

Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros por Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo para Medição de Aporte Térmico

(Development and Assessment of Calorimeters Using Liquid Nitrogen and Continuous Flow (Water) for Heat Input Measurement)

Hernán Dario Hernández Arevalo¹, Louriel Oliveira Vilarinho¹

¹Laprosolda – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Brasil, vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo

Um dos parâmetros mais influentes no processo de soldagem a nível industrial e de pesquisa é o calor entregue à chapa (aporte térmico) devido a sua direta ligação com a mudança das características metalúrgicas e propriedades mecânicas da junta soldada. Para o estudo e quantificação do calor aportado na peça de trabalho, tem-se utilizado tanto métodos teóricos (analíticos e numéricos), quanto experimentais (calorimetria). Estas técnicas apresentam ampla dispersão dos resultados obtidos para o rendimento térmico. Desta forma, a proposta deste trabalho é apresentar o projeto, construção e avaliação de um calorímetro de nitrogênio líquido e fluxo contínuo (água) para a medição do aporte térmico e rendimento térmico de processos GTAW e GMAW. Para o processo GTAW, cordões sobre chapa foram realizados com Ar puro e chapas de aço ao carbono ASTM A36 e variou-se os parâmetros de soldagem como corrente, comprimento do arco, velocidade de soldagem e comprimento do cordão de solda. Foram também realizadas soldagens sobre chapa com o processo GMAW em transferência por curto-circuito e goticular (spray), onde o arame utilizado foi AWS ER70S-6 (1,2 mm de diâmetro) e gás de proteção Ar+25%CO₂ (curto-circuito) e Ar+5%O₂ (goticular). Para os processos derivativos (STT – Surface Tension Transfer, RMD – Regulated Metal Deposition, CMT – Cold Metal Transfer, GMAW-P – Pulsado e GMAW-PV – Polaridade Variável) foram tomados como base parâmetro de soldagem encontrados por outros autores no Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem). De modo geral, o calorímetro de nitrogênio líquido apresentou boa repetibilidade com diferença máxima de 3%. Também foi observado que durante os testes realizados no calorímetro de nitrogênio líquido apresentaram resultados coerentes para as diferentes condições de soldagem e reportando valores de rendimento térmico global de 70,3% para o processo GTAW, 78,6% para GMAW curto-circuito convencional, 73,6% para GMAW goticular e 76,1% para os processos GMAW curto circuito-controlado. Os resultados obtidos com o calorímetro de fluxo contínuo (água) acompanharam a tendência do calorímetro de nitrogênio líquido, mas com resultados médios 12% abaixo.

Palavras-chave: Aporte térmico, Rendimento térmico, Calorimetria, Nitrogênio Líquido, Fluxo contínuo, Processos Derivativos.

Abstract: One of the most influent parameter on the welding process at both industrial and research levels is the heat delivered to the workpiece (heat input) due to its direct connection with changes in metallurgical characteristics and mechanical properties of the weld joint. In order to quantify the heat input, different methods have been developed, both theoretical (analytical and numerical ones) and experimental (calorimetry). These techniques present large dispersion of results for thermal efficiency of welding processes. Therefore, this work aims to present the project, construction and assessment of a liquid nitrogen calorimeter and other one based on constant flow (water) measurement. Both calorimeters were evaluated for measuring heat input and thermal efficiency of GTAW and GMAW processes. For GTAW process, bead on plate welding was carried out with Ar as shielding gas over ASTM A36 plate, varying current, arc length, travel speed and bead length. For GMAW processes, both short-circuit and spray transfers were used with AWS ER70S-6 wire with 1.2 mm of diameter and Ar+25%CO₂ (short-circuit) and Ar+5%O₂ (spray) as shielding gases. For derivative processes (STT – Surface Tension Transfer, RMD – Regulated Metal Deposition, CMT – Cold Metal Transfer, GMAW-P – Pulsed and GMAW-VP – Variable Polarity), the welding parameters were adopted from previous researches from Laprosolda (Center for Research and Development of Welding Processes). It can be concluded that the liquid nitrogen calorimeter presents good repeatability and stability (maximum data scattering of 3%). Also, the obtained results are coherent for different welding conditions applied through the work with global thermal efficiencies of 70,3% for GTAW, 78,6% for conventional short-circuit GMAW, 73,6% for GMAW with spray transfer and 76,1% for GMAW derivative processes. The results measured by the continuous flow (water) calorimeter followed the trend of the liquid nitrogen one, but with average results 12% lower.

Key-words: Thermal efficiency, Calorimetry, Liquid Nitrogen, Continuous Flow, Derivative Processes.

(Convocado em 15/05/2012; Texto final em 26/08/2012).

1. Introdução

O estudo de aporte térmico em processos de soldagem tem implicado no desenvolvimento de diversos métodos para sua quantificação, tanto métodos analíticos, quanto experimentais, que foram evoluindo de acordo com o avanço tecnológico da época. Rosenthal [1] propõe um dos primeiros modelos analíticos para o estudo do fluxo de calor em duas e três dimensões realizando uma série de simplificações permitindo a solução do equacionamento. Partindo deste modelo, diferentes autores analisaram o fluxo de calor e rendimento térmico baseados nas medições dos ciclos térmicos, mas ainda com restrições nas propriedades do material e perdas de calor por convecção, radiação e condução [2]. Mais recentemente [3], os avanços tecnológicos, especificamente em computadores, foram essenciais para o desenvolvimento de modelos mais adequados do fenômeno de transferência de calor. Por isto a estimação do rendimento térmico através deste método não abrange todos os fatores associados a um sistema complexo de fluxo de calor em soldagem, sendo limitado por fatores associados ao próprio modelo e propriedades do material que podem afetar a solução do mesmo. Neste contexto, a solução experimental via calorimetria têm bons resultados, pois envolvem todas as variáveis que estão associadas a um sistema complexo de soldagem.

Os calorímetros utilizados no estudo térmico de processos de soldagem compreendem uma ampla gama de tipos que foram desenvolvidos de acordo com o avanço tecnológico e disponibilidade de materiais para sua construção e uso. Entre estes estão, o calorímetro de água [4] que é baseado no monitoramento da temperatura da água, o calorímetro que funciona baixo o princípio Seebeck [5], o calorímetro de caixa isolada baseado na medição da temperatura de corpos com propriedades térmicas conhecidas e definidas [6] e o calorímetro de nitrogênio líquido (N_2L) que quantifica o aporte térmico através da massa evaporada de N_2L obtendo-se bons resultados [7,8].

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é apresentar o projeto e fabricação do calorímetro de N_2L , tendo como ponto de referência os trabalhos já realizados por outros autores, procurando atribuir uma melhora significativa no modo operativo do processo de medição, uma vez que está diretamente influenciado por parâmetros como o ambiente, pontos de contato da placa de teste, tempo de soldagem, tempo de transferência e intervenção humana. Tal dependência faz com que os testes tenham uma variação significativa de resultados devido à soma de cada um destes parâmetros levando à grande dispersão de resultados encontrada na literatura.

2. Considerações do projeto

O calorímetro de N_2L é utilizado para quantificar a energia absorvida pela chapa num processo de soldagem. O calor absorvido pela chapa durante a formação do cordão de solda é transferido para o N_2L levando-o a ponto de ebulição. A energia associada à mudança de fase de líquido a vapor do N_2L pode ser avaliada 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 conseqüentemente a quantidade de calor que está entrando na chapa devido ao processo de soldagem, expressada pela Eq. (1).

$$Q_{\text{Latente}} = m * L \quad (1)$$

Onde, Q_{Latente} : Quantidade de energia necessária para obter a mudança do N_2 líquido [J]; m: Massa evaporada ou perdida do N_2 líquido [g]; L: Calor latente de vaporização do N_2L [kJ/kg].

O N_2L é um gás liquefeito o seja está a temperaturas criogênicas (menores que -150°C). Esta característica faz que seu ponto de ebulição seja muito baixo ao redor de -196°C . O cálculo de calor absorvido, representado pela Eq. (2) está dividido em duas partes, um é o calor que contem a chapa depois do processo de soldagem e o outro é o calor que contem a chapa a temperatura ambiente.

$$Q_{\text{Absorvido}} = \Delta Q_{\text{PS} \rightarrow \text{TN}_2} - \Delta Q_{\text{TA} \rightarrow \text{TN}_2} \quad (2)$$

Onde, $Q_{\text{Absorvido}}$: Calor líquido absorvido pelo processo de soldagem [J]; $\Delta Q_{\text{PS} \rightarrow \text{TN}_2}$: Calor absorvido pelo N_2L , com chapa na temperatura do processo de soldagem [J]; $\Delta Q_{\text{TA} \rightarrow \text{TN}_2}$: Calor absorvido pelo N_2L , com chapa na temperatura ambiente [J].

O cálculo das parcelas de calor devido ao calor que contem a placa teste a temperatura ambiente e o calor imposto pelo processo de soldagem, Eq. (3) e (4), é obtido pela diferença de massa perdida de N_2L :

$$\Delta Q_{\text{PS} \rightarrow \text{TN}_2} = (m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}} - m_{\text{chapa}}) * L \quad (3)$$

$$\Delta Q_{\text{TA} \rightarrow \text{TN}_2} = (m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}} - m_{\text{chapa}}) * L \quad (4)$$

Onde, m_{inicial} : massa inicial registrada desde o ponto de estabilização do N_2L [g]; m_{chapa} : massa da chapa teste [g]; L: Calor latente de vaporização do N_2L [kJ/kg].

Para se medir o calor de entrada num processo de soldagem, associado à massa perdida de N_2L , tem-se utilizado diferentes configurações deste tipo de calorímetro [8-11], que fazem uso de uma configuração básica formada por um recipiente Dewar (que é um vaso projetado para proporcionar isolamento térmico, diminuindo as perdas de calor por condução, convecção e radiação), uma balança com saída de sinal, sistema de aquisição de dados para registrar os dados de perda de peso da balança, estrutura de proteção do sistema e um recipiente de armazenamento de N_2L de alta capacidade, além destes equipamentos se conta com os elementos de segurança necessários para a manipulação do N_2L . O esquema da configuração geral está representado na Fig. (1).



Figura 1. Esquema geral do sistema de medição de massa perdida de N_2L

O processo da formação do cordão de solda é feito automaticamente com uma mesa automática ou um robô para a movimentação da tocha de soldagem, assegurando um movimento lineal, uma constante distância bico de contato-peça e velocidade de soldagem. A chapa é fixada por um sistema que permite uma menor área de contato para diminuir as perdas de calor por condução, e ao mesmo tempo permita a rápida e fácil liberação da chapa para ser transferida ao recipiente Dewar.

Imediatamente depois da formação do cordão de solda, a chapa é liberada da fixação e transferida para o calorímetro de N_2L , onde vai ser medida a massa perdida devido ao calor imposto no processo de soldagem deixando que a N_2L alcance a taxa de vaporização normal devido à temperatura ambiente. A seguir deve-se fazer uma nova medição do calor que contém a chapa a temperatura até que alcance de novo a taxa de vaporização normal. Com os dados adquiridos de massa perdida pode-se prosseguir a fazer os respectivos cálculos de eficiência térmica

e calor imposto como foi explicado previamente com as Eq. (1) a (4).

Como considerações específicas vale ressaltar que o calor imposto em processos de soldagem é um fator muito sensível a mudanças de parâmetros operativos do processo de soldagem e parâmetros operativos diretamente envolvidos ao processo de medição, estas possíveis fontes de erro são:

- Material para fixar a placa teste durante o processo de soldagem;
- Tempo de formação do cordão (comprimento do cordão de solda);
- Movimento de transferência da placa teste ao calorímetro de N_2L ;
- Intervalo de tempo entre o final da solda até o começo da medição de perda de peso pelo calorímetro;
- Entorno (umidade relativa, condições ambientais e presença de ventos durante o processo).

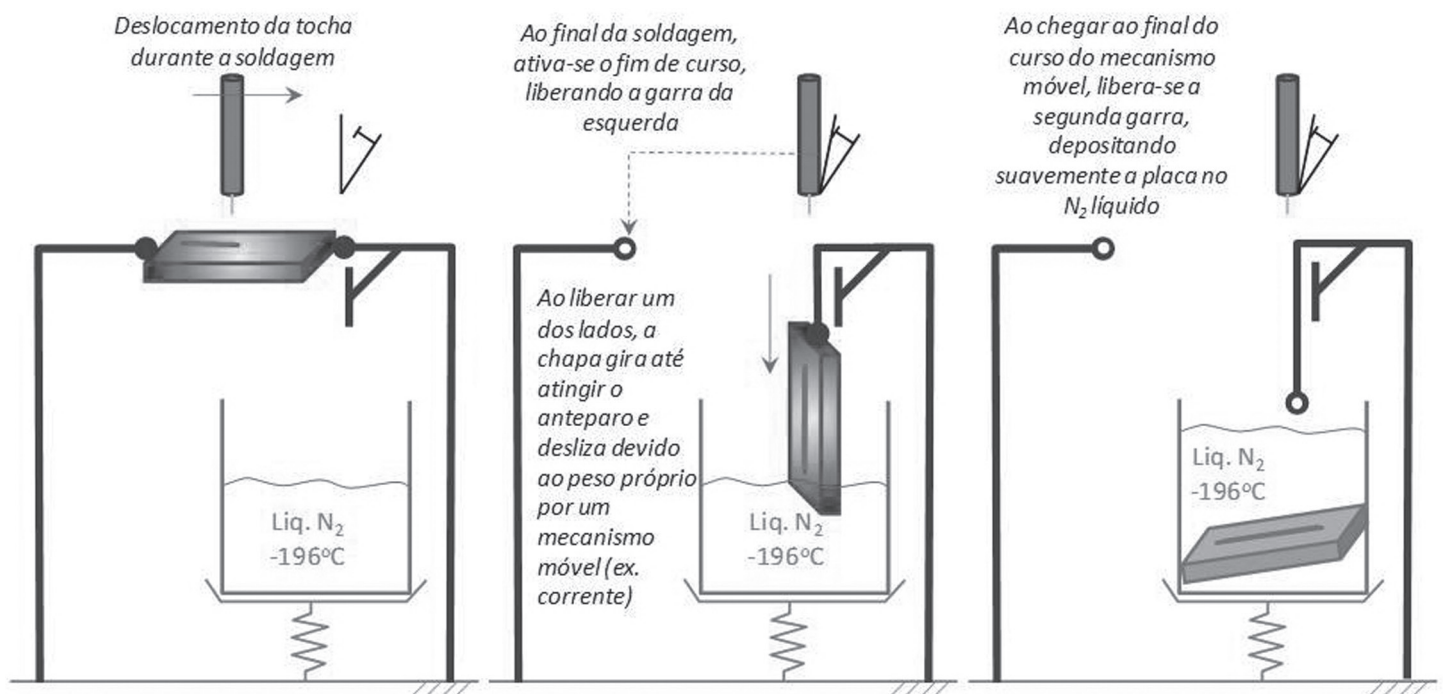


Figura 2. Esquema mecânico da bancada experimental para o calorímetro de N_2 líquido

3. Projeto do calorímetro

A maioria dos erros experimentais listados previamente tem a intervenção do operador sendo este um dos principais fatores que influí diretamente na medição do calor imposto. Assim, a proposta do trabalho é padronizar todos os movimentos e tempos que influem na operação e aquisição de dados do calorímetro de N_2L , por meio de uma bancada experimental automatizada, conforme mostrado na Fig. (2).

O desenho e projeto da bancada experimental foram desenvolvidos com sistema CAD, permitindo analisar e simular os movimentos que estão envolvidos na manipulação da chapa desde o começo da solda até sua total imersão no N_2L . A bancada experimental (Fig. 3) é composta por uma estrutura geral, sistema de manipulação da placa teste (garra fixa e garra móvel), sistema de manipulação da tocha de soldagem, sistema de medição de massa perdida de N_2L , sistema pneumático para automação da bancada e sistema de aquisição de dados.

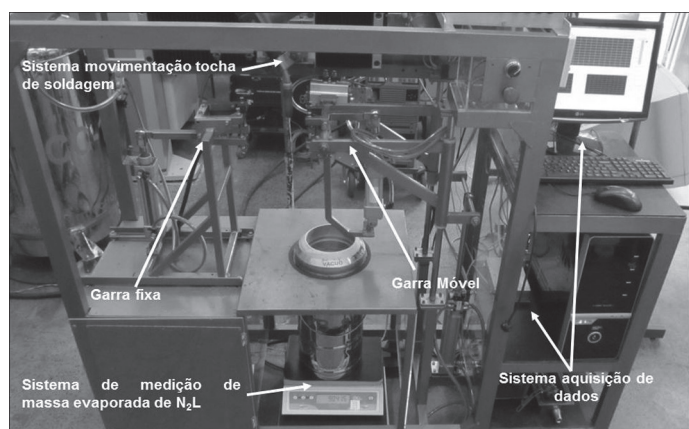


Figura 3. Montagem da bancada experimental de medição de aporte térmico com o calorímetro de N_2L

4. Avaliação do calorímetro

4.1. Avaliação do funcionamento do funcionamento do calorímetro com placas teste em condições ambientais

Para verificar a repetibilidade do sistema se realizaram testes onde foram submersas placas testes no N_2L com diferentes espessuras, como é apresentado na Tab. 1. Realizando duas réplicas para cada espessura com o objetivo de ter resultados mais confiáveis de amostragem.

Tabela 1. Dimensões e massa das placas utilizadas para o teste repetibilidade

Placa teste	Material	Espessura [mm]	Dimensões [mm]	Massa placa [g]
1	Aço A36	3,2	250 x 100	592,8
2	Aço A36	6,35	250 x 100	1263,1
3	Aço A36	9,5	250 x 100	1843,1

Como pode ser observado nas Tab. 2 a massa de N_2L evaporado devido a trocar de calor entre a placa teste e o N_2L (calculada através da diferença de massa apresentada na Eq. (4)) apresenta bons resultados com uma diferença não maior a 1,5 % para as placas de 3,2 mm, 0,5% para as placas de 6,35 mm e 0,64% para as placas de 9,5 mm. Também observar-se que o tempo de estabilização (diferença de tempo desde que entra a placa teste até alcançar o ponto de equilíbrio - t_{est}) foi constante para o mesmo tipo de chapa e aumento de acordo com a espessura da placa teste. A Figura 4 apresenta os sinais do processo de evaporação para as placas com diferentes espessuras utilizadas, onde se pode observar boa repetibilidade do calorímetro de N_2L proposto.

Tabela 2. Resultados da massa evaporada de N_2L com placas em condições ambientais

Placa teste	$m_i N_2L$ [g]	$m_f N_2L$ [g]	massa placa [g]	N_2 evap. [g]	t_{est} [s]
Placa 3,2 mm	9190,3	9531,7	579,5	238,1	61,0
Réplica 1	9190,5	9530,2	579,5	239,8	61,0
Réplica 2	9190,4	9525,5	579,5	244,4	61,0
Média				$240,8 \pm 3,3$	
Placa 6,35 mm	9558,2	10318,4	1261,6	501,4	109,0
Réplica 1	9558	10313,2	1261,6	506,4	109,0
Réplica 2	9558,1	10315,1	1261,6	504,6	109,0
Média				$504,1 \pm 2,5$	
Placa 9,5 mm	9659,6	10770,7	1843,1	732,0	157,0
Réplica 1	9659,6	10772,4	1843,1	730,3	157,0
Réplica 2	9659,2	10763,2	1843,1	739,1	157,0
Média				$733,8 \pm 4,7$	

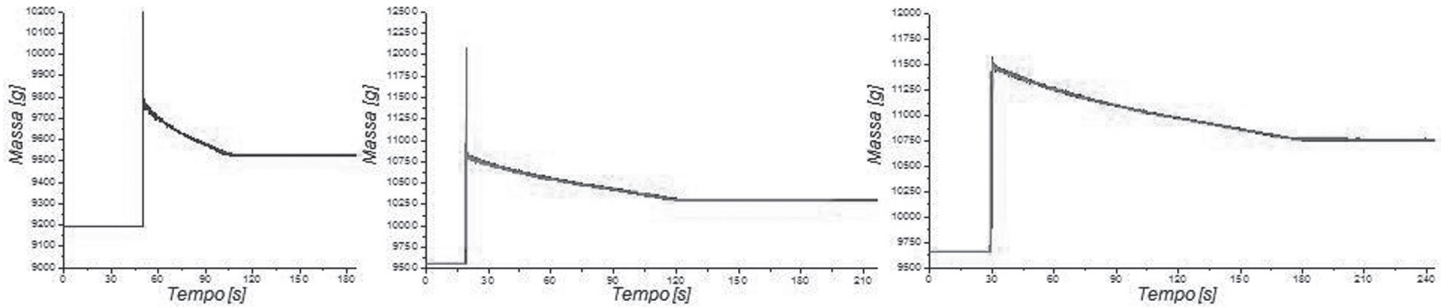


Figura 4. Comportamento da massa evaporada de N_2L para placas de teste de diferentes espessuras (3,2; 6,35 e 9,5 mm da esquerda para direita)

5. Medição do aporte térmico e rendimento térmico

Os processos investigados foram GTAW (TIG), GMAW (MIG/MAG) convencional utilizando transferências metálicas por curto-circuito e goticular (spray) e processos derivativos GMAW. A movimentação da tocha de soldagem foi realizada através de um movimentador linear que garante um movimento constante e sem variação do comprimento do arco. A sujeição da placa teste foi realizada através do sistema de garras apresentado no Item 3, que tem como segunda função deslocar a placa teste até o sistema de medição de massa evaporada de N_2L . O sistema de aquisição dos sinais elétricos de tensão e corrente da fonte de soldagem foi realizada através de uma placa desenvolvida no Lapsolda que adéqua os sinais de corrente e tensão para ser processados pela placa de aquisição NI USB 6215 com taxa de aquisição de dados de 2000 Hz.

O cálculo da energia de soldagem (energia de soldagem por comprimento de cordão) é realizado através de Eq. 5, onde a potência instantânea, Eq. 6, é definida como o produto da tensão e corrente ponto a ponto, representando de forma mais precisa o comportamento da energia levando em consideração qualquer variação na tensão e corrente durante o processo de soldagem [12]. Ressaltando-se que este cálculo é realizado unicamente durante o tempo de arco aberto (processo de formação do cordão).

$$E_{\text{sold}} = P_{\text{inst}}/V_s, \text{ [J/mm]} \quad (5)$$

Onde, P_{inst} é a potência instantânea [W]; V_s é a velocidade de soldagem [mm/s].

$$P_{\text{inst}} = \left(\sum_{i=1}^n (U_i * I_i) \right) / n \quad (6)$$

Onde, U_i é a tensão do processo de soldagem [V]; I_i é a corrente do processo de soldagem [A]; n é número de dados durante o período de arco aberto.

Para o cálculo do aporte térmico foi seguido o procedimento proposto no Item 2, onde se devem levar em consideração as duas etapas de cálculo (placa com energia imposta do processo de soldagem e placas em condições ambientais depois do processo de soldagem). O rendimento térmico do processo é definido como a relação entre o aporte térmico (E_{imp}) e a energia

de soldagem (E_{sold}), como é apresentado na Eq. 7. Assim, deve-se destacar esta equação, pois o pessoal técnico de soldagem ainda utiliza indiscriminadamente esta nomenclatura, sem fazer distinção entre energia de soldagem (mais facilmente medida durante o processo) e aporte térmico (a ser medido via calorimetria).

$$\eta_{\text{term}} = \frac{E_{\text{imp}}}{E_{\text{sold}}} * 100\% \quad (7)$$

5.1. Processo GTAW

Na soldagem GTAW, as soldas foram realizadas na polaridade negativa, eletrodo EW-Th2% com diâmetro de 2,4 mm e ângulo de ponta de 60°, proteção gasosa de argônio 100% e vazão de 15 L/min. As soldas foram realizadas sobre placa ASTM A36 na posição plana com dimensões de 200 x 100 x 3,2 mm. Foi proposta a variação da corrente em dois níveis (100 e 150 A), dois comprimento de arco (3 e 5 mm), três níveis de velocidade de soldagem (15, 20 e 25 cm/min.) e três níveis comprimentos de cordão de solda (8, 12 e 16 cm) com o objetivo de verificar a influência de cada um destes parâmetros sobre o rendimento térmico do processo. Neste caso foi realizado um planejamento fatorial completo com 36 testes no total (Tab. 3).

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a variação dos parâmetros propostos no planejamento experimental. Os resultados foram analisados estatisticamente com análise de variância para cada um dos parâmetros de soldagem propostos. Deve-se ressaltar que cada valor representa uma média de duas medições.

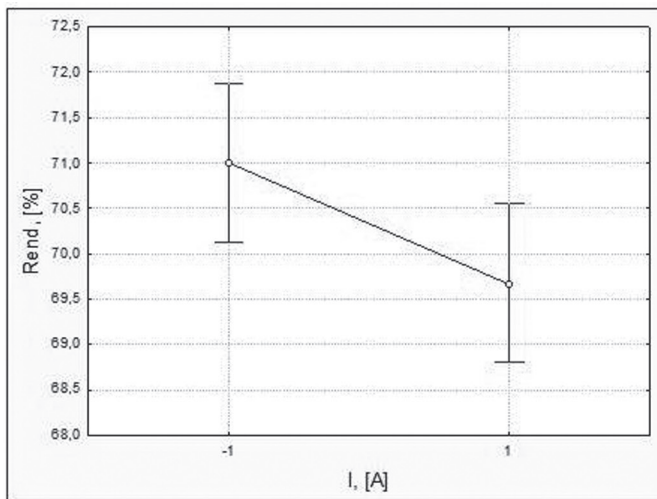
O comportamento do rendimento térmico tem uma tendência significativa a diminuir com o aumento da corrente, apresentando uma queda de 71% a 69,7% para 100 A e 150 A respectivamente como é apresentado na Fig. 5 (a). Este fato é devido, provavelmente, às perdas de calor por convecção e radiação, que têm uma influência maior que o aumento da corrente. Niles [2] em um estudo realizado para TIG variando diferentes parâmetros, como a corrente e os gases de proteção, reporta que o rendimento térmico cai de 60% a 35% para correntes de 125 A e 225 A, respectivamente. A variação de corrente no processo TIG, mantendo-se constantes os outros parâmetros de soldagem (L_a e V_s), apresenta variação na penetração para o cordão de solda como é conhecido [5], mas objetivo deste trabalho não é

Tabela 3. Planejamento experimental para a avaliação do rendimento térmico no processo TIG

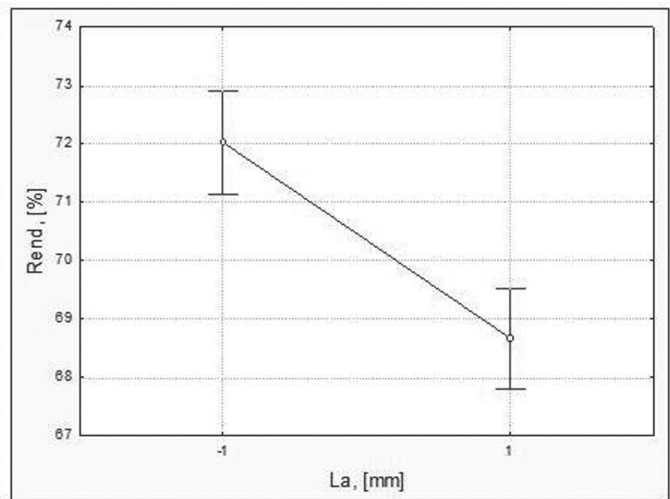
I [A]	100																	
L_a [mm]	3									5								
V_s [cm/min]	15			20			25			15			20			25		
L_c [cm]	8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16

I [A]	150																	
L_a [mm]	3									5								
V_s [cm/min]	15			20			25			15			20			25		
L_c [cm]	8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16

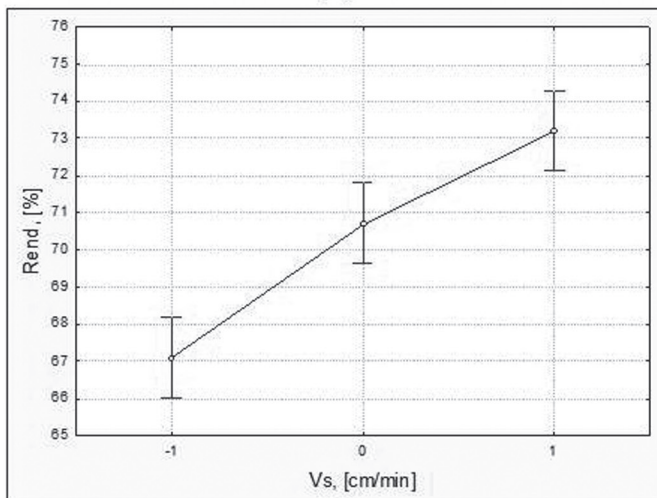
I representa corrente de soldagem, L_a representa comprimento do arco, V_s representa velocidade de soldagem e L_c representa comprimento do cordão de solda.



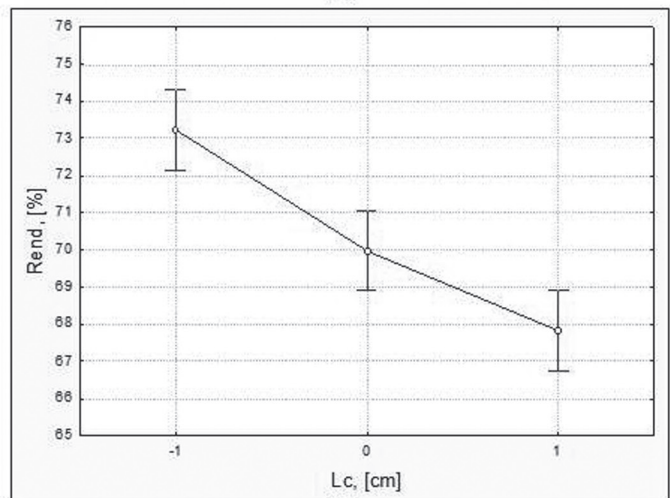
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5. (a) Efeito da corrente (I) sob a rendimento térmico, (b) efeito do comprimento do arco (L_a) sob a rendimento térmico, (c) efeito da velocidade de soldagem (V_s) sob o rendimento térmico e (d) efeito do comprimento do cordão (L_c) sob o rendimento térmico

Tabela 4. Resultados para o planejamento experimental proposto para o processo TIG

I [A]	L_a [mm]	V_s [cm/min]	L_c [cm]	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	η_{term} [%]	
100	3	15	8	10,9	102	1112	445	319	71,8	
			12	10,6	101	1069	428	273	63,7	
			16	10,2	101	1029	412	287	69,6	
		20	8	10,8	102	1094	328	259	78,9	
			12	10,1	102	1028	309	229	74,3	
			16	10,3	102	1050	315	225	71,4	
		25	8	10,7	102	1087	261	205	78,7	
			12	10,4	102	1063	255	194	76,0	
			16	9,9	102	1011	243	167	69,0	
	5	15	8	11,3	101	1144	458	314	68,6	
			12	11,2	101	1130	452	302	66,9	
			16	10,9	101	1103	441	301	68,3	
		20	8	11,3	101	1139	342	246	72,0	
			12	11,1	101	1119	336	228	67,9	
			16	11,1	101	1121	336	222	65,9	
		25	8	12,0	101	1215	292	216	74,2	
			12	11,6	101	1174	282	203	72,0	
			16	11,0	101	1110	266	184	69,1	
	150	3	15	8	11,1	150	1665	666	474	71,2
				12	10,6	150	1594	638	426	66,7
				16	10,5	150	1580	632	411	65,0
			20	8	10,7	150	1595	478	355	74,2
				12	10,1	150	1517	455	334	73,3
				16	10,8	150	1622	487	334	68,6
25			8	10,7	150	1595	383	299	78,1	
			12	10,0	150	1500	360	268	74,4	
			16	10,2	150	1534	368	263	71,5	
5		15	8	12,6	151	1891	756	513	67,9	
			12	11,6	150	1744	698	451	64,6	
			16	11,9	150	1785	714	435	60,9	
		20	8	12,1	150	1825	547	383	69,9	
			12	11,4	150	1715	514	345	67,0	
			16	11,4	150	1708	512	334	65,3	
		25	8	11,7	150	1755	421	309	73,3	
			12	11,6	150	1742	418	305	72,9	
			16	11,7	150	1756	421	292	69,3	

estudar as características geométricas do cordão para diferentes condições de soldagem, mas pode dar outra noção do porquê se apresenta a queda de rendimento térmico com o aumento da corrente. A Figura 6 mostra o esquema do formato de cordão obtido para os dois níveis de corrente (100 A e 150 A), observando-se que o cordão de 150 A tem uma maior penetração e reforço de raiz, comparados com o cordão de 100 A. Com o aumento da área do reforço da raiz, aumenta-se a troca de calor com o meio ambiente por convecção e radiação como pode ser verificado na Fig. 7.

Assim, acredita-se que uma menor espessura de placa teste apresentaria menores rendimentos térmicos, assim como foi citado por Zijp [9] onde o rendimento térmico foi menor para chapas com espessura de 2 mm quando comparadas com chapas de 5 e 10 mm de espessura. Esta comparação do rendimento térmico para diferentes espessuras de corpo de prova foram realizadas com corrente constante de 100A e variação do comprimento do arco.

Apesar de que o incremento do arco (tensão do arco) aumenta o aporte térmico, o rendimento térmico apresenta uma queda significativa, como pode ser observado na Fig. 5 (b). Este efeito pode ser atribuído a maiores perdas de calor na coluna do arco, onde um maior comprimento do arco leva a uma maior área de contato com o ambiente, como é apresentado esquematicamente na Fig. 8.

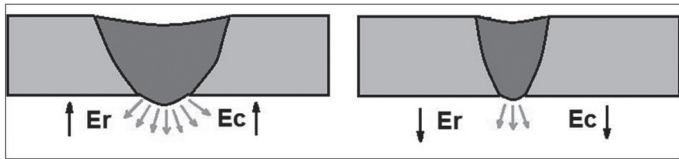


Figura 6. Esquema da forma do cordão para processo TIG CC- com corrente de 150 A e 100 A em placa com 3 mm de espessura

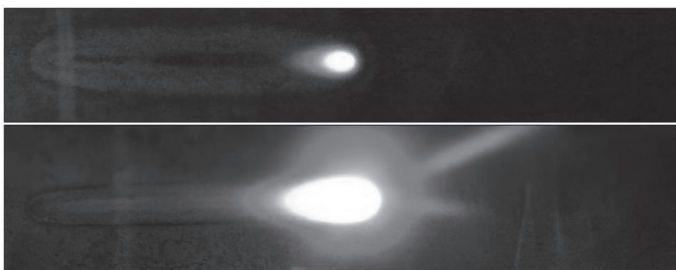


Figura 7. Raiz do cordão durante o processo de soldagem TIG CC- com parâmetros de soldagem: $L_a = 3$ mm, $V_s = 20$ cm/min., proteção gasosa argônio puro e (a) 100 A e (b) 150 A

A eficiência térmica apresenta um aumento significativo com o aumento da velocidade de soldagem, como mostrado na Fig. 5 (c). Sugere-se que isto é em função da alteração de regime de transferência de calor. Uma vez que quanto menor a velocidade de soldagem, maior será penetração e maiores perdas térmicas acontecerão do lado da raiz da solda. Além disto, há de se considerar que em um cordão feito mais rapidamente, há menor

tempo de se trocar calor entre a chapa e o meio ambiente, até o momento em que a placa de teste entra no N_2L . Vale ressaltar ainda que esta consideração de aumentar o rendimento térmico com o aumento da velocidade de soldagem vai até certo ponto, já que velocidades de soldagem demasiada elevadas também podem afetar de forma negativa o calor imposto [10,11].

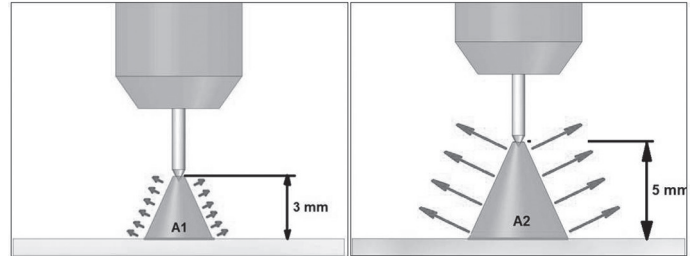


Figura 8. Variação do comprimento do arco em processo TIG

Por fim, observa-se na Fig. 5 (d) que o rendimento térmico sofre uma queda significativa para maiores comprimentos de cordão, onde o tempo de formação do cordão afeta diretamente o calor imposto, já que as perdas de calor durante a formação do mesmo influenciam de forma negativa a eficiência térmica do processo. Isto reflete uma característica importante do ensaio proposto, que é o tempo entre a formação do cordão e o “mergulho” da placa de teste no nitrogênio líquido. Este tempo implica em trocas térmicas com o meio ambiente, sendo uma limitação do ensaio. Entretanto, pela automação executada, garante-se uma grande repetibilidade em todas as medições.

O rendimento térmico para o processo TIG CC- foi de 70% e um rendimento máximo de 79% e mínimo de 61 %, para as condições de soldagem preestabelecidas para este trabalho. Sendo estes valores muito próximos comparados com trabalhos já realizados por outros autores [9,12,13,14], que reportando rendimento térmico de 67% a 80%.

5.2. Processos GMAW convencionais

Após as soldagens GTAW, os planejamentos experimentais mostrados nas Tab. 5 e 6 apresentam os ensaios propostos para a execução das soldagens GMAW convencional (fonte em modo tensão constante) utilizando-se respectivamente transferência metálica por curto-circuito e goticular (spray). Para a transferência por curto-circuito utilizou-se uma distância bico de contato peça (DBCP) de 12 mm e para goticular de 21 mm.

Destaca-se que a ideia destes planejamentos é prover uma avaliação geral das grandezas térmicas passíveis de serem medidas (aporte térmico e rendimento térmico). Assim, optou-se por efetuar um planejamento experimental mais simples. Neste caso, ao se alterar a velocidade de alimentação, sem se alterar a tensão de referência, o comprimento do arco irá se alterar, o que possivelmente trará alterações nas grandezas térmicas mencionadas. Além disto, a taxa de deposição se alterou ao se alterar a relação entre a velocidade de alimentação e de soldagem.

Tabela 5. Planejamento experimental proposto para a soldagem GMAW curto-circuito convencional

Teste	DBCP [mm]	U [V]	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]
1	12	19,0	3,0	30	10
2					15
3				40	10
4					15
5			4,0	30	10
6					15
7				40	10
8					15

Tabela 6. Planejamento experimental proposto para a soldagem GMAW goticular

Teste	DBCP [mm]	U [V]	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]
1	21	29,0	6,5	30	10
2					15
3				40	10
4					15
5			8,5	30	10
6					15
7				40	10
8					15

Tabela 7. Valores obtidos pelo calorímetro de N2L para processo GMAW curto-circuito convencional

U [V]	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]	
19,0	3,0	30	10	19,5	122	2480	496	407	82,1	
			15	19,6	126	2562	512	398	77,7	
		40	10	19,5	123	2495	374	286	76,3	
			15	19,5	128	2593	389	303	77,9	
	4,0	30	10	20,0	164	3341	668	516	77,2	
				15	20,0	166	3363	673	525	78,0
			40	10	20,1	167	3399	510	411	80,7
				15	19,9	168	3384	508	391	77,1

Tabela 8. Valores obtidos pelo calorímetro de N2L para processo GMAW transferência goticular

U [V]	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]	
29,0	6,5	30	10	28,5	247	7039	1408	931	66,2	
			15	28,6	248	7078	1416	991	70,0	
		40	10	28,6	246	7019	1053	775	73,6	
			15	28,8	244	6985	1048	750	71,5	
	8,5	30	10	28,0	282	7909	1582	1241	78,5	
				15	27,6	286	7985	1597	1258	78,8
			40	10	28,0	281	7881	1182	900	76,1
				15	28,1	287	8055	1208	897	74,2

Os resultados destes dois planejamentos experimentais estão apresentados nas Tabs. 7 e 8. A primeira observação é que a transferência metálica goticular, em função dos parâmetros utilizados, atingiu em média o dobro da potência instantânea (7494 W) se comparada com a transferência por curto-circuito (2952 W). Este resultado é uma indicação da maior tensão e maior corrente utilizadas na transferência goticular. Com relação à eficiência térmica, a transferência por curto-circuito apresentou valores maiores em média (79,4 %) se comparada à transferência goticular (73,6 %). Este é um indicativo de que menores arcos de soldagem e menores níveis de corrente determinam menores perdas térmicas e, consequentemente, maiores eficiências térmicas. Em comparação com a literatura valores para rendimento térmico da ordem de 86 % para a transferência por curto-circuito e 73 % para a transferência goticular são apresentados [15].

5.3. Processos GMAW derivativos

Devido à importância crescente dos processos GMAW com transferência controlada (processos derivativos), são propostos nas Tab. 9 a 11 ensaios para avaliar tais processos no tocante a suas eficiências térmicas. Estes processos utilizam diferentes tecnologias: STT (*Surface Tension Transfer*), RMD (*Regulated Metal Deposition*), CMT (*Cold Metal Transfer*), GMAW-P (Pulsado) e GMAW-PV (Polaridade Variável). Neste trabalho, para maior facilidade de comunicação escrita, a nomenclatura “Processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito controlado utilizando-se tecnologia STT/RMD/CMT” será resumida na forma “Processo STT/RMD/CMT”. Destaca-se que a primeira nomenclatura é aquela tecnicamente correta, mas para simplificação escrita, a segunda será adotada.

Tabela 9. Planejamento experimental para o calorímetro de N2L para os processos GMAW derivativos STT, RMD e CMT para os dois níveis de corrente: 115 A e 155 A

Processo	V_s [cm/min]	V_a [m/min]	DBCP [mm]	Parâmetro específico	I_m [A]
STT	12	2,3	12	$I_p=300A$; $I_b=80A$; Tailout=5	118
	12	2,3	12	$I_p=300A$; $I_b=80A$; Tailout=5	119
	18	3,3	12	$I_p=300A$; $I_b=80A$; Tailout=5	155
	18	3,3	12	$I_p=300A$; $I_b=80A$; Tailout=5	154
RMD	12	2,3	18	Trim=80; ArcControl=25	118
	12	2,3	18	Trim=80; ArcControl=25	117
	18	3,3	16	Trim=80; ArcControl=25	154
	18	3,3	16	Trim=80; ArcControl=25	155
CMT	12	2,3	12	Arclength= -20	119
	12	2,3	12	Arclength= -20	118
	18	3,2	16	Arclength= -30	157
	18	3,2	16	Arclength= -30	158

Tabela 10. Planejamento experimental para o calorímetro de N2L para o processo derivativo GMAW-P (Pulsado) para os dois níveis de corrente utilizados: 115 A e 155 A

I_p [A]	t_p [ms]	I_b [A]	t_b [ms]	DBCP [mm]	V_a [m/min]	I_m [A]
275	7,6	60	24	22	3,0	115
275	5,5	60	7,0	22	4,0	156

I_p é a corrente de pico; t_p é o tempo de pico; I_b é a corrente de base e t_b é o tempo de base

Tabela 11. Planejamento experimental para o calorímetro de N2L para o processo derivativo GMAW-PV (Polaridade Variável) para os dois níveis de corrente utilizados: 115 A e 155 A

I_p [A]	I_b [A]	I_n [A]	t_p [ms]	t_{b1} [ms]	t_{b2} [ms]	t_n [ms]	V_a [m/min]	%EN	I_m [A]
250	40	-85	6,9	8,75	2,0	6,0	3,1	20%	114
250	40	-85	6,9	9,75	1,0	5,5	3,1	20%	114
250	40	-125	5,85	2,5	1,44	3,5	4,0	20%	154

Os parâmetros utilizados nesta Tab. Estão identificados na Figura 9, onde %EN é a porcentagem do tempo em que o arame-eletrodo está na polaridade negativa

Deve-se ressaltar que os parâmetros utilizados nestes ensaios foram adotados em função de pesquisas anteriores [16-18] realizadas pelo grupo Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem). Ensaios preliminares foram necessários [19] para selecionar parâmetros apropriados para se atingir dois níveis de corrente: 115 A e 155 A. Neste sentido, as Tab. 9 e 10 apresentam as réplicas realizadas para se demonstrar a repetibilidade (e desta forma, estabilidade) das condições empregadas.

Os resultados obtidos pelo calorímetro de N2L para estes processos derivativos são mostrados na Tab. 12. É possível observar que maiores valores de potência elétrica (e energia de soldagem por consequência) são atingidos para os processos GMAW-P e GMAW-PV (Fig. 10). Isto é devido ao fato de que estes processos utilizam transferência metálica controlada em voo livre, diferentemente dos demais (STT, RMD e CMT) que utilizam transferência metálica controlada por curto-circuito. Assim, por utilizarem transferência controlada em voo livre, estes processos

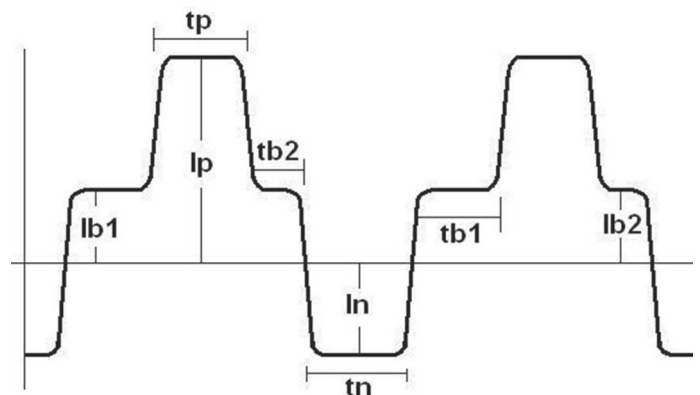


Figura 9. Formato de onda utilizado para o processo GMAW-PV [18]

demandam maiores arcos de soldagem e, desta forma, maiores tensões de soldagem.

Tabela 12. Resultados advindos pelo calorímetro de N2L para os processos derivativos GMAW

STT	I [A]	V _a [cm/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]
	115	2,3	12,3	15	18,4	119	2147	1055	774	73,4
	115	2,3	12,3	15	18,4	119	2134	1045	780	74,7
	155	3,3	17,6	15	16,6	154	2606	851	681	79,9
	155	3,3	17,6	15	16,6	154	2629	892	692	77,5
										76,4
RMD	I [A]	V _a [cm/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]
	115	2,3	12,3	15	17,5	118	1906	903	741	82,0
	115	2,3	12,3	15	17,5	118	1917	902	722	80,1
	155	3,3	17,6	15	17,5	156	2651	957	730	76,3
	155	3,3	17,6	15	17,6	154	2645	944	720	76,2
										78,6
CMT	I [A]	V _a [cm/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]
	115	2,2	11,2	15	10,7	114	1646	861	649	75,4
	115	2,2	11,2	15	10,9	113	1658	863	652	75,6
	155	3,3	17,0	15	12,0	156	2464	816	622	76,3
	155	3,3	17,0	15	11,9	157	2465	851	657	77,2
										76,1
GMAW-P	I [A]	V _a [cm/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]
	115	3	15,8	15	21,2	113	2773	1049	744	70,9
	115	3	15,8	15	21,5	113	2816	1031	725	70,3
	155	4	21,3	15	25,7	154	4368	1184	813	68,7
	155	4	21,3	15	25,3	155	4360	1180	812	68,9
										69,7
GMAW-PV	I [A]	V _a [cm/min]	V _s [cm/min]	L _c [cm]	U _m [V]	I _m [A]	P _{inst} [W]	E _{sold} [J/mm]	E _{imp} [J/mm]	η _{term} [%]
	115	3	15,8	15	21,9	115	2775	1462	860	58,9
	115	3	15,8	15	22,1	115	2793	1512	867	57,3
	155	4	21,3	15	23,7	154	3898	1408	816	57,9
	155	4	21,3	15	23,8	154	3922	1394	808	57,9
										58,0

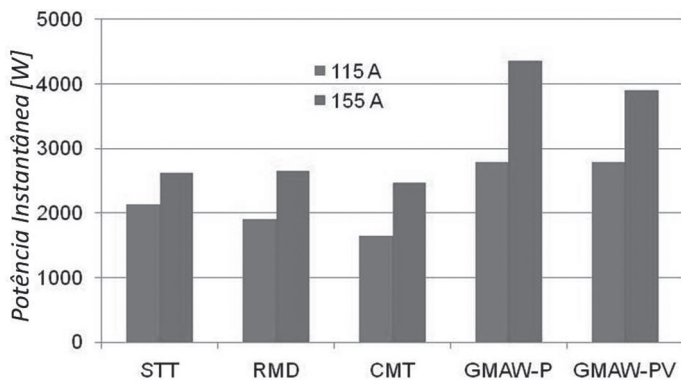


Figura 10. Potência elétrica instantânea para os diferentes processos GMAW investigados

Para o processo STT os valores medidos para rendimento térmico variam entre 74,0% e 78,7% quando a corrente varia de 115 A para 155 A. Isto demonstra as perdas térmicas devido à convecção e radiação do processo. O valor médio de rendimento térmico para o STT foi de 76,4%, o que é comparativamente menor do que 85% reportado por outros autores [8, 15]. Para o processo CMT, valores da ordem de 86% são reportados [8], ao passo que neste trabalho, os valores encontrados foram de 75,4% para 115 A e 76,8% para 155 A. A razão para tal discrepância reside no fato de que foram utilizadas faixa paramétricas diferentes, além do fato de que os tempos de soldagens utilizados na literatura [8] foram consideravelmente menores (25 segundos na literatura contra 42 s nestes trabalho).

Durante o processo RMD, rendimentos térmicos de 91,0%

e 76,3% foram medidos respectivamente para correntes de 115 A e 155 A, ou seja, com tendência decrescente similarmente ao já apresentado para os outros processos. Medições de outros autores não foram encontradas na literatura técnico-científica. Neste sentido, acredita-se que, como os valores encontrados estão da ordem daqueles obtidos pelos processos STT e CMT, os resultados obtidos são coerentes.

O principal motivo para que os resultados obtidos para os processos derivativos estejam relativamente próximo deve-se ao fato de que os parâmetros utilizados foram previamente investigados [16] e representam condições otimizadas para estes processos (STT, RMD e CMT) para uma dada situação (soldagem de tubulação de aço carbono em passe único).

De forma semelhante, o processo GMAW-P apresenta uma queda no rendimento térmico de 70,6% para 68,8% quando a corrente aumenta de 115 A para 155 A, o que indica novamente maiores perdas a maiores correntes e maiores tensões (comprimentos de arco). Estas características também contribuem para maior energia de soldagem. Os valores de rendimento térmico para o GMAW-P encontrado na literatura [20-22] varia entre 62% a 73%, ao passo que neste trabalho é de 69,7%. Por outro lado, Bosworth [23] reporta eficiências da ordem de 75% a 80%.

Dentre os processos derivativos investigados, o processo GMAW-PV foi aquele que apresentou menores rendimentos térmicos, da ordem de 58,0%, sem variação estatística entre os níveis de corrente avaliados (115 e 155 A). Na Ref. [24] é reportado que o aporte térmico é da ordem de 25% menor do que aquele comparado à soldagem GMAW-P e quase metade daquele atingido pela transferência metálica goticular no processo GMAW convencional para uma mesma velocidade de alimentação. Durante o tempo em que o arame-eletrodo está na polaridade positiva, o arco é diretamente conectado à gota em formação e a troca térmica entre o arco e a gota é alta, aquecendo a gota e contribuindo para melhor eficiência térmica quando ao final a gota for transferida. Durante o tempo em que o arame-eletrodo está na polaridade negativa, o arco é conectado à extensão sólida do arame e, embora haja maior taxa de fusão, a área de contato é maior e conseqüentemente a densidade de corrente é menor. Isto contribui para menor troca térmica entre gota em formação e arco, levando a um menor rendimento térmico. Além disto, o comprimento do arco é maior durante a fase negativa e, como mencionado para os outros processos, quanto maior o comprimento do arco, menor será o rendimento térmico.

5.4. Comparação entre calorímetro de N₂L e fluxo contínuo (água)

Finalmente é importante comparar os resultados obtidos pelo calorímetro de N₂L proposto com outra técnica experimental mais tradicionalmente empregada. Neste caso, o calorímetro de fluxo contínuo (água) foi escolhido. No calorímetro de fluxo contínuo, um fluxo de água constante é mantido sob a chapa soldada e as temperaturas de entrada e saída da água são medidas com uso de termopares, como mostrado na Fig. 11. É também importante mensurar o fluxo real de água caso haja variação

no mesmo. Neste trabalho, utilizou-se o sensor SFL 1220 R10. Uma melhor descrição da bancada utilizada é apresentada na Ref. [19] e a Fig. 12 apresenta uma visão geral desta bancada desenvolvida para medição do aporte térmico via calorimetria de fluxo contínuo (água).

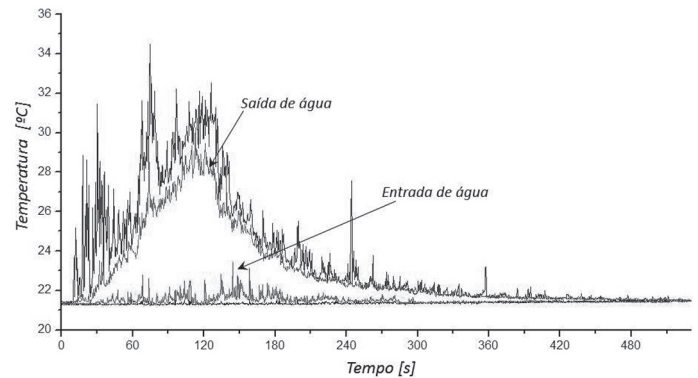


Figura 11. Exemplo de temperaturas medidas no calorímetro de fluxo contínuo (água)

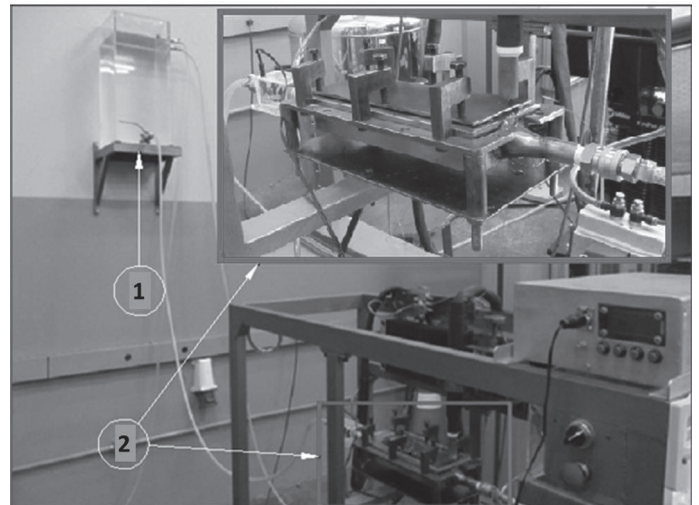


Figura 12. Calorímetro de fluxo contínuo: 1: Recipiente de água para manter pressão constante (coluna d'água) e 2: fixação do calorímetro na bancada experimental

A comparação proposta neste trabalho para ambos os calorímetros será realizada com base nos resultados dos processos GTAW, GMAW convencional por curto-circuito e GMAW convencional goticular. A Tab. 13 apresenta uma seleção dos resultados obtidos para o calorímetro de N₂L apresentados anteriormente e se traduzem em valores máximos e mínimos obtidos até aqui para o rendimento térmico. Os mesmos parâmetros utilizados durante a calorimetria por N₂L foram também utilizados na calorimetria por fluxo contínuo como apresentado na Tab. 14. A utilização de parâmetros que levem a valores máximos e mínimos de rendimento térmico deve-se ao fato de buscar uma situação que se destaque eventuais diferenças entre os dois calorímetros desenvolvidos.

Graficamente a Fig. 13 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para ambos os calorímetros. As diferenças observadas foram de 13,9% para o GTAW, 10,4% para o

Tabela 13. Maiores e menores rendimentos térmicos observados para o calorímetro de N2L

	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]
GTAW	10,8	102	1094	328	259	78,9
	11,9	150	1785	714	435	60,9
GMAW curto-circuito	19,5	122	2480	496	407	82,0
	19,5	123	2495	374	286	76,0
GMAW goticular	27,6	286	7985	1597	1258	78,8
	28,5	247	7039	1408	931	66,2

Tabela 14. Resultados obtidos pelo calorímetro de fluxo contínuo (água) com o mesmo conjunto de parâmetros da Tab. 13

	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]	Rend [%]
GTAW	10,5	100	1053	316	209	66,1	67,4
	10,3	100	1034	310	213	68,7	
	12,9	151	1965	786	401	51,0	54,9
	12,7	152	1934	774	456	58,9	
GMAW curto-circuito	18,8	120	2153	431	324	75,3	72,5
	18,8	120	2152	430	300	69,7	
	18,8	120	2161	324	231	71,2	70,5
	18,8	120	2153	323	226	69,9	
GMAW goticular	28,1	287	8055	1611	1000	62,1	64,3
	28,0	287	8050	1610	1071	66,5	
	28,3	248	7005	1401	910	65,0	65,3
	28,3	248	7000	1400	918	65,6	

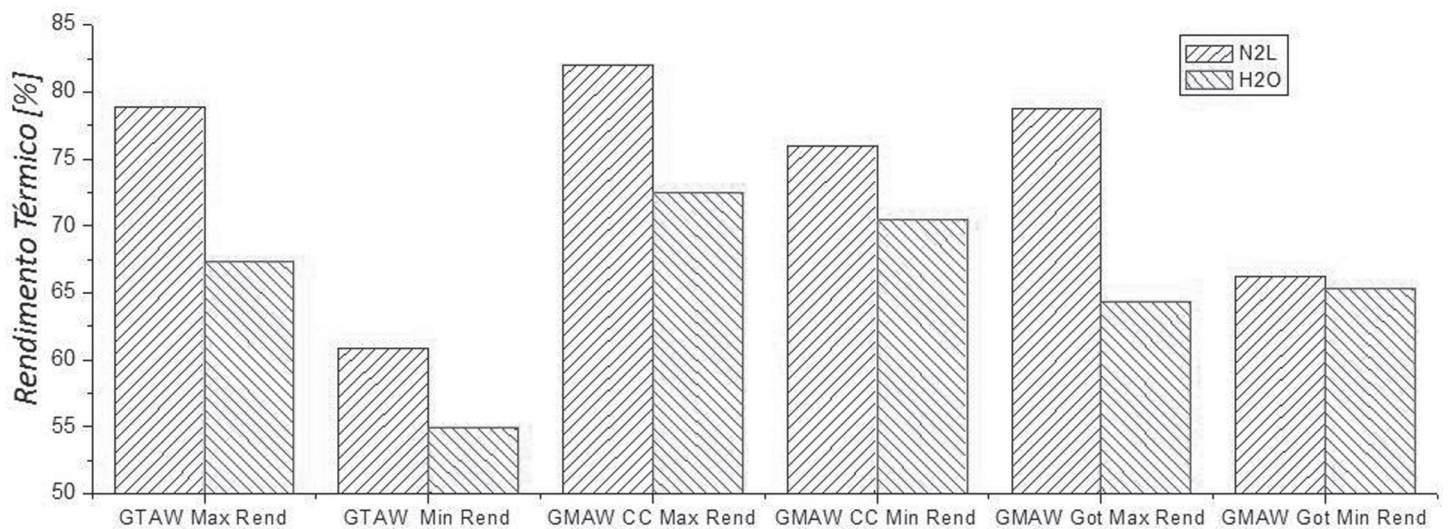


Figura 13. Comparação entre os rendimentos térmicos atingidos por ambos os calorímetros

GMAW convencional por curto-circuito e 12,0% para o GMAW convencional goticular. Estas dispersões de resultados são consistentemente menores do que reportados por outros autores [9]. Os menores valores obtidos pelo calorímetro de fluxo contínuo podem ser atribuídos a perdas térmicas do suporte do calorímetro, evaporação da água e formação de camada gasosa, uma vez que para garantir um fluxo laminar, uma baixa vazão de 2,3 L/min foi utilizada. Desta forma, acredita-se que os resultados obtidos comprovam o sucesso das técnicas desenvolvidas, em especial do calorímetro de N2L.

6. Conclusões

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que:

- O equipamento apresenta bom comportamento mecânico e repetibilidade para diferentes espessuras de placa teste não sendo superior a 1,5% de diferença entre os resultados;
- No processo TIG para um mesmo comprimento de arco e velocidade de soldagem se observou que o acréscimo da corrente influencia de forma negativa o rendimento térmico do processo;
- Para o processo TIG o aumento do comprimento do arco (3 a 5 mm) representou uma diminuição do rendimento térmico de 5% aproximadamente;
- Para os parâmetros propostos na avaliação do processo TIG o aumento da velocidade de soldagem aumenta o rendimento térmico do processo, diminuindo-se as perdas por convecção e radiação para o entorno;
- Os valores de rendimento térmico encontrados neste trabalho para o processo TIG concordam com os resultados encontrados na literatura para condições semelhantes de soldagem.
- Durante a soldagem GMAW convencional, a transferência por curto-circuito levou a maiores rendimentos térmicos do processo quando comparado à transferência goticular;
- Os processos GMAW derivativos podem ser divididos em dois grupos: um que utiliza transferência controlada por curto-circuito (STT, RMD e CMT) e outro que utiliza transferência controlada por voo livre (GMAW-P e GMAW-PV). O rendimento térmico do primeiro grupo é maior do que o aquele observado para o segundo;
- O calorímetro de fluxo contínuo (água) desenvolvido mediu rendimentos térmicos menores do que aqueles aferidos pelo calorímetro de N2L. Entretanto, a dispersão de dados ficou menor do que aquele apresentado na literatura técnico-científica, o que comprova o sucesso das técnicas desenvolvidas, em especial do calorímetro de N2L.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapemig (Processo TEC - PPM-00511-12) e ao CNPq (Processo 307710/2011-4).

8. Referências Bibliográficas

- [1] ROSENTHAL, D. Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting. *Welding Journal*, 20 (5), 220s-234s, 1941.
- [2] NILES, R., & JACKSON, C. E. Weld Thermal Efficiency of the TIG Process. *Welding Journal*, 25s-32s, 1985.
- [3] DUTTA, P. et. al. Determination of Gas Tungsten Arc Welding Efficiency. *Experimental Thermal and Fluid Science* (9), 80-89, 1994.
- [4] LU, J., e KOU, S. Power Inputs in Gas Metal Arc Welding of Aluminum - Part 2. *Welding Journal*, 60 (11), 452s-456s, 1989.
- [5] GIETD, W. H. et al. Welding Efficiency: Calorimetric and Temperature Field Measurements. *Welding Journal*, 68 (1), 28s-32s, 1989.
- [6] CANTIN, G. M., & FRANCIS, J. A. Arc Power and Efficiency in Gas Tungsten Arc Welding of Aluminium. *Science and Technology of welding and joining*, 10 (2), 200-210, 2005.
- [7] PEPE, N. *Advances in Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes*. Cranfield, UK: Cranfield University, 2010.
- [8] PEPE, N. et. al. Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes. *Science and Technology of Welding and Joining*, 412-417, 2011.
- [9] ZIJP, J. *Heat transport during gas tungsten arc welding*. Maandag: Technische Universiteit Delft, 1990.
- [10] MEACKER, H. H., and STABLEIN, H. G. What Keeps an arc Standing in a Croos FLOW? *IEEE. Trans. Plasma Sci*, 291-299, 1986.
- [11] VILARINHO, L. O. O arco TIG a 100 A e Argônio Puro é um Arco Especial? *Soldagem e Inspeção*, 14, 353-357, 2009.
- [12] SMARTT, H. et. al. *Heat Transfer in Gas Tungsten Arc Welding*. International Welding Congress. Toronto, Canada, 1985.
- [13] FUERSHBACH, P. K. (1991). A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Tungsten Arc Welding. *Welding Journal*, 287s-297s.
- [14] DUPONT, J. N., and MARDER, A. R. Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Department of Material Science and Engineering*, 406s-416s, 1995.
- [15] HSU, C.; SOLTIS, E. P. Heat Input Comparison of STT vs. Short-Circuiting and Pulsed GMAW vs. CV Processes. 6th International Trends in Welding Research Conference Proceedings. Pine Mountain, GA, 2003. 369-374.
- [16] COSTA, T.F. *Aplicação de Processos MAG Curto-circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço Carbono*. 2011. 197 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- [17] OJO, E. And SCOTTI, A. Determinação dos parâmetros de pulso na soldagem MIG/MAG pulsada- Parte I: Arame ER70S-6 de 1,2 mm e gás Ar+5%O₂. Uberlândia, MG, Brasil: LAPROSOLDA/UFU 24, 2005.
- [18] VILARINHO, L.O. et al. Methodology for Parameter Calculation of VP-GMAW. *Welding Journal*, April, p.92s-98s, 2009.

- [19] AREVALO, H. H. Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros Via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) para Processos de Soldagem. 2011. 145p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.
- [20] ALLUM, C.J.; QUINTINO, L. Control of Fusion Characteristics in Pulsed Current MIG Welding - Part 2. *Metal Construction*. 17 (1985): 21-24.
- [21] KENNEY, K. L.; MILLER, K. S.; SMARTT, E H. B. Heat Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding. Fifth International Conference on Trends in Welding Research. Pine Mountain, Georgia, USA. 1998. 355-361.
- [22] JOSEPH, A., et al. Measurement and Calculation of Arc Power and Heat Transfer Efficiency in Pulsed Gas Metal Arc Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 8, n. 6 (2003): 400-406.
- [23] BOSWORTH, M. Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding with Solid Wire Electrodes. *Welding Journal*, 70, 1991: 111s-117s.
- [24] HARWIG, D.D. Arc Behavior and Metal Transfer in the VP-GMAW Process. Cranfield University: School on Industrial Manufacturing Science, 2003.