

Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-circuito na Posição Horizontal

(Comparative Analysis of FCAW and GMAW Processes with Short-Circuit Transfer and in Horizontal Position.)

Claudio Ivanei de Souza¹, Valtair Antonio Ferraresi²

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laprosolda, Uberlândia, MG, Brasil. ivanei@hotmail.com¹, valtairf@mecanica.ufu.br²

Resumo

Os processos de soldagem com arame maciço (GMAW) e arame tubular (FCAW), que competem entre si em termos de qualidade, produtividade e operacionalidade, requerem do usuário informações seguras de suas principais características e aplicações para determinar as condições mais adequadas de soldagem. Desta forma, o objetivo deste trabalho é comparar a potencialidade de cada processo na soldagem horizontal de aço carbono ABNT 1020, variando o tipo de gás de proteção, a corrente e tensão de soldagem, mantendo constante a taxa de fusão por unidade de comprimento. Para a realização deste estudo foram utilizados os arames AWS E71T-1 e ER 70S-6 sob as proteções gasosas 100%CO₂ e Ar+25%CO₂ em dois níveis de corrente e quatro níveis de tensão. As características avaliadas foram a regularidade de transferência metálica no modo curto-circuito, a capacidade produtiva através da taxa e rendimento de deposição e o escorrimento do cordão de solda dentro do chanfro. De maneira geral, os dois processos apresentaram semelhança na capacidade produtiva, mostrando certa dependência do valor da tensão de soldagem. Também se observou que, na mesma faixa de corrente e com a elevação da tensão, houve mudanças nas características de transferência metálica nos dois processos. Em relação ao escorrimento dos cordões de solda, o processo GMAW apresentou melhores cordões em menores tensões. Para o processo FCAW os valores dos escorrimientos não apresentaram grandes variações, tendo uma condição melhor que o GMAW para maiores valores de tensão de soldagem (região de predominância de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito). O gás de proteção 100%CO₂, para ambos os processos, foi o que proporcionou melhor rendimento de depósito com predominância de transferência metálica por curto-circuito.

Palavras-chave: GMAW, FCAW, transferência metálica por curto-circuito, gás de proteção, posição horizontal.

Abstract: The processes of welding with solid wires (GMAW) and flux cored wire (FCAW), that compete in terms of quality, productivity and operability, demand the user to have clear information about their main features and applications to determine the most appropriate welding conditions. Thus, the goal is to compare the capability of each process in the horizontal position welding of ABNT 1020 carbon steel, varying the type of shielding gas for the same level of welding current and voltage to maintain a constant deposition rate per length. For this study the wire E71T-1 and ER 70S-6 were used, both under 100% CO₂ and Ar +25% CO₂ shielding gas and in two current and four voltage levels. The stability of short-circuit metal transfer mode was evaluated along with the production capacity (deposition rate and deposition efficiency) and the presence of deposit discontinuity. In general, both processes had a similar production capacity, showing some dependence on the welding voltage value. It was noted that, for the same current range and with increasing voltages, there was a change in metal transfer characteristics for both processes. Regarding deposit discontinuities (runoffs), the solid wire showed better results with lower voltage values. The values of runoffs for the cored wire were similar, however with a better condition for higher values of voltage (region of predominance of metal transfer carried by the flux without short-circuiting). The shielding gas 100% CO₂ allowed higher deposition efficiency for both wires with a predominance of short-circuit metal transfer mode.

Key-words: GMAW, FCAW, short-circuit metal transfer, shielding gas, horizontal position

1. Introdução

Os processos de soldagem apresentam grande versatilidade e por isso são empregados para fabricação de produtos diversos, tais como estruturas metálicas, navios, aeronaves, veículos

terrestres, equipamentos espaciais. Entre os processos que se destacam no segmento da soldagem, com utilização crescente, estão os processos GMAW (Gas Metal Arc Welding) e o FCAW (Flux Cored Arc Welding). Estes processos são evidenciados no meio industrial por apresentarem grande capacidade produtiva, assegurada principalmente pela alta densidade de corrente, o que garante alta taxa de fusão, alto fator de trabalho e automatização do processo. Entretanto, apresentam uma complexa correlação entre suas variáveis as quais requerem certo grau de conhecimento e habilidade do operador, supervisor e engenheiro de soldagem, para garantir o melhor aproveitamento de suas

Recebido em 14/02/2013. Texto Final em 08/07/2013.

qualidades operacionais.

Uma restrição pertinente ao uso de processo GMAW ocorre devido às limitadas ações metalúrgicas proporcionada pela quantidade de composições de arames disponíveis no mercado, comprometendo a versatilidade na soldagem de materiais com exigências de composições especiais. Diante deste fato, o arame tubular foi lançado no mercado com o propósito de suprir a deficiência do arame maciço. O arame tubular é fabricado de fita de aço em forma de tubo e contém um fluxo interno com características operacionais adequadas ao tipo de soldagem requerida [1].

Gomes [2] comenta que a popularidade do processo FCAW tem crescido devido às possíveis vantagens que este processo oferece, tais como: alta qualidade do metal de solda depositado; excelente aparência do cordão de solda; boas características de arco; baixo nível de respingo. Também acrescenta que existe uma taxa de fusão do arame tubular maior que do arame sólido na mesma faixa de corrente, pois o invólucro tubular metálico tem menor massa condutora e isso proporciona maior densidade relativa de corrente. Garcia [3] cita que a maior limitação no uso do arame tubular está no custo de aquisição deste consumível, este fato é compensado pela produtividade e qualidade do cordão de solda. Entretanto, o processo GMAW continua merecendo grande aceitação no meio industrial, principalmente com estudo e aperfeiçoamento de equipamentos que melhoram o desempenho de uso do arame maciço.

O modo pelo qual o material fundido é transferido do eletrodo consumível para a poça de fusão (modo de transferência metálica) exerce grande influência sobre o desempenho de cada processo, podendo afetar diretamente a estabilidade do processo, a geração de respingo, a capacidade posicional do processo, a qualidade e o aspecto visual do cordão de solda [4, 5]. A transferência por curto-circuito ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem relativamente baixas, os quais permitem obter baixa força eletromagnética, grande diâmetro de gota e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar, com frequência de transferência de curto-circuito que pode variar de 20 a 200 Hz [6].

O modo de transferência metálica é dependente do tipo de gás de proteção utilizado. Os gases utilizados para soldagem com o processo FCAW são basicamente os mesmos utilizados na soldagem GMAW, sendo os mais utilizados o dióxido de carbono como gás ativo e argônio e ou hélio como gases inertes, podendo também utilizar-se a mistura destes, de acordo com as propriedades desejadas ou com base nas especificações do fabricante de consumível [7].

As duas opções de soldagem (GMAW e FCAW) deixam os usuários confusos na hora da seleção de qual processo utilizar. Contudo, pode-se esperar que cada processo tenha a sua individualidade e corresponda com melhor desempenho relativo em determinada situação de uso. Para que cada processo seja utilizado corretamente é necessário conhecer as suas características operacionais em função de sua aplicação. Apesar do grande volume de informações citadas na literatura, existe ainda deficiência em relação à comparação dos dois processos para uma determinada aplicação, principalmente na posição horizontal.

As literaturas correlatas destacam alguns aspectos operacionais fazendo comparações entres os processos na soldagem por deposição na posição plana, o que nem sempre corresponde com a capacidade operacional de cada processo. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia que tenha capacidade de analisar de maneira comparativa os dois processos, para uma determinada aplicação e condições de soldagem. Com isso, o objetivo deste trabalho é analisar a potencialidade de cada processo na soldagem horizontal de aço carbono ABNT 1020, nas mesmas condições de soldagem (taxa de fusão por unidade de comprimento constante), utilizando dois arames de grande aplicação no mercado (maciço AWS ER70S-6 e tubular AWS E71T-1) com dois gases de proteção ($Ar+25\%CO_2$ e $100\%CO_2$), em dois níveis de corrente e quatro níveis de tensão.

A metodologia utilizada deverá ser capaz de focar e comparar a eficácia de cada processo, na estabilidade de transferência metálica por curto-circuito, fator econômico (taxa de deposição e rendimentos de deposição) e geometria do cordão de solda (escorrimento). Este estudo não será capaz de avaliar todas as variáveis envolvidas nos processos. Entretanto, acredita-se que o resultado seja útil para acrescentar um número maior de informações aos usuários dos processos, e que estes tenham maiores conhecimentos e argumentos na escolha do processo mais adequado para uma determinada aplicação.

2. Metodologia

Para a realização da pesquisa foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocessos, com capacidade de operação nos processos GMAW e FCAW, e uma mesa de coordenadas que se movimenta em dois eixos. Durante a soldagem foram adquiridos os valores de tensão e corrente através de um sistema composto por um sensor Hall para monitoramento da corrente, com uma faixa de medição de ± 600 A, um divisor de tensão para monitoramento da mesma, com uma faixa de medição de ± 100 V. A frequência de aquisição foi de 5 kHz.

Após a soldagem foi extraído um corpo de prova (perfil transversal do cordão de solda) da seção central do cordão para análise do escorrimento do cordão de solda (E). Para isso, utilizou-se um sistema de aquisição e tratamento de imagens composto por câmera de vídeo e software para a aquisição e tratamento das imagens.

Para este estudo foram usados dois tipos de gás de proteção, gás com $100\%CO_2$ e gás $Ar+25\%CO_2$, vazão de 14 l/min e a indutância constante para todos os ensaios realizados (centro da faixa de trabalho da fonte). Foi utilizado como metal de adição para o processo GMAW o arame da AWS E70S-6 com diâmetro igual a 1,2 mm. Para o processo FCAW foi utilizado o arame AWS E71T-1M, tipo rutilico de diâmetro 1,2 mm. As placas de testes para soldagem foram confeccionadas em aço carbono ABNT 1020 com dimensões de 6,3 x 50,8 x 250 mm e com um rasgo central, simulando uma junta de topo sem abertura na raiz, conforme Figura 1.

As faixas de corrente de soldagem utilizadas foram de 120 e 160 A. As tensões de soldagem utilizadas foram de 18, 20, 22 e 24 V para ambos os gases de proteção. As soldagens foram

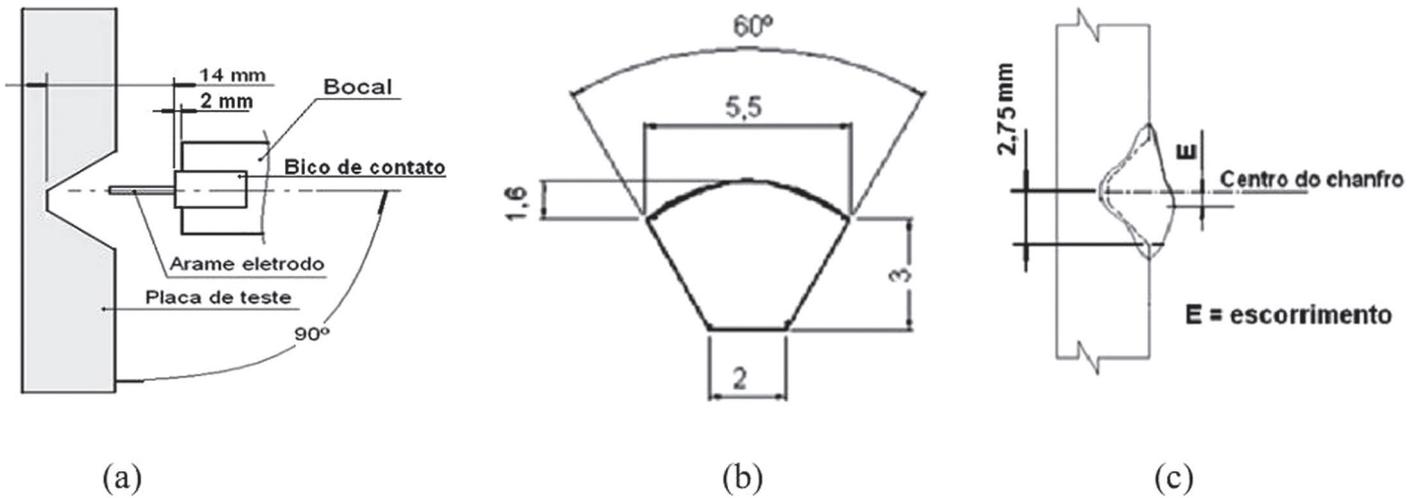


Figura 1. (a) - Esquema da posição da tocha em relação ao tipo de junta utilizado; (b) - Dimensões (mm) do cordão padrão adotado como padrão; (c) Esquema mostrando a forma de medida do escorrimento do reforço.

realizadas na posição horizontal com a tocha fazendo ângulo de ataque reto com o comprimento do cordão (ângulo de ataque perpendicular) e também com a placa de teste a ser soldada. A distância bico de contato peça (DBCP = 14 mm) teve como referência o fundo do chanfro, apresentado na Figura 1(a).

Todas as soldagens foram feitas com apenas um passe de enchimento e sem oscilação da tocha. Este tipo de junta, apresentado na Figura 1(a), não é a mais adequada para esta posição de soldagem (posição horizontal), mas foi adotado visando uma situação crítica para a poça de fusão, em relação a um possível escorrimento do metal fundido. A posição do arame na parte superior do chanfro (Figura 1(a)) teve como objetivo obter o preenchimento completo do chanfro devido ao escorrimento da poça de fusão.

A velocidade de soldagem foi obtida através da relação envolvendo a velocidade de alimentação do arame eletrodo e a constante de fusão (Kd). A constante de fusão para cada processo foi obtida a partir de um cordão padrão para a junta, apresentado na Figura 1(b). Foram utilizadas as velocidades de alimentação dos arames eletrodos (adquirida em testes exploratórios) para calcular as velocidades de soldagem para preencher adequadamente o chanfro. Estes ensaios foram realizados na posição plana de soldagem.

As análises dos resultados foram feitas com base em índice de regularidade citado na literatura corrente [3], obedecendo às seguintes diretrizes adotadas:

A) Condições de regularidade de transferência metálica na soldagem.

Os parâmetros usados foram: frequência de curto-circuito (f_{cc}); período de curto-circuito (P_{cc}) e seu desvio padrão ($\sigma_{P_{cc}}$); tempos médios de curto-circuito (t_{mcc}) e tempos médios de arco aberto (t_{mab}). Estes parâmetros foram obtidos por um programa desenvolvido no Laprosolda/UFU em ambiente MATLAB. As condições de melhor regularidade foram: A maior frequência de curto-circuito (f_{cc}) foi considerada melhor, pois tende a aumentar o rendimento da soldagem e apresentar um arco com maior regularidade; Os menores períodos de curto-circuito (P_{cc}) e uma

mínima variação no período de curto ($\sigma_{P_{cc}}$) foram considerados melhores, pois formam gotas de menor volume e contribui para melhorar a regularidade do arco ($P_{cc} = t_{mab} + t_{mcc}$); Índice do desvio padrão do período de curto-circuito, que é a relação do desvio padrão do período de curto-circuito dividido pelo período de curto-circuito ($\sigma_{P_{cc}}/P_{cc}$), que implica que quanto menor, melhor a regularidade da transferência metálica com ocorrência de curto-circuito.

B) Medidas do escorregamento do cordão de solda.

Para a medição do escorrimento (E) traçou-se uma linha reta no canto inferior do rasgo da placa de teste, com o cordão já soldado, linha esta que ligou os dois extremos da placa de teste, e com o paquímetro fez-se a medição desta linha até o ponto mais alto do escorrimento, onde obteve a cota E (exposto na Figura 1(c)). O menor escorrimento foi considerado a melhor condição.

C) Capacidade produtiva.

A maior taxa de deposição (T_d) bem como o rendimento de deposição (η_D) foram consideradas melhores, pois acarreta em maior produtividade. Para esses cálculos foram utilizados as Equações 1 e 2, sendo as placas de ensaios pesadas antes e após a soldagem.

$$T_d = \left(\frac{M_f - M_i}{T_{ab}} \right) \text{ [g/min]} \quad (1)$$

$$\eta_D = \left(\frac{T_d}{T_f} \right) 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Onde: M_f – massa final [g]; M_i – massa inicial [g]; T_{ab} – tempo de arco aberto (durante a soldagem do cordão) [min]; T_d – taxa de deposição [g/min]; T_f – taxa de fusão [g/min], obtida a partir da relação entre a velocidade de alimentação do arame eletrodo, seu diâmetro e densidade.

2. Resultados

Para a definição das faixas operacionais de soldagem que fossem capazes de garantir parâmetros previamente adotados, isto é, corrente de 120 e 160 A e tensão de 18, 20, 22 e 24 V, foram

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros de soldagem.

Processo			GMAW				FCAW					
Gás	Ur (V)	Id (A)	Teste	Vs (mm/min)	Va (m/min)	Um (V)	Im (A)	Teste	Vs (mm/min)	Va (m/min)	Um (V)	Im (A)
Ar+25% CO ₂	18	120	Tm 01	205	3,1	17,7	119	Tt 01	194	3,6	18,1	119
	20		Tm 02			19,8	119	Tt 02			20,2	119
	22		Tm 03			21,6	121	Tt 03			22,3	123
	24		Tm 04			24,8	122	Tt 04			24,3	123
	18	160	Tm 05	277	4,2	18,1	159	Tt 05	280	5,2	17,9	158
	20		Tm 06			19,5	160	Tt 06			20,1	160
	22		Tm 07			22,3	161	Tt 07			22,1	163
	24		Tm 08			23,4	162	Tt 08			24,0	164
100% CO ₂	18	120	Tm 09	218	3,3	18,3	121	Tt 09	204	3,8	18,5	121
	20		Tm 10			20,4	119	Tt 10			20,2	123
	22		Tm 11			22,5	123	Tt 11			22,4	123
	24		Tm 12			24,4	123	Tt 12			24,3	123
	18	160	Tm 13	297	4,5	18,2	158	Tt 13	301	5,6	18,9	158
	20		Tm 14			20,5	162	Tt 14			22,2	162
	22		Tm 15			21,9	162	Tt 15			22,2	163
	24		Tm 16			23,9	163	Tt 16			24,1	164

Sendo: tensão regulada na fonte (Ur); corrente média desejada (Id); tensão média adquirida (Um); corrente média adquirida (Im); velocidade de soldagem (Vs); velocidade de alimentação do arame (Va).

realizados testes exploratórios com o objetivo de determinar: velocidades de alimentação que correspondessem às condições de soldagem para os dois processos, maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Souza [8]. As condições encontradas e adotadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1. A constante de fusão (relação entre a velocidade de alimentação do eletrodo dividido pela velocidade de soldagem) encontrada nos ensaios preliminares e utilizada no processo GMAW foi $K_d = 15,14$ e para o processo FCAW foi $K_d = 18,60$. O maior valor de K_d do FCAW em relação ao GMAW está relacionado a necessidade de maior velocidade de alimentação do arame eletrodo para obter a mesma quantidade de metal depositado, pois os dois arames são de mesmo diâmetro.

Na Tabela 1, pode-se observar a influência da velocidade de alimentação sobre o gás de proteção utilizado para ambos os processos, por consequência também sobre as suas taxas de fusão. O gás 100%CO₂, em relação ao gás Ar+25%CO₂, necessitou de maior velocidade de alimentação para manter o mesmo nível de corrente desejada. Na Tabela 1 estão apresentados também os valores médios adquiridos para a corrente média (Im), cuja tolerância estabelecida foi de $\pm 5A$.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros para a sua análise. A frequência de curto-circuito (f_{cc}) foi obtida para todos os ensaios realizados, porém ela só foi utilizada para obtenção dos outros parâmetros para os ensaios que tiveram a predominância da transferência metálica por curto-circuito (f_{cc} acima de 19 Hz, com base em recomendações da literatura [6]). Pelos resultados obtidos, pode-se afirmar que a elevação da tensão contribuiu para a diminuição da frequência, passando a ocorrer também transferência do tipo globular, fato esse comum

aos dois processos nas condições utilizadas.

Todos os ensaios com 100%CO₂, apresentados na Tabela 2, ocorrem à predominância da transferência por curto-circuito. Scotti e Ponomarev [6] expõem que o gás rico em CO₂ tende a apresentar um arco curto favorecendo a transferência por curto-circuito. Seu potencial de oxidação favorece a estabilidade da raiz do arco, mas de forma antagônica parece aumentar a tensão superficial metal líquido/meio ambiente, fato este que pode ter contribuído para a ocorrência de transferência por curto-circuito, mesmo com maiores valores de tensões.

Devido à presença do fluxo, a transferência metálica no processo FCAW é diferente do processo GMAW. A gota forma-se na ponta do arame e é conduzida pelo fluxo até a poça de fusão e dependendo, do tipo de gás de proteção e nível de tensão, pode ou não ocorrer curto-circuito [9]. Desta forma, para diferenciar do modo de transferência convencional (processo GMAW) foi utilizada neste trabalho a seguinte terminologia para o processo FCAW: transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito - quando se verifica nos oscilogramas a predominância de curto-circuito; e transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito - quando não se verifica nos oscilogramas a presença de curto-circuito. Os oscilogramas de tensão e corrente do processo FCAW foram semelhantes ao processo GMAW, isto é, com o aumento da tensão a transferência passa a ocorrer com menores frequências de curto-circuito conduzido pelo fluxo, maiores detalhes estão apresentados no trabalho de Souza [8]. Para ilustrar os modos de transferência do processo FCAW, a Figura 2 apresenta os oscilogramas nas condições de transferência metálica conduzida pelo fluxo com (Figura 2(a)) e sem (Figura 2(b)) curto-circuito.

Tabela 2. Parâmetros para obtenção do índice de regularidade de transferência metálica, escorrimento do cordão de solda e taxa e rendimento de deposição

Teste	f_{cc} (Hz)	t_{mcc} (s)	$\sigma_{t_{cc}}$	t_{mab} (s)	$\sigma_{t_{ab}}$	P_{cc} (s)	$\sigma_{p_{cc}}$	$\sigma_{p_{cc}}/P_{cc}$	E (mm)	Td (g/min)	η_D (%)
Tm 01	38,0	0,003	0,0012	0,023	0,0120	0,026	0,0116	0,44	0,3	23,58	89,7
Tm 02	19,8	0,004	0,0008	0,047	0,0231	0,050	0,0418	0,83	0,6	23,22	88,4
Tm 03	3,8	-	-	-	-	-	-	-	1,7	19,26	73,3
Tm 04	3,0	-	-	-	-	-	-	-	2,6	13,29	50,6
Tm 05	51,2	0,003	0,0005	0,016	0,0039	0,019	0,0035	0,18	0,4	32,00	89,9
Tm 06	37,6	0,003	0,0011	0,023	0,0099	0,026	0,0096	0,36	0,7	32,25	90,6
Tm 07	25,8	0,002	0,0012	0,037	0,0465	0,038	0,0404	1,06	1,4	26,99	75,8
Tm 08	15,2	-	-	-	-	-	-	-	2,2	24,07	67,6
Tm 09	79,4	0,003	0,0012	0,009	0,0057	0,013	0,0068	0,52	0,5	25,06	90
Tm 10	74,0	0,002	0,0007	0,011	0,0068	0,013	0,0067	0,51	0,9	25,33	91
Tm 11	44,0	0,003	0,0012	0,02	0,0139	0,023	0,0153	0,66	1,7	23,74	84,9
Tm 12	24,0	0,003	0,0013	0,039	0,024	0,042	0,0226	0,53	2,0	22,35	79,9
Tm 13	69,0	0,004	0,0024	0,011	0,0065	0,015	0,0075	0,5	0,5	32,53	85,3
Tm 14	65,0	0,003	0,0013	0,008	0,0051	0,011	0,0061	0,55	1,0	31,73	83,2
Tm 15	60,8	0,003	0,0013	0,014	0,0084	0,016	0,0100	0,62	1,8	31,58	82,8
Tm 16	36,4	0,003	0,0013	0,024	0,0146	0,027	0,0131	0,48	1,8	31,54	82,7
Tt 01	32,8	0,003	0,0012	0,028	0,0226	0,030	0,0232	0,77	0,8	22,04	81,8
Tt 02	9,5	-	-	-	-	-	-	-	1,2	22,39	83,1
Tt 03	1,8	-	-	-	-	-	-	-	1,3	23,28	86,4
Tt 04	0,2	-	-	-	-	-	-	-	1,4	22,74	84,4
Tt 05	45,8	0,003	0,0015	0,019	0,0144	0,022	0,0153	0,69	0,9	30,82	79,2
Tt 06	27,3	0,002	0,0010	0,034	0,0316	0,037	0,0317	0,85	1,0	30,51	78,4
Tt 07	11,0	-	-	-	-	-	-	-	1,0	31,75	81,6
Tt 08	1,0	-	-	-	-	-	-	-	1,2	32,53	83,6
Tt 09	48,5	0,003	0,0014	0,018	0,0135	0,020	0,0141	0,71	0,8	23,35	82,1
Tt 10	23,8	0,002	0,0010	0,040	0,0364	0,042	0,0365	0,87	0,8	23,26	81,8
Tt 11	6,3	-	-	-	-	-	-	-	1,1	24,4	85,8
Tt 12	1,0	-	-	-	-	-	-	-	1,2	24,65	86,7
Tt 13	55,5	0,003	0,0014	0,015	0,0117	0,018	0,0124	0,69	0,8	33,69	80,4
Tt 14	22,8	0,001	0,0006	0,043	0,0341	0,044	0,0342	0,78	0,8	33,44	79,8
Tt 15	20,0	0,001	0,0007	0,051	0,0367	0,052	0,0368	0,71	0,9	34,87	83,2
Tt 16	5,3	-	-	-	-	-	-	-	1,0	35,49	84,7

Sendo: tempo médio de curto-circuito (t_{mcc}); desvio padrão do tempo de curto-circuito ($\sigma_{t_{cc}}$); tempo médio de arco aberto (t_{mab}); desvio padrão do tempo de arco aberto ($\sigma_{t_{ab}}$); período de curto-circuito (P_{cc}); desvio padrão do período de curto-circuito ($\sigma_{p_{cc}}$); frequência de curto-circuito (f_{cc}); escorrimento do cordão de solda (E); taxa de deposição (Td); e rendimento de deposição (η_D).

3.1. Análise de Regularidade de Transferência Metálica

Considerando a frequência de curto-circuito do processo GMAW para todos os ensaios realizados, tendo como base a maior frequência como a melhor regularidade relativa de transferência, verifica-se que as melhores condições para o gás de proteção Ar+25%CO₂ é com tensão de 18V (Figura 3(a)) A maior frequência ocorre com maior valor de corrente, condição esta de maior velocidade de alimentação. Para o gás de proteção

100%CO₂ (Figura 3(b)), percebe-se que a melhor condição está com a corrente de 120A para as tensões de 18 a 20V. Porém, para maiores valores de tensões de soldagem a frequência é maior para a corrente de 160A. Com isso, pode-se afirmar para o processo GMAW, com base apenas na frequência de curto-circuito, que as melhores condições de regularidade relativa de transferência metálica estão com a utilização de gás de proteção 100%CO₂.

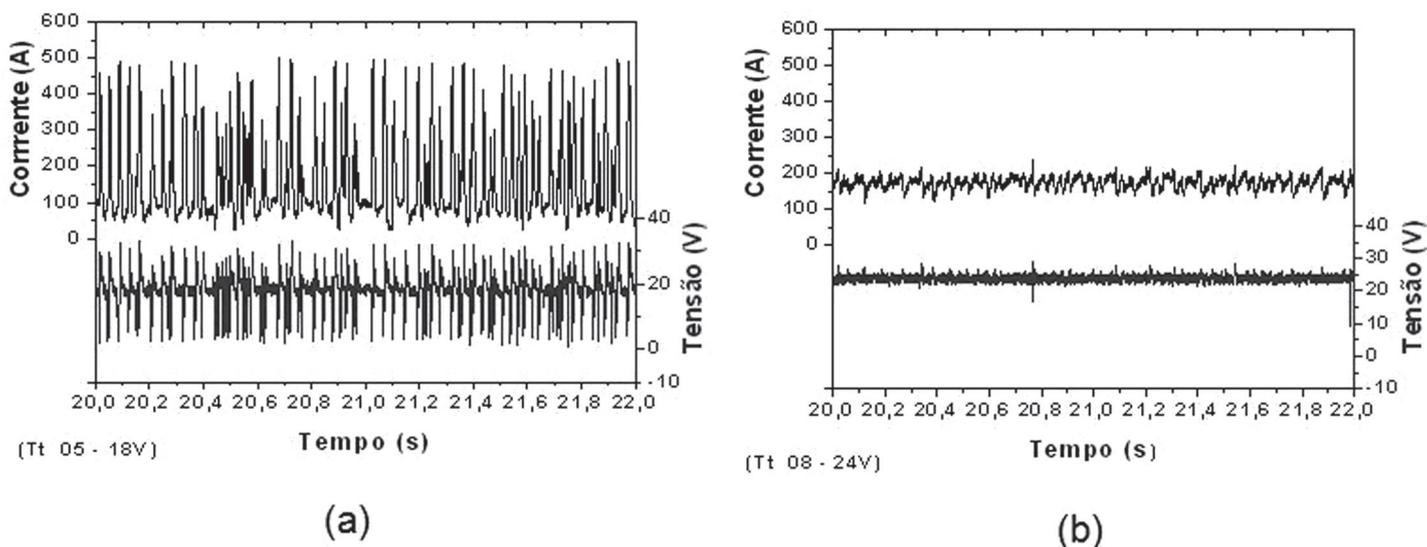


Figura 2. Oscilogramas de corrente e tensão, processo FCAW, 160 A, gás Ar+25%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V (ensaio Tt 05 da Tabela 2) e (b) 24 V (ensaio Tt 08 da Tabela 2)

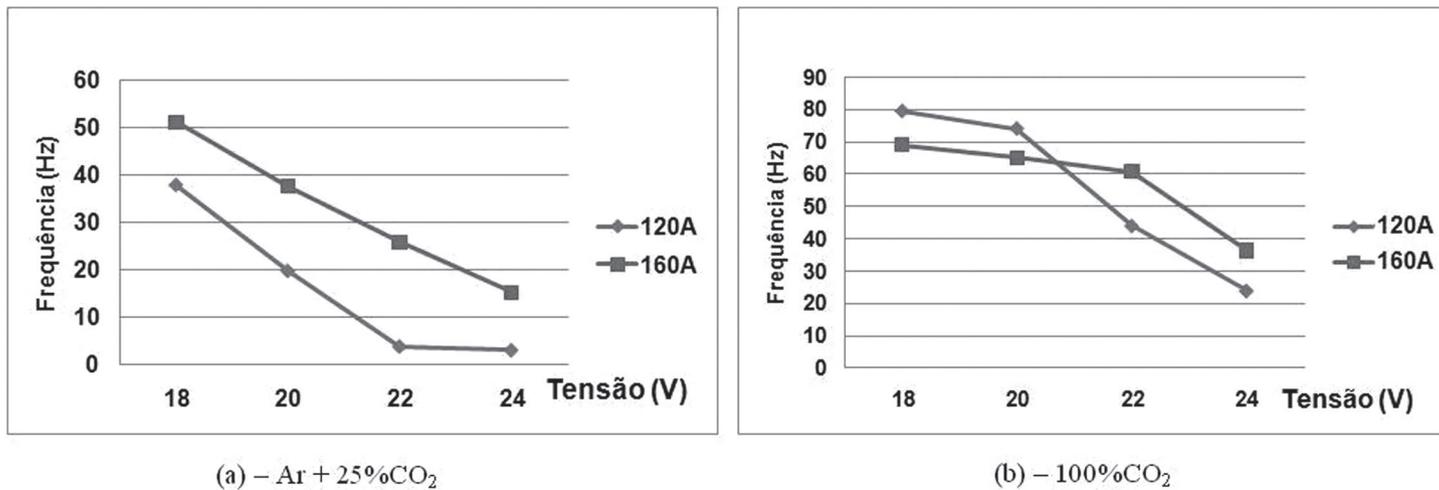


Figura 3. Relação entre a frequência de curto-circuito e a tensão de soldagem para o processo GMAW.

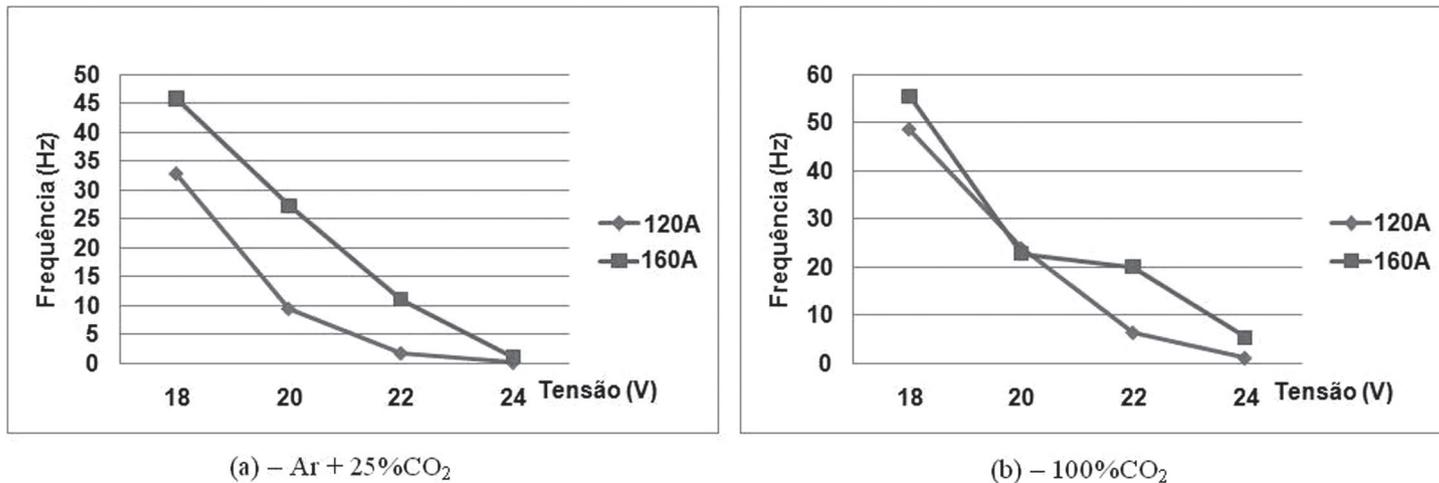


Figura 4. Relação entre a frequência de curto-circuito e a tensão de soldagem para o processo FCAW.

Apesar da transferência metálica do processo FCAW ser diferente do GMAW, foi considerado também a maior frequência de curto-circuito como sendo a de melhor regularidade relativa de transferência. A Figura 4 mostra a relação de frequência com a tensão e corrente de soldagem. Verifica-se que as melhores condições de regularidade relativa de transferência estão com menores valores de tensão e gás mais ativo (100%CO₂), conforme citado por Scotti e Ponomarev [6].

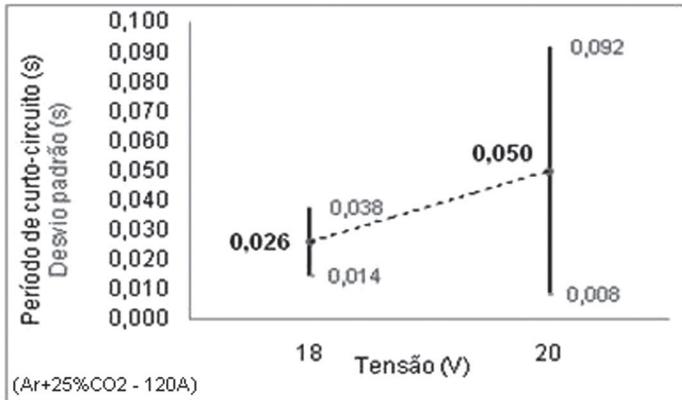
Considerando a análise de regularidade de transferência metálica através do período e seu desvio padrão do processo GMAW, as Figuras 5(a) e (b) apresentam os resultados com o gás Ar+25%CO₂ e as Figuras 6(a) e (b) apresentam as soldagens com o gás 100%CO₂. Os resultados mostram que em ambas as correntes o aumento da tensão contribuiu para aumentar o período de curto-circuito (P_{cc}) e de seu desvio padrão (σ_{pcc}). Isto mostra que o aumento da tensão, de modo geral, acarreta em diminuição da regularidade relativa de transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal.

Dos fatores que compõem o período de curto-circuito (P_{cc} = t_{mcc} + t_{mab}), o tempo médio de arco aberto (t_{mab}) foi o que mais sofreu influência da elevação da tensão (valores correspondentes expostos na Tabela 2). O aumento deste tempo favorece o crescimento das gotas, antes de seu destacamento. Comparando-se a influência dos gases nas mesmas faixas de corrente e tensão de soldagem, o gás 100%CO₂ proporcionou melhor regularidade

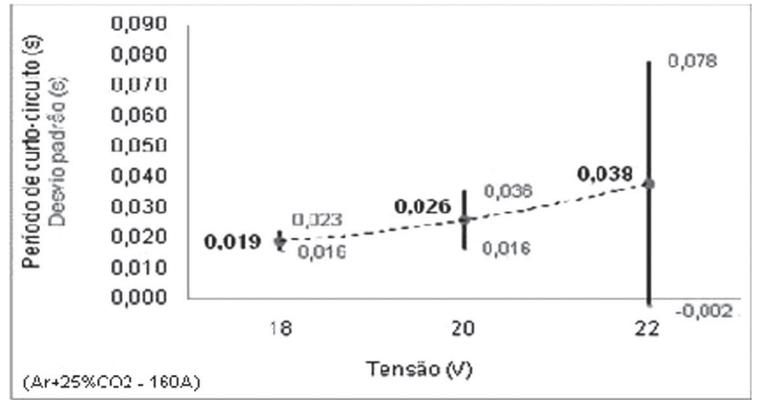
relativa de transferência metálica por curto-circuito. Este fato também pode ser visto na Figura 5 e Figura 6, onde os valores obtidos com o gás 100%CO₂ apresentaram poucas variações em relação aos obtidos com o gás Ar+25%CO₂.

Verifica-se na Tabela 2 que o menor índice do desvio padrão do período de curto-circuito para o processo GMAW ocorreu com o ensaio de Ar+25%CO₂ com 160 A e 18 V (Tm 05 - σ_{pcc}/P_{cc} = 0,1842). Para o gás de proteção 100%CO₂, apesar de apresentar índice com valores superiores à condição acima, esse gás manteve pouca variação em seus valores, obtendo valores praticamente constantes. É importante observar que os menores índices do desvio padrão do período de curto-circuito ocorrem para as condições de soldagem que obtiveram as maiores frequências de curto-circuito. As Figuras 7 e 8 mostram para o processo FCAW o período e seu desvio padrão para as condições de soldagem utilizadas neste trabalho.

As Figuras 7 e 8 indicam que a elevação da tensão (processo FCAW) aumentou o período e seu desvio padrão, reduzindo com isso a regularidade relativa de transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito. Desta forma, a melhor regularidade relativa de transferência, considerando o período e seu desvio, ocorreu para menores valores de tensão de soldagem. Entre os gases de proteção, o gás 100%CO₂, 160 A e tensão de 18 V (Tt 13 da Tabela 2) foi o que apresentou o melhor resultado. Isto também pode ser confirmado com o menor valor índice do

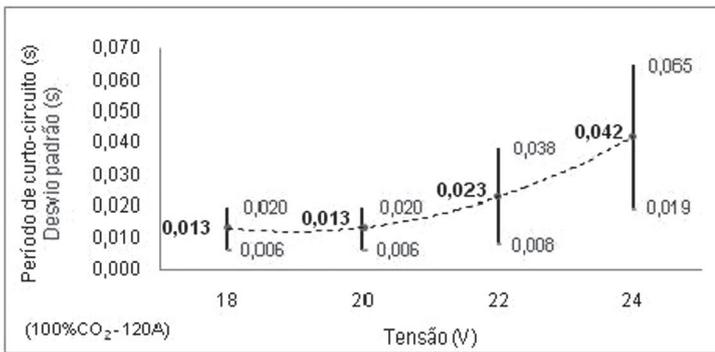


(a) - 120 A

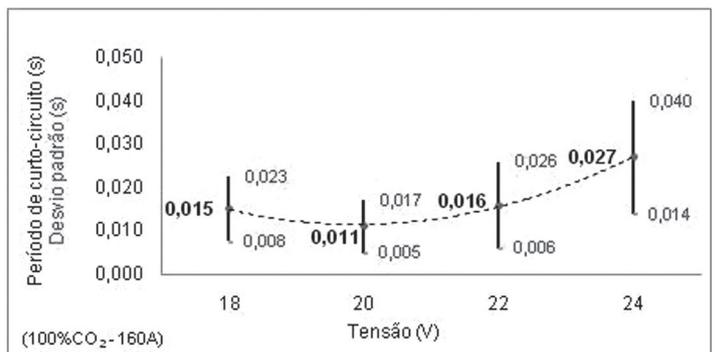


(b) - 160 A

Figura 5. Período e Desvio Padrão do processo GMAW, transferência por curto-circuito e gás Ar+25%CO₂.



(a) - 120 A



(b) - 160 A

Figura 6. Período e Desvio Padrão do processo GMAW, transferência por curto-circuito e gás 100%CO₂.

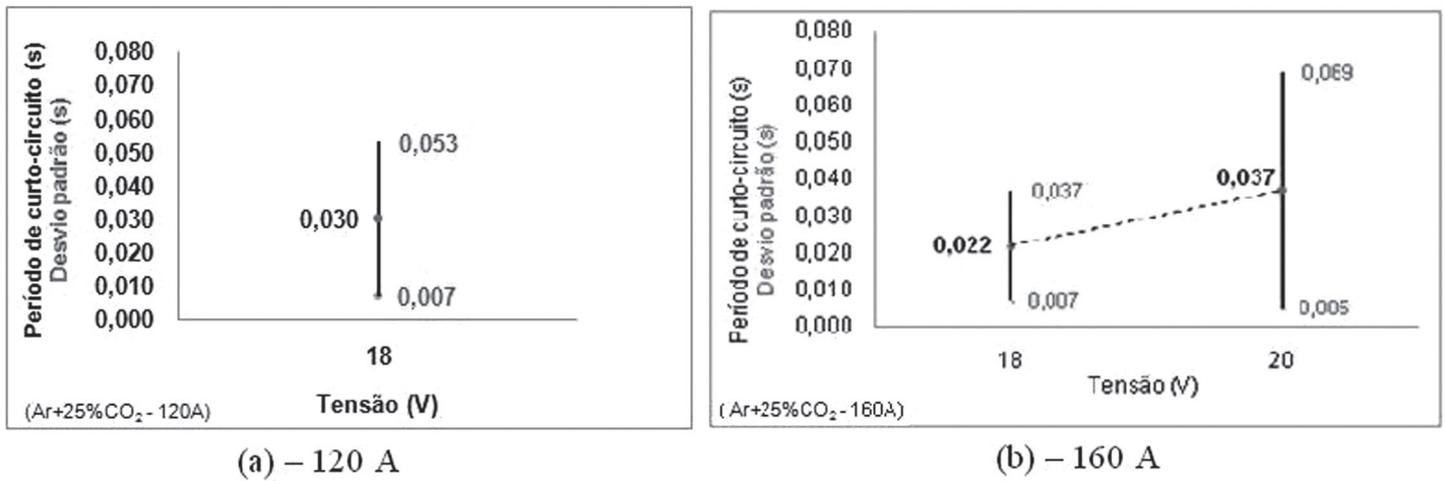


Figura 7. Período e Desvio Padrão do processo FCAW, transferência por curto-circuito e gás Ar+25%CO₂.

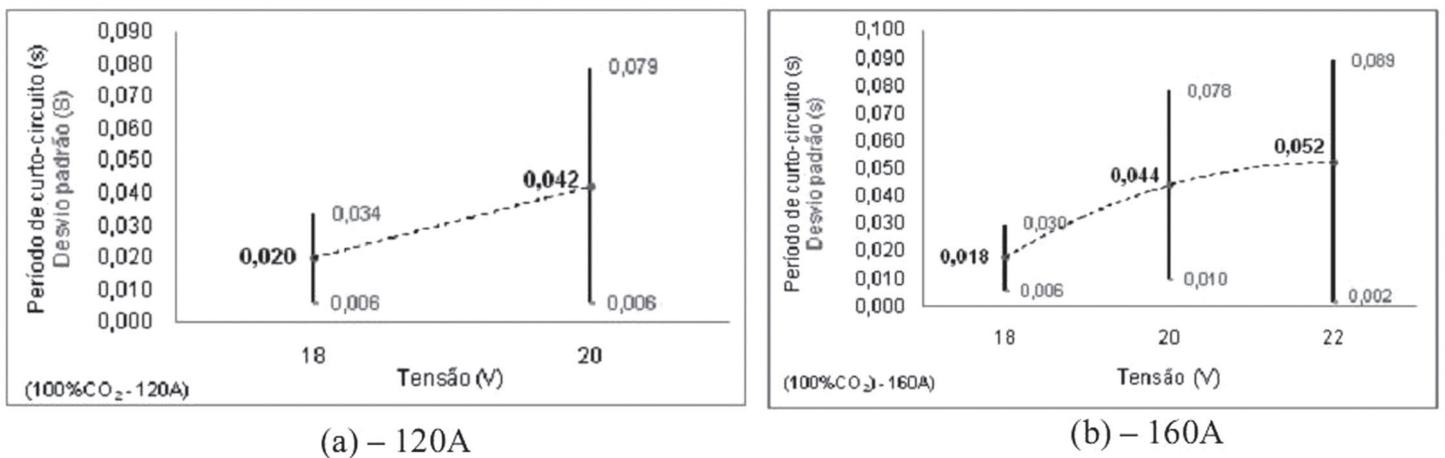


Figura 8. Período e Desvio Padrão do processo FCAW, transferência por curto-circuito e gás 100%CO₂.

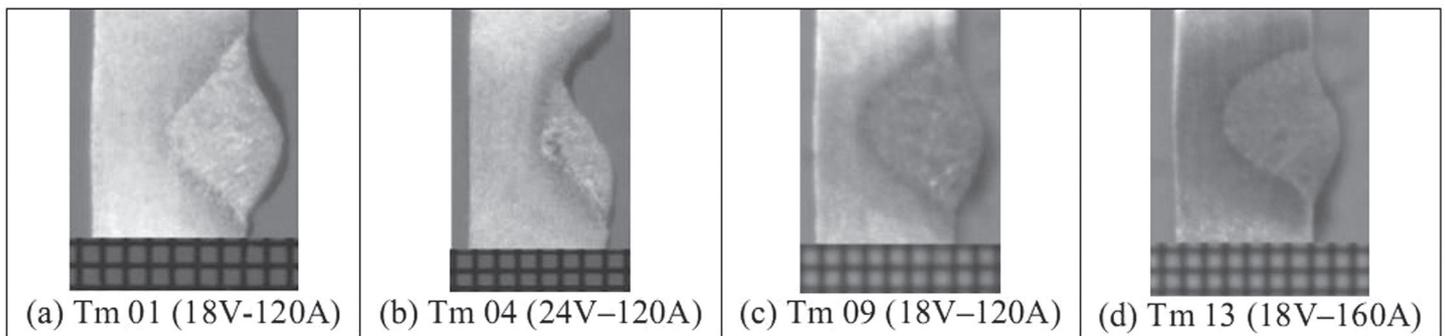


Figura 9. Perfis dos cordões soldados com o processo GMAW: (a) e (b) com proteção do gás Ar + 25%CO₂; e (c) e (d) com proteção do gás 100%CO₂.

período de curto-circuito ($\sigma_{\text{pcc}}/P_{\text{cc}}=0,6888$) e maior frequência de curto-circuito.

3.2. Análise do Escorrimento do Cordão de Solda

Para análise do escorrimento (E) dos cordões de solda foram utilizados todos os ensaios realizados, independente do tipo de transferência metálica encontrada. Estes valores estão

apresentados na Tabela 2, A Figura 9 mostra a condição de menor e maior escorrimento para os dois gases utilizados no processo GMAW.

Verificou-se, processo GMAW, que todos os cordões apresentaram falta de preenchimento na parte superior de sua largura. Este fato é mais acentuado com gás Ar+25%CO₂ e tensão de 24 V, na corrente de 120 A (Tm 04 da Tabela 2 e Figura 9(b)). Esta falta de preenchimento na lateral do cordão foi aumentando com a elevação da tensão de soldagem. Os mesmos fatos forma

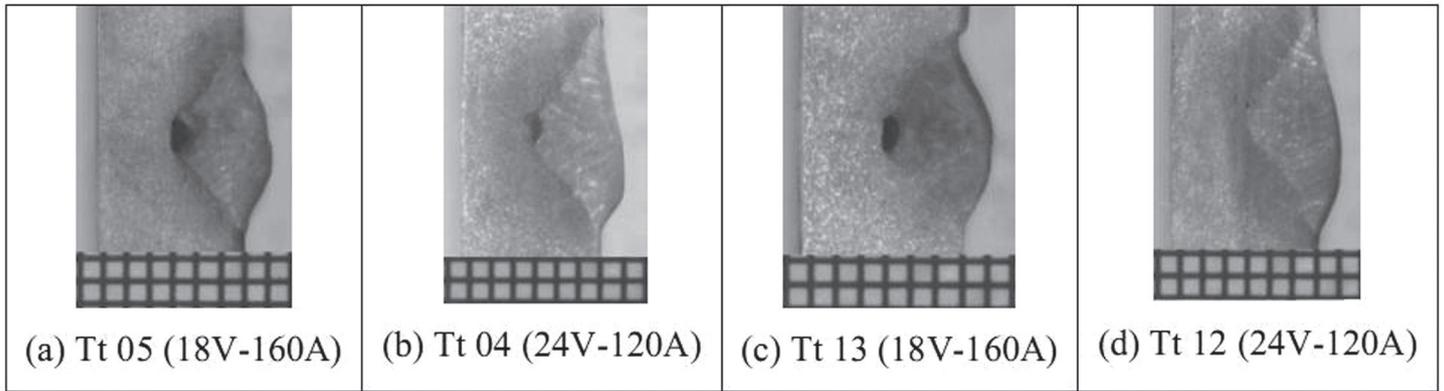
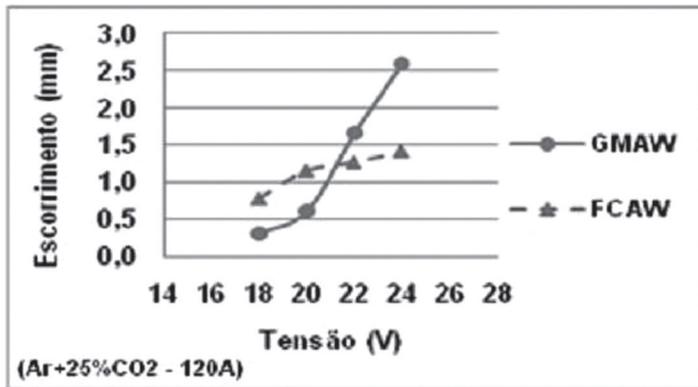
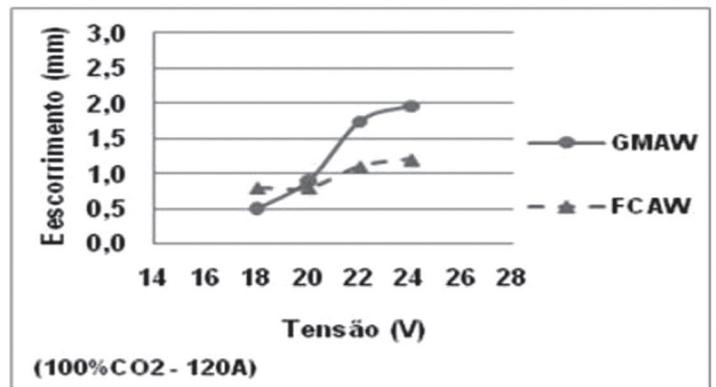


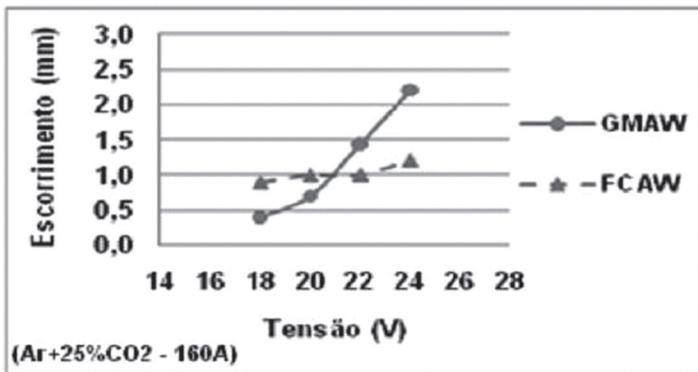
Figura 10. Perfis dos cordões soldados com o processo FCAW: (a) e (b) com proteção do gás Ar + 25%CO₂; e (c) e (d) com proteção do gás 100%CO₂.



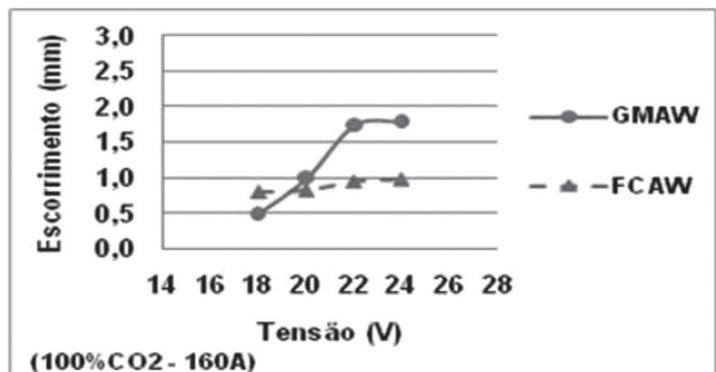
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 11. Escorrimento dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂; (c) 120 A e gás 100%CO₂; (d) 160 A e gás 100%CO₂.

percebidos com gás 100%CO₂.

A Figura 10 mostra os perfis dos cordões para a condição de menor e maior escorrimento para os dois gases utilizados no processo FCAW. Verifica-se (Figura 10 (a), (b) e (c)) a presença de falta de fusão no fundo do chanfro (raiz do chanfro), o que aconteceu para a maioria dos ensaios realizados com o arame tubular. Com o gás 100% CO₂, o cordão de solda apresentou fusão na raiz do chanfro nas tensões de 22 e 24 V e corrente de 160A, o que indica a maior energia relativa imposta, o que,

juntamente com o gás 100%CO₂, evita esta descontinuidade. Para a corrente de 120 A (100%CO₂) este fato só foi evidenciado para a condição de 24 V (Figura 10(d) (Tt 12)).

A Figura 11 apresenta os valores medidos do escorrimento em função da tensão de soldagem para ambos os processos. Ocorreram escorrimentos para ambos os gases e em todas as correntes e tensões utilizadas. Com o aumento da tensão de soldagem aumenta também o comprimento de arco (podendo alterar o modo de transferência metálica) e tendo como

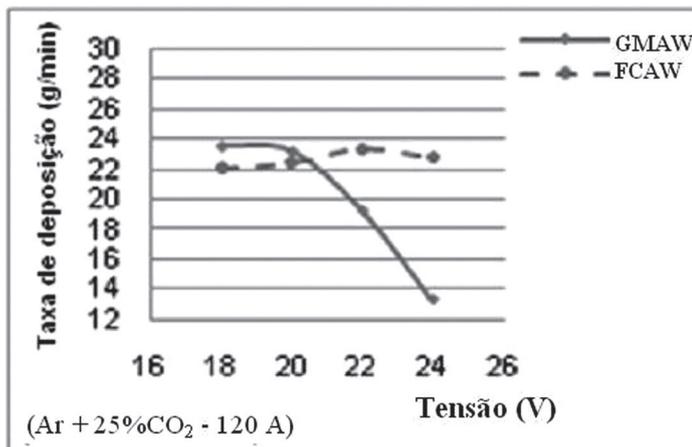
conseqüência um maior escorrimento do cordão de solda, onde as gotas fundidas com maiores volumes e fluidez têm dificuldades para chegar à poça de fusão, aumentando também os níveis de respingos. Este fato foi mais acentuado para o processo GMAW. Fatos semelhantes foram verificados no trabalho de Campos [10] onde é citado que na transferência pelo modo globular (maior comprimento de arco) e soldagem fora de posição as gotas formadas com maior energia (altas correntes e tensões) são bastante fluidas e podem produzir poças de fusão que não são suportadas pela tensão superficial.

Verificou-se nesta pesquisa que o processo FCAW mantém a chegada das gotas à poça de fusão mesmo com as mudanças de modo de transferência, maiores tensões de soldagem. Este fato está relacionado à característica de transferência metálica do processo FCAW. Este arame com seu fluxo tipo rutilico produzem arcos relativamente mais largos e com a presença da escória, considerada de rápida solidificação, mantém ancorado o material fundido na poça de fusão, apresentando menor nível de escorrimento da poça, quando comparado com o processo GMAW em maiores tensões de soldagem.

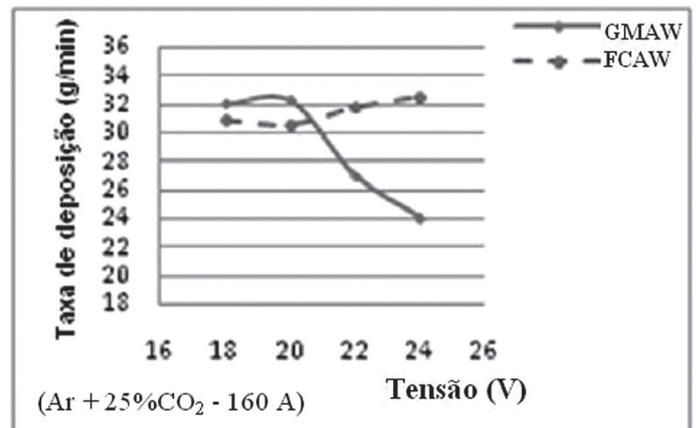
Comparando-se os processos (GMAW com o FCAW) em relação ao escorrimento, pode-se afirmar que na região de transferência pelo modo curto-circuito do processo GMAW (tensões de 18 e 20 V) este processo apresenta menor valor de escorrimento, provavelmente devido ser a região de melhor regularidade de transferência metálica, mostrada no item acima. Para maiores tensões (22 e 24 V) o processo FCAW apresentou melhores resultados de escorrimento que o GMAW, provavelmente devido à mudança no modo de transferência metálica (transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito). Entretanto, no processo FCAW ocorreu falta de fusão no fundo do chanfro na posição de soldagem horizontal.

3.3. Análise da Taxa de Deposição e Rendimento de Deposição

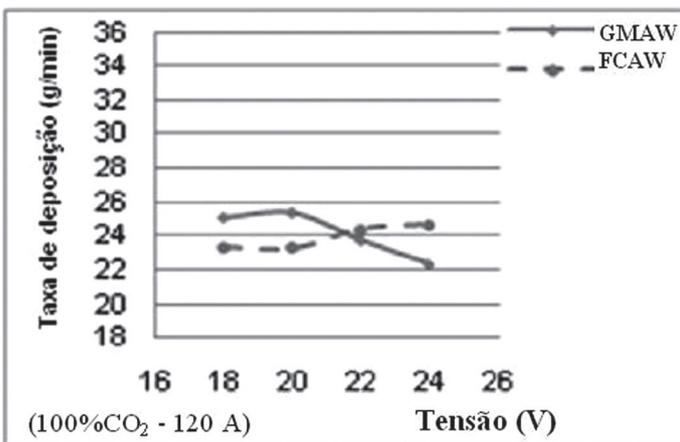
A taxa de deposição, que é a massa depositada em determinado tempo, pode sofrer alteração com o aumento da tensão de soldagem (maior comprimento do arco), podendo causar aumento de respingos reduzindo a taxa de deposição. O



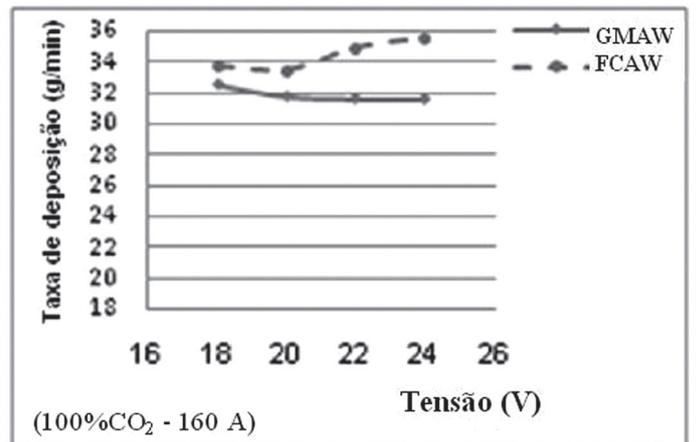
(a)



(c)

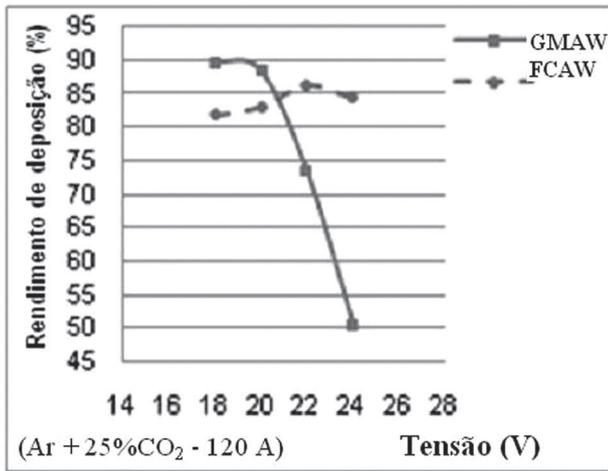


(b)

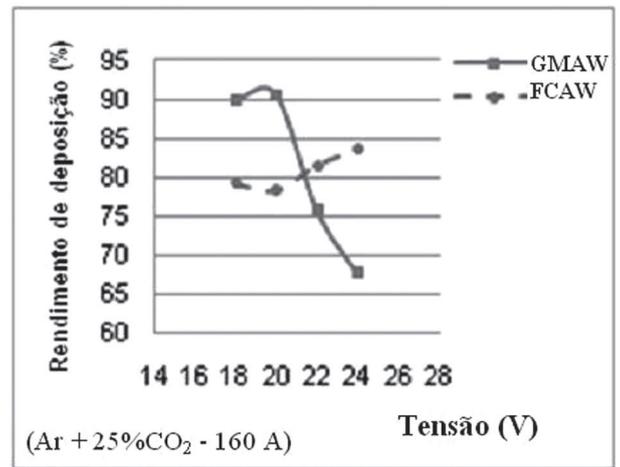


(d)

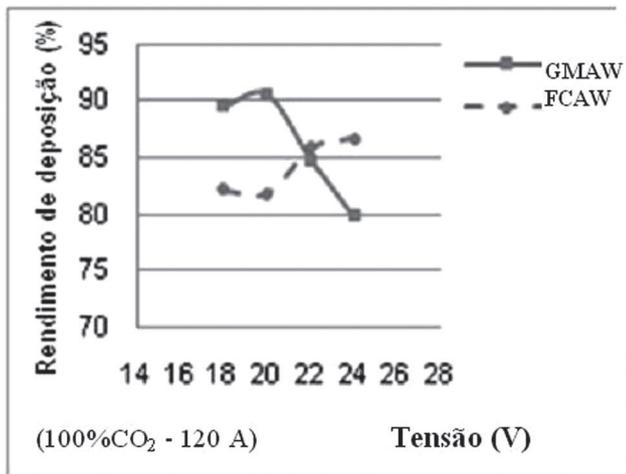
Figura 12. Taxa de deposição (T_d) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 120 A e gás 100%CO₂; (c) 160 A e gás Ar25%CO₂ e (d) 160 A e gás 100%CO₂.



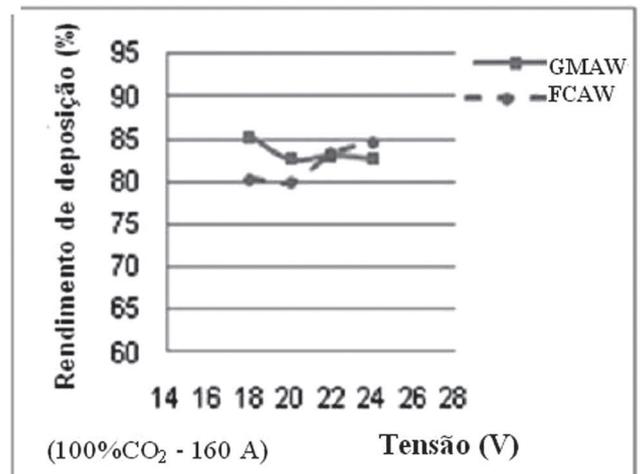
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 13. Rendimento de deposição (η_D) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 120 A e gás 100%CO₂; (c) 160 A e gás Ar25%CO₂ e (d) 160 A e gás 100%CO₂.

processo GMAW, gás de proteção Ar+25%CO₂ e correntes de 120 A, Figura 12(a), teve semelhantes taxas de deposição com as tensões de 18 e 20 V. Esses resultados podem ser atribuídos à condição de melhor regularidade de transferência metálica por curto-circuito. Fatos semelhantes ocorreram também para as outras condições para esta faixa de tensão de soldagem (Figuras 12(b) e (c)). Com o aumento da tensão para 22 V e 24 V houve redução acentuada da taxa de deposição. Estas duas faixas de tensões apresentaram baixos valores de frequência de curto-circuito (modo misto de transferência metálica – curto-circuito e globular) ocasionando aumento de respingos e tendo como consequência redução da taxa de deposição. Fatos semelhantes ocorreram com a corrente de 160A (Figura 12(c)) e com menor intensidade com a corrente de 120A com gás de 100%CO₂ (Figura 12(b)). Na corrente de 160 A esse processo manteve as taxas de deposição praticamente constantes, Figura 12(d). Esses valores próximos da taxa de deposição podem ser atribuídos à

melhor regularidade de transferência metálica em comparação com as condições anteriores. Neste caso, com maior nível de corrente (maior velocidade do arame eletrodo) ocorreu uma menor variação na frequência de curto-circuito com o aumento da tensão de soldagem com o gás utilizado (100%CO₂).

Verifica-se no processo FCAW (Figura 12) que a variação da taxa de deposição com a tensão de soldagem foi menos acentuada que no processo GMAW. Esses fatos indicam que, para o processo FCAW, mesmo com a mudança de transferência conduzida pelo fluxo com curto-circuito para sem curto-circuito não ocorre mudanças significativas de regularidade e as gotas continuaram a atingir a poça de fusão, alterando pouco a taxa de deposição.

Com base no exposto acima e Figura 12(a), (b) e (c) a taxa de deposição é maior para o processo GMAW em relação ao processo FCAW na faixa de regularidade de transferência metálica por curto-circuito, tensões de 18 e 20 V. Para valores de

tensões maiores, o valor da taxa de deposição se inverte, e isto ocorre em função da característica de transferência metálica. No processo GMAW ocorreu o modo de transição de transferência metálica de curto-circuito para globular, dificultando a chegada da gota na poça de fusão na posição horizontal. Já no processo FCAW a transferência metálica ocorreu através do fluxo com e sem curto-circuito, facilitando a chegada da gota na poça de fusão. Na condição de 160 A e gás de proteção de 100%CO₂ (Figura 12(d)), o processo FCAW foi melhor para todas as condições analisadas. Este fato se deve provavelmente à melhor condição de soldagem para o tipo de transferência metálica obtida por esse processo.

Os resultados obtidos nos ensaios com o rendimento de deposição estão apresentados na Tabela 2 e Figura 13. No processo GMAW, independente das condições de soldagem deste trabalho, os melhores resultados correram para tensões de soldagem em 18 e 20 V (transferência por curto-circuito com maiores frequências) o que facilita a chegada da gota na poça de fusão para a posição horizontal de soldagem. Para maiores tensões ocorre uma redução acentuada de rendimento de deposição (Figuras 13 (a), (b) e (c)), devido provavelmente a mudança de transferência metálica do modo curto-circuito para o misto (baixa frequência de transferência metálica), dificultando a chegada da gota na poça de fusão na posição horizontal. Para o gás 100%CO₂ e corrente de 160 A (Figura 13(d)) esta redução foi menos acentuada, devido provavelmente à maior energia de soldagem e melhor condição de regularidade de transferência metálica. Isto mostra que o tipo de gás de proteção altera o perfil do arco elétrico facilitando a transferência da gota para a poça de fusão.

De um modo geral, pode-se afirmar que na soldagem no processo GMAW, em ambas as correntes e para os dois gases de proteção, a condição de transferência metálica por curto-circuito (tensão de 18 e 20 V) apresentou as melhores taxas de rendimento de deposição (valores médios próximo de 90%) do que o processo FCAW, na posição horizontal.

Para o processo FCAW os melhores rendimentos de deposição foram obtidos com tensões maiores (taxas de deposição com valores médios próximos a 85%). Este fato está relacionado com a característica de transferência metálica deste processo, onde o fluxo contido dentro do arame eletrodo contribui para a transferência da gota para a poça de fusão. Estes resultados estão próximos ao encontrado por Garcia [3], em soldagem semelhante com ambos os gases em posição plana, que nas faixas aproximadas de 150 A e 20 V o arame maciço teve o valor médio do rendimento de deposição de 92% e para essa mesma faixa de corrente e na faixa de 25 V o arame tubular teve o valor médio do rendimento de deposição igual a 85%. As pequenas diferenças dos resultados destes dois estudos nos fazem pensar que a posição horizontal contribui para o menor valor do rendimento de deposição, pois a posição plana favorece a transferência das gotas para a poça de fusão.

É interessante observar que as melhores condições de regularidade de transferência metálica conduzido pelo fluxo com curto-circuito do processo FCAW ocorreram para menores tensões, maiores frequência de curto-circuito. Entretanto, os melhores rendimentos de deposição ocorreram para valores

maiores de tensões (22 e 24 V). Isto demonstra que a melhor condição de soldagem, baseado no rendimento de deposição, é para maiores valores de tensão, isto é, ter uma condição de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito, pois o curto-circuito deste processo na posição horizontal gera maior quantidade de respingos.

4. Conclusões

As análises dos resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho tornaram possível chegar às seguintes conclusões:

- A melhor condição de regularidade de transferência metálica por curto-circuito do processo GMAW com o gás de proteção Ar+25%CO₂ foi a condição de soldagem com 18 V e 160 A. Para o gás de proteção de 100%CO₂ os melhores valores dos índices de regularidades de transferência metálica ocorreram para tensões de 18 e 20 V para a corrente de 120 V;

- Para o processo FCAW com o gás de proteção Ar+25%CO₂ a melhor condição de estabilidade de transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito ocorreu para 18 V, tanto para a corrente de 120 A, como para a corrente de 160 A. Fato semelhante ocorreu para o gás de proteção 100%CO₂;

- Para a soldagem do processo GMAW, em ambas as correntes e para os dois gases de proteção, na condição de transferência metálica por curto-circuito, a região de maior regularidade de transferência (tensão de 18 e 20 V) apresenta maior rendimento de deposição na posição horizontal em relação ao processo FCAW;

- Os melhores rendimentos de deposição do processo FCAW ocorreram para valores maiores de tensões (22 e 24 V) para os dois valores de correntes utilizados, região de predominância de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito;

- Em termos de escorrimento, os melhores resultados (menor escorrimento) ocorreram com o processo GMAW na condição de 20 V (região de maior estabilidade na transferência por curto-circuito). Para o processo FCAW os valores do escorrimento tiveram valores próximos, tendo uma condição melhor que o GMAW para maiores valores de tensão de soldagem (região de predominância de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito);

- Para o processo FCAW ocorreu falta de penetração com inclusões de escórias na raiz do cordão para as maiorias das condições utilizadas neste trabalho. A exceção ocorreu para maiores tensões nos ensaios com 100%CO₂.

5. Agradecimentos

Os autores expressam o seu agradecimento às instituições que apoiaram a realização deste trabalho, FAPEMIG, CNPq, CAPES e UFU/FEMEC.

6. Referências

- [1] FORTES, C. Arames Tubulares, Literatura ESAB BR, Contagem, 101 p. Maio, 2004.
- [2] GOMES, E. B. "Análise do comportamento da soldagem por

- Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi”, 2006. 119 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- [3] GARCIA, R. P. “Uma avaliação dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos, usando consumível para aço estrutural”: 2010, 133 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [4] NORRISH, J. “Advanced welding process”. IOP Publishing Ltd. 1992, 375 p.
- AWS, 1991, “Welding Handbook. Welding Processes”. 8th ed. Miami-USA, AWS, v. 2, p. 955.26Cm.
- [5] DUTRA, J. D.; BAIXO, C. E. I. O Estudo da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG. Revista Soldagem e Materiais, n. 21, p.32-36, Jan./Mar. 1990.
- [6] SCOTTI, A. e PONOMAREV, V. “Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho”. São Paulo, Artliber Editora, 2008, 284 p.
- [7] STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.11, n.3, p.147-155, 2006.
- [8] SOUZA, C. I. “Análise comparativa dos processos de soldagem gmaw e fcaw com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal”. 2011, 121p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [9] LIMA A. C.; FERRARESI, V. A. “Estudos dos modos de transferência metálica de um arame tubular autoprottegido com variação na distância bico de contato peça”. Soldagem & Inspeção, 2006, vol. 11, n.3, jul/set.
- [10] CAMPOS, P. T. Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e Arame Tubular. Agosto de 2005. 61 p. Dissertação de mestrado. PUC do Paraná, Curitiba.