

ESTUDO DA SOLDABILIDADE A PONTO POR RESISTÊNCIA ENTRE OS AÇOS 22MnB5 E DP800*

Gabriela Pereira de Miranda¹
Paulo José Modenes²
Kleiner Marques Marra³

Resumo

Este estudo teve por objetivo avaliar a soldabilidade a pontos entre os aços 22MnB5 e Dual Phase da classe de 800 MPa de limite de resistência (DP800), ambos com 1,8 mm de espessura. A intenção foi determinar os parâmetros adequados de soldagem para esse tipo de junta soldada, que vem sendo progressivamente utilizada na estrutura de veículos automotores, em virtude do uso crescente de peças fabricadas a partir do aço 22MnB5, submetido ao processo de estampagem a quente (*hot stamping*). Foram avaliadas as propriedades mecânicas através de ensaios estáticos de cisalhamento e de tração cruzada, em juntas soldadas produzidas a partir da variação do tempo de soldagem e da força aplicada pelos eletrodos. Percebeu-se que as juntas confeccionadas com o tempo de soldagem com múltiplos pulsos (9/2/9/2/9 ciclos) e a força de 5,0 kN obtiveram os melhores resultados em cisalhamento. Em contrapartida, os corpos de prova produzidos com a força de 6,5 kN atingiram os maiores valores em tração cruzada. Independentemente dos parâmetros aplicados, todas as condições avaliadas permitiram alcançar o valor mínimo de carga de ruptura necessária para garantir a qualidade de uma junta soldada a ponto entre os aços avaliados.

Palavras-chave: Soldagem a ponto por resistência; 22MnB5; DP800.

SPOT WELDABILITY EVALUATION OF 22MnB5 AND DP800 STEELS

Abstract

This study aimed to evaluate the resistance spot weldability of 22MnB5 and DP800 steels, both with 1.8 mm thick. The intention was to set of welding parameters appropriate to provide technical support to clients about automotive assembly. Mechanical properties of all welded joints were evaluated using cross tensile and lap shear test samples. It was noticed that the welded joint made from the welding time with multiple pulses (9/2/2/9/2 cycles) and the force of 5.0 kN, achieved the best results in shear tensile test. However, the force of 6.5 kN higher values for the cross tensile test. Nevertheless, all the conditions evaluated were approved in both tests, obtaining the minimum failure load which ensures the qualities of a welded joint.

Keywords: Resistance spot welding; 22MnB5; DP800.

¹ Engenheira Metalurgista, Pesquisadora, Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, doutor, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG e Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, doutor, Especialista em Produto, Gerência Geral de Atendimento ao Cliente, Garantia da Qualidade e Produto, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Um importante foco da indústria automotiva é reduzir o peso dos veículos, devido às exigências ambientais e, ao mesmo tempo, aumentar os níveis de segurança dos passageiros. Como consequência, tem-se procurado incessantemente soluções tecnológicas no desenvolvimento de componentes eficazes na constituição de veículos. Neste contexto, o emprego de aços com resistência à tração que pode chegar a 1500 MPa tem sido utilizado na confecção de peças estruturais e de reforço, a fim de atender aos requisitos determinados pelas normas de segurança com intuito de garantir a integridade dos passageiros em uma eventual colisão. Entretanto, as chapas destes aços não são facilmente conformadas, por possuírem um elevado escoamento associado a uma ductilidade baixa, e como resultado a elevada propensão ao fenômeno do retorno elástico e grande probabilidade da geração de trincas, além de problemas de fixação de forma; o que torna inviável as técnicas de estampagem tradicionais. A solução é a estampagem em temperatura alta, entre 900 e 930°C, seguida de têmpera. Este processo é comumente chamado de estampagem a quente (*hot stamping*) ou endurecimento na prensa (*press hardening*).

O aço mais utilizado no processo de estampagem a quente é o 22MnB5 [1]. A microestrutura inicial desse aço, na condição de recozido, é formada basicamente por ferrita e perlita. Seu limite de resistência nessa condição fica em torno de 600 MPa. Após o processo de estampagem a quente, no qual aplica-se um resfriamento forçado, esse material apresenta, ao final do processo, microestrutura completamente martensítica, podendo atingir valores de limite de resistência que ultrapassam 1500 MPa.

A união de peças estampadas a quente a outras partes do veículo pode ser feita pela soldagem a ponto por resistência, sendo este processo o mais utilizado no segmento automotivo em virtude de sua alta produtividade, relativa facilidade de execução e qualidade adequada das regiões de união [2]. Todavia, não existe muita informação na literatura sobre as características de soldabilidade a ponto desses aços. Assim, o presente trabalho visou avaliar a soldabilidade do aço 22MnB5, em junta mista, unido ao aço *Dual Phase* de 800 MPa de limite de resistência (DP800), uma vez que esse tipo de união vem se tornando usual na indústria automotiva.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de aço utilizadas foram de 22MnB5, após tratamento térmico simulando a estampagem a quente em escala piloto na Usiminas, e *Dual Phase* de 800 MPa de limite de resistência (DP800), ambos não revestido e na espessura de 1,8 mm. A análise química e os valores de propriedades mecânicas em tração dos materiais encontram-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Composição química dos aços (%p/p)

Aço	C	Si	Mn	B	Cu+Cr+Ni+V	C _{eq} ^(a)
22MnB5	≤0,27	≤0,50	≤1,4	0,003	≤0,21	0,35
DP800	≤0,15	≤0,60	≤1,9	—	≤0,12	0,22

(a) $C_{eq} = \%C + (\%Si/30) + ((\%Mn + \%Cu + \%Cr)/20) + (\%Ni/60) + (\%V/10) + \%5B$ [3]

Tabela 2. Propriedades em tração dos aços 22MnB5 e DP800

Aço	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento ^(a) Total (%)
22MnB5 ^(b)	1169	1536	9,60
DP800	698	890	14,9

(a) corpo de prova sub-size da norma ASTM A 370 [4], com base de medida de 25 mm; (b) tratado termicamente.

Para a realização da soldagem, foi utilizada uma máquina estacionária de 170 kVA de potência nominal, de corrente contínua. Foram empregados eletrodos tipo domo de liga Cu-Cr-Zr, pertencentes à classe 2 da norma AWS D8.6 [5]. Os parâmetros fixados foram: vazão de água nos eletrodos de 6 l/min, tempo de pré-pressão de 40 ciclos e tempo de retenção de 10 ciclos. Para determinação dos campos de soldabilidade (correntes mínima (I_{\min}) e máxima (I_{\max})) foram variados o tempo de soldagem e a força aplicada pelos eletrodos, utilizando os parâmetros recomendados pela AWS D8.9M [6], para aços de espessura de 1,8 mm, resultando em 4 combinações, conforme apresentado na Tabela 3. As soldagens ocorreram em juntas dissimilares de 22MnB5/DP800.

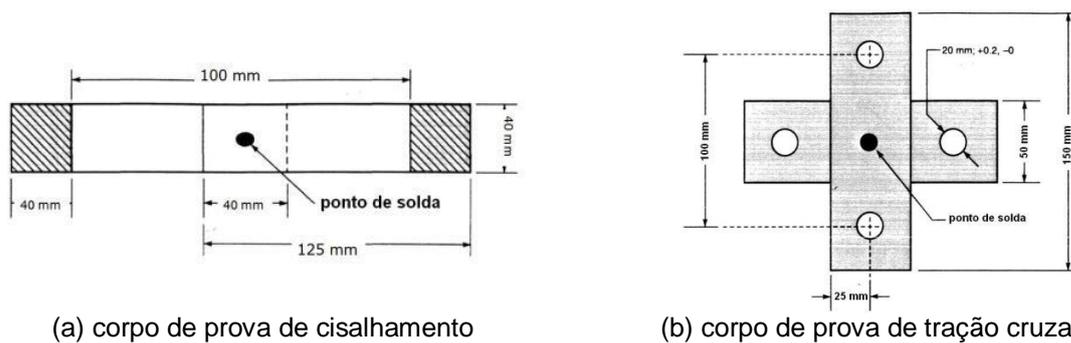
Tabela 3. Parâmetros que utilizados para determinação do campo de soldabilidade da união 22MnB5/DP800

Condição	Força (kN)	Tempo de soldagem (ciclos)
P1	5,0	20
P2	5,0	9/2/9/2/9 ^(a)
P3	6,5	20
P4	6,5	9/2/9/2/9 ^(a)

(a) solda/pausa/solda/pausa/solda.

A I_{\min} foi ajustada para produzir uma lente de solda (zona fundida) da ordem de $4\sqrt{t} \pm 0,1\text{mm}$, sendo t a espessura do aço, e a I_{\max} até que se atingisse a expulsão do metal líquido.

Para cada condição de soldagem exibida na Tabela 3, foram confeccionados três corpos de prova para testes de cisalhamento e três para tração cruzada, de acordo com as normas JIS Z3136 [7] e JIS Z3137 [8], respectivamente. A representação esquemática dos corpos de prova empregados nesses ensaios pode ser vista na Figura 1.



(a) corpo de prova de cisalhamento

(b) corpo de prova de tração cruzada

Figura 1. Representação esquemática e dimensões dos corpos de prova para avaliação das juntas soldadas a ponto, segundo a JIS Z3136 [7] e a JIS Z3137 [8].

Também foi realizada a análise metalográfica da seção transversal à solda, via microscopia ótica, após ataque com reagente nital 2%, nas amostras das condições P1 e P4. Nesta mesma seção, foi realizada a determinação do perfil de dureza da região de solda, com carga de 0,5 kgf, conforme apresentado na Figura 2.

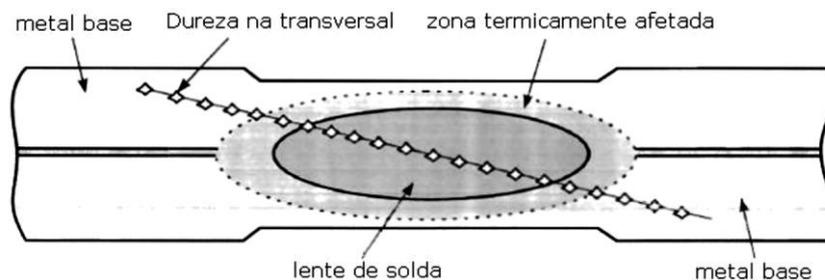


Figura 2. Representação esquemática da avaliação do perfil de dureza [6].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação dos Campos de Soldabilidade

Na Figura 3 são exibidos os campos de soldabilidade. Verifica-se no tempo de soldagem de 20 ciclos, que a corrente mínima (I_{\min}) aumentou de 6,8 kA para 7,2 kA, com o incremento da força de 5,0 kN para 6,5 kN. Normalmente, o aumento da força aplicada pelos eletrodos resulta no deslocamento do campo de soldabilidade (I_{\min} e I_{\max}) para o sentido de maiores correntes. Isso acontece devido ao maior contato efetivo entre a chapa e o eletrodo, que eleva a extração de calor e reduz a densidade de corrente.

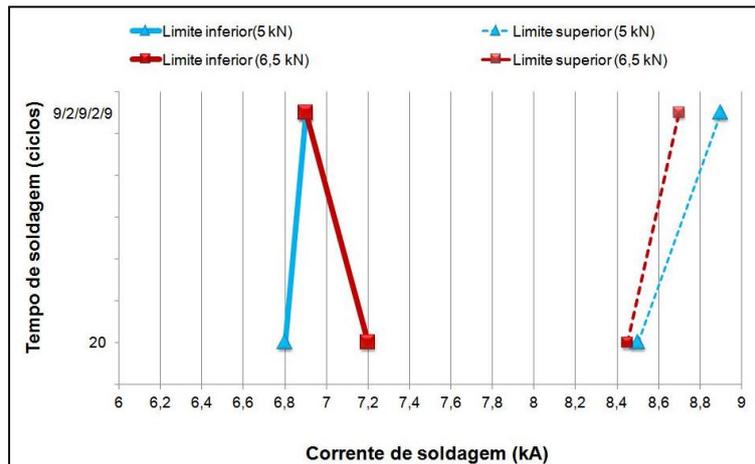


Figura 3. Campos de soldabilidade da junta soldada 22MnB5/DP800, obtidos para diferentes forças aplicadas pelos eletrodos.

Entretanto, o comportamento descrito anteriormente não condiz com os resultados dos campos de soldabilidade. Conforme a Figura 4, percebe-se que o campo, quando aplicada uma força de 5 kN, obteve maior faixa de trabalho, ou seja, maior campo de soldabilidade, em relação à força de 6,5 kN. Acredita-se que a alta resistividade elétrica do 22MnB5 pode ter contribuído para um super aquecimento da região nesse ponto, fazendo com que a expulsão acontecesse precocemente. Contudo, observou-se que a melhor força para soldagem foi a de 5 kN, que garantiu faixas de corrente de trabalho superiores a 1,5 kA, considerada aceitável para soldagem de aços avançados de alta resistência [9,10].

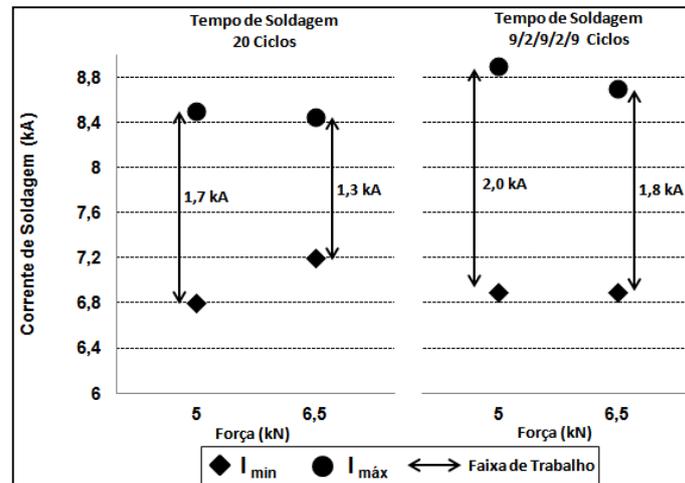


Figura 4. Gráfico da largura dos campos de soldabilidade nas diferentes combinações de tempo de soldagem e força entre eletrodos usados na soldagem das juntas soldada 22MnB5/DP800.

Quanto ao tempo de soldagem, observou-se que um tempo maior com pausa entre as correntes de soldagem (9/2/9/2/9 ciclos) garantiu maiores faixas de trabalho, como pode ser visto na Figura 4. Tawade e colaboradores [11] também observaram o mesmo fenômeno, entretanto não explicaram os motivos pelos quais múltiplos pulsos podem contribuir para o aumento da faixa de corrente de trabalho. Acredita-se que menores intervalos de tempo para passagem de corrente de soldagem contribuem para que o material não supraqueça e forme lentes de solda sem a presença de defeitos e com uma microestrutura favorável às propriedades mecânicas.

3.2 Resistência ao Cisalhamento

Os resultados da resistência ao cisalhamento em relação a corrente de soldagem, para diferentes forças aplicadas pelos eletrodos e tempos de soldagem, podem ser vistos na Figura 5. Nota-se, para todas as condições impostas, a tendência ao aumento da carga de ruptura em função do aumento da corrente de soldagem.

Não foram realizados ensaios de cisalhamento para corpos de prova obtidos na corrente máxima ($I_{m\acute{a}x}$), uma vez que, nesta condição ocorre perda de material (metal líquido), em função da expulsão ocasionada pelo superaquecimento localizado. Possivelmente, isso distorceria os resultados, pois menos material fundido na lente de solda acarretaria em menor resistência em relação aos corpos de prova submetidos às demais correntes de soldagem. Portanto, foram realizados testes em corpos de prova com 200 A abaixo da expulsão, identificados de corrente de operação (I_{op}).

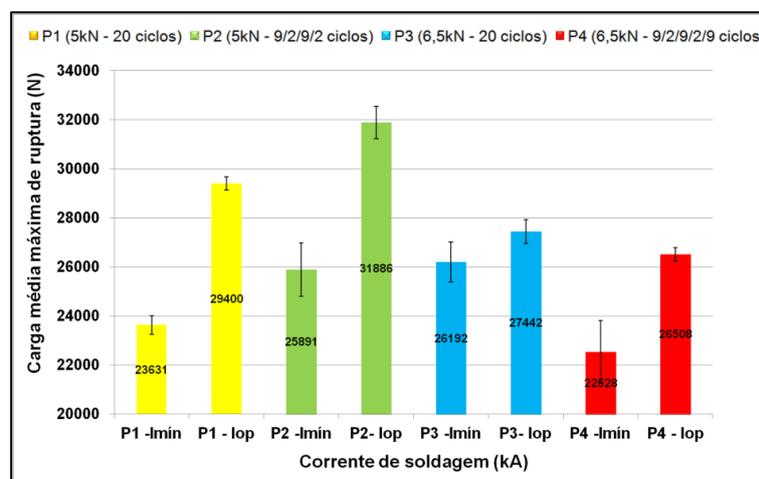


Figura 5. Resultado da resistência ao cisalhamento de juntas soldadas a ponto de 22MnB5/DP800 em função da corrente, utilizando diferentes forças e tempos de soldagem.

Dos parâmetros de soldagem avaliados, os corpos de prova que obtiveram melhores resistências em cisalhamento foram da condição P2, soldados com tempo de soldagem mais longo (9/2/9/2/9 ciclos) e menor força aplicada pelos eletrodos (5,0 kN).

Pode-se dizer que o aumento da força não garantiu o aumento da carga de ruptura em cisalhamento, uma vez que, foi percebida a tendência de menores valores de resistência para os corpos de prova da condição P4, confeccionados com 6,5 kN de força aplicada pelos eletrodos.

De acordo com vários autores [12-14], o diâmetro da lente de solda tem influência sob o resultado da resistência ao cisalhamento de uma junta soldada. Quanto maior o diâmetro da lente, provavelmente maior será a carga de ruptura. Contudo, foi percebido que para uma corrente mais alta, a I_{op} , que produziria uma lente de solda maior, não necessariamente resultou em uma carga ruptura tão alta, como pode ser verificado na condição P4 (Figura 5) em que o valor da carga de ruptura de uma corrente I_{op} , foi de aproximadamente 26 kN; praticamente a mesma de uma corrente mínima de soldagem de uma outra condição, como no caso de P2 e P3.

Apesar da diferença entre os valores encontrados de carga de ruptura, verifica-se que mesmo para um valor mais baixo, 22528 N, o corpo de prova seria aprovado, uma vez que a resistência ao cisalhamento deste seria de 995 MPa, para uma lente

de solda de 5,37 mm; ou seja, maior que a resistência do aço DP800. Portanto, todas as condições foram aprovadas na resistência ao cisalhamento.

3.3 Resistência à Tração Cruzada

Em relação aos resultados de resistência à tração cruzada, o primeiro ponto a ser notado é o valor da carga de ruptura obtida para um corpo de prova confeccionado na corrente mínima de soldagem (I_{\min}), Figura 6. Nessa condição todos os corpos de prova estavam com o mesmo diâmetro de botão de solda no valor de $5,37 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, baseado na equação $4\sqrt{t} \pm 0,1 \text{ mm}$, sendo t a espessura do aço, já comentada anteriormente para obtenção de I_{\min} . Verifica-se que houve diferença entre os valores de carga média de ruptura para I_{\min} , sendo as maiores para os corpos de prova das condições P3 e P4, os quais foram confeccionados com uma força maior de soldagem de 6,5 kN. Uma provável alternativa para explicar a diferença entre os resultados é que de acordo com alguns autores [14,15], além do diâmetro da lente de solda, a microestrutura da zona fundida (ZF) também influencia no resultado da carga de ruptura em tração cruzada. Não foram percebidas alterações de valores de carga de ruptura em relação ao tempo de soldagem aplicado.

Outro ponto importante é que nas condições P3 e P4, a diferença entre as cargas de ruptura entre os corpos de prova de I_{\min} e de I_{op} foram mínimas, o que significa que não só a geometria da junta soldada tem influência sobre esses resultados.

Nos corpos de prova produzidos na corrente I_{op} , verifica-se que os resultados foram similares entre as condições de soldagem avaliadas, com exceção para a condição P1, que teve resultado inferior.

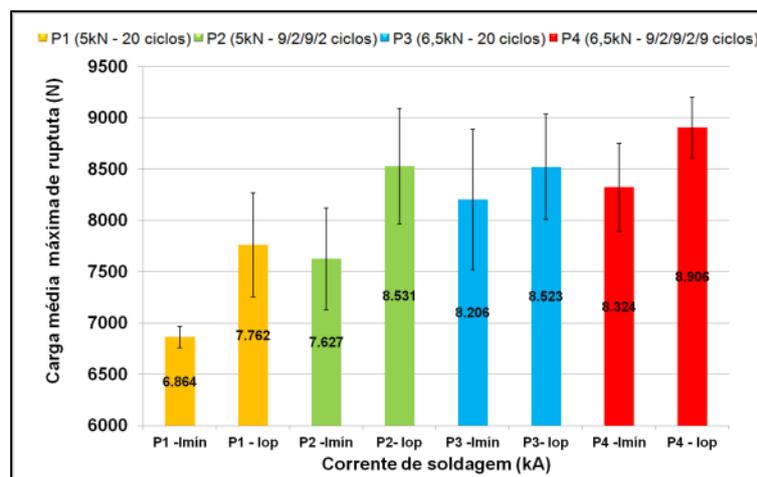


Figura 6. Resultado da resistência à tração cruzada de juntas soldadas a ponto de 22MnB5/DP800 em função da corrente, utilizando diferentes forças e tempos de soldagem.

3.4 Aspecto Macrográfico da Seção Transversal e Perfil de Dureza

O aspecto da seção transversal e o perfil de dureza das juntas soldadas da condição P1 e P4 se encontra, respectivamente, nas Figuras 7 e 8. Os resultados indicam, no caso do aço 22MnB5, que os valores mais altos de dureza estão distribuídos nas regiões de grãos grosseiros da zona termicamente afetada (GG-ZTA), de grãos finos da ZTA (GF-ZTA), zona fundida (ZF) e metal base (MB). Já para o aço DP800 está concentrada nas de GG-ZTA e GF-ZTA; provavelmente devido à formação de martensita nestas regiões.

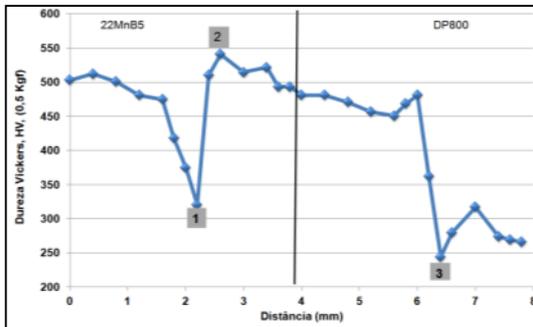
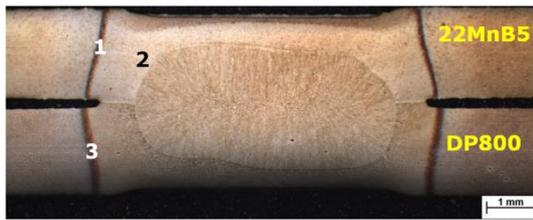


Figura 7. Seção transversal à junta soldada e perfil de dureza Vickers da condição P1 – I_{min} . (Parâmetros de soldagem: força aplicada pelos eletrodos: 5 kN; tempo de soldagem: 20 ciclos, corrente: 6,80 kA).

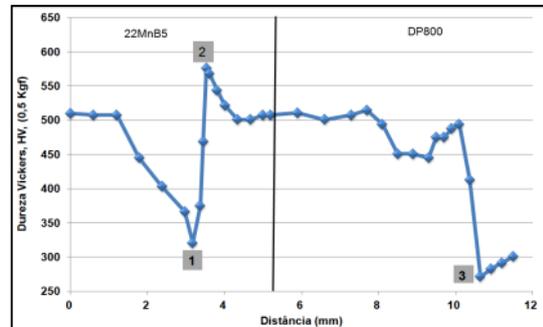


Figura 8. Seção transversal à junta soldada e perfil de dureza Vickers da condição P4 – $I_{máx}$. (Parâmetros de soldagem: força aplicada pelos eletrodos: 6,5 kN; tempo de soldagem: 9/2/9/2/9 ciclos, corrente: 8,71 kA).

Observa-se uma redução da dureza na ZTA em relação ao MB, que está associada ao revenimento da martensita ocorrido na zona subcrítica (RS-ZTA) do aço DP800, ponto 3, e a formação de ferrita na intercrítica (RI-ZTA) do aço 22MnB5, ponto 1. Verifica-se que o amaciamento na ZTA do 22MnB5, ponto 1, foi mais proeminente, queda de aproximadamente 200 HV, do que para o DP800; podendo-se inferir que não houve amaciamento para o aço de dupla fase.

Ao final, observou-se que os perfis de dureza foram similares para todas as condições avaliadas, podendo inferir que: a geometria da junta soldada (exemplo: o diâmetro da lente de solda) provavelmente pode ter influenciado mais do que a microestrutura nas propriedades mecânicas dos aços, principalmente em relação ao ensaio de cisalhamento; fato já confirmado em literatura [13-15].

4 CONCLUSÃO

O presente estudo, que teve como objetivo avaliar a soldabilidade a ponto por resistência entre os aços 22MnB5 e DP800, revelou que:

- O aumento da força aplicada pelos eletrodos não resultou no deslocamento do campo de soldabilidade para o sentido de maiores correntes, pelo contrário, o incremento da força de 5 kN para 6,5 kN não somente diminuiu o campo de trabalho, como também o valor da corrente máxima de soldagem;
- A utilização da soldagem por múltiplos pulsos (9/2/9/2/9 ciclos) garantiu maiores faixas de trabalho, além de maiores lentes de solda (zona fundida);
- No teste de cisalhamento foi verificada a tendência ao aumento da carga de ruptura em função da corrente de soldagem, sendo que, os resultados foram melhores para as juntas soldadas referentes ao final da faixa de soldabilidade, em que são obtidos os maiores diâmetros de lente de solda;
- Dentre os corpos de prova avaliados, os confeccionados na condição com tempo de soldagem com múltiplos pulsos (9/2/9/2/9 ciclos) e força de 5 kN conferiram maiores cargas de ruptura em relação às demais condições; e

- e. Quanto ao teste de tração cruzada, os melhores resultados foram para as condições com maior força aplicada pelos eletrodos (6,5 KN), não havendo diferenças entre os tempos de soldagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem a toda equipe da Usiminas e a CAPES/PROEX que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Soares TJM. Análise técnica e econômica do processo de estampagem a quente com aços microligados ao boro [dissertação de mestrado]. Porto: Universidade do Porto; 2008.
2. Wolff MA, Vargas JE, Alfaro SCA, Vilarinho LO. Comparação entre os processos RSW corrente alternada e média frequência contínua via filmagem em alta velocidade. In: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; 2007; Águas de São Pedro, Brasil.
3. Yurioka, N. Carbon equivalents to assess cold cracking sensitivity and hardness of steel welds. Nippon Steel Technical Report. 1982; 20: 61-73.
4. American Society for Testing and Materials International. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. ASTM A370. 2012.
5. American Welding Society. Specification for automotive resistance spot welding electrodes. AWS D8.6. 2005:100.
6. American Welding Society. Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials. AWS/SAE D8.9M. Miami, FL, USA, 2012: 78.
7. Japanese Standards Association. Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot and embossed projection welded joints. JIS Z 3136. 1999.
8. Japanese Standards Association. Specimen Dimensions and Procedure for Cross Tension Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welded Joints. JIS Z 3137. 1999.
9. Ferrasse S, Verrier P, Meesemaeker F. Resistance spot weld ability of high strength steel for use in car industry. Welding in the World. 1998; 41: 177-195.
10. Shi G, Westgate SA. Resistance spot welding of high strength steels. International Journal for the Joining Material. 2004; 16(1): 9-14.
11. Tawade GKC, Boudreau G. Robust schedules for spot welding zinc-coated advanced high-strength automotive steels. Sheet Metal Welding Conference XI; 2004; Sterling Heights, MI. p. 1-12.
12. Jong YS, Lee YK, Kim DC, Kang MJ, Hwang IS, Lee WB. Microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded ultra high strength steel containing boron. Materials Transactions. 2011; 52(6): 1330-1333.
13. Hernandez VHB. Effects of martensite tempering on HAZ-softening and tensile properties of resistance spot welded dual-phase steels [tese de doutorado]. Ontario, Canada: University of Waterloo; 2010.
14. Pouranvari M. Susceptibility to interfacial failure mode in similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 dual phase steel and low carbon steel during cross-tension and tensile-shear loading conditions. Materials Science and Engineering A. 2012; 546: 129–138.
15. Gu ZW, Zhang ZL, Han LJ, Xu H. Intermediate frequency spot welding performance investigation of precision ultra-high strength quenching steel plate. ISIJ International. 2009; 49(9): 1378–1383.