



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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO BOCAL NA
EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**

KAIO GUILHERME FERRAZ PIRES

UBERLÂNDIA – MG

2018

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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO BOCAL 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, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia – MG

2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Volodymyr Ponomarov
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Douglas Bezerra de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia

Me. Diego Costa
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo! Pela vida, pela saúde, pela graça do saber e pela força que me destes para seguir de cabeça erguida e terminar com excelência o curso de Engenharia Mecânica. Obrigado, Senhor! És tu em todos os momentos o maior mestre que posso ter!

Aos meus pais por acreditarem em mim! Por me conferir a possibilidade dos estudos! Pelo apoio que me deram do início ao fim! Obrigado, pai! Obrigado, mãe!

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, agradeço por me proporcionar o conhecimento e o suporte durante todo o curso de Engenharia Mecânica.

A todos os professores que com saber e competência trouxeram a mim o legado de me formar de maneira séria e promissora, agradeço infinitamente!

Meu orientador Prof. Volodymyr Ponomarov e ao orientador doutorando Diego Costa, obrigado por tão significativo suporte no desenvolvimento deste TCC.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho, Glauber Soares, Pedro Leite, Pedro Cunha, pela solicitude na execução dos testes laboratoriais e pelo envolvimento durante todo o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, meu muito obrigado!

Ao Laboratório de Pesquisa em Soldagem, agradeço pela disponibilização dos equipamentos e locais para execução das ações.

Meu respeito à bancada avaliadora!

A todos os meus familiares e amigos que de alguma maneira contribuíram nesta caminhada e fizeram parte dessa incrível jornada, obrigado!

RESUMO

As normas vigentes, como por exemplo EN ISO 1101-01, estipulam um valor constante para a eficiência térmica (k) de cada processo de soldagem. Por outro lado os valores de k encontrados na literatura caem numa larga faixa, por exemplo de 30% até 90% para o processo TIG. A explicação deste fato pode ser uma ignorância pelos pesquisadores dos fatores que podem influenciar o valor k , tais como vazão de gás de proteção, tamanho de bocal, ângulo de inclinação da tocha, e outros. O presente trabalho tem como objetivo confirmar que mesmo um fator considerado insignificante, como o tamanho do bocal de tocha, pode influenciar a transferência de calor do arco para a peça, ou seja mudar a eficiência térmica do processo de soldagem TIG. Com o intuito de evidenciar a influência do tamanho do bocal na eficiência térmica do processo TIG, foram realizados testes utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água, com três tamanhos de bocal (8, 10 e 12), mantendo a tensão e corrente constantes, para fim de comparação de resultados. Constatou-se que quanto menor o bocal da tocha (nº 8), maior é o valor de k (57,85%), e maiores os valores geométricos de penetração e áreas fundidas do cordão de solda, comprovando o fato da maior transferência do calor para a chapa nestas condições. Foram discutidas hipóteses para explicar os resultados obtidos.

Palavras-chave: Eficiência Térmica; TIG; Geometria do cordão de solda; Tamanho do bico, Calorímetro

ABSTRACT

Existing standards, such as the EN ISO 1101-01, stipulate a constant value for the thermal efficiency (k) for each welding process. On the other hand, values of k found in literature may vary over a wide range, going, for example, from 30% to 90% for the TIG process. One possible explanation is that researchers usually ignore the factors that may influence the k -value, such as the shielding gas flow, nozzle size, torch inclination angle, etc. The aim of the present work is to confirm that even a factor usually considered insignificant, such as the size of the torch nozzle, can influence the heat transfer from the arc to the object, changing the thermal efficiency of the TIG welding process. In order to demonstrate how the nozzle size influences the thermal efficiency of the TIG process, tests were performed using a continuous water flow calorimeter with three nozzle sizes (8, 10 and 12) while voltage and current were kept constant, and then the results were compared. It was found that the lower the torch nozzle (8), the higher the k value (57.85%), the geometric values of penetration and the melted areas of the weld bead, showing a greater heat transfer to the plate under these conditions. Some hypotheses to the results obtained were also discussed.

Key words: Thermal Efficiency; TIG; Weld bead geometry; Size of the nozzle, Calorimeter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Equipamento básico do processo TIG (Fonte: Introdução a processos e metalurgia de soldagem por Professor Dr. João Batista Fogagnolo).....	3
Figura 2.2 - Curva Tensão/Corrente para fonte de soldagem TIG por Professor Dr. Volodymyr Ponomarov.....	5
Figura 2.3 – Bocais usados na tocha de soldagem TIG (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	7
Figura 2.4 - Imagem Arco elétrico aberto no processo de Soldagem TIG (Soldagem – Coleção tecnológica SENAI – 1ª ed. 1997).....	8
Figura 2.5 - Apresentação esquemática da entrada e da saída do calor na chapa durante soldagem, em Hurtig. Et al. (2016).....	9
Figura 2.6 - Calorímetro de fluxo constante de água (SGARBI, 2013).....	9
Figura 3.1 - Bancada experimental (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	13
Figura 3.2 - Calorímetro de fluxo constante de água (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	17
Figura 3.3 - Fixação da chapa de testes com a bolha de ar na parte acrílica (LAPROSOLDA FEMECUFU).....	19
Figura 3.4 - Sistema de aquisição de sinais elétricos para o calorímetro (Arevalo, 2011).....	20
Figura 3.5 - Recipiente de armazenamento de água (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	21
Figura 3.6 - Fonte IMC DIGIPlus A7 (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	22
Figura 3.7 - Curvas frequentes de aquisição de tensão e corrente para o processo de soldagem TIG (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	23
Figura 3.8 - Geometria do cordão de solda (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	25
Figura 3.9 - Curvas de sinais de temperatura da água esperada para os ensaios. (LAPROSOLDA FEMEC UFU).....	26
Figura 3.10 - Escolha dos valores das variáveis do processo TIG por Professor Dr. Volodymyr onomarov.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo do efeito da corrente e polaridade sobre o processo de soldagem TIG.....	6
Tabela 2.2 - Eficiência térmica (k) de processos de soldagem (conforme a Norma EN ISO 1011-1)	11
Tabela 2.3 - Eficiências térmicas (K) propostas por diferentes autores.....	12
Tabela 3.1 - Características da fonte DIGIPlus A7 (IMC,2018)	22
Tabela 4.1 - Valores obtidos e calculados durante os procedimentos experimentais de solda.....	29

LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos
AWS	Sociedade Norte-americana de Soldagem
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DEP	Distância Eletrodo Peça
EN 1011-1	Norma Europeia
TIG	Tungsten Inert Gas (Tungstênio Inerte Gás)

SÍMBOLOS

I	[A]	Corrente
CI	[J]	Calor imposto
C_p	[kJ/Kg • °C]	Calor específico
ρ	[kg/m ³]	Densidade
k	[%]	Eficiência térmica
E_s	[J]	Energia de soldagem
m	[kg/s]	Fluxo mássico de alimentação de água
P	[W]	Potência
T_s	[°C]	Temperatura no ponto de entrada
T_e	[°C]	Temperatura no ponto de saída

v [mm/s] Velocidade de soldagem

t [s] Tempo

U [V] Tensão

Sumário

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS	iii
CAPÍTULO I.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II.....	3
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.1 Processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas).....	3
2.1.2 Principais variáveis do processo.....	4
2.1.3 Tensão do arco.....	4
2.1.4 Corrente de soldagem	5
2.2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS.....	7
2.2.1 Fontes de energia	7
2.2.2 Eletrodos de Tungstênio	8
2.2.3 Bocais	8
2.3 QUANTIFICAÇÃO DO CALOR NO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	10
2.3.1 Quantificação do calor imposto segundo normas.....	11
2.4 ERROS DE DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO	12
2.4.1 Transferência de calor no processo de soldagem	13
2.5 CALORIMETRIA	15
CAPÍTULO III	17
3.1 METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	17
3.1.1 Bancada	17
3.1.2 Calorímetro utilizado.....	18
3.1.3 Sistema de Aquisição de sinais dos termopares	19
3.1.4 Sistema de alimentação de água	20
3.1.5 Fonte de soldagem.....	21
3.1.6 Tocha TIG com bocal de Cerâmica.....	23
3.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA.....	23
3.2.1 Cálculo da Energia de Soldagem.....	24
3.3 Testes de eficiência do calorímetro	24
3.4 Geometria do cordão.....	24
3.5 OBTENÇÃO DO APORTE TÉRMICO	25

CAPÍTULO IV	28
RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
CAPÍTULO V	31
CONCLUSÕES	31
CAPÍTULO VI	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

No processo de soldagem por fusão a arco elétrico, a transferência de calor para o material de base é fundamental. O calor determina como serão as propriedades finais da junta solidificada, mas principalmente os parâmetros inerentes à microestruturas e sua geometria. Essa transferência de calor da fonte de soldagem para a junta causa alterações de temperatura na solda e nas regiões periféricas do metal de base, que é diretamente dependente de como o calor é propagado para as partes sobressalentes do metal sendo soldado.

No que se concerne, o calor gerado pelo arco é de fácil quantificação, já o calor absorvido pelo metal de base é de complexa avaliação. Existem muitas perdas de calor não controladas entre o arco e o metal de base. A eficiência térmica é determinada a partir da razão entre o calor absorvido e a energia de soldagem. Embora essa energia de soldagem seja conhecida, a efeito dela na junta é de difícil previsão. Não sempre é conhecida a relação entre energia de soldagem e seus efeitos na peça, pois os parâmetros de soldagem, tensão, corrente, velocidade de deslocamento e tipo de processo, modificam de modo diferente o rendimento térmico e a intensidade do arco. Logo, utilizando o mesmo processo de soldagem mas com parâmetros individuais distintos, é possível soldas com geometrias de diferentes formatos e resistências.

O arco voltaico é definido por reações químicas e elétricas, que transformam tudo em calor e luz, sendo que para valores maiores de correntes geram mais calor. O processo de soldagem TIG (Tungstênio Inert Gas) utiliza do calor originado do arco para fundir a peça a soldar. Mas nem todo o calor é usado para esse fim, pois uma certa parte desse é transferido para a atmosfera na forma de:

- Intensidade Luminosa;
- Vibração sonora;

- Radiações;
- Aquecimento do eletrodo de Tungstênio;

As especificações do processo de soldagem determinam as perdas de calor e consequentemente a eficiência térmica (K) do processo, critério importante por fazer parte dos cálculos de calor absorvido (Calor Imposto – CI) e, por consequência, usado como parâmetro qualitativo e quantitativo na análise da junta soldada.

As normas vigentes, como por exemplo EN ISO 1101-01 (Soldagem - Recomendações para soldagem de materiais metálicos - Parte 1: orientação geral para soldagem a arco), estipulam um valor constante para a eficiência térmica (k) de cada processo de soldagem. Por outro lado os valores de k encontrados na literatura caem numa larga faixa, por exemplo de 30% até 90% para o processo TIG. A explicação deste fato pode ser uma ignorância pelos pesquisadores dos fatores que podem influenciar o valor k , tais como vazão de gás de proteção, tamanho de bocal, ângulo de inclinação da tocha, e outros. Devido à grande incerteza no que diz respeito ao valor certo da eficiência térmica k , há normas, como por exemplo a Norma ASME IX-2013, que ignoram este valor k , considerando-o como igual a 1 nas equações de cálculo do CI . Assim o valor do Calor Imposto (CI), calculado conforme recomendado pelas normas supramencionadas, pode ser bem diferente do valor real do CI e o benefício dele para a avaliação do processo de soldagem pode ser duvidoso.

O presente trabalho tem como objetivo confirmar que mesmo um fator considerado insignificante, como o tamanho do bocal de tocha, pode influenciar a transferência de calor do arco para a peça, ou seja mudar a eficiência térmica do processo de soldagem TIG. Este processo foi escolhido pois assim dá para excluir a influência de transferência de metal de adição e também é o com maior facilidade para definir os parâmetros necessários para a análise da eficiência. Com o intuito de evidenciar a influência do tamanho do bocal na eficiência térmica do processo TIG, serão realizados testes utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água, com três tamanhos de bocal (8, 10 e 12), mantendo a tensão e corrente constantes, para fim de comparação de resultados.

A geometria do cordão de soldagem (área fundida, penetração e largura) foi determinada, analisada e contextualizada sua dependência direta com o calor imposto na junta.

CAPÍTULO II

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas)

Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) é um processo que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte (Argônio, Hélio ou mistura de ambos). Se um metal de adição é necessário, ele é adicionado no limite da poça de fusão. A qualidade do processo TIG é excelente, possui um ótimo acabamento do cordão de solda e excelentes propriedades mecânicas para a perfeição na soldagem. Como não é gerada escória, a chance de inclusão da mesma no metal de solda é eliminada. O esquema ilustrativo do processo de soldagem TIG é ilustrado na Figura 2.1 abaixo (MODENESI et al., 2012).

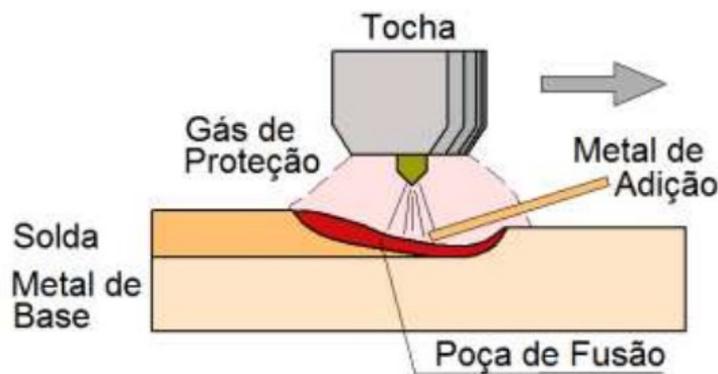


Figura 2.1 – Esquema do processo de soldagem TIG (MODENESI et al., 2012)

O eletrodo de tungstênio é altamente reativo a altas temperaturas, por isso ele é protegido (contra oxidação) pelo 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.

2.1.2 Principais variáveis do processo

Tensão, corrente de soldagem, velocidade de avanço, diâmetro e forma do eletrodo, composição do gás de proteção e metal de adição (MODENESI et al., 2012).

2.1.3 Tensão do arco

A tensão entre o eletrodo e a peça, é fortemente influenciada por diversos fatores, dentre eles: Corrente do arco; Perfil da ponta do eletrodo; Distância entre o eletrodo e a peça (comprimento do arco); Tipo da gás de proteção;

Como existe uma relação direta entre a tensão e o comprimento do arco, a tensão é usada para controlar o processo, pois uma vez fixados diversos outros parâmetros, a tensão do arco possibilita o controle do comprimento do arco que afeta diretamente a geometria do cordão de solda.

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 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 2.2) 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 2.2. Boa parte do calor gerado na coluna de arco é perdida na forma de radiação e convecção para o ambiente.

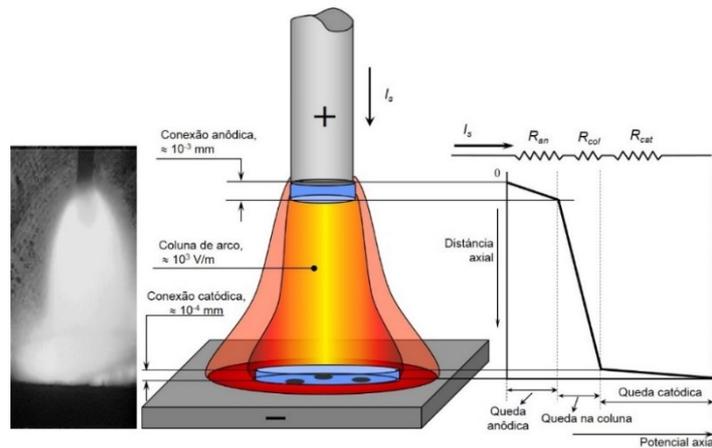


Figura 2.2 - Estrutura e a distribuição da tensão ao longo do arco elétrico TIG por Professor Dr. Volodymyr Ponomarov.

2.1.4 Corrente de soldagem

No processo de soldagem TIG, o arco elétrico pode ser produzido utilizando-se as seguintes configurações elétricas (FOGAGNOLO J., 2011):

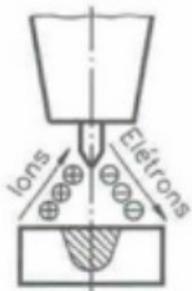
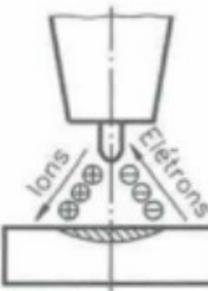
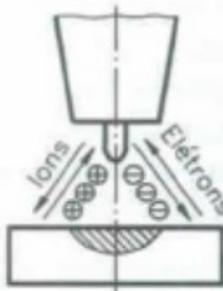
- CC- corrente contínua com eletrodo negativo;
- CC+ corrente contínua com eletrodo positivo;
- CA corrente alternada.

De acordo com as necessidades do trabalho, cada um dos modos de se produzir o arco apresenta um ou mais dos requisitos acima descritos. O uso da corrente contínua com eletrodo negativo faz com que os elétrons fisicamente saiam do eletrodo e incidam no metal-base, enquanto que os íons positivos viajam no arco na direção da peça ao eletrodo.

Na corrente contínua CC- a transferência dos elétrons acontece através do fenômeno “Emissão Termiônica”, que é acompanhada pela baixa geração de calor na região catódica para determinada 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 notório que quanto maior a corrente maior também vai ser a largura do cordão. Também tem uma influência sobre a tensão do arco, se consideramos um mesmo comprimento de arco, quando aumentamos a corrente a tensão tende a aumentar.

Tabela 2.1 - Resumo do efeito da corrente e polaridade sobre o processo de soldagem TIG.

Tipo de corrente	C/C-	C/C+	CA (Balanceada)
Polaridade do eletrodo	Negativa ou direta	Positiva ou inversa	
			
Ação de limpeza	Não	Sim	Sim, em cada semi-ciclo
Balanço de calor no arco (aprox.)	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo
Penetração	Estreita e profunda	Rasa e superficial	Média
Aplicação	Aço, cobre, prata, aços austeníticos ao cromo-níquel e ligas resistentes ao calor.	Pouco usada. Requer eletrodos de maior diâmetro ou correntes mais baixa.	Alumínio, Magnésio e suas ligas.

(Fonte: Tecnologia da soldagem por Paulo Villani Marques e outros, Belo Horizonte: ESAB, 1991, p. 187)

2.2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS

Fonte de energia, corrente contínua para a maioria das ligas metálicas, tocha com eletrodo de tungstênio, bocal, fonte de gás de proteção, sistema para a abertura do arco (geralmente um ignitor de alta frequência), mangueiras, cabos e unidade para circulação de água para refrigeração da tocha, quando necessário (MODENESI et al., 2012).

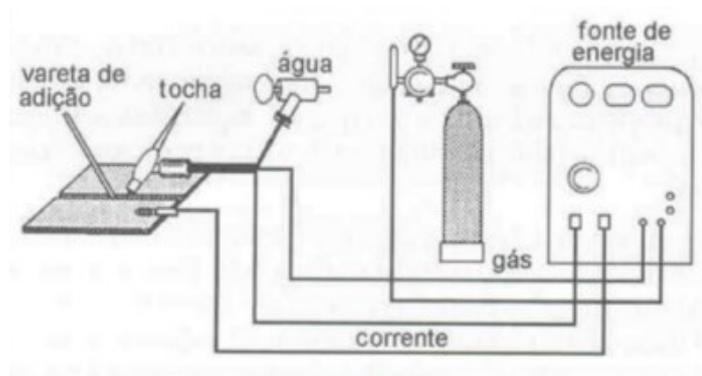


Figura 2.3 - Equipamento básico do processo TIG (Fonte: Introdução a processos e metalurgia de soldagem por Professor Dr. João Batista Fogagnolo).

2.2.1 Fontes de energia

O tipo de fontes usadas nos processos TIG são de Corrente Constante. Segundo Bracarense a energia necessária pode ser fornecida, AC ou CC, tanto por fontes de transformadores/retificadores, quanto por geradores. As fontes para GTAW apresentam tanto uma resposta em para fontes do tipo com controle magnético, quanto resposta de saídas aproximadamente de corrente constante, para fontes controladas eletronicamente.

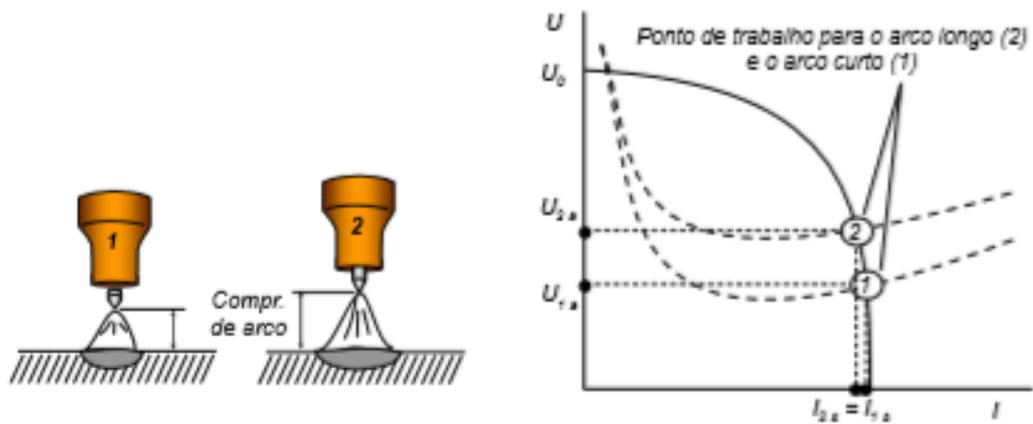


Figura 2.4 - Curva Tensão/Corrente para fonte de soldagem TIG por Professor Dr. Volodymyr Ponomarov.

2.2.2 Eletrodos de Tungstênio

Os eletrodos utilizados no processo TIG são de tungstênio devido ao seu alto ponto de fusão (3392 °C) e grande emissividade termiônica. São fabricados a partir de pó de Tungstênio, ou seja, são varetas sintetizadas (FOGAGNOLO J., 2011).

Os eletrodos podem ser de tungstênio puro ou tungstênio liga do a Cério (Ce), Lantânio (La), Tório (Th) ou Zircônio (Zr). Na classificação AWS são apresentados nove tipos de eletrodos. São designados por EW, indicando tratar-se de eletrodo de W. Em seguida, aparece o símbolo do elemento de liga que compõe o eletrodo e um número que indica o percentual aproximado desse elemento, como 1, 1,5 e 2 %. A letra P é usada para designar o eletrodo de tungstênio puro. Cada tipo de eletrodo, por norma, é identificado com uma cor.

2.2.3 Bocais

Os bocais são fixados na extremidade das tochas e dirigem o gás de proteção para a zona de soldagem. Utilizam-se bocais com o principal objetivo de produzir um fluxo laminar do gás de proteção. Os materiais dos bocais podem ser cerâmicos, metais revestidos com cerâmicos, cerâmicos, quartzo fundido ou outros materiais. Os cerâmicos são os mais baratos e mais utilizados. Os aspectos mais importantes nos bocais são suas dimensões e perfis. Eles devem ser grandes o suficiente para dar cobertura de toda a área de soldagem pelo gás inerte e devem

também proporcionar a densidade e o volume necessários do gás no processo. Se a vazão de gás for excessiva para um determinado diâmetro do bocal, a eficiência de proteção é afetada devido a turbulência (BRACARENSE A., 2000).



Figura 2.5 - Bocais usados na tocha de soldagem TIG (LAPROSOLDA FEMEC UFU).



Figura 2.6 - Imagem Arco elétrico aberto no processo de Soldagem TIG (Soldagem – Coleção tecnológica SENAI – 1ª ed. 1997).

2.3 QUANTIFICAÇÃO DO CALOR NO PROCESSO DE SOLDAGEM

Para cálculo de Potência de soldagem, há diferentes métodos e abordagens, Bosworth (1991) defende que há uma diferença de até 30% no valor para o mesmo arco utilizando metodologias distintas, para efeito de quantificação é utilizado o método descrito pela sequência de equações a seguir:

A média dos valores de tensão e corrente é quantificado através da equações 2.1 e 2.2. A potência surge do produto entre esses dois parâmetros.

$$U_{Med} = \frac{\sum_1^n U}{n} \quad 2.1$$

$$I_{Med} = \frac{\sum_1^n I}{n} \quad 2.2$$

$$P_{ot} = I_{Med} \cdot U_{Med} \quad 2.3$$

Onde tensão de soldagem (U) é dada em Volt (v) e corrente de soldagem (I) em Ampere [A] e a potência em (W) Watt

Após calculado a potência, é possível o cálculo da energia de soldagem através da Equação 2.3.

$$E_S = P_{ot} \cdot t_s \quad 2.4$$

E por fim, a eficiência térmica é obtida através da Equação 2.8.

$$k = \frac{CI}{E_S} \quad 2.5$$

2.3.1 Quantificação do calor imposto segundo normas

O calor transferido para a poça de soldagem é descrito pelo índice chamado Calor Imposto (CI), calculado conforme Equação 1 (Norma EN ISO 1011-1:2009 Soldagem - Recomendações para soldagem de materiais metálicos - Parte 1: orientação geral para soldagem a arco) ou conforme Equação 2 (Norma ASME IX-2013 e outras normas do AWS):

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

$$CI = \frac{U_a \times I_s}{v} \quad 2.7$$

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 ISO 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 2.2 - Eficiência térmica (k) de processos de soldagem (conforme a Norma EN ISO 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

Mas na prática a eficiência térmica do processo k , determinada de maneira experimental, apresenta uma grande variação nos valores como mostra Tabela 2.3.2.

Existem valores de eficiência térmica para o processo GTAW que são definidos por alguns autores, porém cada tipo de processo de medição e cálculo dessa eficiência pode resultar em parâmetros diferentes. A seguir temos a tabela 2.3.2 que mostra diferentes referências de eficiência por autores e métodos diferentes.

Tabela 2.3 - Eficiências térmicas (K) propostas por diferentes autores.

TIG	Fonte
20-50%	DUTTA, 1994. DuPONT e MARDER, 1995.
30-60%	NILES e JACKSON, 1975. MISHRA e DEBROY, 2005.
60-80%	BAG e DE, 2010.

2.4 ERROS DE DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO

No processo de determinação da eficiência no processo de soldagem sempre haverá erros de medição. Por exemplo, no caso do método de calorímetro de nitrogênio, erros maiores podem ser introduzidos devido a perdas de calor não controladas antes do início das medições calorimétricas (PÉPE *et al.*, 2011; MALIN e SCIAMMARELLA, 2006). Quintino *et al.* (2013) mostram como esses erros afetam a previsão do comportamento de uma soldagem, enquanto Liskevych *et al.* (2013) fazem uma análise mais profunda sobre erros, chamando-os de erros intrínsecos. As perdas de calor ocorrerão, por exemplo, durante a soldagem (da superfície da placa para o meio ambiente) e ao retirar a placa (durante a transferência dela para o calorímetro), etc. De acordo com Stenbacka (2012) perdas de calor durante as operações de soldagem e manuseio ao aplicar métodos calorimétricos podem acarretar erros (redução) graves na determinação da eficiência térmica (k) do processo de soldagem (no pior caso até 30% de k).

No entanto mesmo fazendo as medições de eficiência na teoria, sem erros, o valor encontrado só será utilizável para as condições de soldagem exatamente iguais ao utilizado no processo de medição pois os mais diversos parâmetros podem influenciar e impor tendências nas eficiências encontradas.

2.4.1 Transferência de calor no processo de soldagem

Para se entender melhor as razões pela qual a eficiência difere tanto, de autor para autor, faz-se necessário entender melhor o conceito de calor imposto. Para isso, será analisado de forma sucinta o modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco elaborado por Scotti *et al.* (2012) e reformulado por Hurtig *et al.* (2016), proposto na Figura 2.7.

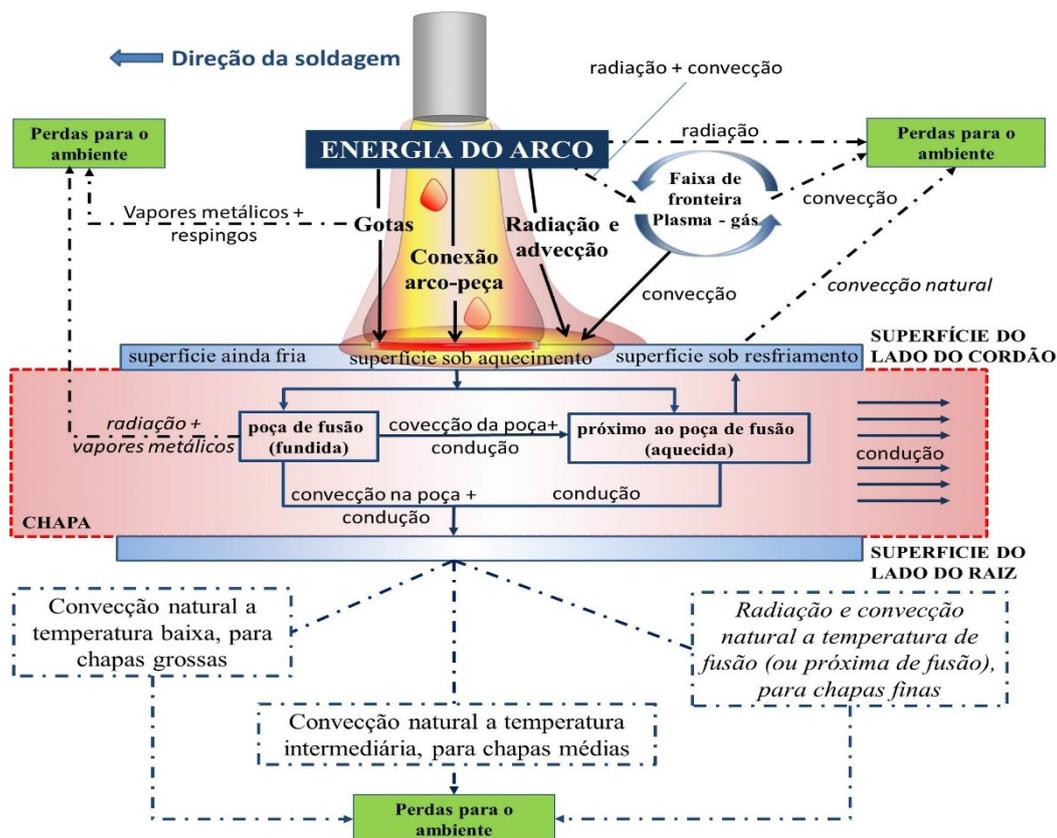


Figura 2.7 - Apresentação esquemática da entrada e da saída do calor na chapa durante soldagem, em Hurtig. Et al. (2016).

A transferência de calor com a peça acontece de forma majoritária a partir de três formas.

Uma delas é na conexão arco-peça, região anódica ou catódica dependendo da configuração do processo, onde o calor é transferido para a chapa na forma de condução formando a poça de fusão. Esse calor é diretamente proporcional à corrente de soldagem, quando maior é a corrente, maior é a quantidade de calor transferido para a chapa.

A segunda forma é a transferência de calor pelas gotas que saem do eletrodo e migram para a peça. Nesse trajeto essas gotas perdem uma parcela do calor para o ambiente, porém mesmo assim a energia transferida dessa maneira é numericamente significativa e Soderstrom *et al.* (2011) encontrou esta quantidade do calor como sendo 20 a 30% da energia total de soldagem (energia do arco, energia usada para aquecer a extensão do eletrodo e perdas), dependendo do material e tipo da transferência metálica.

A terceira forma é a partir da coluna de plasma, o calor da coluna de plasma é repassado para o ambiente por radiação e convecção. Assim a chapa também recebe parte desse calor gerado na coluna por estar localizada na parte do ambiente que recebe a energia. Pelas altas temperaturas dentro da conexão arco-peça, o calor é transferido para essa junção por condução. A radiação da coluna de plasma é uma forma que o calor é transferido para a chapa. No entanto, o plasma também leva a entalpia para a chapa através da convecção forçada (movimentado pelo gás) e difusão.

No processo de soldagem é conhecido que somente parte da energia gasta é usada para fundir material de base, logo parte dessa energia é trocada em forma de calor com a atmosfera. Essa transferência para a atmosfera é ocorrida pelos três mecanismos de troca de calor (condução, convecção e radiação). Logo as perdas de calor podem ocorrer das seguintes formas:

Primeiro pelas perdas por convecção natural a temperatura baixa, se a chapa for grossa o suficiente para não ter a superfície aquecida significativamente (para uma dada energia do arco); Segundo pelas perdas por radiação e convecção da poça na raiz a alta temperatura e perdas por convecção (raiz do cordão solidificado), se a chapa for fina suficiente para ter o lado oposto aquecido até temperatura de fusão; Terceiro pela convecção natural a temperatura média, se a espessura da chapa é intermediária.

2.5 CALORIMETRIA

Os procedimentos experimentais que determinam o percentual da energia de soldagem que foi transferida para a peça são os métodos calorimétricos (LISKEVYCH, 2014). As técnicas calorimétricas conhecidas baseiam-se em princípios de funcionamento que podem ser agrupadas segundo a classificação de Dutta et al. (1994):

- 1) Resfriamento da placa de teste durante e após a soldagem por fluxo de água (o calor absorvido é determinado com base na variação da temperatura do líquido);
- 2) Imersão da placa de teste em nitrogênio líquido exatamente após a soldagem (o calor absorvido na placa de teste é determinado a partir da massa evaporada do nitrogênio líquido);
- 3) Realização da soldagem na placa de teste posicionada no fundo de um calorímetro fechado (o calor transferido para a peça é determinado a partir das temperaturas monitoradas nas superfícies da placa de teste durante soldagem e tempo de resfriamento);

Fazendo a análise dos métodos de calorimetria, é possível inferir que existem particularidades no princípio de funcionamento de cada um, o que interfere na execução do ensaio e pode prejudicar as medidas de calor absorvido para cada processo de soldagem

No presente trabalho foi utilizado nos testes, um calorímetro de fluxo de água constante, o qual é especificado abaixo devido às conclusões de bom rendimento do mesmo especificado abaixo pelos autores.

Lu e Kou (1989), utilizaram uma versão de calorímetro que deriva do calorímetro a água (não existia fluxo entre as partes internas e externas), essa nova versão se baseava no fluxo contínuo de água, que mede a temperatura utilizando termopares na saída e na entrada do calorímetro.

O fluxo de água fica sempre em contato com a placa pelo lado de baixo e a superfície onde acontece a solda. Lu e Kou verificaram que não houve formação de bolhas resultantes da vaporização da água com este arranjo e obtiveram uma eficiência térmica média de 80% para GTAW de alumínio com transferência globular. E concluíram que 45% do calor é proveniente do arco elétrico, 23% das gotas formadas e 12% da poça de fusão. Esta eficiência foi consideravelmente maior do que a obtida por Essers e Walter utilizando o calorímetro de água.

O esquema do calorímetro de fluxo constante está representado na Figura 2.8.

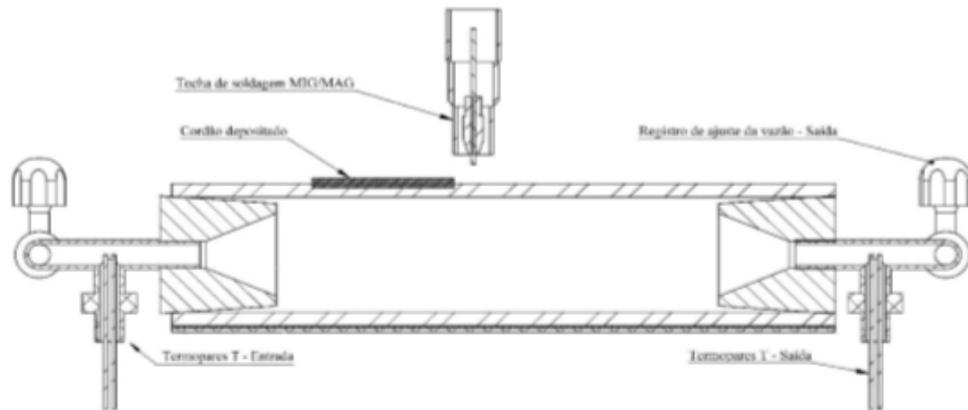


Figura 2.8 - Calorímetro de fluxo constante de água (SGARBI, 2013).

CAPÍTULO III

3.1 METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1.1 Bancada

A bancada experimental localizada no LAPROSOLDA UFU é composta pelos seguintes componentes:

- Calorímetro
- Sistema de aquisição de sinais dos termopares.
- Sistema de alimentação de água
- Fonte de soldagem;
- Tocha TIG;
- Mesa de coordenada X;

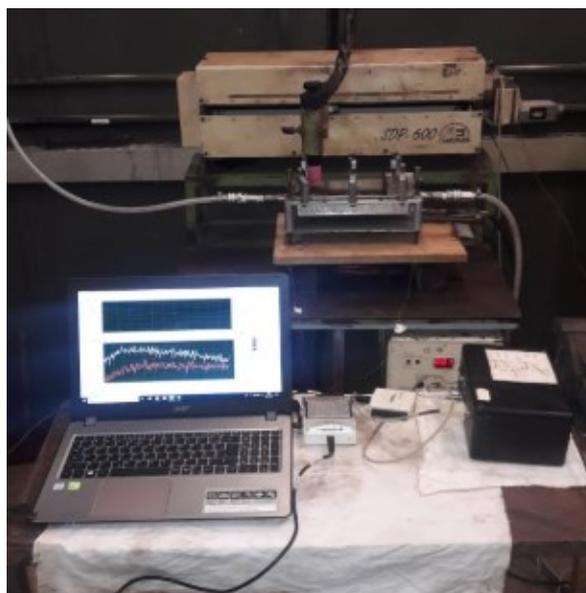


Figura 3.1 - Bancada experimental (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

3.1.2 Calorímetro utilizado

O calorímetro especificado na execução do trabalho foi o Calorímetro de fluxo constante de água (Figura 3.2). A concepção do calorímetro é formada por três partes cruciais, sendo elas, o corpo do calorímetro, o sistema de aquisição de sinais dos termopares e o sistema de alimentação de água.

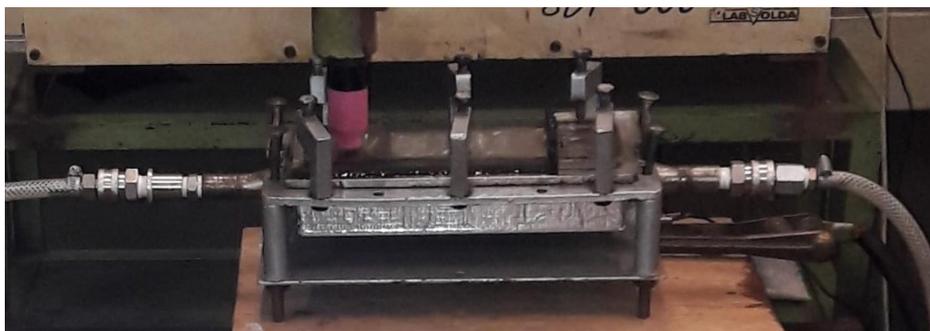


Figura 3.2 - Calorímetro de fluxo constante de água (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

O chamado corpo do calorímetro é composto pela placa de testes, a base, a borracha de vedação, e o sistema de fixação da placa de testes. Passa pelo corpo do calorímetro um volume de água que é renovado seguidamente devido ao fluxo ininterrupto. As dimensões da placa de testes para esse modelo de calorímetro são de 200 x 100 x 6,3 mm, utilizando material aço carbono ABNT 1020. O sistema de fixação da placa de testes é composto por 6 parafusos de 8mm acoplados cada um a um suporte que está fixado na base do calorímetro.



Figura 3.3 - Fixação da chapa de testes com a bolha de ar na parte acrílica (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

A montagem da chapa de testes junto com a borracha de vedação e a chapa de acrílico garantem o total contato da água de fluxo com o chapa metálica, isso ocasiona em uma melhor eficiência na troca de calor da solda com o calorímetro. A bolha de ar de pequenas dimensões fixada na parte acrílica, aponta a inexistência de ar no contato da água com a chapa.

3.1.3 Sistema de Aquisição de sinais dos termopares

O sistema de aquisição de sinais dos termopares adquire os dados de corrente, tensão, temperatura inicial e temperatura final.

É utilizado um sensor Hall para aquisição dos dados de corrente, ele é colocado no cabo terra da fonte de soldagem. Esse sensor envia sinais de corrente para a placa condicionadora de sinal, e então o sinal segue para a placa de aquisição de dados, que envia o sinal para a conexão USB e assim para o computador que faz a leitura a partir do software LabVIEW.

Existe um sensor para adquirir os dados de tensão, que é localizado na tocha de soldagem. Ele captura o sinal de tensão do arco e o envia para a placa condicionadora que por seguimento envia para a placa de aquisição de dados. Com isso o sinal é enviado ao computador da mesma forma do sinal citado acima.

A aquisição se sinal de temperaturas de entrada e saída do calorímetro é feito a partir de dois termopares tipo T ligados à placa de aquisição e essa com conexão direta com o computador por conexão USB e controlado pelo LabVIEW.

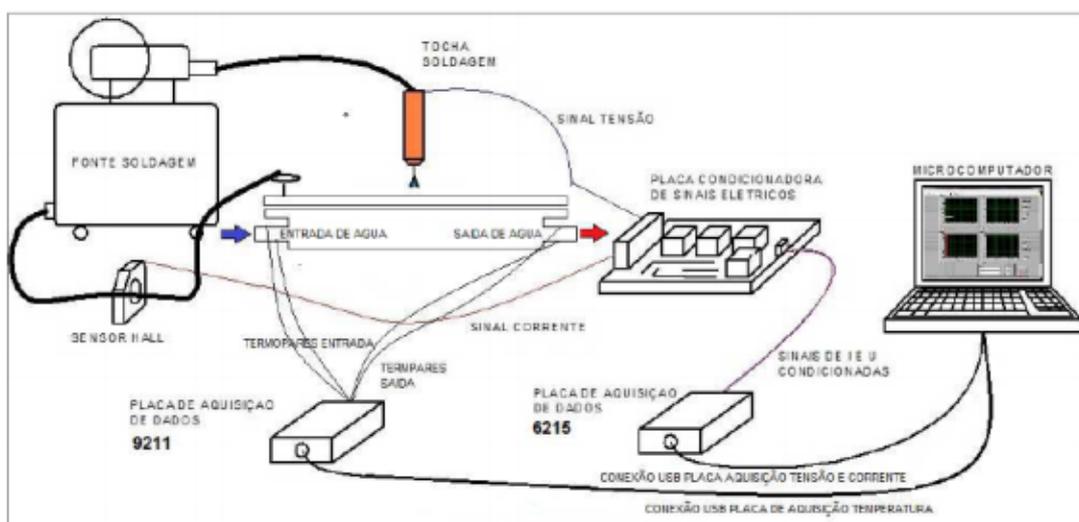


Figura 3.4 - Sistema de aquisição de sinais elétricos para o calorímetro (Arevalo, 2011).

3.1.4 Sistema de alimentação de água

A alimentação de água no calorímetro de fluxo constante de água deve ser de forma ininterrupta, de modo a evitar mudanças de pressão que acarretem mudança no fluxo de água na parte de alimentação. Para que essas mudanças não aconteçam e possam influenciar nas medições, foi utilizado um sistema de alimentação, com um reservatório que manteve o mesmo nível de água. E, assim, garantindo a mesma quantidade de líquido passante no calorímetro. Na Figura 3.5 pode-se observar que o sistema de alimentação é composto pela linha de água, tanque de armazenamento e mangueiras de alimentação e de excesso de água.

O tanque de armazenamento consiste em uma caixa de acrílico de dimensões 250 x 250 x 600 mm com uma entrada de alimentação de água da linha principal, um ponto de saída

na parte inferior que alimenta o corpo do calorímetro e um ponto de saída na parte superior que tem como função principal evacuar o excesso de água e manter sempre o mesmo nível (30 decímetros cúbicos). A vazão no ponto de saída que alimenta o calorímetro é controlada por meio de uma válvula de esfera manual.



Figura 3.5 - Recipiente de armazenamento de água (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

Para especificar a vazão de água constante, o tanque foi mantido com aproximadamente 30 litros e a extremidade de saída da mangueira foi mantida, em todos os experimentos, a uma mesma altura, para que a vazão se mantivesse constante em 4,3 litros por minuto.

3.1.5 Fonte de soldagem

A fonte utilizada nos experimentos de soldagem foi a IMC DIGIPlus A7, as fontes de Soldagem da linha DIGIPlus A7 possuem um avançado processador ARM, 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. A representação fotográfica da mesma segue abaixo na figura 3.6 e suas características na tabela 3.1.



Figura 3.6 - Fonte IMC DIGIPlus A7 (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

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

3.1.6 Tocha TIG com bocal de Cerâmica

Para os testes foi utilizado uma tocha com sistema de resfriamento a água (modelo TIG 27A-28B Binzel).

3.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA

O método utilizado para o cálculo da potência elétrica nesse trabalho, foi o de potência média. Para tal, foi utilizada a Equação 2.3 para obter a potência elétrica de soldagem a partir dos dados adquiridos e acoplados ao software no computador.

Duas formas de curvas são plotadas para o processo tratado, (tensão e corrente x tempo) e (temperatura do termopar de entrada e saída x tempo). A figura 3.7 apresenta a curva de tensão e corrente para o processo de soldagem TIG. Para o cálculo da potência do procedimento de soldagem, foi usado o tempo logo após a corrente sair do nulo até o momento que o arco começa a se fechar.

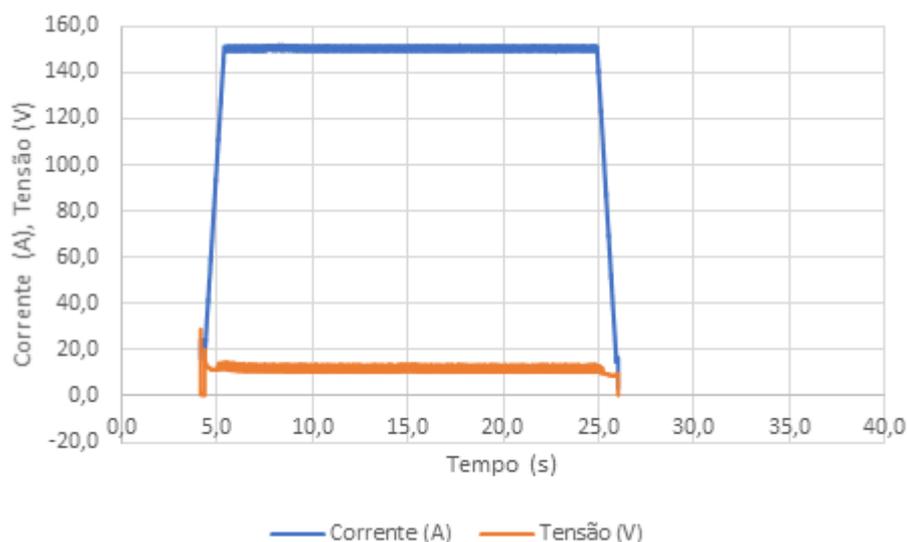


Figura 3.7 - Curvas frequentes de aquisição de tensão e corrente para o processo de soldagem TIG (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

3.2.1 Cálculo da Energia de Soldagem

A energia de soldagem envolvida nos processos analisados neste trabalho foi calculada conforme a Equação 2.4. Utilizou-se a potência elétrica, calculada conforme as considerações do item anterior e o tempo de soldagem adquirido.

3.3 Testes de eficiência do calorímetro

Para verificar eficiência de absorção de calor do calorímetro de fluxo constante de água em diferentes vazões, o aluno de TCC Pedro Henrique Cunha (2018) realizou testes nos quais foi colocada uma resistência ôhmica, imersa no fluxo, ligada na fonte de energia com tensão definida em 57V e corrente em 20A.

Ao avaliar o calor gerado pela resistência ôhmica e transferido para a água do calorímetro, foi determinado que o calorímetro é apto a capturar aproximadamente 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 praticamente os mesmos.

Constatada a relevância da utilização desse calorímetro, pelos resultados de eficiência por vazão, foi definida a vazão mais adequada para o presente trabalho em 4,3 litros/min.

3.4 Geometria do cordão

Com o intuito da análise dos cordões de soldagem, as chapas de aço foram submetidas à cortes na seção transversal utilizando uma cortadora metalográfica. As amostras foram lixadas, na sequência de granulometria partindo de 220, 320, 400 e por fim 600 mesh. Com isso a superfície fica lisa dentro dos padrões necessários foi feito o ataque químico com Nital 10%, e assim toda a geometria do cordão ficou visível e adequado para análise. Os cordões foram colocados no microscópio ótico e realizados registros fotográficos da superfície da amostra. A partir do software foram realizadas medições da geometria dos cordões de solda.

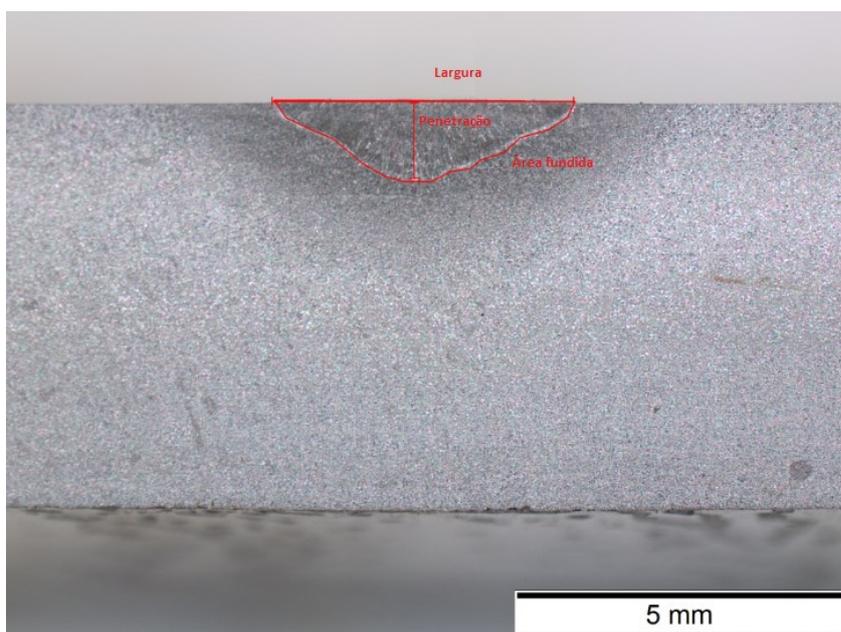


Figura 3.8 - Geometria do cordão de solda (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

3.5 OBTENÇÃO DO APORTE TÉRMICO

Para o cálculo do aporte térmico foi utilizado a equação 3.1 que resulta no calor total entregue à chapa durante o processo de soldagem.

$$Ci = \int_0^t m \cdot Cp \cdot (Ts - Te) \cdot dt \quad 3.1$$

Onde a vazão mássica de água (m) que passa pelo calorímetro é dada em kg/s, o calor específico da água (Cp) em J/kg·K, e as temperaturas adquiridas pelo calorímetro (Ts e Te) em Kelvin, e o tempo total da aquisição de dados, em s.

A vazão de água é mantida constante durante toda a realização do experimento, a densidade e o calor específico variam proporcionalmente com a temperatura, logo esses dois últimos são consideradas constantes devido a desprezível influência nesses valores durante alguma mudança nos padrões no período em que ocorreu os testes.

A integral da variação de temperatura sobre o intervalo de tempo analisado é equivalente à área sob o gráfico dos dados obtidos com a aquisição de temperatura da água do calorímetro.

A eficiência térmica do processo de soldagem é definida como a quantidade 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.

$$k = \frac{\int_0^{\infty} m * C_p * (T_s - T_e) dt}{U * I * t} \quad 3.2$$

Referente aos dados adquiridos é esperado duas curvas, uma representando a temperatura de entrada, outra, a temperatura de saída do corpo do calorímetro. Os dados captados no sistema de aquisição foram plotados e analisados utilizando o software Microsoft Office Excel. O tratamento foi realizado posteriormente com a finalidade de reduzir os erros de medição, ocasionados possivelmente pela influência da velocidade do fluxo de água nas extremidades dos termopares e, também, por campos eletromagnéticos dos demais equipamentos e redes elétricas presentes próximas à bancada de ensaio. Também foram excluídos dos gráficos os valores de aquisição que não foram úteis ao cálculo de calor absorvido, valores anteriores à solda e os valores posteriores ao momento que a temperatura da água se estabiliza, com a variação menor que o erro do equipamento de medição, $\pm 0,1$ °C nesse caso específico.

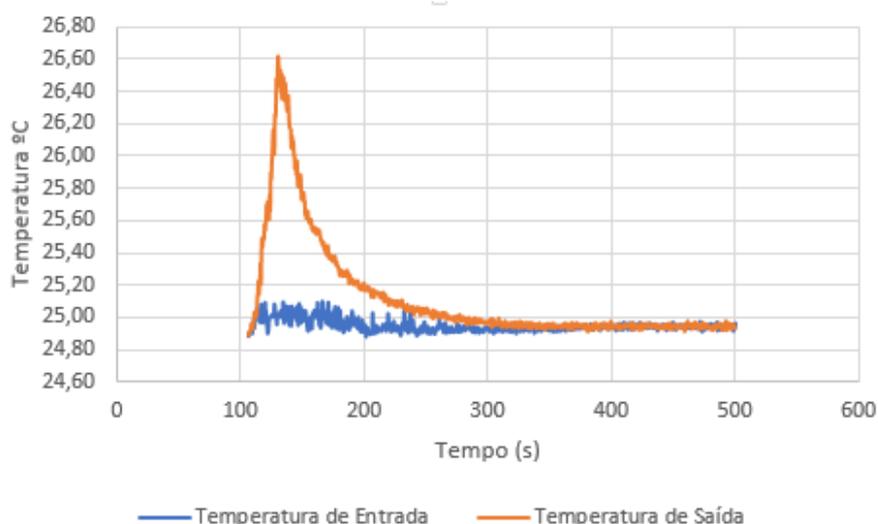


Figura 3.9 - Curvas de sinais de temperatura da água esperada para os ensaios. (LAPROSOLDA FEMEC UFU).

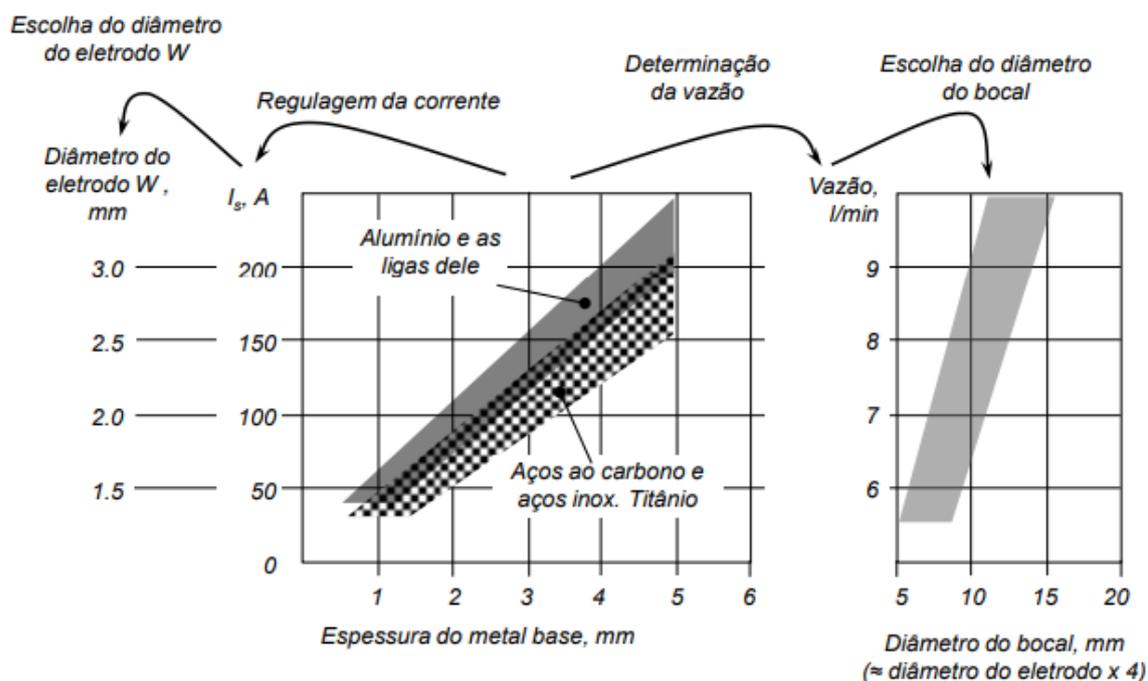


Figura 3.10 - Escolha dos valores das variáveis do processo TIG por Professor Dr. Volodymyr Ponomarov.

Para a realização dos testes, a escolha dos valores das variáveis do processo TIG foram definidos a partir dos gráficos propostos na figura 3.10. Logo, eles foram feitos utilizando-se eletrodo de tungstênio toriado (2%) de 3,2mm de diâmetro, polaridade definida como negativa, com ângulo de afiação da ponta do eletrodo 60° , posição perpendicular da tocha e com distâncias entre eletrodo e a peça de 4mm. O gás de proteção utilizado foi o argônio industrialmente puro (4.0) com vazão de 10 l/min. 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, contendo 6 cordões por chapa. Os bocais utilizados foram de números 8, 10 e 12 para cada bateria de testes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os devidos padrões definidos, a etapa seguida foi realizar 9 testes. Em todos eles a tensão e a corrente de soldagem foram mantidas constantes próximas a 12V e 150A respectivamente, para que a potência se mantivesse constante e próxima a 1800W. Para os três primeiros testes, escolheu-se o bocal de número 12, os próximos três foram feitos com bocal de número 10 e por fim, realizados testes com o menor bocal, número 8.

A Tabela 4.1 apresenta o trabalho experimental, evidenciando os valores obtidos e calculados durante os procedimentos experimentais de solda e também valores referentes à análise do cordão.

Tabela 4.1 - Valores obtidos e calculados durante os procedimentos experimentais de solda

Teste	I média (A)	U média (V)	Potência (W)	Tempo (s)	Calor Absorvido (J)	Energia de soldagem (J)	Eficiência térmica (%)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área fundida (mm ²)
Bocal de número 12										
1	150,3439	11,17918	1680,72152	21,6522	21054,04	36391,32	57,85%	1,153	4,161	3,274
2	150,6019	10,69971	1611,396655	21,1352	19571,38	34057,19	57,47%	1,005	3,829	3,388
3	149,3119	11,85399	1769,941769	20,7656	20122,39	36753,90	54,75%	1,012	4,046	3,185
Médias:								1,057	4,012	3,282

Bocal de número 10										
1	150,8599	10,99191	1658,238443	21,3674	20930,14	35432,23	59,07%	1,359	4,206	3,566
2	150,6019	11,28573	1699,652381	21,2948	21288,14	36193,76	58,82%	1,233	4,263	3,412
3	151,3759	11,07263	1676,129332	21,8092	21534,57	36555,04	58,91%	1,298	4,102	3,701
Médias:								1,297	4,190	3,560

Bocal de número 8										
1	149,5699	11,94279	1786,281906	21,2512	23738,29	37960,63	62,53%	1,413	4,378	4,11
2	149,3119	11,88951	1775,245328	20,6562	22245,01	36669,82	60,66%	1,59	4,467	4,442
3	149,5699	12,15588	1818,153756	20,6808	22815,14	37600,87	60,68%	1,236	3,947	3,166
Médias:								1,413	4,264	3,906

Conforme análise da tabela 4.1 é possível comparar os valores de Eficiência Térmica para cada tamanho de bocal. Ao manter os parâmetros de tensões, correntes e tempos o mais próximo do valor padrão pré-definido, é perceptível a constância dos resultados para o mesmo bocal. Porém a cada troca de bocal por um de número menor, o valor da eficiência do processo aumenta de forma uniforme e contínua.

Com isso conclui-se que pelo fato da vazão de gás ser constante em 10 l/min, o bocal com menor diâmetro proporciona uma maior concentração do gás inerte, assim, espera-se, maior transferência de calor para a peça (que, no caso de bocais grandes, seria perdido no ambiente).

Outro fator determinante é sobre a troca de calor ser diretamente proporcional à área de contato do fluido atmosférico com o material do bocal, e no presente caso a área dos respectivos bocais eram maiores com os números superiores de bocal, aumentando assim a taxa de convecção e proporcionando uma maior perda de calor ao ambiente que circunda a

tocha, diminuindo a quantidade de calor absorvido pela chapa de testes e dessa maneira a eficiência do processo foi reduzida.

Correlacionando os valores de Calor Absorvido com os da geometria do cordão, no caso Penetração e Área Fundida presentes na tabela 4.1, nota-se que ocorre proporcionalidade. Partindo do bocal de número 12, o qual ocorre os menores valores de calor absorvido também são mostrados as menores Penetrações e Áreas Fundidas, assim sucessivamente, até chegar nos maiores valores presentes nas soldas dos bocais de número 8. Logo essa proporcionalidade comprova que para uma mesma energia de soldagem e mesma vazão de gás, quanto menor o bocal, dentre os estudados, maior é a eficiência térmica do processo e consequentemente maiores as penetrações e áreas fundidas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que a redução de tamanho de bocal da tocha TIG implica no aumento de eficiência térmica do processo, influenciando favoravelmente na transferência de calor para a peça (calor imposto).

Foi confirmado que os resultados de eficiência térmica foram inversamente proporcionais ao tamanho do bocal instalado na tocha de soldagem devido a transferência de calor ser maior em áreas maiores de contato com a atmosfera.

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 somente uma parcela do calor gerado pelo arco.

A Equação para o cálculo do CI, prescrita pela Norma EN ISO 1011-1, não oferece um valor seguro do calor imposto pois o valor da eficiência térmica do processo é considerado como constante, o que não é a verdade pois ele pode variar percentuais importantes devido ao tamanho e geometria e tamanho do bocal da tocha.

CAPÍTULO VI

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.

BAG, S. e DE, A., “Probing Reliability of Transport Phenomena Based Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Autogeneous Fusion Welding Process”, Metall. & Material Transactions, Vol41A, Sep. 2010, pp 2337-2347.

BOSWORTH, M. R. (1991). Effective heat input in pulsed current gas metal arc welding with solid wire electrodes. *Welding journal*, 70(5), 111-s.

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.

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

ESSERS, W.; WALTER, R., “Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMAW and Plasma-GMA Welding”, *Welding Journal*, vol 60, n. no 2 (1981): 37s-42s.

FOGAGNOLO, J.B., *Introdução a processos e metalurgia de soldagem*, Apostila 1, Universidade Estadual de Campinas, 2011, 99p.

JOSEPH, A.P., *Assessing the Effects of GMAW- Pulse Parameters on Arc Power and Weld Heat Input*, MSc Dissertation, The Ohio State University, USA, 2001, 101p.

LISKEVYCH, Olga. *Net heat input: a new concept for quantification of thermal transfer into workpiece in arc welding*. 2014. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

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

MALIN, V. e SCIAMMARELLA, F., “Controlling Heat Input by Measuring Net Power”, *Welding Journal*, July 2006, pp 44-50.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Soldagem – Fundamentos e Tecnologia*. Editora UFMG, 2007, 349 p. ISBN 978-98-7041-597-4

PÉPE, N.; EGERLAND, S.; COLEGROVE, P.A.; YAPP, D.; LEONHARTSBERGER, A.; SCOTTI, A., “Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas Metal Arc Welding Processes”, *Sci and Technol. of Weld. Join.*, 16 (5), 2011, p. 412-417.

2012 SCOTTI, AMÉRICO; REIS, RUHAM PABLO; LISKEYCH, OLGA. Modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco visando o conceito de calor imposto efetivo. Soldagem e Inspeção (Impresso), v. 17, p. 166-172, 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

STENBACKA, N., "Review of Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding", IIW Comission IV-XII-SG212 Intermediate Meeting BAM, Berlin, Germany 18-20 April, 2012 DOC XII-xxxxx-12.

WAIN ER, Emili o; BRANDI, Sergio Duarte; HOMEM DE MELLO, Fabio Decourt (Coord.). Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: E. Blücher, 1995-2005 494 p. ISBN 85-212-0238-5