

ESTUDO DE UM CRITÉRIO DE MODO DE FALHA PARA SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA

Douglas Criado Ruiz

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508.900 São Paulo – SP douglas.ruiz@poli.usp.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508.900 São Paulo – SP gilmar.batalha@poli.usp.br

Resumo: Este trabalho se baseia na aplicação de um critério do modo de falhas para pontos de solda por resistência que permita o cálculo do diâmetro mínimo do ponto, indicando de maneira confiável a ocorrência da falha na área ao redor e próxima ao ponto, chamada de zona termicamente afetada (ZTA). Desenvolve-se o modelo de VandenBosche⁽¹⁾, e os resultados obtidos pelos testes então comparados aos encontrados no artigo original, tornando possível a determinação de uma analogia entre as propriedades da solda e a influência dos seu parâmetros.
Palavras-chave: Solda a ponto, tensão de cisalhamento, diâmetro de solda, espessura de chapa.

1. INTRODUÇÃO

A solda a ponto por resistência é amplamente usada na indústria automobilística, em virtude da simplicidade, fácil controle e menor investimento, com o produto de qualidade e resistência satisfatórias. Exemplo: um automóvel possui cerca de 4500 pontos de solda, alguns metros de solda MIG/MAG e em alguns casos, cordões ou pontos Laser. A Figura 1 mostra as tendências no uso das diversas técnicas de junção de carrocerias no decorrer das últimas décadas. Pode ser visto um aumento no uso da junção por conformação (clinch) - Figura 2a, em parte pelo crescente uso de chapas de alumínio. Não obstante um decréscimo da importância da solda a ponto resistiva - Figura 2b, em virtude de suas características e qualidade ela ainda é dominante na indústria automotiva.

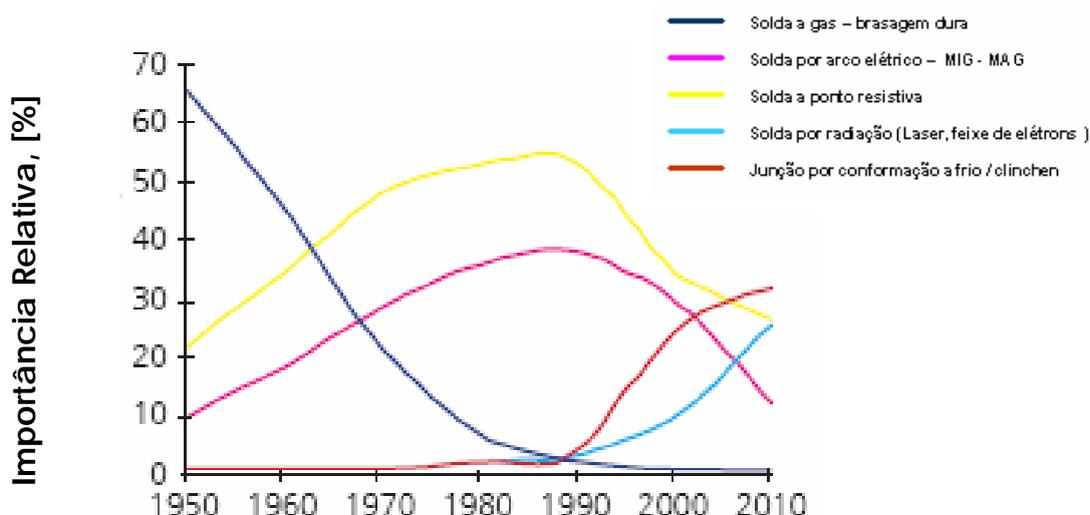


Figura 1 – Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas produzidas em série, sem considerar peculiaridades especiais de construção tais como tipo de carrocerias: estrutura monobloco em aço, “space-frame” em liga de alumínio ou peças com concepção multi-material⁽²⁾.

O uso da solda a laser - Figura 2c - vem aumentando, com empresas já visualizando produtos com cerca de 20 a 30 metros de solda. A figura 1 permite visualizar a solda a laser também substituindo a solda MIG/MAG, e confirma algumas empresas considerando a solda a laser substituindo a solda a ponto resistiva, como uma evolução difícil de ser evitada ⁽²⁾. Uma das vantagens da solda a laser é o fato dele não necessitar acesso pelos dois lados da peça, o que implica na diminuição do número de reforços da carroceria para uma mesma resistência, já que as peças não possuem aberturas ou furos para o acesso da máquina de solda; diminuindo-se o número de peças tem-se a diminuição do peso da carroceria. A resistência e o modo de falhas de um ponto de solda são caracterizados como funções principalmente da espessura das chapas, resistência mecânica do metal, diâmetro do ponto aplicado e do modo de aplicação das cargas sobre esse ponto.

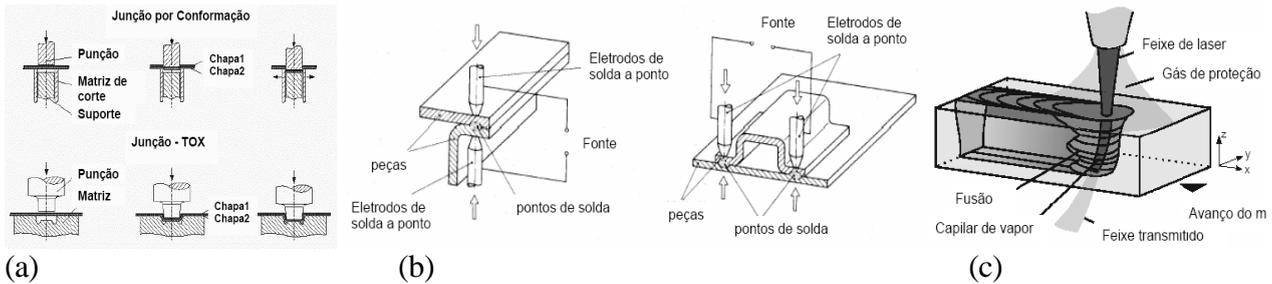


Figura 2 – Técnicas de junção de carrocerias automotivas (a) solda sob pressão por conformação; (b) solda sob pressão resistiva com acesso pelos dois lados; (c) solda sob pressão resistiva com acesso a apenas um dos lados.

2. ESFORÇOS ATUANTES NA JUNTA SOLDADA

O modo de falha de um ponto de solda é influenciado tanto pela mecânica da junta quanto pela metalurgia do material. Desse modo é possível relacionar o diâmetro do ponto de solda, a resistência do metal base e da solda e a espessura da chapa com o modo de falha, conforme VandenBossche. É aplicada uma força F nas extremidades, sem que existam momentos de dobramento, e caso o valor de F seja pequeno, o equilíbrio requer que a linha da força passe pelo centro das extremidades e da solda. Aumentando-se F , ocorrem distorções elásticas e plásticas, causando a rotação das chapas, chamado de rótula plástica, onde um pequeno volume de metal ao longo da linha de solda alcança o limite de escoamento, agindo como uma rótula e permitindo a rotação da solda, conforme mostrado na Figura 3a.

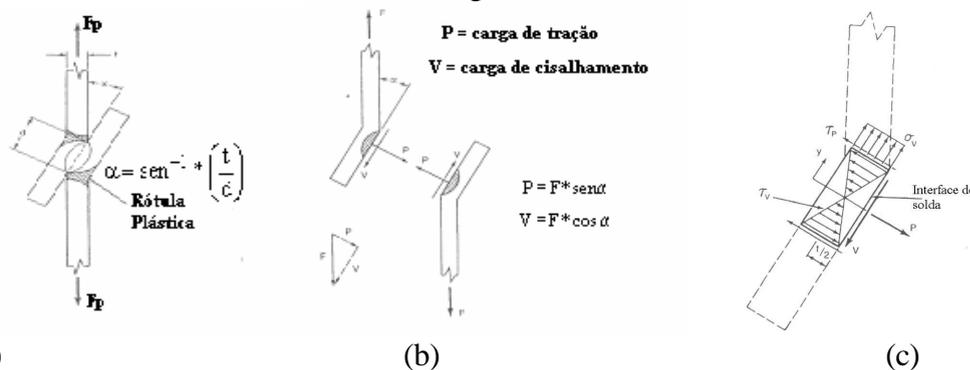


Figura 3 – (a) Rotação na solda durante aplicação da força de tração; (b) Diagrama das forças atuantes nos corpos ;(c) Distribuição de tensões ⁽¹⁾

F_p = força aplicada que resulta na rótula plástica

$$P = \text{carga de tração} \quad P = F * \text{sen} \alpha \quad (1)$$

$$V = \text{esforço cortante} \quad V = F * \text{cos} \alpha \quad (2)$$

$$\alpha = \arcsen \frac{t}{d} \quad (3)$$

2.1 Análises das Tensões na Área de Solda

O modo de falha depende das tensões na interface de solda e na ZTA. Os dois níveis podem ser comparados através do critério de Von Mises ⁽³⁾ para o cálculo da tensão equivalente, que é então comparada com as tensões requeridas para falhar. O primeiro passo para a determinação da tensão na interface é construir um diagrama das forças atuantes nos corpos (Figura 3b), com a decomposição das forças em carga de tração e carga de cisalhamento. De acordo com VandenBossche, a tensão equivalente na interface da solda, considerando a relação $0 < t/d = 1/3$, é:

$$\sigma_{el} = \frac{3 * F}{d^2} \quad (4)$$

Para a ZTA, o cálculo é mais complexo. Se a solda falha na ZTA, um certo volume de metal é empurrado para fora de uma ou das duas chapas, com a forma aproximada de um cilindro, conforme foi utilizado nos cálculos, e mostrado na Figura 3c. Feitos os cálculos, temos que:

$$\sigma_{eZTA} = \frac{S_{yPM} * w * t}{2 * d^2} * \left(\frac{d}{t} + \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

Onde: S_{yPM} é o limite de escoamento para o metal base.

2.2 Critério de falhas

Foi feita uma análise teórica em um ponto de solda em junta de sobreposição carregada em cisalhamento. Como resultado das correlações com o desempenho observado e pontos de solda nesse tipo de junta, o diâmetro mínimo requerido para falha na ZTA é função da resistência do metal, espessura e largura da junção. Isso pode ser descrito pela relação diâmetro-espessura:

$$\frac{d}{t} = \left(0,54 * \frac{S_{yPM}}{1,54 * S_{yPM} + 572 \text{ MPa}} * \frac{w}{t} \right)^{\frac{1}{2}} + 3,0 \quad (6)$$

A carga limite de falha para a solda é determinada pela relação: $L = \frac{S_{yPM} * w * t}{2}$ (7)

Para aços baixo carbono, os tamanhos dos pontos têm sido classificados com base apenas na espessura do metal, como exemplo, o uso de $d=3*t-1,5$ mm, recomendado pela AWS ⁽⁴⁾. Caso seja necessário manter-se um modo de falha dúctil como característica essencial da solda, então as soldas em aços de alta resistência devem ser feitas de acordo com um critério que contemple a influência da resistência do metal base. Uma relação como o mínimo d/t desenvolvida por VandenBossche deve ser utilizada. Os pontos de solda feitos de acordo com um mínimo d/t irão requerer necessariamente um aumento nos parâmetros de solda primários diretamente proporcionais ao quadrado do aumento desejado no diâmetro da solda. O aumento necessário na corrente de solda e força para garantir uma solda mais forte e falhas dúcteis implica também em diversas vantagens:

- As soldas atendem as características de resistência do metal base, resultando em aumento da eficiência da junta e permitindo uma redução do número de pontos para uma dada carga;
- Soldas que falham na ZTA podem absorver maiores níveis de energia que aquelas que falham na interface. Isso pode ter efeitos significativos no desempenho sob cargas de impactos;
- Pontos de solda em aços de alta resistência são historicamente melhores que aqueles em aços carbono para aplicações de fadiga; o aumento no diâmetro da solda resultará em diminuição da tensão da solda e aumento do limite de resistência.
- A relação mínima d/t produz um meio confiável de especificar o tamanho da solda nas juntas com diversas combinações de materiais e espessuras.
- Dispondo-se de meios para garantir modos de falhas aceitáveis para pontos em qualquer tipo de aço de alta resistência, os problemas de compras e controle de materiais podem ser eliminados.

Finalmente, não são necessárias técnicas especiais (ex.: ajustes dos tempos de aperto) ou processos alternativos (como solda a arco) para a montagem de componentes feitos com aços de alta resistência.

3 FATORES E VARIÁVEIS QUE AFETAM A QUALIDADE DA SOLDA ⁽⁵⁾

O controle da qualidade de um processo de solda por resistência ⁽⁵⁾ é baseado na capacidade da máquina repetir resultados sob condições controladas. Essa característica e esses requisitos para se manter o controle das situações sob as quais as máquinas operam formam os maiores problemas no controle da qualidade. Podem ser destacados vários fatores que ocorrem durante a produção e que influenciam a qualidade da solda. É muito importante o entendimento desses fatores e seu efeito na qualidade por parte da produção, manutenção, engenharia de manufatura e controle de qualidade.

3.1 Pressão e Força

O sistema de pressão de uma máquina de solda é normalmente pneumático ou hidráulico. Em ambos os casos, a força de solda é gerada pela pressão de um cilindro, cuja haste está diretamente ligada ao eletrodo móvel. O efeito de uma força imprópria pode ser ilustrado com base na equação de calor usada na solda por resistência: $Q=I^2 \cdot R \cdot t$. Baixa força causará o aumento da resistência (fator R) e essa alta resistência gerará mais calor, efeito negativo da expulsão do metal, solda porosa, baixa vida do eletrodo e solda de baixa resistência.

3.2 Condições do Eletrodo e Geometria

A programação completa de uma solda inclui a forma e geometria recomendada do eletrodo. A perda da forma pode acarretar efeitos desastrosos na qualidade da solda. A área real de contato do eletrodo no material a ser soldado determinará a densidade da corrente de solda e a densidade da força do eletrodo, ou pressão. É de extrema importância o uso total da área de contato, e por isso os eletrodos devem ser afiados cada vez que uma alteração na sua forma for detectada. Essa afiação pode ser manual ou automática, dependendo da aplicação. Uma alternativa para essa afiação é o aumento da corrente e/ou tempo da solda, conforme o diâmetro aumenta. Alguns sistemas aumentam a corrente e/ou tempo automaticamente, mas não afetam nem compensam a diminuição da área do eletrodo e os problemas decorrentes disso.

3.3 Aumento da Resistência e Reatância no Circuito Secundário

Os componentes que carregam a corrente no circuito secundário devem ser mantidos em boas condições para minimizar suas quedas de voltagem individuais. Se o componente é refrigerado à água ou são utilizados cabos, deve ser mantido o fluxo de água adequado, assim como a sua temperatura de entrada. O aumento de temperatura aumentará a resistência do sistema, resultando em baixa corrente de solda no eletrodo. Na troca dos cabos, é necessário utilizar peças de mesma especificação e dimensões; cabos mais longos terão mais resistência e maior reatância indutiva, o que diminui a corrente de solda. Uma boa maneira de minimizar os problemas de qualidade de solda é através de pessoal treinado, com conhecimento do processo de solda e do equipamento, executando sempre a manutenção periódica conforme programado.

4. DESCONTINUIDADES NA SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA ⁽⁴⁾

A qualidade requerida da solda depende da sua aplicação, e pode ser afetada pela composição química, condição do metal base, projeto da junta e das peças, condição dos eletrodos e equipamentos de solda. Em alguns casos, a solda deve atender requisitos mínimos de uma especificação em particular (aviões e veículos espaciais), e em outras podem ter normas para soldas satisfatórias, como permitir uma porcentagem de defeitos (automotiva, por exemplo). Os testes destrutivos são pouco confiáveis para a solda a ponto, e os usos de corpos de prova têm limitações. Os requisitos de projeto devem incluir aparência superficial, resistência mínima, etc.

Tais requisitos devem ser monitorados por um sistema de controle de qualidade, incluindo inspeção visual e exame destrutivo da solda. Os fatores críticos da qualidade da solda são: aparência superficial, tamanho da solda, penetração, resistência e ductilidade, descontinuidades internas, separação de chapas e expulsão de material e consistência da solda.

4.1 Aparência Superficial

Não é uma indicação infalível da resistência ou tamanho da solda. É uma indicação das condições sob as quais a solda foi feita. Por exemplo, um grupo de pontos de solda em uma junta deve ter as mesmas aparências. Entretanto, a segunda e as sucessivas soldas podem ter um menor tamanho em virtude da fuga de corrente para os pontos já soldados (shunting).

4.2 Tamanho da Solda

O diâmetro ou largura da zona de fusão deve atender a uma determinada especificação ou critério de projeto. Na destes requisitos, pode-se considerar que pontos de solda feitos em condições normais devem ter um mínimo de 3,5 a 4,0 vezes a espessura mais fina. Há um limite máximo do tamanho do ponto, baseado nas limitações econômicas e nas leis da geração e dissipação de calor, mas o tamanho máximo do ponto é difícil de ser especificado. A tabela 1 abaixo mostra os principais tipos, as causas e os efeitos de algumas condições indesejadas na solda.

Tabela 1 – Relação causa – efeito para as falhas na solda resistiva a ponto de chapas

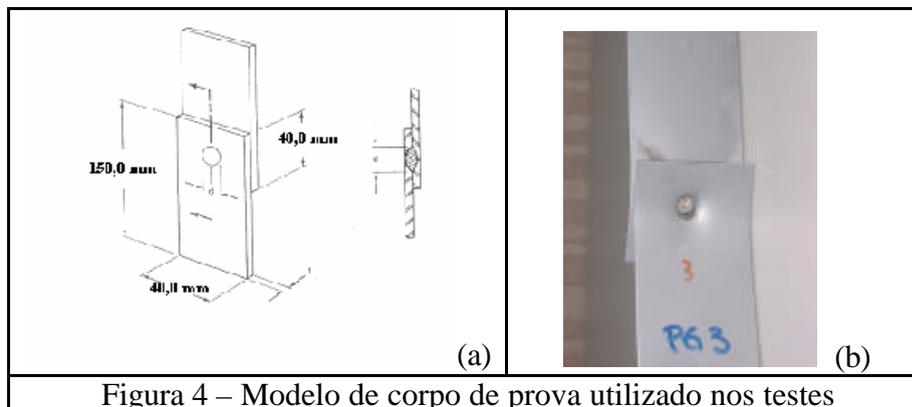
	Tipo de Falha	Causas	Efeitos
1	Endentação profunda do eletrodo	Montagem incorreta dos eletrodos e falta de controle da força, geração excessiva de calor (alta resistência de contato ou baixa força no eletrodo);	Perda da resistência da solda devido à redução da espessura do metal na periferia da área de solda, má aparência;
2	Fusão superficial, (seguida de endentação)	Sujeira no metal, baixa força nos eletrodos, alta corrente de solda, montagem incorreta dos eletrodos, seqüência imprópria de corrente e pressão;	Soldas pequenas devido à expulsão do metal fundido, grande cavidade na zona de solda, aumento do custo de remoção das rebarbas, baixa vida do eletrodo , perda de produção (troca dos eletrodos);
3	Solda com formato irregular	Desalinhamento do trabalho, montagem incorreta dos eletrodos, mau contato entre as chapas;	Resistência reduzida da solda devido às mudanças na área de contato e expulsão de material;
4	Depósito de eletrodos na peça	Sujeira no material, baixa força no eletrodo ou alta corrente de solda, manutenção imprópria do eletrodo, material impróprio do eletrodo;	Má aparência, redução da resistência à corrosão, redução da resistência da solda (expulsão de material), redução da vida do eletrodo;
5	Trincas e cavidades profundas	Remoção da força dos eletrodos antes do resfriamento da solda, geração excessiva de calor resultando na expulsão de metal fundido;	Redução da resistência à fadiga (caso exista tensão na solda ou imperfeições na periferia da área soldada, aumento da corrosão);

5.3 Profundidade de Fusão⁽⁶⁾

Profundidade de fusão é a distância na qual o botão de solda penetra nas peças que estão em contato com os eletrodos. A profundidade mínima de fusão é aceita em geral como 20 % da espessura da chapa mais fina. Se for menor que 20 %, a solda é chamada “solda fria”, pois o calor gerado foi baixo. Variações normais na corrente, tempo e força dos eletrodos causarão alterações indesejáveis na resistência da solda fria. Em casos extremos não há a formação do botão de solda. A profundidade de fusão não deve exceder 80 % da espessura da chapa mais fina, o que resultaria em endentação excessiva e expulsão do material.

6. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Foram feitas doze peças – Figura 4 – para serem utilizadas como corpos de prova, com dimensões baseadas nas definidas por Zhou et al ⁽⁷⁾, conforme mostrado abaixo.



Com isso, até o momento foram ensaiados seis corpos de prova em máquina de solda a ponto portátil, tipo “pinça”, e do tipo *transgun* (possui o transformador de solda incorporado, neste caso de corrente contínua - conhecido como média frequência). O material utilizado nos testes foi aço com revestimento *galvanneal* (zinco – ferro) nas duas faces, espessura de 0,65 mm, especificação BGA OL 45A45A GMB EMS 1508 BH, conforme tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da chapa de aço 180 BH

Tipo	Lim. Escoamento (MPa)		Lim. Resist. Tração (MPa)	Alongamento Min. (%)				Anisotropia \bar{r} min.	Expoente de Encruamento \bar{n} min.	BH (MPa) $\epsilon = 2\%$ após estufa Mínimo.
	$t < 0,9\text{mm}$	$t = 0,9\text{mm}$		$t = 0,6\text{ mm}$		$t = 0,6\text{ mm}$				
				Lo=50 mm	Lo=80 mm	Lo=50 mm	Lo=80 mm			
180 BH	180 - 240		300 mín.	33	31	34	32	1,6	0,17	33

Os corpos de prova foram soldados com dois programas de solda, com os parâmetros abaixo mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Programas de soldagem

Programa de solda 1		Programa de solda 2	
Pré-pressão	700 ms	Pré-pressão	650 ms
1ª solda	280 ms / 4,0 kA	1ª solda	300 ms / 4,0 kA
1º resfriamento	0	1º resfriamento	0
Ramp-up	20 ms / 3,0 kA	Ramp-up	20 ms / 3,0 kA
2ª solda	300 ms / 10,0 kA	2ª solda	220 ms / 10,0 kA
Ramp-down	20 ms / 3,0 kA	Ramp-down	20 ms / 3,0 kA
2º resfriamento	0	2º resfriamento	20 ms
Força aplicada	2800 N	Força aplicada	3500 N

Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração das juntas soldadas conforme norma ABNT

CP	Progr.de Solda	Esp. [mm]	Largura [mm]	Área [mm ²]	Along.de ruptura [mm]	Carga de Escoam. [N]	Limite de Escoam. (0,2%) Mpa	Carga Max. [N]	Tensão Máx. MPa	Módulo Gpa
1	1	1,4	6,8	9,52	-	4175	439	5123	538	100
2	1	1,4	6,8	9,52	3,69	4317	453	5280	555	93
3	2	1,4	6,8	9,52	3,09	4473	470	5206	547	118
4	2	1,4	6,8	9,52	-	4282	450	5062	532	113
5	3	1,4	6,8	9,52	2,36	4474	470	5051	531	123
6	3	1,4	6,8	9,52	2,41	4453	468	5068	532	123
M					2,89	4362	458	5132	539	112
s					0,63	124	13	93	10	13

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração estão mostrados na figura 5.

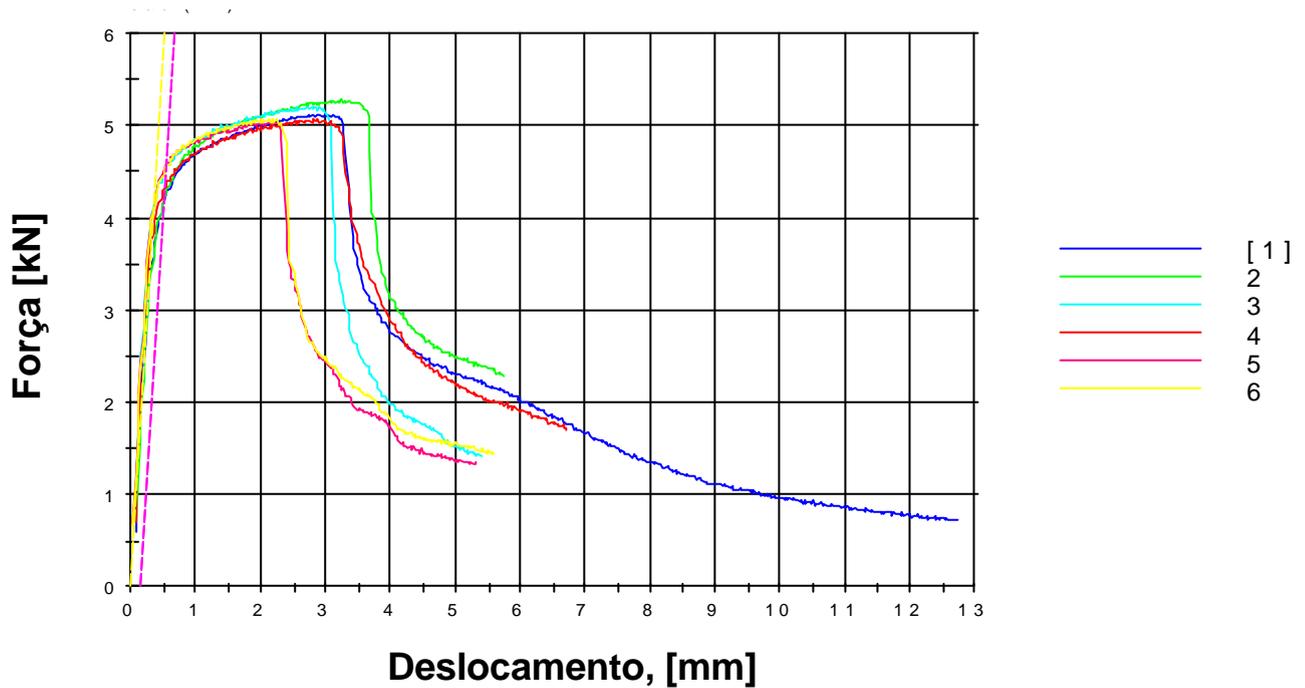


Figura 5 – Curva força deslocamento para os ensaios realizados

7.2 Modelo preditivo da tensão de escoamento da solda em função do diâmetro e espessura

Os resultados da comparação entre os dados experimentais deste estudo e os da referência (1), e sua comparação com o desempenho predito para o metal de solda pelo modelo podem ser vistos na Figura 5.

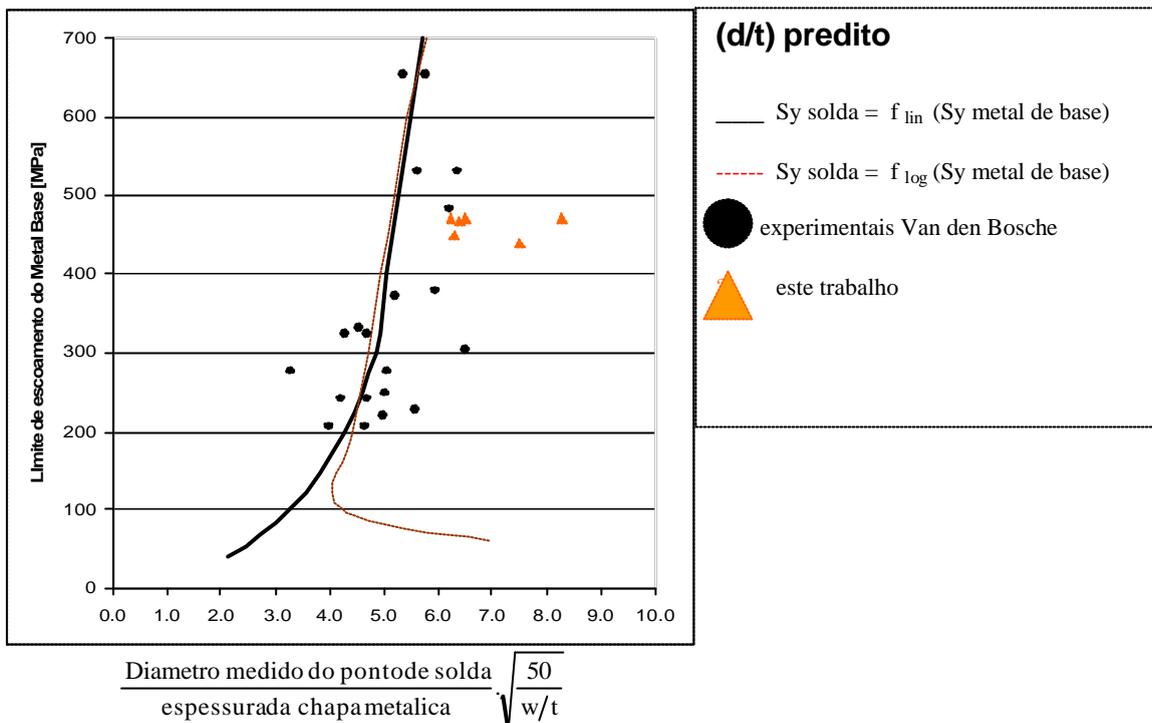


Figura 6 – Comparação entre os dados experimentais e o desempenho predito pelo modelo.

Os resultados desse trabalho inseridos na Figura 6 mostram coerências, já que os valores no eixo da correlação entre o diâmetro medido do ponto de solda / espessura da chapa são maiores que os do trabalho original, e têm sua explicação na pequena espessura das chapas utilizadas e dos parâmetros propositalmente altos utilizados.

7.3 Modelo preditivo da relação diâmetro-espessura medida em função da predita

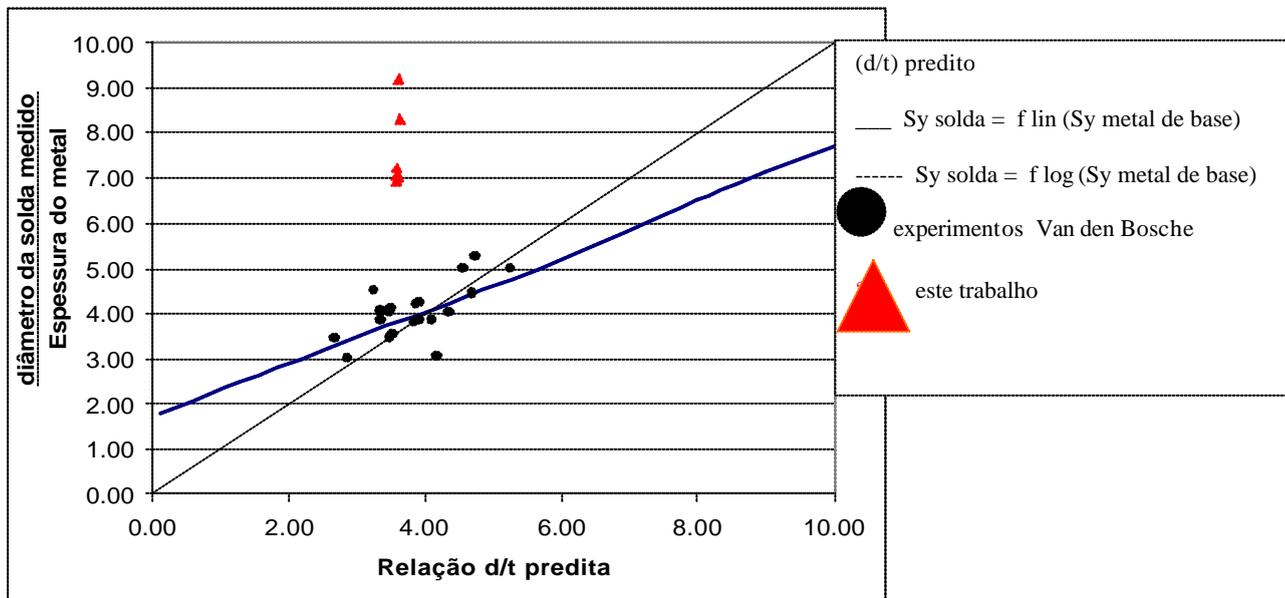


Figura 7 – Comparação entre os a relação d/t predita e a medida nos testes

Do mesmo modo, o posicionamento dos resultados na Figura 7 nos indica que, apesar de maiores que os mostrados no modelo, são coerentes na relação d/t predita, o que reforça a veracidade do modelo.

7.4 Modelo preditivo da carga de falha do ponto de solda medida em função da predita

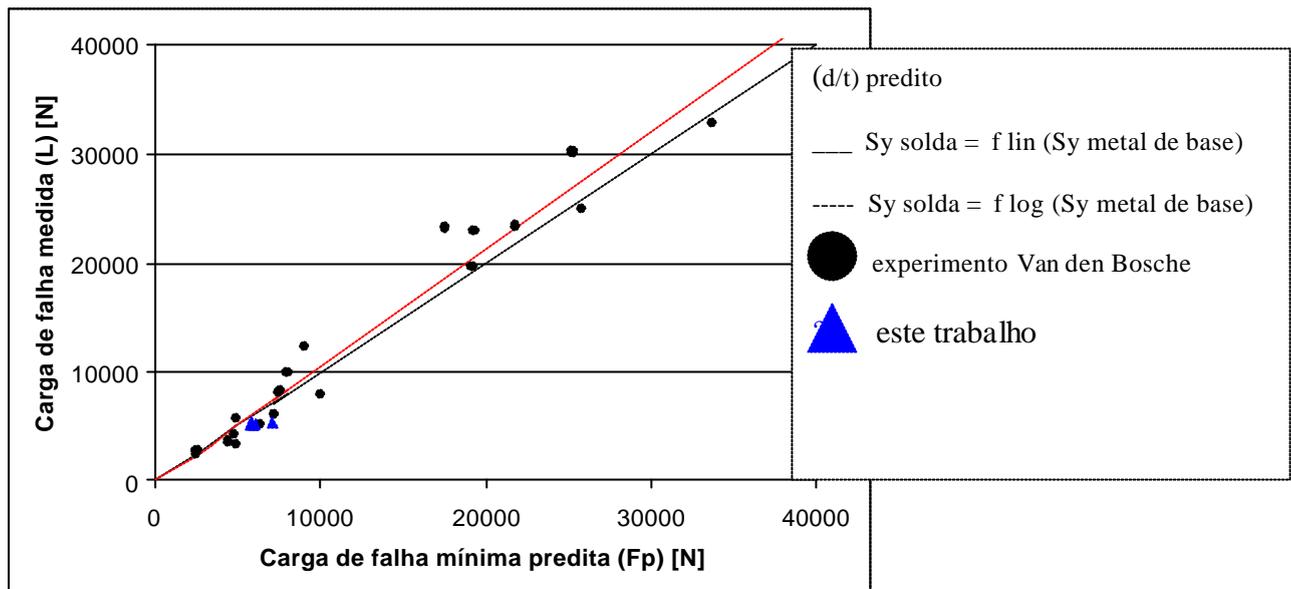


Figura 8 – Comparação entre a carga de falha mínima predita e a medida nos testes.

A carga de falha medida nos corpos de prova desse trabalho foi muito próxima daquela conseguida pelo modelo para uma espessura de chapa similar (0,64 mm), indicando que o modelo predito por VandenBossche se ajusta ao material e às condições em que realizamos os testes.

8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Considerando os ensaios realizados e modelagem dos resultados usando os critérios de falha estudados para o material e as programações de soldagem empregadas podem ser tomadas as seguintes conclusões, adicionais aos comentários já feitos no texto quando os valores desse trabalho forma inseridos nas Figuras 6, 7 e 8:

1. Pode ser visto na Figura 4 (e foi observado nos outros corpos de prova) que a falha ocorreu na Zona Termicamente Afetada, conforme previsto pelo modelo. Tal fato indica a funcionalidade do modelo, uma vez que os diâmetros medidos dos pontos de solda são maiores que os mínimos calculados através das fórmulas do modelo; isso realmente direcionou a falha da solda na ZTA.
2. Novos testes deverão ser feitos com chapas de diferentes espessuras, acabamentos e parâmetros de solda, para efeito de comparação entre o modelo e o trabalho.

De qualquer maneira, podemos concluir com base nos os resultados conseguidos até o momento que o modelo permite variações nas condições do ensaio, sem que sua funcionalidade seja afetada.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Jose A. Castillo – General Motors do Brasil, ao Prof Roberto Bortolussi e a Eng. Aline Szabo Ponce.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VandenBossche, D. J., 1977. Ultimate strength and failure mode of spot-weld in high strength steels. SAE Technical Paper n° 770214, Society of Automotive Engineers, Warren dale, PA.
- (2) Relatório 2003 do IWU – Fraunhofer Institute –Chemnitz, Alemanha.
- (3) Polakowski, N. H & Ripling, E.J. “Strength and Structure of Engineering Materials”, Englewood Cliffs, N.J.; Prentice-Hall, 1966.
- (4) Welding Handbook – Section 2, American Welding Society publication, Fifth edition, P. 30-47, New York, N.Y., 1963.
- (5) Resistance Welding Manual, Fourth edition, RWMA- Resistance Welding Manufacturer’s Association, Cap.24, P.1 – 27, 1989.
- (6) Welding Handbook, 8th ed., V.1, American Welding Society – Welding Technology, 1987.
- (7) Zhou, M., Hu, S.J. & Zhang, H., Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets, setembro 1999.

STUDY OF FAILURE MODE CRITERIA FOR RESISTANCE SPOT WELDS

Douglas Criado Ruiz

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508.900 São Paulo – SP douglas.ruiz@poli.usp.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508.900 São Paulo – SP gilmar.batalha@poli.usp.br

Abstract: *This work aims the statement of a failure mode criteria for resistance spot welds that allows for the computation of the minimal spot diameter, pointing in a reliable way the failure occurrence at the area around and near the spot, the so called Heat affected zone (HAZ). The modeling is based on the criteria proposed by VandenBossche. Some preliminary results are compared with former results of other authors, making possible the determination of relationship between the properties of resistance spot welds and their geometric features.*

Key words: *resistive spot-weld, shear strength, sheet metal, thickness.*