

CT-46 Soldagem a Ponto MIG/MAG de Pés de Motores Elétricos**(MIG/MAG Spot Welding of Electrical Motors' Feet)**

Régis Henrique Gonçalves e Silva¹, Raul Gohr Jr¹, Fábio Lanznaster¹, Tiago Cunha¹, Rui Paulo Weis², Régis C. Esteves²

¹LABSOLDA /UFSC – Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC
Brasil – regis@labsolda.ufsc.br

²WEG – Motores, Jaraguá do Sul, SC, Brasil

Resumo

Atualmente, a união dos pés de motores elétricos às respectivas carcaças era conduzida através de soldagem por projeção. Para determinadas aplicações, esta solda não apresenta níveis satisfatórios de confiabilidade em suas propriedades mecânicas, principalmente no caso de solicitações cíclicas de maior intensidade. Para melhorar esta característica, a WEG-Motores cogitou substituir, nestes casos, a soldagem por projeção pela soldagem pelo processo MIG/MAG. Foram realizados desenvolvimentos no software de controle da fonte de soldagem, reprogramação do robô de 6 eixos, projeto e construção de novo sistema de fixação das peças na tentativa de se aprimorar o procedimento e sobrepujar dificuldades identificadas. Ao longo de todo o projeto, foram realizados monitoração com aquisição de dados de soldagem e ensaios radiográficos dos pontos soldados. Chegou-se a uma programação apropriada da fonte de soldagem, que ao mesmo tempo suporta o necessário interfaceamento com o robô de soldagem e possibilita uma solda de dimensões e propriedades adequadas, por meio do desenvolvimento de um método inovador de soldagem MIG/MAG, o duplo-ponto. Isto permitiu o desenvolvimento de um procedimento de soldagem dos pés dos motores às carcaças dos mesmos.

Palavras-chave: automação da soldagem, produtividade, técnicas inovadoras de soldagem MIG/MAG.

Abstract: *Currently the joining of electrical motors' feet to their bodies was carried out by means of projection welding. For certain applications, this weld did not have satisfactory reliability levels of its mechanical properties, mainly in cases of severe cyclic loading. To improve this characteristic, WEG Motors considered replacing projection welding by MIG/MAG Welding. Developments in power source control software, 6 axis robot programming as well as project and construction of a new pieces positioning system were conducted in attempt to improve the procedure and overcome the identified difficulties. Along the project, data acquisition and radiographic tests on spot samples were made. An adequate welding source programming was achieved, which supports the necessary interface with the welding robot and enables a weld with good properties, by means of an innovative MIG/MAG method, the double-spot. It permitted the development of a welding procedure for the motors' feet to their bodies.*

Key-words: welding automation, productivity, innovative MIG/MAG welding techniques.

1. Introdução

Dentro de uma parceria já estabelecida entre as duas instituições, foi exposta, pelos técnicos da WEG-Motores ao staff do LABSOLDA, a necessidade de se desenvolver procedimentos de soldagem ao arco voltaico para união dos pés de motores elétricos.

Atualmente esta união é conduzida através de soldagem por projeção. Para determinadas aplicações, esta solda não apresenta níveis satisfatórios de confiabilidade em suas propriedades mecânicas. Para melhorar esta característica, a WEG-Motores já havia realizado experiências com o objetivo de substituir, nestes casos, a soldagem por projeção para a soldagem a ponto pelo processo MIG/MAG.

Para a união por pontos através do processo MIG/MAG foram feitos furos no pé do motor. O arco voltaico foi inserido no centro destes furos. A figura 1 mostra, esquematicamente, um furo de diâmetro “d” e um ponto já soldado.

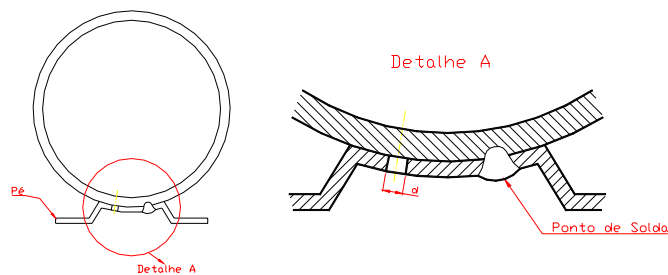


Figura 1 – Desenho esquemático dos pontos a serem soldados

A resistência mecânica dos pontos realizados pelo processo MIG/MAG na WEG-Motores não apresentou níveis satisfatórios durante ensaios de tração.

Uma das peças destruídas pelo ensaio de tração foi analisada de forma preliminar no LABSOLDA e, como mostra a figura 2, observa-se que o furo do pé do motor não foi totalmente preenchido.



Figura 2 – Foto do pé do motor elétrico após ensaio de tração.

Em um estágio preliminar, os processos Plasma e TIG foram avaliados no LABSOLDA para a aplicação em questão. Ambos não apresentaram viabilidade técnica, devido, principalmente, à baixa produtividade e dificuldades quanto à repetibilidade.

Durante a execução deste trabalho objetivou-se, então, determinar e avaliar procedimentos de soldagem que pudessem ser utilizados na união das peças acima citadas. Para tanto, foram testados os processos MIG/MAG convencional e pulsado. O processo MIG/MAG Pulsado, apesar de apresentar vantagens em inúmeras aplicações, não obteve bons resultados nesta.

Os trabalhos se concentraram, então, no objetivo de otimizar o procedimento de soldagem pelo processo MIG/MAG convencional, cujos resultados de produtividade ligados à qualidade estrutural e estética da solda se mostraram os mais adequados (aliados à robustez e relativa simplicidade do processo MIG/MAG convencional). Para isso, lançou-se mão de seguidas modificações no software de controle da fonte de soldagem, reprogramação do robô de 6 eixos, projeto e construção de novo sistema de fixação das peças, realização de ensaios em corpos de prova e carcaças reais e monitoração com aquisição de dados de soldagem e ensaios radiográficos dos pontos soldados.

Chegou-se a uma programação apropriada da fonte de soldagem, que ao mesmo tempo suporta o necessário interfaceamento com o robô de soldagem e possibilita uma solda de dimensões e propriedades adequadas, por meio do desenvolvimento de um método inovador de soldagem MIG/MAG, o duplo-ponto. Isto permitiu o desenvolvimento de um procedimento de soldagem dos pés dos motores às carcaças dos mesmos.

2. Materiais e Métodos

Com a função de simular a junta real, foram fornecidos pela WEG corpos de prova, chapas planas, com furos a serem preenchidos por soldagem, materializando-se a união com as chapas de base, sem furação (figura 3). Posteriormente, confirmou-se na literatura [1] que o furo é necessário para a obtenção de penetração total na configuração de soldagem em questão. O aço é o AISI 1020 e os furos têm 6,0 mm de diâmetro.

Para manipulação da tocha de soldagem foi aplicado o robô de 6 eixos pertencente à infra-estrutura do LABSOLDA. Ressalta-se que se planeja realizar a soldagem também automaticamente na empresa. A fonte de soldagem utilizada é eletrônica e microcontrolada, permitindo a alteração de software.

O arame utilizado foi o ER70S6, de 1,2 mm e 1,6 mm e o gás de proteção o CO₂ puro e Ar 4% CO₂.

Para análise dos resultados foram realizados ensaios radiográficos, executados no LABSOLDA por equipamento também pertencente à sua infra-estrutura.

Para determinar o procedimento de soldagem através do processo MIG/MAG, os seguintes experimentos serão conduzidos:

a) Para a determinação dos parâmetros de soldagem, inicialmente foram feitos ensaios sobre chapas sobrepostas, de 3 mm de espessura previamente furadas, como mostra a figura 3.

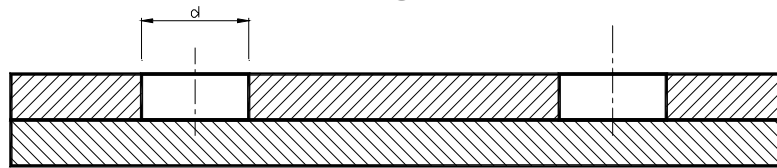


Figura 3 – Desenho esquemático de corpos de prova a serem soldados em laboratório.

Para análise da resistência das soldas obtidas, foi considerada a adoção da norma BS 1140:1993 [2]. Esta norma trata de Soldagem por Resistência Elétrica e foi ponderado seu uso devido a características geométricas semelhantes à soldagem por pontos com o Processo MIG/MAG.

De fato, a norma se mostrou adequada em seus requisitos, pois se trata de uma união realizada por pontos nos quais ocorre fusão metálica de ambas as peças a serem soldadas. Além disso, ela apresenta um grau de flexibilidade em certos aspectos que tornam interessante sua utilização para o projeto em questão.

Os requisitos adotados foram:

- Isenção de falta de fusão;
- Penetração adequada (no caso do projeto considerou-se penetração até a extremidade inferior da peça inferior);
- Aparência adequada (requisitos estéticos, convexidade...);
- Para os ensaios destrutivos, os corpos de prova devem puxar um plug (porção do metal de solda) ao romper.

Tais requisitos são coerentes com o depoimento do Eng. Erwin Teichmann [3], atuante na área de soldagem a ponto na indústria automobilística. Ele descreveu o procedimento de controle da qualidade em soldas de carrocerias de uma das maiores montadoras européias, sendo similar ao adotado neste trabalho.

3. Desenvolvimentos no processo MIG/MAG

3.1 MIG/MAG Pulsado

Para os ensaios com o MIG/MAG Pulsado, foi utilizado o programa sinérgico da máquina para o arame em questão, para determinação das variáveis de soldagem (a tabela 1 mostra o melhor resultado).

Tabela 1 – Procedimento MIG/MAG Pulsado

Corrente média	190 A
Gás de proteção	Ar+ 4% CO ₂ , 11 l/min
Arame	ER70S-6 1,6 mm
Distância bico de contato-peça	11,0 mm

Foram realizados então, ensaios de raios-X para verificação inicial da integridade das soldas (figura 4). Nota-se que apresentaram falta de fusão nas bordas dos furos, na interface com a chapa de base, apesar de um bom aspecto da face da solda. Isto se deve à limitação desta variante em fundir o fundo de juntas como as utilizadas neste trabalho e passes de raiz, por exemplo.

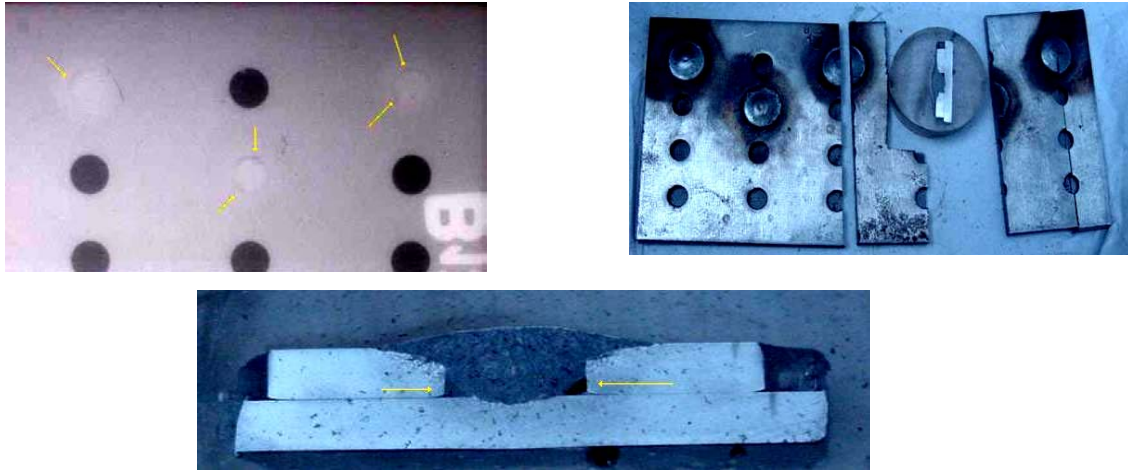


Figura 4 – Soldas em MIG/MAG Pulsado, procedimento da tabela 1.

3.2 Mig convencional

Partiu-se, então, para ensaios com o MIG/MAG convencional, com transferência metálica por curto-circuito e comando de tensão. Nesta variante, se garante a incidência do material de aporte diretamente no fundo da junta. A Tabela 2 mostra os parâmetros e variáveis regulados que proporcionaram resultado satisfatório. A Figura 5 mostra a peça com bom aspecto, a seção transversal, livre de falhas como falta de fusão e porosidades e uma boa penetração, e o ensaio de raios-X, também isento de falha em todos os pontos. A resistência da solda foi averiguada conforme norma BS 1140:1993, como citado anteriormente.

Tabela 2 – Procedimento MIG/MAG convencional desenvolvido.

Tensão	40 V
Gás de proteção	CO ₂ , 20 l/min
Arame	ER70S-6 1,2 mm
Velocidade do arame	10 m/min
Distância bico de contato-peça	10,0 mm

Porém, surgiram problemas com poros quando se partiu para a soldagem das carcaças. Como pode ser visto na figura 5 as soldas apresentavam bom aspecto na superfície, semelhante ao observado nas chapas. Executaram-se, portanto, mais soldas em carcaças para verificar a repetibilidade dos parâmetros.

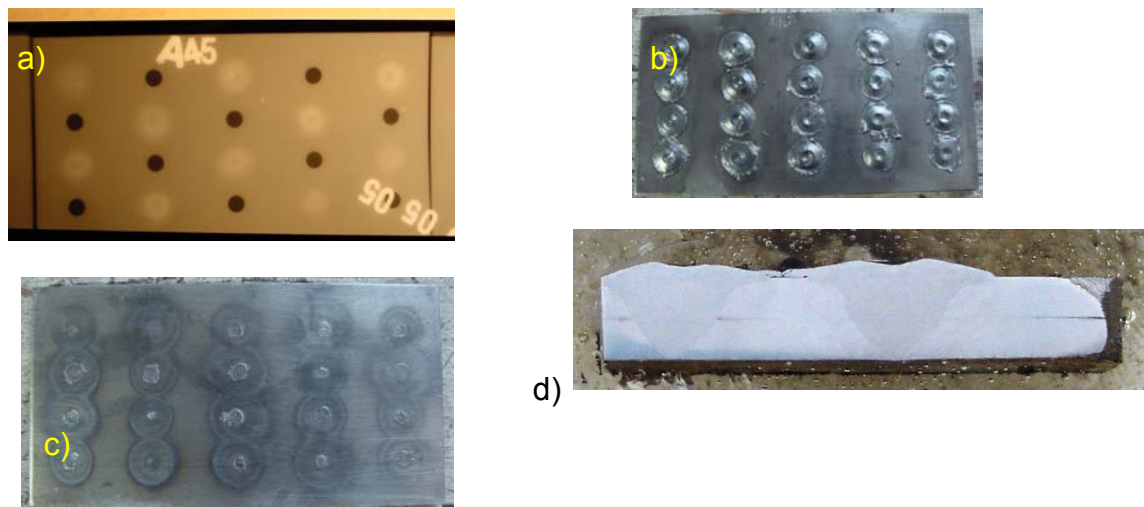


Figura 5 – Soldas com o procedimento MIG/MAG convencional desenvolvido: a) raios-X, b) face das soldas, c) fundo das soldas, d) seção transversal.

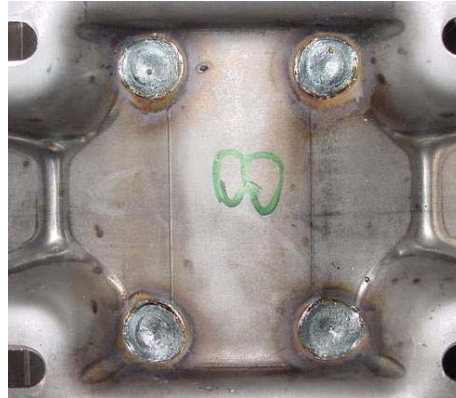


Figura 5 - Soldas realizadas em carcaça.

Estas mostraram boa repetitividade com relação ao aspecto visual, respingos e continuidade do processo, assegurada quando o arame não gruda na solda exigindo o corte do mesmo e interrupção momentânea da produção.

Quando da análise das soldas por ensaios radiográficos verificou-se a existências de vazios sub-superficiais, poros, em praticamente todas as soldas, figura 6. Isto pôde ser confirmado em ensaios macrográficos, mostrados na figura 7.



O ponto escuro no centro da solda indica a existência de um vazio.

Figura 6 - Radiografia que indica existência de poros.

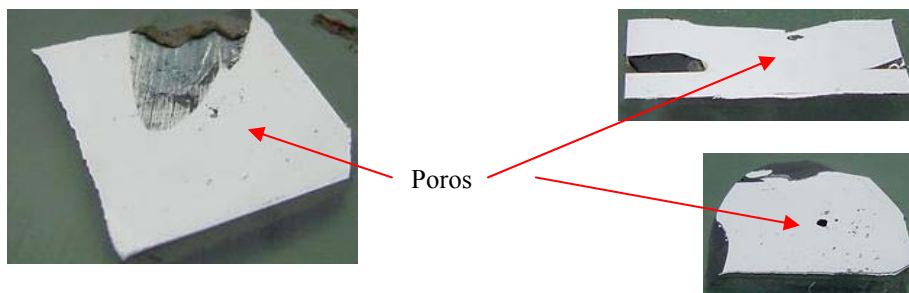


Figura 7 - Presença de poros subsuperficiais confirmada nos ensaios macrográficos sob diferentes perspectivas.

Cogitou-se que o problema poderia ser resolvido somente com o ajuste dos parâmetros de soldagem, mas não foi possível de fato eliminar os defeitos. Assim se decidiu por outra abordagem do desenvolvimento. Essa nova abordagem considerou desenvolvimentos no software de controle da fonte de soldagem, ainda atuando no processo MIG/MAG em comando de tensão, gerando-se a técnica do duplo-ponto.

3.2.1 Duplo ponto, 1ª Versão

Assim, foi estabelecido um procedimento com duplo-ponto, através de nova programação da fonte de soldagem, na tentativa de se eliminar o defeito descrito Nesta nova programação, os pontos eram subseqüentes, sem necessidade de novo disparo da fonte. Ao final se chegou a um resultado com um diâmetro excessivo do ponto,

tendência a vazios internos (provavelmente ao excessivo volume da poça fundida) e uma tendência a colar o arame ao fim da solda, assim como excessiva fusão na raiz. A Tabela 3 mostra os parâmetros do procedimento, cuja solda pode ser vista na Figura 8.

Tabela 3 - Procedimento MIG/MAG convencional com a 1ª versão do duplo ponto (demais parâmetros similares à tabela 2).

	Tensão (V)	Va (m/min)	Ks	Kd
Ponto 1	40	10	10	10
Ponto 2	19,5	3	10	10
t de cada fase	0,4			



Figura 8 – Soldas realizadas com o procedimento da Tabela 3.

3.2.2 Duplo ponto, 2ª Versão

Para sanar este problema, a estratégia foi reduzir os tempos das fases (regulados no robô), reduzindo o *heat input* e o material depositado. Foi necessária nova reprogramação do software de controle da máquina, de modo a tornar o processamento mais rápido. Houve sucesso quanto à possibilidade de tornar a máquina mais rápida, mas não foi possível se chegar a um diâmetro final adequado da solda. Também a ponta do arame livre ao final de uma solda é imprescindível, principalmente em operações automatizadas. Além disso, os parâmetros e variáveis devem ser regulados de modo a minimizar o raio de arredondamento da ponta do arame ao fim de uma solda, para ignição suave do arco na próxima (figura 9).

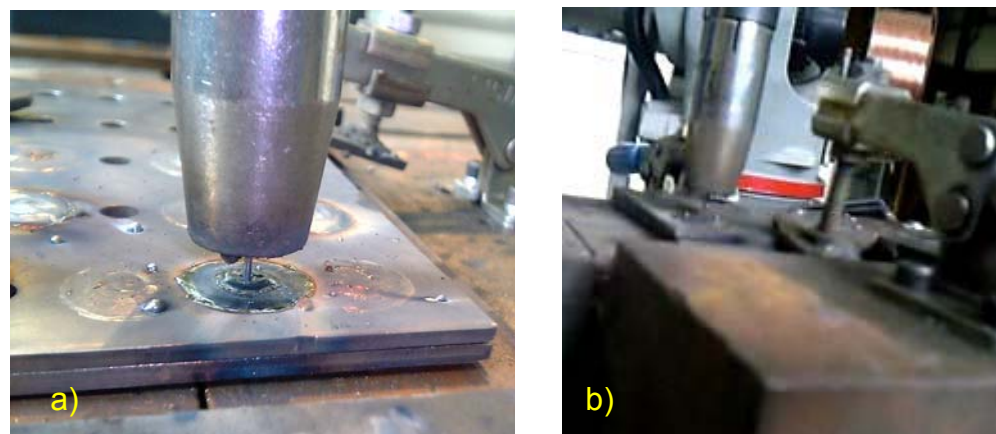


Figura 9 – Ponta do arame ao final da solda: a) arame grudado na solda; b) ponta do arame livre, pronta para a próxima solda.

3.2.3 Duplo ponto, 3ª Versão

Uma terceira reprogramação do controle da DIGITEC foi realizada, com a resposta ainda mais rápida. Desta maneira, foi possível reduzir o material depositado e o *heat input* e, conseqüentemente, o diâmetro do ponto de solda. A partir daí se seguiu o trabalho de desenvolvimento do procedimento de soldagem. O resultado final gerou soldas livres de defeitos no ensaio radiográfico (Figura 10), com parâmetros da Tabela 4. Observou-se determinado nível de respingos.



Figura 10 – Corpo de prova soldado com o procedimento para a 3ª versão do duplo ponto.

Tabela 4 - Procedimento MIG/MAG convencional com a 3ª versão do duplo ponto. 1º ponto: soldagem em duas fases; 2º ponto: pós-arco. Gás de proteção: CO₂ puro, 13 l/min.

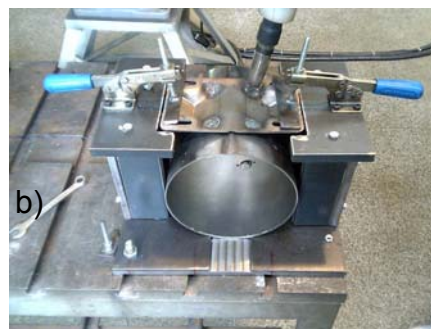
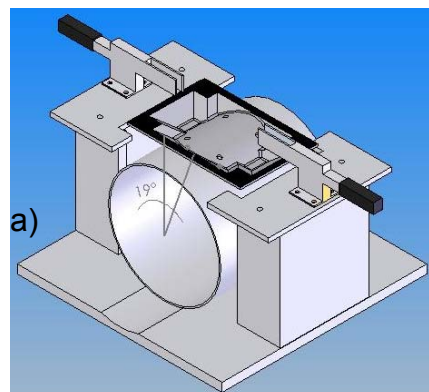
	Tensão (V)	Va (m/min)	Ks	Kd
Início (1ª fase)	40	10	10	10
Pós-Arco	17	3	10	10
Tempo (s)				
Intervalo	2			
Pré-Gás	2			
Pós-Gás	2			
t de cada fase	0,3			

3.2.4 Aplicação do procedimento desenvolvido nos CPs planos

Uma vez determinado o procedimento de soldagem, o próximo passo foi a aplicação deste em peças reais.

Para o novo diâmetro de carcaças, foi projetado e construído um novo sistema de fixação (Figura 11), o qual também pode se adequar outros diâmetros de carcaça. Na programação do robô para realização das soldas foi respeitado o ângulo de inclinação das superfícies onde se encontram os furos a serem preenchidos por solda (Figura 11).

Apesar de todos os parâmetros terem se mantido constantes, não foi possível se obter nas carcaças os bons resultados antes observados nos corpos de prova em chapas planas. Muito embora se tenham apresentado bons resultados em termos de penetração (Figura 12), o principal fator indesejável foi a falta de repetibilidade nas soldas realizadas em seqüência. Ora se obtinha quantidade excessiva de respingos e instabilidade no processo (principalmente no ponto secundário), ora se grudava a ponta do arame ao final do primeiro ou do segundo ponto. O oscilograma da Figura 13 evidencia a brusca subida de corrente para ignição do segundo arco, ocasionando subida brusca de corrente e fusão do arame com o bico de contato, com ausência do segundo ponto, ou uma reabertura explosiva e o posterior comprometimento da estabilidade do arco, com gotas muito grandes (grandes períodos de transferência de gotas com altas correntes de pico).



Sistema de aquisição e tratamento de dados

Fonte de soldagem DIGITEC

Robô de soldagem de 6 eixos

Suporte de fixação das peças

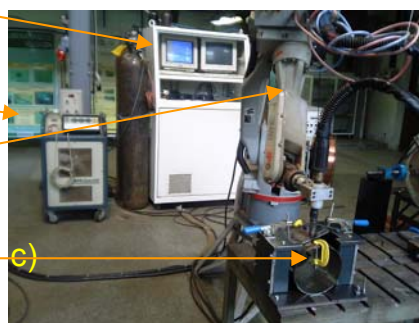


Figura 11 – Dispositivo de fixação para carcaças e pés de motores elétricos: a) projeto e inclinação da tocha; b) dispositivo construído e c) bancada completa do projeto.



Figura 12 – Penetração em carcaças.

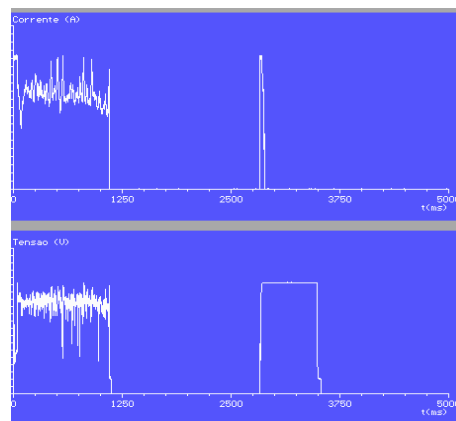


Figura 13 – Oscilograma de reignição de arco com arame gradado (ausência do segundo ponto).

Na tentativa de se sanarem esses problemas, foram realizadas novas regulagens nos parâmetros, com o objetivo de se determinar um procedimento de soldagem destinado às peças reais. Foi observado, então, que uma gota de diâmetro excessivo ainda freqüentemente se solidificava na ponta do arame ao final do primeiro ponto de solda (Figura 14), fato que, por vezes, ocasionava um distúrbio na abertura do arco do segundo ponto, prejudicando a estabilidade do arco.



Figura 14 – Gota grande solidificada na ponta do arame ao final do primeiro ponto.

Apesar de se terem alcançado melhorias e de as soldas terem apresentado boa penetração, não foi possível se chegar a um procedimento otimizado e robusto, capaz de realizar as soldas com repetibilidade na estabilidade. Como consequência, surgiram pontos de solda com excessivos respingos e, com menos frequência, falhas de fusão lateral.

Em vista dos resultados obtidos, foi realizada uma modificação no posicionamento das peças a serem soldadas, de modo a reproduzir mais fielmente os ensaios nas chapas (soldagem na posição plana). Com a nova configuração foram obtidos resultados repetitivos (relativamente, devido ao baixo número de carcaças) e em consonância com os resultados alcançados nas chapas, em soldas estáveis oscilograficamente, de penetração e fusão em conformidade (Figura 15). Um certo nível de respingos ainda persistiu.



Figura 15 – a) Face, b) penetração e c) fusão em soldagem na posição plana.

Também foram realizados testes simulando uma situação passível de acontecer na prática: um *gap* entre as peças a serem unidas. Seguindo sugestão da WEG, foi testado *gap* de 1 mm. Esta situação causou prejuízo à solda, ocorrendo eventuais cavidades internas (apesar do bom aspecto superficial e de penetração). Ou seja, um *gap* de 1 mm não permitiu, com esse procedimento, uma solda isenta de falha. Além disso, surge um fator prejudicial em relação produtividade, ou seja, tempo de processamento de cada peça soldada, pois surgiu a necessidade de se realizar a solda sempre na posição plana. Assim, neste procedimento, se permitem apenas duas soldas por vez, de um total de quatro para fixação do pé do motor, exigindo inclusive a rotação da peça.

Foi decidido por se realizarem esforços adicionais, com a finalidade de otimizar os resultados acima. Novamente as atividades se voltaram para desenvolvimento do software da fonte de soldagem, obtendo uma melhor geometria da ponta do arame, facilitando a reignição do mesmo com atraso no corte da corrente em relação à parada do arame. Melhores resultados foram encontrados com o duplo-ponto. Na Tabela 5 está descrito o procedimento de soldagem. O ponto obtido está mostrado na Figura 16.

Tabela 5 – Procedimento duplo-ponto com Ud, arame de 1,2 mm.

	Tensão (V)	Va (m/min)	Ks	Kd
1º ponto	43	13	10	10
2º ponto	17	3	10	10
Intervalo (s)	1			
Tempo de Pré-Gás (s)	2			
Tempo de Pós-Gás (s)	2			

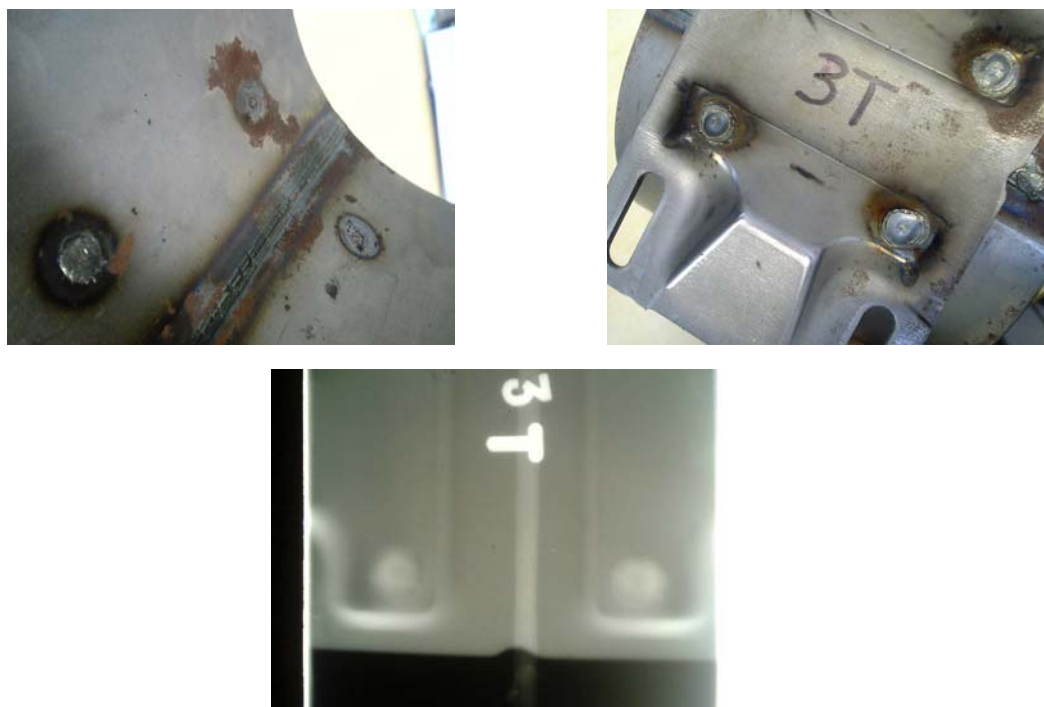


Figura 16 – Soldas realizadas de acordo com a Tabela 5, inclusive com gap de 1,0 mm.

Este procedimento exibiu soldas estáveis, com penetração total e isentas de defeitos. Foi possível, então realizar os ensaios de repetibilidade, que confirmaram a característica para esta regulagem, incluindo testes com *gaps* de 1,0 mm.

Os resultados foram informados ao pessoal da WEG, e as carcaças soldadas entregues para testes de fadiga na empresa. Estava determinada, portanto, a solução final para o processo de soldagem dos pés dos motores elétricos às suas carcaças.

Os dados de soldagem adquiridos durante os ensaios, exemplificados na Figura 17, indicam um comportamento oscilográfico padrão para as soldas. Nele, se observa o primeiro ponto, com alta corrente e tensão de soldagem, seguido do intervalo para solidificação do primeiro ponto e o segundo ponto, com menor energia.

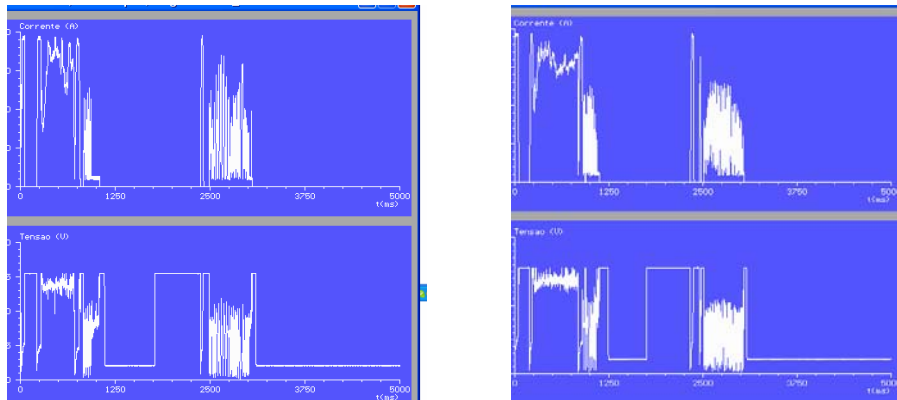


Figura 17 – Comportamento oscilográfico padrão do procedimento final.

4. Conclusões

O Processo MIG/MAG convencional, em comparação com os outros processos de soldagem abordados no projeto, apresentou maior produtividade (aspecto de primordial importância no setor industrial e produção em escala), com integridade, qualidade e robustez.

Num primeiro momento, ao se transporem os resultados obtidos em testes realizados sobre corpos de prova de chapas planas soldados na posição plana para as carcaças reais, surgiram dificuldades processuais. Apesar de não se ter realizado um trabalho científico mais aprofundado acerca das origens das disparidades, levantaram-se hipóteses como diferenças em dissipação térmica e alteração na posição de soldagem.

Tais dificuldades exigiram a atuação em uma frente de trabalho além do desenvolvimento de procedimentos de soldagem. As atividades em programação computacional resultaram em importantes evoluções no desenvolvimento de *know how*, não apenas na área do processo de soldagem MIG/MAG convencional para esta aplicação em si, mas também em relação ao desenvolvimento de software de controle da fonte de soldagem em conjunto com a programação do robô de soldagem (o que pode ser transposto para outros sistemas de automação).

O trabalho de interconexão entre esses flancos possibilitou, então, a geração de um procedimento especial, dedicado e otimizado, que materializou a solução para o problema apresentado.

Na validação do procedimento foram levadas em consideração a norma BS1140, previamente fornecida pela WEG, assim como informações angariadas junto à indústria automotiva. A característica estrutural das soldas geradas pelo procedimento aqui desenvolvido se provou em conformidade com os requisitos da norma citada, e por consequência também com os requisitos da indústria automobilística. É notório o alto fator de confiabilidade e segurança exigido na fabricação de veículos. Os testes abordados neste projeto foram além dos utilizados neste ramo, incluindo ensaios radiográficos (realizados pelo LABSOLDA) e ensaios de fadiga (realizados na WEG).

Em vista dos profícuos resultados obtidos, a equipe de engenheiros do LABSOLDA agradece a total colaboração da equipe WEG de Jaraguá do Sul envolvida no projeto. A qualidade técnica e gerencial apresentada foi fundamental para o sucesso obtido. Desta maneira, se fortalece a parceria WEG / LABSOLDA, estimulando-se a realização de novos projetos conjuntos que viabilizem a geração e implementação de tecnologias inovadoras na soldagem e sua automação.

5. Referências Bibliográficas

- [1] Sandor, L. W. PULSED GMA SPOT WELDING OF COPPER-NICKEL TO STEEL. *Welding Journal (Miami, Fla)*, v 63, n 6, Jun, 1984, p 35-50
- [2] BS 1140:1993 Resistance Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steel
- [3] Teichmann, E. W. Normas para Avaliação de Solda a Ponto, mensagem de email recebida em 20/04/2006.