

# ESTUDO DA APLICAÇÃO DO PROCESSO GMAW EM CORRENTE ALTERNADA NA SOLDAGEM DE ALUMÍNIO EM JUNTAS SOBREPOSTAS<sup>1</sup>

*Edson Frota Pessoa<sup>2</sup>  
Felipe Damásio de Queiroz Paiva<sup>3</sup>  
Airton Patrício de Aquino Júnior<sup>4</sup>  
Hélio Cordeiro de Miranda<sup>5</sup>  
Marcelo Ferreira Motta<sup>5</sup>  
Jesualdo Pereira Farias<sup>6</sup>*

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do processo GMAW em corrente alternada (CA) sobre a geometria do cordão de solda obtido por deposição em juntas sobrepostas. Para efeito comparativo foram realizadas soldagens em corrente contínua pulsada. Os experimentos foram realizados em chapas de alumínio, utilizando eletrodo de 1,2 mm de diâmetro e argônio como gás de proteção. As soldagens, na posição plana, foram realizadas automaticamente empregando uma central eletrônica controlada remotamente por computador. Realizaram-se depósitos em juntas sobrepostas com dois ângulos de trabalho (60° e 45°) e três porcentagens em CA na polaridade negativa (20%, 30% e 40%). Os resultados obtidos mostraram que quanto maior a porcentagem de corrente negativa, menor a estabilidade do arco, menor a penetração, maior a taxa de fusão do eletrodo consumível e maior o reforço do cordão de solda. A soldagem em CA resultou numa menor penetração e maior taxa de fusão quando comparada à soldagem em corrente contínua pulsada, viabilizando deste modo, a soldagem de chapas finas de alumínio com boa produtividade. Contudo, após avaliação qualitativa, observou-se que a pulsação em corrente contínua tem menor possibilidade de ocorrência de mordedura e falta de fusão.

**Palavras-chave:** GMAW; Corrente alternada; Alumínio; Chapas finas; Juntas.

## APPLICATION STUDY OF ALTERNATING CURRENT GMAW PROCESS IN WELDED JOINTS OF ALUMINUM SHEETS

### Abstract

This work has the objective of value the effect of GMAW with AC in the geometrics characteristics of the weld bead in joints. To compare with a more common process, weldings were made with pulsed GMAW. The experiments were made using aluminum sheets, with a 1,2 mm diameter wire and argon as shielding gas. The welds, in the flat position, were made automatically. There were made welds in lap joints with two work angles (60° e 45°) and three percentages in the AC negative polarity (20%, 30% e 40%). The results shown that, greater the AC negative percentage, worst the arc stability, shallower the penetration, greater the fusion rate of the electrode wire and greater the reinforcement of the weld bead. The AC welding resulted in minor penetration and greater fusion rate if compared with pulsed GMAW, making possible the welding of aluminum sheets with good productivity.

**Key words:** AC GMAW; Aluminum; Sheets; Joints.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

<sup>2</sup> *Engº, Mestrando em Engenharia e Ciência dos Materiais – UFC. bolsista CAPES – UFC.*

<sup>3</sup> *Engº.*

<sup>4</sup> *Graduando em Engenharia Mecânica – UFC.*

<sup>5</sup> *Dr., Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.*

<sup>6</sup> *Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.*

# 1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas têm atraído considerável atenção como substituto para o aço, pois sua utilização proporciona a vantagem de se obter estruturas com baixo peso e boa resistência à corrosão e mecânica.

Dentre os vários processos utilizados para a soldagem de alumínio, destaca-se o GMAW principalmente pela sua alta produtividade, qualidade da solda e fácil possibilidade de automatização.<sup>(1)</sup> Todavia, o processo GMAW depende diretamente do tipo de transferência metálica e requer um ajuste cuidadoso dos parâmetros para se obter as características adequadas para a solda.<sup>(2)</sup>

Atualmente, um dos critérios básicos na construção de equipamentos e de estruturas em geral é a utilização de ligas leves de alta resistência e paredes finas. Quando se considera a união destes materiais por soldagem, a especificação de procedimentos que proporcionem baixa penetração e baixa distorção é de fundamental importância.

A evolução dos equipamentos de soldagem permitiu que algumas técnicas de soldagem fossem implementadas para algumas aplicações especiais. Como exemplos, têm-se a soldagem em corrente pulsada e corrente alternada (CA) com o processo GMAW. Com o advento de fontes modernas de soldagem possibilitando a mudança rápida de polaridades e inibindo a extinção do arco no instante de troca de polaridade, pode-se controlar a transferência de calor para a peça e a taxa de fusão do arame em corrente alternada através do ajuste da razão entre o período de eletrodo positivo e negativo.

O processo GMAW em corrente alternada apresenta duas características principais. Uma delas vem do GMAW pulsado cujo princípio é gerar uma gota por pulso na polaridade positiva. A outra, advém da soldagem com eletrodo negativo que gera uma menor quantidade de calor na peça, quando comparada ao eletrodo na polaridade positiva, a qual eleva a taxa de fusão do arame eletrodo.<sup>(3)</sup> A soldagem GMAW em CA torna-se, assim, um processo apropriado para a união de chapas finas de alumínio devido o calor imposto ao metal de base e a penetração do cordão de solda serem controlados, minimizando problemas como perfuração da chapa soldada e imperfeições dimensionais como deformações.<sup>(4)</sup>

Basicamente, em CA, ocorre uma junção das características da fase positiva (polaridade inversa) e da fase negativa (polaridade direta). Com a soldagem GMAW com polaridade direta, o calor imposto no metal de base assim como a penetração são reduzidos. Infelizmente a estabilidade do processo com a polaridade direta não é muito boa, o que acarreta numa maior dificuldade operacional para o processo GMAW em CA quando comparado à operação em corrente contínua com a polaridade positiva. As fontes de soldagem GMAW CA combinam o processo de soldagem pulsada com controle independente de polaridades direta e inversa. Isto leva a um processo de soldagem mais estável, com penetração ajustável e preenchimento da junta adequado para chapas finas geralmente encontradas em aplicações industriais.<sup>(5)</sup> Recentemente, Paiva et al.,<sup>(6)</sup> constataram que através da aplicação da soldagem GMAW em simples deposição utilizando CA, é possível unir chapas finas de alumínio com elevadas velocidades de soldagem e boas características do cordão de solda. Entretanto, estudos preliminares indicam uma maior dificuldade no ajuste dos parâmetros para este processo, de forma que se faz necessária exploração complementar dos parâmetros para GMAW em CA em diversas condições.

É devido à escassez acerca da aplicação da soldagem GMAW em CA em juntas que este trabalho tem como objetivo avaliar as características superficiais e geométricas do cordão de solda obtidos em juntas sobrepostas de chapas finas de alumínio utilizando o processo GMAW em corrente alternada e comparar com a soldagem GMAW pulsada.

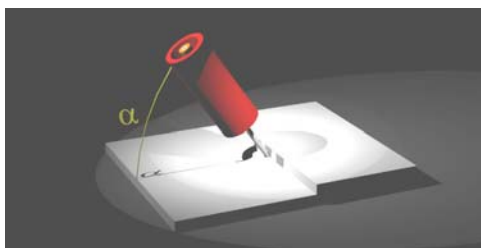
## 2 MATERIAIS MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Na realização dos ensaios foi utilizada uma fonte eletrônica multiprocesso controlada por microcomputador. Utilizaram-se chapas de alumínio ABNT 6060 nas dimensões de 1,5x50x200 mm. O arame eletrodo aplicado como metal de adição foi AWS ER 4043 com 1,2 mm de diâmetro. As soldagens foram realizadas na posição plana, tendo como ângulos de trabalho ( $\alpha$ ) 60° e 45°, conforme Figura 1. A Figura 2 mostra a onda em CA utilizada. O gás de proteção utilizado foi o argônio puro a uma vazão de 12 l/min. Os valores de velocidade de soldagem e distancia bico de contato peça (DBCP) foram fixados em 80 cm/min e 20 mm, respectivamente. Os valores dos parâmetros: corrente na polaridade positiva ( $I_p$ ), tempo na polaridade positiva ( $T_p$ ), corrente na polaridade negativa ( $I_n$ ), tempo na polaridade negativa ( $T_n$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de base ( $T_b$ ) e corrente eficaz ( $I_{ef}$ ) se encontram na Tabela 1. Consta ainda na mesma tabela o número do ensaio, o tipo de onda (corrente alternada e pulsada) e o ângulo de trabalho. Os valores de corrente estão em amperes e tempo em milissegundos.

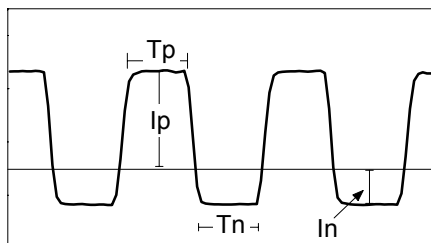
**Tabela 1.** Parâmetros de soldagem.

ENSAIO	ONDA	%CAEN	Ângulo	$I_p$	$T_p$	$I_n$	$T_n$	$I_b$	$T_b$	$I_{ef}$
1	CA	20	60°	180	3	25	6	-	-	105,9
2	CA	20	60°	180	3	25	6	-	-	105,9
3	CA	20	60°	180	3	25	6	-	-	105,9
4	CA	30	60°	180	3	34	7	-	-	102,6
5	CA	30	60°	180	3	34	7	-	-	102,6
6	CA	30	60°	180	3	34	7	-	-	102,6
7	CA	40	60°	180	3	40	9	-	-	96,4
8	CA	40	60°	180	3	40	9	-	-	96,4
9	CA	40	60°	180	3	40	9	-	-	96,4
10	CA	20	45°	180	3	25	6	-	-	105,9
11	CA	20	45°	180	3	25	6	-	-	105,9
12	CA	20	45°	180	3	25	6	-	-	105,9
13	CA	30	45°	180	3	34	7	-	-	102,6
14	CA	30	45°	180	3	34	7	-	-	102,6
15	CA	30	45°	180	3	34	7	-	-	102,6
16	CA	40	45°	180	3	40	9	-	-	96,4
17	CA	40	45°	180	3	40	9	-	-	96,4
18	CA	40	45°	180	3	40	9	-	-	96,4
19	PULS	-	60°	225	1,3	-	-	65	10	97,8
20	PULS	-	60°	225	1,3	-	-	65	10	97,8
21	PULS	-	60°	225	1,3	-	-	65	10	97,8
22	PULS	-	45°	225	1,3	-	-	65	10	97,8
23	PULS	-	45°	225	1,3	-	-	65	10	97,8
24	PULS	-	45°	225	1,3	-	-	65	10	97,8

A porcentagem na polaridade negativa (%CAEN) foi calculada através da razão entre a área da curva na fase negativa (produto da corrente pelo tempo nesta polaridade) e a área total da curva compreendendo ambas polaridades.



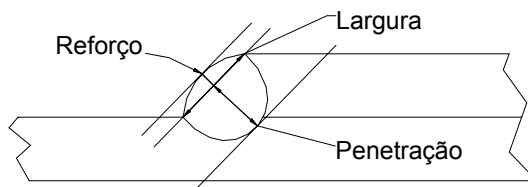
**Figura 1.** Ângulo de trabalho aplicado nas soldagens.



**Figura 2.** Formato da onda em corrente alternada.

Para a soldagem em CA os valores de tempo e de corrente foram ajustados tendo como referência o valor de corrente eficaz de aproximadamente 100 A, como é mostrado na Tabela 1. Os valores de velocidade de alimentação do arame ( $V_{alim}$ ) foram obtidos mantendo o comprimento de arco aproximadamente constante (10 mm) para todos os ensaios. Para efeito de análise comparativa foram realizados ensaios em corrente pulsada (CC+) com o mesmo nível de corrente eficaz.

Visando obter características comuns para todas as repetições buscou-se extrair amostras (secções transversais) dos corpos de prova para macrografia, aproximadamente a 120 mm do início das chapas. Procurou-se também manter constante a extensão percorrida pela tocha fazendo com que os cordões apresentassem comprimentos aproximados. As medidas de reforço, largura e penetração (Figura 3) foram realizadas através de um microscópio óptico.



**Figura 3.** Características do cordão de solda.

Através de um software de análise estatística avaliou-se a influência dos parâmetros de soldagem nas características geométricas (largura, penetração e reforço do cordão de solda), e na velocidade de alimentação do arame.

### 3 RESULTADOS

Os resultados obtidos referentes à geometria da solda e velocidade de alimentação do arame eletrodo estão apresentadas na Tabela 2.

Onde a  $V_{ALIM}$  - velocidade de alimentação, Ref. - reforço, Pen. - penetração, Lar. - largura e %CAEN - porcentagem na polaridade negativa.

De posse desses resultados foi realizada a análise estatística de variância relacionando as soldagens realizadas em CA para os ângulos de  $60^\circ$  e  $45^\circ$ . Os resultados com valores inferiores a 0,05 indicam que uma dada variável (reforço, penetração, largura e velocidade de alimentação) foi afetada estatisticamente por um parâmetro de controle (ângulo de trabalho, porcentagem em CAEN e forma de onda) com confiabilidade de 95%, os quais são considerados neste trabalho, significativos.

**Tabela 2.** Resultados dos experimentos.

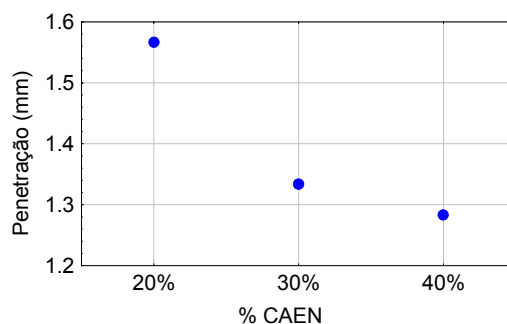
ENSAIO	ONDA	% CAEN	ÂNGULO	Pen. (mm)	Ref. (mm)	Lar. (mm)	V <sub>ALIM</sub> (m/min)
1	CA	20	60°	1,6	1,5	4,6	3,8
2	CA	20	60°	1,8	1,0	4,5	3,8
3	CA	20	60°	1,7	1,1	4,2	3,8
4	CA	30	60°	1,2	1,6	4,6	4,2
5	CA	30	60°	1,4	1,4	4,8	4,2
6	CA	30	60°	1,2	1,7	4,7	4,2
7	CA	40	60°	1,1	1,8	4,7	4,5
8	CA	40	60°	1,1	1,5	4,3	4,5
9	CA	40	60°	1,4	1,3	4,4	4,5
10	CA	20	45°	1,5	1,5	4,3	3,8
11	CA	20	45°	1,5	1,3	4,3	3,8
12	CA	20	45°	1,3	1,5	4,6	3,8
13	CA	30	45°	1,3	1,4	4,5	4,2
14	CA	30	45°	1,3	1,5	4,1	4,2
15	CA	30	45°	1,6	1,6	4,1	4,2
16	CA	40	45°	1,5	1,2	4,2	4,5
17	CA	40	45°	1,2	1,8	3,9	4,5
18	CA	40	45°	1,4	2,0	3,9	4,5
19	PULS	-	60°	1,8	0,8	6,0	3,7
20	PULS	-	60°	2,1	0,9	5,8	3,7
21	PULS	-	60°	1,7	1,1	6,0	3,7
22	PULS	-	45°	1,3	1,7	4,6	3,7
23	PULS	-	45°	1,7	0,9	5,3	3,7
24	PULS	-	45°	1,8	1,0	5,5	3,7

O resultado da análise de variância está apresentado na Tabela 3. Por esta tabela, constata-se que a porcentagem em CAEN influenciou estatisticamente a penetração e a velocidade de alimentação. Por sua vez, o ângulo influenciou a largura do cordão de solda.

**Tabela 3.** Valores obtidos através da análise estatística de variância dos resultados em CA.

Variável de controle	V <sub>ALIM</sub>	Ref.	Pen.	Larg.
% CAEN	<b>0,00</b>	0,16	<b>0,02</b>	0,12
Ângulo	-	0,46	0,88	<b>0,00</b>

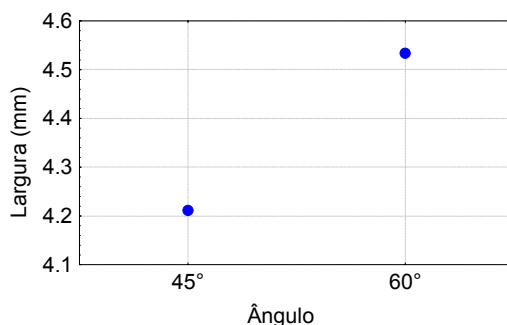
A Figura 4 mostra o efeito da porcentagem em CAEN sobre a penetração do cordão de solda. Constata-se que com o aumento da porcentagem em CAEN ocorre uma redução da penetração.



**Figura 4.** Influência da porcentagem em CAEN sobre a penetração do cordão de solda.

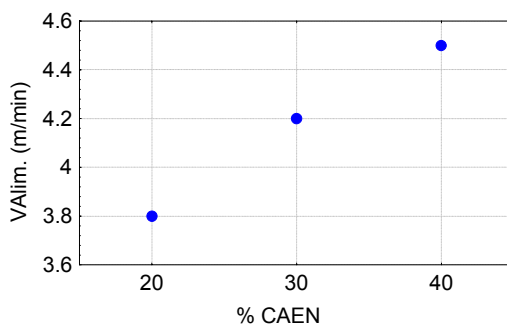
Este resultado já era esperado e está de acordo com Pessoa et al.,<sup>(7)</sup> pois com o aumento da porcentagem em polaridade direta há uma redução no calor imposto à junta minimizando, assim a penetração. De qualquer forma, deve-se atentar que independente da influência estatística, a variação do valor absoluto de penetração foi muito baixa, e qualquer que fosse o nível adotado para a porcentagem em CAEN (de 20% a 40%) seria possível realizar a soldagem sem perfuração.

A junta soldada com o ângulo de 60° apresentou uma maior largura em relação ao de 45° conforme pode ser visto na Figura 5. Mais uma vez, apesar da influência estatística, a alteração em valores absolutos foi muito pequena e tanto o ângulo de 45° quanto o de 60° possibilitou a obtenção de cordões satisfatórios.



**Figura 5.** Comportamento da largura com a variação do ângulo de trabalho.

De acordo com a Figura 6 pode-se observar um aumento considerável da velocidade de alimentação do arame com o aumento da porcentagem em CAEN. Como a operação de soldagem apresentou um arco estável e contínuo, pode-se afirmar que houve aumento na taxa de fusão do arame.<sup>(2)</sup> Este resultado também foi comprovado por Pessoa et al.<sup>(8)</sup>



**Figura 6.** Influência da porcentagem em CAEN sobre a Valim.

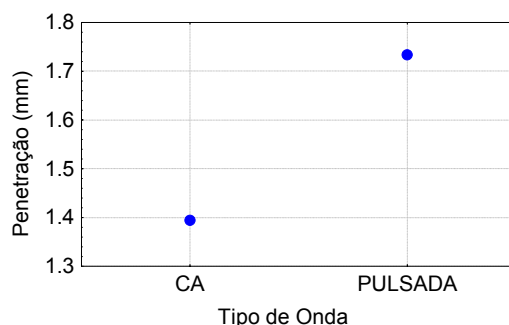
Por apresentar, também, um baixo aporte térmico ao metal de base, boa qualidade de solda e ser mais comumente utilizado, o processo GMAW pulsado foi escolhido para a realização de comparação de seus resultados com os obtidos com o processo GMAW CA.

Realizou-se também a análise de variância comparando o processo em CA com a corrente pulsada. Ressalta-se que foram empregados todos ensaios em CA para a análise de variância. Encontra-se na Tabela 4 o resultado da análise de variância. Pode-se verificar que o tipo de onda (pulsada e CA) influenciou estatisticamente a penetração, o reforço, a largura e a taxa de fusão do arame eletrodo. Observa-se que a variação do ângulo de trabalho utilizado influenciou somente a largura do cordão de solda.

**Tabela 4.** Valores obtidos através da análise de variância em CA e corrente pulsada.

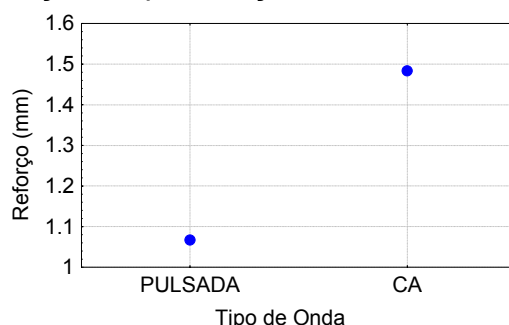
Variável de controle	$V_{ALIM}$	Ref	Pen	Larg
Tipo de onda	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>
Ângulo	-	0,10	0,22	<u>0,00</u>

A Figura 7 mostra que a penetração obtida em CA é menor que os resultados obtidos em GMAW pulsado para o mesmo nível de corrente eficaz. De uma forma geral, em CA há uma maior possibilidade de controle da penetração com a variação da porcentagem em CAEN, porque além de se ajustar a pulsação (frequência), ajusta-se também o percentual em cada meio ciclo. A variação da penetração foi em torno de 20%.



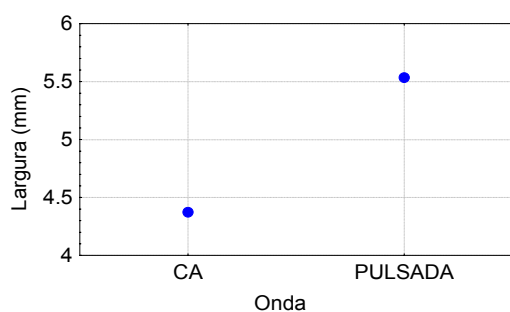
**Figura 7.** Influência do tipo de onda na penetração.

Verifica-se na Figura 8 a influência do tipo de onda sobre o reforço. Pela análise da mesma, verifica-se que o reforço dos cordões de solda obtidos em CA é bem maior que em corrente pulsada. Este resultado deve-se ao fato de que em CA tem-se a maior parte do calor concentrado no arame eletrodo aumentando a taxa de fusão, contribuindo para o aumento do reforço e diminuição da penetração.

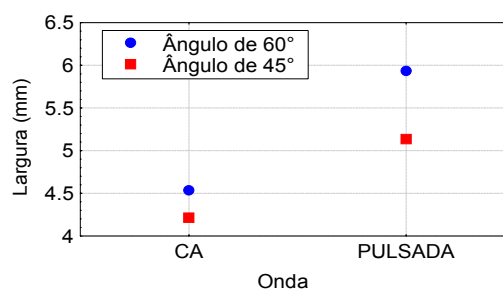


**Figura 8.** Influência do tipo de onda sobre o reforço.

A Figura 9(a) mostra o comportamento da largura sob a influência do tipo de onda. Pode-se observar que a largura dos cordões de solda em corrente pulsada foi substancialmente maior que em CA. Constata-se também que com a corrente pulsada foram obtidos maiores larguras com o ângulo de trabalho de 60° de acordo com a Figura 9(b).



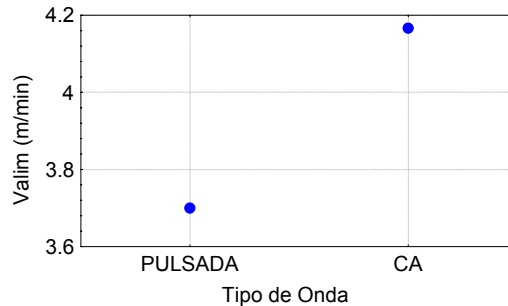
a)



b)

**Figura 9.** Influência do tipo de onda e dos ângulos de trabalho na largura do cordão de solda.

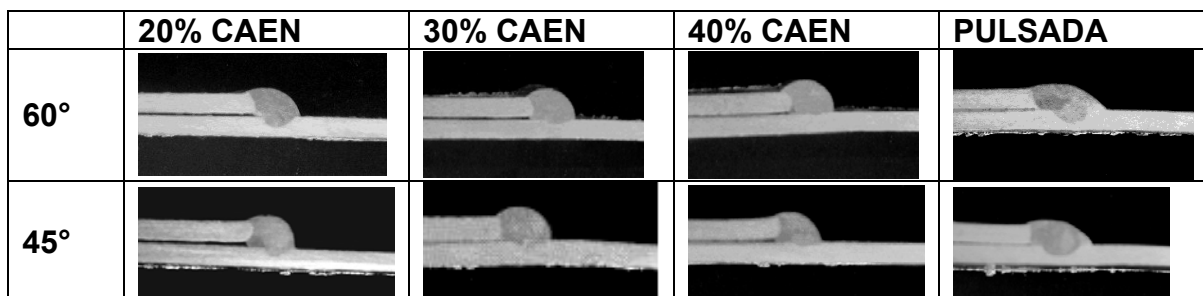
A Figura 10 mostra a influência do tipo de onda da corrente sobre a velocidade de alimentação. A velocidade de alimentação para CA foi significativamente maior do que para corrente pulsada. Constata-se novamente que em CA tem-se a maior parte do calor concentrada no arame eletrodo, contribuindo para o aumento de sua taxa de fusão e, conseqüentemente, aumento da Valim. Vale ressaltar que foram empregados valores aproximados de corrente eficaz.



**Figura 10.** Influência do tipo de onda sobre a velocidade de alimentação.

As imagens mostradas na Figura 11 indicam que os cordões de solda obtidos com corrente pulsada apresentaram um melhor perfil das juntas sobrepostas quando comparados aos cordões em CA para todos os níveis de porcentagem em polaridade direta.

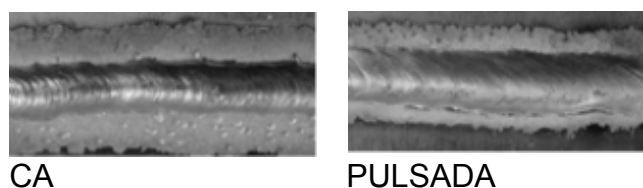
Este comportamento indica que a soldagem em corrente pulsada quando comparada a soldagem em CA apresenta menor possibilidade (considerando as soldagens realizadas) de ocorrências de defeitos tais como mordeduras e falta de fusão.



**Figura 11.** Fotos dos cordões de solda realizados utilizando os dois ângulos de trabalho e todos os tipos de onda.

As juntas soldadas com CA para todos os percentuais em CAEN apresentaram cordões mais convexos que os realizados em corrente pulsada. Também foi possível constatar que em CA houve mais respingos em torno do cordão de solda, que nos ensaios com corrente pulsada.

Quanto às características gerais dos cordões obtidos verificou-se que as duas formas de onda apresentaram boa qualidade superficial (Figura 12).



**Figura 12.** Aspecto dos cordões de solda.



Desta forma, apesar da corrente alternada apresentar menor penetração, a soldagem em corrente pulsada atendeu bem aos requisitos de não “furar” as chapas componentes das juntas e ainda apresentam melhores características de preenchimento e poucos respingos, obtendo melhor desempenho para esta aplicação.

Foram observados ainda pequenos desalinhamentos ao longo do cordão, que pode ter ocorrido em virtude da alta velocidade de soldagem empregada e das dimensões da junta, sendo essa mais susceptível à pequenas distorções.

Recomendam-se estudos complementares para que sejam consolidadas pesquisas em CA tanto em outros tipos de depósitos, quanto em chapas com espessura inferior a estudada.

#### **4 CONCLUSÕES**

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

- há o aumento do reforço e diminuição da penetração com o aumento da porcentagem em CAEN;
- a penetração obtida em CA foi menor quando comparada com a corrente pulsada para os mesmo níveis de corrente eficaz, mas tanto em CA quanto na pulsada os valores observados de penetração foram baixos;
- as soldagens realizadas em CA apresentaram cordões de solda com maior convexidade, quando comparados aos de corrente pulsada;
- os ângulos de trabalho apresentaram uma maior influência sobre a largura, não afetando as outras características geométricas do cordão de solda;
- para maiores porcentagens em CAEN são obtidas maiores taxas de fusão do arame eletrodo;
- as velocidades de alimentação do arame em corrente pulsada se mostraram menores que as em CA para os mesmos níveis de corrente eficaz;
- foi possível obter juntas soldadas satisfatórias com os dois ângulos de trabalho.
- as soldagens realizadas em CA e em corrente pulsada foram consideradas satisfatórias. Entretanto destaca-se que a soldagem em corrente pulsada apresentou melhores características de preenchimento de junta e menor quantidade de respingos quando comparada à CA.

#### **Agradecimentos**

Ao CNPq e à UFC, pelo suporte financeiro e aos professores e bolsistas do ENGESOLDA pelo apoio e amizade.

## REFERÊNCIAS

- 1 1 AWS, **Welding Handbook**. American Welding Society, vol. 3, 8ª edição, USA, 1991, p. 46.
- 2 SILVA, H. R., FERRAESI, V. A. Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG de Alumínio na Qualidade do Cordão de Solda. **Soldagem & Inspeção**, ano 8, n°1, p. 39 – 45, mar.2003.
- 3 GOHR Jr, R.. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG. , Florianópolis-SC, 2002.. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina.
- 4 UEYAMA, T., TONG, H., YAZAWA, I., HIRAMI, M., NAKATA, K., USHIO, M. Hight speed welding of Aluminium alloys sheets using laser AC pulsed MIG arc hybrid welding process. **Journal of the International Institute of Welding**, Vol. 48, p 139-144, jul. 2004.
- 5 ULRICH DILTHEI, LARS STEIN. Technical Trends and Future Prospects of European Automotive Industry. **Journal of the International Institute of Welding**, Vol. 48, p 19-30, jul. 2004.
- 6 PAIVA, F. D. Q., PESSOA, E. F., MIRANDA, H. C., MOTTA, M. F., FARIAS, J. P. Análise das características geométricas de cordões de solda depositados em chapas finas de alumínio com o processo MIG/MAG em corrente alternada. In: **XXX CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM**. Anais...Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- 7 PESSOA, E. F., PAIVA, F. D. Q., MIRANDA, H. C., MOTTA, M. F., FARIAS, J. P. Efeito da corrente alternada na soldagem de alumínio ABNT 6060 empregando o processo MIG/MAG. In: **3º CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**. Anais... Belém-PA.
- 8 LAGARES Jr, M. L. L. Implementação processo MIG pulsado para soldagem de um componente automotivo de aço inoxidável. Uberlândia-MG, 2001. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia.