

Soldagem por Resistência de Chapas de Aço Utilizadas para Redução de Vibração e Ruído⁽¹⁾

(2) Marcelo Ferreira Lucas

(3) Maurício David Martins das Neves

RESUMO

A combinação de boas propriedades mecânicas e de atenuação sonora tem tornado as chapas de aço VDS (Vibration Damping Steel), um material atrativo para diversas aplicações industriais. Este material é constituído por uma fina camada de polímero colaminado entre duas chapas de aço. Atualmente, o processo de soldagem por resistência é o mais usado para uniões de chapas do tipo VDS.

Neste estudo investigou-se o efeito da soldagem em chapas de aço com a presença de uma camada intermediária de resina visco-elástica, que funciona como isolante elétrico. A presença da camada isolante dificulta a passagem de corrente elétrica e a conseqüente geração de calor, dificultando a soldagem. Uma técnica empregada com sucesso foi a utilização de um circuito adicional entre as chapas externas fornecendo condições para o estabelecimento de um circuito entre os dois eletrodos.

A utilização do circuito adicional na soldagem das chapas VDS propiciou propriedades mecânicas e características microestruturais, similares as chapas de aço sem aplicação de resina. Apesar da queima do polímero em regiões próximas da zona de fusão, o material conservou em parte suas propriedades de amortecimento de ruídos.

Palavras-chave: soldagem por resistência, aço com amortecimento de vibrações e ruídos

ABSTRACT

The combination of good vibration damping properties and high strength make polymercored laminated steels (VDS - Vibration Damping Steel) an attractive material for automotive applications. This material is composed of two skin steel sheets and the core of damping polymer. Nowadays the spot welding process is often used to join sheets of VDS.

In this study the effect of welding vibration damping steel was researched. The presence of the core resin that is an electrical insulator makes welding difficult. A technique used with success is a shunting circuit between the upper and lower sheets to establish a circuit.

The utilization of the shunting circuit in the welding of VDS sheets gave results in terms of mechanical properties and microstructural characteristics, similar to that of steel sheets without resin. In spite of the burn up of the core resin, the material presented partial damping properties.

Key-Words: spot welding, vibration damping steel, shunting circuit

0802029713



(1) Trabalho apresentado no XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem

(2) Bolsista da Faculdade de Engenharia Industrial (FEI)

(3) M.Sc., Eng. Metalurgista, Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)

INTRODUÇÃO

A combinação de boas propriedades mecânicas e de atenuação sonora tem tornado as chapas de aço VDS (Vibration Damping Steel), um material atrativo na fabricação de diversos componentes da indústria automobilística^(1,2). Outros segmentos também podem utilizar este material, principalmente, a construção civil e a indústria de eletrodomésticos⁽¹⁾.

O conjunto VDS é constituído por duas chapas de aço, com uma fina camada de polímero, aplicado e colaminado entre elas. Esse material apresenta a vantagem de associar as características mecânicas do aço com as excelentes propriedades de absorção de vibração e ruídos dos materiais poliméricos⁽³⁾.

Atualmente, o principal consumidor das chapas VDS é a indústria automobilística, onde a soldagem possui um papel de relevante importância⁽⁴⁾. O processo de soldagem por resistência é ainda o mais utilizado neste segmento, principalmente, para chapas finas com espessuras inferiores a 3 mm, devido a facilidade de automação, que propicia a redução do custo unitário e aumento da produtividade.

O processo de soldagem por resistência tem como princípio de funcionamento a geração de calor, a partir da passagem de um fluxo de corrente elétrica pelos materiais de base (MB) sobrepostos, concomitantemente, com a aplicação de pressão pelos eletrodos. Na interface dos dois materiais de base, a resistência elétrica apresenta o valor mais elevado, provocando nesta região, maior dissipação de calor e originando a zona de fusão.

Os principais parâmetros do processo são: resistência elétrica, corrente e tempo de soldagem. O efeito conjunto das variáveis pode ser melhor compreendido através da relação⁽⁵⁾ para estimar o calor imposto na soldagem: $H = R \cdot I^2 \cdot t - H_{perdas}$, onde I = corrente de soldagem [A], R = resistência elétrica local [W], t = tempo [s] e H_{perdas} = perda de calor da solda em função do calor imposto. A intensidade do calor imposto a junta (H) apresenta uma relação direta com as dimensões da zona de fusão (lente de solda).

Uma variável não representada diretamente na equação anterior, mas de elevada influência na resistência elétrica do conjunto, eletrodo-material de base, é a força exercida pelo eletrodo⁽⁵⁾. A resistência elétrica aumenta quando a força dos eletrodos é pequena, devido ao contato incompleto entre as superfícies. Uma elevada força do eletrodo deforma as asperezas e aumenta a área de contato reduzindo a resistência, mas

pode ocasionar marcas superficiais ou deformação excessiva no material de base, prejudicando o acabamento superficial. A força exercida pelos eletrodos apresenta limites inferior e superior, portanto, dentro de valores operacionais ótimos a força do eletrodo se comporta de forma inversamente proporcional a resistência elétrica.

Em uniões de chapas do tipo VDS, a presença de uma camada de polímero dificulta a passagem da corrente elétrica e a geração de calor, inviabilizando a soldagem, pela metodologia tradicional usada no processo por resistência⁽³⁾. A dificuldade adicional criada pela presença da camada, que possui isolamento elétrico, motivou o desenvolvimento de duas técnicas distintas, para soldagem por resistência das chapas VDS.

A primeira técnica utiliza um circuito adicional, que é colocado entre as chapas externas, criando condições para o estabelecimento de um circuito entre os dois eletrodos (punções) de soldagem, conforme mostrado na figura 1a. A segunda, consiste no emprego de uma resina condutora, misturada com pós metálicos ou fibras de carbono, como apresentado na figura 1b.

Basicamente, o objetivo das duas técnicas é atenuar o efeito da elevada resistência elétrica da resina visco-elástica, e criando condições para um fluxo adequado de corrente elétrica, visando a realização da soldagem^(3,6).

Na soldagem das chapas VDS utilizando o circuito adicional, o fluxo da corrente elétrica não passa, inicialmente, através dos materiais de base, devido a presença da camada de polímero. A diferença de potencial entre o eletrodo e a região do MB abaixo de sua superfície (ao longo da espessura) apresenta um valor, que é insuficiente para gerar um fluxo de corrente adequado para soldagem. Portanto, nos instantes iniciais da soldagem a corrente elétrica percorre apenas, pelo circuito adicional⁽⁷⁾.

A soldagem prossegue com a resina sofrendo aquecimento e amolecimento. A força (pressão) exercida pelo eletrodo provoca um afastamento lateral da resina, que depende da geometria da ponta do eletrodo. A região fundida da resina torna-se maior, do que a área de contato com o eletrodo, devido a condução de calor na chapa, portanto, a resina situada abaixo do eletrodo não é expulsa simultaneamente, mas de forma gradual, a partir do centro do eletrodo. Nesta etapa de soldagem, o aumento de temperatura da resina é controlado pela distância entre os pontos de incidência dos eletrodos em relação ao contato com circuito adicional no MB, pela intensidade de corrente proveniente do circuito adicional e pelo tempo de aplicação da corrente⁽⁷⁾.

O calor e a pressão dos eletrodos causam a expulsão da resina no MB apenas abaixo do eletrodo e, cria condições, para as chapas, superior e inferior, se

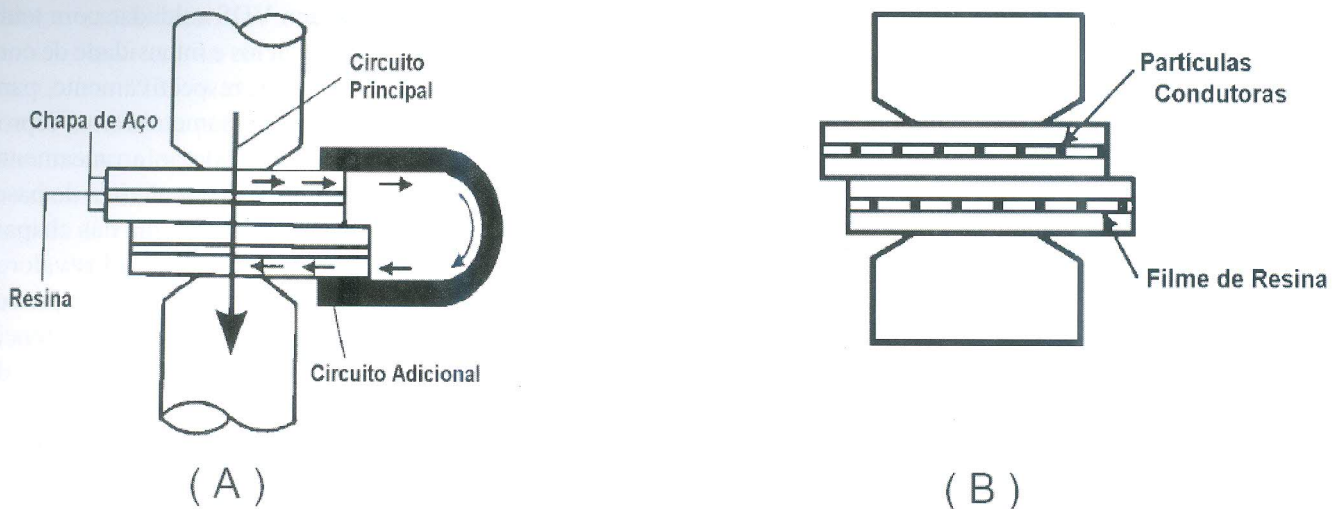


Figura 1: Representação esquemática das soldas das chapas VDS
(A) Circuito Adicional (B) Partículas Condutoras

encontrarem entre os eletrodos, favorecendo a ligação elétrica do circuito. A corrente elétrica deixa de passar pelo circuito adicional, começando a percorrer o circuito principal, dando início a soldagem. A figura 1.a. mostra uma representação esquemática dos circuitos principal e secundário envolvidos na soldagem das chapas VDS.

Neste trabalho investigou-se o efeito dos parâmetros da soldagem por resistência de duas chapas de aço sobrepostas (VDS + VDS ou VDS + chapa de aço), utilizando-se a técnica do circuito adicional. Foram estudados os efeitos da corrente de soldagem, tempo e diâmetro do eletrodo sobre a resistência mecânica e características microestruturais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material de base utilizado foi AISI 1008 com composição química mostrada na tabela 1. O limite de resistência deste aço apresentou um valor de 310-360 MPa. A espessura total da chapa VDS (chapa + resina + chapa) era de aproximadamente $(1,84 \pm 0,05)$ mm, enquanto cada chapa de aço possuía uma espessura de $(0,83 \pm 0,02)$ mm. A resina utilizada para compor a chapa VDS era do tipo polivil-butiral e apresentava espessura média de $(0,19 \pm 0,06)$ mm. A chapa VDS foi desenvolvida no Laboratório de Processamento Termomecânico (LPT) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

As chapas foram cortadas nas dimensão de 100,0 X 25,0 mm e desengraxadas com acetona. A seguir montou-se o conjunto de chapas sobre-

postas, mantendo sempre a mesma distância entre centro do ponto de incidência do eletrodo e o contato do circuito adicional e realizava-se a soldagem. Utilizou-se, como circuito adicional, uma barra de cobre dobrada com 6,0 mm de diâmetro, para facilitar o contato com o MB, que era posicionado numa distância aproximada de 1,0 cm do ponto de incidência do eletrodo.

As soldas foram executadas no fabricante de equipamentos de soldagem por resistência, IBMS — Equipamentos Industriais Ltda, em uma máquina modelo “IB2PP” de 150 KVA, com braço no comprimento de 0,3 metros. Utilizaram-se eletrodos de cobre do grupo A e classe 2 (Cu-0,8%Cr), com diâmetros de 4,0 e 6,0 mm. Foram testadas as geometrias, plana e levemente abaulada, para a extremidade (ponta) do eletrodo. As forças exercidas pelos eletrodos foram mantidas constantes nos valores de 1150 e 1850 N, respectivamente, para cada diâmetro.

Após a soldagem, as amostras foram inspecionadas visualmente e submetidas aos ensaios mecânicos de arrancamento e de cisalhamento (tração), com base na norma AWS C.1.1⁽⁸⁾. Outras amostras foram cortadas na seção transversal da solda, preparadas metalograficamente e atacadas quimicamente. Utilizou-se a microscopia ótica, para medir as dimensões típicas da zona de fusão (ZF) e Efetuaram-se medidas de

	%C	%Mn	%P	%Si	%Fe
% peso	0,09	0,45	0,035	0,10	Bal.

Tabela 1: Composição química do material de base

microdureza Vickers, com uma carga de 200 gramas, em função da distância, com objetivo de ajudar o dimensionamento da ZAC.

Em algumas amostras soldadas foi efetuado o ensaio de atenuação sonora, segundo a norma ASTM E 756-93⁽⁹⁾.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A soldagem das chapas VDS empregando o circuito adicional (CA), deve atender determinados requisitos de desempenho, avaliados por meio de ensaios mecânicos (arrancamento e cisalhamento), caracterização microestrutural e testes de atenuação sonora.

O ensaio de arrancamento foi executado inicialmente, com objetivo de realizar uma seleção dos parâmetros mínimos, que deveriam ser utilizados na

soldagem. As chapas de aço VDS soldadas com tempo igual ou inferior a cinco ciclos e intensidade de corrente inferior a 2750 e 4000 A, respectivamente, para os eletrodos de 4,0 e 6,0 mm de diâmetro foram reprovadas. O ponto de solda submetido ao arrancamento era fraturado e separado de um dos materiais de base, isto é, o rompimento não ocorria em uma das chapas, mas através do ponto de solda. Os reduzidos valores dos parâmetros, corrente e tempo de soldagem provocaram uma lente de solda com dimensão e resistência insuficientes para permitir a aprovação no ensaio de arrancamento.

As chapas de aço AISI 1008 sem a presença de resina e com espessuras semelhantes as chapas VDS, quando soldadas com tempo mínimo correspondente a cinco ciclos e corrente de 2750 e 4000 A, para os eletrodos de 4,0 e 6,0 mm, respectivamente, foram aprovadas no ensaio de arrancamento. Este resultado con-

Tabela 2: Parâmetros de soldagem e características

Amostra	ϕ_{ELETROD} [mm]	I [A]	T [ciclos]	F [N]	largur _{max} [mm]	penetr. ZF [mm]	$\sigma_{\text{TRAÇÃO}}$ [MPa]	ZAC [mm]
1	4	3000	6	1150	3,00	1,89	364	0,25
2	4	3250	6	1150	*	*	365	*
3	4	3500	6	1150	3,40	2,02	381	0,30
4	4	3750	6	1150	*	*	382	*
5	4	4000	6	1150	3,80	2,08	385	0,34
6	4	4250	6	1150	*	*	371	*
7	4	4500	6	1150	4,00	2,12	331	0,37
8	4	4750	6	1150	*	*	280	*
9	6	5000	6	1850	4,00	1,80	308	0,28
10	6	6000	6	1850	*	*	319	*
11	6	7000	6	1850	*	*	338	*
12	6	8000	6	1850	4,15	1,90	362	0,39
13	6	6000	8	1850	*	*	352	*
14	6	7000	8	1850	*	*	369	*
15	6	8000	8	1850	4,25	2,08	354	0,45
16	6	6000	10	1850	*	*	354	*
17	6	7000	10	1850	*	*	375	*
18	6	8000	10	1850	4,35	2,18	355	0,59
19 **	4	4500	6	1150	4,10	2,22	351	0,39
20 **	6	7000	10	1850	*	*	355	*
21 **	6	8000	6	1850	*	*	349	*
22 **	6	8000	10	1850	6,40	2,38	250	0,60
23 ***	6	7000	10	1850	5,00	2,46	351	0,51
24 ***	6	8000	10	1850	6,35	2,61	368	0,55
25 ***	6	7000	12	1850	*	*	365	*

* amostras não ensaiadas ** amostras AISI 1008/AISI 1008 *** amostras VDS/VDS

firmou a influência, que a camada de resina e o circuito adicional tem na elevação do tempo de soldagem das chapas VDS. A utilização do CA aumentou a distância percorrida pela corrente, reduziu a intensidade de corrente, elevou do tempo necessário para fundir a resina abaixo do eletrodo e retardou o início a soldagem através do circuito primário.

As chapas de aço VDS soldadas foram aprovadas no ensaio de arrancamento, quando utilizou-se um tempo igual ou superior a seis ciclos e intensidade de corrente superior a 3000 e 5000 A, respectivamente, para os eletrodos de 4,0 e 6,0 mm. Observou-se experimentalmente, que o número de ciclos deveria ser superior a seis, para possibilitar o amolecimento e a expulsão da camada de resina sob o eletrodo. Alguns resultados^(6,7) mostraram que o aumento da temperatura da resina é controlado basicamente pela intensidade de corrente, que passa pelo circuito adicional e a resina leva de 1/20 até 1/10 de segundo, para se aquecer e fundir. Este resultado foi coerente com os valores obtidos, para o amolecimento da resina, nas condições operacionais usadas neste trabalho.

A inspeção visual foi o critério empregado para selecionar os parâmetros máximos de soldagem. Amostras de chapas VDS soldadas com valores superiores a 5000 e 9000 A, respectivamente, para os eletrodos de 4,0 e 6,0 mm apresentaram excessivo amolecimento e profunda depressão na superfície do MB, ocasionado pelo elevado calor imposto a junta. Portanto, valores de intensidade de corrente superiores não foram ensaiados, pois causariam prejuízo às características superficiais e mecânicas da junta.

A partir dos valores obtidos nos testes de arrancamento e de inspeção visual realizaram-se novas soldas e os ensaios de cisalhamento. Observou-se que, as amostras tracionadas apresentaram ruptura apenas na zona afetada pelo calor, sem que ocorresse a separação do ponto de solda do material de base. O limite de resistência das soldas variaram no intervalo de 280 a 385 MPa para as chapas VDS e de 250 a 361 MPa para chapas de aço, conforme apresentado na tabela 2.

As dimensões da lente de solda (penetração e largura) foram medidas por microscopia ótica e seus resultados estão apresentados na tabela 2. Observou-se uma relação direta entre os parâmetros, corrente de soldagem e número de pulsos, com as características dimensionais da zona de fusão. Uma elevação na intensidade de corrente e no número de ciclos incrementaram o calor imposto a solda, provocando um aumento no diâmetro da lente de solda e na profundidade de penetração (altura da ZF). As figuras 2 a 4

mostram seções transversais da solda.

A relação entre os valores do diâmetro máximo de solda (largura) e a tensão de cisalhamento (sTRAÇÃO) nas chapas VDS é consistente com os resultados, que foram obtidos nas amostras soldadas sem resina. A profundidade de penetração variou de 1,80 a 2,61mm, que correspondeu ao intervalo de 66 a 82% da espessura total da chapa. Recomenda-se que, a penetração seja mantida entre os valores de 70 a 80% da espessura total da chapa, visando obter a máxima resistência a tração⁽⁵⁾.

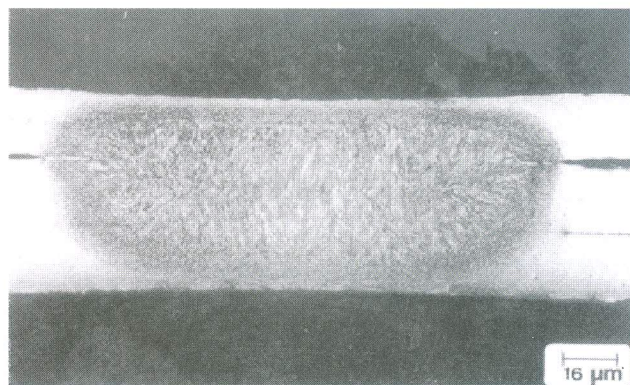


Figura 2: Micrografia ótica da seção transversal da ZF - amostra nº 12

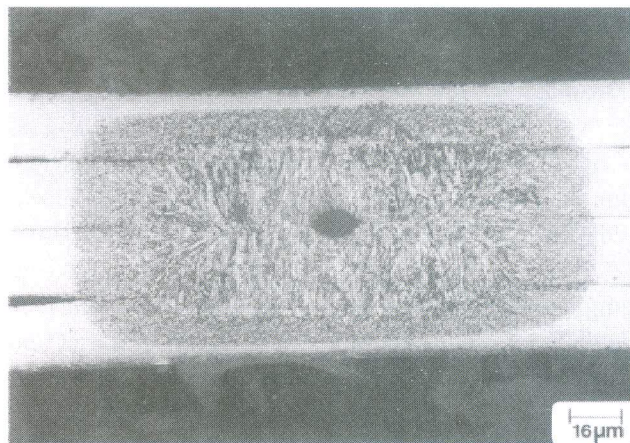


Figura 3: Micrografia ótica da seção transversal da ZF - amostra nº 12

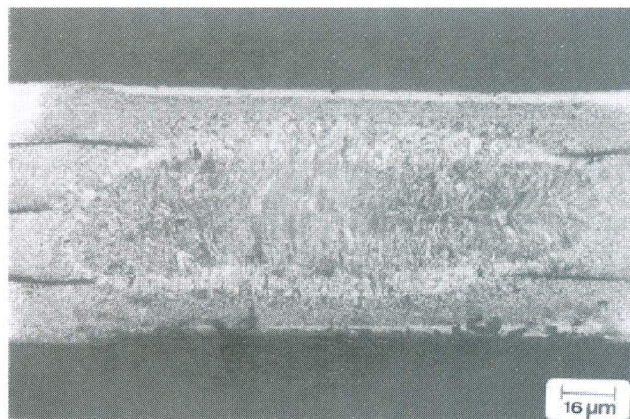


Figura 4: Micrografia ótica da seção transversal da ZF - amostra nº 24



Figura 5: Micrografia ótica mostrando ZF com poro, ZAC e MB (região superior)

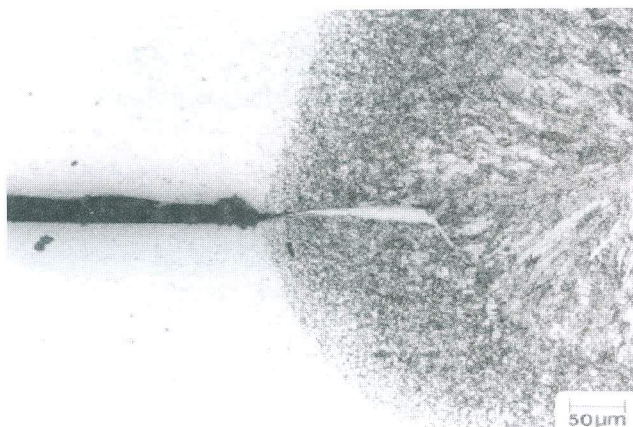


Figura 6: Micrografia ótica da ZF, ZAC e MB

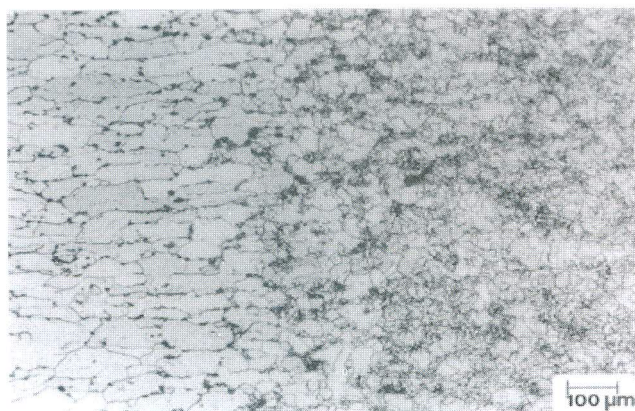


Figura 7: Micrografia ótica da interface ZAC e MB

A zona de fusão apresentou uma morfologia colunar e refinada, devido a elevada velocidade de resfriamento, conforme observado nas figuras 2 a 6. A microestrutura desta região era basicamente, composta por uma matriz ferrítica.

Observou-se em algumas amostras, a existência de poros na ZF, vide figuras 3 e 5. A presença dos poros deveu-se a dificuldade de saída dos vapores, originados durante a soldagem. A utilização de eletrodos com ponta plana dificultou a expulsão da resina. A geometria levemente convexa da ponta do eletrodo contribuiu para diminuir a formação de poros na ZF, pela facilidade em expulsar a resina e os vapores gerados na soldagem.

Durante a soldagem, os grãos do MB próximos a interface sólido-líquido, sofreram transformações originando a Zona Afetada pelo Calor (ZAC), vide figura 7. Esta região, que era composta por uma matriz ferrítica foi transformada para austenita, devido ao aquecimento provocado pela solda. No resfriamento, a ZAC reverteu a fase ferrítica, originando a presença de martensita ou carbonetos, que dependia da velocidade de resfriamento local.

A microestrutura do MB, fora da ZAC, conservou suas características originais, isto é, grãos de ferrita, com a presença de carbonetos e inclusões. Os grãos estavam alongados mostrando uma textura proveniente do processo de laminação a frio sofrido pelo MB. Os valores de microdureza mostraram que o MB após laminação sofreu recozimento

O perfil típico da microdureza Vickers em função da distância está mostrado na figura 8. Observou-se uma queda da microdureza no centro da ZF, em relação às extremidades, devido, a diferentes velocidades de resfriamento. As regiões externas da ZF foram as primeiras a solidificar e portanto, apresentaram maiores valores de microdureza. A dimensão da ZAC estimada por microdureza variou de 0,25 a 0,60mm, conforme mostrado tabela 2. O perfil de microdureza na ZAC foi decrescente, devido a menor velocidade de resfriamento, que ocorria no MB, em função do afastamento da ZF.

Os resultados obtidos nos ensaios de amortecimento de vibração e ruído, com base na norma ASTM E 756-93, apesar de iniciais, mostraram que o fator de amortecimento das chapas VDS é superior as chapas de aço soldadas, sem a presença do polímero, apesar da queima da resina nas regiões próximas a solda. Outra informação que deve ser extraída do teste é a determinação do local, onde os pontos de solda deverão ser realizados, com o objetivo de oferecer uma estrutura soldada com maiores propriedades de atenuação.

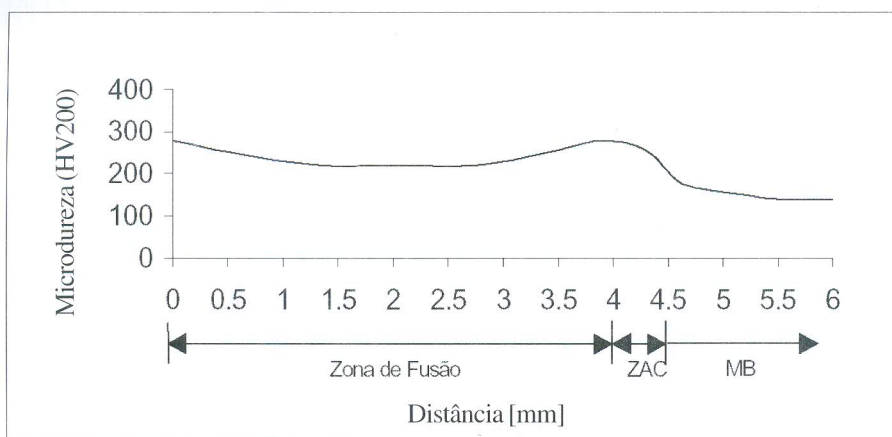
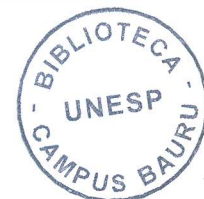


Figura 8: Perfil de microdureza Vickers X Distância

CONCLUSÕES

A resina deve ser fundida e expulsa nos instantes iniciais de soldagem das chapas VDS. Observou-se ainda que o tempo de exclusão da resina é diretamente proporcional a corrente que passa pelo circuito adicional.

A influência dos parâmetros (corrente e tempo) na soldagem das chapas VDS, usando o circuito adicional, mostrou um comportamento semelhante ao das variáveis de soldagem para as chapas de aço AISI 1008.

O tempo mínimo de soldagem das chapas VDS é superior ao utilizado em aços soldados sem aplicação de resina.

A ponta do eletrodo deve apresentar uma geometria levemente convexa para facilitar a expulsão da resina e diminuir a possibilidade de poros na zona de fusão.

A utilização do circuito adicional propiciou que a soldagem das chapas VDS apresentasse propriedades mecânicas e características microestruturais similares, as obtidas nas juntas dos aços AISI 1008.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas, IBMS – Equipamentos Industriais Ltda e Waytec Eng^a. Com. Ltda, respectivamente, por cederem suas instalações para a realização das soldas e os ensaios de atenuação sonora. Os autores agradecerem ainda, ao técnico Daniel Fioravante Peixoto do LPT do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

BIBLIOGRAFIA

1. Akeda, Y.; Shimozaki M.; Kobayashi, S.; Hosoda, H.; Furukawa, K.; Resin Composite Type Vibration Damping Steel Sheet – Kawasaki Steel Report, (27), 1992, p.59-61
2. Vydra, E.J.; Composite for Noise Reduction, Automotive Body Materials – Proceedings of 1st International Body Engineering Conference, 1993, Detroit-Michigan, p.79-80
3. Muroga, O.; Nishimoto, A.; Watanabe Y.; Fujii Y.; Yamazaki Y.; Kabasawa M.; Properties of VDS and its Application - NKK Technical Review (57), 1989, pp.1-8
4. Wang, P. C.; Fridrich, R. J.; Effect of Thermal Aging on Damping Properties of a Resistance Spot-Welded Acrylic-Cored Laminated Steel – Weld. Journal (1997), p.421s-430s
5. Metals Handbook - Welding, Brazing & Soldering, ASM, (6), 9^a Edition, 1983.
6. Nishimoto, A; Watanabe, Y.; Fujii, Y.; Kabasawa, S.; Matsuda, Y.; Weldable Vibration VDSNKK Technical Review (53), 1988, p.10-18
7. Kabasawa, M.; Matsuda, Y.; Fujii, Y.; Core Resin Exclusion Phenomena in Spot Welding of VDS Sheets by Providing Shunting Circuit- NKK Technical Review, (2), (1996) p.285-291
8. AWS C.1.1. – Section V – Standard Methods for Testing Resistance Welding, American Welding Society, 1996, p.77-112
9. ASTM E756-93 – Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, American Society for Testing & Materials (04.06 – Section 4), 1995, P.774-780