metal base com o calor gerado pelo arco, não depende apenas do processo de soldagem, mas também dos parâmetros do processo (eletrodo

consumível ou não, corrente e tensão) e das características do material base (condutividade térmica do material, quanto maior a condutividade maior perdas de calor durante o processo de soldagem), isso impossibilita de utilizar um valor fixo para o rendimento térmico de um determinado processo como valor absoluto.

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 2.8). 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 através das gotas do eletrodo consumível (Figura 2.8) 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 é utilizado para aquecer o eletrodo (que no caso não é consumível) esse aquecimento ajuda a promover a emissão termiônica. Vale lembrar que uma parcela do calor carregado pelas gotas é perdida para o ambiente devido aos respingos e à evaporação metálica.

A terceira maneira é a transferência da coluna do arco de plasma que é entregue principalmente na área adjacente a poça de fusão. A radiação da coluna de plasma é um meio de transferir o calor para a chapa, o jato de plasma também carrega energia do plasma (entalpia) para a chapa através da advecção forçada (movimento forçado do gás) e difusão. Uma parcela do calor do plasma é perdida para o meio, por radiação que é a forma predominante e advecção (uma parte do calor do jato de plasma aquece as fronteiras do gás de proteção) (Figura 2.8). Mas a parcela significativa desta perda de calor da coluna de plasma vai para a chapa (não considerada, então, como perda). Isso acontece por advecção, uma vez que a camada correspondente do gás aquecido não ionizado em torno também carrega a energia (entalpia).

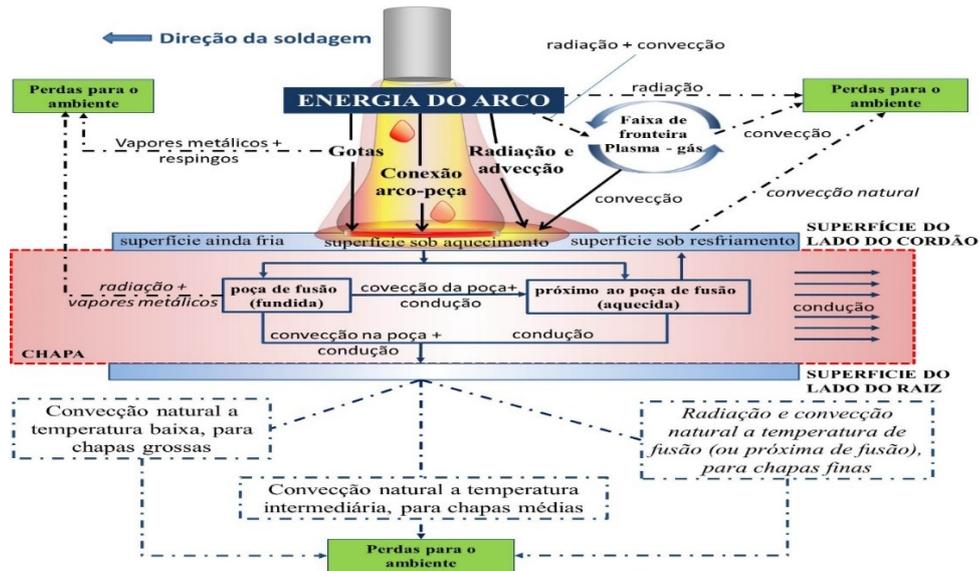


Figura 2.8. Apresentação esquemática da entrada e da saída do calor na chapa durante soldagem (Hurtig. *Et al.*, 2016)

2.4. Calorimetria

Para estudar a eficiência térmica dos processos de soldagem são utilizados calorímetros. O calorímetro, 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. Entre os calorímetros mais utilizados para esse tipo de estudo dois se destacam, o calorímetro de água que é baseado no monitoramento da temperatura da água e calorímetro de nitrogênio líquido (N_2L) quantifica a o aporte térmico através da massa evaporada de N_2L .

2.4.1. Calorímetro 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 2.9.

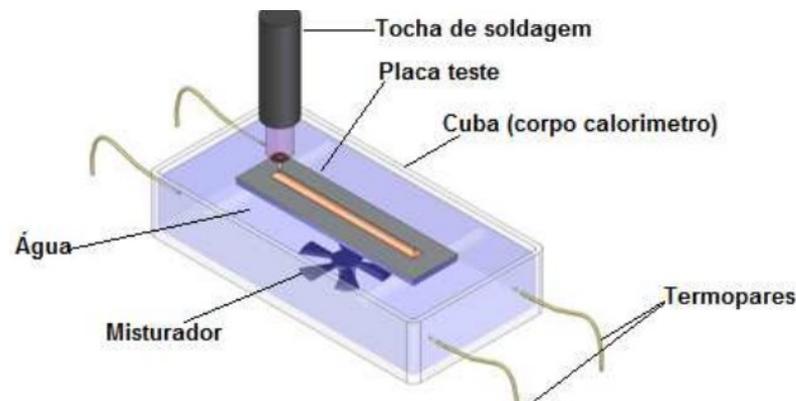


Figura 2.9. Esquema do calorímetro de água (Essers, 1981)

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, após esperar 15 segundos depois de finalizar o processo de soldagem.

O calorímetro da Figura 2.10 mede apenas a eficiência térmica da resistência elétrica e pode ser usado para a aferição do calorímetro de fluxo contínuo de água, conforme mostrado na sessão 3.7. Nesse calorímetro, um fluxo constante de água passa por 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).

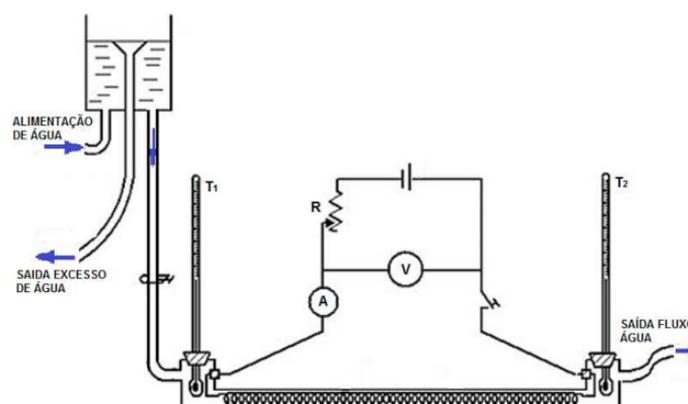


Figura 2.10. Esquema calorímetro de fluxo contínuo (Overbeck e Palmer, 2009)

Lu e Kou (1989) utilizaram um calorímetro do tipo fluxo contínuo para determinar o aporte térmico em processo de soldagem como mostrado na Figura 2.11. 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.

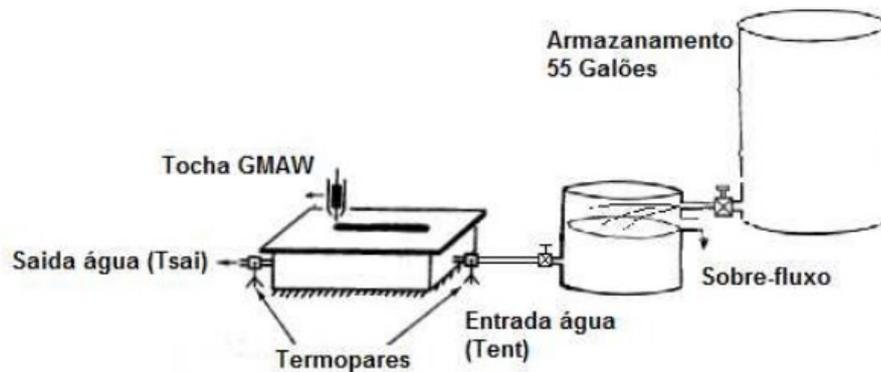


Figura 2.11. Esquema calorímetro fluxo contínuo de água (Lu e Kou, 1989)

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.

$$k = \int_0^{\infty} W * C_{pw} * (T_{2w} - T_{1w}) dt / U_a * I_s * t \quad (2.1)$$

Onde,

W : Fluxo mássico de alimentação de água, [kg/s];

C_{pw} : Calor específico da água [Kj/Kg · °C]

T_{2w} : Temperatura da água no ponto de saída, [°C];

T_{1w} : Temperatura da água no ponto de entrada, [°C];

t : Tempo de soldagem, [s];

U_a : Tensão de soldagem, [V];

I_s : Corrente de soldagem, [A].

2.5. 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 2.2 (Norma EN 1011-1:2009 Soldagem - Recomendações para soldagem de materiais metálicos - Parte 1: orientação geral para soldagem a arco) ou conforme Equação 2.3 (Norma ASME IX-2013 e outras normas do AWS):

$$CI = k \frac{U_a \times I_s}{v} \quad (2.2)$$

$$CI = \frac{U_a \times I_s}{v} \quad (2.3)$$

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 2.1.

Tabela 2.1. 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

2.6. Faixas de Eficiências Térmicas Encontradas por Outros Autores

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), quanto 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 térmica (k) diferentes como mostrado na Tabela 2.2. Tal discrepância pode ser explicada tanto por erros experimentais, como pela dependência do valor da eficiência térmica do processo (k) para cada parâmetro elétrico do arco, a saber, para corrente e para tensão.

Tabela 2.2. 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.

As faixas de eficiências na Tabela 2.2 induzem algumas dúvidas, será que a eficiência térmica (k) é realmente constante (Tabela 2.1) para um determinado processo? e também qual das normas, citadas no item 2.5 da revisão bibliográfica, deve ser utilizada para o cálculo do CI (a que leva em consideração o fator k , ou a outra que ignora a eficiência térmica)? Um dos objetivos deste trabalho é responder essas perguntas.

3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

3.1. Bancada Experimental

A bancada experimental era composta pelos seguintes componentes:

- ✓ Fonte de soldagem;
- ✓ Tocha TIG;
- ✓ Mesa de coordenada ortogonais X;
- ✓ Sistema de aquisição de sinal (Tensão, Corrente);
- ✓ Calorímetro fluxo contínuo de água;



Figura 3.1. Bancada experimental utilizada

3.2. Equipamentos e Insumos

3.2.1. Fonte de Soldagem

Para a realização das soldas utilizou-se a fonte IMC DIGIPlus A7, as fontes de Soldagem da linha DIGIPlus A7 possuem um avançado processador ARM de 32 bits, o que permite operar

com várias modalidades de soldagem (incluindo a solda TIG utilizada no trabalho) e elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica.



Figura 3.2. Fonte utilizada IMC DIGIPlus A7

Tabela 3.1. Características da fonte DIGIPlus A7 (IMC,2018).

Capacidade de Corrente	450A
Tensão de alimentação trifásica	220/380/440
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V
Corrente a 100 % de fator de carga	280 A
Potência nominal	10 kVA
Faixa de corrente	5- 450 A
Corrente nominal por fase (220/380/440)	26/15/13 A
Ripple de corrente	8A
Fator de Potência	0,94

3.2.2. Tocha TIG

Foi utilizado uma tocha com sistema de refrigeração a água (modelo TIG 27A-28B, fabricada pela Binzel).



Figura 3.3. Tocha TIG

3.2.3. Mesa de coordenadas X

A mesa utilizada (Figura 3.1) teve uma grande importância no trabalho, com ela foi possível padronizar o tamanho do cordão, com a velocidade e tempo de soldagem. A tocha era fixada no braço móvel da mesa, que se movimentava no eixo X a uma determinada velocidade. Com isso foi possível eliminar influência do operador no experimento, como possíveis variações na DEP.

3.2.4. Calorímetro utilizado

Para a realização do trabalho foi escolhido um calorímetro do tipo fluxo contínuo de água (Figura 3.4). O seu funcionamento se baseia na medição do aumento da temperatura do fluxo de água, no interior de um recipiente como tubo ou caixa, que retira o calor da placa de teste absorvido do arco de soldagem.

O fluxo de água é contínuo e mantido constante. A evolução da temperatura do fluxo de água é registrada utilizando termopares que mostram a diferença de temperatura do fluxo na saída e na entrada do calorímetro durante o período que engloba o tempo de soldagem e o tempo do seu posterior resfriamento até retornar à temperatura ambiente.



Figura 3.4. Calorímetro utilizado

O calorímetro foi totalmente vedado para que não ocorra nenhuma fuga de água, também é revestido por uma manta térmica com objetivo de evitar fugas de calor. A fixação da chapa é dada através de 4 parafusos.

A chapa metálica deve ser colocada de tal maneira que a região onde ocorre a solda esteja continuamente em contato com água para que ocorra a troca de calor entre o fluxo de água e a chapa. Devido a isso foi colocado um pedaço acrílico na extremidade de saída do calorímetro, de tal maneira que é possível verificar a formação de uma bolha de Ar (Figura 3.5). A presença da bolha indica que não existe ar entre a chapa e a água, quanto menor a bolha melhor.



Figura 3.5. Bolha de ar

3.2.5. Sistema de Alimentação de água e Controle de Vazão

A alimentação de água para o calorímetro deve permanecer com um fluxo constante, evitando flutuações, que podem ocorrer, como quedas de pressão (uma diminuição no nível de água) e aumento ou diminuição de fluxo de água na linha de alimentação. Com essa preocupação foi projetado um sistema que tem como função manter o mesmo nível de água (pressão) no recipiente durante os testes, permitindo assim um fluxo constante de água na alimentação do calorímetro. Na Figura 3.6 mostra o sistema projetado.

A água era contida em uma caixa de acrílico, de dimensões 25x25x60 cm (Figura 3.6), tendo uma linha de alimentação superior que é controlada pelo registro de alimentação da rede de água, um ladrão na parte superior que tem como objetivo manter o nível constante removendo o excesso de água. O nível de água era mantido a aproximadamente 30 litros. Na parte inferior do reservatório de água foi colocado uma válvula de esfera manual, que era mantida totalmente aberta durante os testes e controlava o fluxo de saída para o calorímetro.

O controle da vazão de água no calorímetro era dado pela altura da mangueira na extremidade da saída. Em todos os testes a mangueira foi mantida em uma determinada altura (Figura 3.7), de tal maneira, que fosse possível manter a mesma vazão para todos os testes.



Figura 3.6. Recipiente de água



Figura 3.7. Posição da extremidade de saída da mangueira

3.2.6. Sistema de aquisição de sinal

Com o sistema de aquisição (Figura 3.8) foi possível o monitoramento da tensão e corrente, gerada pela fonte, e as variações de temperatura da água dentro do calorímetro (temperatura de entrada e saída).

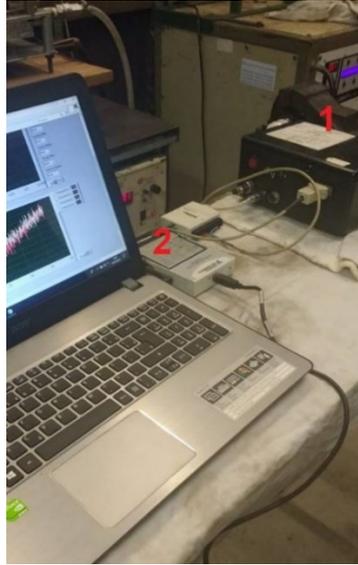


Figura 3.8. Sistema de aquisição de tensão e corrente (1) e temperatura (2)

A tensão do arco que foi adquirida através de um receptor posicionado na tocha de soldagem. O sinal passa por um condicionador de sinal e depois é transferido para uma placa de aquisição de dados, com uma porta USB, para o armazenamento em um micro, auxiliado com o programa labVIEW.

Para a aquisição de corrente foi utilizado um sensor Hall (Figura 3.9), posicionado no cabo terra da fonte de soldagem. O sinal era encaminhado ao condicionador de sinal, depois era transferido para a placa de aquisição.



Figura 3.9. Sensor Hall no cabo terra da fonte

Para a aquisição da temperatura foi utilizado dois termopares do tipo T, os termopares foram devidamente calibrados antes da realização dos testes. Eles devem ser cuidadosamente posicionados de tal maneira que apenas a ponta esteja em contato com o fluxo de água. Os dados foram captados por um módulo de entrada de temperatura da Série C, o NI-9211 (Figura 3.10) possui filtros antialiasing, detecção de termopar aberto e compensação de junta fria, para proporcionar medições de termopar com alta exatidão. A placa possui uma conexão USB direta com o micro, também foi utilizado o labVIEW para a aquisição.



Figura 3.10. Placa de aquisição de temperatura NI-9211

3.3. Procedimento Experimental

Os testes foram realizados com a solda TIG, assim pode-se descartar a influência do metal de adição nos cálculos. Neste processo a tensão e corrente podem ser ajustadas de maneira quase independente. Ao mudar o valor da U o valor da I , permanece constante, já ao mudar I , o valor de U também sofre algumas variações que são fáceis de ajustar (como mostrado no item 2.1.3).

Os parâmetros de soldagem tensão e corrente foram variados durante os testes de tal maneira que fosse possível comparar a influência de cada um deles na eficiência térmica do processo, mantendo a mesma energia de soldagem e com tensão e corrente diferentes.

Utilizou-se para isso um eletrodo de tungstênio toriado (2%) de 3,2 [mm] de diâmetro, com ângulo da afiação do eletrodo 60° e com posição perpendicular da tocha. Os testes foram realizados em simples deposição na posição plana sobre chapas de aço carbono ABNT 1020 de 200 x 100 x 6,3 [mm] de dimensão, com 2 cordões por placa de teste.

A soldagem foi realizada com o eletrodo na polaridade negativa. O gás de proteção utilizado foi o argônio industrialmente puro (4.0) com vazão de 10 [l/min]. A vazão de água no calorímetro foi mantida 4,3 [l/min] para todos os testes.

O valor do tempo de soldagem desejado estava em torno de 20 segundos, ocorreu algumas alterações devido ao *delay* (atraso), Figura 3.11, de abertura e fechamento do arco elétrico.

3.4. Cálculo da Energia de Soldagem

A partir dos dados obtidos pelo sistema de aquisição de tensão e corrente foi possível calcular a energia de soldagem.

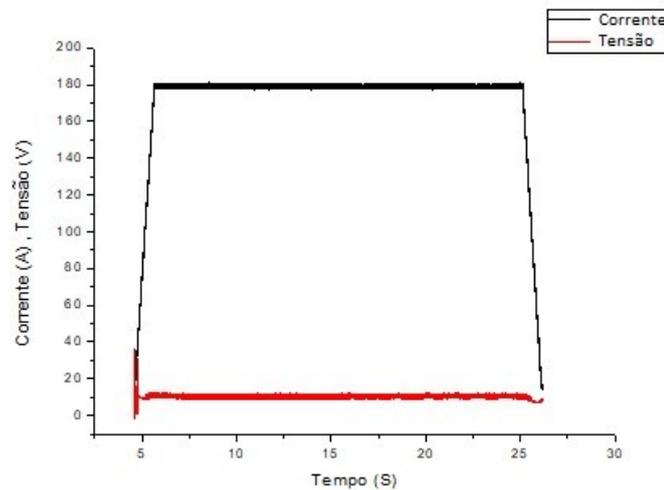


Figura 3.11. Aquisição de tensão e corrente no tempo (5 s o arco é aberto e em torno de 25 s é fechado)

A potência instantânea média (\bar{P}_{inst}) Equação 3.1, é o somatório do produto da tensão e corrente em cada instante durante o período de soldagem, dividido pelo número de pontos adquiridos.

$$\bar{P}_{inst} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)}{n} \quad (3.1)$$

Neste trabalho a energia de soldagem (E_s) foi calculada utilizando a Equação (3.2), que é o produto da potência instantânea média com o tempo de soldagem (t_s).

$$E_s = \bar{P}_{inst} * t_s \quad (3.2)$$

3.5. Cálculo do Aporte Térmico

O aporte térmico é obtido através de calorimetria. Para o cálculo da energia absorvida, durante o processo de soldagem, usando calorímetro deve-se utilizar a Equação 3.3.

$$C_{abs} = \int_0^{\infty} W * C_{pw} * (T_{2w} - T_{1w}) * dt \quad (3.3)$$

Onde W é a vazão de água, que passa dentro do calorímetro durante o processo de soldagem, que é dada em [kg/s], o C_{pw} é o calor específico da água [kJ/Kg · °C], T_{2w} e T_{1w} são as temperaturas de saída e de entrada de água no calorímetro respectivamente, a temperatura é dada em [°C]. O dt é a constante de tempo do sistema.

A densidade (ρ) e o calor específico (C_{pw}) são propriedades termodinâmicas que variam de acordo com a temperatura da água, para simplificar os cálculos, foi utilizado a temperatura de entrada da água para encontrar essas propriedades. Foi adotado respectivamente 0,7 [kg/s] e 4176 [kJ/Kg · °C]. O dt é um valor constante de tempo dado pelo o sistema de aquisição de temperatura, que vale 0,42 [s], ou seja, o sistema adquire um sinal de temperatura a cada 0,42 [s]. A integral da variação de temperatura no espaço de tempo analisado é análoga à área acima do gráfico (Figura 3.12) obtido através do sistema de aquisição de sinal.

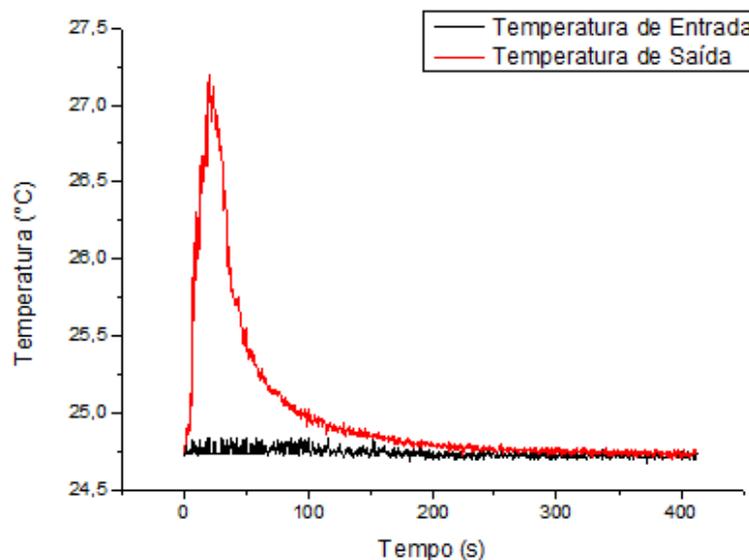


Figura 3.12. Gráfico aquisição de temperatura

Pode-se observar o gráfico de aquisição (Figura 3.12) com duas curvas de temperatura adquiridas pelos termopares, uma curva mostra a temperatura na entrada do calorímetro, que tende a se manter constante durante o processo de soldagem, e a outra representa a temperatura na saída, a temperatura de saída tende a subir durante o processo de soldagem e depois com o tempo ela vai se estabilizando, até chegar a mesma temperatura da entrada.

O sinal foi tratado e filtrado no Excel, para tentar eliminar ao máximo os ruídos presentes no momento da aquisição de sinal, também para corrigir variações na temperatura de entrada e saída dos termopares.

3.6. Análise da geometria do Cordão

Para realizar a análise dos cordões de solda, as chapas que continham os cordões foram cortadas transversalmente com um disco especial na cortadora metalográfica (Figura 3.13). As amostras devidamente separadas foram preparadas metalograficamente, com lixas de granulometria 220, 320, 400 e 600 mesh, para eliminar todos os riscos presentes. Em seguida todas as amostras foram atacadas quimicamente, utilizando-se Nital 10%, para uma melhor visualização dos contornos da área fundida.



Figura 3.13. Cortadora Metalográfica

As amostras atacadas foram levadas para o microscópio ótico, onde foram ampliadas e fotografadas (Figura 3.14). Com um auxílio de um software, as imagens foram tratadas e as medições das características dos cordões de solda (largura do cordão, área fundida e penetração) foram realizadas.

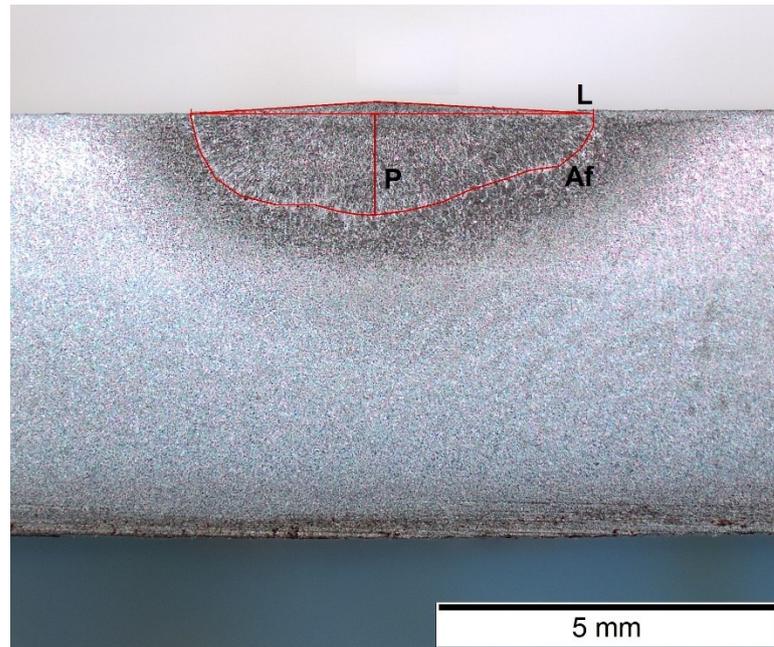


Figura 3.14. Características do cordão Penetração (P), Largura (L), Área fundida (Af)

3.7. Aferição do calorímetro

Para medir o calor gerado por uma resistência ôhmica foi utilizado o mesmo calorímetro com um aquecedor de chuveiro instalado dentro do calorímetro (Figura 3.15). Nas extremidades da resistência, foram acoplados dois fios, estes localizados sobre a superfície de uma placa de acrílico, que além de ser uma forma de vedar o calorímetro, também servia como isolante térmico entre o meio (fluxo de água) e o ambiente.

Dois porta eletrodos foram instalados nos bornes de uma fonte de soldagem TIG (gerando 20 [A] com 57 [V]) de tensão e ligados separadamente em cada um dos fios, como observado na (Figura 3.15).

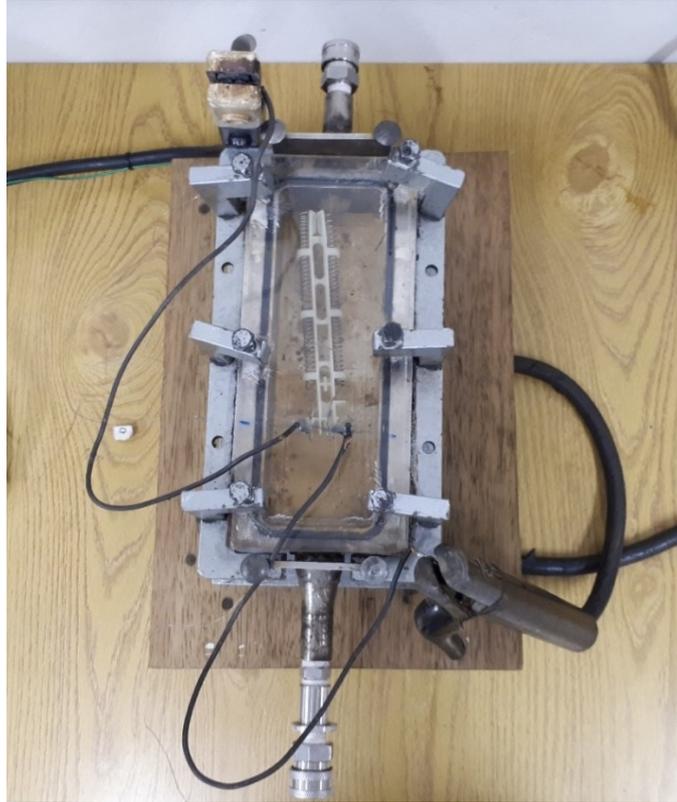


Figura 3.15. Resistência acoplada a placa de acrílico dentro o calorímetro

Ao avaliar o calor gerado pela resistência ôhmica que é absorvido pela água do calorímetro, foi determinado que o calorímetro “consegue” capturar por volta de 95% do calor gerado dentro dele por efeito Joule, confirmando que no caso da resistência ôhmica, o calor teórico gerado e o calor capturado pelo calorímetro são quase iguais. O que não é caso do arco elétrico. Embora o calor gerado pelo arco elétrico seja de simples mensuração ($U_a \cdot I_a \cdot t$), nem todo o calor será repassado para a peça de trabalho.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Comparação teórica do fenômeno da geração de calor numa resistência ôhmica e no arco elétrico

Numa resistência ôhmica a contribuição da tensão e da corrente na geração do calor é a mesma, ou seja, para manter uma dada potência, elas têm que ser escolhidas de maneira inversamente proporcional (quando um parâmetro se torna maior, o outro deve ser menor). Por exemplo, a potência de 2500 [W] em um chuveiro elétrico pode ser alcançada por 220 [V] e 11,4 [A] ou por 127 [V] e 19,7 [A]. A única diferença será na bitola dos fios elétricos, sendo mais grossos para a tensão 127 [V]. A água receberá a mesma quantidade de calor, caso a potência do chuveiro seja do mesmo valor.

Por outro lado, em se tratando de soldagem, embora a geração do calor no arco elétrico vai seguir os mesmos princípios da eletricidade, a transferência do calor para a peça já não vai ser tão eficiente como no caso de uma resistência submersa na água. Isso acontece devido ao fato que a geração de calor no arco elétrico acontece ao mesmo tempo nas três zonas distintas, contudo apenas uma delas está acoplada à peça. A seguir será mostrado que neste caso um aumento da tensão de arco aumentará a geração de calor no arco, mas não obrigatoriamente favorecerá à transferência de calor para a peça. Embora, um aumento da corrente sempre ocasionará um aumento da geração de calor e a transferência dele para a chapa. A Figura 4.1 mostra uma analogia do arco de soldagem com resistências ôhmicas em série (representando a extensão do eletrodo e as zonas do arco: conexão arco-eletrodo, coluna de arco e a conexão arco-peça).

Cada zona desde o eletrodo até a peça de trabalho constitui um valor de tensão diferente, totalizando um único valor de tensão de arco U_a , contudo, há apenas um valor constante de corrente elétrica I_s ao percorrer todas as zonas.

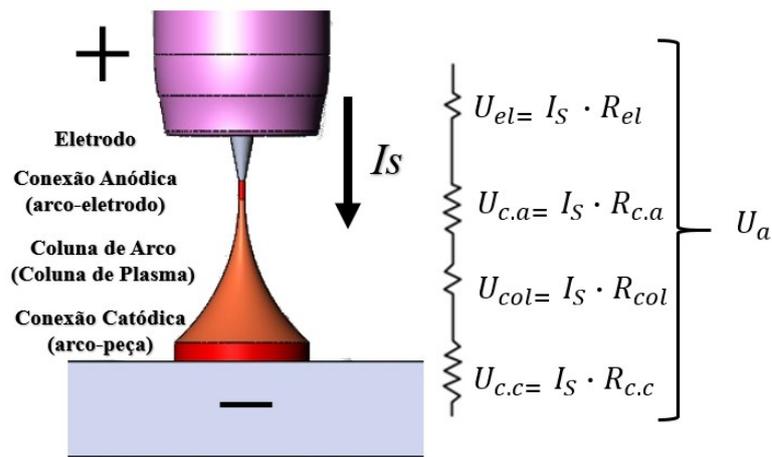


Figura 4.1. Uma analogia do arco com resistências ôhmicas em série

Para entender melhor o que acontece com a geração de calor nas três zonas do arco e na extensão do eletrodo, precisa-se analisar a influência dos dois principais parâmetros elétricos do arco, a saber a tensão U_a e a corrente I_s , pois a geração de calor em cada zona depende tanto da corrente I_s , como da tensão U_a . A corrente I_s é a mesma para todas as três zonas do arco e extensão do eletrodo, enquanto a queda de tensão é diferente para cada uma delas. A queda de tensão na extensão do eletrodo depende do comprimento da extensão e da corrente (em ambos os casos a dependência é ôhmica e linear). As quedas de tensão nas conexões anódica ($U_{c.a}$) e catódica ($U_{c.c}$) para mesma corrente I_s são constantes. A queda de tensão da coluna do arco (U_{col}) depende do seu comprimento (dependência é ôhmica e linear) e da corrente (mas de maneira não ôhmica e não linear).

Para a situação quando a corrente de soldagem é mantida constante, um aumento do comprimento do arco acarreta um aumento da potência do arco e, logo, da geração do calor, mas apenas numa das suas zonas, a saber, na coluna de arco contribuindo para perdas de calor para o meio ambiente e parcialmente aumentando o aporte de calor (Figura 4.2). O calor gerado na conexão arco-eletrodo é o mesmo e com a mesma densidade de energia. O calor gerado na conexão arco-peça é mesmo, mas a densidade de energia é mais baixa.

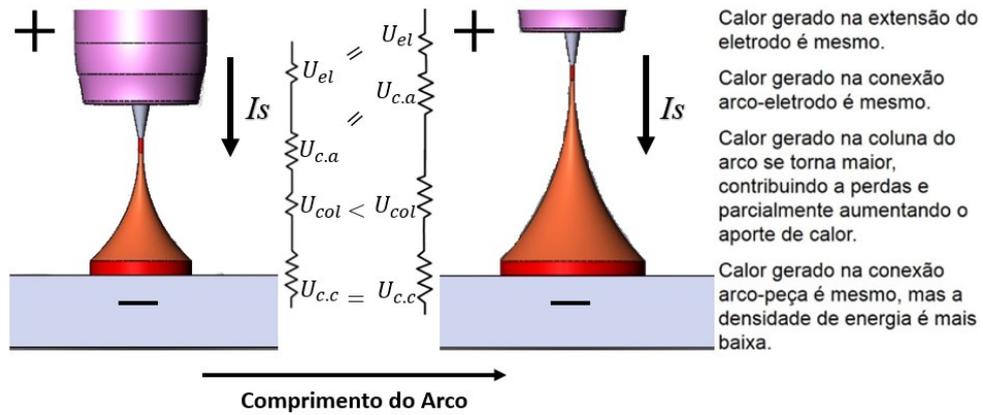


Figura 4.2. Ilustração dos efeitos do aumento da tensão de arco de soldagem mantendo a corrente constante (a potência do arco vai crescer)

Uma segunda situação de destaque, é quando mantêm-se mesmas potências ($P_1 = P_2$ para a resistência elétrica e $P_{S1} = P_{S2}$ para o arco), Figura 4.3, porém os valores de tensão e corrente se tornam inversamente proporcionais (por exemplo, para o arco, valor de tensão menor que o valor da corrente e vice-versa: $P_{S1} = U_1 \downarrow \cdot I_1 \uparrow$; $P_{S2} = U_2 \uparrow \cdot I_2 \downarrow$, ou seja o arco 2 é mais longo).

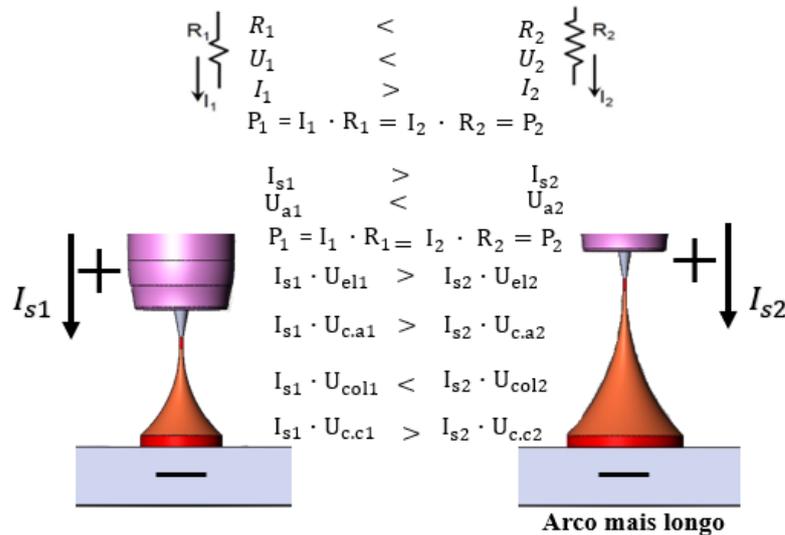


Figura 4.3. Comparação ilustrativa dos efeitos da regulação dos parâmetros de uma resistência ôhmica (acima) e de um arco de soldagem (abaixo) mantendo a mesma potência elétrica.

Neste caso, para potências iguais ($P_1 = P_2$), considerou-se valores de corrente ($I_1 > I_2$), enquanto que para tensões ($U_1 < U_2$), mantendo-se a proporcionalidade entre as variáveis e sobretudo a igualdade dos valores de potências, que, por sua vez, determina a igualdade do

volume de calor gerado em ambos os casos (arco curto e arco longo). Mas, a distribuição do calor entre as zonas do arco torna-se distintas: enquanto a coluna do arco ganha calor, as conexões anódica e catódica perdem. Além disso, a densidade de energia no acoplamento arco-peça torna-se menor quanto maior for o comprimento do arco. Logo, no arco 2 a área fundida será menor, a penetração reduzida (tanto por causa da redução de corrente, como devido redução da densidade de energia) e a largura do cordão será maior.

4.2. Resultados dos testes para avaliar a influência da tensão do arco e da corrente de soldagem na eficiência térmica do processo de soldagem a arco e na geometria do cordão

A eficiência da transferência de calor no caso da soldagem a arco dependerá principalmente do comprimento do arco, ou seja, da tensão do arco como mostram os dados da Tabela 4.1. Os testes 1 e 2 (replicado em 5, 6 e 9, 10) apresentam resultados com aproximadamente a mesma potência de soldagem (~ 1800 [W]) e tempo de soldagem ($\sim 21,5$ [s]), resultando assim em uma energia de soldagem por volta de (~ 36000 [J]), fazendo uma combinação entre a tensão e corrente, de modo que o produto (o valor de potência) se mantivesse constante. Para os testes 1, 5 e 9, escolheu-se um valor de corrente de 150 [A], o comprimento de arco de 4 mm com o valor de tensão resultante de 12 [V]. Para os testes 2, 6 e 10, o valor do comprimento de arco foi reduzido e, ao mesmo tempo, o valor da corrente de soldagem aumentado até 180 [A]. A tensão medida neste caso foi de 10 [V], haja visto sua relação de proporcionalidade com o comprimento do arco. Assim foram obtidos os valores de potência similares. A velocidade de soldagem foi mantida constante em 20,0 [cm/min]. Os dados da Tabela 4.1 mostram que para aproximadamente a mesma potência de arco e energia de soldagem E_s , o calor absorvido pela peça de teste foi menor no caso do arco longo, acarretando menores valores da eficiência térmica do processo de soldagem.

A Tabela 4.1 também contém os resultados dos testes com a variação de apenas um parâmetro de soldagem, ora U_a , ora I_s . Assim tornou-se possível destacar a contribuição de U_a e I_s para a eficiência térmica do processo de soldagem e para o calor imposto. Essa contribuição está ilustrada de maneira qualitativa na Figura 4.4. Com um aumento tanto da tensão do arco, como da corrente a energia de soldagem aumenta também. Contudo, a eficiência térmica do processo cai.

A queda de k é mais acentuada no caso do aumento da U_a , pois o arco mais longo perde mais calor para o ambiente. No caso do aumento da I_s o valor do k permanece quase constante (com uma perda leve). O calor imposto sobe de maneira proporcional ao aumentar a corrente e tem apenas leve crescimento com o aumento da tensão do arco (resultado do aumento das perdas de calor para ambiente). Esta análise mostra de maneira clara que a eficiência térmica de um determinado processo de soldagem a arco não é uma grandeza constante.

Tabela 4.1. Eficiência térmica da soldagem TIG para diferentes combinações dos valores da tensão do arco, da corrente de soldagem.

<i>Teste</i>	<i>DEP</i> (mm)	U_a (V)	I_s (A)	<i>Potência</i> (W)	t (s)	E_s (J)	C_{abs} (J)	k (%)
1ª série de testes								
1	4	12	150	1722,52	20,37	35087,72	18941,56	54
2	2	10	180	1679,71	21,65	36365,66	22926,44	63
3	2	10	150	1407,65	21,89	30813,44	20164,35	65
4	4	12	180	2137,51	21,34	45614,54	24424,95	54
2ª série de testes								
5	4	12	150	1623,21	21,81	35402,18	20041,28	57
6	2	10	180	1603,87	21,51	34499,14	21926,74	64
7	2	10	150	1348,28	21,43	28893,71	18941,59	66
8	4	12	180	1887,97	21,71	40987,90	21886,32	53
3ª série de testes								
9	4	12	150	1645,01	21,81	35877,65	20362,36	57
10	2	10	180	1706,34	21,67	36976,47	22834,67	62
11	2	10	150	1336,20	22,39	29917,45	19041,56	64
12	4	12	180	1916,12	22,05	42250,45	22886,46	54

Obs.: O eletrodo foi de 3,2 mm, a vazão de gás de 10 l/min e o bocal usado foi de nº 10 (diâmetro do orifício de 16,3 mm). Nos pares de testes 1 e 2, 5 e 6, 9 e 10 a intensão foi de manter a mesma potência. As três séries dos mesmos testes foram feitas para verificar a repetibilidade.

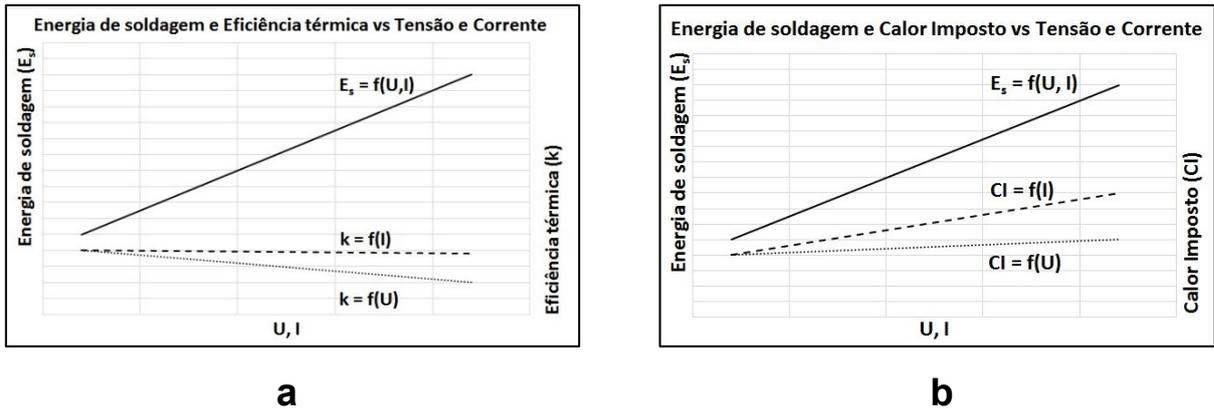


Figura 4.4. Ilustração qualitativa da influência da tensão do arco e da corrente de soldagem na eficiência térmica do processo (a) e no CI (b)

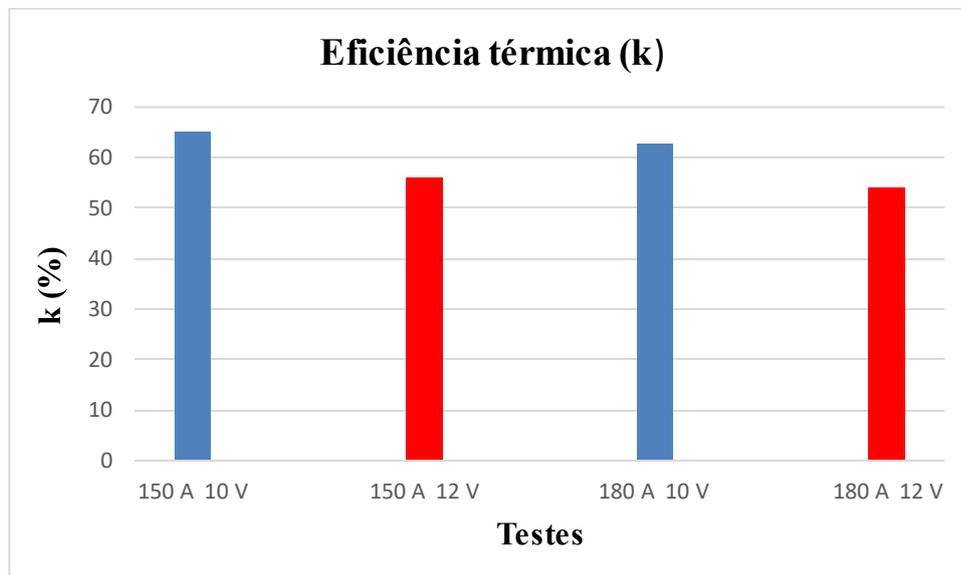


Figura 4.5. Valores médios da Eficiência térmica dos testes realizados

A Figura 4.4 mostra, de maneira qualitativa, a influência da tensão do arco e da corrente na energia de soldagem, na eficiência térmica do processo e no calor imposto. Com um aumento tanto da tensão do arco, como da corrente a energia de soldagem aumenta também. Mas no caso da eficiência térmica do processo, ela cai drasticamente com aumento da U_a , pois o arco mais longo perde mais calor para o ambiente, e permanece quase constante (com uma perda leve) no caso do aumento da I_s (Figura 4.5). O calor imposto sobe de maneira proporcional ao aumento da corrente e tem apenas leve crescimento com o aumento da tensão do arco (resultado do aumento das perdas de calor pelo ambiente). Esta análise mostra de maneira clara que a eficiência térmica de um determinado processo de soldagem a arco **não é uma grandeza constante**.

Tabela 4.2. Valores médios das Características do cordão de solda.

I_s (A)	U_a (V)	k (%)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)
150	12	56	1,159	4,606	3,566
180	12	54	1,495	5,936	7,348
150	10	65	1,622	4,181	4,352
180	10	63	1,977	5,468	6,404

A influência da combinação dos parâmetros de soldagem na eficiência térmica do processo, é confirmada pela análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria dos cordões obtidos nestes testes (Tabela 4.2). O menor comprimento do arco e a maior corrente de soldagem resultaram em maior penetração e área fundida, pois quanto mais próximo o eletrodo se encontrar da placa de teste, mais concentrado é acoplamento arco-peça, o que proporciona menores perdas de calor para áreas circundantes resultando, dessa forma, em um melhor aproveitamento do calor gerado pelo arco (confirmado pelos maiores valores de eficiência térmica k). Lembra-se que a potência elétrica foi mantida a mesma tanto para o arco curto, como para o arco longo.

Porém, quando se tem como análise a largura, verifica-se que o afastamento do eletrodo da placa de teste (tensão 12[V]) propicia um acoplamento arco-peça mais largo e o arco menos concentrado, apresentando com isso maior valor de largura e menores valores para penetração e área fundida. O arco longo tem maiores perdas de calor para o ambiente ocasionando uma queda do rendimento térmico do processo como verificado na Tabela 4.1, resultado este que está em concordância com o trabalho de Haelsing *Et. al.*, 2012. Para o processo de soldagem TIG o Calor Imposto pode representar apenas a metade (50%) do calor total gerado pelo arco (Tabela 4.1).

5. CONCLUSÕES

Um aumento da tensão de arco aumenta a geração de calor no arco, mas não obrigatoriamente favorece à transferência de calor para a peça (aumento do Calor Imposto), pois o aumento da tensão acontece normalmente pelo aumento da coluna do arco que perde quase todo seu calor para o meio ambiente, reduzindo assim a eficiência térmica do processo.

Um aumento da corrente sempre vai acarretar em um aumento da geração de calor e a transferência dele para a chapa, pois junto ao aumento da corrente acontece o aumento da geração do calor em todas as três zonas do arco, e mesmo com a perda de calor da coluna, por sinal, a menor parte das três, o calor gerado no acoplamento arco – metal de base será transferido para a peça quase por completo aumentando o Calor Imposto).

O valor do Calor Imposto, calculado conforme recomendado nas normas vigentes (ASME IX e EN 1011-1), pode ser bem diferente do valor real do *CI* e o benefício dele para a avaliação do processo de soldagem é duvidoso, com muitos erros associados a variação de eficiência térmica para cada parâmetro.

O “Calor Imposto” calculado pela equação, recomendada pela Norma ASME IX, não leva em consideração a eficiência térmica do processo e representa “a energia do arco por unidade do comprimento do cordão” e não o Calor Imposto propriamente dito. Para o processo de soldagem TIG, o Calor Imposto pode representar apenas a metade (50%) do calor total gerado pelo arco.

A Equação para o cálculo do *CI*, prescrita pela Norma EN 1011-1, também não oferece um valor seguro do *CI* pois o valor da eficiência térmica do processo é considerado como constante, o que não é a verdade pois ele pode variar em 20 – 30% devido, principalmente, do valor da tensão do arco (Figura 4.4).

Para evitar equívocos na avaliação da influência da energia de soldagem nas propriedades da solda é aconselhável usar os valores da tensão do arco, da corrente de soldagem e da velocidade de soldagem recomendados e indicados por Especificações de Procedimento de Soldagem (EPS) sem chegar a calcular o Calor Imposto.

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.

ARÉVALO, H. D. H. (2011). **Desenvolvimento e avaliação de calorímetros via nitrogênio líquido e fluxo contínuo (água) para processos de soldagem,** Mestrado em Engenharia. Universidade Federal de Uberlândia.

BAG, S. & DE, A., **Probing Reliability of Transport Phenomena Based Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Autogenous Fusion Welding Process.** Metall. & Material Transactions A, Vol 41A, Sep. 2010, pp. 2337-2347.

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

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

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.

ESSERS, W. G., & WALTER, R. (1981). **Heat transfer and penetration mechanisms with GMA and plasma-GMA welding.** Welding Journal, 60(2), 37-42.

HÄLSIG, KUSCH, MAYR. **New findings on the efficiency of gas shielded arc welding.** Weld World 56(11-12), ISSN: 0043-2288, 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.

LU, J., e KOU, S. **Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminum - Part 2**. Welding Journal, 60 (11), 452s-456s, 1989.

OVERBECK, C.J.; MARSH, R.R.; PALMER, W.W. "Cenco Physics." All content copyright Cenco Physics and Sargent-Welch, unless otherwise noted. 19 de Agosto de 2009.

MISHRA, S. & DEBROY, T., **A heat-transfer and fluidflow-based model to obtain a specific weld geometry using various combinations of welding variables**. J. Appl. Phys. 98, 2005, 044902.

MODENSI, P. J.,” **Introdução à Física do Arco Elétrico**”, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

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

PONOMAREV, V., “**Apresentação Soldagem TIG**”. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018. 50 p. Disciplina Fundação e Soldagem.

SGARBI, P.V., **Construção de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem**, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

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.

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