

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Eduardo Bidese Puhl

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS NO PROCESSO
MIG/MAG PARA AUMENTO DE PRODUTIVIDADE E
MELHORIA DA QUALIDADE MEDIANTE O USO DA
POLARIDADE NEGATIVA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra
Co-orientador: Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca
da
Universidade Federal de Santa Catarina

P978d Puhl, Eduardo Bidese

Desenvolvimento de tecnologias no processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa [dissertação] / Eduardo Bidese Puhl ; orientador, Jair Carlos Dutra. - Florianópolis, SC, 2011.
1 v.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem MIG/MAG. 3. Polaridade negativa. 4. Revestimentos. 5. Chapas de metal - Soldagem. I. Dutra, Jair Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

CDU 621

Eduardo Bidese Puhl

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS NO PROCESSO
MIG/MAG PARA AUMENTO DE PRODUTIVIDADE E
MELHORIA DA QUALIDADE MEDIANTE O USO DA
POLARIDADE NEGATIVA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 8 de agosto de 2011.

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.
Co-Orientador

Prof. Julio Cesar Passos, Dr. Eng.
Coordenador do curso

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Enrique Niño. Dr. Eng.
Presidente

Profª. Ana Sofia Clímaco Monteiro d'Oliveira, Ph.D.
Membro

Prof., Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.
Membro

Aos meus pais, João e Cristina,
Ao meu irmão Rafael

AGRADECIMENTOS

Ao meu co-orientador, Prof. Nelso Gauze Bonacorso, pelo exemplo de dedicação e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e oportunidade de fazer parte da equipe do LABSOLDA.

Aos bolsistas Alexandre Weingartner, Felipe Nicolau, aos tecnólogos Jônathas Alves, Rafael Lucas, Renon Carvalho, Ricardo Campagnin, Fernando Costenaro, Diego Ederman ao designer Marcelo Okuyama ao Soldador Cleber Guedes, aos engenheiros Raul Gohr Junior, Erwin Teichmann e Miguel Guayasamin pela atuação direta no trabalho.

Aos técnicos Marcus Barnetche Paulo Pereira, Evandro Martins, Ricardo Campagnin, aos engenheiros Régis Silva, Mateus Schwedersky, e a toda equipe do LABSOLDA.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao CNPQ, pela bolsa de pesquisa e apoio financeiro para viagens.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão,
perder com classe e vencer com ousadia,
porque o mundo pertence a quem se atreve...”

(Augusto Branco)

RESUMO

Este trabalho trata do estudo feito sobre a aplicabilidade da polaridade negativa no processo MIG/MAG. Os desenvolvimentos são divididos em duas partes. A primeira parte é focada no uso em conjunto das polaridades positiva e negativa como estratégia para aumentar a produtividade e alcançar características específicas almejadas em procedimentos de revestimento por soldagem como, por exemplo, a baixa diluição. 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. Nem mesmo em soldagens de revestimento, onde baixa penetração é uma condição favorável, é possível utilizar a polaridade negativa. Devido à convexidade da solda, a realização de cordões lado a lado resulta em falhas de fusão. Para solucionar estes problemas, foi desenvolvida uma estratégia de troca de polaridade sincronizada com a posição da tocha no movimento de tecimento. A polaridade negativa é aplicada na região central do cordão de solda, enquanto que a polaridade positiva é usada nas regiões laterais. Desta maneira, é possível fazer uso da polaridade negativa para aumentar a taxa de deposição e diminuir a penetração, garantindo que, com a polaridade positiva, não ocorram pontos de falha de fusão nas laterais dos cordões. Na segunda parte do 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 uma maneira geral, para algumas aplicações de revestimento e soldagem de união de chapas finas, a soldagem MIG/MAG pode ser utilizada com polaridade

de eletrodo negativo mediante aplicação de técnicas que minimizem as falhas.

Palavras-chave: MIG/MAG, polaridade negativa, polaridade sincronizada, tecimento, revestimento, 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 bead without defects using only the negative polarity on GMAW processes. However, the results presented in these literatures are on deposit sheet and weld beads of high convexity, which hardly reflects a real application. The high convexity of a weld bead and the resulting low penetration, results in a low applicability in join welding. Not even in overlay welding, where low penetration is a favorable condition, it is possible to use negative polarity. Due to welding convexity, the realization of weld beads side by side results in a fusion failure. To solve the problem of this welding process it was developed a strategy of changing polarity in synchronized parameters with the torch trajectory on weaving motion. The negative polarity is applied to the central part of the weld seam while the positive polarity is applied to the borders. This way it is possible to use the negative polarity to increase the deposition rate and therefore decrease the penetration, and with positive polarity ensure that points of fusion defect will not occur at the borders of the weld bead. In the second part of this work, the negative polarity is applied to the automotive industry under the same circumstances 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 company's 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.

Keywords: GMAW, negative polarity, synchronized polarity, weaving motion, thin metal weld.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grandezas envolvidas na determinação da taxa de fusão[8]	6
Figura 2 - Comportamento do arco elétrico: em (a) CC+ e em (b) CC-[8].....	8
Figura 3 Taxa de fusão CC- e CC+ para DBCP de 25 mm.....	10
Figura 4 – Imagens da gota metálica sendo repelida e da movimentação do ponto catódico [14].	11
Figura 5 - Simulação mostrando o destacamento da gota metálica no processo MIG/MAG com polaridade positiva[15].	13
Figura 6 - Quadro de comparação variando polaridade e gás de proteção [16].	15
Figura 7 - Ensaios preliminares com polaridade negativa.	16
Figura 8 - Modelo típico de forma de onda do MIG CA, apresentado por Gohr [18]	17
Figura 9 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 4,7 mm (a); (b); (c); (d).	18
Figura 10 Ensaio de deposito sobre chapa MIG/MAG CA EM 70%	19
Figura 11 Ensaio de deposito sobre tubo MIG/MAG CA EN 70%	19
Figura 12 - Estratégia de funcionamento do processo MIG/MAG-PS.....	23
Figura 13 - Secção transversal do cordão	24
Figura 14 - Diagrama funcional do processo MIG/MAG-PS.	24
Figura 15 - Lógica de sincronismo do processo MIG/MAG-PS.....	25
Figura 16 - Foto da bancada de ensaios do processo MIG/MAG – PS.....	26
Figura 17 - Estrutura básica do SAC (Sistema Avançado de Controle).....	27
Figura 18 - Tela de configuração do SAC para o processo MIG/MAG - PS.	28
Figura 19 - Fluxograma no SAC do processo MIG/MAG – PS.	30
Figura 20 - Tartilope V2F montado sobre uma superfície curva.	31
Figura 21 - Fluxograma do MIG/MAG – PS no Tartilope V2F.	32
Figura 22 - Bancada de ensaios da soldagem de juntas	34
Figura 23 - Conjunto de peças que formam a longarina.	35
Figura 24 - Geometria de referência da secção transversal e seus parâmetros..	36
Figura 25 - Cordão de solda obtido com 50% de polaridade negativa.....	40
Figura 26 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame do cordão de solda da Figura 20.	41
Figura 27 - Geometria do cordão de solda obtida no processo MIG/MAG-PS com 67% de polaridade CC-	42
Figura 28 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame com 67% de polaridade negativa.	43
Figura 29 - Imagem da altura do arco e comprimento do eletrodo.	44
Figura 30 - Geometria de uma camada de solda obtida no processo MIG/MAG-PS com 1/3 de polaridade CC+.....	45
Figura 31 - Falhas de fusão em decorrência de desalinhamentos.	46
Figura 32 - Revestimento com falha de fusão.....	46
Figura 33 - Orientação da tocha na junta da longarina. A esquerda a inclinação transversal e a direita a inclinação longitudinal.....	48

Figura 34 - Aspecto visual e secções transversais dos cordões de solda.....	49
Figura 35 - Teste 2 em perspectiva.	51
Figura 36 - Defeitos encontrados nas soldagens de longarina.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Testes de comparação de gases e velocidades de arame para polaridades positiva e negativa.	14
Tabela 2 Ensaio com MIG/MAG CA.....	18
Tabela 3 Parâmetros para qualificação do cordão.....	37
Tabela 4 - Parâmetros do processo com 50 % de polaridade negativa	40
Tabela 5 - Parâmetros do processo com 67 % de polaridade negativa	42
Tabela 6 - Parâmetros usados nos ensaios nas juntas de longarina.	49
Tabela 7 - Resultado da medição dos parâmetros da norma.	50
Tabela 8 - Parâmetros utilizados para soldagem da longarina com duplo arame e polaridade negativa.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

Ar - elemento químico argônio
b - folga entre as chapas
CA - Corrente alternada
CC- - Polaridade negativa
CC+ - Polaridade positiva
CO₂ - gás carbônico
DBCP - Distância entre bico de contato e peça
E - Espessura da chapa
Eixo X - Eixo de movimentação longitudinal ao cordão de solda
Eixo Y - Eixo de movimentação transversal ao cordão de solda
G - Altura do cordão
GMAW – Gas Metal Arc Welding
I - corrente de soldagem
K - temperatura em Kelvin
L - extensão do eletrodo
L1 - comprimento de penetração
MIG/MAG - Metal Inert Gas / Metal Active Gas
MIG/MAG-PS - Processo de soldagem MIG/MAG com polaridade sincronizada
O₂ - oxigênio
r - profundidade de mordedura
SAC - sistema de aquisição e controle
SAP - sistema de aquisição e processamento
Tf - taxa de fusão
v. - velocidade
va - vazão
vs - velocidade de soldagem
Yp - amplitude de polaridade positiva do tecimento
Yt - amplitude de troca de polaridade
 $\Delta t(Va)$ – variável de atraso na troca de velocidade de arame
 α - constante relacionada ao calor gerado por fenômenos no arco
 β - constante dependente do diâmetro e da resistividade do arame-eletrodo

SUMÁRIO

ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ESTRUTURA DO TEXTO	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NA TAXA DE FUSÃO DO PROCESSO MIG/MAG	5
2.2- INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG NAS CARACTERÍSTICAS DO CORDÃO.	7
2.3 REVESTIMENTOS COM MIG/MAG CA E POLARIDADE NEGATIVA	14
3 METODOLOGIAS PARA APLICAÇÃO DA POLARIDADE NEGATIVA.	21
3.1 DESENVOLVIMENTOS PARA ALTA PRODUTIVIDADE EM SOLDAGEM DE REVESTIMENTOS MIG/MAG – PS	21
3.1.2 Bancada De Ensaio Para Soldagens Com o MIG/MAG – PS e Seus Desenvolvimentos	26
3.1.1 Fonte de Soldagem Aplicada no MIG/MAG – PS	26
3.1.2 SAC Sistema Avançado de Controle	27
3.1.3 Deslocador de Tocha Tartúlope V2F	30
3.2 SOLDAGEM DE LONGARINAS COM POLARIDADE NEGATIVA	33
3.2.1 Bancada de Ensaio da Soldagem de Longarinas	33
3.2.2 Descrição da Soldagem de União.	34

3.2.3 Critérios de avaliação das soldagens da longarina	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 DESENVOLVIMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE O MIG/MAG-PS	39
4.1.1 Ensaios de Soldagem Com o Processo MIG/MAG – PS	39
4.1.2 Problemática do Alinhamento no Processo MIG/MAG-PS	45
4.2 APLICAÇÃO DA SOLDAGEM DE JUNTAS COM POLARIDADE NEGATIVA	47
4.2.1 Resultado dos Ensaios com MIG/MAG CC-	47
4.2.2 Discussões Sobre os Resultados de Soldagem de Juntas Com Polaridade Negativa	53
5 CONCLUSÕES	55
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
7 REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho seguiu a linha de pesquisa e desenvolvimento característica do LABSOLDA, onde é almejado o surgimento de tecnologias inovadoras e suas respectivas metodologias de execução. Tal conduta proporciona maior desenvolvimento nacional, pois não fica concentrada na utilização de equipamentos existentes no mercado. No âmbito da tecnologia da soldagem, isto é relevante para o Brasil, uma vez que os produtos mais avançados são oriundos de tecnologia estrangeira. Além disso, o desenvolvimento de tecnologia própria gera grande flexibilidade para a pesquisa, pois não se está restrito às limitações impostas por um equipamento comercial, sendo factível o desenvolvimento de acordo com necessidades encontradas no decorrer do projeto.

Dentro destes desenvolvimentos, uma das linhas de pesquisa do laboratório é a 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 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 essas características ideais para soldagem de revestimento na recuperação de superfícies desgastadas de peças e de dutos. Bem como para a soldagem de chapas finas onde além da alta velocidade de soldagem o calor aportado a peça deve ser reduzido diminuindo distorções. Entretanto as falhas de fusão entre cordões de solda e instabilidade do arco devem ser controladas para utilização somente desta polaridade.

1.1 OBJETIVOS

A presente dissertação reúne as tecnologias e esforços desenvolvidos na área de soldagem MIG/MAG de revestimento e de união de chapas finas com os seguintes objetivos principais:

- i) Desenvolver uma metodologia para o emprego da polaridade negativa como ferramenta para aumento de taxa de deposição e qualidade de revestimentos. Para isto serão desenvolvidos meios para eliminar as falhas encontradas na soldagem com polaridade negativa.

ii) Explorar a polaridade negativa na soldagem MIG/MAG de união de chapas finas em alta velocidade aplicando o processo em peças da indústria automotiva. A meta é realizar soldas aceitáveis aos requisitos impostos com alta produtividade com processos mais simples que os aplicados industrialmente.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

A estrutura do trabalho está dividida em seis capítulos, onde o primeiro é a Introdução.

Na sequência, o segundo capítulo apresenta uma fundamentação teórica onde é explicada a base de conhecimentos para o perfeito entendimento do trabalho. São destacados os efeitos e características da soldagem MIG-MAG, especialmente quando o eletrodo encontra-se ligado ao pólo negativo da fonte.

No terceiro capítulo estão expostos os desenvolvimentos tecnológicos propostos no trabalho, envolvendo concepções de projeto e metodologias.

A seguir, no quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados com os processos de soldagem para revestimento e solda de união.

Por fim, o quinto capítulo trás as conclusões sobre os desenvolvimentos do trabalho e o sexto capítulo apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo MIG/MAG é convencionalmente utilizado com o eletrodo conectado ao pólo positivo da fonte. Sendo a configuração representada por CC+, (polaridade positiva). Nesta condição, o processo apresenta características de geometria do cordão de solda e estabilidade do arco elétrico adequadas para utilização do processo. Na polaridade negativa, CC-, o processo não apresenta estas características. A falta de estabilidade é o fator responsável pela pouca aplicação da polaridade negativa. Esta resulta em um cordão de solda de qualidade inaceitável com respingos nas laterais dos cordões soldados com CC-.

Quando se comuta a polaridade do eletrodo as características do arco e do cordão mudam de forma relevante. Por exemplo, a profundidade de penetração e tamanho da zona fundida de uma solda em MIG/MAG CC- são menores em relação à outra soldagem realizada com MIG/MAG CC+ para as mesmas condições de gás de proteção, corrente de soldagem e relação entre a velocidade de alimentação de arame e a velocidade de deslocamento.

Na maioria das aplicações, quando se tenta unir duas peças, por exemplo, a penetração completa é uma característica desejável. Nestes casos, é muito importante garantir a penetração e conseqüentemente a continuidade da junta, justificando também o maior uso da polaridade positiva que apresenta característica de maior penetração.

2.1 INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NA TAXA DE FUSÃO DO PROCESSO MIG/MAG

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 da maioria das

aplicações. 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.

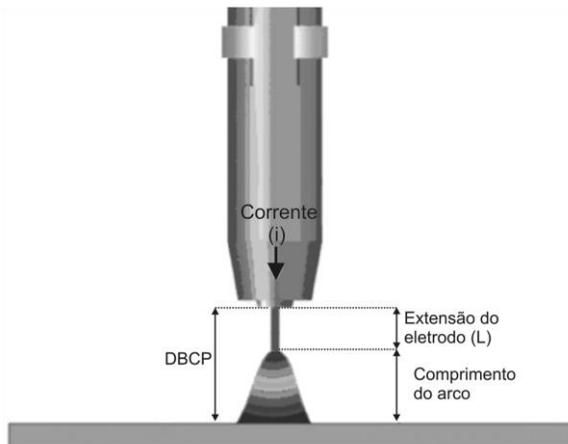


Figura 1 - Grandezas envolvidas na determinação da taxa de fusão[8]

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

Onde:

- Tf: taxa de fusão (kg/h);
- α : constante relacionada ao calor gerado por fenômenos no arco e dependente também da polaridade (kg/A.h);
- β : constante dependente do diâmetro e da resistividade do arame-eletrodo (kg/mm.A².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 α . 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.

A segunda parte representa a parcela de calor gerado 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 secção transversal, extensão (L) e resistividade elétrica do material.

Entretanto a Equação 1, para polaridade negativa mesmo que exista com um conjunto de variáveis “ α ” e “ β ” adequadas, é de difícil aplicação esta equação para a negativa. Nessa situação, é não se tem uma definição clara de comprimento do arco e de extensão do eletrodo devido às características do arco em CC-.

2.2- INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG NAS CARACTERÍSTICAS DO CORDÃO.

Existe ainda 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].

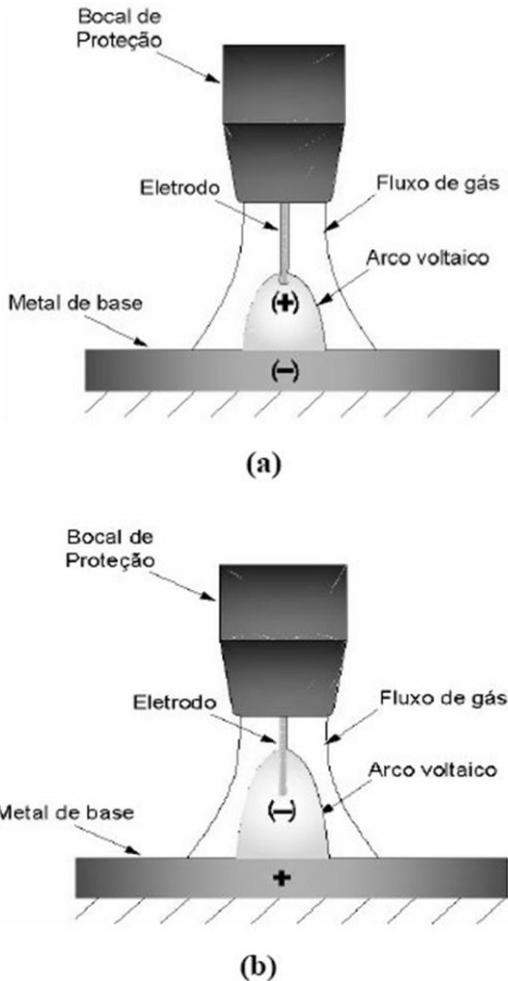


Figura 2 - Comportamento do arco elétrico: em (a) CC+ e em (b) CC- [8]

O envolvimento da maior extensão sólida do eletrodo pelo arco 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 tanto para polaridade positiva quanto 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%O₂ como gás de proteção e para as soldagens com eletrodo positivo o gás de proteção utilizado foi 92%Ar+8%CO₂. Todas as 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.

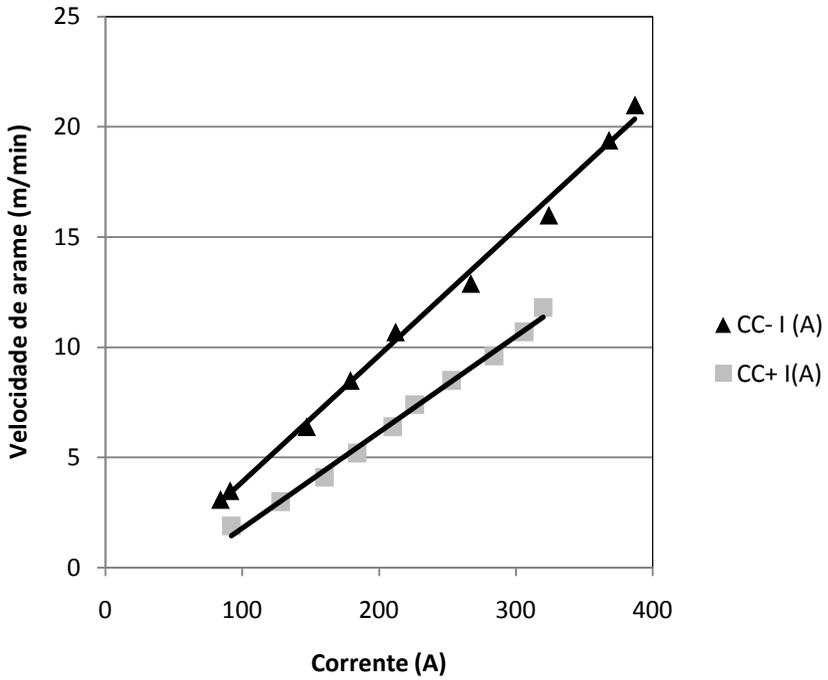


Figura 3 Taxa de fusão CC- e CC+ para DBCP de 25 mm

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.

A 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 à poça.

Lancaster [7] atribui os respingos grosseiros a uma força catódica repulsiva relacionada à formação de um ponto catódico de natureza bastante instável. O ponto catódico na extremidade inferior da gota metálica é identificado por uma grande concentração de energia luminosa, Figura 4.



Figura 4 – Imagens da gota metálica sendo repelida e da movimentação do ponto catódico [14].

A polaridade tem efeito marcante nas características geométricas do cordão. É notável a diferença de geometria e tamanho da 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 consigo uma quantidade de calor que, dependendo da energia cinética da gota pode ter conseqüências diferentes na geometria do cordão.

Essers e Walter [5] afirmam que a menor parte do calor transferido para a região da solda é devido às gotas metálicas (25%). O calor transferido por radiação, convecção e condução combinadas e pela passagem de corrente representam 34% e 41%, respectivamente.

Na condição CC+ a gota é destacada em uma condição superaquecida e quando projetada para poça de fusão contribui para o aumento de fusão. Na condição CC- o arco fica ancorado mais acima, envolvendo uma porção maior do arame aproveitando mais a energia para fusão do arame. Deste modo, supõe-se que a gota tenha uma quantidade menor de calor.

Para verificar o efeito do impacto das gotas metálicas na formação da poça de fusão, Essers e Walter [5] realizaram filmagens de alta velocidade onde constataram que o impacto de cada gota gera uma deformação, ou cavidade dentro da poça, e que a frequência de destacamento das gotas influencia no comportamento da poça. Em correntes baixas as gotas se chocam com a poça de fusão em uma frequência menor, permitindo que a cavidade gerada por uma gota seja preenchida pela ação da tensão superficial antes que uma nova gota cause outro impacto. À medida que a frequência de destacamento é maior, não há tempo suficiente para ação da tensão superficial, permitindo que a cavidade se feche. Desta forma, as gotas subseqüentes entram em contato com uma região mais profunda da poça aumentando a transferência de calor nesta região.

Este efeito é mais pronunciado na condição CC+, onde as gotas atingem a poça de fusão com grande velocidade, resultando em maior profundidade de penetração. Nos experimentos de Essers e Walter [5] a

velocidade de impacto das gotas metálicas foi menor na condição CC-, e resultaram em cordões de solda menos profundos. A diminuição da velocidade das gotas na polaridade negativa foi atribuída à escalada do arco.

Hu e Tsai [15] afirmam que o impacto das gotas metálicas sobre a poça de fusão afeta a forma da superfície e a transferência de calor por convecção na poça de fusão. A deformação gerada pelo impacto de uma gota metálica tem influência sobre a distribuição da corrente na poça de fusão e desta forma afeta o fluxo de calor e a energia transferida do arco. Seus resultados basearam-se na simulação do destacamento da gota, transferência desta no arco, transferência de calor na poça de fusão, formação e preenchimento da cavidade em regime de transferência globular em CC+. Na Figura 5 é possível observar esta sequência e a formação da cavidade, em função do impacto da gota metálica contra a poça de fusão acarretando, também em um aumento de temperatura no interior desta.

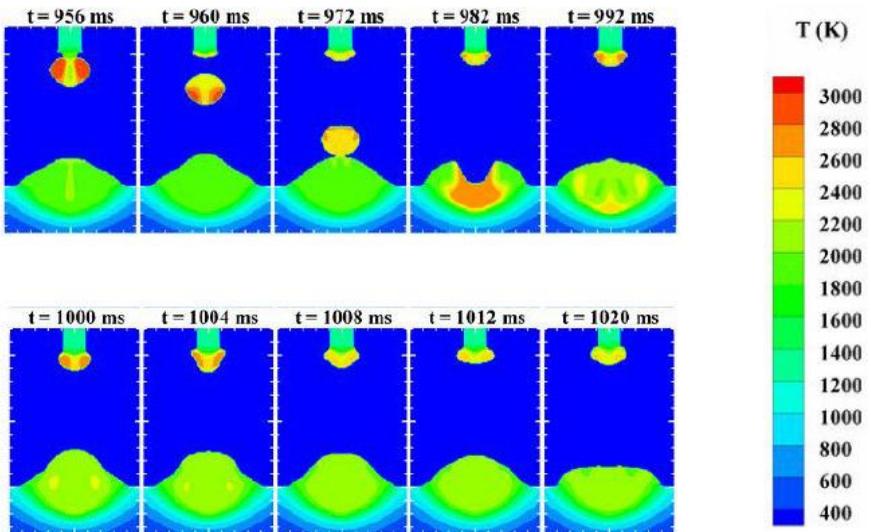


Figura 5 - Simulação mostrando o destacamento da gota metálica no processo MIG/MAG com polaridade positiva[15].

2.3 REVESTIMENTOS COM MIG/MAG CA E POLARIDADE NEGATIVA

Resultados mais recentes apresentados por Souza [4] mostram a 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%O₂. Como resultados foram obtidos cordões com acabamento aceitável, porém de geometria extremamente convexa.

Em ensaios realizados no LABSOLDA [16], 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%O₂, Figura 6.

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 ₂	8	30	15	20	250
2	CC-	98%Ar+2%O ₂	12,4	46	15	20	250
3	CC+	92%Ar+8%CO ₂	8	30	15	20	250
4	CC-	92%Ar+8%CO ₂	11,4	43	15	20	250
5	CC+	82%Ar+18%CO ₂	8	30	15	20	250
6	CC-	82%Ar+18%CO ₂	11	41	15	20	250

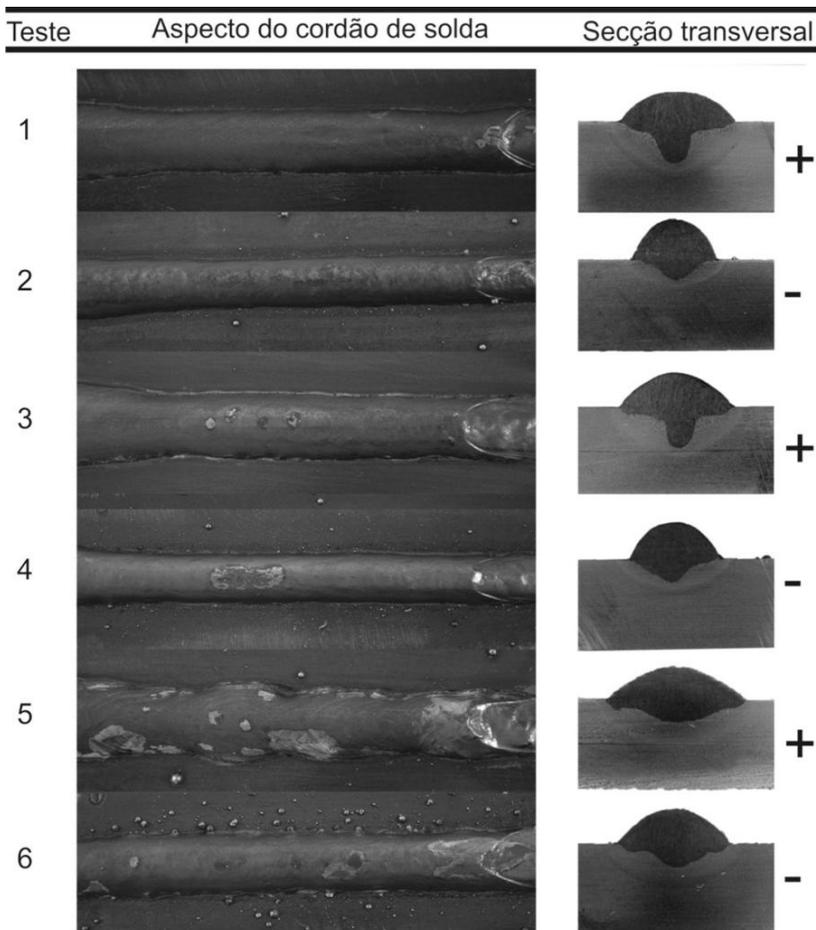


Figura 6 - Quadro de comparação variando polaridade e gás de proteção [16].

De maneira geral os resultados da Figura 6 confirmam 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_2 ou CO_2 misturado ao Argônio, sendo que os ensaios 2 e 4 com 98%Ar+2% O_2 e 92%Ar+8% CO_2 na polaridade negativa apresentaram baixo nível de respingos, porém com geometria de alta convexidade. À medida que o teor de CO_2 aumenta, o cordão soldado passa a ter uma geometria mais favorável e com maior penetração. Em contrapartida a quantidade de salpicos indesejáveis aumenta.

Na tentativa de aplicar a polaridade negativa em soldagens de revestimento Puhl [17] apresenta ensaios de soldagem onde foram realizados revestimentos com eletrodo negativo. Nestes revestimentos a fonte de soldagem operou em modo tensão com amplitude de tensão imposta ao arco elétrico de 32 Vcc. A corrente elétrica média resultante com DBCP de 20 mm foi de 250 A. As velocidades de soldagem e de arame foram respectivamente 13,2 mm/s (22 cm/min) e 0,7 mm/s (11,7 m/min). A mistura 98% Ar mais 2 % de O₂, com vazão de 15,0 l/min, foi o gás de proteção utilizado.

Em todas as três distintas técnicas aplicadas de revestimento houve falhas de fusão entre cordões de solda como pode ser constatado nas respectivas secções transversais da Figura 7.

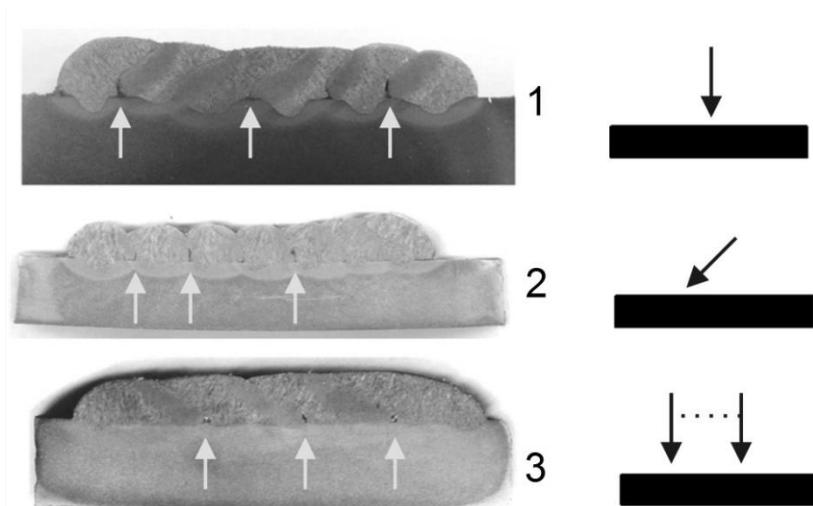


Figura 7 - Ensaios de revestimento com polaridade negativa.

Os cordões de solda dos três revestimentos foram depositados de forma automática com uma sobreposição de 50 % onde o eletrodo era sempre posicionado junto à lateral do cordão anterior. O revestimento da Figura 7.1 foi realizado sem tecimento e com ângulos de ataque e de inclinação nulos, ou seja, tocha perpendicular a superfície do corpo de prova. O revestimento da Figura 7.2 foi também realizado sem tecimento. A tocha foi inclinada em 45°, giro ao redor do eixo longitudinal dos cordões de solda, com o objetivo de eliminar, sem sucesso, a descontinuidade por falhas de fusão entre cordões de solda. Outra tentativa de eliminar este defeito, também sem obter sucesso, foi

o de realizar o revestimento por meio de um tecimento triangular da tocha de soldagem, amplitude de 12 mm e frequência de 1,5 Hz, Figura 7.3.

Santos[6] desenvolveu uma tecnologia para soldagem MIG/MAG CA em aplicações com alumínio e aço. Na soldagem com aço a polaridade tem influência na taxa de fusão e na transferência metálica. De forma semelhante ao MIG/MAG Pulsado, o processo em corrente alternada utiliza um pulso de corrente positiva para forçar o destacamento da gota metálica. Sendo que a corrente de base pode variar entre a polaridade positiva e negativa. Esta variação influencia diretamente na taxa de fusão e no calor entregue a peça assim modificando a geometria do cordão de solda. A Figura 8 apresenta a forma de onda utilizada por Santos [6].

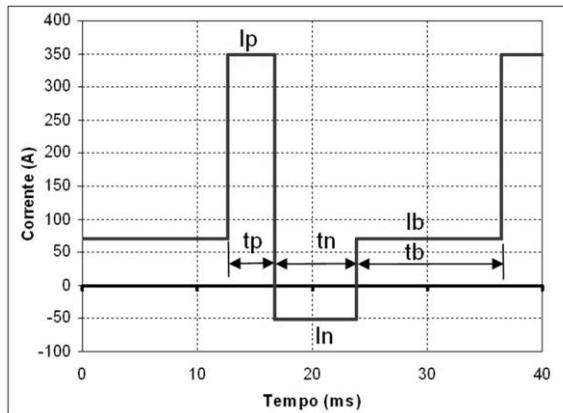


Figura 8 - Modelo típico de forma de onda do MIG CA, apresentado por Gohr [18]

Variando os valores de I_n , t_n , I_b , e t_b Santos [6] definiu condições intermediárias de polaridade de eletrodo. A Tabela 2 apresenta ensaios com MIG/MAG pulsado com percentuais de eletrodo negativo diferentes.

Tabela 2 Ensaio com MIG/MAG CA

Ensaio	%EN	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Ip (A)	tp (ms)	In (A)	tn (ms)	Ib (A)	tb (ms)
a	0	2,7	54	300	4	0	0	78	20
b	30	2,7	54	300	4	60	7	80	13
c	50	2,7	54	300	4	60	12	84	8
d	70	2,7	54	300	4	60	17	101	3

Ensaio foram realizados sobre chapas de aço carbono 4,7 mm de espessura, com arame ER 70S6 com diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção com mistura de Argônio com 8 % CO₂, vazão de 15 l/min e distância bico-peça (DBCP) de 15 mm.

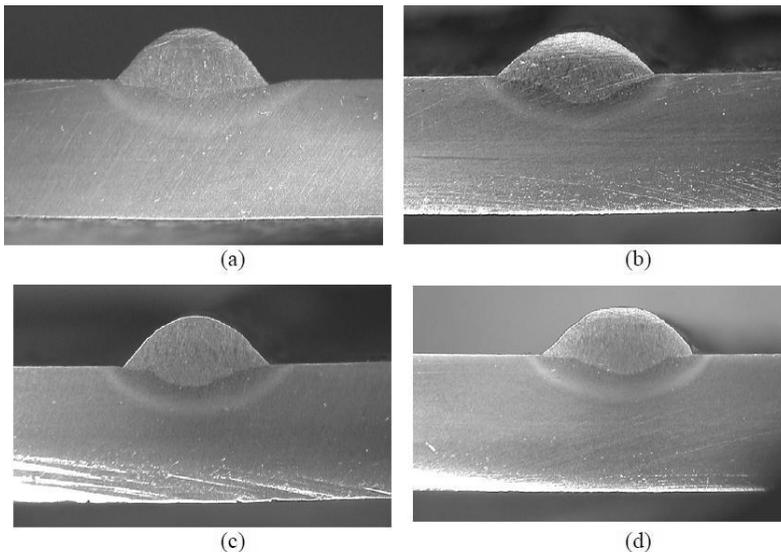


Figura 9 – Seções transversais dos cordões (a); (b); (c); (d) da Tabela 2. [6]

Com o aumento de percentual de eletrodo negativo (EN) a diluição do cordão de solda diminui. Entretanto esta diminuição não é significativa.

Visando a avaliação prática da aplicação do processo à soldagem de recuperação de dutos em operação, Santos [6] realizou ensaios exploratórios simulando a soldagem de recuperação de dutos.

Nestes experimentos foram utilizadas as variáveis do experimento “d” da Figura 9 com 70% de eletrodo negativo, e efetuada deposição de vários cordões sobre chapa, Figura 10, e posteriormente, sobre tubo, Figura 11. Nos ensaios foram utilizadas chapas e tubos com espessura de 2 mm.

As setas verticais indicam falhas de fusão presentes na união dos cordões. Estas estão presentes tanto no revestimento em chapa plana como sobre tubo.

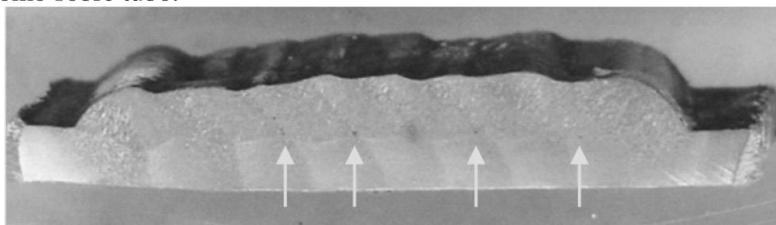


Figura 10 Ensaio de depósito sobre chapa MIG/MAG CA EM 70% [6]

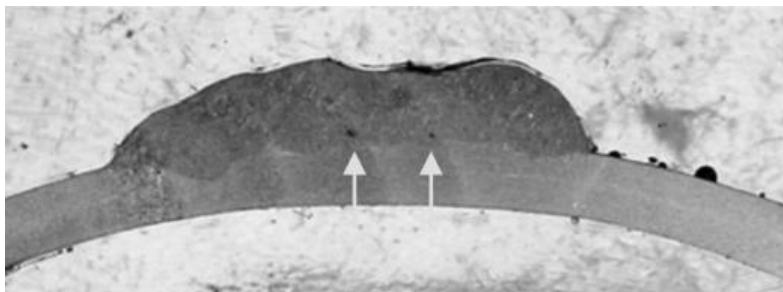


Figura 11 Ensaio de depósito sobre tubo MIG/MAG CA EN 70% [6]

Os resultados apresentados por Santos [6] mostram que o MIG/MAG CA pode ser aplicado para revestimentos, entretanto aparecer descontinuidades entre os cordões. Estas descontinuidades aparecem alinhadas ao longo dos cordões caracterizando um defeito grave reprovando o revestimento perante normas de qualificação.

Figura 9, que apresenta a influência das variações de percentual de polaridade na geometria do cordão, mostra que esta influência não é relevante quando comparada com a encontrada nos ensaios somente com a polaridade negativa Figura 6.

3 METODOLOGIAS PARA APLICAÇÃO DA POLARIDADE NEGATIVA.

Apesar dos problemas relatados na literatura presente este trabalho apresenta propostas para a utilização da polaridade negativa no processo MIG/MAG em dois contextos. Em soldagem de revestimentos e soldas de chapas finas em junta sobrepostas.

Para realizar revestimentos sem descontinuidades e utilizando os benefícios da polaridade negativa é proposta uma tecnologia com polaridade sincronizada que aqui passa a ser denominado MIG/MAG – PS. Neste processo a polaridade de eletrodo se altera de acordo com a posição da tocha em relação a seu movimento oscilatório no transversalmente ao sentido de soldagem.

Para soldagem de juntas de chapas finas o trabalho apresenta alternativa que compete em produtividade com o processo MIG/MAG duplo arame.

3.1 DESENVOLVIMENTOS PARA ALTA PRODUTIVIDADE EM SOLDAGEM DE REVESTIMENTOS MIG/MAG – PS

Na soldagem de revestimentos algumas características especiais dos processos e procedimentos devem ser buscadas. Estas devem atender a determinados requisitos inerentes ao que é almejado de um revestimento.

Um caso muito característico é a recuperação por soldagem de linhas dutoviárias de petróleo e gás que sofreram corrosão e que necessitam serem soldadas em operação. A temperatura ao longo da espessura do material não deve atingir determinado nível para garantir segurança no trabalho e isto só pode ser conseguido com mínimo de penetração e diluição. Trabalhos deste tipo vêm sendo realizados ainda com eletrodos revestidos, pois associando o tipo de eletrodo com a habilidade do soldador, é possível executar a operação com poucos riscos.

Por outro lado, o processo MIG/MAG é considerado de alta produtividade e facilmente automatizado, justamente por essas razões é bastante aplicado na indústria em operações manuais e automatizadas. Na soldagem de revestimento a mínima diluição é primordial, uma vez

que o objetivo principal não é fundir o material de base e sim depositar material à superfície das peças.

Esta característica é encontrada na soldagem MIG/MAG com polaridade negativa (CC-) onde a pequena profundidade de penetração da zona fundida aliada à alta taxa de fusão do eletrodo, é favorável para o revestimento. Em contra partida, a polaridade negativa propicia menor estabilidade do arco elétrico atribuída a uma força eletromagnética repulsiva de natureza instável [7]. Como descrito na fundamentação teórica, existem condições onde o processo com polaridade negativa não apresenta respingos, porém com uma geometria extremamente convexa.

Apesar do cordão de solda produzido pelo processo MIG/MAG com polaridade negativa, apresentar uma significativa redução de penetração em relação à polaridade positiva, o seu perfil, quase circular, é impróprio para receber outro cordão de solda ao lado. Os resultados apresentados na fundamentação teórica mostram não é possível conseguir, mesmo com orientação da tocha de soldagem favorável, um revestimento sem descontinuidades por falta de fusão.

Por isso, surge a inovação tecnológica aqui proposta, baseada nas características fundamentais do processo MIG/MAG convencional. Para a sua execução é necessário além de equipamentos automáticos um método de sincronização entre o movimento de tecimento da tocha e a polaridade do processo MIG/MAG conforme mostra a Figura 12.

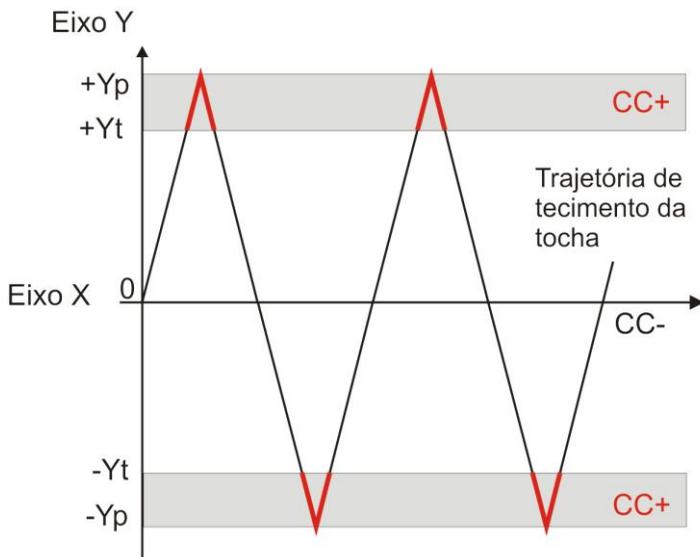


Figura 12 - Estratégia de funcionamento do processo MIG/MAG-PS.

No região central do cordão de solda, o intervalo entre as amplitudes de tecimento ($-Y_t$ e $+Y_t$), funciona a polaridade negativa e quando a tocha se aproxima das extremidades, intervalos entre as amplitudes de tecimento ($-Y_t$ e $-Y_p$) e ($+Y_t$ e $+Y_p$) a polaridade é comutada para a positiva a fim de que se tenha um perfil transversal adequado à união com o cordão adjacente. A esta nova modalidade de processo, onde o operador define os valores de amplitude Y_t e Y_p , foi atribuído o nome de MIG/MAG-PS, numa referência à polaridade do processo de soldagem MIG/MAG ser sincronizada com o movimento de tecimento da tocha.

A representação esquemática da seção transversal do cordão esperado, Figura 13, possui em suas extremidades laterais características da polaridade positiva e na parte central características da polaridade negativa. A penetração esperada é baixa, de perfil uniforme e a geometria do cordão possibilita a soldagem de revestimentos em múltiplos passes. A esta possibilidade de múltiplos passes, aliada a alta taxa de deposição, beneficia o aumento de produtividade.

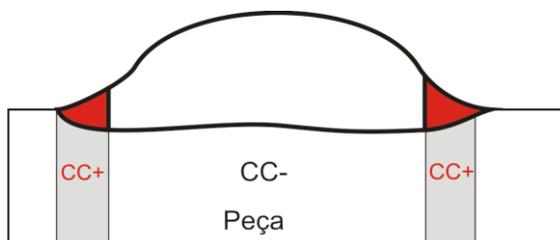


Figura 13 – Representação esquemática da secção transversal do cordão

A Figura 14 mostra, de forma esquemática, os equipamentos envolvidos com seus respectivos parâmetros e/ou sinais de entrada e saída para a implementação deste novo processo de soldagem.

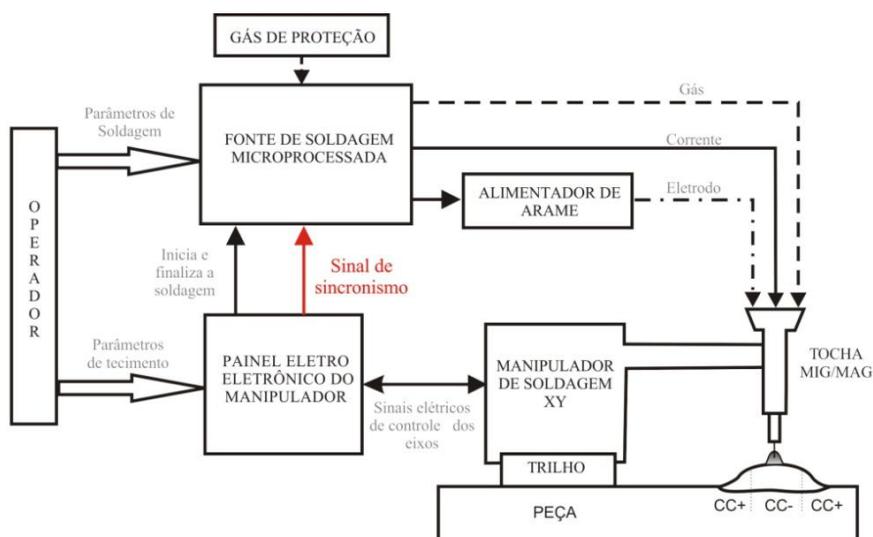


Figura 14 - Diagrama funcional do processo MIG/MAG-PS.

Na fonte de soldagem são configuradas variáveis como corrente e velocidade de arame para as duas polaridades. No decorrer da soldagem o manipulador de dois graus de liberdade executa os movimentos de tecimento e envia o sinal de sincronismo para a fonte atuar no processo de soldagem.

No painel eletrônico do manipulador são configuradas as seguintes variáveis: amplitude e frequência de tecimento, velocidade de

soldagem e as amplitudes $-Y_t$ e $+Y_t$. Estas variáveis fazem parte da lógica de geração do sinal de sincronismo, Figura 15.

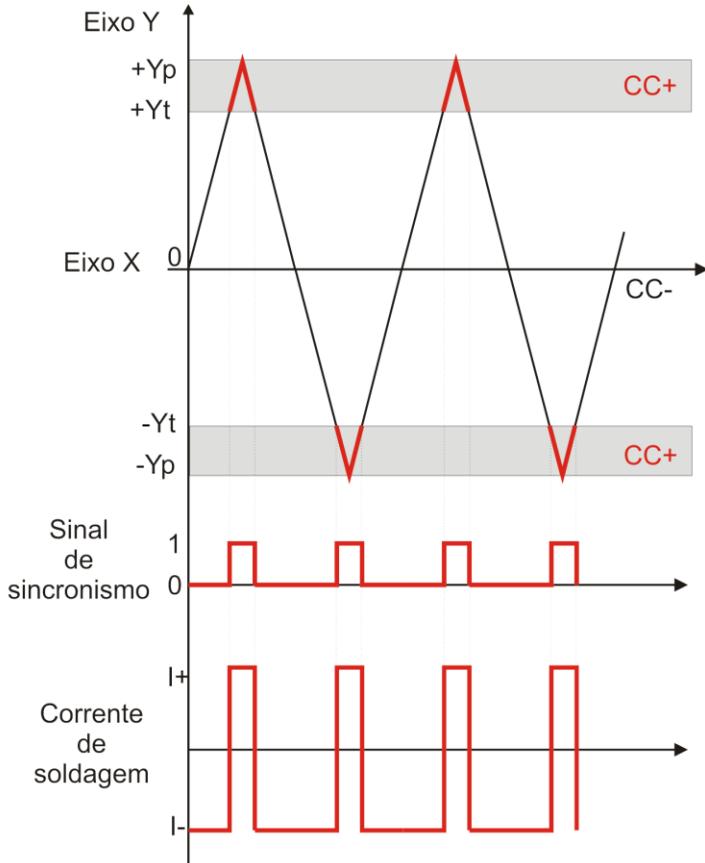


Figura 15 - Lógica de sincronismo do processo MIG/MAG-PS.

Para uma dada velocidade, amplitude e frequência de tecimento configuradas, são comparadas instantaneamente a posição do Eixo Y com as amplitudes de sincronismo ($-Y_t$ e $+Y_t$). Quando a posição no Eixo Y ultrapassa uma das linhas, $-Y_t$ ou $+Y_t$, o sinal de sincronismo passa para nível lógico 1 (um) e a fonte aplica corrente positiva ($CC+$), caso contrário o nível lógico é 0 (zero) e a fonte aplicará corrente negativa ($CC-$).

3.1.2 Bancada De Ensaios Para Soldagens Com o MIG/MAG – PS e Seus Desenvolvimentos

A bancada de ensaios, Figura 16, é composta por uma fonte de soldagem Inversal 450 destacada no item 1, o SAC – Sistema Avançado de Controle item 2, um manipulador de tocha Tartílope V2F item 3 e o SAP - Sistema de Aquisição Portátil utilizado para captura dos sinais de tensão corrente e velocidade de arame [19, 20] indicado com o número 4.

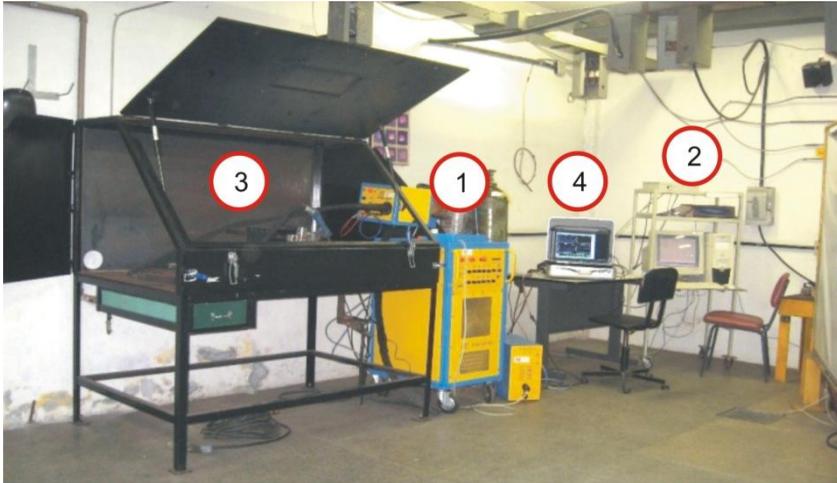


Figura 16 - Foto da bancada de ensaios do processo MIG/MAG – PS. (1) Fonte de soldagem, (2) Sistema Avançado de Controle, (3) Tartílope V2F, (4) Sistema de Aquisição Portátil.

3.1.1 Fonte de Soldagem Aplicada no MIG/MAG – PS

A fonte de soldagem, INVERSAL 450, pode trabalhar com os processos TIG, MIG/MAG, Plasma e Eletrodo revestido, tanto em CC quanto em CA com grande variedade de opções de regulagem dos parâmetros. Além disso, possui uma entrada de sinal analógico de referência de corrente do arco elétrico, o que caracteriza o acionamento em modo remoto da fonte. Ao se usar a opção de acionamento remoto a corrente de soldagem fornecida é controlada em malha fechada pela fonte que obedece ao sinal de referência aplicado na referida entrada analógica.

A fonte de soldagem não é microprocessada, não sendo factível a atuar sobre seu software. Desta maneira não está preparada para trabalhar diretamente com o processo MIGMAG-PS. Por meio da entrada analógica remota da fonte de soldagem torna-se viável implementar o processo MIG/MAG-PS. Nesta condição, foi utilizado o SAC (Sistema Avançado de Controle) para fornecer o sinal de referência da corrente elétrica do arco.

3.1.2 SAC Sistema Avançado de Controle

A estrutura do equipamento é formada por dois componentes básicos: um computador denominado CPU1 onde está instalado o software de interface gráfica com o usuário e uma plataforma microcontrolada, identificada como CPU2, com entradas e saídas digitais e analógicas. Na interface gráfica do CPU1 são configurados os parâmetros de soldagem necessários, e por comunicação USB são passadas as informações de referência para CPU2. Esta por sua vez, é responsável por tratar as informações recebidas e enviar os sinais de referência para o controle remoto da fonte [19, 20].

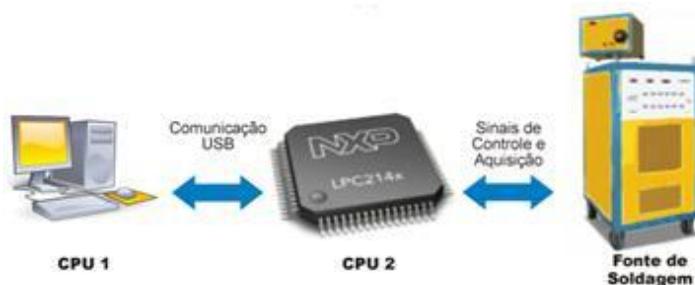


Figura 17 - Estrutura básica do SAC (Sistema Avançado de Controle).

Para realizar o sincronismo do SAC com o Tartilope foi desenvolvida uma conexão elétrica entre os equipamentos. Dentro do desenvolvimento de software da interface CPU1 foi desenvolvida uma tela de configuração, Figura 18, para o processo MIG/MAG-PS onde é possível configurar os parâmetros de soldagem para as duas condições CC+ e CC-.

SAC - Controle Remoto da Fonte da Soldagem DIGIplus A7

Inicio
Eletrodo Revestido
MIG /MAG

Convençional
Pulsado Normal
Pulsado Térmico
Misto
CCC
Polaridade Sincronizada
Deserhe seu MIG

TIG
Normal
Pulsado
Alternado
Deserhe seu TIG
Plasma

Salvar Ler Enviar Soldar Parar Info

Variáveis
I+ = corrente fase positiva [A]
I- = corrente fase negativa [A]
Vp+ = voltagem fase positiva [V(rms)]
Vp- = voltagem fase negativa [V(rms)]
MaxI = atraso da val aarame [ms]
Ucc = tensão de curto-circulo [V]
Icc = corrente de curto-circulo [A]

Variáveis do manipulador >>
Amplitude do movimento (Y) [mm]
Velocidade de avanço (X) [mm/min]
Velocidade de soldagem (X) [mm/min]

MIG/MAG + PS (Polaridade Sincronizada)

Corrente I (A)
Deslocamento da tocha X
t (ms)

Fase Positiva Vp+ 200 Vp- 12
Fase Negativa I- -250 I+ 11
Global 01 Δt(Va) 100
Global 02 Ucc 10 Icc 400

CC+ CC- CC+ CC-

Figura 18 - Tela de configuração do SAC para o processo MIG/MAG - PS.

No menu a esquerda da tela na Figura 18 o usuário pode definir o processo a ser utilizado, por exemplo, em MIG/MAG existem algumas modalidades, entre elas, a polaridade sincronizada. Na parte superior é possível salvar e ler arquivos, comandar a soldagem pelo computador e obter informações adicionais do processo.

As variáveis de soldagem estão divididas em fase positiva, fase negativa e variáveis globais. Nas fases, positiva e negativa, são definidas a corrente de soldagem e a velocidade de arame. As variáveis globais têm influência tanto na fase positiva quanto na fase negativa. A variável $\Delta t(Va)$ expressa um atraso em milissegundos. Ela representa um instante de tempo entre a troca de parâmetro de corrente e de velocidade de arame. As variáveis U_{cc} e I_{cc} são respectivamente a tensão e a corrente de curto circuito.

Quando o SAC opera no modo MIG/MAG – PS os parâmetros configurados na tela da Figura 18 são dependentes do sinal externo de sincronismo. Quando a soldagem é iniciada, de acordo com o fluxograma da Figura 19, um teste lógico é feito, verificando o sinal de sincronismo para empregar os parâmetros de polaridade negativa ou positiva.

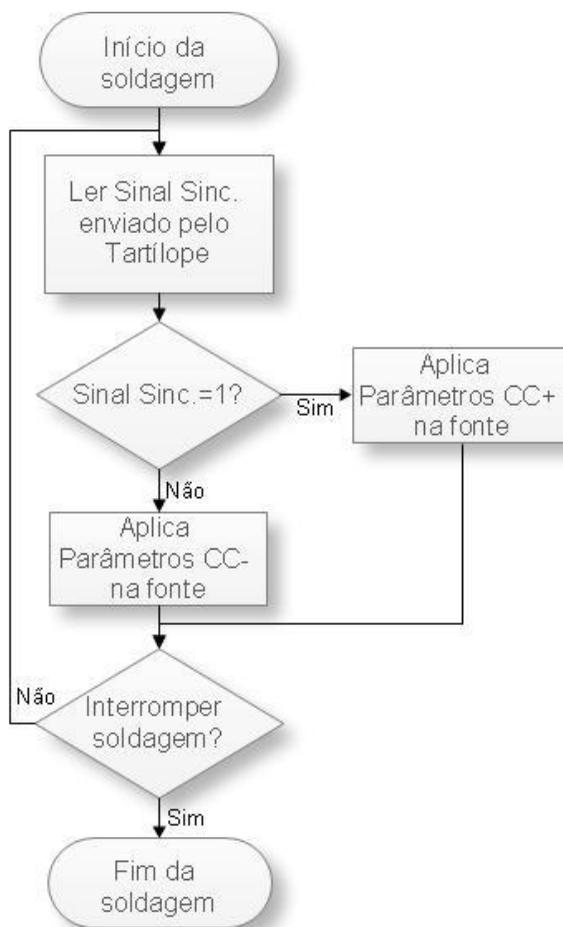


Figura 19 - Fluxograma no SAC do processo MIG/MAG – PS.

3.1.3 Deslocador de Tocha Tartilope V2F

O Tartilope V2F é um manipulador de dois graus de liberdade, direções X e Y, capaz de mover uma tocha de soldagem em uma trajetória paralela a uma superfície curva sem variar a DBCP (distância entre bico de contato e peça) [9]. Pode-se verificar a aplicabilidade deste equipamento em operações de reparo por deposição de solda, ou até na soldagem orbital de tanques, tubos ou reservatórios de grande porte. A estrutura desse equipamento, Figura 20, é formada por dois

componentes básicos, manipulador e trilho. O manipulador é montado sobre o trilho flexível com sapatas magnéticas de fixação. Desta forma, o trilho toma a forma da superfície a ser soldada.

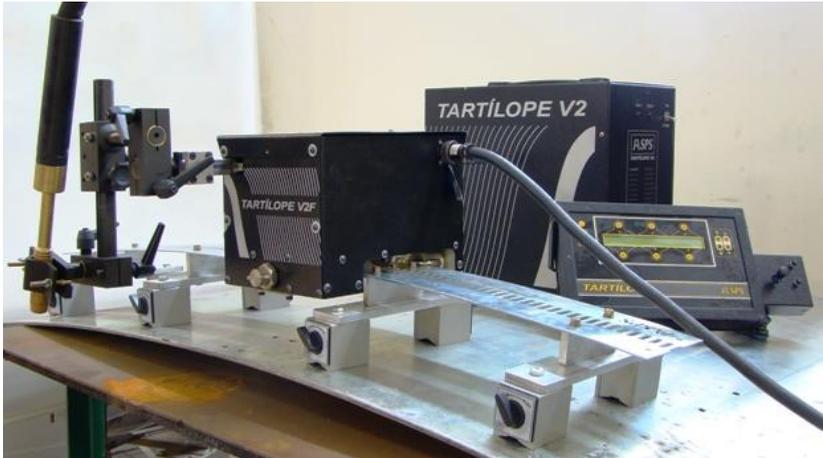


Figura 20 - Tartilope V2F montado sobre uma superfície curva.

No painel eletrônico do manipulador são configuradas: a amplitude e a frequência de tecimento, a velocidade de soldagem e a amplitude de comparação Y_t . Estas variáveis fazem parte da lógica do sinal de sincronismo, conforme descrito na Figura 15.

O sinal de sincronismo serve como parâmetro de seleção das variáveis de soldagem e é gerado no gabinete de controle do Tartilope. Ao iniciar o movimento dos eixos X e Y para execução do tecimento é iniciada a rotina de sincronismo.

O grande desafio tecnológico para a execução do processo MIG/MAG-PS é sincronizar a polaridade da fonte de soldagem com a trajetória de movimento da tocha. Para realizar tal tarefa, tanto o manipulador, quanto a fonte de soldagem, devem permitir implementação de lógicas de controle envolvendo entradas e saídas de sinais elétricos específicos.

Analisando a posição do eixo Y, o equipamento identifica se está dentro da faixa Y_p e Y_t e atualiza o sinal de sincronismo para o SAC. Estas faixas são estabelecidas na tela de configuração de tecimento,

junto com amplitude, frequência e velocidade de deslocamento. A rotina de testes pode ser observada no fluxograma da Figura 21.

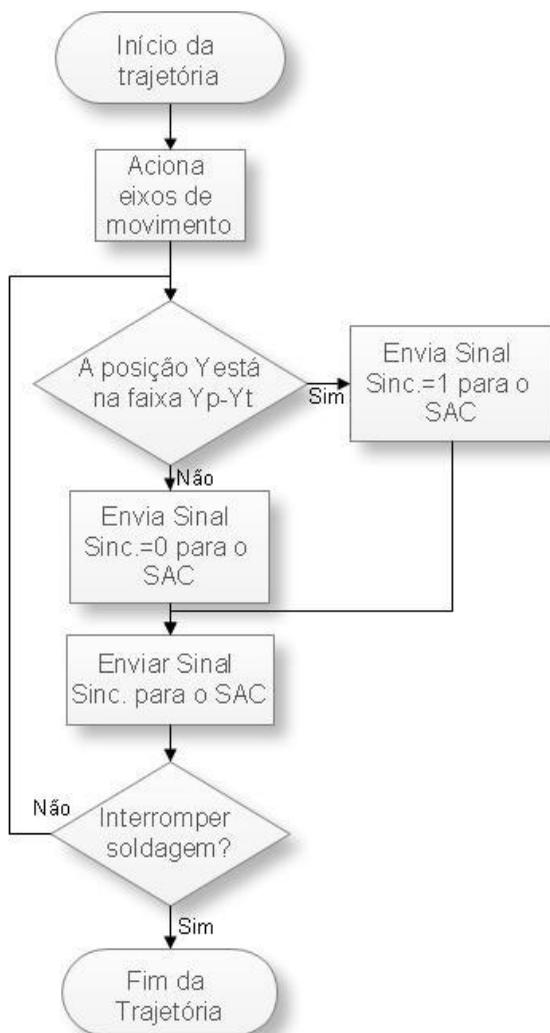


Figura 21 - Fluxograma do MIG/MAG – PS no Tartilope V2F.

3.2 SOLDAGEM DE LONGARINAS COM POLARIDADE NEGATIVA

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% O₂ 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-.

3.2.1 Bancada de Ensaio da Soldagem de Longarinas

A Figura 22 mostra a bancada de soldagem usada para realização dos ensaios propostos 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 22 - Bancada de ensaios da soldagem de juntas

A fonte utilizada é uma fonte eletrônica não inversora, que portanto, 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.

3.2.2 Descrição da Soldagem de União.

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 23 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 23 - Conjunto de peças que formam a longarina.

O conjunto em questão tem 1000 mm de comprimento e uma geometria cheia de curvas. Uma vez que a finte de soldagem não estava integrada com o robô, não era possível sincronizar o início de movimento com o início da soldagem. Também ficaram impossíveis as alterações de parâmetros de soldagem em determinadas regiões do cordão.

Para facilitar a etapa de testes serão avaliadas as soldagens do maior trecho reto da junta, conforme destacado na Figura 23. A reta em vermelho representa o segmento de 250 mm apresentado nas imagens de comparação de resultados.

3.2.3 Critérios de avaliação das soldagens da longarina

Os resultados das soldagens serão apresentados e confrontados com critérios de aceitação utilizados no controle de qualidade de peças automotivas.

O critério de avaliação aplicado pelo fabricante considera a geometria da secção transversal da solda e a continuidade do cordão, não permitindo furos ou espaços sem solda.

A análise da secção transversal do cordão de solda é baseada na espessura da chapa mais fina que compõe a junta. No caso de uma junta formada pela união de duas chapas de espessuras “ e_1 ” e “ e_2 ”, Figura 24, o menor valor de espessura é denominado “ e ”. Assim, os limites mínimos e máximos das medições do cordão são vinculados ao valor “ e ” conforme mostra a Tabela 3.

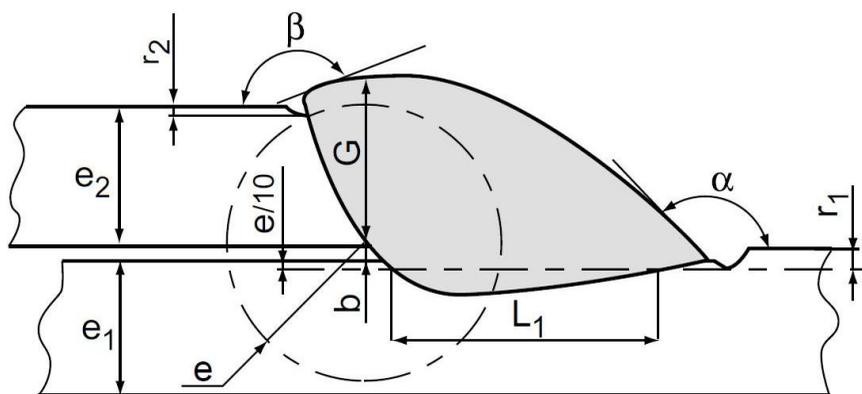


Figura 24 - Geometria de referência da secção transversal e seus parâmetros.

Tabela 3 Parâmetros para qualificação do cordão.

Parâmetro	Descrição	Faixa tolerável
e_1, e_2 (mm)	Espessuras das chapas	$e_1 = 2$ e $e_2 = 2$
e (mm)	Menor espessura de chapa	2
$L1$ (mm)	Comprimento de penetração	$L1 \geq e$
G (mm)	Altura do cordão	$G \geq 0,8e$
b (mm)	Distância entre as chapas após a soldagem	$b \leq 0,5$
r_1, r_2 (mm)	Mordeduras	$r1 \leq 0,1e$ e $r_2 \leq 0,1e$
α, β (°)	Ângulos entre o cordão e a peça	$\alpha \geq 120^\circ$ e $\beta \geq 120^\circ$

O cordão não é desqualificado pela presença de respingos. Entretanto, a ocorrência destes em grande quantidade pode representar instabilidade do processo. Neste caso, a peça é reprovada, pois não se pode garantir que os valores dos parâmetros geométricos das seções transversais estão dentro da faixa de tolerância.

Com base nestas informações é possível avaliar o procedimento proposto quanto a sua aplicabilidade em soldas para este tipo de configuração de junta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESENVOLVIMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE O MIG/MAG-PS

Neste capítulo são descritos os ensaios para de aplicação experimental do processo de soldagem MIG/MAG-PS. São apresentados os resultados de desenvolvimento dos equipamentos bem como as soldagens realizadas. Toda a metodologia, desenvolvida e descrita no capítulo anterior, é aqui aplicada nos experimentos. Por fim, os resultados são apresentados e discutidos.

4.1.1 Ensaios de Soldagem Com o Processo MIG/MAG – PS

A fonte de soldagem no processo MIG/MAG – PS opera impondo corrente ao arco elétrico, ou seja, em modo corrente. Na proposta de sincronizar a polaridade do eletrodo com o ciclo de tecimento ocorre diferença na taxa de fusão entre as polaridades aplicadas. No MIG/MAG CA esta variação ocorre de forma menos perceptível, devido à alta frequência da corrente elétrica empregada no processo.

Para minimizar a variação do stick-out no MIG/MAG – PS a velocidade de arame é alterada junto com o parâmetro de corrente do arco elétrico conforme mostra a Tabela 4. Desta forma existe um equilíbrio entre a taxa de fusão e taxa de alimentação nas duas polaridades de eletrodo.

Tabela 4 - Parâmetros do processo com 50 % de polaridade negativa

PARÂMETRO	VALOR
Velocidade de soldagem (cm/min)	22
Frequência de tecimento (Hz)	1
Amplitude de tecimento (mm)	11
Amplitude da polaridade negativa (mm)	6
Corrente da polaridade positiva (A)	250
Velocidade do arame na polaridade positiva (m/min)	8
Corrente da polaridade negativa (A)	250
Velocidade do arame na polaridade negativa (m/min)	10,7

A Figura 25 apresenta as características geométricas do cordão de solda resultante da aplicação dos parâmetros da Tabela 2 na posição plana de soldagem com a tocha na vertical. Mesmo utilizando 50% de polaridade negativa a quantidade de respingo é aceitável.

**Figura 25 - Cordão de solda obtido com 50% de polaridade negativa.**

O cordão de solda da Figura 25 apresentou altura de 3,5 mm, largura de 14,9 mm e diluição de 25 %. A penetração presente nas laterais do cordão é de 1,4 mm e a diluição de 25%. Dependendo da aplicação, a diluição permitida é muito baixa. Sendo a diluição alcança muito elevada para a aplicação da técnica de revestimento de superfícies em determinados casos.

É possível notar as características de geometria diferenciadas nas laterais e na parte central do cordão. A diminuição da amplitude de polaridade positiva é a solução natural para diminuir a penetração nas laterais e conseqüentemente a diluição do cordão.

Entretanto, o alimentador de arame não possui dinâmica suficiente para efetuar as variações de velocidade nas mudanças de

polaridade. É possível observar essa limitação, Figura 26, durante a execução do cordão de solda da Figura 25.

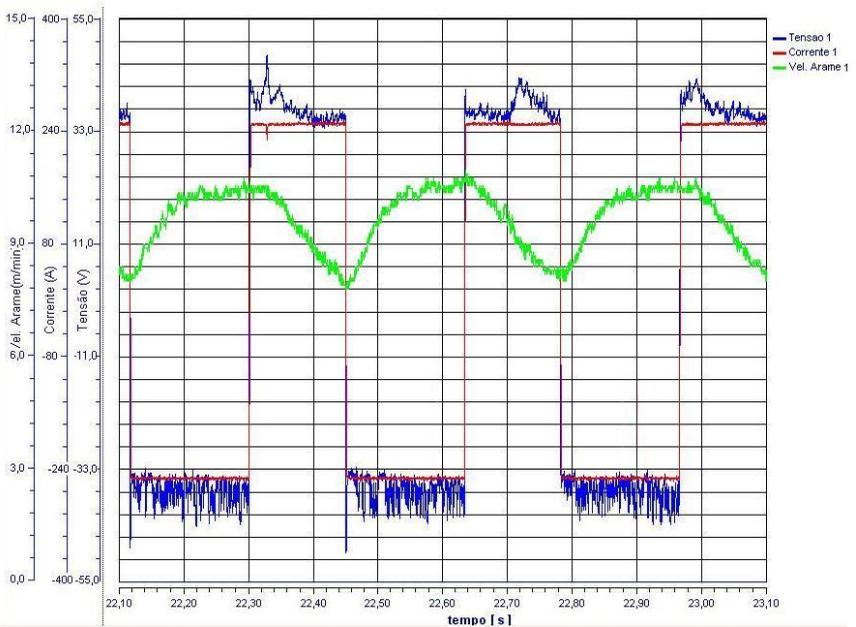


Figura 26 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame do cordão de solda da Figura 25.

Observa-se que a velocidade de arame no processo MIG/MAG – PS com 50% de polaridade negativa demora muito até alcançar o valor de referência tanto na polaridade positiva quanto na polaridade negativa. Entretanto o valor médio resultante foi suficiente para garantir a estabilidade do processo.

Mesmo resultando em um cordão satisfatório, Figura 25, esta condição não é a mais adequada, pois não se tem o controle do valor da taxa de alimentação instantânea. Para amplitudes de polaridade positiva menores, a taxa de variação da velocidade de arame é tão lenta que não chega a atingir o valor de referência e, desta forma, impossibilita a soldagem.

A solução encontrada foi utilizar uma velocidade de arame constante que atendesse as duas polaridades. Esta metodologia possibilitou uma maior flexibilidade nos ajustes das faixas Yt-Yp. Como consequência desta metodologia a taxa de fusão não se mantém

igual à taxa de alimentação, entretanto em valores médios são compatíveis conferindo estabilidade ao processo.

Adicionalmente, com o aumento da velocidade de soldagem e frequência de tecimento, para uma mesma amplitude de movimento os tempos em cada polaridade diminuem contribuindo para uma menor variação na altura do arco.

O cordão da Figura 27 foi soldado com o procedimento MIG/MAG – PS onde as faixas Yt-Yp deixavam somente dois milímetros em cada lado do tecimento soldado com polaridade positiva. A Tabela 5 apresenta as variáveis do procedimento.

Tabela 5 - Parâmetros do processo com 67 % de polaridade negativa

PARÂMETRO	VALOR
Velocidade de soldagem (cm/min)	43,6
Frequência de tecimento (Hz)	2,5
Amplitude de tecimento (mm)	12
Amplitude da polaridade negativa (mm)	8
Corrente da polaridade positiva (A)	270
Velocidade do arame na polaridade positiva (m/min)	11,5
Corrente da polaridade negativa (A)	250
Velocidade do arame na polaridade negativa (m/min)	11,5

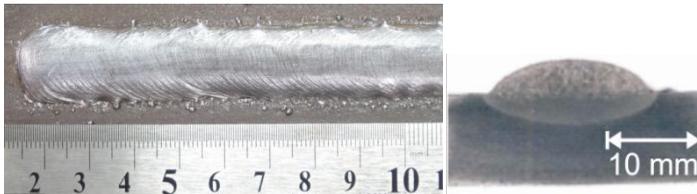


Figura 27 - Geometria do cordão de solda obtida no processo MIG/MAG-PS com 67% de polaridade CC- .

O depósito foi feito pela técnica “empurrando” com um ângulo de 10°, que juntamente com o aumento de velocidade de soldagem resultaram na diminuição da altura do cordão para 3 mm e aumento da largura para 15,4 mm. Os parâmetros de corrente também foram alterados, foi empregado um valor maior de corrente positiva. Obteve-se uma diluição de 13 % com uma penetração máxima de apenas 0,5 mm.

O oscilograma da Figura 28 mostra os sinais de corrente tensão para uma velocidade de arame constante. É possível observar que na polaridade positiva, quando a corrente atinge o seu valor de referência a tensão gradativamente vai diminuindo e na situação de polaridade negativa ela aumenta gradativamente em módulo.

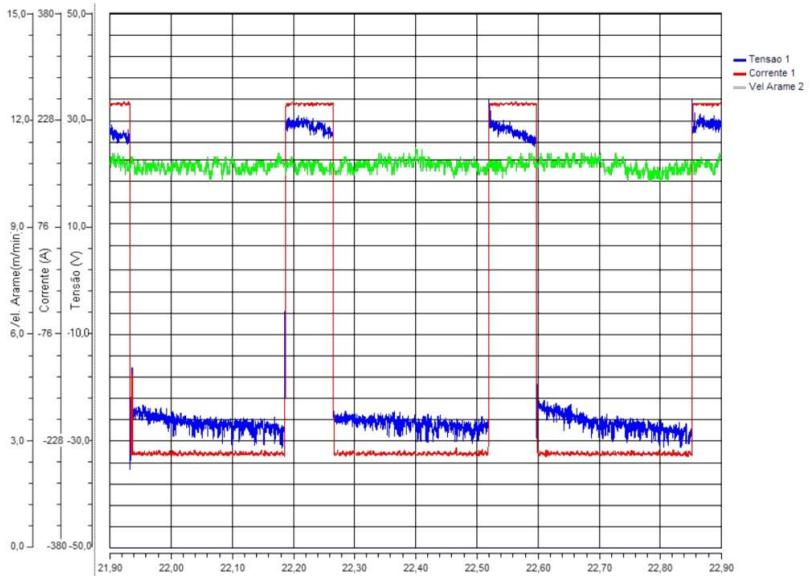


Figura 28 - Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame com 67% de polaridade negativa.

Isto ocorre devido ao emprego da velocidade de alimentação de arame constante implicar na variação da altura de arco e extensão sólida do eletrodo. De fato a velocidade de alimentação do arame varia em torno da taxa de fusão instantânea, mas está adequada à taxa média de fusão. Esta solução não é a ideal por resultar em alguns respingos, mas tornou factível o processo MIG/MAG – PS com as características desejadas.

Na Figura 29 é possível observar a variação da altura de arco e na extensão de eletrodo sólido de três diferentes posições de tecimento. A marcação em vermelho indica a posição linha central de tecimento. No primeiro e no terceiro quadro o eletrodo é positivo e no segundo o eletrodo é negativo. Pode se observar as variações de comprimento de arco e de *stick-out* do eletrodo.

Durante a fase positiva a taxa de alimentação é superior a taxa de fusão, isto se reflete no aumento gradativo da extensão sólida do arame. Já na fase negativa, a taxa de alimentação é menor que a taxa de fusão, sendo assim a extensão sólida do arame vai diminuindo no decorrer da fase.

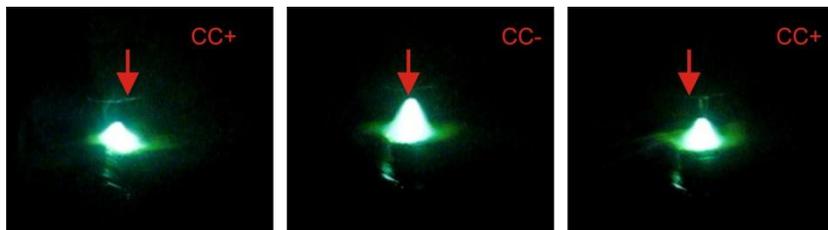


Figura 29 - Imagem da altura do arco e comprimento do eletrodo.

O revestimento da Figura 30 foi soldado com o procedimento MIG/MAG – PS onde as faixas (Yt-Yp), dois milímetros em cada lado do tecimento foram soldados com polaridade positiva. Neste caso a sobreposição dos cordões também foi de 2 mm. Os parâmetros utilizados são idênticos aos apresentados na Tabela 4.



Figura 30 - Geometria de uma camada de solda obtida no processo MIG/MAG-PS com 1/3 de polaridade CC+.

4.1.2 Problemática do Alinhamento no Processo MIG/MAG-PS

A metodologia utilizada no MIG/MAG-PS possibilita o uso da polaridade negativa e contribui para eliminar as falhas de fusão entre cordões utilizando a polaridade positiva nas laterais do cordão. Desta forma é importante que os cordões de solda estejam alinhados, pois um pequeno desalinhamento mesmo em cordões não muito longos pode implicar em sobreposições demasiadas.

Na Figura 31 estão representados três cordões MIG/MAG – PS, onde, em azul, são as fases de polaridade positiva. Estas devem estar paralelas e sobrepostas. Em caso de desalinhamento ou até mesmo sobreposição excessiva onde a faixa de polaridade positiva se

sobreponha à polaridade negativa existe a grande probabilidade de ocorrência de falha de fusão.

O equipamento deslocador de tocha utilizado para este desenvolvimento é fixado por bases magnéticas, que em alguns casos podem permitir o escorregamento do trilho. Caso isto ocorra, os cordões de solda podem ser soldados na posição errada, prejudicando o resultado da técnica de sincronismo de polaridade.

Em vermelho é representada a região de provável falha de fusão. É evidente que se o desalinhamento também provocar sobreposição de polaridades negativas, isto também resultará na ocorrência de falha de fusão entre cordões.

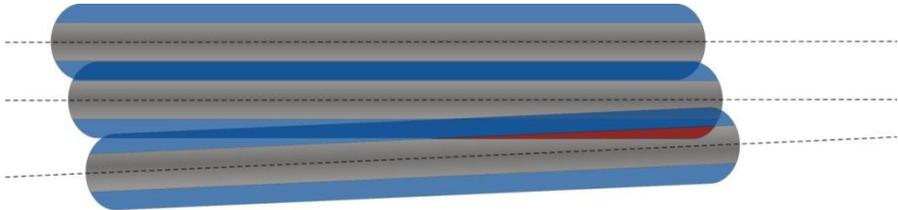


Figura 31 - Falhas de fusão em decorrência de desalinhamentos.

Os parâmetros de solda que resultaram no cordão da Figura 25 com penetração excessiva, onde a ocorrência de falha de fusão deveria ter menor incidência, ao executar o revestimento apresentou uma falha de fusão causada provavelmente por desalinhamento Figura 32.



Figura 32 - Revestimento com falta de fusão.

O MIG/MAG-PS é um processo dependente da automação, só podendo ser realizado com deslocadores de tocha automáticos. Neste tipo de procedimento o trilho do deslocador é fixado não podendo ter movimento relativo à peça. Entretanto no caso de algum deslizamento do deslocador ou da peça é possível que ocorram desalinhamentos.

4.2 APLICAÇÃO DA SOLDAGEM DE JUNTAS COM POLARIDADE NEGATIVA

Com base na metodologia do capítulo 3.2 são apresentados os resultados das soldagens com o processo MIG/MAG CC-. Estes são comparados e discutidos para avaliar a aplicabilidade do processo. Os resultados serão confrontados com o critério de avaliação descrito no capítulo 3.2.2 e posteriormente discutidos.

4.2.1 Resultado dos Ensaios com MIG/MAG CC-

Os ensaios da literatura apresentados no capítulo de fundamentação teórica mostram a estabilidade do processo MIG/MAG em depósito sobre chapa plana. Estes resultados apontam que a polaridade negativa aumenta a produtividade da soldagem, incrementando a quantidade de material depositado para uma mesma corrente, sem o aparecimento de alguns defeitos característicos do processo com eletrodo negativo. Entretanto, quando utilizado o mesmo processo para união de chapas é esperado que as características do cordão sejam diferentes.

A mistura de 98% Ar com 2 % de O₂ foi adotada, como gás de proteção para a soldagem MIG/MAG CC- com arame ER-70S6 de 1,2 mm de diâmetro, por resultar em uma condição de menor respingo. Foram empregados valores de corrente acima de 250 A para evitar a ocorrência de curtos circuitos e prováveis respingos

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 ajuste dos ângulos de orientação da tocha, Figura 33.

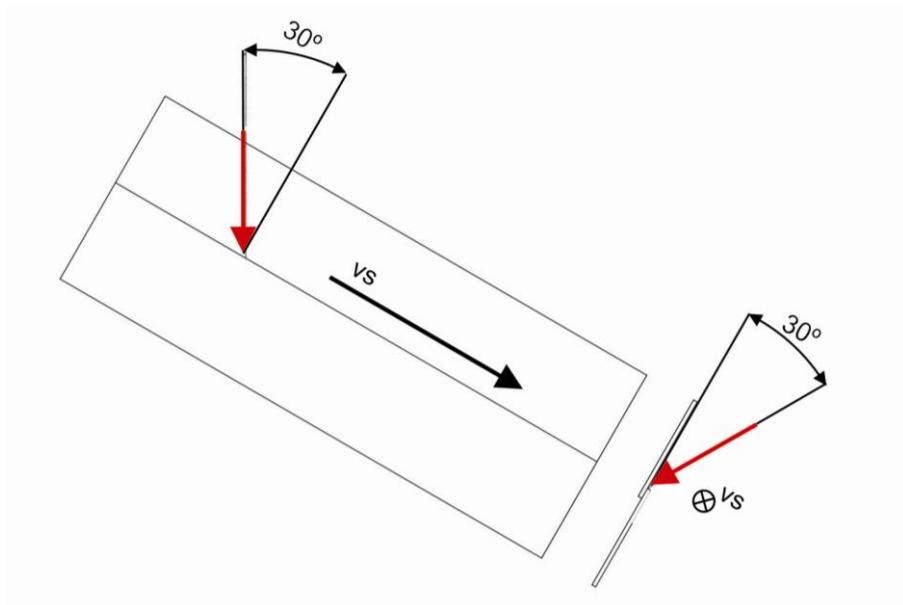


Figura 33 - Orientação da tocha na junta da longarina. À esquerda inclinação longitudinal e a direita a inclinação transversal.

A Figura 34 mostra as fotos dos cordões de solda e suas respectivas secções transversais resultantes de ensaios com os parâmetros utilizados da Tabela 5 enquanto que a Tabela 6 apresenta os valores das medições dos parâmetros geométricos destas secções transversais.

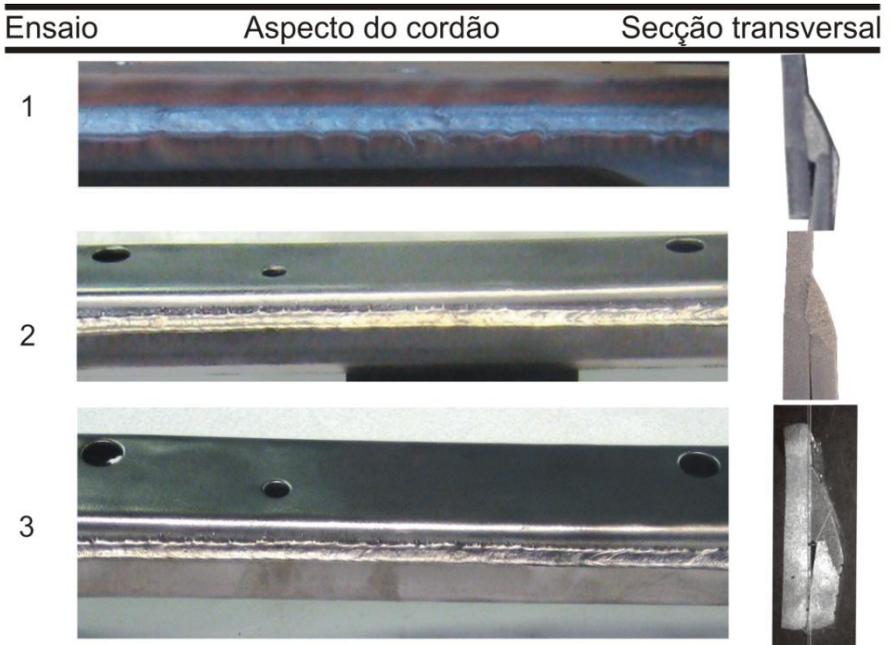


Figura 34 - Aspecto visual e secções transversais dos cordões de solda.

Tabela 6 - 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 7 - 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
α, β	$\geq 120^\circ$	$\geq 120^\circ$	$\geq 120^\circ$

No ensaio 1, Figura 34, é possível notar a tendência ao escorrimento do metal fundido para fora da junta. 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 7, 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 35 apresenta a fotografia da peça soldada com os parâmetros usados no ensaio 2. É possível observar as regiões onde há 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 35 - Teste 2 em perspectiva.

A Figura 36 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 descontinuidades 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.

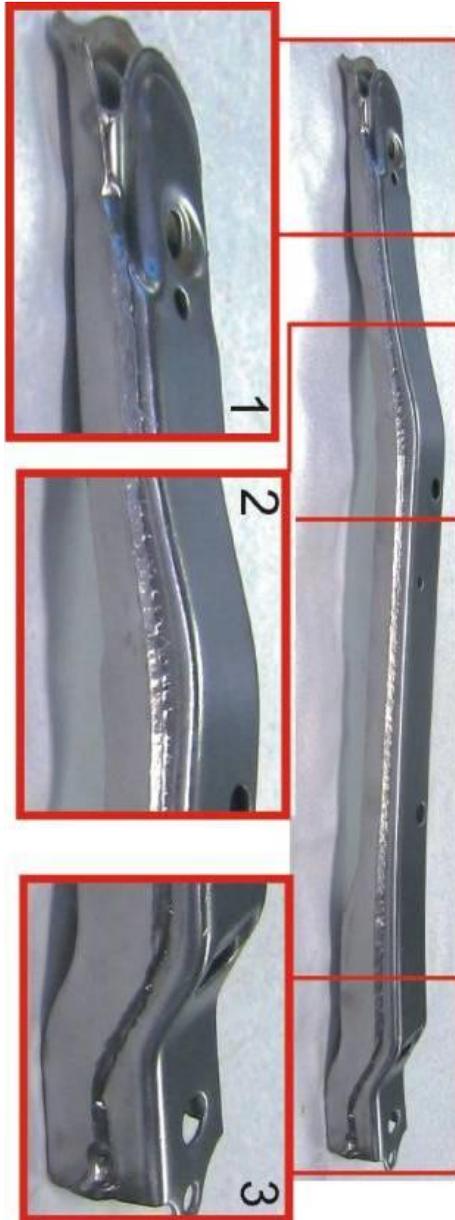


Figura 36 - Defeitos encontrados nas soldagens de longarina.

A fim de comparar o processo de soldagem atualmente usado na indústria, MIG/MAG pulsado duplo arame, com o MIG/MAG CC- foi construída a Tabela 8 com os principais parâmetros de ambos processos.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados para soldagem da longarina com duplo arame e polaridade negativa.

Parâmetro	MIG/MAG Pulsado duplo arame			MIG/MAG CC-
	Fonte 1	Fonte 2	Equivalente	
Corrente (A)	212,8	262,0	474,8	-340,0
Tensão (V)	23,7	28,0	-	-35,8
Velocidade de arame (m/min)	8,3	10,3	18,6	20
Velocidade de soldagem (m/min)	2,58	2,58	2,58	2,40
Potência (W)	5.047	7.342	12.389	12.172

O processo duplo arame é do tipo potencial isolado, de modo que cada arame é ligado a uma fonte de soldagem tendo correntes e velocidades de arame [21]. Os valores apresentados do processo com duplo arame, Tabela 8, estão representados em valores médios, sendo que para o MIG/MAG duplo arame existem os valores das duas fontes e o valor equivalente.

4.2.2 Discussões Sobre os Resultados de Soldagem de Juntas Com Polaridade Negativa

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, pois deve ser considerada a redução do calor aportado a peça que contribui para diminuir a penetração. Desta forma, 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 36. 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.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussões sobre o MIG/MAG – PS é possível concluir:

- Os cordões de solda produzidos pelo processo de soldagem MIG/MAG-PS possuem características geométricas apropriadas para a tarefa de revestimento de superfícies na posição plana de soldagem, tais como: baixa penetração, superfície lisa e geometria adequada.
- O MIG/MAG-PS juntamente com o critério sobreposição da faixa de polaridade positiva dos cordões de solda, proporcionou revestimentos na posição plana de soldagem fazendo uso d polaridade negativa para aumentar a taxa de deposição sem que ocorressem falhas de fusão.
- A polaridade negativa pode ser aplicada como artifício para contribuir com a diminuição da penetração e aumento da produtividade sem o aparecimento de falhas características da polaridade.

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

- Nos resultados deste trabalho o processo MIG/MAG CC- realizou soldas aceitáveis perante os critérios de qualidade utilizados neste trabalho.
- O MIG/MAG CC- alcançou velocidades de soldagem elevadas de até 2,4 m/min.
- O MIG/MAG CC- mostrou ter perspectiva de aplicação como uma opção de baixo custo para processos de alta produtividade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os desenvolvimentos deste trabalho mostram perspectiva de aplicação da polaridade negativa em soldagens de revestimento com o processo MIG/MAG – PS. Dentro deste contexto algumas sugestões para continuidade do desenvolvimento são:

- Realizar um estudo que confronte os resultados obtidos para revestimento com MIG/MAG – PS com os resultados do MIG/MAG CA para verificar de forma isolada as vantagens do sincronismo do movimento da tocha e parâmetros de soldagem.
- A mudança de polaridade do MIG/MAG – PS nos casos apresentados nesta dissertação implica na variação da taxa de fusão instantânea. Sendo a alimentação de arame um processo mecânico, este tem inércia muito maior que a inércia da corrente elétrica. Aumentar a dinâmica do alimentador de arame pode colaborar com a eliminação das falhas presentes nos resultados do MIG/MAG – PS. Utilizando uma bobina de arame com menos peso também pode se diminuir a inércia imposta ao sistema de tração.
- A tecnologia desenvolvida para o MIG/MAG – PS pode ser também aplicada para o preenchimento de chanfros. Onde da mesma forma que para os revestimentos, a polaridade negativa pode aumentar a produtividade garantindo, com a polaridade positiva, que não ocorram falhas nas regiões laterais do cordão.
- Dando sequência ao desenvolvimento do processo é necessário que sejam levantados parâmetros para soldagem com outros materiais.

- Este trabalho serve de material para o contínuo desenvolvimento do Tartilope V4 [22], equipamento destinado a automação da soldagem. Para aplicação do MIG/MAG - PS em campo é necessário diminuir o volume e quantidade de equipamentos envolvidos. Sendo assim a lógica de controle presente no SAC, pode ser implementada em uma fonte do tipo micro-controlada como a Digiplus [23].

A soldagem de chapas finas apresentou resultados inovadores, que confrontam a literatura clássica. Entretanto problemas com a automação da bancada impossibilitaram a realização de uma peça totalmente aprovada para fabricação. Sendo assim, são sugeridas as atividades para trabalhos futuros:

- Realizar a soldagem de um lote grande de peças com a estrutura completamente automatizada. Desta forma é possível levantar a quantidade de refugos e avaliar a repetitividade do processo.
- Outra vantagem deste processo é teoricamente a diminuição do calor imposto a peça. Ensaios comparativos de distorções podem comprovar e quantificar esta vantagem.
- Sendo o MIG/MAG CC- uma opção de baixo custo para processos de alta produtividade é importante realizar uma comparação detalhada entre o custo deste processo e de processos de alta produtividade. Assim definindo melhor os casos em que a polaridade negativa apresenta vantagens econômicas.

7 REFERÊNCIAS

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>. 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. TALKINGTON, J. Variable Polarity Gas Metal Arc Welding. **1. 998. 113 f. MSc Dissertation, The Ohio State University.**
15. HU, J.; TSAI, H. L. Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part II: The Metal. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, p.808-820, mar. 2007.
16. SCHWEDERSKY, M. B. Relatório de Estágio Supervisionado IV, Curso de Graduação em Engenharia de Materiais.. **LABSOLDA - UFSC. Florianópolis**, p. 17-26. 2007.
17. PUHL, E. B.; DUTRA, J. C.; BONACORSO, N. G.. Soldagem Automatizada de Revestimentos Empregando o Novo Processo MIG/MAG com Inversão de Polaridade Sincronizada com a Trajetória de Tecimento dos Cordões de Solda. **CONSOLDA**, Recife, 2010.
18. GOHR JR., R. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG.. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC**, 2002.
19. LOCATELLI, G. Uma Ferramenta Computacional para o Controle de Processo de Soldagem a Arco.. **Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.**
20. LOCATELLI, G.; DUTRA, J. C. A Computational Tool for the Control of Arc Welding Processes.. **Welding and Cutting**, v. 7, p. 293-298, jul. 2008.
21. MOTTA, M. F. Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com duplo arame e potenciais isolados em soldagens de revestimento. **Tese de Doutorado - UFSC**. 2002.
22. CARVALHO, R. S. Inovações Em Processos, Procedimentos E Equipamentos Para A Automatização Do Revestimento De Tubos De Caldeiras De Usinas Termelétricas.. **Dissertação de mestrado. Dept. de Eng.** Fev. 2009
23. IMC SOLDAGEM. **imc-soldagem**, 2009. Disponível em: <<http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/digiplus.zip>>. Acesso em: 15 maio 2011.