

# DESENVOLVIMENTO DE CRITÉRIO DE FALHA DE SOLDA A PONTO PARA A MONTAGEM DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS

## Douglas Criado Ruiz

General Motors do Brasil. CT, Avenida Goiás, 2769, 09550-900, S. Caetano do Sul – SP – Brasil  
Fone: 00 55 11 4234-6132 – e-mail: [douglas.ruiz@gm.com](mailto:douglas.ruiz@gm.com)

## Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Depto de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508.970 São Paulo – SP-BRASIL. Fone 00 55 11 30915763 - e-mail: [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Resumo:** *O trabalho se baseia na aplicação de um critério do modo de falha de Vandenbossche para pontos de solda por resistência que permita o cálculo do diâmetro mínimo do ponto, indicando de modo confiável a ocorrência de falha na ZTA em cargas de cisalhamento. Foram estudados modelos (AWS 1995, ISO 2004), em aços BH revestidos com galvanneal. Tais modelos têm comportamentos diferentes em relação à Vandenbossche. O modelo AWS resultou em diâmetros de pontos de solda menores que os mínimos requeridos, e assim sua utilização na indústria automotiva não é recomendada. O modelo da ISO atende os requisitos para algumas espessuras na condição  $d = 6.vt$ . Foi verificada a aplicabilidade dos parâmetros iniciais de solda de uma das tabelas de referência General Motors (WS-1, 2003), assim como atendidos os diâmetros mínimos determinados por Vandenbossche. Os diâmetros reais cobrem os valores mínimos requeridos pelos modelos.*

**Palavras chaves:** *soldagem, carroceria, montagem, parâmetros de solda, lentilha de solda.*

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Colocação do problema

A Engenharia de Manufatura pode ser dividida em Estamparia, Funilaria, Pintura e Montagem Final. Este trabalho foi concentrado na área de Funilaria, onde as peças metálicas são posicionadas em dispositivos e soldadas entre si formando subconjuntos (ex.: longarinas, cofre). Os subconjuntos são soldados formando conjuntos (ex.: assoalho, laterais) que por sua vez formam a carroceria. Na realização da solda podem ser utilizados diversos processos, como solda por resistência, solda a LASER e solda a arco (MIG/MAG). Dentre esses processos a solda a ponto por resistência é o mais utilizado em virtude da simplicidade (Ruiz & Batalha, 2004), facilidade de controle e menor investimento necessário, resultando em um produto com qualidade, conforme mostrado na Figura 1. Para exemplificação, um automóvel possui cerca de 4.800 pontos de solda, diversos cordões de solda MIG/MAG e em casos específicos cordões ou pontos de solda a LASER (Figura 2). A Figura 3 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), em parte pelo crescente uso do alumínio. Não obstante, um decréscimo da importância da solda a ponto resistiva, em virtude de suas características, ela ainda é dominante na indústria automotiva.

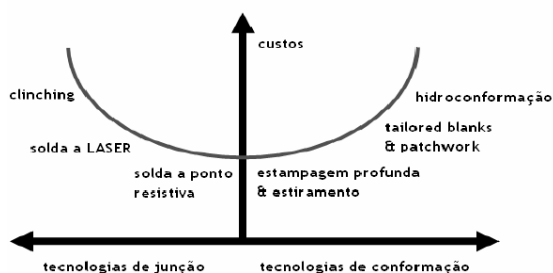


Figura 1 Comparação das novas tecnologias de junção de carrocerias (Standing 2004)

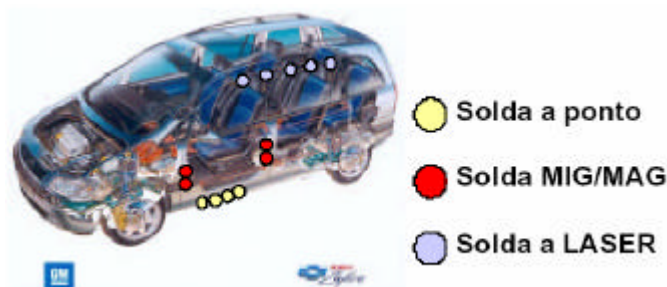


Figura 2 –soldas em uma carroceria (GM, 2004)

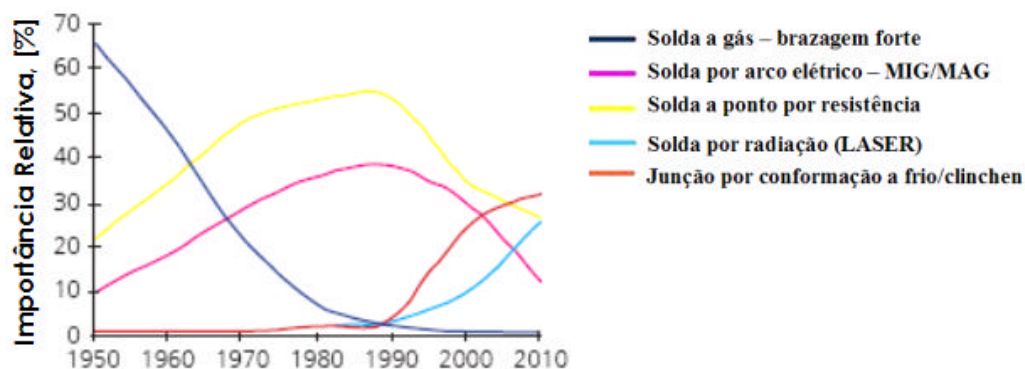


Figura 3 – Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas (IWU, 2003).

Chao, (2003) apud Ruiz & Batalha (2004), a resistência e o modo de falhas de um ponto de solda são caracterizados como funções da espessura das chapas, resistência mecânica do material, diâmetro do botão e modo de aplicação das cargas sobre esse ponto. De maneira análoga, à simulação virtual – a grande dificuldade em se determinar um critério com essa finalidade (e que seja confiável) para a solda a ponto se deve ao grande número de variáveis envolvidas no processo. O modo de falhas de um ponto de solda, conforme Heuschkel (1952), Sawhill et al (1981) e Lin et al (2001), sob carga deveria ser indicado baseado nas condições do carregamento, propriedades do material, diâmetro do botão, espessura de chapa e parâmetros do processo.

Esse trabalho se baseia no modelo de Vandenbossche (1977), porém com materiais atuais da indústria automobilística. Foram validadas algumas linhas de uma das tabelas de referência da General Motors (2003), em aço BH (endurecível na estufa de pintura), revestimento *galvaneal*, espessura governante de 0,80 mm a 1,60 mm e os parâmetros indicados para cada situação. Foram estudados modelos que predizem o diâmetro mínimo do botão em função da espessura da chapa (ISO, 2004 e AWS 1995) e comparados ao modelo de Vandenbossche.

## 1.2 Projeto de junções soldadas

A junta soldada pode ser definida como uma montagem onde os componentes são unidos por solda, segundo a RWMA (1989). O objetivo básico do projeto é garantir que esta atenda os requisitos de funcionalidade, confiabilidade e segurança requeridas e seja capaz de ser fabricada, inspecionada, transportada e posta em trabalho com os menores custos possíveis. O cenário em que deve ser desenvolvido o projeto da junta soldada é mostrado na Figura 4 onde o projeto e o material devem resultar em peças soldadas com qualidade e segurança; o material e o processo projetados para que os materiais possam ser soldados com tecnologia e máquinas atuais. Finalmente, projeto e processo devem ser feitos de modo não sejam necessárias invenções ou soluções de altos custos. O projetista deve considerar como as decisões tomadas afetarão as operações de produção, custos de manufatura, desempenho do produto, aparência, e aceitação do consumidor. A partir dos requisitos do produto em relação ao diâmetro dos pontos de solda e sua resistência requerida, é possível a determinação do lóbulo de solda, tendo-se como limites os diâmetros críticos de expulsão (superior) e solda fria (inferior), mostradas na Figura 5.

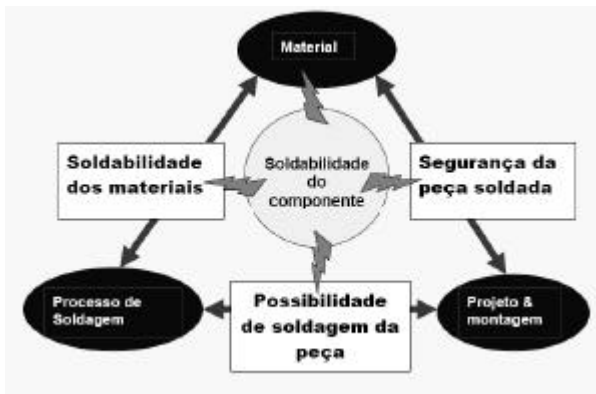


Figura 4 – Cenário dos pilares base para o projeto da junta soldada (Batalha, G.)

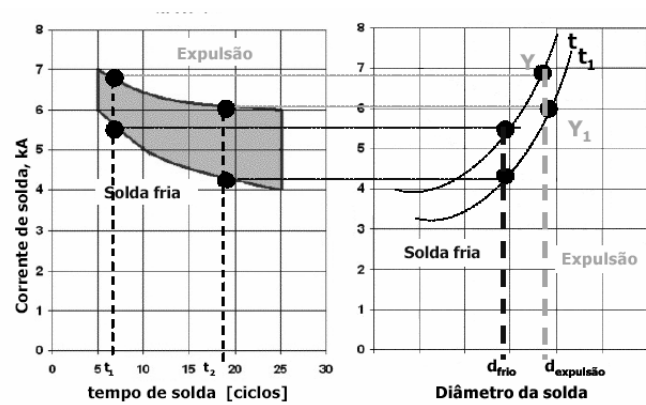


Figura 5 – Determinação do lóbulo de solda no projeto da junta soldada (Batalha, G.)

## 2. MODELAGEM DA FALHA DAS JUNTAS DE SOLDA A PONTO

### 2.1. Modos de falhas das juntas soldadas

Zhou et al (1999) estudaram os modos de falha em testes estáticos, constatando a existência de cinco diferentes modos de falhas, conforme mostrado na figura 6. Os modos A e B representam uma falha no material base, portanto é um modo indesejável, pois essas curvas poderiam ser conseguidas em um ensaio de tração comum. Esses resultados são encontrados geralmente em corpos de prova estreitos. Os modos C, D e E de falha são resultados do destacamento do ponto de solda, rasgamento da chapa na ZTA ou cisalhamento do ponto na superfície de colapso, sendo desejáveis para a maioria das aplicações da solda por resistência. Segundo Zhou et al, (1999), a dimensão que mais afeta a resistência da junta no caso de cisalhamento por tração é a largura do corpo de solda, e após uma comparação entre as normas existentes chegou-se a representação da Figura 7. Lin et al (2002) e Lin et al (2003) estudaram o comportamento do ponto de solda sob a ação de carregamentos combinados de cisalhamento e tração. Foi verificado que para um carregamento próximo ao limiar do teste de tração a falha ocorre na ZTA, ao longo da borda do botão. Para o caso do carregamento combinado (cisalhamento-tração) a falha ocorre próxima à borda do botão, na região do metal base. Mantendo-se os parâmetros geométricos, a taxa de deformação pode gerar diferentes modos de falha na junta, conhecidas como:

- Falha por rasgamento simples (*single shearing T* - modo D da Figura 6), em que o ponto de solda permanece intacto e é produzido um rasgo alongado em uma das chapas;
- Falha por cisalhamento do ponto de solda (*shear plugging P* - modo E da Figura 6), em que há a fratura do ponto de solda, e cada porção do botão permanece em uma chapa;
- Falha por rasgamento duplo (*double tearing D* - uma variação do modo D na Figura 6) que se assemelha ao rasgamento simples com a diferença de que as duas chapas são rasgadas.

Zhang et al (2001) mediram as grandezas obtidas em ensaio de tração com taxas de deslocamento próximas ao cenário de teste de impacto. Observou-se que a resistência do ponto à carga de impacto aumenta com o diâmetro do botão (Aslanlar, 2004), que a orientação do ponto tem pouca influência na forma de ocorrência da falha e que as discontinuidades totalmente internas ao botão de solda não deterioram a resistência do ponto (Markiewicz & Drazetic, 2003). Para a fadiga do ponto, Sevim (2004) mostrou que a vida em fadiga é expressa normalmente em termos de densidade de tensões, ou intensidade dos fatores de tensões.

### 2.2 Modelagem da resistência mecânica do ponto de solda

Williams & Parker (2004) destacam os seguintes fatores no desenvolvimento de um modelo: As alterações que ocorrem de maneira contínua nas áreas de contato entre os eletrodos e as chapas durante o ciclo de solda, devido à deformação dos eletrodos como consequência da força aplicada e/ou tipo de eletrodo. Esses efeitos alteram a densidade de corrente média através das interfaces,

influenciando a taxa de geração de calor; A diminuição da resistência de contato conforme se aumenta a força aplicada. Ela depende da forma dos eletrodos e de alterações na distribuição da temperatura entre eles. A distribuição da corrente nos eletrodos de solda. Combescure et al (2003). propôs uma formulação para a identificação e aplicação de modelo do comportamento a junta quando submetida a carregamento simulando uma colisão veicular. Tal modelo propõe-se a prever um tipo dúctil de falha, com o modo de rasgamento da chapa no material base ao redor do ponto de solda. Como critério de falha adotou-se uma formulação baseada na mecânica do dano, cujo comportamento do material é elasto-plástico. Lin et al (2002) investigaram as cargas de falha em pontos de solda sob condições de carregamento combinado, e os resultados experimentais mostraram que sob carga apenas de arrancamento a falha de cisalhamento ocorre na ZTA, ao longo da fronteira do botão e no caso de carregamento combinado ocorre próxima ao botão, na área deformada plasticamente do metal base. O modo de falha é expresso em função do limite de resistência do metal base, do tamanho do botão de solda, da espessura da chapa, do ângulo de carregamento e de um coeficiente empírico para um dado programa de solda.

Após uma análise do limite inferior de carregamento para investigar os efeitos da combinação da carga, da espessura da chapa e do raio do botão de solda na falha foi proposta uma fórmula de engenharia caracterizando a capacidade de carga dos pontos de solda. Os corpos de prova podem ser vistos em Wung (2001) e Lin (2002), que estudaram quatro ângulos de aplicação da carga: 0°, 22°, 45° e 60°, e em o pico de carga decresce com o aumento do ângulo de carregamento, tanto para 1,0 mm como para 1,5 mm. Segundo Lin et al (2002), em geral a falha deveria ser expressa em função das condições de carregamento, propriedades do material, diâmetro do botão, espessura das chapas, e parâmetros da solda. Vandebossche (1977) estudou um corpo de prova por sobreposição, com um ponto de solda de diâmetro  $d$  aplicado no centro dessa sobreposição, conforme Figura 8. Esse modelo será aplicado em aço BH e comparado com outros modelos que relacionam a espessura e o diâmetro mínimo do ponto. Foi aplicada uma força  $F$  nas extremidades do corpo de prova, e essa aplicação resulta em uma rótula plástica, onde o eixo do ponto de solda é girado para que a linha de força passe sobre o ponto, como mostrado na Figura 9. O modo de falha depende das tensões relativas entre a interface de solda e a ZTA, e os dois níveis podem ser comparados através do critério de Henky – Huber - Von Mises (Vandebossche, 1977) para o cálculo da tensão equivalente, que é então comparada com as tensões requeridas para falhar

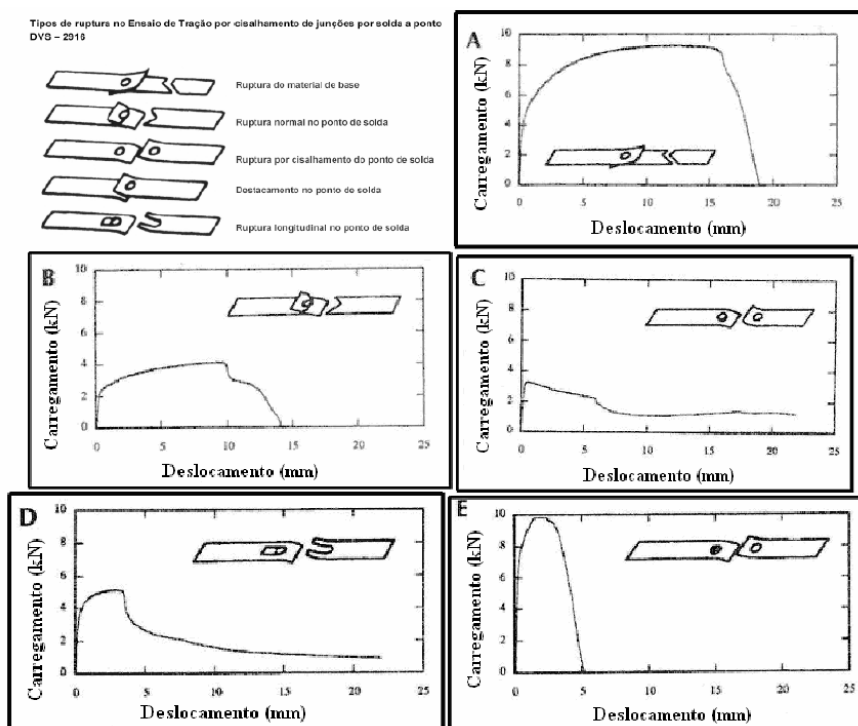


Figura 6 – Curva força em função do deslocamento, modos de falha (DVS 2916 e Zhou et al, 1999)

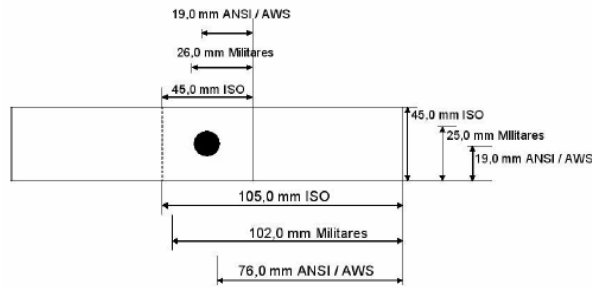


Figura 7 –Dimensões de referência – corpos de prova para ensaio de tração (Zhou et al, 1999)

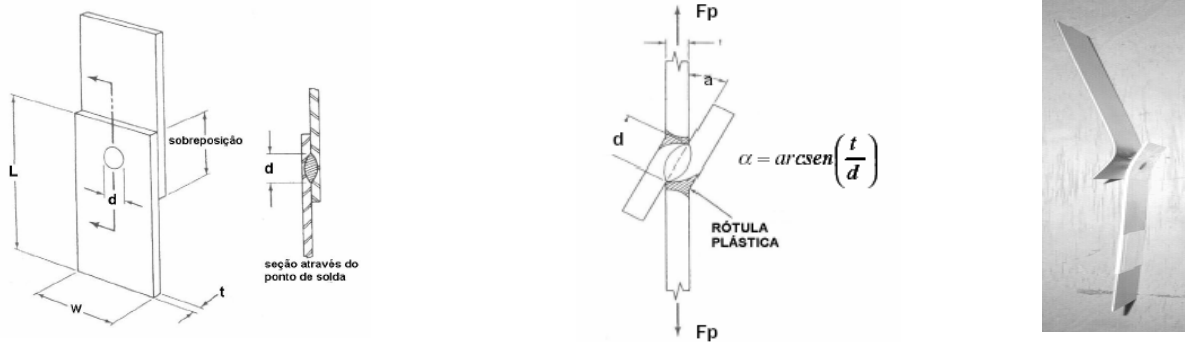


Figura 8 – corpo de prova -ensaio de tração Figura 9 – Formação da rótula plástica (Van den por cisalhamento (Vandenbossche, 1977). Bossche, 1977)

Para a determinação da tensão na interface foi construído um diagrama das forças atuantes nos corpos (Figura 10), com a decomposição das forças em carga de tração e carga de cisalhamento. A tensão equivalente na interface da solda (para a relação  $0 < t/d = 1/3$ ) é:

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

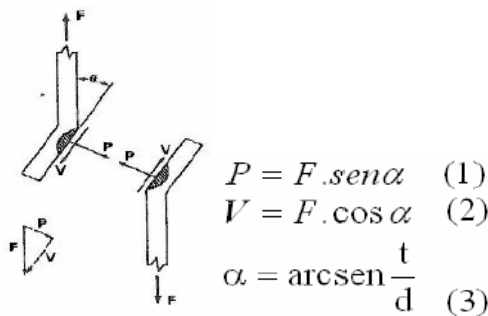


Figura 10 - Diagrama das forças atuantes nos corpos (Vandenbossche, 1977)

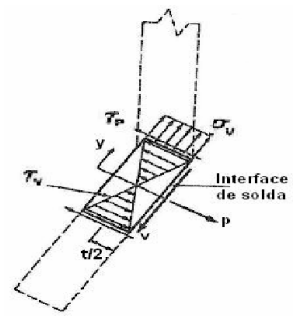


Figura 11 - Distribuição de tensões no botão de solda a ponto (Vandenbossche 1977)

A tensão na ZTA é dada por:

$$\sigma_{eZTA} = \frac{Sy_{PM} \cdot w \cdot t}{2d^2} \left( \frac{d}{t} + \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

A distorção de energia prevê que a falha ocorrerá quando a tensão equivalente em um ponto determinado exceder o critério limite. Se for escolhido o limite na interface ou na ZTA como o critério de falha do ponto de solda as equações 11 e 12 podem ser usadas para prever onde a falha ocorrerá primeiro.

$$\sigma_{einterface} = \frac{3 \cdot Sy_{MB} \cdot w \cdot t}{2 \cdot d^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{eZTA} = \frac{Sy_{MB} \cdot w \cdot t}{2 \cdot d^2} \cdot \left( \frac{d}{t} + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

Substituindo  $S_{y_{MS}}$  por  $S_{ei}$  e  $S_{y_{ZTA}}$  por  $S_{e_{ZTA}}$  e rearranjando os termos tem-se duas equações que relacionam a razão diâmetro da solda – espessura do metal com as propriedades independentes do corpo de prova. A eq. 6 se torna:

$$\left(\frac{d}{t}\right)^2 = \frac{3 \cdot S_{y_{MB}} \cdot w}{2 \cdot S_{y_{MS}} \cdot t} \quad (6A)$$

E a equação 7:

$$\frac{\left(\frac{d}{t}\right)^2}{\left(\frac{d}{t} + \frac{1}{2}\right)} = \frac{S_{y_{MB}} \cdot w}{2 \cdot S_{y_{ZTA}} \cdot t} \quad (7A)$$

Combinando as duas equações chega-se à faixa de variações da relação d/t:

$$\left(1,5 \cdot \frac{S_{y_{MB}} \cdot w}{S_{y_{MS}} \cdot t}\right) \leq \frac{d}{t} \leq \frac{S_{y_{MB}} \cdot w}{2 \cdot S_{y_{ZTA}} \cdot t} + \frac{1}{2} \quad (8)$$

Conclui-se que o diâmetro crítico da solda para a razão de espessuras está mostrado na equação 9:

$$\left(\frac{d}{t}\right)_c = \left(1,5 \cdot \frac{S_{y_{MS}} \cdot w}{S_{y_{MS}} \cdot t}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Vandenbossche (1977) concluiu então que caso o valor de  $S_{y_{MS}}$  seja constante ou uma função de  $S_{y_{MB}}$ , então a razão crítica d / t ser diretamente proporcional ao limite de escoamento do metal base. O diâmetro mínimo requerido para falha na ZTA é função também da resistência do metal, espessura e largura da junção, e isso resulta em uma equação que permite relacionar a razão diâmetro / espessura com a carga de ruptura de um ponto de solda.

$$\frac{d}{t} = \left(0,54 \cdot \frac{S_{y_{MB}}}{1,54 \cdot S_{y_{MB}} + 572 \text{ MPa}} \cdot \frac{w}{t}\right)^{\frac{1}{2}} + 3,0 \quad (10)$$

A carga limite de falha para a solda é determinada pela relação:

$$L = \frac{S_{y_{MB}} \cdot w \cdot t}{2} \quad (11)$$

A AWS (1995) propõe um modelo de correlação entre o diâmetro mínimo do ponto de solda e a espessura da chapa, para aços baixo carbono, conforme se pode ver na equação 12.

$$d = 3 \cdot t - 1,5 \text{ mm} \quad (12)$$

Para a indústria automotiva, os valores determinados por esse modelo são menores que os mínimos requeridos para as espessuras (de 0,5 mm a 3,0 mm). Entretanto, para poder-se comparar e analisar esses valores, serão feitos os cálculos para as espessuras utilizadas nesse trabalho e comparados aos valores determinados por esse modelo, assim como aos valores de Vandenbossche (1977). Como modelo final a ser considerado nesse trabalho tem-se conforme norma ISO/DIS 14373 (2004) a relação descrita pela equação 13.

$$d = a \cdot \sqrt{t} \quad (13)$$

O coeficiente  $a$  pode variar de 3,5 a 6, e as curvas feitas com esses valores e com as espessuras utilizadas nesse trabalho serão igualmente comparadas com os demais modelos, e inseridos graficamente no modelo de Vandenbossche.

### 3. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para os testes de solda foi escolhida uma MSPP tipo “C”, modelo 360008-02 (Figura 12), instalada na planta industrial. A MSPP está instalada em um TSP marca Roman, modelo F466170JL5335WX, de 170 kVA de potência, montado em painel de solda marca Bosch, modelo PSS5100-115 C-I/O – *ethernet wire*. Para a calibração dos parâmetros de solda foi utilizado um equipamento para inclusão dos parâmetros desejados marca REXROTH, modelo BT-6, e um equipamento para a verificação dos parâmetros reais na MSPP, marca MIYACHI. Em seguida, os parâmetros da tabela de referência (Tabela 1) foram divididos em três grupos, até uma espessura governante de 1,60 mm, valor que engloba cerca de 80 % da chapa soldada em uma carroceria automotiva. A partir da definição dos grupos e conseqüentemente das espessuras governantes, foram realizados os testes de solda utilizando-se os materiais mostrados na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros de Solda de Referência – divisão dos grupos

Grupo	Espessura governante EG mm	Força requerida F		Corrente de solda I Ka	Tempo total ciclo = 1/60 seg				Dist. min entre pontos mm	Diâmetro mínimo do botão mm	Flange mínima			Eletrodo	
		N	Lb		Compressão	Solda	Retenção	Pausa			e <sub>mi</sub>	f <sub>mi</sub>	l <sub>mi</sub>	d <sub>mi</sub>	D <sub>mi</sub>
1	0,75 - 1,10	2937	660	10,5	8,8	9,9	2,2	6,6	18	4,4	14,3	7,2	16,5	6,2	14,3
2	1,11 - 1,35	2937	660	11,0	11	11	2,2	6,6	21	5,0	17,6	8,3	19,8	6,7	17,6
3	1,36 - 1,60	3916	880	13,2	13,2	13	2,2	8,8	29	5,5	17,6	9,4	19,8	7,3	17,6
4	1,61 - 1,80	4403	990	14,3	15,4	15	5,5	11	32	5,8	17,6	9,7	20,9	7,6	17,6
5	1,81 - 2,10	5382	1210	16,0	19,8	20	5,5	13	35	6,3	17,6	9,9	20,9	8,0	17,6
6	2,11 - 2,40	6360	1430	17,1	22	23	5,5	15	39	6,6	17,6	10,5	22,0	8,4	17,6

Tabela 2 – Materiais ensaiados nos testes de soldagem a ponto por resistência elétrica.

Tipo	Espessura [mm]	LE [MPa]	LR [Mpa]	Ensaio de revestimento (BGA)	
				Superior [g/m <sup>2</sup> ]	Inferior [g/m <sup>2</sup> ]
BGA OL GM 45A45 GMB EMS 1508	0,80	164	310	51	51
EMS - ME - 1508 - 45A45	1,00	155	284	52	52
EMS - ME - 1508 - EEP	1,20	162	300	61	66
EMS - ME-1508 - 210 BH - 45A45A	1,30	248	343	54	54
EMS - ME - 1508 - 180 BH	1,50	221	327	66	59
EMS - ME- 1508 - EEP - PC	2,00	164	297	61	59

Preparados os materiais dos testes e definidos o local e a MSPP a ser utilizada, cada grupo foi detalhado em função de combinações de espessuras usuais em carrocerias e o equipamento programado com os parâmetros correspondentes. Foi feitos um total de 48 corpos de prova com um ponto de solda no centro da superposição das chapas, identificados e separados por Grupo. Os corpos de prova após o teste de tração são mostrados na Figura 13. Os diâmetros dos botões foram medidos com paquímetro digital TESA, modelo 8H268106, e os valores médios calculados (e então corrigidos pelo fator t de *Student*). O valor desse fator para uma confiabilidade de 95% é 2,015. A compilação desses valores pode ser vista em **Ruiz 2005**. Esse fator corrige o erro dos resultados, por tratar-se de uma amostra pequena de corpos de prova. Como já citado, após os testes de solda os corpos de prova foram submetidos a um teste de tração feito no laboratório da área de Qualidade de Peças de Fornecedor da GMB. O ensaio foi feito em uma máquina INSTRON, MODELO 4482, capacidade de 10 toneladas, a uma velocidade de 10 mm/min. A micrografia indicou que houve entrelaçamento granular, com estrutura da chapa de perlita com ferrita no contorno de grão (Figura 14), com transformação na região aquecida. Notou-se a presença de trincas na região de rompimento da chapa, devido ao esforço do ensaio de tração.

Com o valor de referência dos diâmetros mínimos estimado e os reais medidos, restaram os valores calculados pelo modelo de Vandenbossche para que os resultados dos ensaios pudessem ser devidamente analisados, baseando-se na Tabela 2.

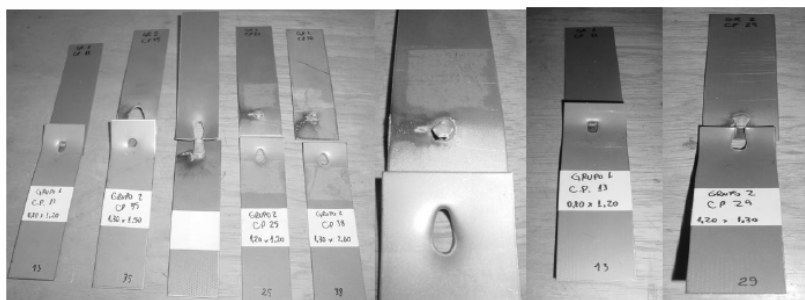


Figura 13 – Corpos de prova após o ensaio de tração

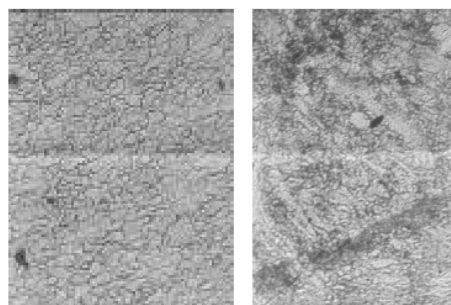


Fig. 14 – Metalografia da solda.

Usando-se a Equação 15 já descrita, tem-se para uma espessura governante de 0,80 mm e  $S_{yMB} = 164$  MPa. Os valores assim calculados podem ser comparados aos valores determinados pelos modelos da AWS, ISO e Vandenbossche, e ainda pelos diâmetros reais medidos nos pontos de solda feitos com os valores de referência industrial. Essa comparação é vista na Tabela 3. Os dados do Modelo da AWS (1995) estão mostrados na Fig. 15.

Tabela 3 – Comparação dos modelos estudados

ESPESSURA GOVERNANTE [mm]	PREDITOS					MEDIDOS	
	ISO [mm]			AWS [mm]	VandenBossche [mm]		Tabela GM
	4vt	5vt	6vt	3.t-1,5	$\frac{dc}{t} = \left[ \frac{0,54.S_{yMB}}{1,54.S_{yMB} + 572.MPa} \left( \frac{w}{t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} + 3,0$	teórico	
0,8	3,6	4,5	5,4	0,9	4,3	4,4	6,4
1,0	4,0	5,0	6,0	1,5	5,0	4,4	6,4
1,2	4,4	5,5	6,6	2,1	5,9	5,0	6,9
1,3	4,6	5,7	6,8	2,4	6,2	5,0	7,3
1,5	5,1	6,3	7,6	3,0	7,3	5,5	7,3
2,0	5,7	7,1	8,5	4,5	8,9	6,3	7,3

\* valores de referência para a EG de 1,3 mm, pois não foi possível medir esses valores nos testes, em virtude da utilização dos parâmetros do grupo anterior da tabela.

Pode-se observar que os pontos medidos, resultado da aplicação dos parâmetros da Tabela 1, atendem totalmente os requisitos indicados pelo modelo ISO (2004) até 5vt e parcialmente o Modelo de Vandenbossche, até a espessura de 1,3 mm. A Referência utilizada pela GMB (4vt.) é totalmente atingida (considerando-se o atributo diâmetro do botão de solda). A Figura 16 mostra os modelos de Vandenbossche (1977), ISO (2004) e dos pontos medidos.

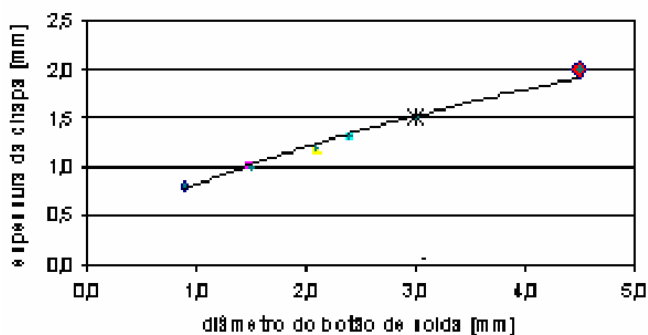


Figura 15 – Representação gráfica do Modelo AWS (1995) para as espessuras desse trabalho.

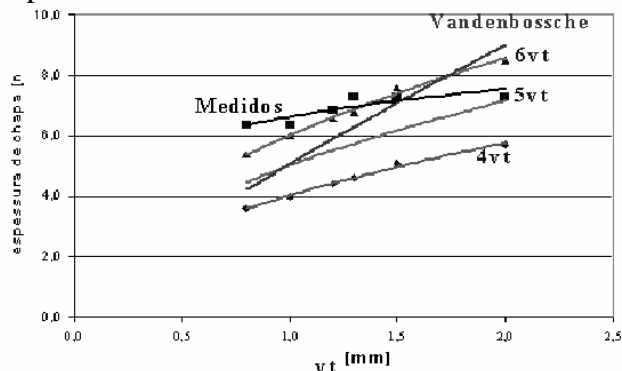


Figura 16 – Representação dos Modelos ISSO (2004), Vandenbossche (1977) e os medidos.



### 3.1 – Representação gráfica do critério de Vandenbossche

Para análise e comparação das informações obtidas nos ensaios em relação ao desempenho previsto pelo modelo de Vandenbossche para os pontos de solda foram então inseridos nas figuras desenvolvidas conforme modelo. E esta comparação pode ser vista na Figuras 17, 18 e 19. A Figura 17 mostra uma tendência e um direcionamento de resultados no trabalho original na região dos pontos de 200 MPa a 400 MPa, podendo ser a princípio interpretada como equívoco. Tal fato é proveniente do trabalho ter sido feito para aços de alta resistência.

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho permitiu a verificação da aplicação dos parâmetros iniciais de solda conforme indicados na Tabela 1. Poucos testes são feitos com esses parâmetros antes de seu ajuste de acordo com as condições reais de produção, e os resultados dos testes de tração são comparáveis aos modos de falhas mostrados na Figura 6. Os Grupos 1 e 2 apresentaram modos de falhas do tipo D (chapa de menor espessura se deforma, atinge a fase plástica e se rompe; tipo de falha aceitável). O Grupo 3, assim como os corpos de prova extras (espessura de 2 mm) mostraram o real perigo na utilização de parâmetros subdimensionados, pois não resistiram à metade da carga dos demais. É importante frisar que nesse trabalho os estudos se limitam ao diâmetro mínimo dos botões de solda, devendo trabalhos futuros estudar os demais parâmetros requeridos para uma solda de boa qualidade, como a profundidade da solda (endentação), compressão, o efeito da corrente e do tempo de solda. De posse dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se dizer que os parâmetros contidos na tabela 1 são efetivamente parâmetros iniciais de programação, devendo ser refinados e alterados de acordo com as peculiaridades existentes em cada célula de produção. Ainda sobre a Tabela 1, a utilização de seus parâmetros como ponto de partida para a solda a ponto mostrou-se eficaz e válida, como indicam os resultados dos testes de tração e as medidas dos diâmetros dos botões reais, após os testes de tração.

Os diâmetros mínimos foram atendidos em todos os Grupos de corpos de solda onde foi possível realizar a medição dos diâmetros reais, e desse modo pode ser feita uma analogia entre Vandenbossche (1977) e a Tabela 1, pois os parâmetros iniciais atendem os valores mínimos para que a solda sofra o modo de falha corretamente. Vandenbossche (1977) indica também a grande importância das propriedades do material utilizado versus a espessura da chapa. Diante do estudo dos diferentes modelos apresentados, pode-se questionar sobre a utilização de parâmetros que resultem em um diâmetro mínimo de botão de solda maior que todos os valores requisitados. Isso é possível, entretanto torna-se inviável em uma linha de produção, pois devem ser utilizados valores maiores de tempo de solda (resultando em perda de volume de produção), valores maiores de corrente (resultando em maior custo de energia), entre outros. Desse modo, faz-se necessário a utilização dos lóbulos de solda, que determinam os valores máximos e mínimos dos parâmetros de solda para que os pontos de solda tenham boa qualidade.

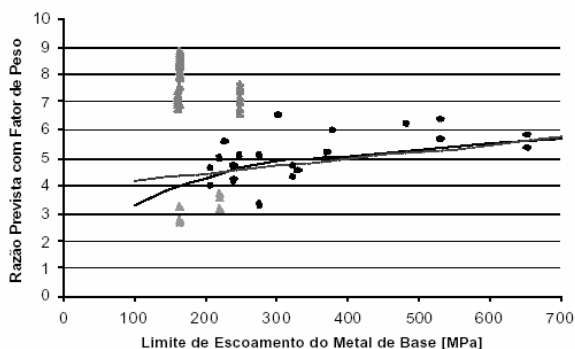


Figura 17 – Comparação entre dados dos testes e desempenho previsto.

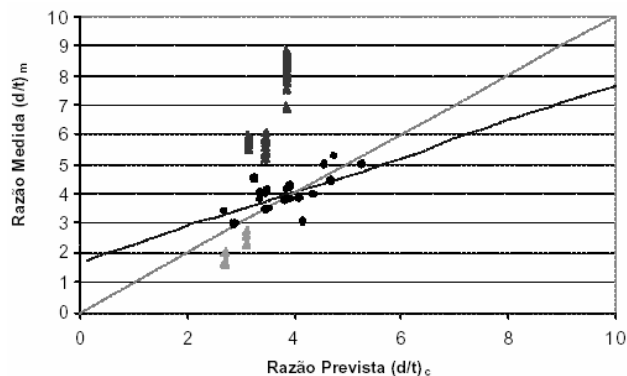


Figura 18 - Razão diâmetro-espessura prevista x real.

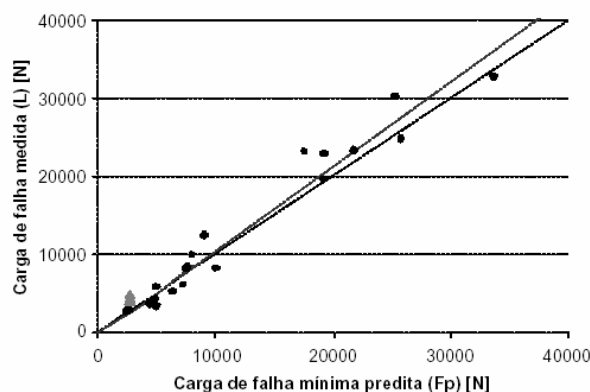


Figura 19 – Carga de falha dos pontos de solda predita x real.

## 5. CONCLUSÕES

Os modelos estudados têm comportamentos diferentes em relação ao modelo de Vandebossche, para aços BH revestidos com *galvanneal*. O modelo AWS resultou em diâmetros de pontos de solda menores que os valores mínimos considerados, indicando que sua utilização na indústria automotiva não é recomendada. O modelo ISO atende os requisitos para a falha na ZTA para algumas espessuras na condição  $d = 6 \cdot vt$ . Na condição de  $d = 4vt$  (usada pela GM) os valores ficam próximos, mas abaixo dos considerados mínimos pelo modelo de Vandebossche. Isso não garante a falha na ZTA, mas atende os requisitos da Engenharia de Produtos. Foi verificada a aplicabilidade dos parâmetros de solda iniciais utilizados pela GMB nos materiais estudados, assim como verificado o atendimento ao diâmetro mínimo determinado por Vandebossche. Os diâmetros reais dos pontos de solda são maiores que os do modelo nas espessuras de 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm e 1,3 mm, já que nas espessuras de 1,5 mm e 2,0 mm foram utilizados propositalmente parâmetros inferiores que não permitiram a medição dos botões, já que o botão foi rompido nos testes de tração. Os diâmetros reais dos pontos de solda atendem todos os valores mínimos estipulados pelos modelos estudados.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a General Motors do Brasil pelo apoio e recursos fornecidos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Aslanlar, S.** The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry, *Materials and Design*, 2004.
- AWS** – American Welding Society Welding Handbook – v. 2 – 8th ed., 1995.
- Chao, Y. J.**, 2003, Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads, *J. Materials Eng. & Technology*, v. 125, 125-32.
- GM 2003** – North America Design Standards Resistance Spot Welding, WS-1, Controls, Robotic & Welding.
- Heuschkel, J.** The expression of spot-weld properties, 1952. *Welding Journal* 31, pp. 931-943.
- ISO / CEN DIS 14373**. “Welding – Resistance spot welds: Procedure for spot welding of uncoated and coated low carbon and high strength steels”, Genebra, Suíça, Outubro 2004.
- IWU** – 2003 Annual Report – Fraunhofer Institute – Chemnitz, Alemanha.
- Lin, S – H., Pan, S. -R. Wu, Tyan, T., Wung, P.**, 2001. Failure loads of spot welds under combined opening and shear static loading conditions. *Int. J. Solids and Structures* 39, pp. 19-39.
- Lin, S-H et al.** Failure loads of spot welds under combined opening and shear static loading conditions. *Int. J. of Solids and Structures*, v.39, p.19-39, Jul. 2002.
- Lin, S-H., Pan, J., Tyan, T., Prasad, P.** A general failure criteria for spot welds under combined loading conditions. *Int. J. of Solids and Structures*, v.40, p.5539-5564, jun. 2003.
- Markiewicz, E., Drazétic, P.** Expérimentation et simulation numérique locale/globale de la tenue mécanique des assemblages soudés par points, *Mécanique & Industries*, 4, 2003, p. 17-27.
- Ruiz, D. C.** - Estudo de um critério de modo de falha para solda a solda a ponto por resistência, Trabalho de conclusão de curso, mestrado profissional em engenharia automotiva, EPUSP, 2005.

- Ruiz, D. C., Batalha, G. F.**, Estudo de um critério de modo de falha para solda a solda a ponto por resistência, II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Joinville, SC, 2005.
- RWMA** - Resistance Welders Manufacturers' Association, 1989, 4th ed.
- Sawhill, J. M., Furr, S. S.**, 1981. Spot weldability tests for high-strength steels. SAE Technical Paper n° 810352. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, EUA.
- 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, Warrendale, EUA.
- Williams, N. F., Parker, J. D.** Review of resistance spot welding of steel sheets, part 1: modeling and control of weld nugget formation. Int. Mat. Review, 2004, 49, (2), 45-75.
- Williams, N. F., Parker, J. D.** Review of resistance spot welding of steel sheets, part 2: factors influencing electrode life. Int. Mat. Review, 2004, 49, (2), 77-108.
- Wung, P.**, 2001. A force-based failure criterion for spot weld analysis. J. Exp. Mech. 41, 107-13.
- Zhang, S.**, 2001. Recent developments in analysis and testing of spot welds. SAE Technical Paper no.2001- 01-0432, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, EUA.
- Zhou, M., HU, S. J., and Zhang, H.** Critical Specimen Sizes for Tensile -Shear Testing of Steel Sheets. 1999, Welding Research supplement: 305-13.

## **DEVELOPMENT OF FAILURE CRITERIA FOR SPOT WELD IN ASSEMBLING PROCESSES FOR AUTOMOTIVE BODY IN WHITE**

### **Douglas Criado Ruiz**

General Motors do Brasil CT, Av. Goiás, 2769, 09550-900, S. Caetano do Sul - douglas.ruiz@gm.com

### **Gilmar Ferreira Batalha**

PMR-EPUSP - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508.900 São Paulo - SP gilmar.batalha@poli.usp.br

***Abstract:** This work is based on a spot weld failure mode criteria application that determine the critical spot weld diameter, indicating in a faithful way the failure occurrence in the HAZ, in case of shear load. It was studied several models (AWS 1995, ISO 2004) with BH galvaneal coated steel. The models studied have different behavior when compared to Vandenbossche's model. The use of the AWS model resulted em weld nugget diameters smaller than the minimum, indicating that in automotive industries application it is not recommended. ISO's model reached the required values for some thicknesses in the condition  $d = 6.vt$ . It was verified the reliable usage of the General Motors initial reference parameters table (WS\_1, 2003). The weld nuggets have reached Vandenbossche's minimum diameters. The measured weld nugget complies with the minimum values determined by the studied models.*

**Key words :** welding, body, assembling, welding parameters and welding nugget.