

Tema: Soldagem

## CARACTERIZAÇÃO DO FORMATO DO CORDÃO DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX BAIXA LIGA UNS S82441 PARA DIFERENTES FORMATOS DE CORRENTES DE SOLDAGEM NO PROCESSO MIG/MAG-TC\*

Evandro Armini de Pauli<sup>1</sup>  
Sérgio Duarte Brandt<sup>2</sup>

### Resumo

Os aços inoxidáveis duplex apresentam propriedades superiores, quando comparados aos aços austeníticos e ferríticos, tornando-o bastante competitivo no mercado, inclusive na substituição dos aços AISI 316 e 316L. A soldabilidade dos aços duplex baixa liga, como o UNS S82441, não é tão boa quanto a dos austeníticos, exigindo um controle rígido da composição química do metal de solda e dos ciclos térmicos de soldagem, que afetam a fração volumétrica de austenita na junta soldada. O modo pelo qual o material é transferido no arco determina a estabilidade do processo e afeta fortemente a qualidade/geometria do cordão. O presente trabalho tem como objetivo estudar o formato do cordão de juntas soldadas do UNS S82441 comparando-o com os tipos de formato de onda da corrente de soldagem. Foram utilizados os processos MIG/MAG convencional, pulsado e curto-circuito controlado na realização de cordões de solda em chapas de dimensões de 100x300x6,1 mm com material de adição de arame tubular de núcleo metálico segundo a norma AWS A5.22 e gás de proteção com 98%Ar + 2%CO<sub>2</sub>. O metal de base foi caracterizado macroestruturalmente. Nas juntas soldadas foram realizadas macrografias para obtenção das características geométricas. O ataque eletrolítico foi efetuado com ácido oxálico 10%. Os resultados mostraram que a maior penetração e largura do cordão ocorreram para o MIG/MAG pulsado. O valor para a penetração foi de 4,3 mm e da largura 11,2 mm.

**Palavras-chave:** Soldagem; Aço inoxidável baixa liga duplex; Formato do cordão.

### CHARACTERIZATION OF THE SHAPE OF THE BEAD WELDED JOINTS OF DUPLEX STAINLESS STEEL LOW ALLOY UNS S82441 FOR DIFFERENT FORMATS OF WELDING CURRENTS IN THE PROCESS MIG/MAG-TC

#### Abstract

Duplex stainless steels have superior mechanical and chemical properties when compared to austenitic and ferritic stainless steels, making them very competitive in the market, including the replacement of AISI 316 and 316L for some applications. The weldability of lean duplex steel, UNS S82441 is inferior to austenitic stainless steels, requiring tight control of the chemical composition of the weld metal and the weld thermal cycles, which affect the volumetric fraction of austenite in the welded joint. The manner in which the material is transferred through electric arc determines the stability of the process and greatly affects the quality and bead geometry. The present work aims to study the shape of the UNS S82441 welded beads comparing different types of GMAW welding current waveform. The conventional GMAW process, pulsed GMAW and controlled short-circuit GMAW were used to weld samples of 100x300x6,1 mm dimensions, E2209 metal cored filler wire, according to AWS A5.22, and 98% Ar + 2% CO<sub>2</sub> shielding gas. The base metal was characterized macrostructurally utilizing electrolytic etching with 10% oxalic acid. The weld bead geometric characteristics were measured for it welding condition. The results showed that the greatest bead width and bead penetration occurred for pulsed GMAW, which presented weld bead penetration of 4.3 mm and weld bead width of 11.2 mm.

**Keywords:** Welding; Lean duplex stainless steel; Weld bead shape.

<sup>1</sup> Aluno de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor, Engenharia Metalúrgica, Professor Titular, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

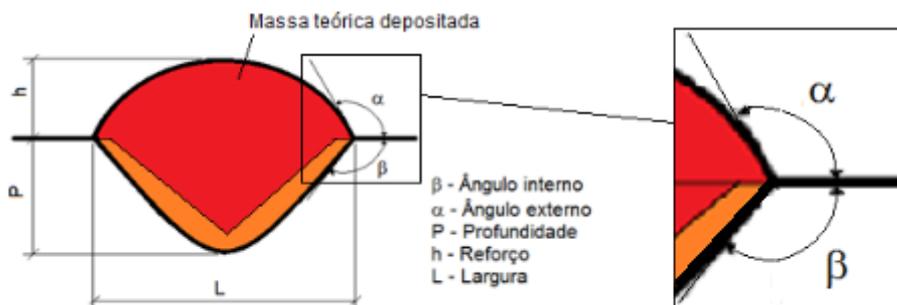
Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni-Mo-N, que possuem o nitrogênio como elemento de liga substituindo parcialmente o níquel [1]. Apresentam uma microestrutura mista de ferrita e austenita, na proporção de aproximadamente 50% de cada fase [1,2]. Possuem boa tenacidade e combinam resistência mecânica superior com elevada resistência à corrosão [3,4], devido à porção de austenita presente. Apresentam propriedades superiores, quando comparado aos aços austeníticos e ferríticos, tornando-o bastante competitivo no mercado, inclusive na substituição dos aços AISI 316 e 316L. Por apresentar grande tendência à formação de precipitados intermetálicos e uma solidificação iniciada como ferrita primária, a soldabilidade dos aços duplex baixa liga, como o UNS S82441, cuja denominação 'baixa liga' advém de teores mais baixos de Ni e Mo no aço, é pior que a dos austeníticos, exigindo um controle rígido da composição química do metal de solda e dos ciclos térmicos de soldagem [3], que afetam a fração volumétrica de austenita na junta soldada.

O modo de transferência metálica varia de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados [5], sendo o número de parâmetros a regular no processo MIG/MAG muito grande e todos eles em maior ou menor grau, governam a geometria do cordão, que também se baseia na soldabilidade [6-8]. O modo pelo qual o material é transferido no arco determina a estabilidade do processo e afeta fortemente a qualidade/geometria do cordão e seu controle pode garantir uma transferência metálica mais uniforme, uma poça de fusão de menor volume e uma relação penetração/taxa de deposição controlada [8].

A corrente de soldagem afeta o modo de transferência do metal de adição, controla fortemente a velocidade de fusão do arame e aumenta a penetração, o reforço e a largura do cordão quando as demais variáveis são mantidas constantes [9].

O formato do cordão de solda e a penetração também são afetados pelo ângulo de trabalho do eletrodo em relação à junta que passa pelo processo de soldagem. Tal efeito sobre a qualidade do cordão de solda considera-se maior que o da tensão de arco ou o da velocidade de avanço [10]. Um aumento ou diminuição da velocidade modifica o grau de penetração, largura do cordão e sua forma geométrica e influencia inversamente proporcional na energia de soldagem.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o formato do cordão de juntas soldadas do UNS S82441 comparando-os com tipos de formato de onda da corrente de soldagem. Para tanto, buscou-se avaliar o efeito dos formatos de onda utilizando os processos MIG/MAG curto-circuito controlado (PP), convencional (CV) e pulsado (P) sobre as características geométricas (ângulos internos e externos, penetração, reforço e largura), mostradas na Figura 1, na realização de cordões de solda.



**Figura 1.** Representação das características geométricas e massa teórica depositada.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A Figura 1, também mostra, a massa teórica depositada e uma ampliação dos ângulos, interno ( $\beta$ ) e externo ( $\alpha$ ), que regem a profundidade de penetração e reforço do cordão, respectivamente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As soldagens foram executadas em chapas de aço duplex UNS S82441 de dimensões 100x300x6,1 mm, preparadas com ângulo de bisel de 22,5° e face de raiz de 3 mm. As chapas foram soldadas com adição de arame tubular de núcleo metálico  $\varnothing$  1,2 mm, com classificação AWS E2209, segundo a norma AWS A5.22, e gás de proteção 98%Ar + 2%CO<sub>2</sub> e vazão de gás de 15l/min. Para cada tipo de formato de onda da corrente de soldagem foram executados dois cordões de solda mantendo-se a mesma distância do bico à peça de 15 mm. Para análise do formato do cordão deste trabalho foi considerado somente o passe com chanfro de 45°. A raiz foi goivada por disco abrasivo até encontrar o material do 1º cordão.

Procurou-se manter uma relação próxima, para cada tipo de formato de onda da energia de soldagem a fim de tentar manter o volume depositado constante para comparação.

O metal de base foi caracterizado em microscopia ótica e nas juntas soldadas foram realizadas macrografias para obtenção das características geométricas em amostras retiradas das seções transversais aos cordões de solda. O ataque químico foi efetuado com ácido oxálico 10%.

A Tabela 1 apresenta a composição química nominal do aço duplex UNS S82441, conforme certificado de análise química fornecido pela empresa.

**A Tabela 1.** Composição química nominal do aço duplex UNS S82441

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Ti
0,02	0,39	2,9	0,021	0,001	24,08	3,62	1,57	0,269	0,42	0,004

As variáveis do processo utilizadas na soldagem dos cordões de solda são mostradas na Tabela 2. Como já mencionado, procurou-se manter próximas a energia de soldagem variando-se a corrente, a velocidade de soldagem e a tensão. Nota-se que os maiores valores das variáveis são para tipo de formato de onda da de soldagem PP, exceto para a energia de soldagem e massa teórica depositada.

**Tabela 2.** Variáveis do processo utilizadas nos cordões de solda

Variáveis do processo	Tipo de formato de onda da corrente de soldagem		
	PP	CV	P
Corrente Média (A)	197,00	180,00	193,00
Tensão Média (V)	27,21	26,71	26,97
Velocidade de soldagem (mm/s)	6,67	5,83	6,17
Energia de soldagem (J/mm)	804,10	824,20	844,10
Potência do arco (A*V)	5360,40	4807,80	5205,20
Razão entre potências	1,115	1,000	1,083
Velocidade de alimentação do arame (cm/s)	17,08	15,00	15,83
Massa teórica depositada (g/s)	1,96	2,06	2,22

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

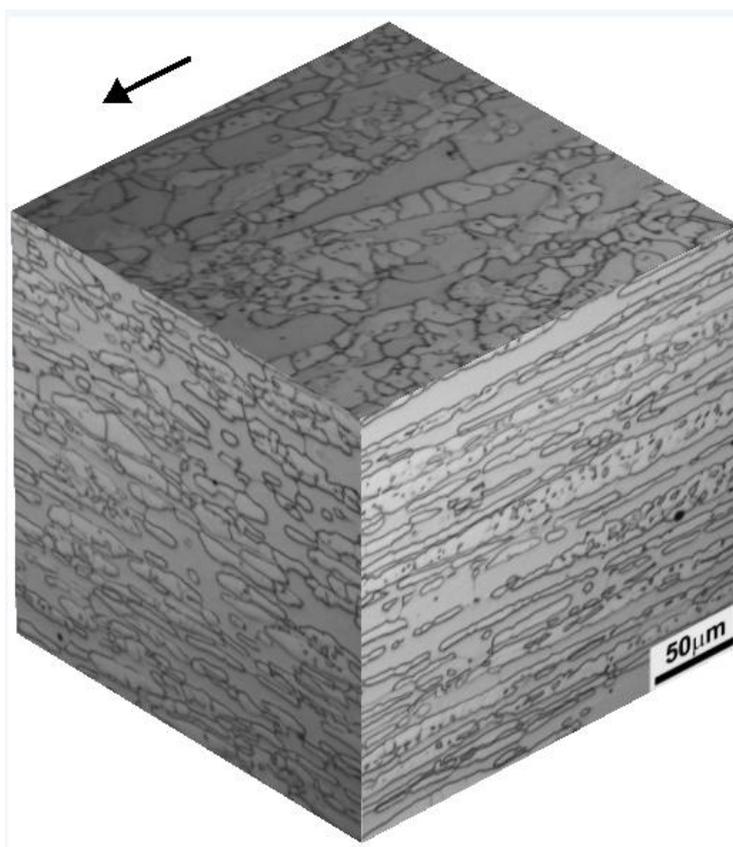
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os resultados médios medidos das características geométricas retirados em ensaio de macrografia (ângulos internos e externos, penetração, reforço e largura), visualizados na Figura 1, dos cordões de solda.

**Tabela 3.** Resultados de características geométricas

Tipo de formato de onda da corrente de soldagem	Ângulos internos °C		Ângulos externos °C		Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
	Lado esquerdo	Lado direito	Lado esquerdo	Lado direito			
PP	116,5	121,2	148,6	155,2	3,4	2,6	9,9
CV	133,3	117,9	149,6	144,1	2,8	3,1	11,0
P	117,0	123,4	159,8	151,5	4,3	2,9	11,2

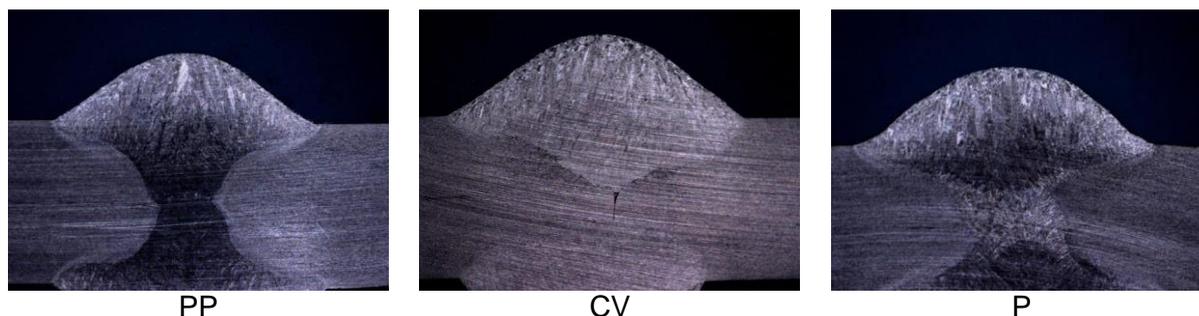
A Figura 2 apresenta a micrografia nas três direções do aço inoxidável duplex UNS S82441. A direção de laminação é indicada pela seta e a forma como os grãos são dispostos, após laminação, mostrada para cada vista.



**Figura 2.** Micrografia nas três direções da chapa do aço inoxidável duplex S82441. Ataque eletrolítico: 10% de ácido oxálico. Aumento: 200X.

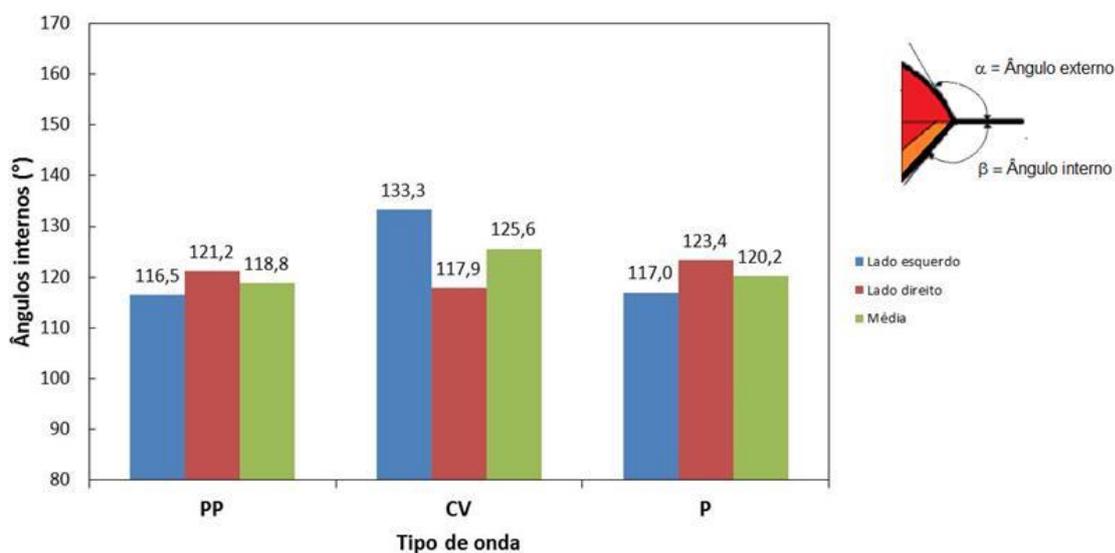
O formato dos cordões das amostras retiradas das seções transversais aos cordões de solda é mostrado na Figura 3, onde apresenta as fotos retiradas por microscópio ótico que foram levadas à lupa para retirada das características geométricas, utilizadas nesse trabalho.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

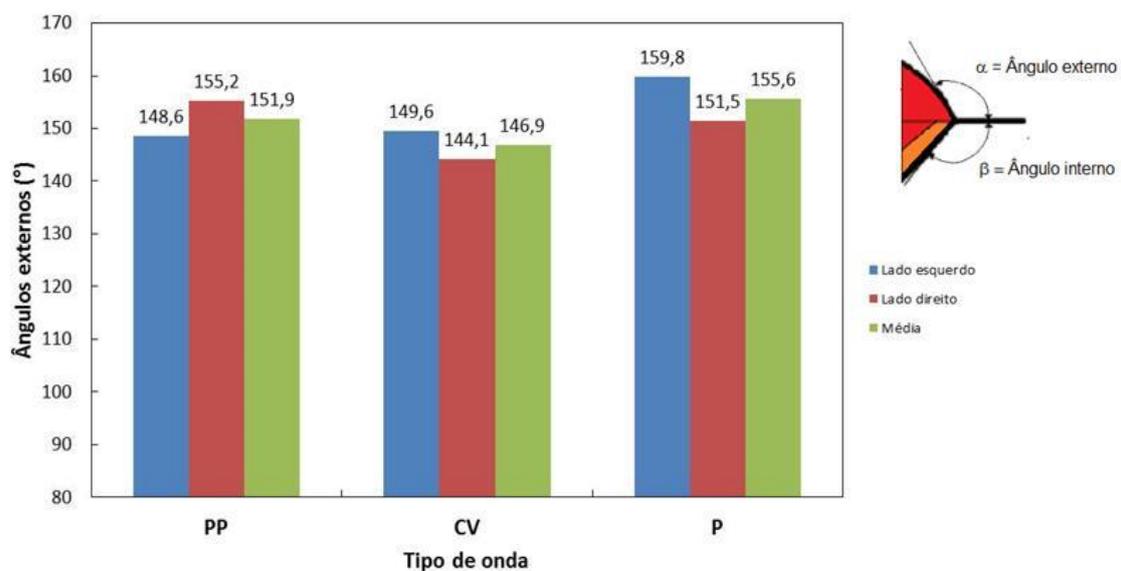


**Figura 3.** Macrografia dos cordões de solda para cada tipo de formato de onda da corrente de soldagem.

As Figuras 4 e 5 apresentam respectivamente os ângulos internos e externos em função do tipo de formato de onda da corrente de soldagem.



**Figura 4.** Ângulos internos em função do tipo de formato de onda da corrente de soldagem.



**Figura 5.** Ângulos externos em função do tipo de formato de onda da corrente de soldagem.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

As diferenças ocorridas entre os ângulos do lado direito e do lado esquerdo, observadas na Tabela 4, são afetadas pela orientação do eletrodo em relação à junta; diferença de altura entre as superfícies ao soldar e dilatação das peças ocorrida na soldagem por falta de fixação adequada.

A maior diferença (1,13) ocorreu com ângulo interno e tipo de formato de onda da corrente de soldagem CV e a menor diferença (0,96) ocorreu tanto com ângulo interno quanto ângulo externo e tipo de formato de onda da corrente de soldagem PP.

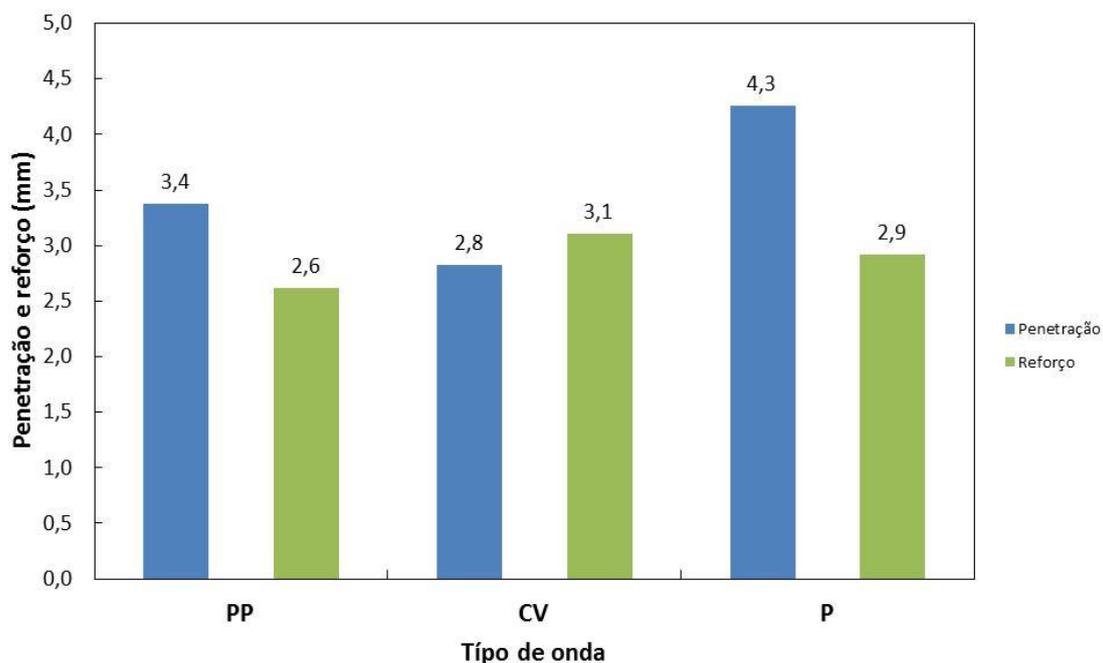
**Tabela 4.** Relação entre os ângulos lado esquerdo e lado direito para cada cordão de solda

Tipo de formato de onda da corrente de soldagem	Ângulo interno	Ângulo externo
PP	0,96	0,96
CV	1,13	1,04
P	0,95	1,05

A Figura 6 apresenta a penetração e reforço em função do tipo de formato de onda da corrente de soldagem. Observa-se que todos os cordões, exceto para CV, apresentaram a penetração maior que o reforço sendo a maior penetração (4,3 mm) obtida com o passe de raiz com tipo de formato de onda da corrente de soldagem P. O maior reforço (3,1 mm) foi obtido com tipo de formato de onda da corrente de soldagem CV, resultando um cordão mais convexo apresentando o menor fator de forma (Tabela 5) de todos os cordões.

**Tabela 5.** Fator de forma

Tipo de formato de onda da corrente de soldagem	Fator de forma	Razão entre os fatores de forma
PP	0,34	1,36
CV	0,25	1,00
P	0,38	1,52



**Figura 6.** Penetração e reforço em função do tipo de formato de onda da corrente de soldagem.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A largura do cordão de solda para todos os tipos de formato de onda da corrente de soldagem utilizados é mostrada na Figura 7. Nota-se que o maior valor (11,2 mm) ocorreu para o passe com tipo de formato de onda da corrente de soldagem P.

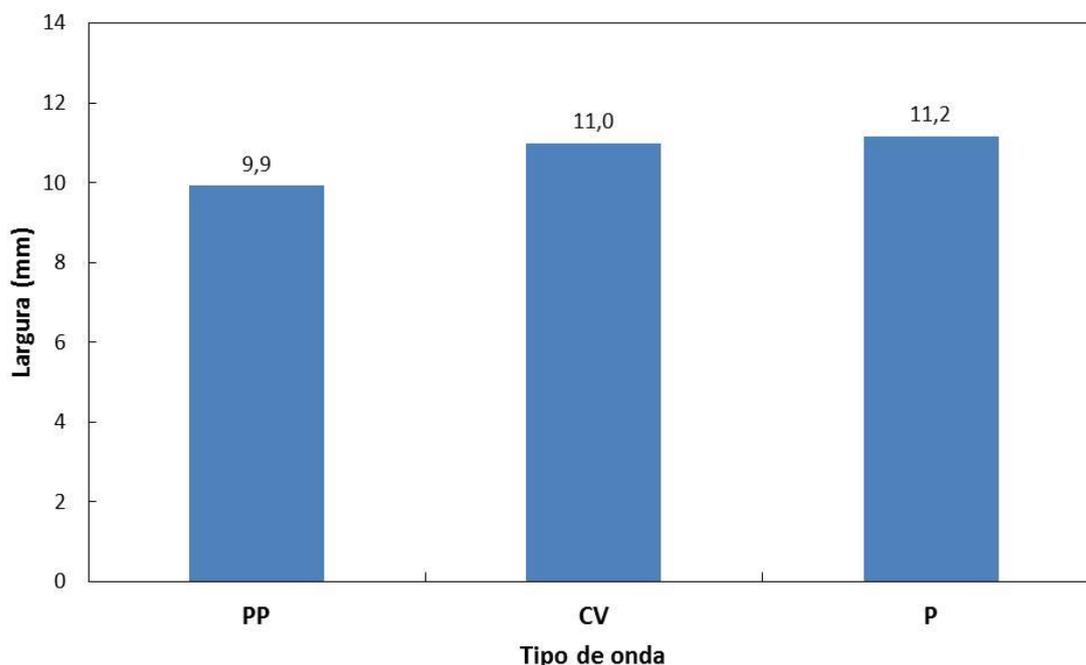


Figura 7. Largura em função do tipo de formato de onda corrente de soldagem.

As Figuras de 8 a 15 mostram os gráficos da relação de algumas variáveis do processo utilizadas nos cordões de solda com a taxa de deposição teórica, calculada a partir da área do cordão de solda, obtida pela lupa. A maior taxa de deposição teórica foi para o tipo de formato de onda da corrente de soldagem P.

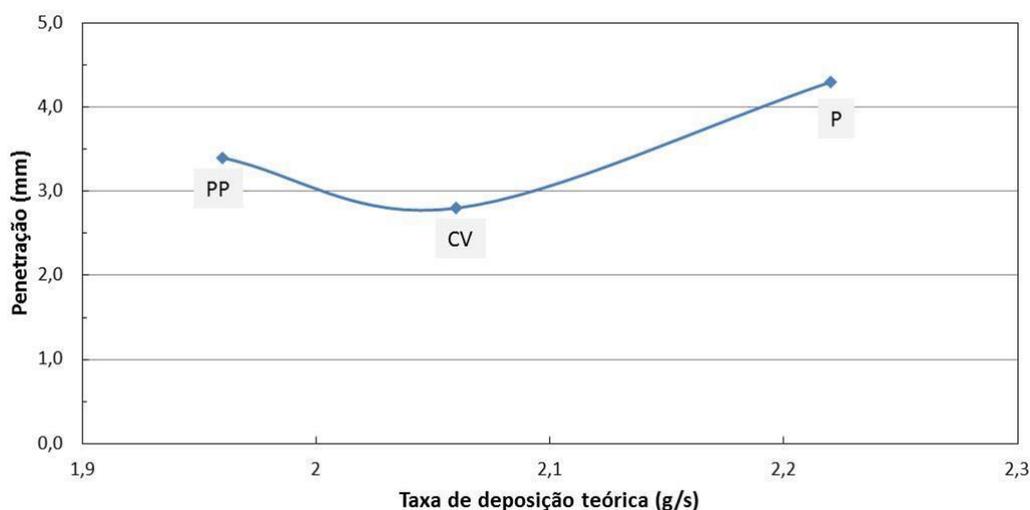


Figura 8. Penetração em função da taxa de deposição teórica.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

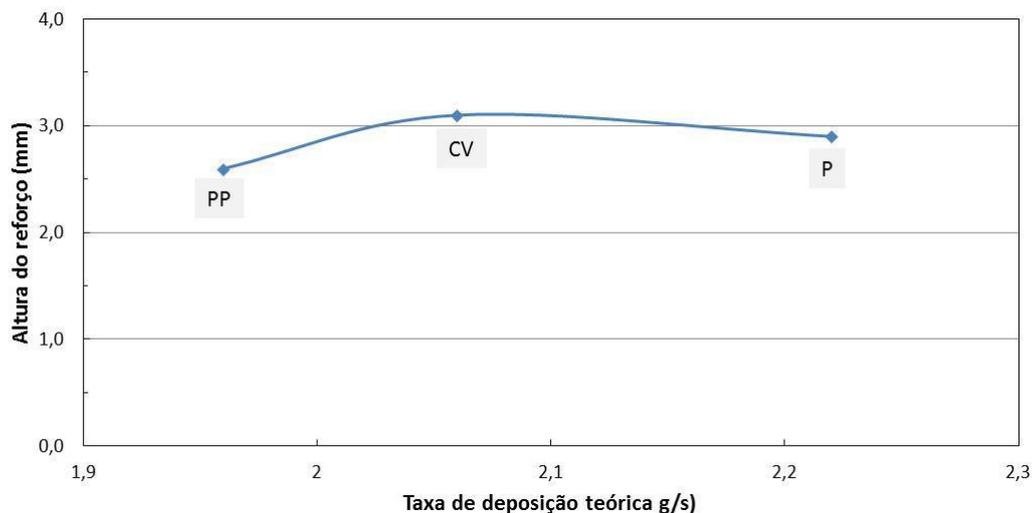


Figura 9. Altura do reforço em função da taxa de deposição teórica.

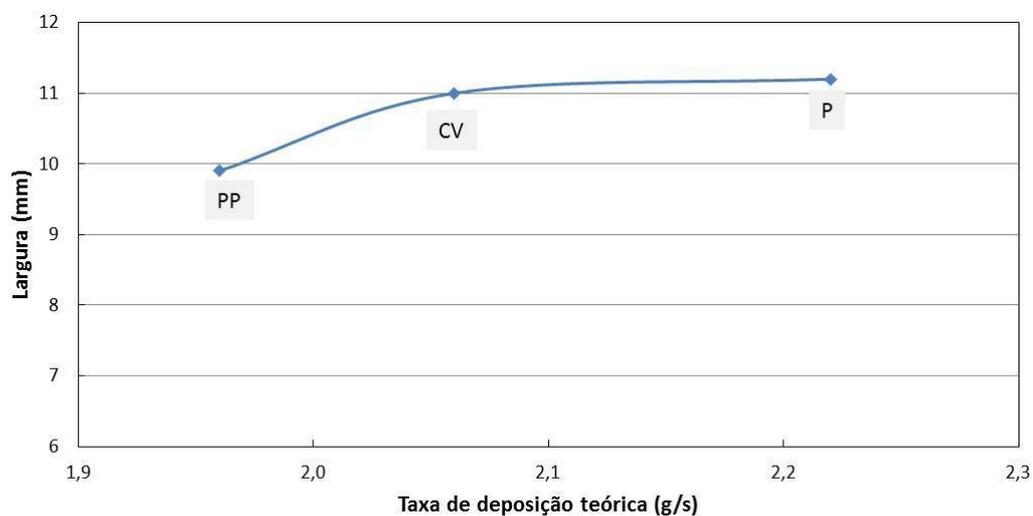


Figura 10. Largura em função da taxa de deposição teórica.

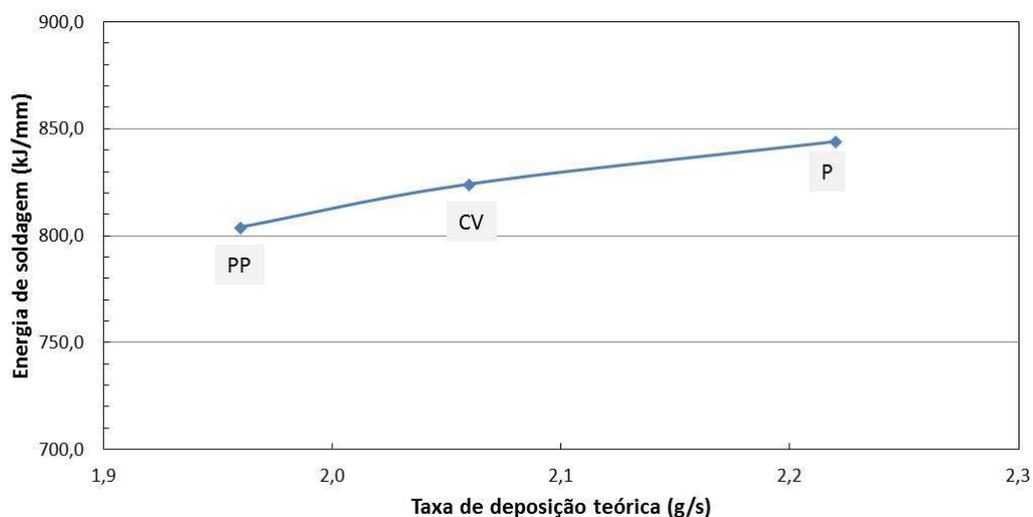


Figura 11. Energia de soldagem em função da taxa de deposição teórica.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

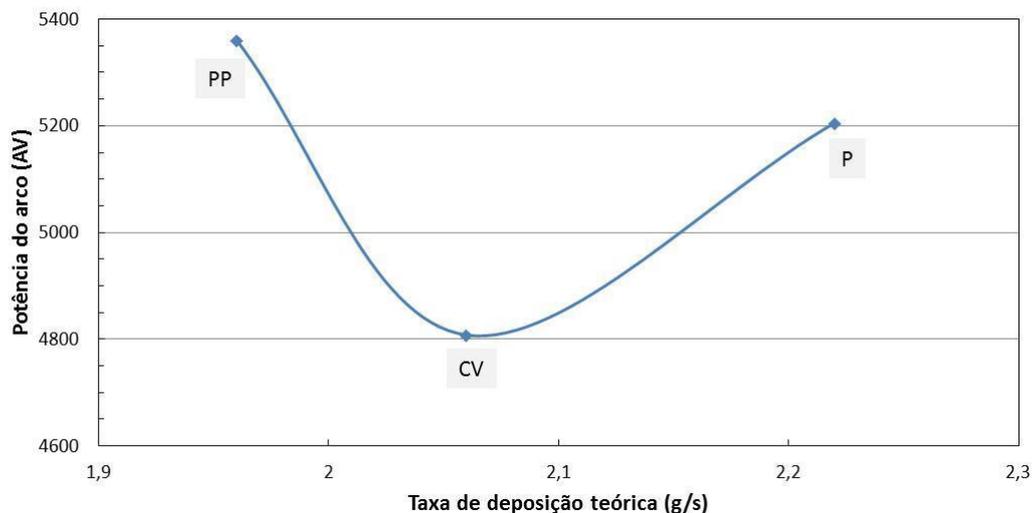


Figura 12. Potência do arco em função da taxa de deposição teórica.

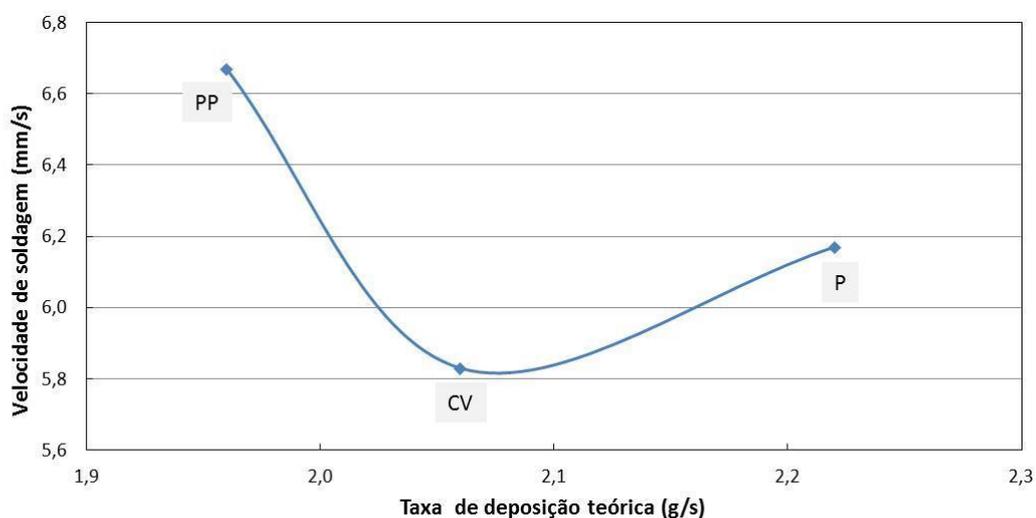


Figura 13. Velocidade em função da taxa de deposição teórica.

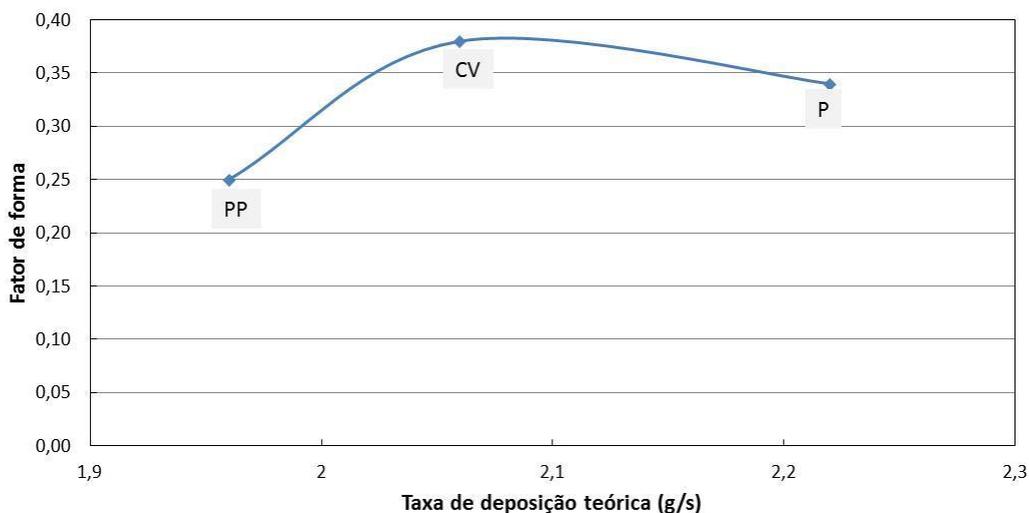
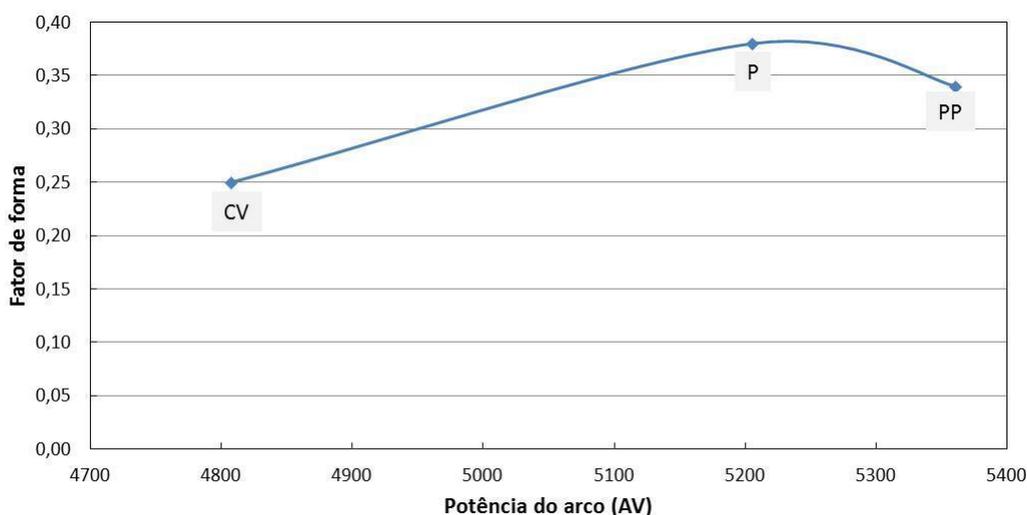


Figura 14. Fator de forma em função da taxa de deposição teórica.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Nota-se que, a penetração, Figura 8, apresenta um formato do gráfico, bem similar à potência do arco, Figura 12, e à velocidade de soldagem, Figura 13. A largura, Figura 10, apresenta os valores para CV e P muito próximos, podendo-se considerar que a largura e altura do reforço, Figura 9, assim como a energia de soldagem, Figura 11, possuem formatos dos gráficos similares e aumentam com o aumento da massa teórica depositada. Todas as variáveis exceto o fator de forma, Figura 14, aumentaram de CV para P, onde P apresenta os maiores valores para penetração, Figura 8, e largura, Figura 10.



**Figura 15.** Fator de forma em função da potência do arco.

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco elétrico e o tempo gasto para percorrê-lo. Este parâmetro, influencia na taxa de deposição e na geometria do cordão de solda [11]. Um aumento da corrente implica diretamente na taxa de deposição do metal de solda, porém, junto ao aumento da velocidade, implica inversamente. Isso pode ser notado ao analisarmos a Figura 13 junto a Tabela 1, onde PP possui a maior corrente, a maior velocidade e a menor taxa de deposição teórica.

A variação do fator de forma mostrado nas Figuras 14 e 15 apresentam curvas distintas, apresentando razão entre os fatores de até 1,52, conforme Tabela 5. Nota-se uma inversão, quando comparado ao aumento da taxa de deposição teórica, PP, CV, P, Figura 14, quanto a potência do arco, para CV, P, PP, Figura 15.

## 4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos é possível concluir:

- Os melhores valores das características geométricas para os tipos de formato de onda da corrente de soldagem estudados foram obtidos com o formato de onda pulsado.
- O tipo de formato de onda da corrente de soldagem convencional apresentou formato do cordão mais convexo.
- Apesar de se aumentar a potência do arco, a energia de soldagem pode cair em função da velocidade de soldagem.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Outokumpu pela doação das chapas do aço duplex UNS S82441, a Lincoln pela disponibilidade de pessoal e estrutura física na execução dos cordões de solda e no fornecimento dos consumíveis.

## REFERÊNCIAS

- 1 Brandi SD, Lippold JC. Considerações sobre a metalurgia da soldagem de aços inoxidáveis duplex e superduplex. *Metalurgia & Materiais*, 1997: 141-146.
- 2 Alvarez AI. Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. *Recent Patents on Mechanical Engineering* 2008, 1, 51-57.
- 3 Cardoso JR, Bracarense AQ, Campos FR, Souza CS, Silveira DM, Lins VFC. Avaliação da Soldagem Multipasse de Chapas de Aços Inoxidáveis Lean Duplex UNS S32304 soldadas, pelos processos SMAW, GMA WParte e FCAW – Parte 1: Propriedades Mecânicas. *Soldagem Inspeção*. 2012; São Paulo, Brasil, 2012; 4: 306-316.
- 4 ASM, American Society For Metals (1990) *Metals Handbook –Volume 1 – Proprieties and selection: Irons, Steels and High performance alloys*, ASM International, US.
- 5 Modenesi P. *Introdução a Física do Arco*. 1. ed. Belo Horizonte - Brasil, Editora UFMG, 2001.
- 6 Nascimento AS, Menezes Junior LC, Vilarinho LO. Efeito do Formato de Onda e Gás de Proteção sobre a Taxa de Fusão e Geometria do Cordão na Soldagem MIG/MAG-PV. *Soldagem Inspeção*. 2012; 17: 40-48.
- 7 Norrish J. *Advanced Welding Process*, 375pg, Cranfield Institute of Technology, p. 147, 1992.
- 8 Scotti A. Ponomarev V. *Soldagem MIG/MAG*. São Paulo, Artliber, 2008.
- 9 Modenesi P. *Técnica Operatória da Soldagem GMAW – 1. Trabalho Prático*.
- 10 Torres EMM. *Uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW [Dissertação de Mestrado]*. Distrito Federal: Universidade de Brasília, 2013.
- 11 Machado IG. *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Editado pelo autor, 1ª edição 1996.

---

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*