

GUILHERME DO VALLE GALVÃO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG/MAG**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

GUILHERME DO VALLE GALVÃO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG/MAG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Núcleo de Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

UBERLÂNDIA - MG

2017

GUILHERME DO VALLE GALVÃO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG/MAG**

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo

Doutorando Diego Costa Correia Silva

UBERLÂNDIA - MG

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível.

À minha família, meus pais, Wagner e Kênia por nunca terem poupado esforços e incentivos para os meus estudos. Minhas irmãs, Isabela e Giovana por sempre terem me apoiado.

À minha namorada Amanda, por sempre ter me incentivado e dado força para superação de obstáculos.

Ao professor e orientador Volodymyr Ponomarev, por todo o suporte para que este trabalho fosse realizado, sempre compartilhando seu conhecimento.

Aos colegas que contribuíram para que este trabalho fosse possível.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a eficiência térmica do processo de soldagem MIG/MAG (GMAW), quantificando-a. Isto é feito com a finalidade de poder comparar esta eficiência térmica obtida com a de outros processos de soldagem a arco elétrico, como a soldagem com eletrodo revestido (SMAW) e TIG (GTAW). Vale ressaltar que apesar de ser impossível realizar todos os processos de soldagem exatamente com os mesmos parâmetros, tentou-se realizar todos os experimentos de forma que sejam o mais semelhante possível. Foi concluído que os processos MIG/MAG e ER possuem valores semelhantes para eficiência térmica, ambos maiores que para o processo TIG. A soldagem MIG/MAG acaba se tornando então mais adequada, devido a sua maior produtividade e acabamento no cordão de solda.

Palavras chave: Eficiência Térmica; Rendimento Térmico; MIG/MAG; Eletrodo Revestido; TIG.

ABSTRACT

The present work has as main objective to evaluate the thermal efficiency of the MIG/MAG weld process, quantifying it. This is done in order to compare this thermal efficiency obtained with the results of other processes of electric arc welding, such as welding with covered electrode (SMAW) and TIG (GTAW). It is noteworthy that although it is impossible to perform all the welding processes exactly with the same parameters, it was attempted to perform all experiments in a way that is as similar as possible. It was concluded that the MIG / MAG and Covered Electrode processes have similar values for thermal efficiency, both bigger than for the TIG process. MIG / MAG welding become more suitable due to its higher productivity and weld bead finish.

Key words: Thermal Efficiency; MIG/MAG; Covered Electrode; TIG.

Lista de Abreviações

MIG – Metal Inert Gas

MAG – Metal Active Gas

GMAW – Gas Metal Arc Welding

SMAW – Shielded Metal Arc Welding

ER – Processo de soldagem por eletrodo revestido

CC – Corrente contínua

CA – Corrente Alternada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Comparativo de Eficiências.....	3
2.2. Fundamentos dos Processos.....	3
2.2.1. MIG/MAG.....	3
2.2.2. TIG.....	8
2.1.3 Eletrodo Revestido	9
2.3 Calorímetro	10
2.3.1. Calorímetro de água.....	11
2.3.2. Calorímetro de nitrogênio líquido (N ₂ L)	12
3. METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS.....	13
3.1. Considerações gerais.....	13
3.2. Cálculo do Rendimento Térmico	13
3.3. Equipamentos Utilizados Para Soldagem MIG/MAG	15
3.4.1 Descrição do calorímetro utilizado.....	19
3.4.1 Sistema de Aquisição de Dados do Calorímetro	22
4. PROCEDIMENTOS PRELIMINARES.....	244
4.1. Montagem do Calorímetro.....	244
4.2. Bolha de Ar	244
4.3. Vazão de Água.....	266
5. RESULTADOS	288
6. CONCLUSÃO	333
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	344

1. INTRODUÇÃO

Apesar de apresentar algumas dificuldades de execução, a soldagem é a melhor forma de se unir materiais com baixo custo e simplicidade.

Em todos os processos de soldagem a arco elétrico, o último é responsável pela produção de calor, o qual tem a função de fundir, dependendo do tipo do processo utilizado, a alma do eletrodo revestido, juntamente com seu revestimento, o arame-eletrodo, o metal de adição, o fluxo e o metal base. Mas não é possível aproveitar totalmente o calor gerado pelo arco para fundir o metal de base e o metal de adição, pois parte dele é dissipado.

A quantidade de calor aproveitado depende das características específicas de cada processo, e a obtenção desse valor possibilita que a eficiência térmica seja calculada e assim comparada, a fim de se descobrir qual processo é o mais eficiente. Com isso, pode-se então refletir qual processo é o mais vantajoso para a execução de uma determinada tarefa.

É preciso deixar claro também que não se pode escolher um processo observando apenas a eficiência térmica, visto que existem outros fatores que são de extrema importância, como a qualidade necessária do acabamento, a produtividade, espaço disponível para execução da solda e outros fatores.

O processo MIG/MAG (GMAW) é amplamente utilizado na indústria pelas suas inúmeras vantagens em relação aos outros processos. Apesar do equipamento ser um pouco mais caro e sua locomoção ser restrita devido ao cilindro de gás, alimentador com um carretel de arame-eletrodo, ele oferece alta produtividade e baixo custo por metro de solda, sendo que o treinamento do soldador para este processo também é bem mais rápido e barato.

Esta maior facilidade de aprendizado dos soldadores se deve ao fenômeno de auto ajuste do arco, ou seja, regulagem automática do comprimento do arco, de forma que ele se mantenha aproximadamente constante e como consequência, intensidade de corrente e a tensão se ajustam também permanecendo aproximadamente constantes. Fato este que pode

pesar na escolha de qual processo de soldagem utilizar, visto que o treinamento do soldador é mais rápido e mais barato.

Neste trabalho, o processo MIG/MAG vai ser comparado no que diz respeito à eficiência térmica com outros dois processos de soldagem a arco elétrico, a saber, o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) e a soldagem TIG (GTAW). O primeiro processo ainda é muito utilizado devido a sua simplicidade, melhor acesso em áreas com pequeno espaço disponível para soldagem, baixo custo, e possibilidade de solda em espaço aberto, o que nos outros casos é quase impossível devido ao uso de tochas maiores. É um processo que exige mais dedicação e tempo no aprendizado, e geralmente é usado em pequenas empresas onde a produção não necessita ser tão grande. O equipamento é portátil e dependendo se o serviço não exigir alta corrente e tensão, é bem compacto e pode ser transportado sem problemas.

O processo de soldagem TIG (GTAW) é um processo relativamente mais caro, devido a utilização de gases de proteção de valor expressivo, além de exigir muito mais destreza e habilidade do soldador que os outros dois processos já citados. Outra necessidade do processo, é que as peças que serão soldadas estejam limpas e livres de impurezas. É ideal para a solda de chapas finas e possui excelente acabamento, podendo também ser utilizado para fazer o passe de raiz, pois garante uma boa penetração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Comparativo de Eficiências

Na literatura atual têm-se diferentes valores para as eficiências térmicas dos processos de soldagem. Muitos autores ao invés de afirmarem um valor exato, apresentem uma faixa de rendimentos térmicos. Na tabela abaixo pode-se verificar os valores declaradas por alguns autores.

Tabela 2.1 - Eficiências térmicas encontrados nas fontes bibliográficas

Eficiência térmica (η_t) dos principais processos de soldagem			
Eletrodo Revestido (ER)	TIG	MIG/MAG	Fonte
70-80%	20-50%	70-85%	PUC-Rio – Certificação Digital
90%	30-60%	70-80%	Eficiência térmica - Infosolda Portal Brasileiro da Soldagem
75%	60-80%	85%	Aulas de soldagem do Prof. Scotti

Com essas divergências entre valores na literatura e com o intuito de encontrar um valor exato para a eficiência térmica de cada processo, ao invés de uma faixa de valores, foi proposto realizar os testes com o calorímetro de fluxo de água, conforme será apresentado nos próximos tópicos ao longo do trabalho.

2.2. Fundamentos dos Processos

2.2.1. MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW) é um processo em que o arco elétrico fornece o calor necessário para a fundição do eletrodo metálico nu e consumível, permitindo assim que se possa fazer a união de peças metálicas (Modenese; Bracarense; Villani. Soldagem Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 362p, 2005). Para isso a poça de metal fundido precisa de proteção contra contaminação da atmosfera, a qual é feita por um gás, podendo ser puro ou mistura.

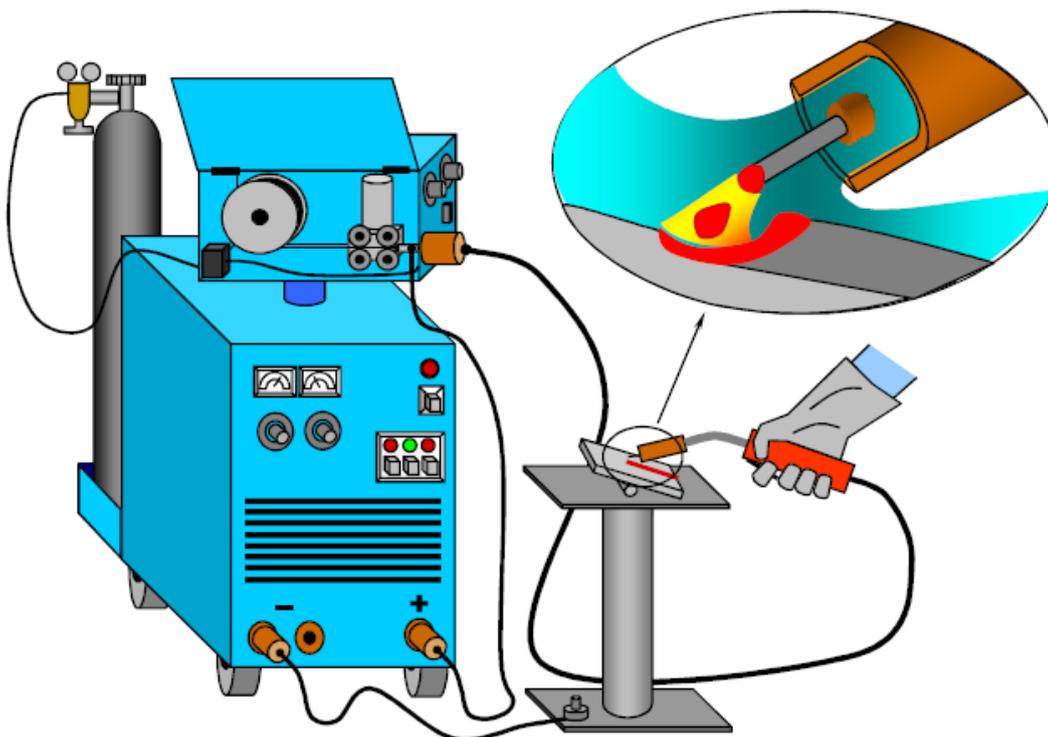


Figura 2.1 - Esquema do processo de soldagem MIG/MAG. (Fonte: Material Didático Prof. Volodymyr Ponomarov)

Utiliza-se também as nomenclaturas de MIG (Metal Inert Gas) para os casos onde o gás utilizado é inerte, e portanto apenas protege a poça de fusão, e MAG (Metal Active Gas) quando o gás além de proteger a poça, também reage proporcionando maior estabilidade do arco.

O processo MIG/MAG possui ótimas características para que possa ser robotizado, permitindo com que a soldagem seja feita de forma automática ou semi-automática. Isto pode ser explicado pelo fato de ser um processo em que se pode soldar em todas as posições, desde que os parâmetros de soldagem sejam escolhidos de forma correta, possui uma boa estabilidade no arco, produz quase nenhuma escória, possibilitando mais de um passe sem nenhuma limpeza prévia.

2.2.1.1. Componentes do equipamento

O conjunto básico do equipamento para realizar a soldagem é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame e uma tocha de soldagem. O alimentador de arame é o responsável por deslocar o arame-eletrodo

consumível em direção à tocha por meio dos roletes propulsores. É muito importante que a velocidade de alimentação do arame seja constante para uma solda uniforme e de boa qualidade.

A tocha é um importante componente do sistema, pois é ela que tem a função de direcionar o arame-eletrodo e o gás de proteção para a poça de fusão. Visto que fica posicionada próxima ao arco elétrico e a poça de fusão, a tocha precisa de refrigeração, podendo ser feita pelo mesmo gás de proteção ou água, dependendo das condições de trabalho.

O bico de contato assegura a passagem da corrente vinda da fonte, para o arame através do contato entre os dois. Um contato seguro entre o bico e o arame é indispensável para que se tenha boa estabilidade no processo MIG/MAG. Em geral, são utilizados bicos de cobre puro ou de ligas de cobre. Pode-se afirmar que um bico de contato de boa qualidade assegura um bom desempenho do processo de soldagem.

Os arames (eletrodos) são disponíveis em vários diâmetros diferentes, as mais comuns são com o diâmetro de 0,8-1,0-1,2 e 1,6 mm. Além de diâmetro diferente, são encontrados também em materiais diferentes, para a soldagem de praticamente todas as ligas ferrosas e muitas não ferrosas, como é o caso do cobre, alumínio e até mesmo materiais mais reativos, como é o caso do titânio.

2.2.1.2. Característica Estática da Fonte

A fonte que irá fornecer a corrente e tensão para o procedimento é comumente caracterizada pela curva estática do tipo Tensão Constante, fazendo com que a corrente não seja regulada diretamente no equipamento e sim através da regulação da velocidade de alimentação do arame, sendo que a tensão irá definir o comprimento do arco. Essa característica estática da fonte assegura o fenômeno do auto ajuste do comprimento de arco.

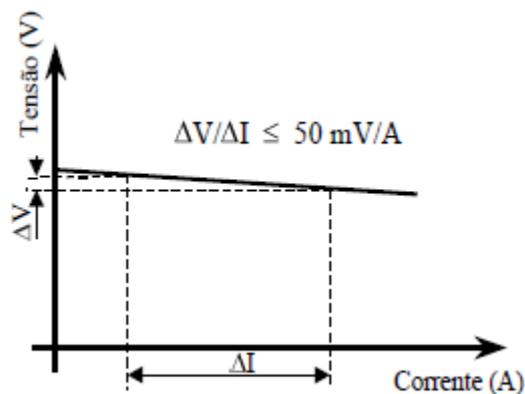


Figura 2.2 - Exemplo da Característica Estática da Fonte de Tensão Constante (Fonte: Material Didático Prof. Valtair Antonio Ferraresi)

O fenômeno do auto ajuste é um fator que influencia muito no processo, quando se avalia a dificuldade de soldar. Quando os diferentes processos de soldagem são comparados pelo parâmetro de dificuldade de realizar a solda, o processo MIG/MAG é o que exige menos treinamento por parte do soldador. Tanto o processo com Eletrodo Revestido, quanto com TIG demanda certa habilidade e treinamento considerável para a execução de um cordão de solda bem feito, já a execução do MIG/MAG é muito mais simples, e mesmo com pouca prática o soldador já é capaz de soldar cordões com boa qualidade.

2.2.1.3. Variáveis

As variáveis e parâmetros importantes presentes no processo são a velocidade de alimentação do arame-eletrodo (corrente de soldagem), tensão e (comprimento) do arco, velocidade de soldagem, gás de proteção, diâmetro do arame-eletrodo e ângulos da tocha.

2.2.1.4. Gases

Os gases mais utilizados na soldagem são: argônio (Ar), dióxido de carbono (CO₂) e, às vezes, hélio (He).

- O argônio possui baixa capacidade de troca de calor e baixo potencial de ionização. Sua aplicação pura deve ser feita em ligas de alumínio, níquel, cobre, magnésio e titânio, para o uso em outras ligas, utiliza-se mistura de argônio com outros gases.

- O dióxido de carbono possui alta capacidade de troca de calor, necessita de tensões maiores para que o arco fique aberto e possibilita cordões de solda mais largos com alta penetração. É utilizado puro para a solda de aços de baixo carbono.
- O hélio tem como principais características a alta capacidade de troca de calor, alto potencial de ionização, permite a utilização de maiores velocidades de soldagem, além de permitir a formação de um cordão de solda mais largo e com alta penetração. Mas, ele tem preço bem mais elevado.

As vantagens e limitações do processo MIG/MAG são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2.2 - Vantagens e Limitações do processo MIG/MAG

Vantagens:	Limitações:
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada taxa de deposição; • Pode ser operado de forma automática ou semi-automática; • A soldagem pode ser realizada em qualquer posição; • Diferentes combinações nos parâmetros de soldagem resultam em soldas completamente diferentes; • A penetração pode ser controlada também pelo ângulo de trabalho; • Pode ser aplicado a uma grande variedade de metais; • Processo de fácil domínio prático; • Requer pouca limpeza do cordão do cordão após a solda (baixa produção de escórias). 	<ul style="list-style-type: none"> • O equipamento é mais complexo, caro e menos portátil de que no processo ER; • A soldagem deve ser realizada em ambientes protegidos contra fluxos de ar, devido ao risco da proteção gasosa ser removida; • Dificuldade em manter a proteção gasosa em trabalhos de campo (grande sensibilidade às correntes de ar); • Dificuldade de solda em locais de difícil acesso; • Altos níveis de calor e iluminação irradiados; • Ação metalúrgica limitada.

2.2.2. TIG

A soldagem TIG (GTAW) possibilita a união de metais pelo seu aquecimento e fusão localizada com o arco elétrico estabelecido entre a ponta de um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. Após uma poça de fusão ser criada, o arco é deslocado progressivamente ao longo da junta fundindo as bordas das peças a serem unidas. O espaço (a abertura, chamada também como a folga) pode ser preenchido utilizando o metal de adição que se encontra no mercado em bobina ou em vareta. Caso o metal de adição não esteja sendo utilizado, a soldagem é considerada autógena.

O equipamento básico utilizado na soldagem TIG consiste de fonte de energia (Corrente Contínua e/ou Corrente Alternada, dependendo do material a ser soldado), cabos, tocha, eletrodo de tungstênio e cilindro de gás de proteção com regulador de vazão. Equipamentos como ignitor de alta frequência para facilitar a abertura do arco e sua manutenção quando em CA, e um sistema de acionamento que inicia ou interrompe o fornecimento de energia elétrica e de gás de proteção à tocha podem também ser usados nesse tipo de processo.

As vantagens e limitações do processo TIG são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2.3 - Vantagens e Limitações do processo TIG

Vantagens:	Limitações:
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilita a soldagem sem a adição de metal (chapas finas); • Não existem reação metal-gás e metal-escória (sem escória), sem grande geração de fumos, o que permite ótima visibilidade para o soldador; • Possui um arco elétrico suave, produzindo soldas com boa aparência e acabamento, exigindo pouco ou nenhuma limpeza após a operação; • Possui excelente controle do calor cedido à peça, devido ao controle independente da fonte de calor e 	<ul style="list-style-type: none"> • A taxa de deposição é menor que em processo com eletrodo consumível (para uma dada corrente); • É menos econômico para espessuras maiores que 10 mm; • Exige mais destreza e boas competências do soldador para soldagem manual; • Dificuldade em manter a proteção gasosa em trabalhos de campo (grande sensibilidade às correntes de ar); • Comprimento fixo do Consumível (máx. 1000 mm, em vareta);

<p>da adição de metal;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Solda todos os metais incluindo os dissimilares; • Solda em todas as posições; • Permite um controle preciso das variáveis de soldagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo rendimento $\leq 0,5$ kg/h; • Risco de inclusões de tungstênio; • Custos altos dos gases de proteção.
--	--

2.1.3 Eletrodo Revestido

No processo de soldagem a arco com Eletrodo Revestido, conhecido nos EUA como Shielded Metal Arc Welding (SMAW) ou na Europa como Manual Metal Arc Welding (MMA), o arco elétrico atua entre a ponta de um eletrodo revestido consumível e a poça de fusão estabelecida na linha de junta entre as bordas das peças a soldar. A corrente de soldagem pode ser do tipo alternada ou contínua, com o eletrodo ligado no polo positivo (CC+ ou polaridade inversa), ou no polo negativo (CC- ou polaridade direta).

O controle do processo e, conseqüentemente, a produtividade e a qualidade da junta soldada, é determinado pelas seguintes variáveis: comprimento do arco, tipo e valor da corrente, velocidade de soldagem, tipo e bitola do eletrodo, orientação do eletrodo e posição de soldagem.

O eletrodo representa-se um arame (alma), o qual é revestido concentricamente com uma massa composta de diversos minerais e produtos químicos. Os gases e a escória provenientes da decomposição dos componentes deste revestimento protegem o metal fundido dos gases da atmosfera e ainda permitem o uso em posição contrária à gravidade (“sobre cabeça”).

As vantagens e limitações do processo de soldagem a arco com Eletrodo Revestido são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2.4 - Vantagens e Limitações da soldagem com Eletrodo Revestido

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • O equipamento é relativamente simples, barato e portátil; • O metal de adição (alma) e os meios 	<ul style="list-style-type: none"> • A taxa de deposição é menor que em processo com eletrodo consumível (para uma dada

<p>de proteção durante a soldagem são fornecidos pelo próprio eletrodo revestido;</p> <ul style="list-style-type: none"> • É o processo a arco que possui a maior flexibilidade de aplicação; • A soldagem pode ser realizada em todas as posições (o que é muito importante caso a execução da solda não pode ser na posição plana); • É menos sensível a corrente de ar (por exemplo, a ventos) que processos que utilizam proteção gasosa; • Ocupa pouco espaço físico (versatilidade de manuseio); • É adequado para materiais de espessura acima de 1,5 mm; • A variedade de eletrodos existentes no mercado é imensa e são facilmente encontrados; • Facilidade de ajustar a composição do depósito (versatilidade de mercado); • É apropriado para a maioria dos metais e ligas metálicas comumente encontradas no mercado (aço carbono, aços de baixa, média e alta liga, aço inoxidável, ferro fundido, cobre, níquel e suas ligas e algumas ligas de alumínio); • É possível realizar a soldagem de materiais dissimilares; • É um dos processos de soldagem mais utilizados, particularmente na produção de cordões curtos, em trabalhos de manutenção e reparo e em trabalhos em campo. 	<p>corrente);</p> <ul style="list-style-type: none"> • É menos econômico para espessuras maiores que 10 mm; • Exige mais destreza e boas competências do soldador para soldagem manual; • Dificuldade em manter a proteção gasosa em trabalhos de campo (grande sensibilidade às correntes de ar); • Comprimento fixo do Consumível (máx. 1000 mm, em vareta); • Baixo rendimento $\leq 0,5$ kg/h; • Risco de inclusões de tungstênio; • Custos altos dos gases de proteção.
---	--

2.3 Calorímetro

Para medir-se eficiência térmica nos processos de soldagem, o método experimental mais utilizado é o calorímetro, podendo este apresentar várias formas geométricas e fluidos de operação. Existem dois tipos de calorímetros

que são mais frequentes em trabalhos e pesquisas, que é o calorímetro de água e o calorímetro de nitrogênio líquido (N₂L).

2.3.1. Calorímetro de água

Um dos métodos experimentais mais utilizados para se medir a eficiência térmica em processos de soldagem é o calorímetro de água (ESSERS, 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 garantida através de um misturador, como pode ser observado na Figura 2.3.

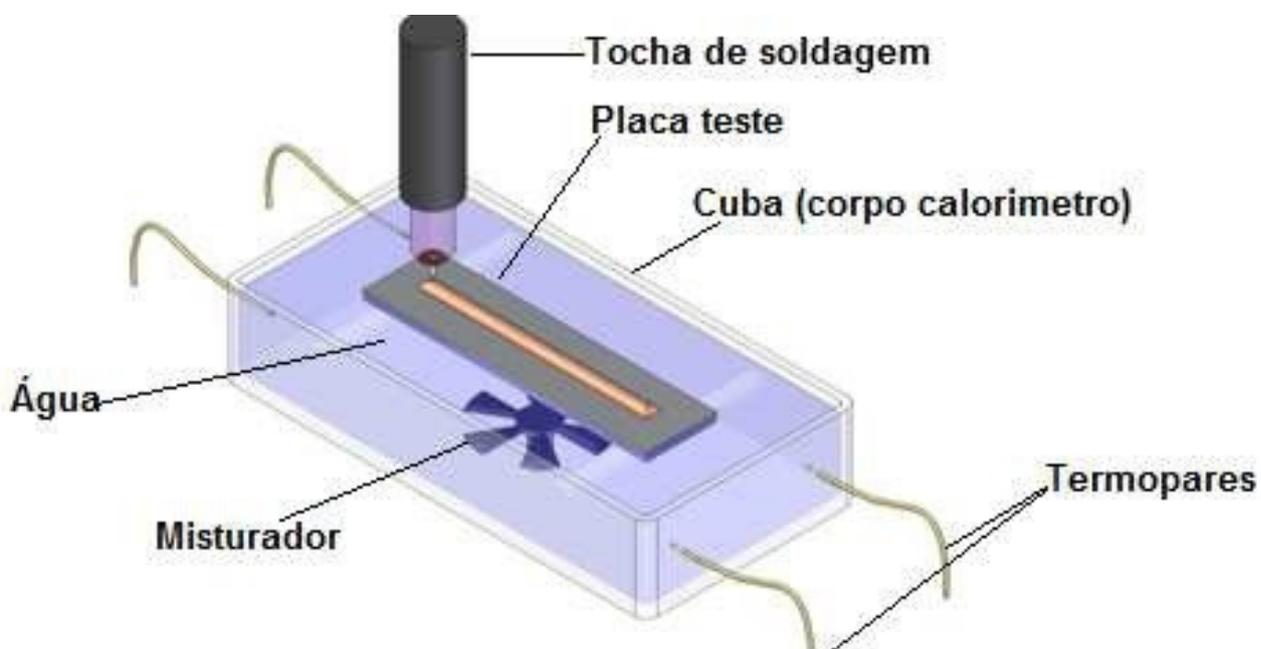


Figura 2.3 - Apresentação esquemática do calorímetro de água apresentado por ESSERS (1981).

Este tipo de calorímetro tem sido amplamente utilizado para a avaliação do calor imposto em processos de soldagem. O calor transferido é avaliado por meio da medição da variação da temperatura da água que fica em contato com a placa de teste. A mudança de temperatura da água neste caso é medida com um termopar tipo K. Em todos os testes, foram recolhidos os dados de temperatura durante 5 minutos a partir do início de soldagem que durou 20 segundos.

2.3.2. Calorímetro de nitrogênio líquido (N₂L)

Outro tipo de calorímetro utilizado por alguns autores é o do nitrogênio líquido (N₂L) para quantificar o calor imposto em processos de soldagem. O calorímetro de nitrogênio é composto basicamente por um recipiente Dewar (ou cuba criogênica) posicionada sobre uma balança digital com interface direta para monitoramento da perda de massa de N₂L. Também conta com um sistema de manipulação da placa de teste que permite um rápido deslocamento da placa para o recipiente Dewar, minimizando assim a dissipação do calor.

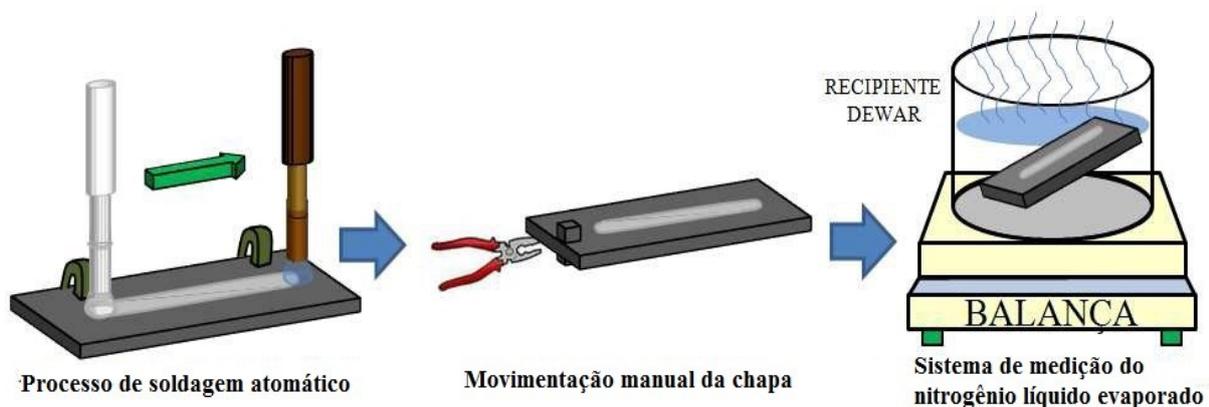


Figura 2.4 - Esquema do calorímetro de nitrogênio líquido e de medição da massa do N₂L evaporada (AREVALO, 2011).

O calor absorvido pela chapa durante a formação do cordão de solda é transferido para o N₂L, levando-o à ebulição. A energia associada à mudança de fase de líquido a vapor do N₂L pode ser considerada como a energia perdida pela chapa. A análise calorimétrica está baseada na perda de massa do N₂L. Com o conhecimento da massa evaporada, e o calor latente de vaporização do N₂L pode-se determinar a quantidade de calor trocado, e conseqüentemente a quantidade de calor que entrou na chapa devido ao processo de soldagem.

3. METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

O presente trabalho se embasou na comparação da eficiência térmica dos processos de soldagem MIG/MAG, TIG e Eletrodo Revestido, processos estes realizados utilizando parâmetros de soldagem semelhantes, de forma com que se possa comparar os resultados obtidos dos testes realizados.

3.1. Considerações gerais

Com o objetivo de poder fazer alguns cálculos necessários, como é o caso da Energia imposta, deve-se monitorar e registrar os parâmetros determinados durante os procedimentos de soldagem.

Parâmetros que são considerados de entrada, como é o caso de tensão e corrente são definidos de forma com que os processos possam ter seus resultados comparados, conforme já dito anteriormente. Esses valores são definidos na fonte de soldagem e monitorados durante os procedimentos.

Para o presente trabalho é importante considerar que todo o calor fornecido para a chapa de aço durante o processo de soldagem é transferido para o fluxo de água do calorímetro e registrado através dos termopares do mesmo.

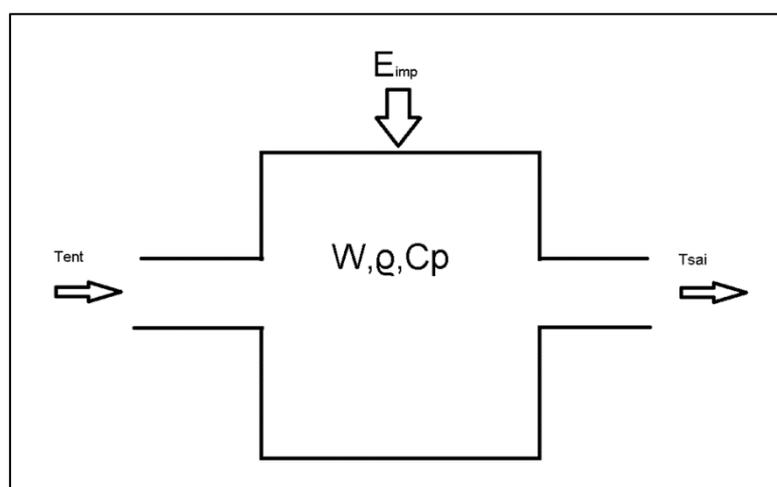


Figura 3.1 - Esquema do fluxo de água do calorímetro levando em conta alguns parâmetros.

3.2. Cálculo do Rendimento Térmico

De acordo com o esquema anterior, a energia imposta pode ser calculada pela seguinte equação (Eq. 3.1):

$$E_{imp} = \int_0^{tsold} W * \rho * C_p * (T_{ent} - T_{sai}) dt \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde,

W : Fluxo volumétrico de água, [m³/s];

ρ : Massa específica da água, [Kg/m³];

C_p : Calor específico da água à pressão constante, [KJ/Kg.°C];

T_{ent} : Temperatura da água na entrada no calorímetro, [°C];

T_{sai} : Temperatura da água na saída do calorímetro, [°C];

Como W , ρ e C_p não são funções do tempo, então essas constantes podem sair da integral, sendo assim, a energia imposta poderá ser escrita da seguinte maneira (Eq. 3.2):

$$E_{imp} = (W * \rho * C_p) * \int_0^{tsold} (T_{ent} - T_{sai}) dt \quad (\text{Eq. 3.2})$$

A integral na equação anterior é equivalente à área entre a curva de aquisição do termopar na saída e curva dos registros do termopar na entrada como representado pela figura a seguir:

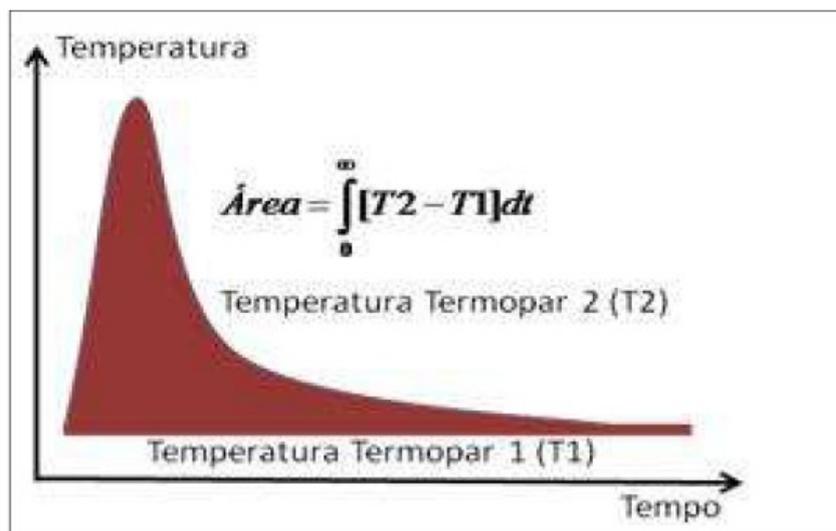


Figura 3.2 - Sinais de temperatura esperados para o termopar de entrada (T1) e o termopar de saída (T2).

Essa área pode ser aproximada utilizando o intervalo de aquisição dos termopares e os resultados obtidos de temperatura como mostrado na equação a seguir (Eq. 3.3):

$$\int_0^{t_{sold}} (T_{ent} - T_{sai}) dt \approx \sum_0^{i=n} t_{aq} * (T_{ent_i} - T_{sai_i}) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde t_{aq} é o intervalo de aquisição em s.

Fazendo as substituições necessárias, da Eq. 3.3 na Eq. 3.2, temos que a Energia Imposta pode ser aproximada como (Eq. 3.4):

$$E_{imp} \approx (W * \rho * C_p) * \sum_0^{i=n} t_{aq} * (T_{ent_i} - T_{sai_i}) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Substituindo novamente, desta vez, a Eq. 3.4 na equação para o cálculo do rendimento térmico, obtém-se uma maneira de calcular o rendimento térmico a partir dos parâmetros do experimento:

$$\eta_{term} = \frac{E_{imp}}{U * I * t_{sold}} \approx \frac{(W * \rho * C_p) * \sum_0^{i=n} t_{aq} * (T_{ent_i} - T_{sai_i})}{U * I * t_{sold}} \quad (\text{Eq 3.5})$$

3.3. Equipamentos Utilizados Para Soldagem MIG/MAG

A fonte utilizada na soldagem MIG/MAG foi à do tipo multiprocesso MTE Digitec 600 (Fig. 3.3).



Figura 3.3 - Fonte utilizada no processo MIG/MAG.

O regulador com o manômetro e o indicador de vazão utilizados encontram-se apresentados na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Medidores de pressão e vazão utilizados.

Foi usada uma tocha da soldagem MIG/MAG do fabricante TBi da marca 511 de 450 A resfriada a gás (Fig. 3.5).

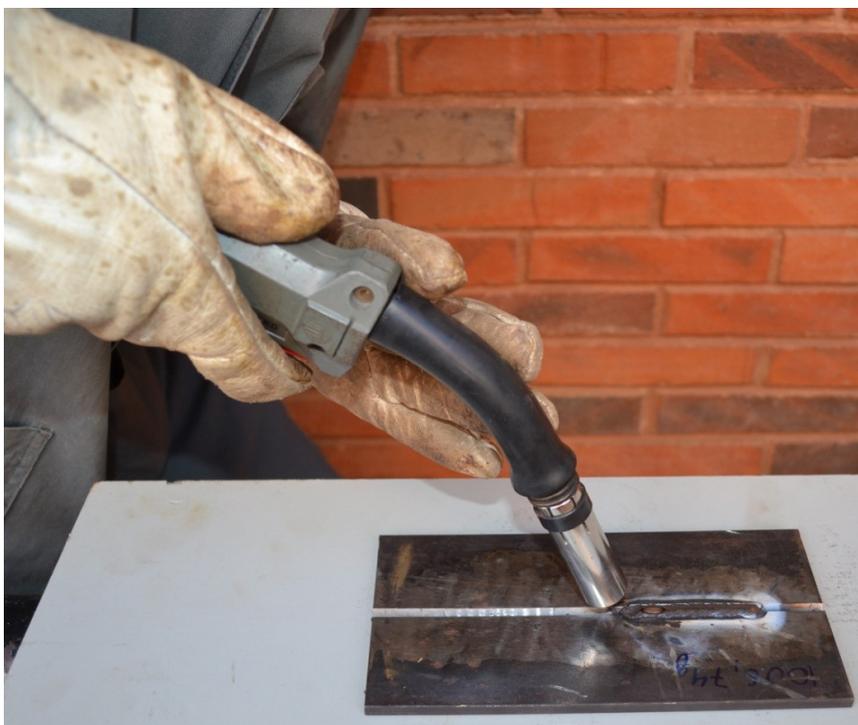


Figura 3.5 - Tocha usada na soldagem MIG/MAG.

O gás de proteção foi da marca STARGOLDTUB da empresa White Martins com a composição Argônio 93,6% - Dióxido de Carbono 6,4% (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Gás de proteção.

O arame utilizado foi do tipo ER-70S-6 cobreado com diâmetro de 1,0 mm da empresa Belgo Bekaert (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Arame para soldagem MIG/MAG.



Figura 3.8 - Especificações do arame utilizado para soldagem MIG/MAG.

3.4.1 Descrição do calorímetro utilizado

O calorímetro escolhido para o embasamento do trabalho foi o Calorímetro à Água com fluxo contínuo. O projeto do calorímetro é composto

por três partes principais, sendo elas o corpo do calorímetro, o sistema de alimentação de água e o sistema de monitoramento dos sinais de saída dos termopares.

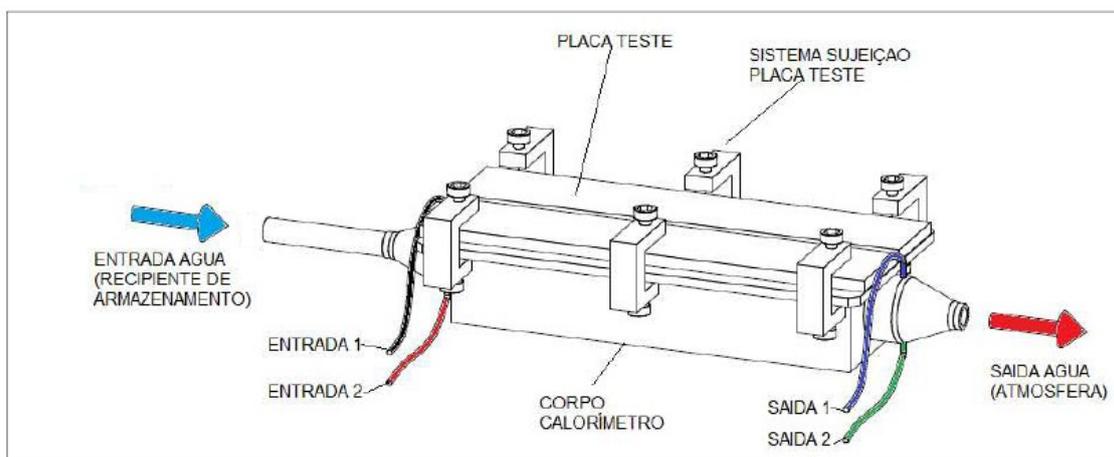


Figura 3.9 – Esquema do calorímetro de fluxo contínuo utilizado (AREVALO, 2011).

Chama-se de corpo do calorímetro a base, o selo de vedação, a placa teste e o sistema de sujeição placa teste. Este corpo contém em seu interior um volume de água que está sendo renovado constantemente devido ao fluxo contínuo, onde se está trocando calor diretamente com a placa teste durante o processo de soldagem e resfriamento da placa teste.

As dimensões da placa teste para este tipo de calorímetro são de 200 x 100 x 6,35 (mm), utilizando material base aço carbono ASTM A36, com chanfro no centro em sentido longitudinal.

O sistema de fixação da placa teste foi realizado através de seis parafusos de 8 mm que são suportados diretamente na base do calorímetro.

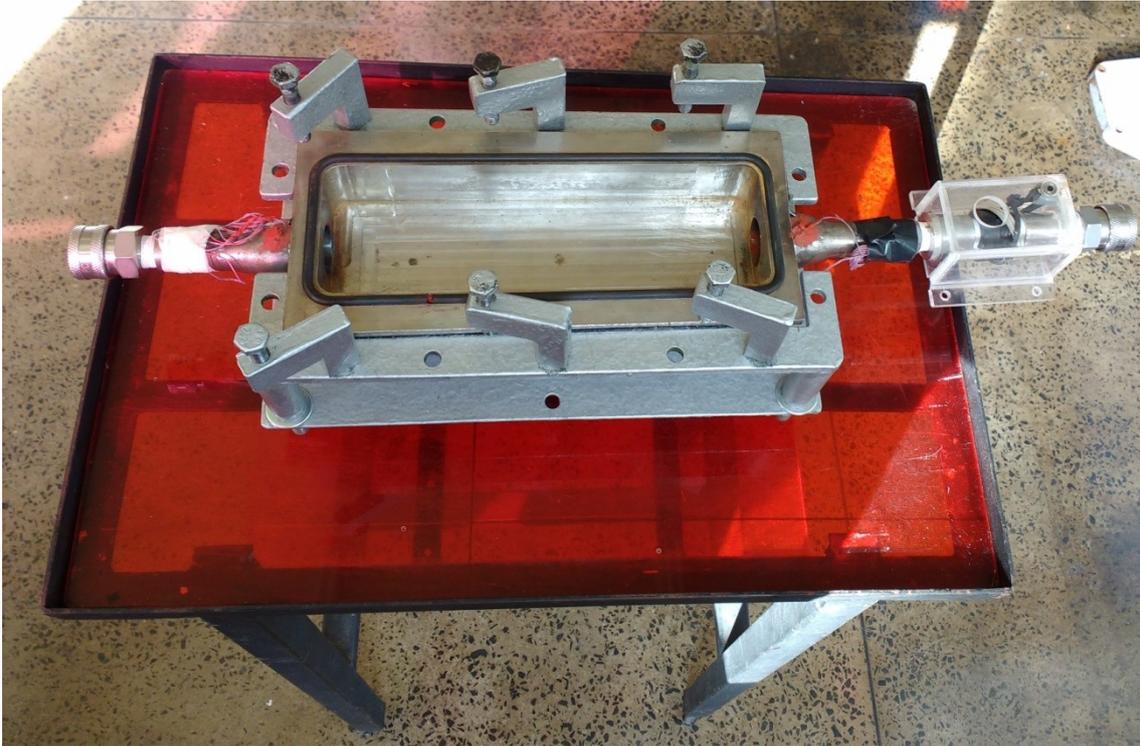


Figura 3.10 – Vista geral do calorímetro utilizado junto com uma bancada.

A alimentação de água do calorímetro de fluxo contínuo deve ser feita de forma constante, evitando flutuações que podem acontecer devido a quedas de pressão e aumento ou redução no fluxo de água na linha de alimentação. Para evitar isto foi projetado um sistema de alimentação para manter sempre o mesmo nível de água (cabeça de pressão) e, portanto a mesma taxa de alimentação de água para o calorímetro de fluxo contínuo. Na Figura 3.11 pode se observar que o sistema de alimentação é composto pela linha principal de água, recipiente de armazenamento e mangueiras de alimentação e de excesso de água (ladrão).

O recipiente de armazenamento consiste em uma caixa de acrílico de dimensões 25 x 25 x 60 cm 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 (aproximadamente 30 litros). A vazão no ponto de saída que alimenta o calorímetro é controlado por meio de uma válvula de esfera manual de aço inoxidável (com esta pode ser regulada a vazão de água dependendo do grau de abertura).

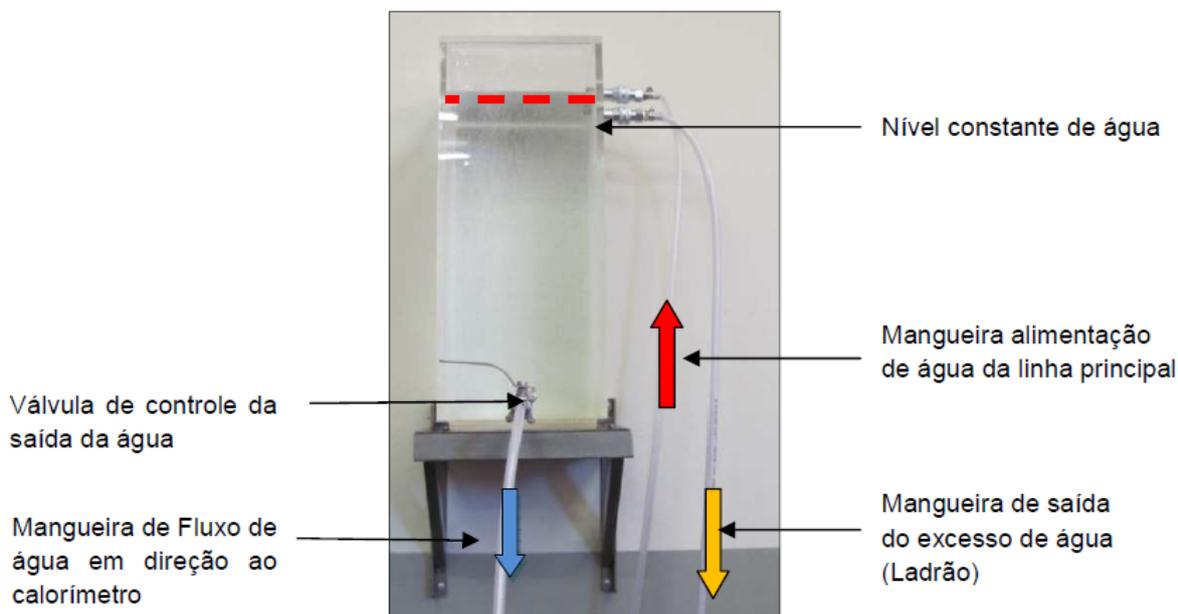


Figura 3.11 - Recipiente de armazenamento de água com capacidade aproximada de 30 litros (AREVALO, 2011).

3.4.1 Sistema de Aquisição de Dados do Calorímetro

O sistema de aquisição de dados do calorímetro deve receber os dados de tensão, corrente, temperatura inicial e temperatura final (Figura 3.12).

Para o recebimento de dados de tensão, existe um receptor na tocha de soldagem que capta o sinal elétrico de tensão do arco e o direciona para uma placa condicionadora, que por sua vez é ligada a uma placa de aquisição de dados. Essa última placa envia o sinal para uma conexão USB possibilitando assim a leitura por um micro com o auxílio do programa LabVIEW.

Para o recebimento de dados de corrente, existe um sensor Hall posicionado no cabo terra da máquina de solda. Este sensor envia então um sinal de corrente para a mesma placa condicionadora de sinal mencionada anteriormente, realizando então o mesmo caminho da leitura de sinal da tensão, ou seja, depois segue para uma placa de aquisição de dados e depois para o micro.

Já o monitoramento das temperaturas de entrada e saída foi feito por meio de termopares tipo T através de uma placa de aquisição com interface direta com o micro por meio de conexão USB e monitorada pelo LabVIEW.

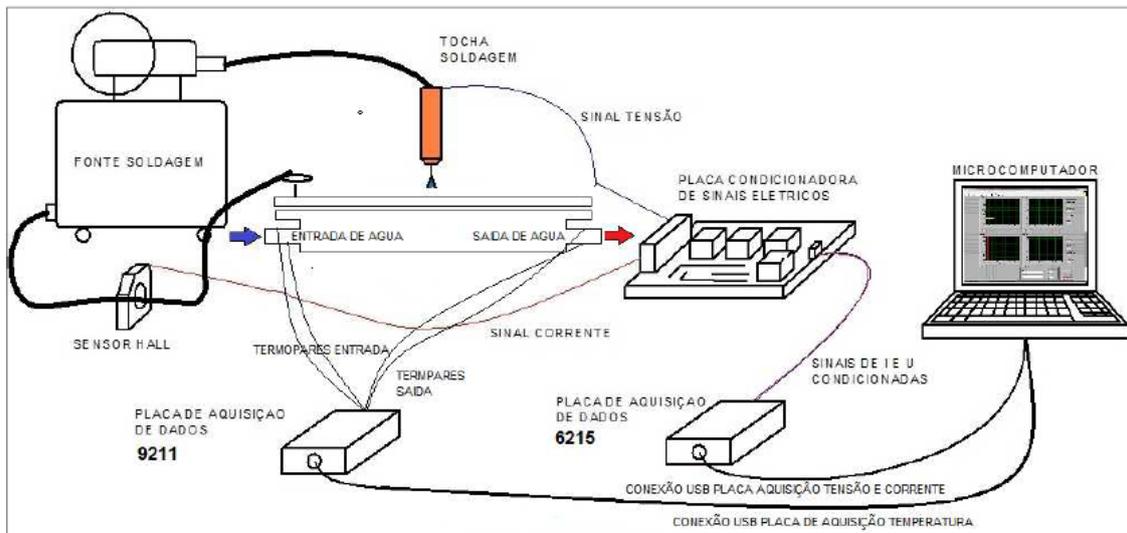


Figura 3.12 - Sistema de aquisição de sinais elétricos para o calorímetro (AREVALO, 2011).

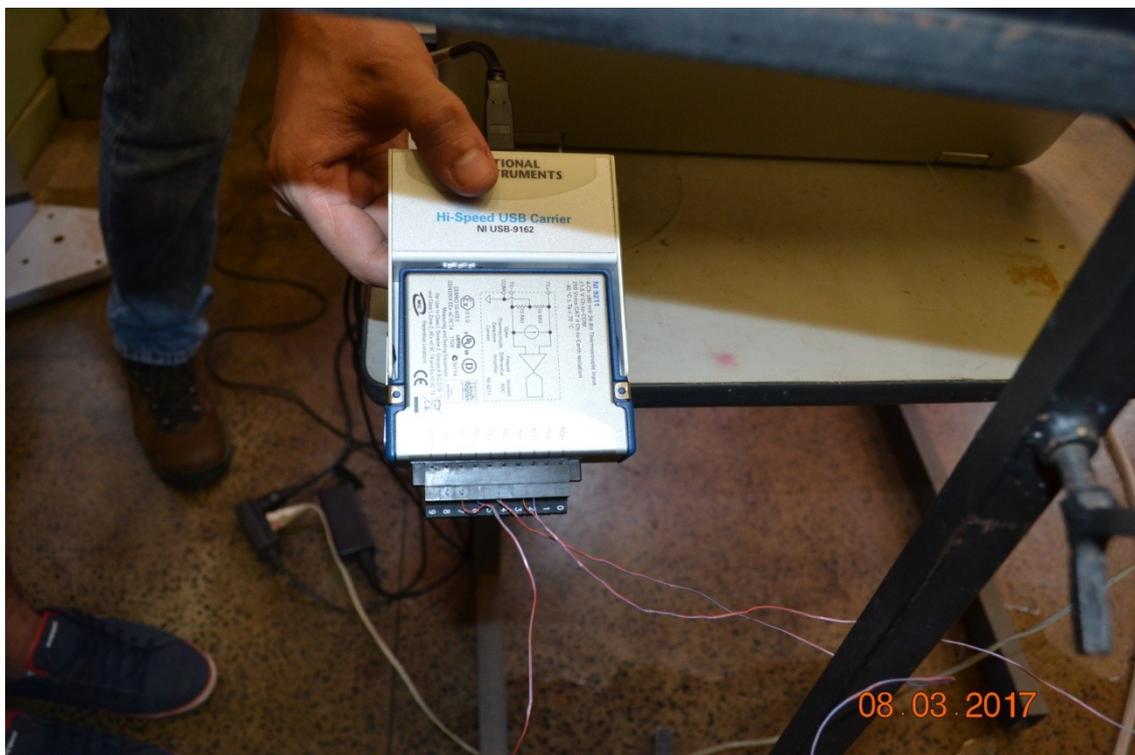


Figura 3.13 - Placa de aquisição dos termopares.

4. PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

4.1. Montagem do Calorímetro

Na montagem do calorímetro, posiciona-se o equipamento sobre uma bancada e fazem-se as ligações das mangueiras para o fluxo de água. Primeiramente é feita a ligação entre uma saída de água existente no laboratório onde estavam sendo executados os testes e o reservatório de água, depois entre este reservatório e o calorímetro, e por último do calorímetro para o meio ambiente.

Depois de o calorímetro estar montado, deve-se então fixar a chapa de teste que receberá as soldas, conforme a Figura 4.1.



Figura 4.1 - Calorímetro já com a chapa de teste fixada.

4.2. Bolha de Ar

Outro ponto muito importante neste experimento é que a chapa de teste deve estar em contato com a água durante todo o tempo ao longo de toda a sua superfície para que os resultados não apresentem erros, uma vez que o ar dentro do calorímetro pode causar medições erradas no monitoramento da temperatura de entrada e saída.

Para garantir que esse erro não aconteça foi adotado dois procedimentos. Um deles é instalação de uma cantoneira no fundo do calorímetro do lado interno, com o objetivo de forçar a água a passar sempre tocando na chapa de teste conforme a figura abaixo.

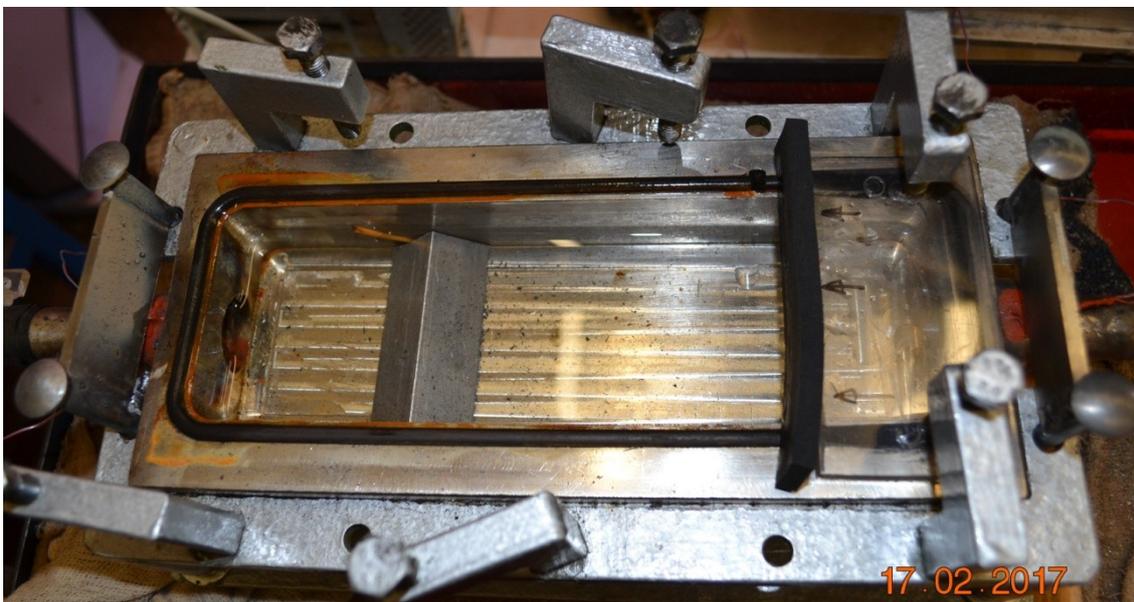


Figura 4.2 - Posicionamento da cantoneira dentro do calorímetro.

O outro procedimento foi inclinar o calorímetro de forma que todo o ar contido lá dentro fosse deslocado apenas para um lado. Foi instalada também uma placa de acrílico para verificar essa quantidade de ar presente dentro do calorímetro quando os testes forem realizados. Sendo assim é possível através da observação da bolha de ar formada avaliar que a água está em total contato com a chapa de teste.



Figura 4.3 - Bolha de ar deslocada para uma extremidade do calorímetro.

4.3. Vazão de Água

A vazão de água foi calculada através de uma verificação da quantidade de água que saía do reservatório durante determinado tempo, conforme a válvula de saída era aberta. Dessa forma, a válvula foi ajustada para permitir a vazão de água escolhida e com o auxílio de um suporte, esta mesma vazão foi mantida para todos os testes.

O valor da vazão de água escolhido para os testes realizados foi de 2,6 litros de água por minuto. Vale lembrar que o reservatório de água mantinha seu nível sempre constante, através de reposição instantânea, com o objetivo da altura da coluna de água não variar e com isso a vazão permanecesse constante durante todo o tempo.

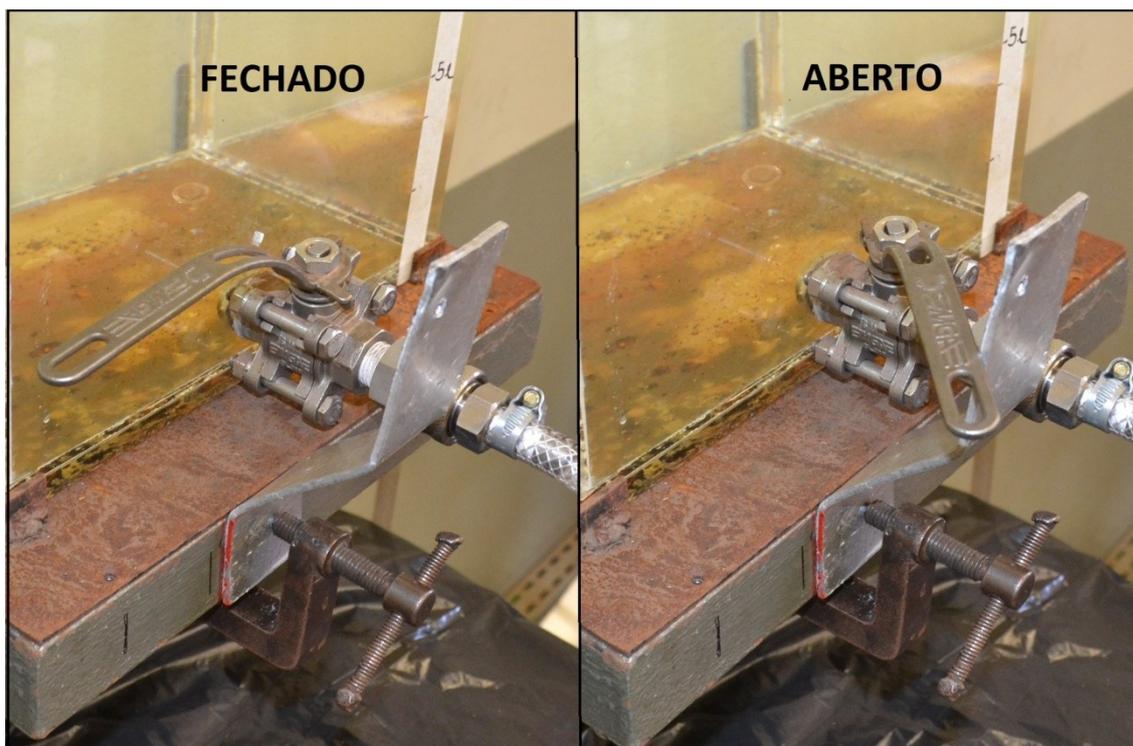


Figura 4.4 - Válvula completamente fechada (à esquerda) e parcialmente aberta (à direita) de acordo com a vazão escolhida.

5. RESULTADOS

Foram realizados 3 testes para cada processo de soldagem, os quais terão seus resultados apresentados abaixo, com o intuito de verificar e comparar a eficiência térmica do processo MIG/MAG versus outros processos de soldagem e versus os valores já apresentados na literatura. Todas as soldagens foram realizadas por um soldador.

Em todos os testes, foram recolhidos os dados de temperatura durante 5 minutos a partir do início de soldagem que durou 20 segundos. Para melhor verificação das variações de temperaturas, foram construídos gráficos com base nos dados recebidos dos termopares.

Os testes realizados com o processo MIG/MAG foram feitos de duas maneiras diferentes. Sendo duas soldas realizadas dentro de um chanfro localizado no centro da peça e uma outra realizada sob uma solda já realizada, com a finalidade de verificar se haveria alguma mudança nos resultados.

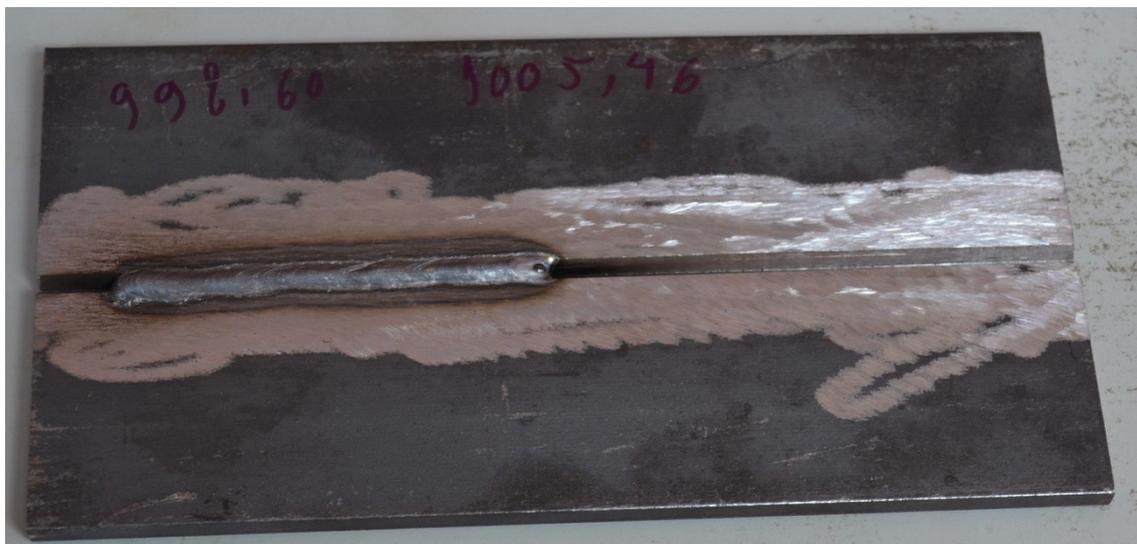


Figura 5.1 - Solda realizada dentro do chanfro



Figura 5.2 - Solda realizada sob a solda anterior

Abaixo estão representados através da tabela 5.1 os parâmetros de soldagem utilizados nos procedimentos.

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem

Número do Teste	1	2	3
LOCAL	Chanfro	Chanfro	Sob a solda
TENSÃO (V)	18	19	19
VELOCIDADE DE ARAME (m/min)	4,7	4,7	4,7
CORRENTE (A)	125	116	130
VAZÃO DE GÁS (l/min)	13	15	15
MASSA INICIAL (gr)	1000,76	998,6	1005,46
MASSA APÓS SOLDA (gr)	1008,54	1005,46	1013,09
TOTAL MASSA DEPOSITADA (gr)	7,78	6,86	7,63

Com os parâmetros acima utilizados, foram registradas as seguintes temperaturas:

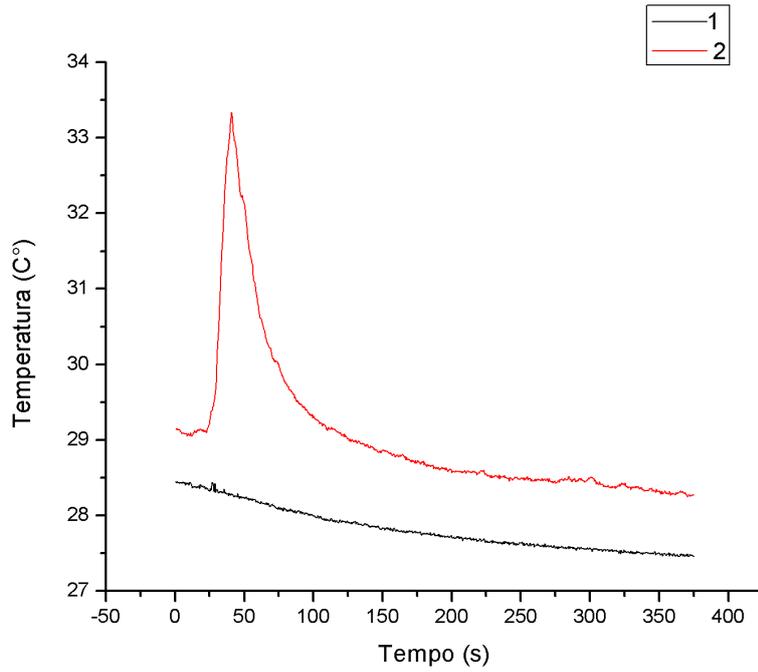


Figura 5.3 - Temperaturas Teste 1.

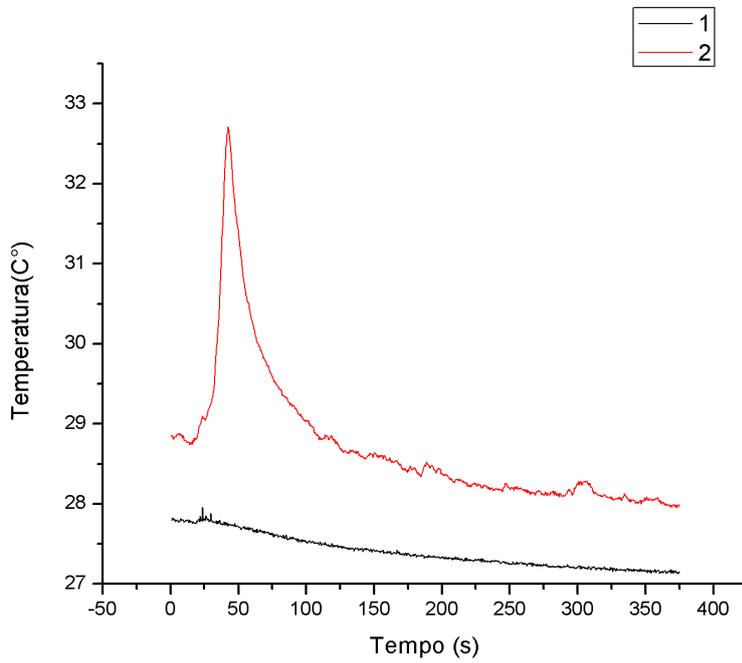


Figura 5.4 - Temperaturas Teste 2.

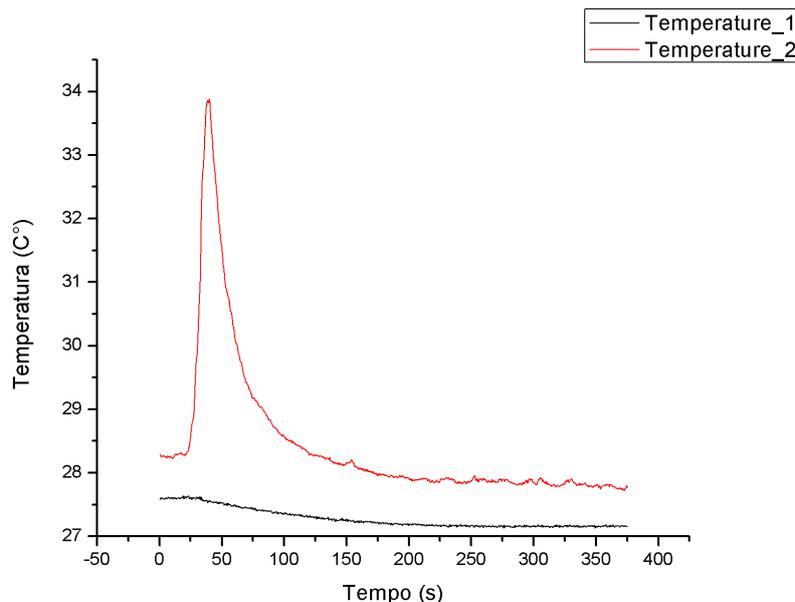


Figura 5.5 - Temperaturas Teste 3.

Assim têm-se todos os parâmetros necessários para fazer o cálculo do rendimento térmico, conforme mostrado no item 3.2 do presente trabalho. Os rendimentos térmicos calculados estão apresentados na tabela abaixo junto com os dos processos de soldagem TIG e ER obtidos nas outras Teses de Conclusão de Curso feitos na mesma época pelos alunos Gabriel Carraro e Gustavo Resende.

Tabela 5.2 - Rendimentos térmicos calculados

N° DO TESTE	MIG/MAG			ER				TIG			
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4
LOCAL DA SOLDA	Chanfr o	Chanfr o	Solda*	Chanfr o	Chanfr o	Solda	Solda	Chanfr o	Fora do Chanfr o	Chanfr o	Fora do Chanfr o
CORRENTE (A)	125	116	130	131	132	132	132	130	130	130	130
TENSÃO (V)	18	19	19	20	20	20	20	11,5	11	10,5	12
EFICIÊNCIA TÉRMICA	81%	78%	75%	76%	72%	83%	78%	65%	53%	69%	58%

*A solda foi realizada sob outra solda já existente na placa de teste.

Os resultados encontrados para as eficiências térmicas são condizentes com os afirmados pela literatura, e como esperado, os valores para o processo MIG/MAG estão muito próximos aos com ER, sendo que estes são maiores que os obtidos com o processo TIG. Pode-se afirmar então que o processo

MIG/MAG se sobrepõe aos outros, por ter valores considerados bons de eficiência térmica e ainda inúmeras vantagens em relação aos outros processos, conforme já dito anteriormente.

De acordo com os resultados, é possível perceber também que o valor da eficiência térmica cai quando a solda é realizada fora do chanfro, ou seja, com a solda dentro do chanfro o aproveitamento do calor é melhor.

Outro fator existente que deve ser lembrado é que o próprio calorímetro absorve calor, podendo reduzir o valor da eficiência térmica em até 5%. Sendo assim, se os resultados encontrados para a eficiência térmica forem acrescidos de 5%, os valores se tornam ainda melhores, comprovando mais ainda o sucesso do experimento.

6. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado comparou a eficiência térmica entre três processos de soldagem diferentes, sendo eles o MIG/MAG, Eletrodo Revestido e TIG, com o intuito de comparar também os resultados obtidos com a literatura.

O calorímetro de água possibilitou a medida do aporte térmico e rendimento térmico do processo de soldagem. A repetibilidade alcançada dos resultados foi boa, e juntamente com o fato dos resultados estarem dentro do esperado, pode-se considerar os testes como confiáveis.

O processo de soldagem MIG/MAG se mostrou com um bom rendimento térmico, aliado a uma taxa de deposição de metal superior e maior facilidade de treinamento do soldador, quando comparado com os processos por Eletrodo Revestido e TIG. Visto isso, pode-se afirmar então que o processo em questão é uma ótima opção, tanto para grandes indústrias quanto para pequenas, no setor metal-mecânico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREVALO, H. H. **Desenvolvimento e Avaliação de Bancada Experimental para Calorimetria via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) em Processos de Soldagem**. 2011. 145p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 362p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2014. 288p.