

GABRIEL CARRARO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

GABRIEL CARRARO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS**

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
Ponomarev

UBERLÂNDIA - MG

2017

GABRIEL CARRARO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS**

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo

Mestre Diego Costa Correia Silva

UBERLÂNDIA - MG

2017

AGRADECIMENTOS

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

À minha família, meus pais, Gilson e Luciani, por nunca terem poupado esforços e incentivos para os meus estudos. Meu irmão, Guilherme, por sempre ter me apoiado.

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 a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), quantificando-a. Isto será feito com a finalidade de poder comparar esta eficiência térmica obtida com a de outros processos de soldagem, como a soldagem MIG/MAG (GMAW) 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 a soldagem com eletrodos revestidos possui valores de eficiência térmica semelhantes aos do processo MIG/MAG e maiores do que o processo TIG. Ao fazer uma escolha, o usuário deve levar em consideração algumas limitações do processo com eletrodo revestido, aceitando assim que 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 welding with covered electrode (SMAW) 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 MIG/MAG and TIG (GTAW) welding processes. 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 higher than that for the TIG process. MIG/MAG welding is more desirable due to its higher productivity and better weld bead appearance.

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

Lista de Abreviações

GMAW – Gas Metal Arc Welding

MIG/MAG - Metal Inert Gas / Metal Active Gas

SMAW – Shielded Metal Arc Welding

ER – Processo de soldagem por eletrodo revestido

CC – Corrente contínua

CCEP – Corrente contínua e eletrodo positivo

CCEN – Corrente contínua e eletrodo negativo

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. Eletrodos Revestidos (SMAW)	3
2.2.2. MIG/MAG ou GMAW	11
2.1.3 Soldagem TIG	13
2.3 Calorímetro	15
2.3.1. Calorímetro de água	15
2.3.2. Calorímetro de nitrogênio líquido (N ₂ L)	16
3. METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS	17
3.1. Considerações gerais	17
3.2. Cálculo do Rendimento Térmico	18
3.3. Equipamentos Utilizados Para Soldagem SMAW	19
3.4.1 Descrição do calorímetro utilizado	22
3.4.1 Sistema de Aquisição de Dados do Calorímetro	24
4. PROCEDIMENTOS PRELIMINARES	26
4.1. Montagem do Calorímetro	26
4.2. Bolha de Ar	26
4.3. Vazão de Água	28
5. RESULTADOS	30
6. CONCLUSÃO	35
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

A soldagem por eletrodo revestido é um processo que se caracteriza por produzir a fusão dos metais por um arco elétrico, originado entre a ponta do eletrodo revestido e a superfície do metal de base. Ao passo que o eletrodo vai se fundindo, deposita metal de adição à solda, juntamente com uma escória líquida de menor densidade que a do metal. Essa escória é formada pelo revestimento do eletrodo e também das impurezas do metal de base, formando-se assim uma proteção superficial que impede que a poça de fusão seja contaminada pela atmosfera.

Esse processo é um dos mais populares devido a sua grande versatilidade e também porque os equipamentos empregados na realização desse tipo de solda são simples, baratos e portáteis. O eletrodo revestido possui uma vantagem em situações que apresentam certa dificuldade de execução imposta por obstáculos físicos, pois possui uma acessibilidade melhor.

Além disso, pode ser utilizado para soldar a maioria dos aços e alguns metais não ferrosos, expandindo-se muito sua área de aplicação. Também é utilizado para a deposição de metal de adição, afim de se alcançar certas propriedades e dimensões no metal de base que está sendo trabalhado.

No entanto, a taxa de alimentação do eletrodo não é constante, sendo recomendado para serviços que tenham como característica cordões curtos. Sua produtividade é menor, comparada ao processo MIG/MAG e deve ser utilizado para metais de base com espessura acima de 2 mm.

Não é capaz de soldar materiais com baixo ponto de fusão, devido à grande intensidade de calor, além de também não ser recomendado para metais reativos, pois a escória não tem capacidade de evitar a contaminação da poça fundida pelo oxigênio nesse caso. A escória também exige uma operação para removê-la após a soldagem, gerando muitos resíduos que podem contaminar o local onde foi realizada a solda.

É sempre um desafio selecionar o melhor processo a ser utilizado de acordo com os serviços em demanda. Sempre deve-se levar em conta a qualidade do

trabalho a ser realizado, conformidade com as exigências técnicas, produtividade, velocidade de execução, prazos e o que a empresa dispõe, tanto na questão de equipamentos de soldagem, como na qualificação de mão-de-obra.

Porém, nem sempre há a disponibilidade de condições favoráveis à realização da solda, como intempéries, dificuldade de acesso, falta de materiais e equipamentos, falta de mão-de-obra qualificada e erros de execução do serviço. Portanto, todos esses fatores que podem prejudicar a qualidade final do trabalho devem ser levados em consideração no momento da decisão do processo de soldagem que será utilizado. Se a escolha for feita de forma inadequada, as consequências podem ser problemáticas tanto para a empresa, como quebra de equipamentos e inutilização de peças, quanto para o operador, que pode vir a sofrer um acidente de trabalho.

A quantidade de calor perdido no processo também tem que ser levada em conta para a seleção de qual processo será utilizado para a realização do serviço. A obtenção do valor de rendimento, então, se torna fundamental para que haja uma comparação entre as eficiências dos processos.

Esse trabalho tem como objetivo realizar a comparação entre as eficiências térmicas dos processos de soldagem por eletrodos revestidos, MIG/MAG e TIG, com foco em eletrodos revestidos, para que facilite o momento da decisão de qual processo utilizar de acordo com o serviço apresentado.

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 declarados 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. Eletrodos Revestidos (SMAW)

A eficiência térmica dos processos de soldagem está diretamente relacionada com o arco elétrico, que quando aberto, resulta na geração de grande quantidade de calor e luz. Esse calor gerado não é aproveitado completamente no processo, pois parte dele é perdido para o meio ambiente na forma de luz, som e outras radiações. Como já foi mencionado acima (Tabela 2.1), na literatura podemos encontrar muitas informações acerca da eficiência térmica dos processos de soldagem por eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG, porém há uma grande divergência nos valores fornecidos de um estudo para o outro.

Essa falta de consenso entre os estudos especializados acarreta em um grave erro do cálculo do calor imposto, que é um parâmetro de grande importância para a avaliação da microestrutura do metal de solda.

A soldagem por eletrodo revestido é um processo que se caracteriza por produzir a fusão dos metais por um arco elétrico, originado entre a ponta do eletrodo revestido e a superfície do metal de base. Ao passo que o eletrodo vai se fundindo, deposita metal de adição à solda, juntamente com uma escória líquida de menor densidade que a do metal. Essa escória é formada pelo revestimento do eletrodo e também das impurezas do metal de base, formando-se assim uma proteção superficial que impede que a poça de fusão seja contaminada pela atmosfera. O revestimento também possui funções de facilitar a ionização, estabilizar o arco, formar uma proteção gasosa contra a atmosfera e fornecer elementos de liga. O esquema do processo é representado na figura a seguir:

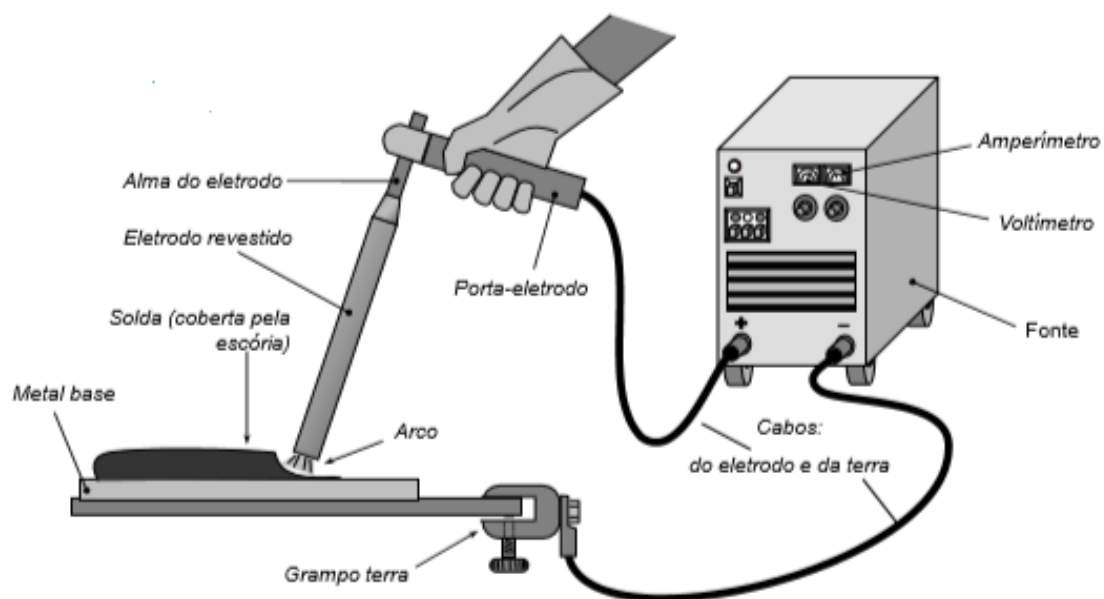


Figura 2.2.1. - Esquema de Soldagem Eletrodo Revestido (Fonte: Material Didático Prof. Vladimir Ponomarov)

A característica estática da fonte nesse processo é a do tipo corrente constante. Nessa configuração é possível ajustar a corrente conforme as especificações necessárias requisitadas no trabalho e essa se manterá dentro de uma faixa restrita que viabiliza a solda. A curva estática típica desse tipo de fonte pode ser observada na figura a seguir:

- Tipo Corrente Constante;
- Trabalha com todos os tipos de corrente, CC+, CC-, CA, dependendo do tipo de cada eletrodo;
- Tensão em vazio (U_0): de 70 a 90 V.

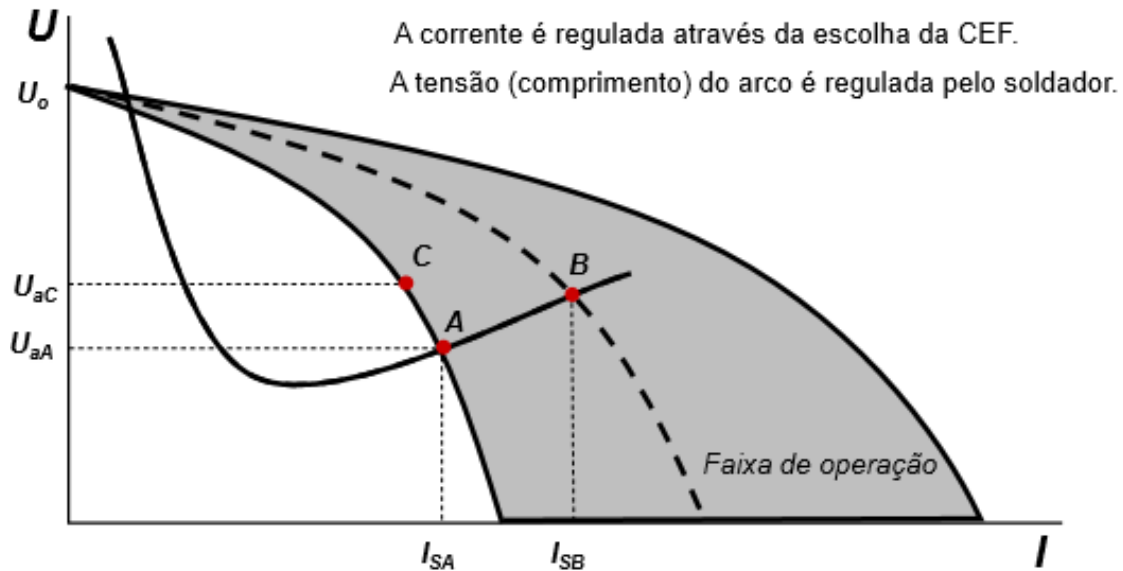


Figura 2.2.2 - Fonte de Característica Estática Corrente Constante (Fonte: Material Didático Prof. Vladimir Ponomarov)

O eletrodo revestido é formado pelos seguintes componentes:

- Alma: uma vareta metálica que é fabricada por meio da trefilação. A alma conduz a corrente elétrica, fornecendo também o metal de adição para a junta;
- Revestimento: uma mistura de diversos materiais recobre a alma, formando o revestimento. Esse revestimento tem diversas funções na soldagem, como estabilizar o arco elétrico, proteger a poça de fusão e o metal de solda contra contaminação pela atmosfera por meio da proteção gasosa e da escória, fornecer os elementos de liga visando ajustar a composição química do cordão, conferir características operacionais, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e à solda.

Segue abaixo, na figura, uma representação do eletrodo no momento da soldagem, assim como a formação da poça de fusão, atmosfera protetora gerada e a escória solidificada.

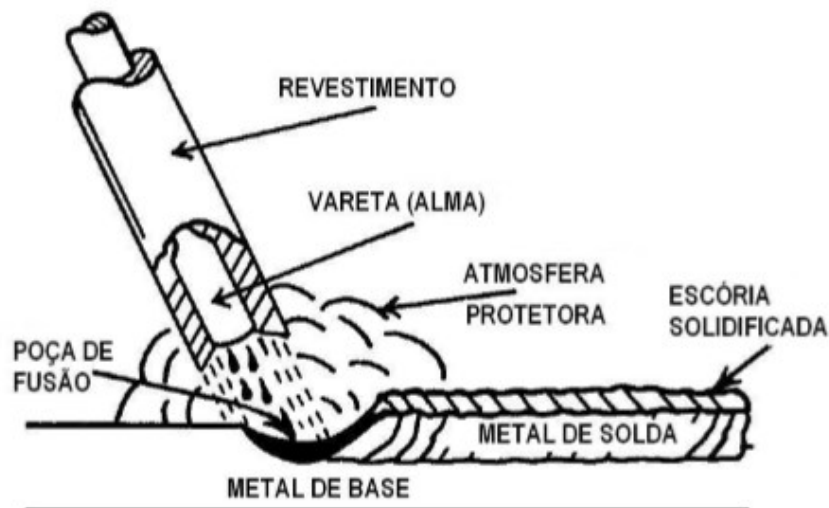


Figura 2.2.3 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Fonte: Material Didático Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

Os principais tipos de revestimento para eletrodos são o celulósico, básico e o rutílico, cada um com suas vantagens e limitações. Neste trabalho, utilizamos dois tipos apenas, o básico e o rutílico.

Revestimento celulósico: caracterizado pela grande produção de gases resultantes da combustão de materiais orgânicos (principalmente a celulose). Não devem ser ressecados, alta penetração, pouca escória, facilmente destacável. O alto nível de hidrogênio no metal de solda depositado impede o uso em estruturas muito restritas, ou em materiais sujeitos a trincas por hidrogênio.

Revestimento básico: possui em sua composição grandes quantidades de carbonatos (de Cálcio ou do outro material elemento) e fluorita (CaF_2), responsáveis pela geração de escória com características básicas. Em adição com o dióxido de carbono decomposto do carbonato, protege a solda contra a ação da atmosfera. Esse revestimento produzirá soldas com baixo teor de hidrogênio, desde que seja armazenado adequadamente. Com isso há uma minimização dos problemas de fragilização e fissuração. A solda feita com eletrodos deste tipo possui penetração média e o cordão apresenta boas características mecânicas.

Vantagens:

- Boas características mecânicas;
- Escória fluida e facilmente destacável;
- Aplicações em soldas de alta responsabilidade.

Desvantagens:

- Difícil de soldar;
- Requer ressecagem a temperaturas relativamente altas.

Revestimento rutílico: possuem em sua composição grandes quantidades de rutila (TiO_2 - dióxido de Titânio), produzindo uma escória abundante, densa e de fácil destacabilidade. Os eletrodos com esse revestimento são de fácil manipulação e podem ser usados em qualquer posição, exceto quando possuírem grande quantidade de ferro em sua composição. São bastante utilizados por serem bem versáteis, podendo utilizar corrente contínua ou alternada, produzindo um cordão de bom aspecto. Possui penetração baixa ou média.

Vantagens:

- Alta estabilidade do arco;
- Excelente acabamento do cordão;
- Poucos respingos;
- Escória abundante e de fácil destacabilidade.

Desvantagens:

- Baixa penetração;
- Baixa resistência à fissuração;
- Características mecânicas piores que as do eletrodo básico.

A nomenclatura adequada, de acordo com a norma AWS A5.1, é representada por:

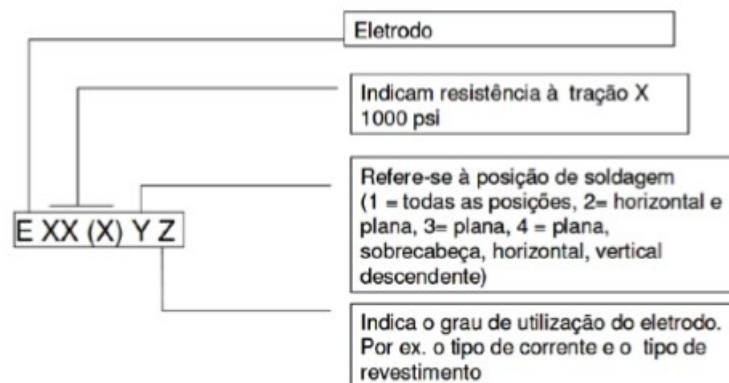


Figura 2.2.4 – Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono (Fonte: Material Didático Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

Neste trabalho foram utilizados os eletrodos E6013 e E7018.

Os eletrodos E6013 (rutílicos) contêm um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo – TiO_2) em seu revestimento. São projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que metais de baixa espessura sejam soldados sem furar a peça. O revestimento contém compostos de potássio suficientes para estabilizar o arco na soldagem com corrente alternada (CA). Também possui uma taxa de deposição relativa baixa.

Já os eletrodos E7018 (básicos) são a versão mais moderna do eletrodo de baixo hidrogênio. A adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento resulta num arco mais suave e com menos respingos. Esse moderno balanço de ingredientes do revestimento resulta numa grande melhoria na estabilidade do arco, na direção do arco e na facilidade de manuseio em todas as posições. Possui ainda taxa de deposição e penetração médias.

Podemos ainda observar na figura abaixo mais algumas aplicações desses eletrodos, bem como especificações técnicas fornecidas pelo fabricante:

ELETRODO OK	METAL DEPOSITADO	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS	POSIÇÃO SOLDAGEM	TENSÃO/ TIPO CORR.	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	FAIXA DE CORRENTE (A)
46.00 rutílico E 6013	C 0,07	Uso geral, todos os tipos de juntas em todas as posições, produzindo cordões de excelente acabamento; soldagem de chapas navais, estruturas metálicas, construções em geral; bom desempenho em chapas galvanizadas, juntas mal preparadas e ponteamto. HOMOLOGAÇÕES: ABS, BV, DNV, LR	T480-520 MPa A 22-24%		18 - 28 V	2	300	50 - 70
	Si 0,20				CA $\geq$ 50 V	2,5	350	60 - 100
	Mn 0,35				CC + ou -	3,25	350	80 - 150
						4	350	105 - 205
						5	350	155 - 300
						6	450	195 - 350
48.04 básico E 7018	C 0,07	Uso geral em soldagem de grande responsabilidade, depositando metal de alta qualidade; todos os tipos de juntas; alta velocidade e boa economia de trabalho; indicado para estruturas rígidas, vasos de pressão, construções navais, aços fundidos, aços não ligados de composição desconhecida, etc. HOMOLOGAÇÕES: ABS, BV, DNV, LR, FBTS	T530-590 MPa A 27-32% Ch V (-29° C) 90-120 J		20 - 30 V	2	300	50 - 90
	Si 0,50				CA $\geq$ 70 V	2,5	350	65 - 105
	Mn 1,30				CC+	3,25	350	110 - 150
						4	450	140 - 195
						5	450	185 - 270
						6	450	225 - 355

Figura 2.2.5 – Especificações técnicas para eletrodos revestidos (Fonte: Material Didático Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

Há grandes diferenças entre os processos de soldagem por eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG, apresentando vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração no momento da escolha do processo que será utilizado para a realização do serviço proposto.

Entre as vantagens do processo de soldagem por eletrodo revestido, podemos citar:

- O equipamento é relativamente simples, barato e portátil;
- É o processo a arco que possui a maior flexibilidade de aplicação;
- O metal de adição e os meios de proteção durante a soldagem, são fornecidos pelo próprio revestimento;
- A soldagem pode ser realizada em todas as posições, o que é muito importante quando a solda não puder ser executada na posição plana;
- É menos sensível à corrente de ar em comparação com processos que utilizam proteção gasosa;
- Ocupa pouco espaço físico;
- Pode ser utilizado em áreas de acesso limitado;
- Adequado para materiais de espessura acima de 2 mm;
- A variedade de eletrodos encontrados no mercado é imensa e são facilmente encontrados;
- É apropriado para a maioria dos metais e ligas metálicas comumente encontradas no mercado, como 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 solda de metais dissimilares;
- É um dos processos de soldagem mais utilizados, particularmente na produção de cordões curtos, em trabalhos de manutenção e em reparos em campo;
- É o processo a arco elétrico mais utilizado na soldagem subaquática;

Definitivamente é um processo que apresenta uma grande variedade de vantagens, porém também possui algumas limitações:

- A alimentação do eletrodo não é contínua;
- Apresenta baixas taxas de deposição quando comparado ao processo MIG/MAG e um fator de operação baixo;
- Ligas de baixo ponto de fusão, tais como chumbo, estanho e zinco e suas ligas não são soldados por esse processo, devido a intensidade do calor do arco ser muito alta para esses materiais;
- Não é adequados para metais reativos como titânio e zircônio, pois a proteção proveniente da queima do revestimento não é suficiente para evitar a contaminação da solda pelo oxigênio;
- A corrente a ser utilizada no processo é limitada. Uma amperagem excessiva superaquece o eletrodo, danificando o revestimento, provocando mudanças nas características do arco e da própria proteção;
- Produz escória, exigindo uma limpeza profunda após a soldagem;
- Essencialmente manual e de baixa produtividade;

- Mau uso dos eletrodos, com perdas de até 35%;
- Necessidade de ressecagem;

A polaridade é um item que deve ser levado em consideração na realização da solda, pois é uma variável importante que pode afetar a forma, as dimensões das poças de fusão, a estabilidade do arco e o modo de transferência do metal de adição.

O termo polaridade é utilizado para descrever a conexão elétrica do porta-eletrodo com relação aos terminais da fonte que fornece corrente contínua.

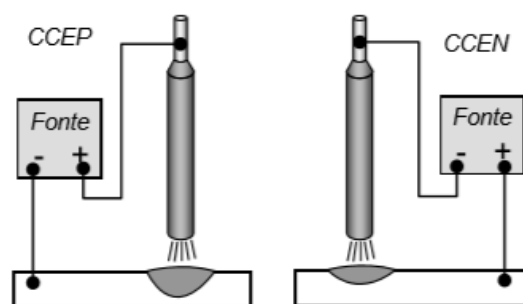


Figura 2.2.6 – Polaridade elétrica (Fonte: Material Didático Prof. Vladimir Ponomarev)

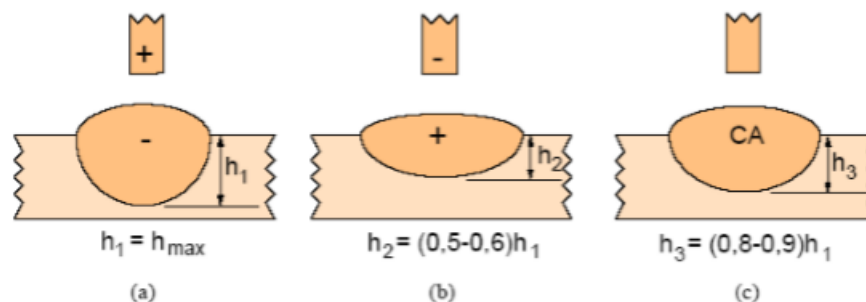


Figura 2.2.7 - Influência da polaridade e do tipo de corrente na penetração: (a) Polaridade inversa (CC+), (b) polaridade direta (CC-) e (c) corrente alternada (CA) (Fonte: Material Didático Prof. Vladimir Ponomarev).

Em geral, a soldagem manual com polaridade eletrodo positivo (CCEP) produz arcos mais estáveis e cordões mais regulares, assim como uma maior penetração enquanto que, com polaridade eletrodo negativo (CCEN), a penetração é menor, mas a taxa de fusão é maior.

Com corrente alternada, a penetração e a taxa de fusão tendem a ser intermediárias, mas a estabilidade do processo pode ser inferior. Por outro lado, a soldagem com CA apresenta menos problemas de sopro magnético, sendo melhor para a soldagem com eletrodos e correntes maiores.

A grande maioria dos eletrodos revestidos utiliza polaridade positiva, CCEP, embora alguns eletrodos (ferro fundido, etc) são recomendados para CCEN (menos penetração). Outros podem ser usados tanto em CCEP, como em CCEN. A relação entre taxa de deposição e penetração para a polaridade é função do tipo de revestimento.

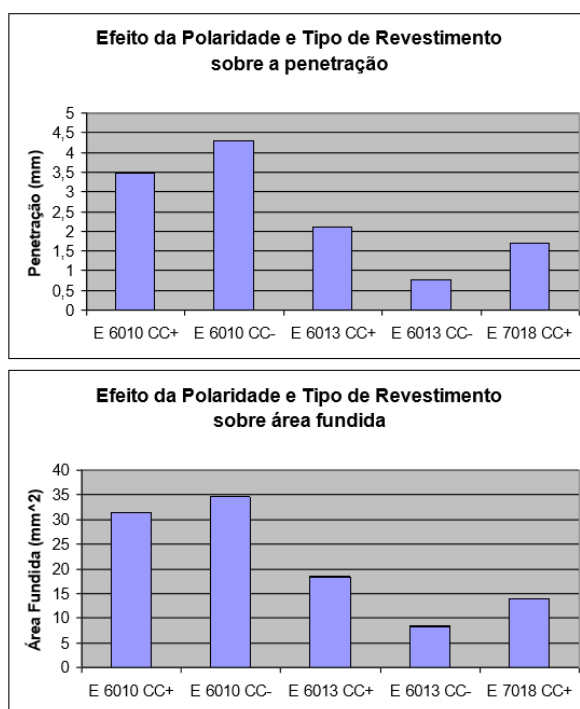


Figura 2.2.8 – Efeito da polaridade e tipo de revestimento sobre a penetração (Fonte: Material Didático Prof. Vladimir Ponomarov).

2.2.2. GMAW (MIG/MAG)

A soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW ou MIG/MAG) 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. 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. (Modenese, Bracarense, Villani, pag. 233).

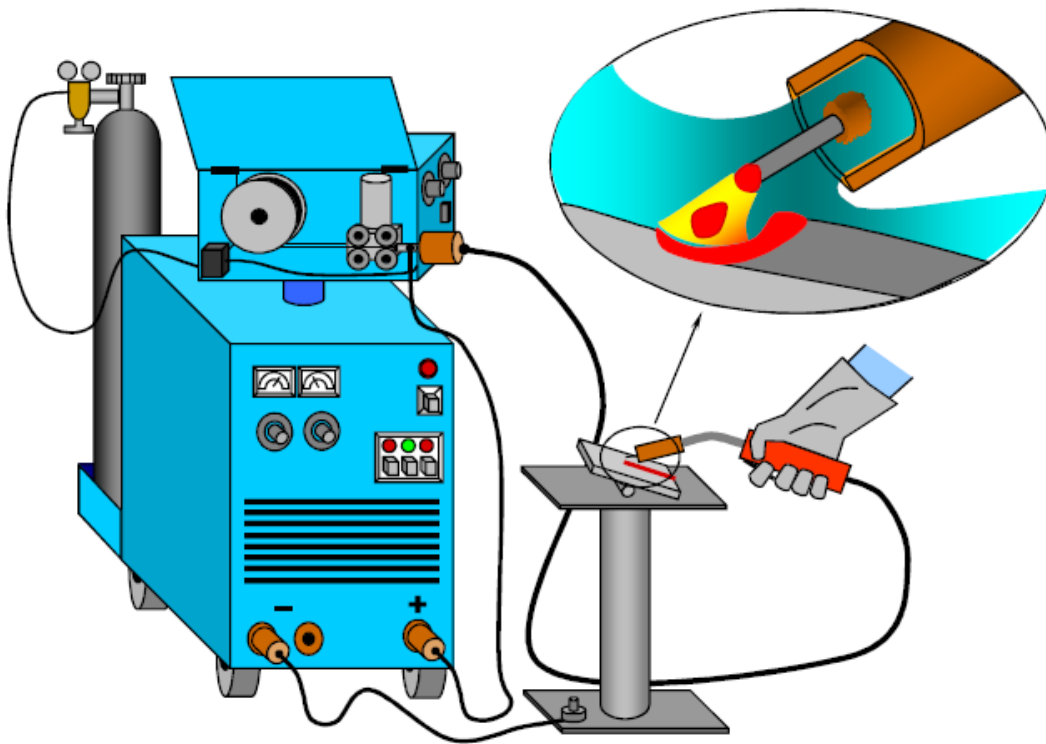


Figura 2.2.9-Esquema do processo de soldagem MIG/MAG. (Fonte: Material Didático Prof. Volodymyr Ponomarov)

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.

Entre as vantagens do processo MIG/MAG, podemos citar:

- 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 pelo ângulo de trabalho;
- Pode ser aplicado uma grande variedade de metais;
- Processo de fácil domínio prático;
- Requer pouca limpeza do cordão do cordão após a solda (baixa produção de escórias);

Também podemos citar algumas limitações de MIG/MAG, por exemplo:

- O equipamento é mais complexo, caro e menos portátil;
- A solda deve ocorrer em ambiente fechado, devido ao uso de gás de proteção;
- Dificuldade de solda em locais de difícil acesso;
- Altos nível de calor e iluminação irradiados;
- Ação metalúrgica limitada;

2.2.3 Soldagem GTAW (TIG)

A soldagem GTAW (ou TIG) obtém a união de materiais metálicos pelo seu aquecimento e fusão localizados. O arco elétrico é estabelecido pela corrente que atravessa o gás ionizado entre a ponta de um eletrodo não consumível e a peça. O calor gerado funde o metal base e forma-se uma poça de fusão. Com a movimentação da tocha o arco progressivamente funde a superfície da junta que pode ser preenchida através da utilização de metal de adição em bobina ou em vareta.

O equipamento básico utilizado na soldagem GTAW consiste de mesa de soldagem, fonte de energia (Corrente Contínua e/ou Corrente Alternada, dependendo do material a ser soldado) do tipo corrente constante, cabos, tocha, eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção com regulador de vazão, ferramentas e equipamentos de segurança. Equipamentos como ignitor de alta frequência para facilitar a abertura do arco e sua manutenção quando em CA, e um sistema 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.

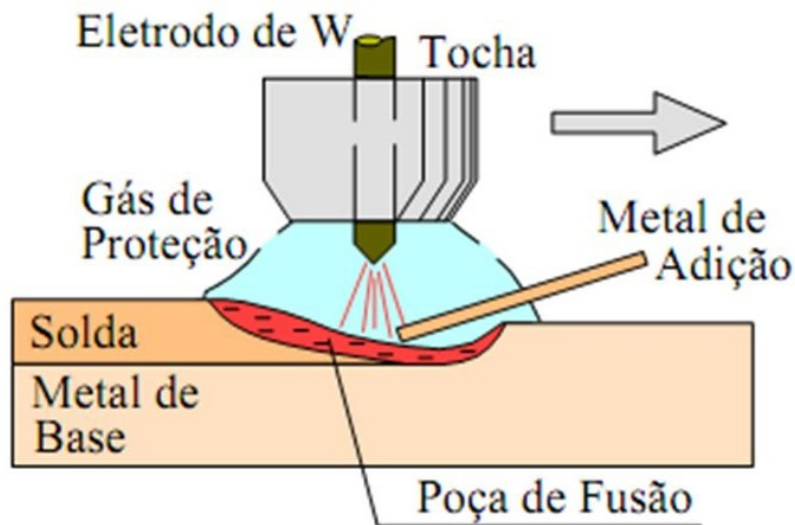


Figura 2.2.10 – Esquema do processo de soldagem TIG (Fonte: Material Didático Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo)

Entre as vantagens do processo TIG, podemos citar:

- 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 da adição de metal;
- Permite o uso de CA e CC (em função do material);
- Solda todos os metais incluindo os dissimilares;
- Solda em todas as posições;
- Permite um controle preciso das variáveis de soldagem.

Também podemos citar algumas limitações de TIG, por exemplo:

- 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);
- 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 (N_2L).

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, as vezes, garantida através de um misturador, como pode ser observado na Figura 2.3.

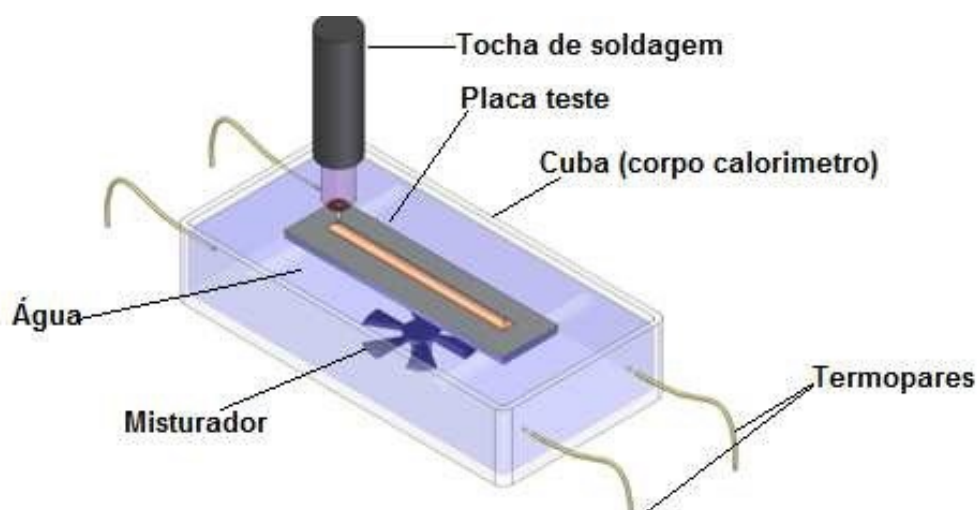


Figura 2.2 - Apresentação esquemática do calorímetro de água apresentado por ESSERS (1981).

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 (N_2L)

Outro tipo de calorímetro utilizado por alguns autores é o do nitrogênio líquido (N_2L) 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 N_2L . 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 2.3 - Esquema do calorímetro de nitrogênio líquido e de medição da massa do N_2L evaporada (AREVALO, 2011).

O calor absorvido pela chapa durante a formação do cordão de solda é transferido para o N_2L , levando-o à ebulição. A energia associada à mudança de fase de líquido a vapor do N_2L pode ser considerada como a energia perdida pela chapa. A análise calorimétrica está baseada na perda de massa do N_2L . Com o conhecimento da massa evaporada, e o calor latente de vaporização do N_2L pode-se determinar a quantidade de calor trocado, e consequentemente 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 Eletrodo Revestido, MIG/MAG e TIG, 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 o calor fornecido para a chapa de aço durante o processo de soldagem é transferido (com algumas perdas) para o fluxo de água do calorímetro e registrado através dos termopares do mesmo.

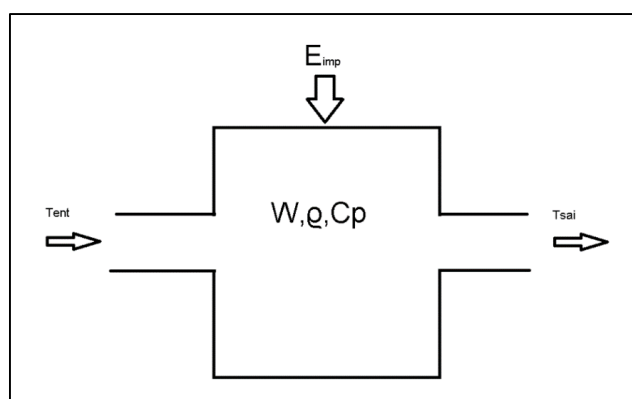


Figura 3.1 - Esquema do fluxo de água do calorímetro levando em conta alguns parâmetros.

3.2. Cálculo do Rendimento Térmico

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

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

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):

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

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:

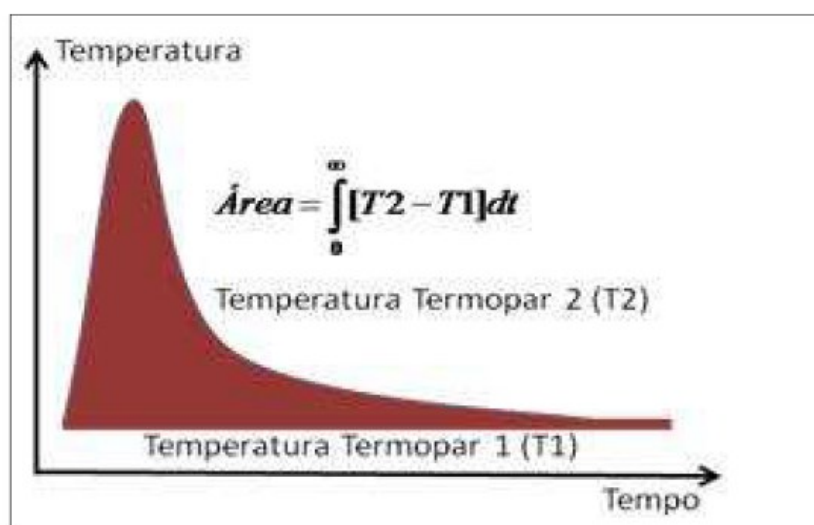


Figura 3.2 - Sinais de temperatura esperados para o termopar de entrada (T1) e o termopar de saída (T2).

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 SMAW

Foi utilizada a fonte de energia *Larry TE 160* da fabricante IMC (Santa Catarina), mostrada na figura abaixo. É uma fonte do tipo inversora que fornece a corrente continua em faixa de 20 a 160 A.



Figura 3.3.1 – Equipamento de soldagem utilizado no método Eletrodo Revestido

Foram usados eletrodos do tipo E6013 (rutílicos) da marca OK 46.00 da empresa ESAB (Fig. 3.3.2) com diâmetro 2 mm. Estes eletrodos são designados para aços de baixo e médio teor de carbono (ou seja, adequados para este trabalho). Este tipo de eletrodos é de uso geral, abrangendo todos os tipos de juntas em todas as posições, produzindo cordões de boa qualidade.



Figura 3.3.2 – Eletrodos rútilicos do mesmo tipo usado na soldagem (Fonte: Catálogo ESAB)

E também foram utilizados eletrodos básicos do tipo E7018 de 3,25 mm de uso em soldagem de alta responsabilidade, depositando metal de alta qualidade. Para todos os tipos de juntas. Indicado para estruturas rígidas, vasos de pressão, aços fundidos, aços não ligados e de composição desconhecida.



Figura 3.3.3 – Eletrodos básicos do mesmo tipo usado na soldagem (Fonte: Catálogo ESAB)

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).

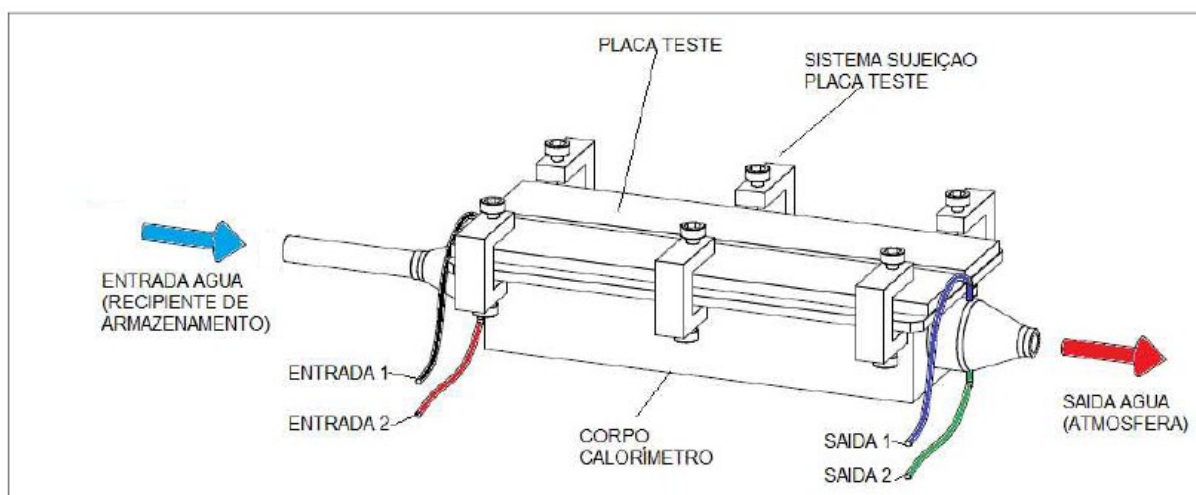


Figura 3.9 – Esquema do calorímetro de fluxo contínuo utilizado (AREVALO, 2011).

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).

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).

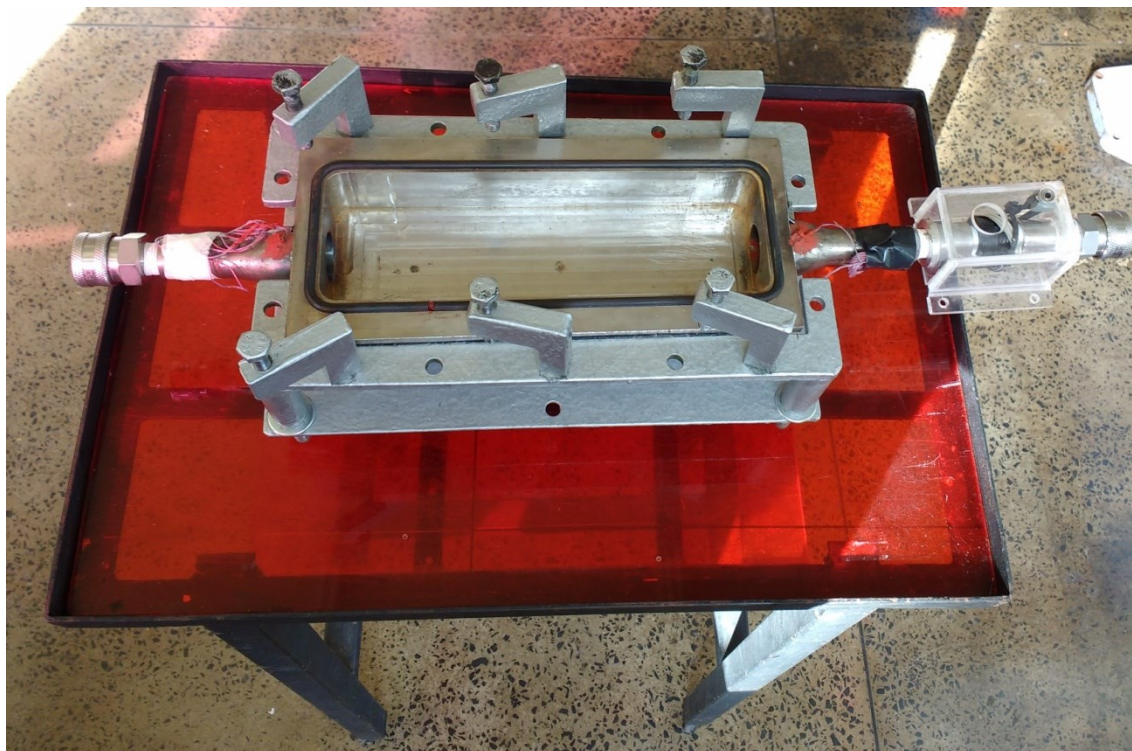


Figura 3.10 – Vista geral do calorímetro utilizado junto com uma bancada.

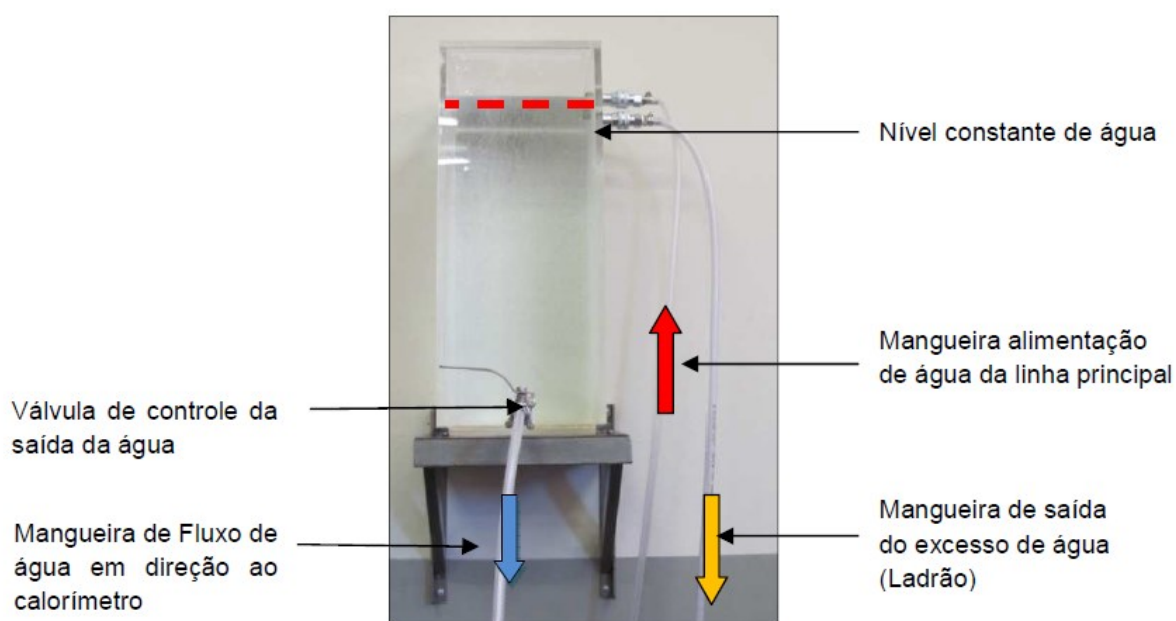


Figura 3.11 - Recipiente de armazenamento de água com capacidade aproximada de 30 litros (AREVALO, 2011).

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).

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 K através de uma placa de aquisição com interface direta com o micro por meio de conexão USB e monitorada pelo LabVIEW (Figura 3.13).

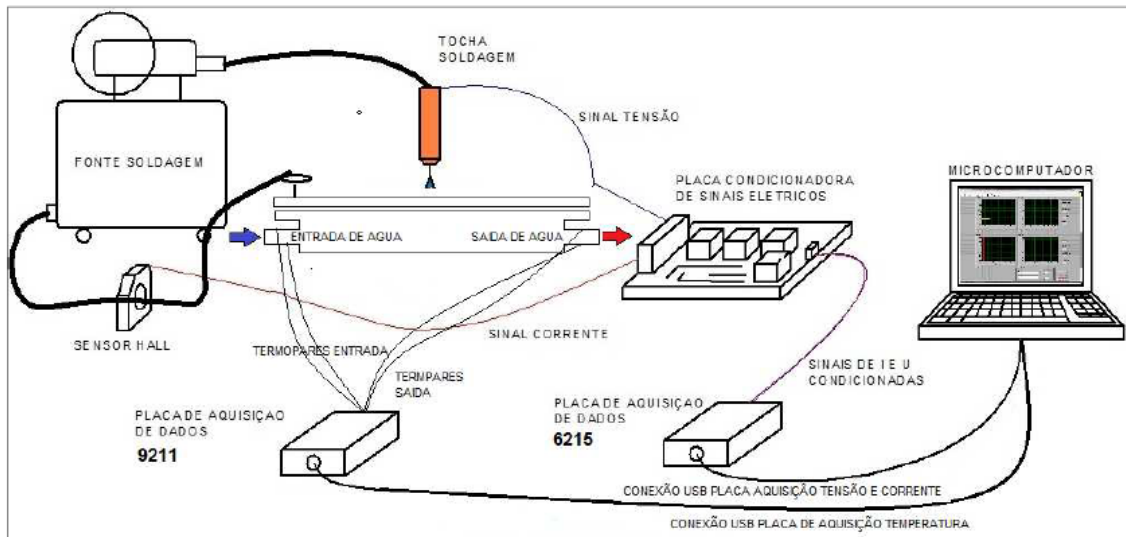


Figura 3.12 - Sistema de aquisição de sinais elétricos para o calorímetro (AREVALO, 2011).

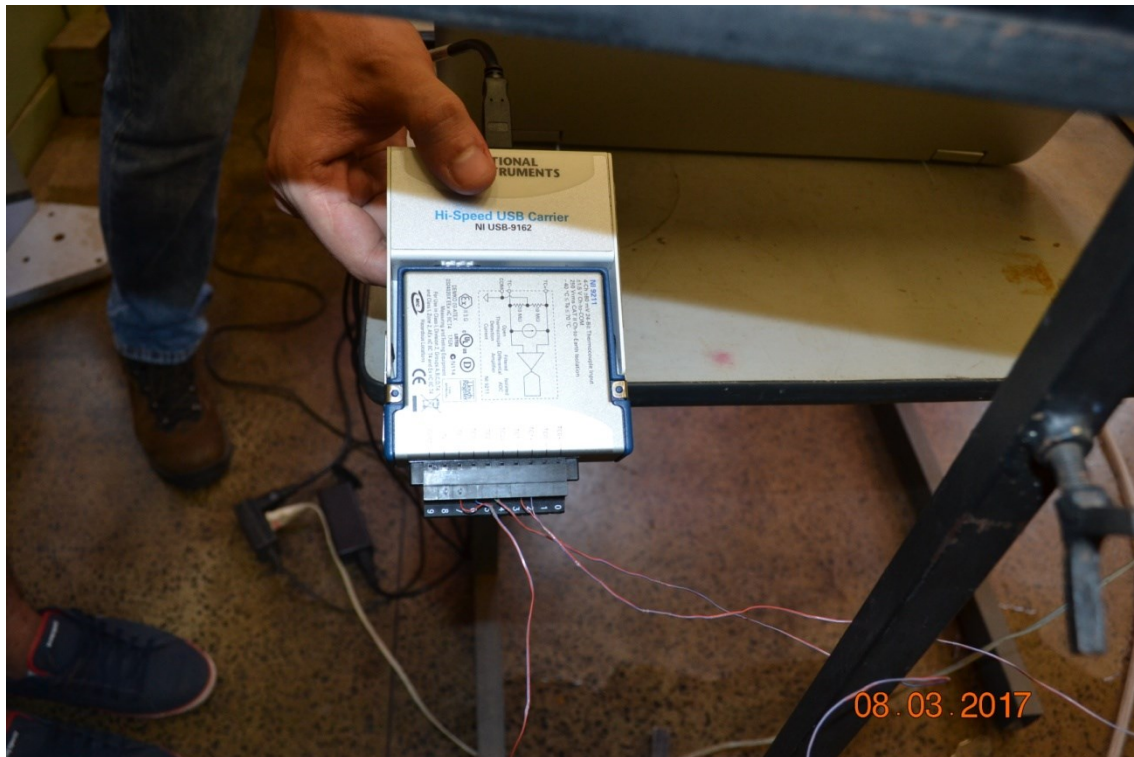


Figura 3.13 - Placa de aquisição dos termopares.

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 do 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

(Figura 4.2), com o objetivo de forçar a água a passar sempre tocando na chapa de teste conforme a figura abaixo.

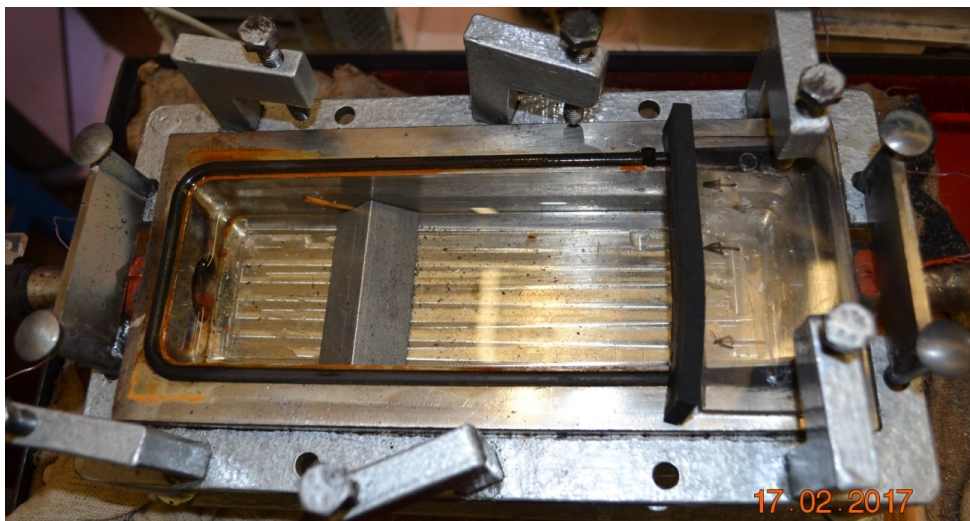


Figura 4.2 - Posicionamento da cantoneira dentro do calorímetro.

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).



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 (Figura 4.4).

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.

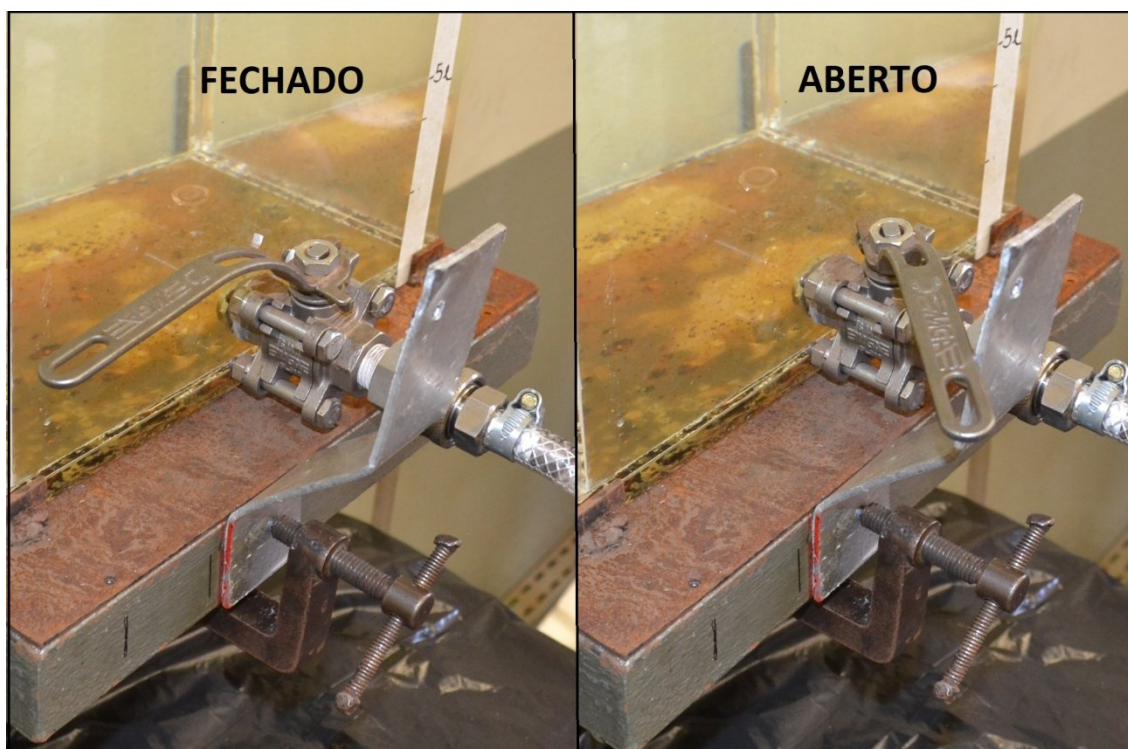


Figura 4.4 - Válvula completamente fechada (à esquerda) e parcialmente aberta (à direita) de acordo com a vazão escolhida.

4.4. Variação de Voltagem no eletrodo revestido

Também foi realizado um teste para a verificação da voltagem tanto no contato do eletrodo com a peça, quanto no contato com o porta eletrodo. O procedimento e os equipamentos utilizados para que esse teste fosse feito está mostrado na figura abaixo.



Figura 4.5 – Multímetro mensurando voltagem.

Dessa forma conseguimos perceber uma diferença de voltagem entre o contato com a peça e o porta eletrodo, mostrando que há uma perda ao longo da alma do eletrodo de cerca 1 V, o que indica que o experimento com a tensão de arco de 20 V pode ter acumulado um erro de até 5% apenas devido a essa condição, o que deve ser levado em conta no resultado final.

5. RESULTADOS

Foram realizados 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 de soldagem por eletrodos revestidos 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 todos os processos foram feitos de duas maneiras diferentes. Sendo duas soldas realizadas dentro de um chanfro localizado no centro da peça e duas outras realizadas sobre soldas já realizadas, com a finalidade de verificar se haveria alguma mudança nos resultados (Figura 5.1).



Figura 5.1 - Solda com eletrodo revestido.

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	4
LOCAL	Chanfro	Chanfro	Sobre a solda	Sobre a solda
TENSÃO (V)	20	20	20	20
CORRENTE (A)	131	132	132	132
MASSA INICIAL (gr)	998,05	996,89	1004,65	996,74
MASSA APÓS SOLDA (gr)	1002,57	1002,44	1008,72	1001,95
TOTAL MASSA DEPOSITADA (gr)	4,52	5,55	4,07	5,21

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

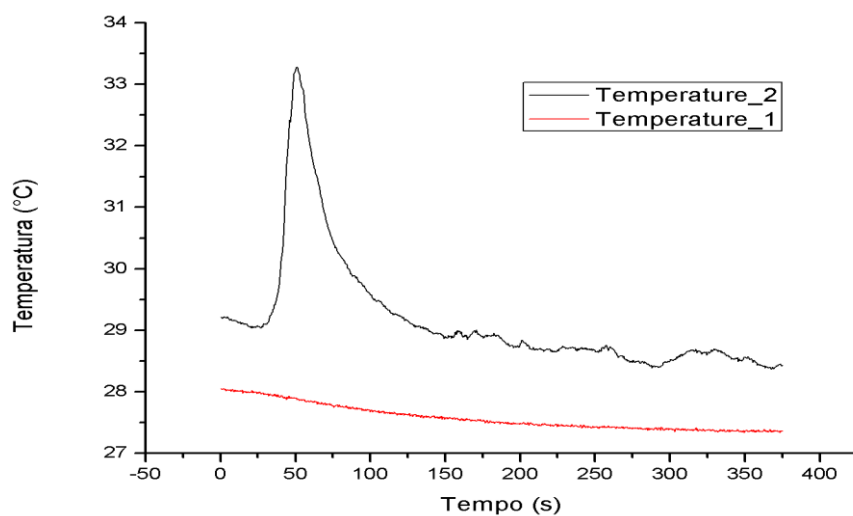


Figura 5.2 - Temperaturas Teste 1.

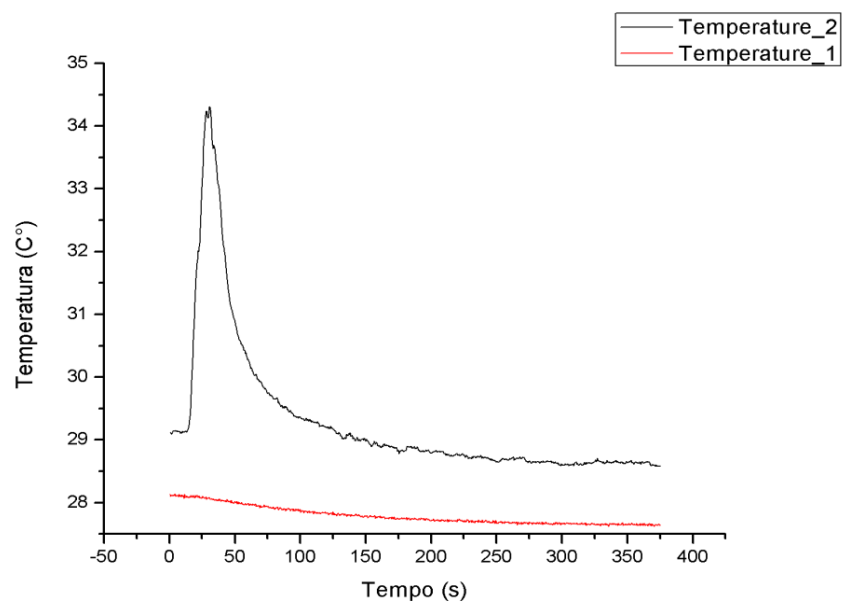


Figura 5.3 - Temperaturas Teste 2.

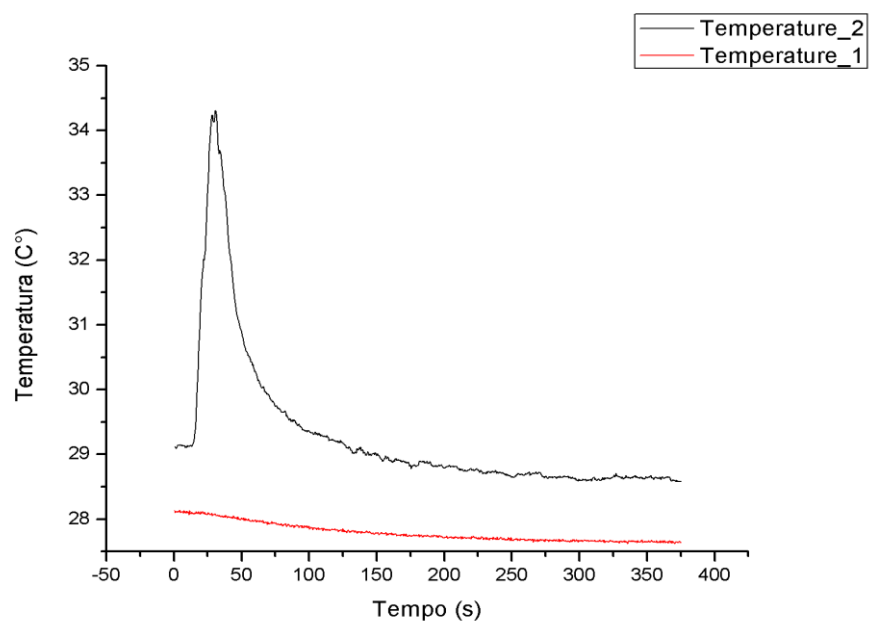


Figura 5.4 - Temperaturas Teste 3.

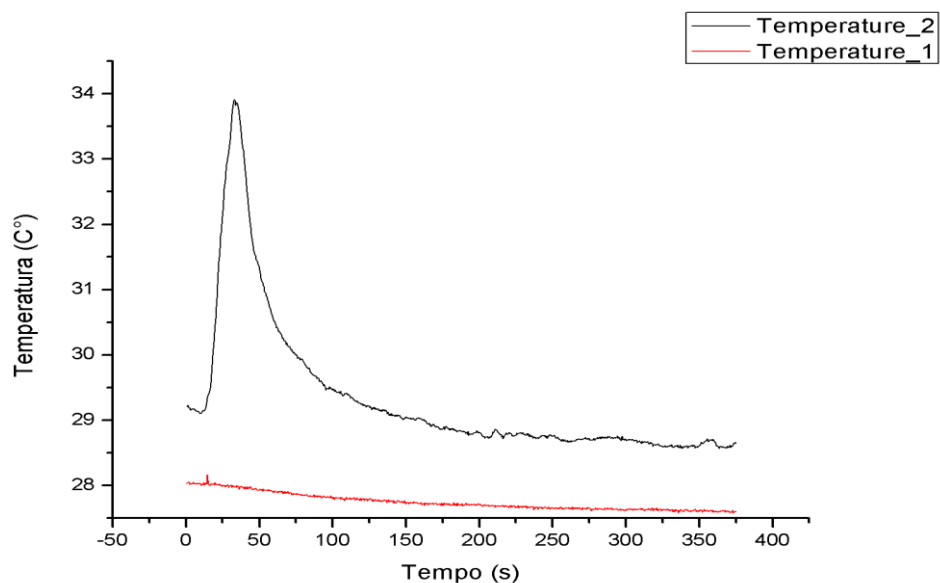


Figura 5.5 - Temperaturas Teste 4.

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 MIG/MAG e TIG obtidos nas outras Teses de Conclusão de Curso feitos na mesma época pelos alunos Guilherme do Valle Galvão e Gustavo Alves Resende.

Tabela 5.2 - Rendimentos térmicos calculados

Nº DO TESTE	MIG/MAG			ER				TIG			
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4
LOCAL DA SOLDA	Chanfro	Chanfro	Solda*	Chanfro	Chanfro	Solda	Solda	Chanfro	Chanfro	Solda	Solda
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 ER estão muito próximos aos do MIG/MAG, 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.

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. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado comparou a eficiência térmica entre três processos de soldagem diferentes, sendo eles o Eletrodo Revestido, MIG/MAG 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 repetitividade alcançada dos resultados foi aceitável, e juntamente com o fato dos resultados estarem dentro do esperado, pode-se considerar os testes como confiáveis.

O rendimento térmico do processo de soldagem por eletrodos revestidos se mostrou muito semelhante ao da solda MIG/MAG, porém ainda é mais alto que o do processo TIG. O fato de os rendimentos de dentro do chanfro e sobre a solda terem sido próximos, pode ser explicado pelo fato de que o diâmetro do eletrodo é muito grande para a largura do chanfro. Dessa forma, as gotas de metal não são depositadas apenas no fundo, mas também nas laterais e até fora do mesmo. Assim, não há uma diferença considerável entre as duas posições.

Portanto, o processo de soldagem por eletrodos revestidos se mostra mais vantajoso que os outros quando o serviço oferece uma maior dificuldade de acessibilidade, ambientes abertos que podem ventar, soldas realizadas em campo como manutenção, devido à portabilidade do equipamento, e, por fim, a capacidade de realizar soldas em qualquer posição.

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.