

## Estudo da Aplicabilidade do MIG/MAG com Polaridade Negativa para Soldagens de Alta Velocidade em Peças da Indústria Automotiva

*Eduardo Bidese Puhl<sup>1</sup>, Jair Carlos Dutra<sup>1</sup>, Nelso Gauze Bonacorso<sup>2</sup>*

*1 Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, eduardopuhl@labsolda.ufsc.br, jdutra@labsolda.ufsc.br*

*2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Departamento de Metal Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, nelso@ifsc.edu.br*

### Resumo

*Este trabalho trata do estudo feito sobre a aplicabilidade da polaridade negativa no processo MIG/MAG na soldagem de união. Na literatura clássica o processo MIG/MAG com polaridade negativa é definido como instável e apresenta muitos respingos. Trabalhos mais recentes mostram que para determinada faixa de corrente e gás de proteção é possível conseguir cordões sem defeitos utilizando somente a polaridade negativa no processo MIG/MAG. Entretanto, os resultados apresentados nestas literaturas são de depósito sobre chapa e cordões de alta convexidade, o que dificilmente reflete uma situação de aplicação real. A alta convexidade do cordão de solda e a conseqüente baixa penetração fazem com que os resultados não apresentem perspectiva de aplicação em soldagens de união. Neste trabalho, a polaridade negativa é aplicada na soldagem de uma peça da indústria automotiva nas mesmas condições de um posto de trabalho industrial. A velocidade de soldagem alcançada é da ordem de processos de alta produtividade como o MIG/MAG duplo arame. As soldas foram aprovadas pela norma interna da empresa que cedeu as peças para os ensaios. Neste tipo de aplicação a polaridade negativa mostrou colaborar com o aumento da velocidade de soldagem sem o aparecimento de defeitos que desqualificassem a solda. De maneira geral para algumas aplicações de soldagem de união de chapas finas, a soldagem MIG/MAG pode ser utilizada com vantagens na polaridade de eletrodo negativo mediante aplicação de técnicas que minimizem as falhas.*

**Palavras-chave:** MIG/MAG, polaridade negativa, soldagem de alta velocidade, soldagem de chapas finas.

**Abstract:** *This dissertation is a research on the applicability of negative polarity using GMAW processes. This research is divided into two parts. The first part is based on the combined use of positive and negative polarity as a strategy to achieve specific characteristics that are desired in overlay welding process, as an example the low dilution process. In classic literature the GMAW process with negative polarity is defined as unstable and as a result presents a lot of spatter. Recent studies show that, for a certain range of current and gas protection, it is possible to obtain weld seams without defects using only the negative polarity on GMAW processes. However, the results presented in these literatures are on deposit sheet and strands of high convexity, which hardly reflects a real application. The high convexity of a weld and the resulting low penetration, results in a low applicability in join welding. Not even in overlay welding, which low penetration is a favorable condition, it is possible to use negative polarity. In this work, the negative polarity is applied to the automotive welding industry under the same terms as an industrial work station. The welding speed achieved is compared to high speed productive processes such as GMAW double wired. The welds were approved by the companys internal regulations, which also gave the parts for testing purposes. To this type of application the negative polarity showed to be efficient with an increase on welding speed without been disqualified by welding defects occurrences. However for some applications of overlay and thin metal union, the GMAW can be used with negative polarity electrode by applying techniques that minimize these types of failures.*

**Key-words:** GMAW, negative polarity, high speed welding, thin metal weld.

## 1. Introdução

Dentro dos desenvolvimentos realizados no labsolda, uma das linhas de pesquisa é baseada na busca pelo aumento das velocidades de soldagem, qualidade dos serviços e diminuição do retrabalho entre outros fatores que compõem a produtividade. Novas tecnologias aparecem no mercado constantemente onde os processos híbridos surgem com maior frequência [1, 2].

Entretanto os ganhos de produtividade nem sempre são dependentes de processos complexos e de alto custo como processos a laser ou processos híbridos. Estes ganhos podem ser alcançados com variações de processos simples. Em alguns casos as variações são vantajosas em alguns casos devido ao menor custo de desenvolvimento. O MIG/MAG pulsado, MIG/MAG CA, MIG/MAG duplo arame, MIG/MAG com bico de contato cerâmico [3] são alguns exemplos de variações do processo MIG/MAG.

Uma ferramenta utilizada para diminuir a energia imposta e aumentar a taxa de fusão no processo MIG/MAG é a polaridade de eletrodo negativa [4]. Entretanto, o uso somente da polaridade negativa, de acordo com a literatura, não apresenta estabilidade suficiente para produzir um cordão de solda sem respingos e falhas de fusão [5].

Uma alternativa para utilizar a polaridade negativa é o processo MIG/MAG CA onde são utilizadas as polaridades positiva e negativa. Na fase negativa, a taxa de fusão do arame é elevada e ao mesmo tempo o calor aportado a peça é menor, sendo estas características ideais para um revestimento ou soldagem de chapas finas, resultando em um cordão de baixa penetração e alta taxa de deposição [4].

A polaridade positiva é aplicada no processo MIG/MAG CA com o objetivo de realizar a transferência metálica, tornando o processo mais estável. Podendo variar sua intensidade para se conseguir características intermediárias de solda.

SANTOS [6] apresenta resultados que comprovam que com o aumento do percentual de fase negativa no MIG/MAG CA os cordões de solda tendem a diminuir a penetração resultando em uma solda mais fria. Entretanto os resultados alcançados não apresentam uma mudança drástica de geometria do cordão devido à dependência da polaridade positiva.

Para realizar uma soldagem com baixa penetração e elevada taxa de deposição fazendo uso da polaridade negativa é necessário que não se tenha a dependência da polaridade positiva para transferência metálica. SOUZA [4] comprova em seus ensaios que é possível obter um cordão de solda utilizando somente a polaridade negativa, entretanto não consegue um cordão sem respingos e de geometria adequada ao mesmo tempo.

A polaridade negativa proporciona para a soldagem de chapas finas onde além da alta velocidade de soldagem. O calor aportado a peça também é reduzido diminuindo distorções. Entretanto as falhas a instabilidade do arco e a geometria do cordão devem ser controladas para utilização somente desta polaridade.

A taxa de fusão é influenciada por vários parâmetros como corrente de soldagem, distância do bico de contato e peça, mas nenhum outro fator influencia mais esta característica do processo como a troca de polaridade de eletrodo. Para as mesmas condições, o uso da polaridade negativa implica em uma maior taxa de fusão. Este aumento pode ser vantajoso visto que em muitos casos a taxa de deposição esta ligada de forma relevante à produtividade.

Algumas características da polaridade negativa podem ser desejáveis outras nem tanto, dependendo da aplicação. Sendo assim, de maneira geral o que limita seu aproveitamento é a instabilidade na transferência metálica que compromete o resultado final na maioria dos casos. A transferência metálica é usualmente limitada à condição globular e as gotas tendem a serem expelidas em uma direção diferente da poça causando respingos grosseiros em grande quantidade. Lancaster [7] atribui isto a uma força catódica repulsiva bastante instável que empurra a gota para longe da poça. Por esta razão, o MIG/MAG CC- não é utilizado, apesar da alta taxa de fusão e características que poderiam melhorar a produtividade em determinados casos.

A Figura 1 apresenta as grandezas que influenciam o valor da taxa de fusão do processo MIG/MAG e a Equação 1, criada de forma empírica, relaciona estas grandezas.



Figura 1 Grandezas envolvidas na determinação da taxa de fusão [8].

$$T_f = \alpha \cdot i + \beta \cdot L \cdot i^2 \quad (1)$$

Onde:

$T_f$ : taxa de fusão (kg/h);

$\alpha$ : constante relacionada ao calor gerado por fenômenos no arco e dependente também da polaridade (kg/A.h);

$\beta$ : constante dependente do diâmetro e da resistividade do arame-eletrodo (kg/mm.A<sup>2</sup>.h);

$i$ : corrente elétrica do arco (A);

$L$ : extensão do eletrodo (mm).

A primeira parcela dessa equação é, segundo Lesnewich [9], responsável pela geração de calor na região de queda catódica, ou anódica se o eletrodo estiver ligado ao pólo negativo, sendo depende da constante  $\alpha$ . Esta parcela de calor gerada pelo arco, na condição CC+ é explicada da seguinte forma: elétrons emitidos a partir da peça são acelerados através do plasma pelo elevado gradiente de tensão na região anódica e se chocam contra o eletrodo liberando calor para a fusão deste.

Esta parcela de calor gerada pelo arco, na condição CC+ Lesnewich [9] considera que os elétrons emitidos a partir da peça são acelerados através do plasma pelo elevado gradiente de tensão na região anódica e se chocam contra o eletrodo liberando calor para a fusão deste.

A segunda parte representa a parcela de calor gerada por efeito Joule do eletrodo que se aquece com a passagem de corrente. Deste modo, esta parcela é dependente do valor da corrente elétrica e das características do eletrodo: área da seção transversal, extensão (L) e tipo de material.

Entretanto a Equação 1, para polaridade negativa mesmo que exista com um conjunto de variáveis " $\alpha$ " e " $\beta$ " adequadas, é de difícil aplicação para polaridade negativa. Nessa situação, é difícil ter uma definição clara de comprimento do arco e de extensão do eletrodo devido às características do arco em CC-.

No caso do CC- os elétrons partem do arame eletrodo em direção a peça. Mesmo supondo que a emissão no processo MIG/MAG seja predominantemente por efeito de campo Yarmuch e Prtchet [10] levantaram a hipótese de que os efeitos da emissão de elétrons por um catodo frio podem aumentar a geração de calor. Isso explicaria a maior taxa de fusão do arame na polaridade negativa.

Existe outra teoria que explica o aumento de taxa de fusão com a troca de polaridade para CC-. A Figura 2 apresenta as duas condições do eletrodo, positivo e negativo. Na condição CC+, Figura 2(a), o arco parte da extremidade do eletrodo, neste caso ânodo, envolvendo a gota metálica em formação.

Por outro lado, quando o eletrodo é ligado ao pólo negativo, Figura 2(b), o arco elétrico não começa na extremidade do arame e sim em uma parte mais alta, buscando pontos onde a emissão de elétrons seja favorecida pela presença de óxidos. Ao envolver uma maior extensão sólida do eletrodo, o calor do arco é usado de forma mais eficiente para fundi-lo e a taxa de fusão torna-se mais alta [11, 12].

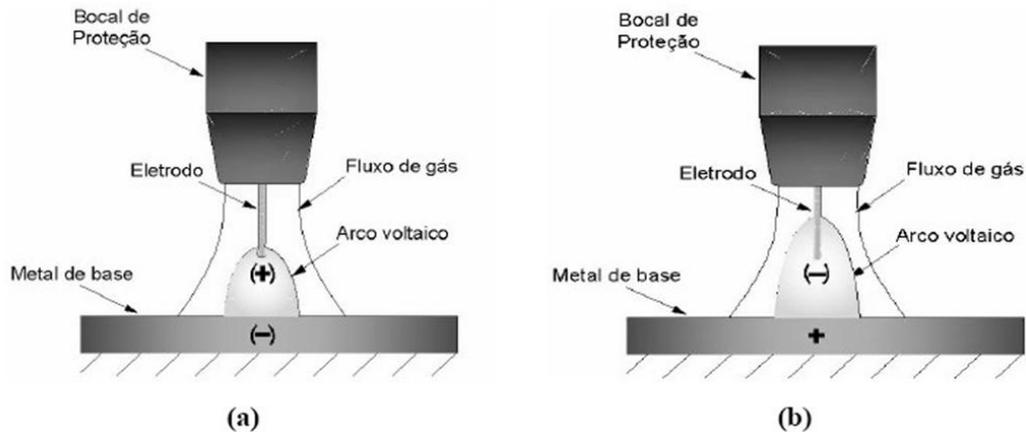


Figura 2 Comportamento do arco elétrico: em (a) CC+ e em (b) CC- [8].

O envolvimento da maior extensão sólida do eletrodo, resultaria no maior aproveitamento do calor para sua fusão, ou seja, cerca de 30% do calor para o metal base e 70% para fundir o eletrodo, o que torna a taxa de fusão mais alta. Porém, no balanço energético do arco com polaridade positiva (CC+), a situação é invertida, cerca de 30% do calor do arco pertencem ao eletrodo e 70% ao metal de base, o que explicaria a maior taxa de fusão na polaridade negativa do que com a polaridade positiva [11, 12-13].

O gráfico da Figura 3, que resultou de ensaios preliminares feitos no LABSOLDA, apresenta as curvas de taxa de fusão das polaridades positiva e negativa. As soldagens foram realizadas com arame ER 70S6 e DBCP igual a 25 mm. Para as soldagens com eletrodo negativo foi utilizado 98%Ar+2%O<sub>2</sub> como gás de proteção e para as soldagens com eletrodo positivo o gás de proteção utilizado foi 92%Ar+8%CO<sub>2</sub>. Todas soldagens foram realizadas na posição plana com ângulo de tocha igual a 90°. As velocidades de soldagem acompanharam proporcionalmente a taxa de fusão do cordão de solda, variando entre 5,33 e 23,33 mm/s (32 e 140 cm/min) na polaridade positiva entre 8,33 e 26,66 mm/s (50 e 160 cm/min) polaridade negativa.

Santos [6] afirma que para polaridade de eletrodo negativo a taxa de fusão pode ser expressa em uma função de segundo grau, entretanto seus ensaios se limitaram as correntes de até 100 A. Para faixas acima deste valor é possível observar uma linearidade na variação da taxa de fusão. Dependendo da faixa de corrente o acréscimo de taxa de fusão na troca de eletrodo positivo para negativo pode incrementar de 40% a 50% na faixa de corrente apresentada na Figura 3. Este incremento na taxa de fusão pode ser utilizado como meio para aumentar velocidades de soldagem e contribuir com a produtividade.

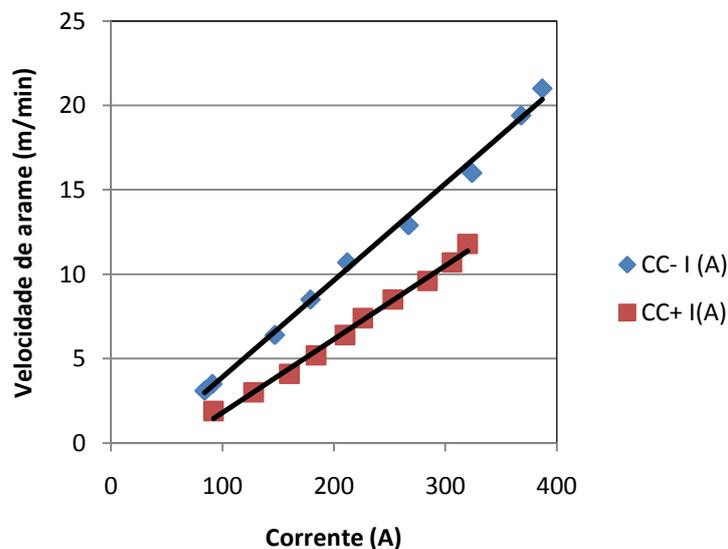


Figura 3 Taxa de fusão CC- e CC+ para DBCP de 25 mm.

A estabilidade do arco também é influenciada pela polaridade do eletrodo. Quando ligado ao pólo positivo as forças eletromagnéticas estão concentradas na extremidade do eletrodo. Este fato contribui significativamente para estabilidade do arco elétrico, pois a ação das forças eletromagnéticas, responsáveis pelo destacamento de uma gota metálica, age significativamente.

Esta escalada do arco faz com que as forças eletromagnéticas que ajudavam o destacamento da gota em CC+ não atuem mais desta forma. Nesse caso, o arco encobrindo uma extensão maior do arame, as forças não têm intensidade suficiente para expulsar a gota em direção a poça.

A polaridade tem efeito marcante nas características geométricas do cordão. É notável a diferença de penetração e zona fundida de um cordão de solda realizado com CC+ para um realizado nas mesmas condições no CC-. A polaridade positiva resulta em um cordão com mais penetração e molhabilidade, que o cordão realizado nas mesmas condições com polaridade negativa.

Em processos de eletrodo consumível como o MIG/MAG a transferência de calor para a peça não se dá somente em função dos fenômenos relacionados ao arco elétrico. Neste caso a transferência metálica é responsável também pela transferência de calor. A gota metálica ao se chocar com a poça de fusão carrega com si uma quantidade de calor, que dependendo da energia cinética da gota pode ter conseqüências diferentes na geometria do cordão.

Resultados mais recentes apresentados por Souza [4] chegam à conclusão de que o modo de transferência metálica em CC- é dependente do tipo de gás de proteção utilizado e que o gás de proteção influencia na geometria do cordão de solda de forma diferente dependendo da polaridade usada.

Em ensaios de depósito sobre chapa com corrente de 250 A, Souza [4] mostra que é possível obter transferência globular ou goticular sem gotas repulsivas com a polaridade negativa, ao contrário do que é dito na literatura clássica. Na condição de menor quantidade destes salpicos, foi usada a mistura 98%Ar+2%O<sub>2</sub>. Como resultados foram obtidos cordões com acabamento aceitável, porém de geometria extremamente convexa.

Em ensaios realizados no LABSOLDA [14], foram utilizados três diferentes composições de gases em ambas as polaridades com a mesma taxa de alimentação por velocidade de soldagem, Tabela 1. O objetivo destes ensaios foi o de verificar os resultados provenientes de Souza [4]. A condição de melhor estabilidade na polaridade negativa foi confirmada usando a mistura gasosa 98%Ar+2%O<sub>2</sub>, Figura 4.

Tabela 1 Testes de comparação de gases e velocidades de arame para polaridades positiva e negativa.

Teste	Polaridade	Gás de Proteção	V. Arame (m/min)	V. Soldagem (cm/min)	Va. Gás (l/min)	DBCP (mm)	Corrente (A)
1	CC+	98%Ar+2%O <sub>2</sub>	8	30	15	20	250
2	CC-	98%Ar+2%O <sub>2</sub>	12,4	46	15	20	250
3	CC+	92%Ar+8%CO <sub>2</sub>	8	30	15	20	250
4	CC-	92%Ar+8%CO <sub>2</sub>	11,4	43	15	20	250
5	CC+	82%Ar+18%CO <sub>2</sub>	8	30	15	20	250
6	CC-	82%Ar+18%CO <sub>2</sub>	11	41	15	20	250

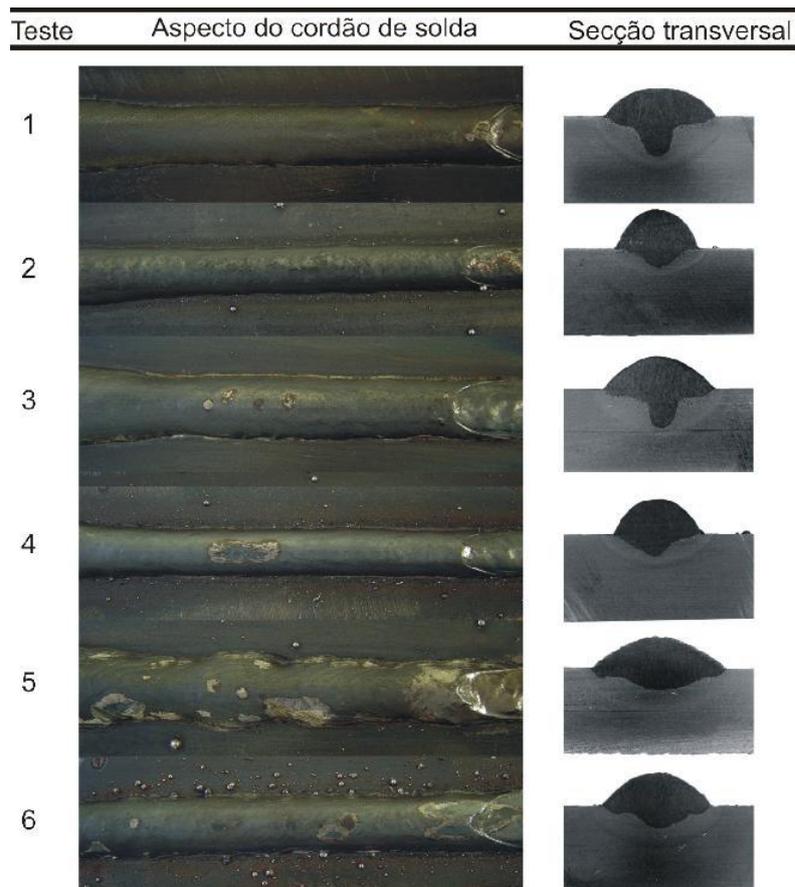


Figura 4 Quadro de comparação variando polaridade e gás de proteção [14].

De maneira geral os resultados da Figura 4 concordam com a maior parte das afirmações da literatura. Para o mesmo nível de corrente, as características do cordão soldado variam de acordo com a quantidade de O<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub> misturado ao Argônio, sendo que os ensaios 2 e 4 com 98%Ar+2%O<sub>2</sub> e 92%Ar+8%CO<sub>2</sub> na polaridade negativa apresentaram baixo nível de respingos, porém com geometria de alta convexidade. À medida que o teor de CO<sub>2</sub> aumenta, o cordão soldado passa a ter uma geometria mais favorável e com maior penetração. Como consequência a quantidade de respingos indesejáveis aumenta.

## 2. Materiais e Métodos

Conforme apresentado na fundamentação teórica a polaridade negativa apresenta uma taxa de fusão da ordem de 70% maior que a polaridade positiva. Sendo assim, em tese, esta seria uma alternativa para soldagem de alta produtividade com velocidades de soldagem elevadas.

A polaridade negativa como ferramenta para aumento da produtividade já é utilizada na corrente alternada. Entretanto, de acordo com a teoria de taxa de fusão, a porção de corrente positiva representa uma diminuição no ganho de produtividade.

Alguns trabalhos descrevem a factibilidade de uma soldagem em polaridade negativa, entretanto apresentam resultados somente em depósito sobre chapa na posição plana. Segundo Souza [4] é possível realizar soldagens com arame ER70S-6 de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro com gás de proteção 98% Ar + 2% O<sub>2</sub> e corrente de 250 A com boa aparência visual e sem respingos.

Desta forma levanta-se a hipótese de que com apenas um arame, seria factível alcançar resultados comparáveis com processos de alta produtividade como o duplo arame. Este processo faz uso de dois arames em uma mesma poça de fusão para aumentar a taxa de deposição e realizar a soldagem da junta com maiores velocidades.

Neste trabalho serão soldadas peças de linha de fabricação da indústria automotiva. Atualmente estas peças são soldadas com o processo duplo arame e neste trabalho será aplicada a polaridade negativa em um único arame. Tendo como com o objetivo principal avaliar a real aplicabilidade do processo MIG/MAG com CC-.

A Figura 5 mostra a bancada de soldagem usada para realização dos ensaios de uniões proposta neste trabalho. Os principais equipamentos desta bancada são: a fonte de soldagem Digitec 450, o robô antropomórfico Motoman UP6 equipado com uma tocha MIG/MAG e o sistema de fixação das peças a serem unidas.



Figura 5 Bancada de ensaios da soldagem de juntas.

A fonte utilizada é uma fonte eletrônica não inversora, ou seja, não é capaz de impor tensão alternada à tocha de soldagem. Assim, para realização dos ensaios com polaridade negativa as conexões dos cabos de corrente da tocha e do terminal terra foram invertidas.

O robô antropomórfico de seis graus de liberdade foi necessário devido à complexidade de posição e orientação da junta a ser soldada. O dispositivo de fixação garante um ângulo de inclinação de aproximadamente 45° com a horizontal.

O processo utilizado na fabricação seriada da peça em questão é o MIG/MAG duplo arame pulsado. Este processo atual utiliza uma única tocha que comporta dois arames com o intuito de aumentar a produtividade. Por serem dois arames de potencial isolado este processo utiliza duas fontes de soldagem, dois tracionadores de arame, uma tocha especial e um bocal refrigerado para suportar o calor dos dois arcos.

O processo proposto utiliza a mesma estrutura do MIG/MAG convencional, desta forma é mais barato e de fácil manutenção. A Figura 6 mostra as peças a serem soldadas por este processo, onde dois perfis estampados em aço carbono de espessura igual a dois milímetros se encaixam formando a longarina.



Figura 6 Conjunto de peças que formam a longarina.

O conjunto em questão tem 1000 mm de comprimento e uma geometria cheia de curvas. Para facilitar a etapa de testes e diminuir a probabilidade de falhas na soldagem por erro de posicionamento da tocha serão avaliadas as soldagens dos trechos retos da junta, conforme



Ao iniciar os ensaios com 250 A se obteve resultados completamente diferentes dos da posição plana em depósito sobre chapa plana. Com a junta sobreposta na posição vertical descendente, inclinação de 45°, o material escorria para fora da junta em forma de gotas de metal fundido. Estas falhas na junta da longarina foram solucionadas com o aumento da velocidade de soldagem vs e dos ângulos de orientação da tocha, Figura 8.

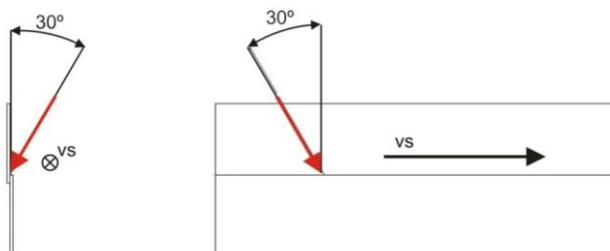


Figura 8 Orientação da tocha na junta da longarina. A esquerda a inclinação transversal e a direita a inclinação longitudinal.

A Figura 9 mostra as fotos dos cordões de solda e suas respectivas secções transversais resultantes de ensaios com os parâmetros utilizados da Tabela 3 enquanto que a Tabela 4 apresenta os valores das medições dos parâmetros geométricos destas secções transversais.

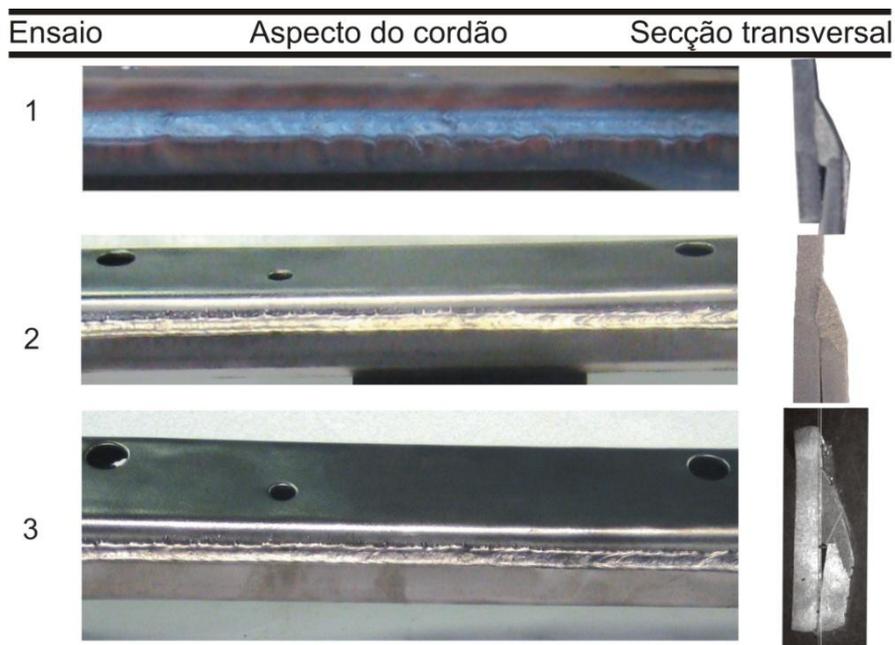


Figura 9 Aspecto visual e secções transversais dos cordões de solda.

Tabela 3 - Parâmetros usados nos ensaios nas juntas de longarina.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tensão (V)	-32	-35,8	-35,8
Corrente (A)	-250	-340	-340
Velocidade de arame (m/min)	11,7	20	20
Velocidade de soldagem (m/min)	1	2,4	2,6
DBCP (mm)	25	25	25

Tabela 4 - Resultado da medição dos parâmetros da norma.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
e (mm)	2	2	2
L1 (mm)	2,7	2,5	0,2
G (mm)	2,7	2,2	2,8
b (mm)	0,5	0,1	0,5
r1, r2 (mm)	0	0	0
$\alpha, \beta$	$\geq 120^\circ$	$\geq 120^\circ$	$\geq 120^\circ$

No ensaio 1, Figura 9, é possível notar a tendência ao escorrimento do material de adição ao encontrar a peça pouco aquecida pela polaridade negativa. Observa-se também que este corpo de prova está escurecido devido à oxidação, nos ensaios seguintes os corpos de prova foram limpos.

A respectiva secção transversal do cordão de solda do ensaio 1 apresenta um perfil, onde as duas chapas foram fundidas. De acordo com as faixas de tolerância da Tabela 2 os parâmetros geométricos medidos, Tabela 4, indicam que a união referente ao ensaio 1 está aprovada.

O ensaio 2 foi realizado com valores de corrente elétrica e de velocidade de soldagem maiores do que o ensaio 1. O cordão de solda resultante deste ensaio foi também aprovado de acordo com as faixas de tolerância adotadas, Tabela 2.

Procurando soldar a peça no menor tempo possível, os parâmetros de soldagem do ensaio 2 foram aplicados no ensaio 3 com exceção da velocidade de soldagem que foi maior. Analisando a secção transversal do cordão de solda do ensaio 3 é possível notar a falta de penetração na chapa superior. O parâmetro L1 tem valor muito baixo o que reprova o corpo de prova 3.

A Figura 10 apresenta a fotografia da peça soldada com os parâmetros usados no ensaio 2. É possível observar os defeitos de falta de uniformidade no cordão e os respingos presentes na parte superior da junta. Estes respingos estão presentes em todos os ensaios realizados.



Figura 10 Ensaio 2 em perspectiva.

A Figura 11 apresenta a longarina do ensaio 2 com algumas regiões destacadas. As regiões 1 e 3 representam respectivamente o início e o fim do cordão que não foram consideradas para avaliar o processo. Naturalmente os parâmetros aplicados no início e fim do cordão devem ser adaptados para que não ocorram falhas como destacado nestas regiões extremas.

Nas regiões 2 e 3 aparece trechos da soldagem com curvas acentuadas da junta. Nesta condição o processo não resultou em cordão aceitável. Uma solução bastante aplicada para estes problemas é a comunicação entre o robô e a fonte de solda para troca de parâmetros em pontos definidos da trajetória de soldagem. Esta integração é capaz de solucionar tanto as falhas de início e fim do cordão de solda como as falhas em regiões curvas da junta.

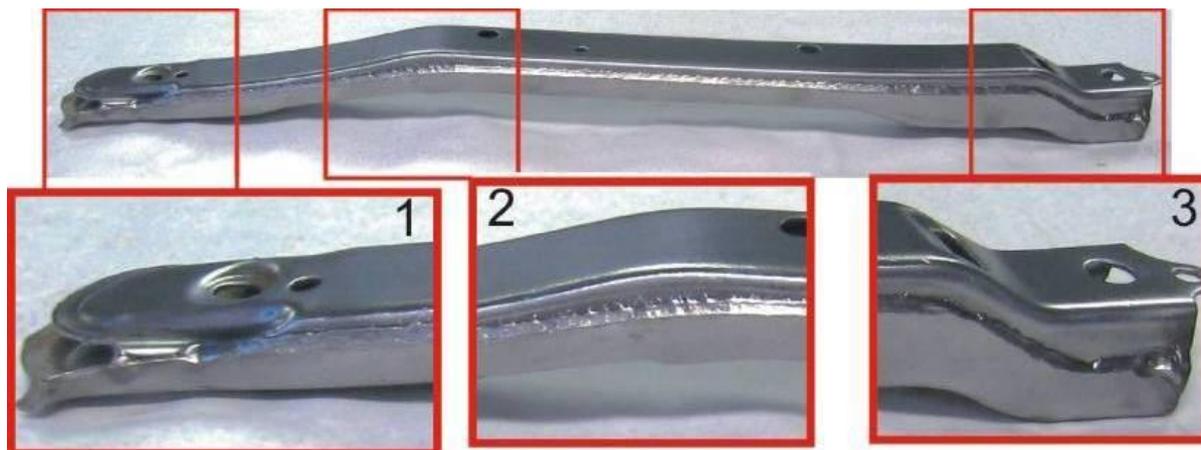


Figura 11 Defeitos encontrados nas soldagens de longarina.

É evidente que para empregar a polaridade negativa de eletrodo existem algumas premissas, o gás de proteção deve ser adequado ao processo e a faixa de parâmetros é restrita a valores acima de 250 A como apresentado por Souza [4]. Desta forma os respingos são reduzidos significativamente não desqualificando o cordão.

De acordo com o apresentado na fundamentação teórica, a soldagem com MIG/MAG CC- possibilita o aumento da taxa de fusão, conferindo a uma mesma corrente de soldagem uma quantidade de material depositado maior. Entretanto os ganhos em termo de velocidade de soldagem não se atribuem somente a isto, a redução do calor aportado a peça contribui para diminuir a penetração. Desta forma com o volume de material se distribui mais facilmente ao longo da junta. Nos ensaios realizados esta característica era acentuada pela inclinação de 45° do corpo de prova, onde a ação da gravidade naturalmente faz a poça de soldagem ganhar mais a velocidade. A inclinação também teve papel importante para atenuação do perfil do cordão, onde a polaridade negativa deixa de apresentar a alta convexidade.

A falta de automação no procedimento de soldagem ocasionou os defeitos da Figura 11. Estes defeitos aparecem em variações grandes na junta de soldagem, no início e no final dos cordões onde os parâmetros de soldagem deveriam ser variados. Desta forma os resultados não servem para avaliar a aplicabilidade da polaridade negativa, justificando a escolha de avaliação dos trechos retos para julgar o MIG/MAG CC-.

Adicionalmente o processo duplo arame utilizado na indústria é extremamente mais complexo e oneroso que MIG/MAG CC-. Esta tecnologia aplicada na indústria utiliza duas fontes eletrônicas e uma tocha duplo arame de potencial isolado, sendo o custo de implantação do processo da ordem de vinte vezes maior que a polaridade negativa.

A manutenção do processo com eletrodo negativo também é muito mais barata por utilizar componentes idênticos ao MIG/MAG convencional.

#### 4 . Conclusões

Com base nos resultados e discussões sobre o MIG/MAG CC- é possível concluir:

- Os ensaios da Figura 9 mostram a factibilidade da soldagem utilizando a polaridade negativa do processo MIG/MAG. Os resultados das medições soldas estão dentro dos padrões de fabricação adotados como referência.
- A polaridade negativa apresentou respingos quando empregada na soldagem de união proposta neste trabalho. Entretanto, estes não ocorrem de forma intensa suficiente para desqualificar a peça perante os critérios utilizados neste trabalho.
- Nos resultados deste trabalho o processo MIG/MAG CC- alcançou velocidade de soldagem comparável a processos de alta produtividade.

- A infra-estrutura e os insumos do processo MIG/MAG CC- são praticamente os mesmos de um processo MIG/MAG convencional, ou seja, de custo significativamente inferior e de funcionamento mais simples que processos de alta velocidade como o duplo arame.
- Utilizando velocidades de arame muito elevadas o processo MIG/MAG CC- pode ser influenciado pela falta de robustez no sistema de alimentação de arame. Em determinadas posições da tocha o mangote pode se dobrar variando a velocidade instantânea do arame no bico de contato.
- O MIG/MAG CC- mostrou ter perspectiva de aplicação como uma opção de baixo custo para processos de alta produtividade.

## 5. Agradecimentos

Gostaria de agradecer a toda equipe do LABSOLDA que trabalhou no desenvolvimento das tecnologias equipamentos presentes neste trabalho. À Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Ao CNPQ, pela bolsa de pesquisa e apoio financeiro.

## 6. Referências Bibliográficas

1. JASNAU, U. H. J. S. Nd:YAG – Laser – GMA – Hybrid Welding in Shipbuilding and Steel Construction Robotic Welding. **Intelligence and Automation**, 2004. 14–24.
2. KELLY, S. M. et al. Using Hybrid Laser-Arc Welding to Reduce Distortion in Ship Panels. **Welding Journal**, 32-6 Mr 2009.
3. MIGFAST WELDING TIPS. **MIGfast**, 2010. Disponível em: <[http://www.migfast.com/downloads/MIGfast\\_AWJ\\_article.pdf](http://www.migfast.com/downloads/MIGfast_AWJ_article.pdf)>. Acesso em: 15 janeiro 2011.
4. SOUZA, D.; RESENDE, A. A.; SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF**, abril 2007.
5. ESSERS, W. G. A. W. R. Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding.. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, 1979. 289-300.
6. SANTOS, T. F. Soldagem MIG com Corrente Alternada. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.**, 2008.
7. LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**.2. ed. Pergamom Press, 1986. 335.
8. CIRINO, L. M. Estudo Dos Efeitos Da Polaridade Na Soldagem Com Corrente Contínua E Alternada Pelos Processos Tig E Mig/Mag Fev. **2009. Dissertação de mestrado. Dept. de Eng.**
9. LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of Electrode Melting Rate. **Welding Journal**, ago 1958. 343s-353s.
10. YARMUCH, M. A. R.; PATCHETT, B. M. Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum.. **Welding Journal**, jul 2007. 196s-200s.
11. TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHIO, M. Quality and Productivity in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 6, n. 4, 2001.
12. UEYAMA, T.; TONG, H.; HARADA, S.; PASSMORE, R.; USHIO, M.. AC Pulsed GMAW Improves Sheet Metal Joining. **Welding Journal**. v. 84, n. 2, fev. 2005.
13. HOWARD B. CARY. **Modern Welding Technology**, Third Edition, 1994 Regents/Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
14. SCHWEDERSKY, M. B. Relatório de Estágio Supervisionado IV, Curso de Graduação em Engenharia de Materiais.. **LABSOLDA - UFSC. Florianópolis**, p. 17-26. 2007.
15. MOTTA, M. F. Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com duplo arame e potenciais isolados em soldagens de revestimento. **Tese de Doutorado - UFSC**. 2002.