

Determinação dos Campos de Soldabilidade para o Aço Dual-Phase 600 em Equipamentos de Soldagem a Ponto AC e MFDC

(Determination of Weldability Fields for Dual-Phase 600 Steel in AC and MFDC RSW)

Marco Antonio Wolff¹, Ramsés Ferreira da Silva¹ e Louriel Oliveira Vilarinho²

¹ Usiminas, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento (U-IDP), Ipatinga, MG, Brasil.

² Laprosolda – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo

A soldagem utilizada na indústria automobilística encontra num momento de escolha entre dois tipos principais de equipamentos para a soldagem a ponto por resistência: fonte que usam ou corrente alternada (AC) ou corrente contínua média-freqüência (MFDC). A primeira tecnologia (fontes AC) é a mais tradicional e tem sido utilizada com sucesso na soldagem de chapas de aços de baixo-carbono, com relativo baixo custo. Por outro lado, a tecnologia mais recente (fonte MFDC) tem sido descrita pelos seus fabricantes como uma evolução na soldagem a ponto por resistência ao se aumentar a produtividade, reduzir o consumo de energia elétrica, propiciar melhor controle dos parâmetros e menor estresse termo-mecânico. Além destas vantagens, observando-se o aspecto construtivo das fontes MFDC, estas demandam menores transformadores, uma vez que a eficiência de um transformador é proporcional à freqüência de entrada da rede elétrica, i.e., 60 Hz no caso do Brasil para as fontes AC, ao passo que esta freqüência chega a 1000 Hz no caso das fontes MFDC, reduzindo, assim, seu tamanho. Embora importantes, tais vantagens têm sido alardeadas sem a devida comprovação científica, em especial durante a aplicação dos aços de mais alta resistência. Dentre estes aços, os aços dual-phase têm iniciado sua expansão. Desta forma, este trabalho procura comparar equipamentos AC e MFDC do ponto de vista de envelope operacional (campo de soldabilidade) para a soldagem a ponto por resistência de aços dual-phase com limite de resistência de 600 MPa. Para tanto, a metodologia de comparação foi definida com base no tamanho equivalente do ponto de solda. Como resultado final, encontrou-se que para menores correntes, o campo de soldabilidade obtido com o equipamento MFDC foi maior, diminuindo à medida que se aumenta a corrente de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem a Ponto; Ensaios Mecânicos; Aços de Alta Resistência.

Abstract: The automotive industry faces nowadays a challenge of choosing between two types of current for resistance spot welding equipments: AC (alternating current) and MFDC (medium-frequency direct current). The first technology (AC equipment) is the traditional one and has been successfully applied to accomplish weldments in low-carbon steel sheets, with relatively low cost. On the other hand, the new technology (MFDC equipment) has been propagated by the manufactures as an evolution of the resistance spot welding, where higher productivity, lower energy consumption, better parameters controlling and lower thermal-mechanical stress. Besides these claimed qualities, from the construction point of view, the MFDC equipment demands smaller transformers, since its efficiency is proportional to the input frequency, i.e., the AC equipment uses the 60-Hz (in the Brazilian case) from the power lines, whereas the MFDC ones goes for 1000 Hz, increasing its efficiency and reducing its size. Despite these commercial claims of the MFDC-equipment manufacturers, few scientific results have been published with a thorough methodology of comparison, especially for the recently introduced dual-phase steels. Therefore, this work is aimed to provide the comparison between MFDC and AC resistance spot welding equipment by using an appropriated methodology based on the equivalent size of the obtained spot. It is expected the results lead to further discussion between the use of these two equipments.

Key-words: Resistance Spot Welding; Mechanical Testing; High Strength Steel

1. Introdução

Aquecimento Global é um termo freqüentemente citado nos jornais, revistas e televisão. Acredita-se que este processo ocorra

devido à aplicação de combustíveis fósseis e outros processos em nível industrial, que levam à acumulação na atmosfera de gases propícios ao Efeito Estufa, tais como o CO₂. Cerca de 19% da emissão de CO₂ de toda Europa é proveniente de carros de passeio e veículos leves [1]. A tentativa de conter o aquecimento, sem, porém, afetar o crescimento econômico mundial, fez com que os esforços no sentido de reduzir a emissão de poluentes recaíssem sobre os veículos automotores leves, com a criação de leis que reduzem paulatinamente o nível de emissões e até que propõem a proibição da comercialização de carros de alto

(Recebido em 29/03/2010; Texto final em 03/08/2010).
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2009,
Piracicaba, SP, Outubro de 2009.

desempenho, altamente poluentes.

O desenvolvimento de outras fontes energéticas menos poluentes vem sendo um dos caminhos adotados pelas indústrias a fim de se adequarem às novas legislações. Porém, estes são caminhos muitas vezes caros e de desenvolvimento demorado. O desenvolvimento de novos materiais e ligas, bem como a aplicação de novas técnicas de fabricação foram alguns dos caminhos mais rápidos e acessíveis, em termos de custos e adaptabilidade ao processo produtivo, encontrados na tentativa de se reduzir os impactos ambientais provocados pelos veículos automotores. Este objetivo é alcançado através da redução de peso das carrocerias, o que leva a uma redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, a uma redução nas emissões.

Assim, vêm-se observando uma progressiva substituição dos aços na indústria automobilística por materiais mais leves e também resistentes, como o alumínio, compósitos, polímeros, etc. que apresentam vantagens em relação aos mesmos quanto ao consumo de combustível devido à redução de peso das carrocerias e maior resistência à corrosão, etc. [2]. Neste sentido, a indústria siderúrgica tem procurado desenvolver a fabricação de aços de alta resistência. Estes aços são capazes de aliar alta resistência mecânica, redução de peso e maior capacidade de absorção de impacto, além de ser uma opção mais barata frente aos novos materiais concorrentes.

Dentre os aços de alta resistência em estudo e projetados para a aplicação na indústria automobilística, os aços Dual-Phase tem ganhado importância, pela combinação de alta resistência mecânica, ductilidade e conformabilidade [3]. A boa ductilidade e conformabilidade são conferidas pela matriz ferrítica no aço, ao passo que a resistência mecânica é garantida pela presença da martensita dentro da matriz ferrítica [4]. O potencial destes aços, como substituto barato e de qualidade para os aços em utilização na indústria é enorme, o que justifica um estudo mais aprofundado dos fatores relacionados aos processos de fabricação aos quais estes estarão sujeitos (conformação, soldagem, usinagem, etc.).

A larga aplicação destes materiais na indústria automotiva tem se mantido inexpressiva devido ao conhecimento insuficiente de suas características de soldabilidade, o que explica o recente interesse pelo estudo dos mesmos [5]. Além disso, parâmetros de soldagem ainda não padronizados, sujeitam os pesquisadores e indústria a selecionar condições de soldagem de outros materiais, com resistência similar aos Dual-Phase, como uma primeira aproximação para os seus estudos [6]. Esta dificuldade em se obter parâmetros para a soldagem destes materiais pode ser ressaltada pela lacuna deixada no manual do International Iron and Steel Institute [7].

Um dos processos mais utilizados pela indústria automobilística é o processo de soldagem por resistência a pontos. Cada automóvel leva em média 3000 pontos de solda [8], sendo de fundamental importância a garantia da qualidade destas soldas no que se refere à vida útil dos veículos, bem como à segurança dos passageiros. Este processo de soldagem, apesar de relativamente antigo e bem estudado para os equipamentos de corrente alternada (AC), ganhou novo fôlego e uma nova linha de pesquisas com o início da comercialização dos equipamentos de soldagem Média Frequência Corrente Contínua (MFDC). Para

estes equipamentos, ainda pouco estudados com metodologia e rigor científicos, quase nada se conhece sobre suas possíveis vantagens ou desvantagens em relação aos equipamentos AC, no que se refere à vida útil dos eletrodos, microestrutura gerada nas soldas, tempo de soldagem e economia de energia, além daquela pregada por fabricantes.

É com base na importância da soldagem por resistência a pontos para a indústria automobilística e na escassez de trabalhos em relação à soldabilidade dos aços de alta resistência para estes fins que se justifica o presente estudo. Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar os campos de soldabilidade para equipamentos de soldagem a ponto MFDC (Média Frequência Corrente Contínua) e AC (Corrente Alternada) para aços Dual-Phase 600, revestidos e não revestidos.

2. Procedimento Experimental

2.1 Equipamentos de Soldagem

Os experimentos foram realizados utilizando-se dois equipamentos de soldagem por resistência a pontos. O equipamento de corrente alternada (AC) é composto de um transformador (Soltronic HT75 2 MF, 440 V, 75 kVA, 170 A no circuito primário), um controlador (Fase Saldatura com potência nominal de 54 kVA) e uma pinça de soldagem pneumática (pressões entre 730 e 2740 N) refrigerada a água. A corrente de soldagem (no circuito secundário) varia entre 1 e 9,5 kA com 100 ciclos de solda máximos.

O equipamento média frequência corrente contínua (MFDC) é composto de um transformador (Bosch PSG 3100), um controlador (Bosch PSI6100.100L) e uma pinça pneumática (pressões entre 660 e 3700 N) refrigerada a água. A corrente no circuito secundário, para este equipamento, varia entre 1 e 20 kA.

2.2 Materiais Utilizados para a Soldagem

Para a realização dos testes, foram utilizados aços de alta resistência Dual-Phase com 600 MPa de limite de resistência. Foram ensaiados aços não revestidos e revestidos, por galvanização a quente pelo processo “galvanized”, com espessura de camada de revestimento de 14 micrometros. A medição da espessura da camada de revestimento foi realizada através do Medidor DIGI-DERM Modelo 979-745, marca Mitutoyo [9].

O material foi cortado em guilhotina, nas dimensões de 120 x 35 mm. As rebarbas foram aparadas e o óleo presente nas chapas retirado no momento da soldagem com o auxílio de um pano seco. Ressalta-se que visando um melhor aproveitamento do material, as dimensões utilizadas são menores que aquelas previstas na norma AWS/SAE D 8.9 [10] para os testes de arrancamento (120 x 40 mm para chapas de espessura entre 0,9-1,29 mm e 140 x 50 mm para chapas de espessura entre 1,3 – 1,69 mm). A mesma dimensão foi também aplicada aos testes de cisalhamento, embora não sejam as dimensões de acordo com a norma JIS 3136 [11] (100 x 30 mm para chapas de espessura entre 0,8-1,3 mm e 125 x 40 mm para chapas de espessura entre 1,3 – 2,5 mm), utilizada como referência para os ensaios de

cisalhamento.

2.3 Ensaios Mecânicos

Foram realizados testes de arrancamento através da aplicação de força, predominantemente de tração, que resulta em uma sollicitação primariamente normal à interface entre as chapas soldadas (ISO/DIS 10447 [12]). O método de arrancamento selecionado para os trabalhos foi o método “Peel Test”, por ser este o método recomendado pela norma de referência (AWS/SAE D 8.9 [10]) e pela maior facilidade encontrada na aplicação do mesmo. Para tanto, utilizou-se uma montagem a partir de pistão hidráulico. É importante observar que os corpos de prova sempre estarão sujeitos a tração pura, dados os graus de liberdade oferecidos por parafusos de fixação e correntes para tracionamento. Isto faz com que o teste apresente uma boa repetibilidade.

Após o teste de arrancamento, mediu-se o diâmetro dos botões de solda. A medição do diâmetro dos botões foi realizada com o auxílio de um paquímetro com 0,05 mm de resolução, onde foram tomadas as medidas do maior e menor diâmetro do botão de solda arrancado. Para modos de falha onde não houve o arrancamento total do botão, como em fraturas interfaciais ou parciais, foram tomadas as medidas do botão arrancado e também da lente de solda, colocada entre parênteses após a primeira medida. O método de medição obedeceu às normas ISO/DIS 14323 [13] e AWS/SAE D 8.9 [10].

Com relação à medição da indentação, esta não apresenta um limite para reprovação segundo a norma de soldagem adotada (AWS/SAE D 8.9 [10]). Neste caso, cabe ao usuário definir qual a indentação máxima permissível, de acordo com o acabamento desejável e resistência mecânica da junta. As medidas das indentações foram realizadas com o auxílio de uma mesa de desempenho e um relógio comparador com 0,01 mm de resolução. Quatro medições foram realizadas com o intuito de compensar possíveis empenamentos nas chapas, provocados pelo transporte das mesmas, corte em guilhotina e pelo próprio processo de soldagem (Figura 1). Desta forma, a indentação medida é uma média entre os pontos 3 e 4 (buscando-se compensar o empenamento do corpo de prova no sentido 3-4) e entre os pontos 1 e 2 (buscando-se compensar o empenamento do corpo de prova no sentido 1-2).

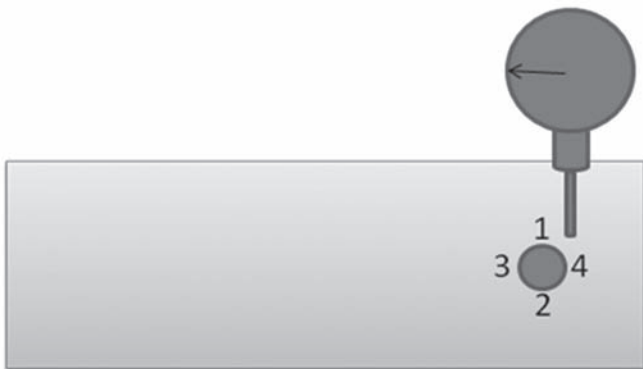


Figura 1. Esquema da medição das indentações nas chapas soldadas

Já a resistência mecânica das soldas foi avaliada através da realização de testes de cisalhamento, segundo a norma JIS Z 3136 [11]. Os testes foram realizados em um equipamento universal de ensaios, de acordo com a Figura 2. Após os testes, foram anotados a resistência mecânica da junta soldada e o modo de falha observado.

Os ensaios de microindentação foram realizados em um microindentador Digital Microhardness Tester HVS-1000, com penetrador de piramidal de diamante de 120° de conicidade. As medidas foram realizadas com a movimentação do corpo de prova sobre a bancada do aparelho, com a observação através de uma lente de ampliação de 100 vezes. Foi utilizada uma carga de 4,9 N em 15 segundos de tempo de aplicação. Treze medidas foram tomadas no metal de base, zona afetada pelo calor e zona fundida, de acordo com o apresentado na Figura 3. Foi obedecida uma distância mínima entre os pontos de medição de 0,4 mm, de acordo com a Norma de referência (AWS/SAE D 8.9 [10]). A tomada da dureza foi realizada através da observação da impressão no corpo de prova por uma lente de ampliação de 400 vezes.

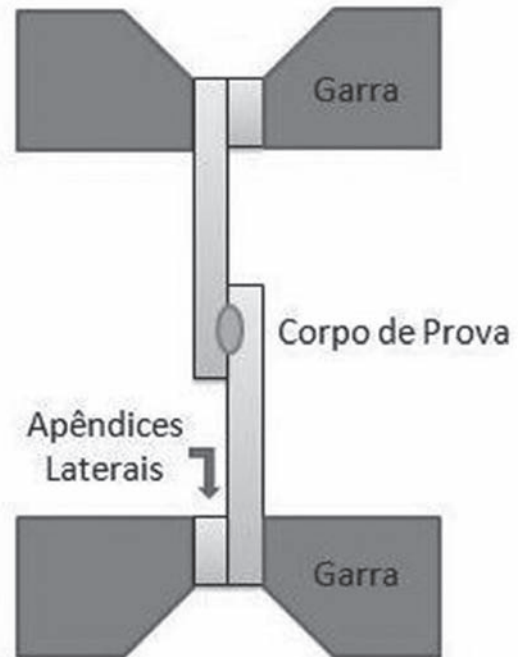


Figura 2. Ilustração do ensaio de cisalhamento por tração de acordo com a Norma JIS Z3136 [11] para chapas com espessura superior a 3 mm.



Figura 3. Ilustração da localização onde as medidas foram realizadas (b), no metal de base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e zona fundida (ZF).

2.4 Critérios de Comparação Entre os Equipamentos

Neste estudo, a comparação entre os equipamentos de soldagem AC e MFDC foi realizada estabelecendo-se a mesma força de soldagem, corrente RMS e os mesmos eletrodos, para ambos os equipamentos. Visto que as pinças de soldagem são diferentes para os mesmos, e que o sistema de refrigeração também o é, um estudo sobre a distribuição de temperaturas nos eletrodos também foi realizado a fim de se avaliar a influência do sistema de refrigeração de cada máquina sobre a soldagem.

Foi realizada a calibração da força aplicada às pinças de soldagem para ambos os equipamentos. O método utilizado consistiu na variação das forças, ajustadas nos programas de soldagem dos controladores de ambos os equipamentos e na medição destas forças nas pinças de soldagem, através do dinamômetro digital Crown Filizola. Pelos resultados obtidos da calibração das forças, a comparação entre os equipamentos só é válida para a aplicação de forças compreendidas entre 750 e 2700 N (limitadas inferiormente e superiormente pelo equipamento AC), forças estas possíveis de serem obtidas para ambos os equipamentos.

A aplicação de uma mesma corrente RMS durante a soldagem, para ambos os equipamentos, é avaliada através da utilização do analisador portátil de soldagem Miyachi MM-315A, capaz de medir a corrente de soldagem, tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua e o tempo de soldagem, tanto em ciclos quanto em milissegundos. Foi também utilizado um sistema de aquisição de dados. O analisador Miyachi consiste em um aparelho de leitura direta de corrente e tempo de soldagem, conectado a uma bobina toroidal, que deve ser ajustada entre os cabos de corrente do secundário do equipamento. O sistema de aquisição de dados consiste em uma placa de aquisição de dados National Instruments A/D PCI 6036E 16 bits, ajustada para 25 kHz para os equipamentos AC/MFDC, bem como de dois programas elaborados em ambiente “Labview” pelo próprio Laprosolda [14]. Foi aplicada a mesma corrente RMS para ambos os equipamentos. Visto que o formato de onda é uma característica de cada processo (AC ou MFDC), as diferenças entre a transferência de energia às soldas por estes equipamentos foi objeto de análise por parte do estudo, não de comparação.

Foram empregados no estudo os mesmos eletrodos para ambos os equipamentos: eletrodos Nippert F16CS02 RWMA Classe 20 de formato dome, com 6 mm de raio de ponta. Um par de cada tipo de eletrodos foi aplicado em cada planejamento, para cada tipo de material ensaiado, após a realização de 50 pontos de solda para adequação dos mesmos antes do início dos experimentos.

Deve-se assegurar que não haja diferenças na parte térmica nos eletrodos dos dois equipamentos, o que poderia interferir em qualquer tentativa de comparação envolvendo os mesmos. Assim, foram realizadas medidas de temperatura nos eletrodos de ambas as máquinas de soldagem, a fim de verificar a influência do sistema de refrigeração sobre a formação das soldas. As medidas de temperatura foram tomadas junto aos bicos dos eletrodos (capas) onde foi instalado um termopar. Assim, buscou-se adquirir as temperaturas do fluido de refrigeração no

momento mais crítico, que seria a saída da água das pinças de soldagem, após a refrigeração do eletrodo superior e inferior da mesma.

Os sinais medidos pelo termopar foram adquiridos através do sistema de aquisição descrito anteriormente, amplificados através do Amplificador de Sinal – Laprosolda e convertidos em temperatura, através da curva de calibração do Termopar tipo K (cromel/alumel) com junta fria a 0 °C. O sinal da corrente de soldagem foi sincronizado ao sinal do termopar, a fim de se avaliar a evolução da temperatura nos eletrodos frente ao ciclo de soldagem. Foram realizadas medidas de temperatura para correntes de soldagem de 3 e 6 kA em ambos os equipamentos, com o sistema de refrigeração ligado. Nos programas de soldagem foram adotados 15 e 30 ciclos de solda sem rampas de subida e descida de corrente, com uma força nos eletrodos de 1800 N. Os resultados seguem ilustrados pelas Figuras 4 e 5.

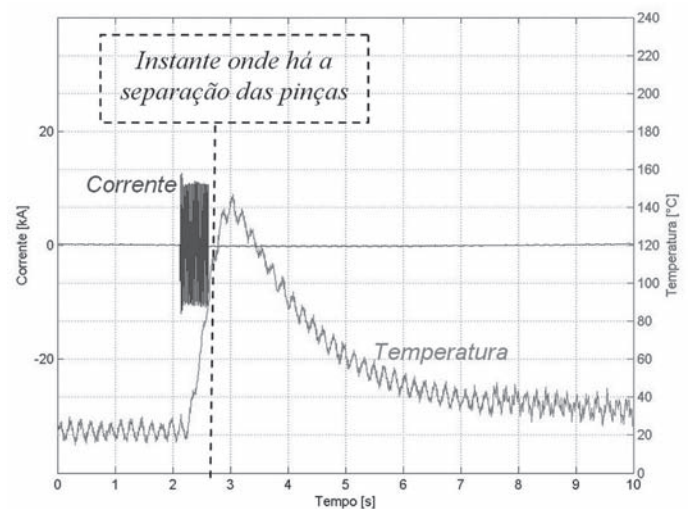


Figura 4. Evolução de temperatura e corrente de soldagem para o equipamento AC. Corrente de 6 kA, 30 ciclos de solda e sistema de refrigeração ligado

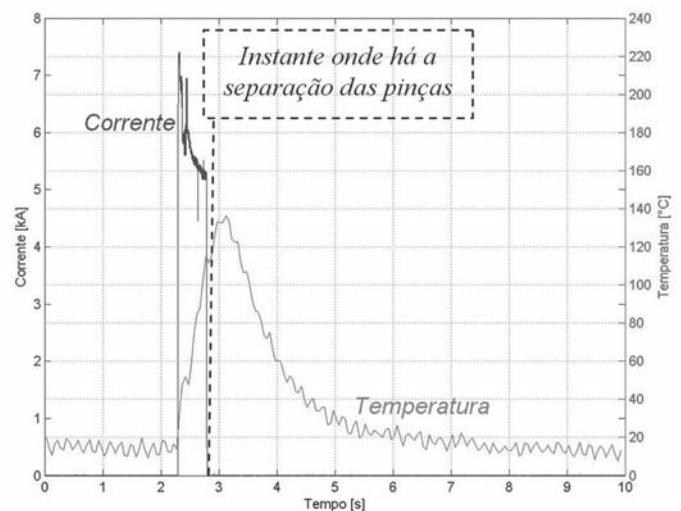


Figura 5. Evolução de temperatura e corrente de soldagem para o equipamento MFDC. Corrente de 6 kA, 30 ciclos de solda e sistema de refrigeração ligado

Pode-se verificar, através das Figuras 4 e 5, que o pico das temperaturas nos eletrodos só ocorreu após a interrupção da passagem da corrente, em 140 °C. Durante o ciclo de soldagem (que vai de aproximadamente 2,2 s a 2,7 s nas Figuras 4 e 5), a taxa de subida da temperatura é aproximadamente a mesma, bem como a temperatura ao final do ciclo (aproximadamente em 2,7 s), de aproximadamente 100 °C nos dois equipamentos. Sendo que o instante onde há a separação das pinças é mostrado nas Figuras 4 e 5.

Desta forma, fica descartada a possibilidade de que pinças de soldagem distintas possam interferir na comparação entre os equipamentos, para a realização de pontos de solda únicos, sob o ponto de vista de troca de calor entre a solda em formação e o equipamento. Para tanto, deve ser obedecido um tempo de resfriamento antes da realização de cada experimento, que deve ser superior a 10 segundos para o equipamento. Visto que a preparação das chapas de teste e programação do equipamento leva mais de 2 minutos para cada solda, este tempo é perfeitamente obedecido.

3. Resultados e Discussão

3.1 Diâmetro dos Botões de Solda

A análise do diâmetro dos botões de solda foi realizada após teste de arrancamento, como discutido no Item 2.3. Para tanto, foram construídos gráficos onde a média das duas medidas do diâmetro dos botões foi arranjada com todas as forças, tempos e correntes de soldagem. Os resultados mais significativos, bem como os gráficos mais representativos seguem expostos e discutidos abaixo.

O estudo da influência dos fatores analisados (corrente, força e tempo de soldagem) sobre o diâmetro dos botões de solda se mostrou bastante dependente do processo de expulsão. Este processo tende a diminuir a resistência da solda e a causar falhas por arrancamento parcial ou mesmo fraturas interfaciais, reduzindo assim, o diâmetro do botão medido. Este fenômeno é agravado para os aços de mais alta resistência, devido à grande fragilidade gerada na solda e nas regiões próximas à mesma, induzindo, de antemão modos de fratura menos favoráveis. O modo de fratura, para este aço, não apresentou problemas, como visto acima, mas o diâmetro dos botões de solda foi influenciado pelas expulsões. Estes fatos geraram uma grande dispersão nos resultados, o que exigiria um maior número de ensaios para se tentar obter conclusões mais confiáveis, impraticável sob o ponto de vista do gasto de material para esta etapa do trabalho, onde o que se buscou foram os parâmetros para a realização das etapas posteriores.

Graficamente (Figuras 6 e 7), pode-se observar que a força de 1,6 kN foi claramente insuficiente para a soldagem destes materiais, pois apresentou elevados índices de expulsão para os dois equipamentos (AC e MFDC). Os pontos em asterisco (*) nos gráficos representam as soldas onde ocorreram expulsões. A faixa preta nos gráficos representa o diâmetro mínimo do botão de solda adotado pela norma de soldagem [10].

Forças de 2,0 kN, por sua vez, se mostraram ser mais apropriadas para a soldagem, apresentando menos pontos com

expulsão (Figuras 8 e 9). Desta forma, pode-se concluir que este nível de força se mostrou o mais adequado para a soldagem dos aços Dual-Phase 600, não se devendo utilizar forças inferiores a 2,0 kN para a aplicação em conjunto com esses eletrodos nas etapas posteriores do trabalho. Entretanto, o aumento da força de soldagem para este material fica limitado pela indentação, já bastante elevada para estes níveis de força, como será discutido no item seguinte.

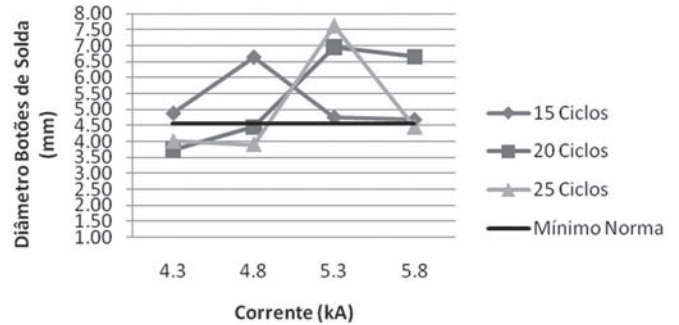


Figura 6. Diâmetro dos botões de solda para a variação do tempo de soldagem (15, 20 e 25 ciclos) para o aço Dual-Phase 600 não revestido, soldado pelo equipamento AC, com força de

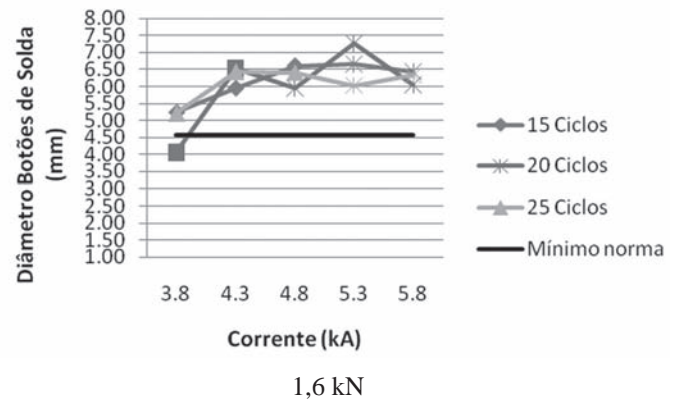


Figura 7. Diâmetro dos botões de solda para a variação do tempo de soldagem (15, 20 e 25 ciclos) para o aço Dual-Phase 600 não revestido, soldado pelo equipamento MFDC, com força de 1,6 kN

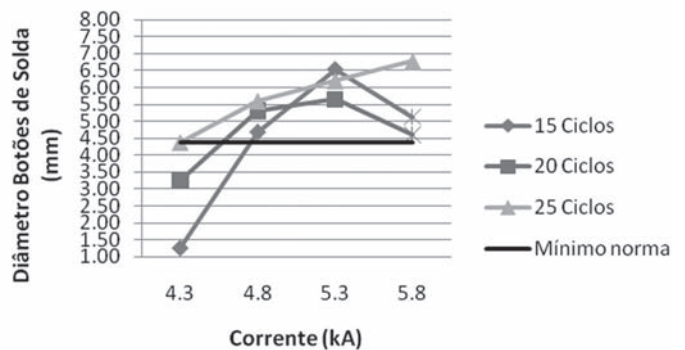


Figura 8. Diâmetro dos botões de solda para a variação do tempo de soldagem (15, 20 e 25 ciclos) para o aço Dual-Phase 600 revestido, soldado pelo equipamento AC, com força de 2,0 kN

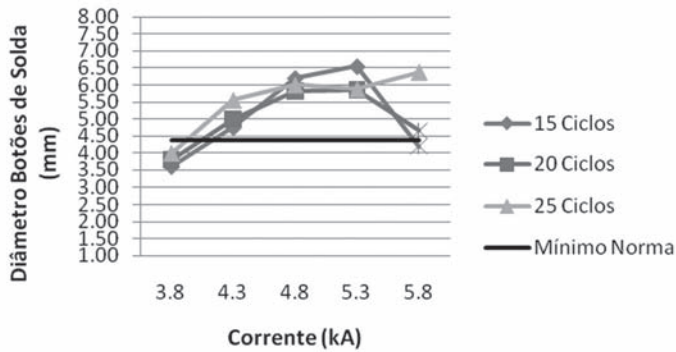


Figura 9. Diâmetro dos botões de solda para a variação do tempo de soldagem (15, 20 e 25 ciclos) para o aço Dual-Phase 600 revestido, soldado pelo equipamento MFDC, com força de 2,0 kN

As soldas realizadas pelo equipamento MFDC obtiveram diâmetro dos botões de solda consideravelmente maiores que os obtidos para o processo AC, analisando-se os menores níveis de corrente utilizados no planejamento, em conformidade a literatura [7]. Isto pode ser observado na soldagem dos aços não revestidos, Figuras 6 e 7, e também na soldagem dos aços revestidos, Figuras 8 e 9. Para o aço revestido soldado pelo processo AC (Figura 8), não foram realizados testes com a corrente de 3,8 kA, uma vez que para a corrente de 4,3 kA os diâmetros dos botões de soldagem já não foram satisfatórios.

Este fenômeno de crescimento diferenciado das lentes de solda observado para correntes de soldagem menores nos experimentos pode ser explicado pela queda mais lenta da resistência de contato entre as chapas para o processo MFDC [15]. Assim, mais calor é gerado na interface entre as mesmas nos ciclos iniciais de soldagem, permitindo um maior crescimento da lente de solda por este processo. Na soldagem pelo processo AC, a resistência de contato entre as chapas é reduzida rapidamente já nos primeiros ciclos de solda, mesmo para correntes baixas, diminuindo o calor gerado e por consequência, o diâmetro dos botões de solda. É como se em uma corrida, o processo MFDC largasse na frente do processo AC, no que se refere ao crescimento da lente de solda para baixas correntes. Para correntes maiores, essa queda na resistência de contato ocorre quase ao mesmo tempo para ambos os processos, diminuindo assim, a diferença notável no diâmetro da lente entre os mesmos.

Diâmetro de botões de solda aceitáveis foram encontrados para os dois equipamentos. O equipamento MFDC se mostrou mais eficiente em produzir pontos de solda maiores para menores correntes frente ao equipamento AC. Para os limites superiores de corrente testados, a grande quantidade de expulsões causou uma grande variabilidade nos resultados, além de reduzir os campos de soldabilidade por não serem aceitáveis pela norma de referência, embora em alguns casos o diâmetro dos botões de solda tenham sido satisfatórios mesmo com a presença de expulsão.

3.2 Considerações Acerca das Indentações

A análise das indentações foi realizada através da medição

das mesmas em ambas as superfícies das chapas, conforme Item 2.3. A partir dos resultados, foram construídos gráficos em que as forças, correntes e tempos de soldagem foram plotadas em função da porcentagem da espessura das chapas indentadas. Os resultados mais significativos, bem como os gráficos mais representativos, seguem expostos e discutidos abaixo.

Foi observado um aumento nas indentações com o aumento da corrente e tempo de soldagem, para os aços Dual-Phase 600 revestidos e não revestidos, soldados pelos processos AC e MFDC (Figuras 10 e 11). A indentação está relacionada com a redução da resistência na região da soldagem, devido ao aquecimento e fusão desta para a formação da lente de solda, sob pressão. Desta forma, a indentação aumenta à medida que a energia de soldagem, diretamente relacionada com a corrente e tempo, aumenta (Lei de Joule). Isto ocorre devido à redução da resistência mecânica do material de forma mais extensa, proporcionando uma maior impressão dos eletrodos nas chapas. Os pontos em asterisco (*) nos gráficos representam as soldas onde ocorreram expulsões.

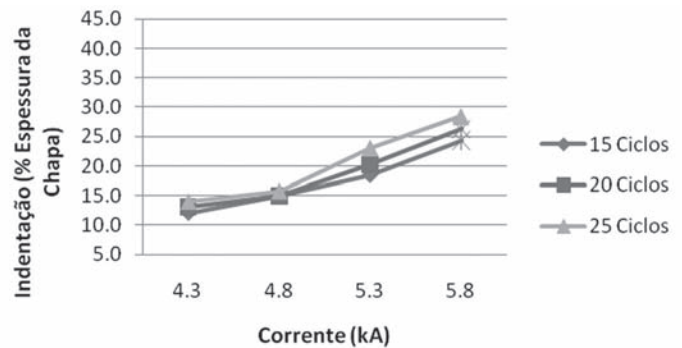


Figura 10. Indentação para a variação do tempo de soldagem (15, 20 e 25 ciclos) para o aço Dual-Phase 600 Revestido, soldado pelo equipamento AC, com força de 2,0 kN

Comparando-se os gráficos, as indentações foram maiores para o processo MFDC frente ao processo AC, para uma mesma corrente e tempo de soldagem. Este fenômeno ocorreu principalmente para a soldagem dos aços revestidos. Isto se deve, possivelmente, ao melhor aproveitamento da corrente em MFDC, que gera uma maior energia na região da soldagem [15], proporcionando uma maior geração de calor e aumento da indentação.

Foi observada também, a tendência de aumento das indentações com o aumento da força de soldagem para os aços Dual-Phase 600 revestidos e não revestidos, soldados pelo equipamento AC, como pode ser observado através da Figura 12 (pontos em asterisco (*) nos gráficos representam as soldas onde ocorreram expulsões). Para o equipamento MFDC, esta tendência de aumento não pôde ser observada claramente (Figura 13).

Para os aços soldados pelo processo MFDC, observa-se que o aumento das indentações é menos influenciado pelo parâmetro de força dos eletrodos (Figura 13), quando comparado ao processo AC (Figura 12). Sugere-se que o comportamento observado deve-se às forças máximas e mínimas utilizadas, que estão numa faixa estreita de $\pm 11\%$ ($1,8 \pm 2,0$ kN), o que poderia

ser diferente caso as mesmas estivessem numa faixa mais ampla.

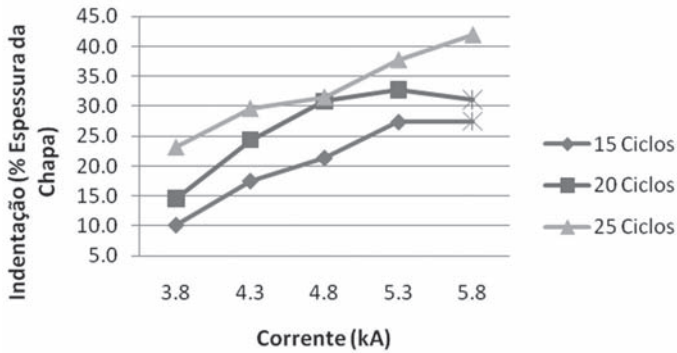


Figura 11. Indentaçao para a variaçao do tempo de soldagem (15, 20 e 25 ciclos) para o aço Dual-Phase 600 revestido, soldado pelo equipamento MFDC, com força de 2,0 kN

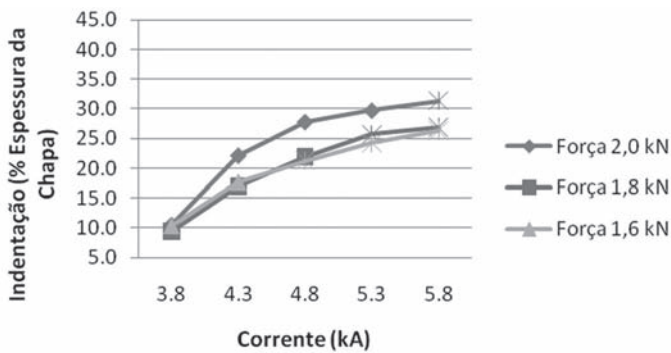


Figura 12. Indentaçao para a variaçao da força de soldagem (1,6; 1,8; e 2,0 kN) para o aço Dual-Phase 600 não revestido, soldado pelo equipamento AC, com 20 ciclos de solda

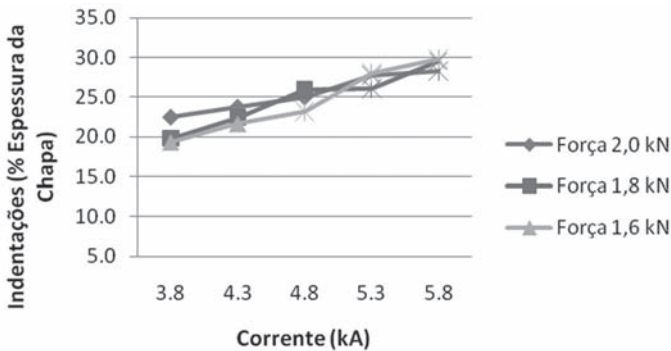


Figura 13. Indentaçao para a variaçao da força de soldagem (1,6; 1,8; e 2,0 kN) para o aço Dual-Phase 600 não revestido, soldado pelo equipamento MFDC com 20 ciclos de solda

As indentaçoes observadas foram bastante expressivas, da ordem de até 40 % da espessura das chapas, o que pode interferir na resistência mecânica das soldas, além de serem inaceitáveis sob o ponto de vista estético das mesmas. Os eletrodos do tipo dome se mostraram ser os possíveis responsáveis pela elevada indentaçao, além de não resolverem completamente os problemas de alinhamento da pinça de soldagem.

3.3 Modo de Fratura

Após os ensaios de arrancamento, observou-se o modo de fratura obtido. Fraturas parciais ou interfaciais foram observadas somente para as correntes de soldagem mínimas aplicadas, o que é aceitável devido à formaçao ainda incompleta da lente de soldagem para estes parâmetros. As demais soldas, ainda que com a presença de expulsão, apresentaram arrancamento total do botão. Este resultado (presença de arrancamento total do botão) é um dos indicativos de boa qualidade da união conforme a norma utilizada [10]. Demais consideraçoes sobre o diâmetro dos botões de solda e as indentaçoes seguem comentadas abaixo.

3.4 Campos de Soldabilidade

As Figuras 14 a 17 apresentam os campos de soldabilidade obtidos para os aços Dual-Phase 600, revestidos e não revestidos, soldados com eletrodos dome, com a faixa de corrente em função da força e tempo de soldagem que produzem soldas aceitáveis para cada equipamento, de acordo com a norma de referência (AWS D 8.9). Pela norma, as soldas devem possuir diâmetro de botão de solda mínimo e apresentarem arrancamento total do botão de solda de uma das chapas, sem nenhuma presença de expulsão.

Dada a importância destas Figuras 14 a 17, cabe aqui uma explanaçao sobre as mesmas, antes de analisá-las. É comum apresentar o envelope operacional na soldagem a ponto por resistência através de uma curva lóbulo que relaciona os três principais parâmetros do processo: corrente, tempo e força. Um indicativo da robustez de um envelope operacional é sua largura, ou seja, o quanto é possível variar um parâmetro e ainda assim obter soldas de boa qualidade. Neste sentido, as Figuras 14 a 17 não apresentam as curvas lóbulo (estas podem ser construídas a partir das Figuras 6 a 13 mostradas anteriormente), mas sim a variaçao máxima de corrente permitível (para um dado tempo e força) e que ainda garanta um ponto de boa qualidade, ou seja, as Figuras 4 a 17 apresentam a robustez obtida para ambos os equipamentos. Optou-se por escolher esta forma de apresentação, pois a robustez é, na maioria das vezes, requerida pela indústria automotiva, grande usuária do processo.

Os campos de soldabilidade obtidos para o equipamento MFDC foram maiores que os obtidos para o equipamento AC, analisando-se cada aço, revestido e não revestido separadamente. Com um número maior de conjuntos de parâmetros obtendo faixas de corrente aceitáveis de 1 kA, os experimentos seguiram a tendência observada pela literatura [7]. O maior crescimento do botão de solda para o equipamento MFDC, principalmente para menores correntes, foi o responsável por este crescimento do campo, em relação ao processo AC.

A surpresa ficou com a soldagem dos aços revestidos pelo processo MFDC, apresentando campos de soldabilidade de até 1,5 kA, os maiores encontrados (ou seja, maior robustez). Estes resultados, contrastantes com a literatura que afirma que a soldagem de aços revestidos é mais difícil que a de aços não revestidos, podem ser explicados pelo menor índice de expulsões encontrados na soldagem destes materiais, em relação aos aços não revestidos soldados pelo mesmo processo. O menor índice de expulsões pode ter sido obtido pela menor resistência de contato entre as chapas, causada pelo revestimento, que permitiu

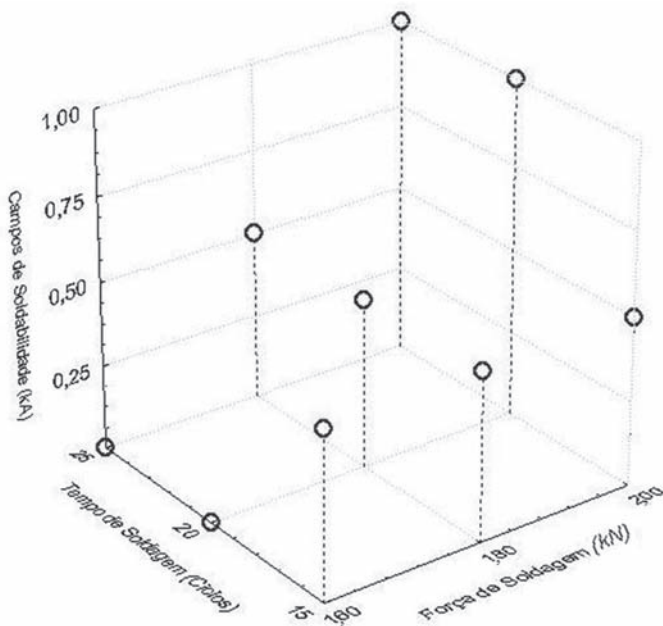


Figura 14. Campos de soldabilidade para o aço Dual-Phase 600 não revestido soldado pelo equipamento AC

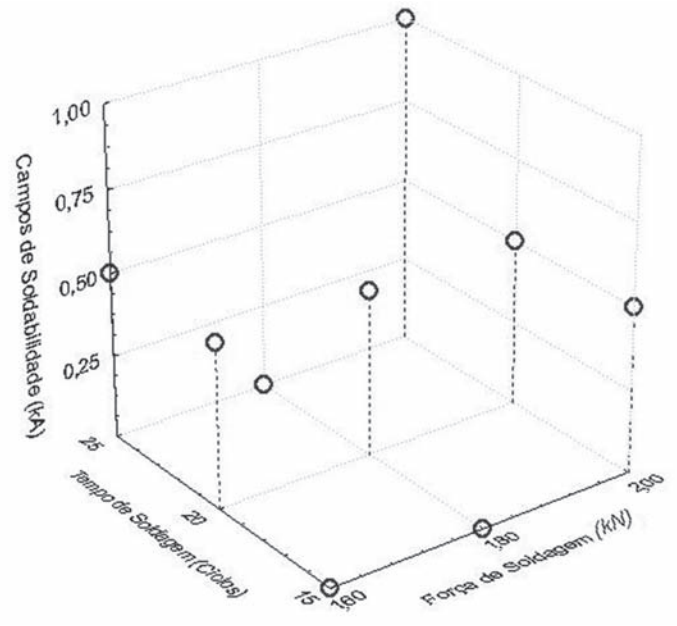


Figura 16. Campos de soldabilidade para o aço Dual-Phase 600 revestido soldado pelo equipamento AC

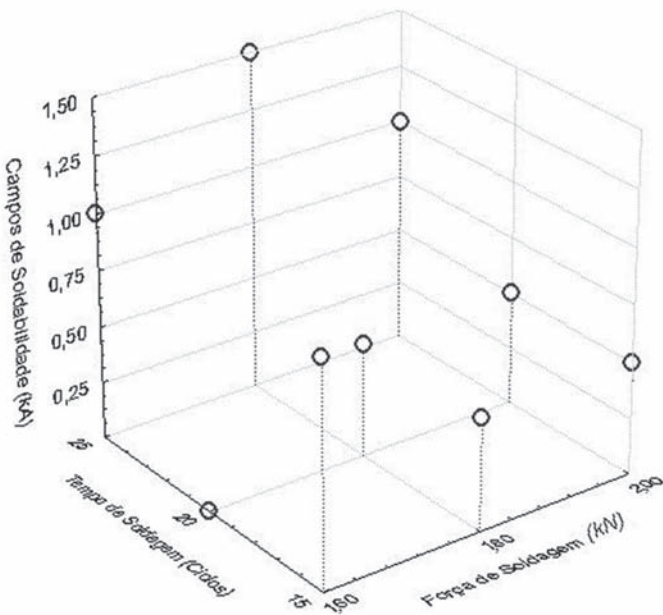


Figura 15. Campos de soldabilidade para o aço Dual-Phase 600 não revestido soldado pelo equipamento MFDC

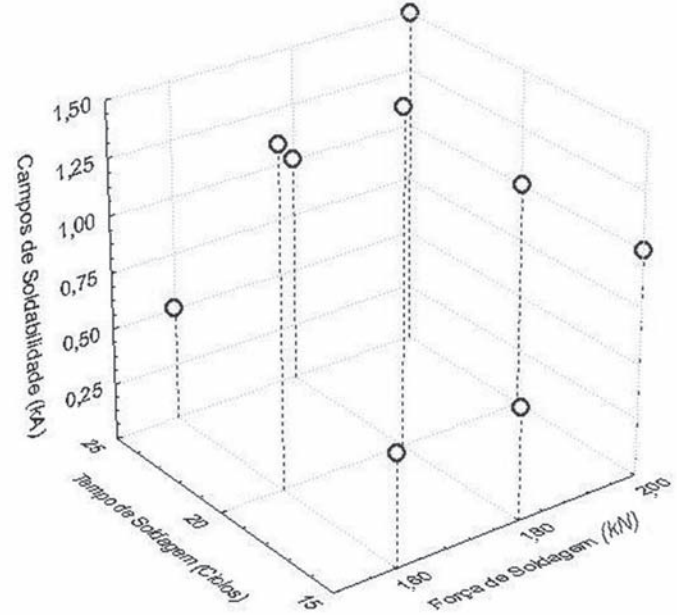


Figura 17. Campos de soldabilidade para o aço Dual-Phase 600 revestido soldado pelo equipamento MFDC

uma passagem mais suave da corrente, evitando o problema. O maior crescimento dos botões de soldagem para o equipamento MFDC também fez com que os campos do mesmo fossem consideravelmente maiores que os encontrados para os aços revestidos soldados pelo equipamento AC.

Analisando-se a soldagem pelo equipamento AC, os aços não revestidos apresentaram campos de soldabilidade maiores, conforme a literatura. Para a soldagem com este equipamento, o baixo crescimento dos botões observados para a soldagem dos aços revestidos foi o responsável pelos baixos campos

de soldabilidade. Este menor crescimento das lentes ocorre, possivelmente, devido à menor resistência de contato entre as chapas para os aços revestidos, que aliada à queda mais acelerada desta resistência [15], que é uma característica do processo, limita o crescimento das lentes.

Os eletrodos esféricos mostraram serem os possíveis responsáveis pelos relativos baixos campos de soldabilidade. Isto porque aumentam consideravelmente a densidade de corrente, concentrando a energia de soldagem em uma pequena área, limitando o crescimento das lentes de solda e causando

muitas expulsões. Mais testes também deveriam ser realizados a fim de se refinar os campos de soldabilidade e aumentar a confiabilidade nos resultados, o que não foi objetivo desta etapa do trabalho.

4. Conclusões

Foram encontrados campos de soldabilidade para ambos os aços testados, Dual-Phase 600 revestido e não-Revestido, para ambos os equipamentos de soldagem, obtidos para faixas de corrente de até 1,5 kA. Estes campos correspondem às faixas de corrente onde o modo de fratura, diâmetro do botão de solda e expulsão atendem à norma de soldagem utilizada como referência.

Maiores campos de soldabilidade foram obtidos para o equipamento MFDC. Este processo se mostrou ser mais sensível à alteração dos parâmetros de soldagem, principalmente nos limites inferiores dos campos de soldabilidade, apresentando maiores botões de soldagem em relação ao processo AC nestes casos.

Problemas foram encontrados em relação à indentação encontrada, muito elevada e possível motivo de reprovação das soldas, por uma questão estética ou de resistência das mesmas.

Os eletrodos esféricos se mostraram serem os possíveis responsáveis pelos relativos baixos campos de soldabilidade e também pela elevada indentação nas chapas e expulsão.

A força de soldagem de 2,0 kN se mostrou ser a mais eficaz para a soldagem dos aços Dual-Phase 600 testados, reduzindo a expulsão e apresentando um melhor comportamento em relação às medidas do diâmetro dos botões obtidos.

5. Agradecimentos

O Prof. Vilarinho gostaria de agradecer a Usiminas pelo financiamento deste trabalho conjunto e ao CNPq (Processo 473953/2009-9 e Processo 307554/2008-2), à Fapemig (Processo TEC - APQ-01389-08).

6. Referências Bibliográficas

[1] CONGRESS, G.C. Energy, Technologies, Issues and Policies for Sustainable Mobility. "European Parliament Votes for 125g/km CO2 Limits of New Vehicles by 2015". 2008 [cited 20th Feb. 2008]; Available from: <http://www.greencarcongress.com/2007/10/european-parlia.html>.

[2] SABATINI, J. Steel Never Sleeps. Automotive Design & Production. 2007 [cited 03 mar. 2007]; Available from: <http://www.autofieldguide.com/articles/070007.html>.

[3] MARYA, M. and X.Q. GAYDEN. Development of Requirements for Resistance Spot Welding Dual-Phase (DP-600) Steels Part 1 – The Causes of Interfacial Fracture. Welding Journal, v.84, n. 11, p. 172s-182s, 2005.

[4] CARLSSON, B., J. LARSSON, and T. NILSSON. Dual-Phase Steels for Auto Body: Design, Forming and Welding Aspects. SSAB Tunplatt AB, 2005, p.

[5] TUMULURU, D.M. Resistance Spot Welding of Coated High-Strength Dual-Phase Steels. Welding Journal, v.85, n. 8,

p. 31-37, 2006.

[6] POGGIO, S., M. PONTE, and C. GAMBARO. Resistance Spot Welding of Advanced High Strength Steel DP600. Università Degli Studi Di Genova, Facoltà de Ingegneria, 2005, p.

[7] INSTITUTE, I.I.A.S. Section 1: General Description of AHSS In: Advanced High Strength Steel Application Guidelines, Version 3, Rev. 18th June. 2006, p.

[8] ALENIUS, M. and E. AL. Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels. Welding Journal, v.85, n. 12, p. 305s-313s, 2006.

[9] WOLFF, M.A. Avaliação das Espessuras das Camadas de Zinco das Chapas Galvanizadas a Serem Soldadas por Resistência a Ponto. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU, 2006, p.

[10] AWS. AWS/SAE D8.9M: Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. International Standard Book Number: 0-87171-672-0. 2002. 2002, p.

[11] JIS. JIS - Z3136. Method of Tension Shear Test for Spot Welded Joint. Japanese Standards Association, 1999, p.

[12] ISO. ISO/DIS 10447. Peel and Chisel Testing of Resistance Spot and Projection Welds. 2005, p.

[13] ISO. ISO/DIS 14323. Resistance Spot and Projection Welds – Destructive Testing for Welds – Specimen Dimensions and Procedure for Impact Shear and Cross Tension Testing. 2005, p.

[14] NASCIMENTO, V.C. Instalação e Desenvolvimento de Software para Controle da Placa de Aquisição NI PCI6036E – Aplicação em Soldagem por Resistência. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 2/2003, 2004.

[15] BROWN, B.M. A Comparison of AC and DC Resistance Welding of Automotive Steels. Welding Journal, v.66, n. 1, p. 18-23, 1987.