

# 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](mailto: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](mailto: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 VandenBossche<sup>(1)</sup>, e os resultados obtidos pelos testes são 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 um 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-2c, em virtude de suas características e qualidade ela ainda é dominante na indústria automotiva.

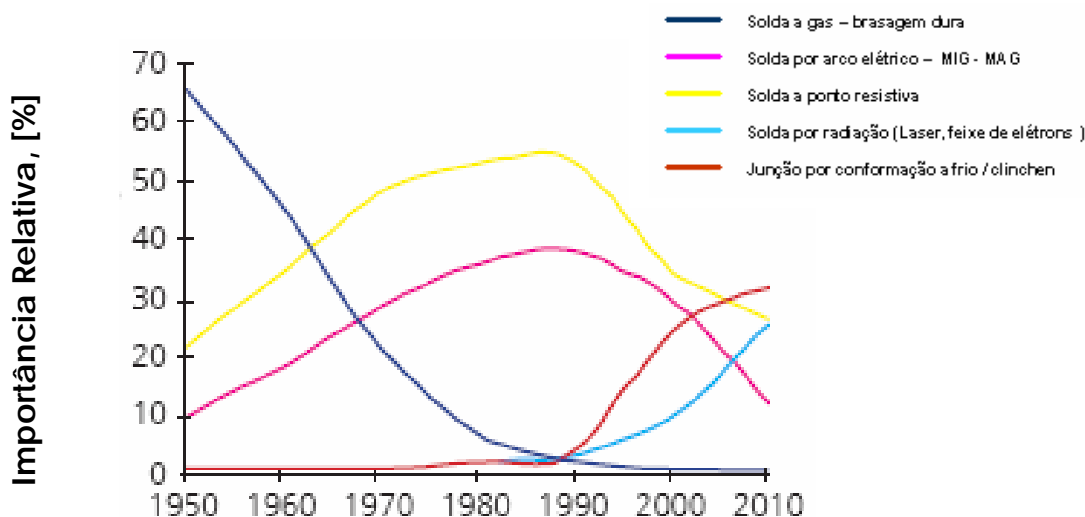


Figura 1 – Tendências nos processos de junção em carrocerias automotivas produzidas em série, sem considerar peculiaridades especiais de construção tais como tipo de carrocerias: estrutura monobloco em aço, “space-frame” em liga de alumínio ou peças com concepção multi-material<sup>(2)</sup>.

O uso da solda a laser - Figura 2d - 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<sup>(2)</sup>. Uma das vantagens da solda a laser é o fato dela 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.

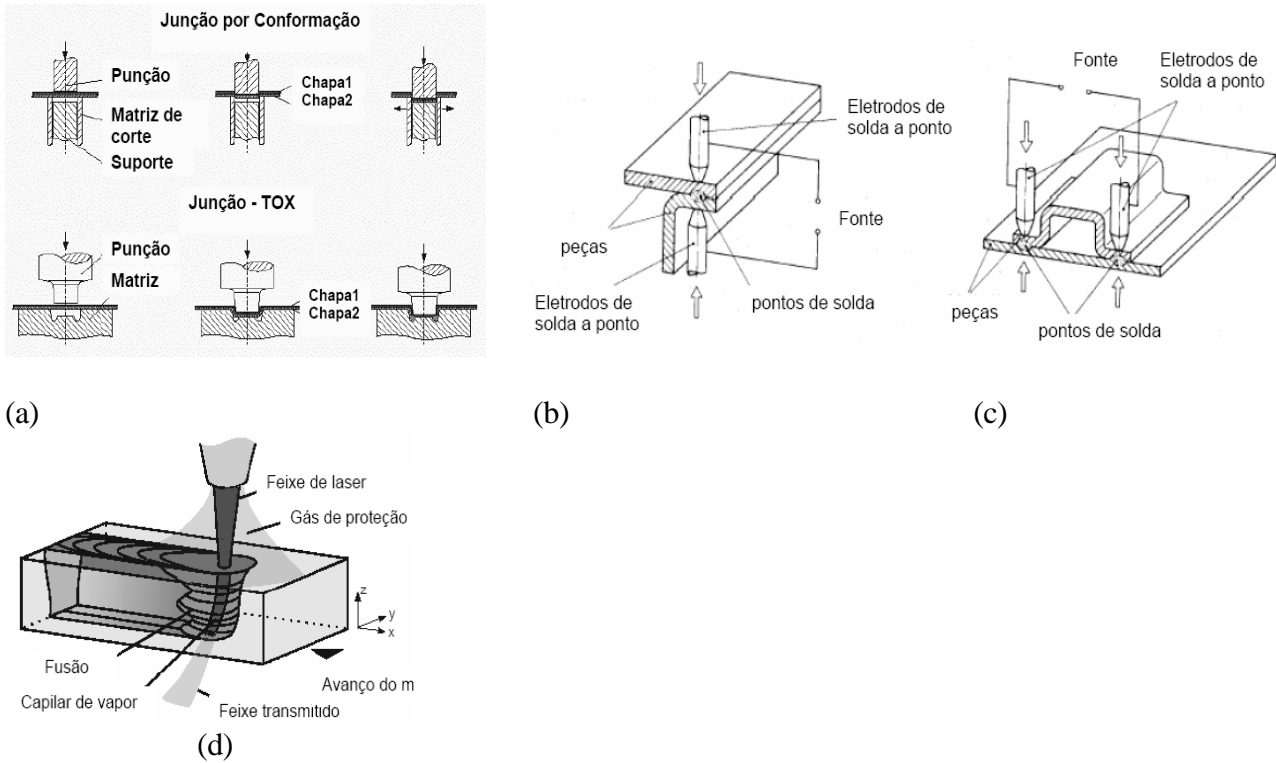


Figura 2 – Técnicas de junção de carrocerias automotivas (a) solda sob pressão por conformação; (b) solda sob pressão resistiva com acesso pelos dois lados; (c) solda sob pressão resistiva com acesso por apenas um dos lados e (d) solda a laser. (e) custos das tecnologias de junção.

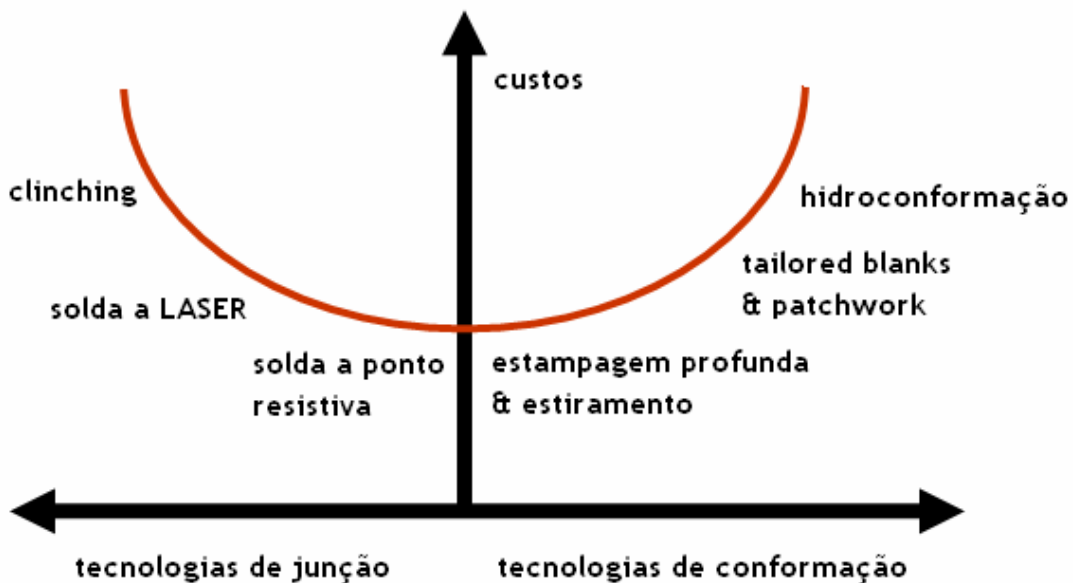


Figura 3 – Curva representativa do custo vs. Processos de conformação e junção na montagem de carrocerias automotivas.

## 2 – SOLICITAÇÕES TÉRMICAS EM JUNÇÕES

As figuras abaixo resumem brevemente as solicitações térmicas típicas a que estão submetidas as junções soldadas tanto durante o processo de fabricação quanto em serviço

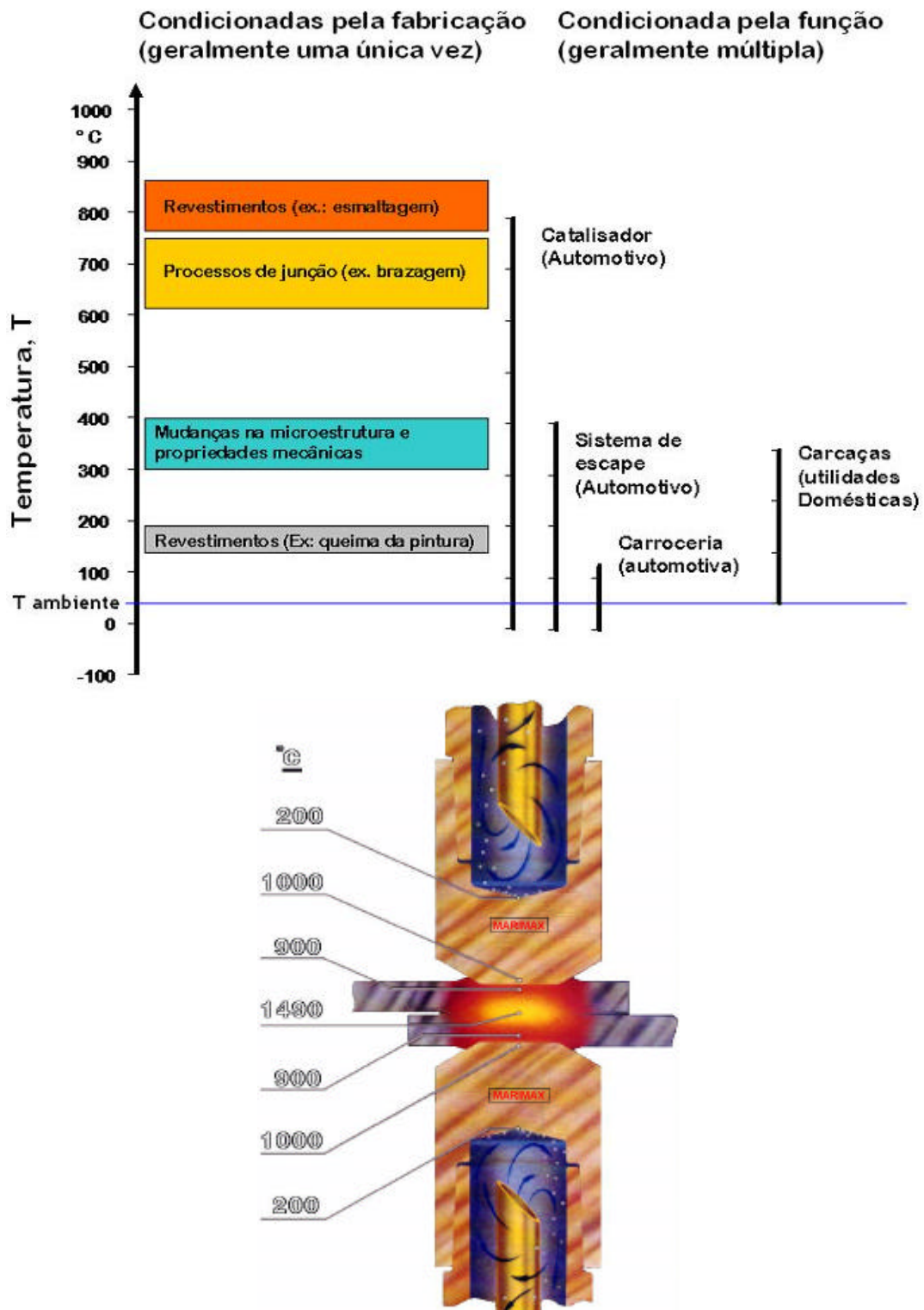


Figura 4 – Solicitações térmicas de junções de chapas (a) durante os processos da manufatura automotiva e posteriormente do produto já em serviço. (b) temperaturas do processo. Segundo Matthes e Riedel 1995.

### 3. RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS E RESISTÊNCIA MECÂNICA NA SOLDA A PONTO

A qualidade da solda a ponto é um termo não bem definido, e é geralmente medida em função de requisitos de desempenho da solda, podendo ser quantitativos ou qualitativos. Em princípio torna-se importante avaliar como se procedeu ao seqüenciamento do processo de soldagem resistiva (Figura 5) e sua influencia sobre os atributos da lentilha de solda e sua respectiva zona termicamente afetada.

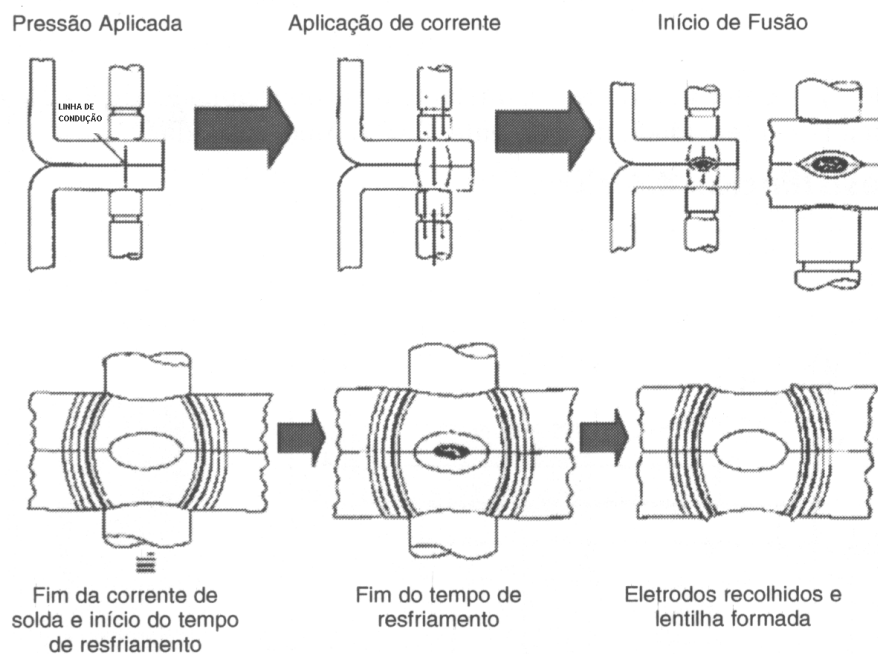


Figura 5 - Esquema da seqüência do processo de soldagem a ponto resistiva e respectiva evolução da lentilha de solda resistiva.

Em geral, as características de desempenho da solda deveriam se referir tanto para a resistência estática quanto para a dinâmica. A resistência ao cisalhamento obtido em ensaios de tração, resistência à tração transversal, e resistência ao descascamento são exemplos de resistências estáticas, e as resistências de impacto e fadiga são comumente referidas como resistências dinâmicas. Contudo, por razões práticas, apenas ensaios de cisalhamento sob tração são conduzidos na maioria dos casos. Tipicamente, a resistência de um ponto de solda resistiva é frequentemente relacionado com os atributos físicos da junta soldada. Além do tamanho ou diâmetro do ponto de solda (usualmente obtido após um ensaio de tração com destacamento), como mostrado na Figura 6, os atributos de uma solda se referem ao tamanho da zona térmica afetada (ZTA ou ZAC), penetração, endentação, separação da chapa e propriedades do material [1]. Contudo, apenas o tamanho ou diâmetro do ponto de solda tem sido usado amplamente nas relações atributo-propriedades. Outros atributos dos pontos de solda são usados mais raramente, basicamente devido não ficar claro como eles afetariam a resistência de um ponto de solda resistiva.

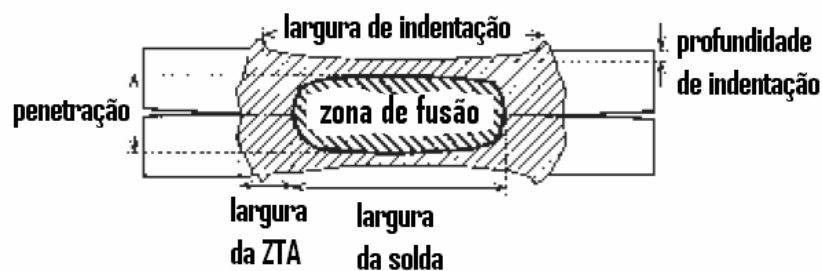


Figura 6 - Atributos geométricos de uma solda a ponto, definidos em uma secção transversal esquematizada de uma junção por solda a ponto.

Admite-se que soldas boas seriam soldas com maiores diâmetros do ponto de solda e com alta resistência sem expulsão ou formação de ponto de solda parcial. Uma solda com uma zona de fusão completa e pelo menos uma resistência mínima, e sem fissuras ou expulsão ou porosidade foram consideradas como soldas boas. Eles tentaram também definir soldas não-conformes como sendo aquelas com tamanho muito pequeno do ponto de solda, ou com trincas, porosidade excessiva, expulsão excessiva, e camadas de adesão danificada para soldas de aderência. Estas classificações são geralmente qualitativas e dependem de uma multiplicidade de parâmetros, além daqueles do material soldado (aço ou alumínio). Em muitos casos, a largura da zona de fusão ou o diâmetro do ponto de solda são usados como únicos parâmetros de qualidade de um ponto de solda. Isto se deve intuitivamente ao fato de que o tamanho da junção teria a influencia mais significativa na resistência da solda. É também fácil de medir e especificar valores do tamanho do ponto de solda freqüentemente citados em normas e recomendações. Existem muitas tentativas de vincular o tamanho do ponto de solda com a resistência/qualidade da junção por solda a ponto. A maior parte destes trabalhos ocupa-se das relações entre o diâmetro da solda e a resistência ao cisalhamento por tração. Um dos primeiros trabalhos nesta direção foi uma expressão simples da resistência em função do diâmetro da solda

$$P=120 \cdot d^2 \quad (1)$$

Onde  $P$  é a carga de cisalhamento em Newton e  $d$  é o diâmetro da solda em mm. Propôs-se uma relação empírica mais complexa para a resistência ao cisalhamento por tração:

$$S = t \cdot S_0 \cdot d \cdot [\alpha - \beta(C + 0.05Mn)] \quad (2)$$

Onde  $S$  é a resistência ao cisalhamento sob tração,  $S_0$  é a resistência do metal base (MB),  $d$  é o diâmetro da solda,  $t$  é a espessura da chapa,  $C$  e  $Mn$  são as composições químicas do MB, e  $\alpha$  e  $\beta$  são funções da espessura  $t$ . Esta relação depende tanto das dimensões da junção quanto das propriedades dos materiais. Contudo, uma relação complexa como esta não é a mais indicada para uma predição da resistência mecânica do ponto de solda. Alguns trabalhos propuseram uma formula similar para aços refosforizados e submetido a alívio de tensões,

$$S=f \cdot t \cdot S_0 \cdot d \quad (3)$$

Onde  $f$  é um coeficiente dependente do material,  $f = 2.5 \sim 3.1$ . Embora grande parte dos trabalhos tenha sido feita com aço, alguns esforços foram devotados à soldagem de alumínio e suas ligas, uma vez que estas têm sido introduzidas na montagem de carrocerias automotivas nas últimas décadas. Levando em consideração o modo de fratura, uma expressão foi proposta para soldas de ligas de alumínio por :

$$P = (0.12t - a)d \quad (4)$$

Aqui  $P$  está em kN,  $t$  e  $d$  estão em mm, e  $a$  é um coeficiente relacionado com o modo de fratura.

Estas equações fornecem informações valiosas sobre a influência das dimensões do ponto de solda sobre a resistência da junção soldada, não obstante elas se adequem apenas para materiais e geometrias de junções específicas. Tentou-se desenvolver uma relação entre a carga de falha do ponto de solda e a resistência do material de base (MB), velocidade de ensaio, configuração da junção e plano de soldagem. Diversos testes, tais como, cisalhamento sob tração, tração transversal, e destacamento, foram realizados com diversas chapas empregadas em carrocerias automotivas para estabelecer estas relações. Os resultados estão dispersos devidos principalmente a complexidade do processo de fratura da junção por solda a ponto, e o grande número de variáveis envolvidas no experimento.

Uma vez que a resistência ao cisalhamento e o tamanho do ponto de solda estão fortemente correlacionadas, estes requisitos são comumente feitos em função do tamanho da solda, que por sua vez, é freqüentemente projetada em função da espessura da chapa. Um diâmetro ótimo do ponto de solda foi considerado como sendo  $5vt$ , onde  $t$  é a espessura da chapa mm. Nas normas americanas com unidades inglesas (polegada), este diâmetro ótimo é aproximadamente  $vt$ . As aplicações costumeiras da indústria situam o diâmetro do ponto de solda entre  $3vt$  e  $6vt$  mm. Tais requisitos assumem uma clara dependência entre a resistência da junção e o diâmetro da solda. Contudo, como destacado, uma correlação entre resistência e o diâmetro da solda nem sempre existirá. Exceto para tamanhos de soldas, existe muito pouca pesquisa sobre a influencia dos atributos da solda, tais como, zona termicamente afetada (ZAC ou ZTA), endentação, etc, sobre a qualidade da solda. A importância das propriedades do material já é reconhecida há muito tempo, porém, apenas recentemente as pessoas começaram a distinguir os efeitos das propriedades do material em diferentes partes de uma junta soldada tais como: zona de fusão, zona termicamente afetada e metal base. Baseado em estudos anteriores, a resistência de uma solda pode ser expressa plenamente por sua carga de pico e a energia correspondente e o deslocamento na carga de pico obtida no ensaio de cisalhamento sob tração. Intuitivamente, eles podem ser expressos como função da geometria da junção e das propriedades do material, ou:

$$P_{max} = f_P(\text{geometria; propriedades do material de base, ZTA e zona de fusão}) \quad (5A)$$

$$U_{max} = f_U(\text{geometria; propriedades do material de base, ZTA e zona de fusão}) \quad (5B)$$

$$W_{max} = f_W(\text{geometria; propriedades do material de base, ZTA e zona de fusão}) \quad (5C)$$

Onde  $P_{max}$  é a carga de pico, e  $U_{max}$  e  $W_{max}$  são os deslocamentos e a energia correspondentes, respectivamente. Em geral, todas estas relações são desconhecidas. É também muito difícil, se não impossível, obtê-las analiticamente. Diferentes abordagens devem ser buscadas objetivando desenvolver tais relações. Neste sentido, uma metodologia recentemente desenvolvida combinada com uma abordagem numérica (via MEF) e planejamento e análise estatística (projeto de experimentos) [16] foi empregada para estabelecer tais relações.

Recentemente Zhou et al, propuseram um modelo computacional detalhado de juntas de solda a ponto resistiva, onde é apresentado e um experimento planejado estatisticamente com auxílio computacional é introduzido para avaliar a resistência de pontos de solda. Os efeitos dos atributos da solda sobre qualidade/resistência e a relação entre a resistência da solda e seus atributos foram estabelecidos quantitativamente. Eles escolheram dois conjuntos de variáveis. Um conjunto baseado nas dimensões geométricas, que incluiu a espessura da chapa, comprimento e largura dos corpos de prova, sobreposição das chapas, diâmetro da lentilha de solda, tamanho da zona afetada pelo calor (ZAC), endentação e separação da chapa, entre outras. Baseado em estudos prévios [17], o comprimento foi fixado em  $L = 150$  mm, e a sobreposição equacionada com a largura do corpo de prova de tração. Para simplificar, soldas com tamanhos maiores foram consideradas, e o diâmetro da lentilha de solda foi vinculado com a espessura da chapa como  $d = 5vt$ . O caso extremo para uma junta soldada, onde exista um entalhe nítido em volta da lentilha, também foi considerado. Neste sentido, eles escolheram como variáveis geométricas: a espessura da chapa, largura dos corpos de prova, tamanho da ZAC e a endentação. O outro grupo de variáveis incluiu as propriedades do material, que são: o módulo de Elasticidade ( $E$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), o limite de escoamento ( $s_y$ ), o limite de resistência mecânica ( $s_{uts}$ ) e o alongamento ( $e$ ). Uma vez que as microestruturas do material na lentilha, na zona afetada pelo calor e no metal de base são diferentes, diferentes propriedades foram usadas para cada parte da solda. Embora, não sejam as propriedades da solda independentes do material na lentilha e na ZAC, elas podem ser relacionadas de modo aproximado com a dureza do metal de base ( $H_v$ ) pelas seguintes relações [14]:

$$s_{uts} = s_0 + k_1 \cdot H_v \quad (6A)$$

$$s_y = k_1 \cdot H_v \quad (6B)$$

$$e = k_2 / H_v \quad (6C)$$

$$H_v = k \cdot H_{base} \quad (6D)$$

Onde  $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k$  são constantes,  $s_{uts}$  é o limite de resistência mecânica sob tração,  $s_y$  é o limite de escoamento, e  $e$  é o alongamento;  $H_{peça}$  e  $H_{base}$  são as durezas da peça estudada e a do material de base, respectivamente. Usando estas equações, não mais que cinco variáveis são necessárias. Neste sentido, se apenas aço é considerado, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson podem ser fixados como constantes ( $E = 210$  GPa e  $\nu = 0,3$ ). Portanto, no planejamento dos experimentos, apenas as propriedades do metal de base e a razão de dureza ( $k$ ) entre o metal de solda e o metal base são deixados como variáveis do material. Os atributos da solda considerados são: espessura da chapa ( $t$ ), largura da chapa ( $w$ ), tamanho da ZTA ( $h$ ), e endentação ( $t_i$ ). Pelo que, a equação 5 pode ser simplificada como:

$$P_{max} = f_P(t, w, h, t_i; s_y, s_{uts}, e, k) \quad (7A)$$

$$U_{max} = f_U(t, w, h, t_i; s_y, s_{uts}, e, k) \quad (7B)$$

$$W_{max} = f_W(t, w, h, t_i; s_y, s_{uts}, e, k) \quad (7C)$$

A Tabela 1 lista as faixas de cada variável do planejamento do experimento que são necessárias para o planejamento estatístico.

**Tabela 1 — Faixa das variáveis de entrada**

t (mm)	h (mm)	w (mm)	t <sub>i</sub>	σ <sub>v</sub> (MPa)	σ <sub>0</sub> (MPa)	e (%)	k
0.5 ~ 2.0	0.1 ~ 1.5	30 ~ 50	0 ~ 20%	205 ~ 1725	50 ~ 200	2 ~ 65	1.0 ~ 3.0

#### 4. 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 7a.

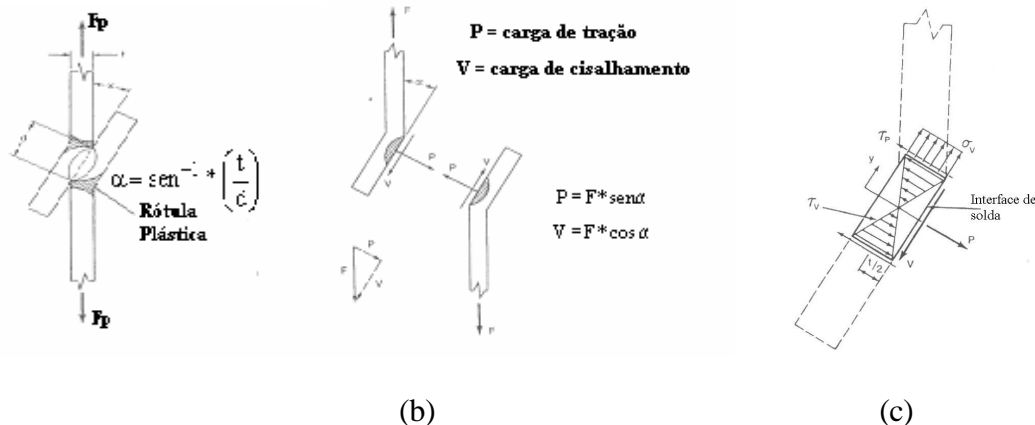


Figura 7 – (a) Rotação na solda durante aplicação da força de tração; (b) Diagrama das forças atuantes nos corpos; (c) Distribuição de tensões <sup>(1)</sup>

$F_P$  = força aplicada que resulta na rótula plástica

$$P = \text{carga de tração} \quad P = F \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

$$V = \text{esforço cortante} \quad V = F \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

$$\alpha = \arcsen \frac{t}{d} \quad (10)$$



## 4.1 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 <sup>(3)</sup> 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 7b), 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:

$$\sigma_{el} = \frac{3 * F}{d^2} \quad (11)$$

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 7c. Feitos os cálculos, temos que:

$$\sigma_{eZTA} = \frac{S_{y_{PM}} * w * t}{2 * d^2} * \left( \frac{d}{t} + \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

Onde:  $S_{y_{PM}}$  é o limite de escoamento para o metal base.

## 4.2 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:

$$\frac{d}{t} = \left( 0,54 * \frac{S_{y_{PM}}}{1,54 * S_{y_{PM}} + 572 \text{ MPa}} * \frac{w}{t} \right)^{\frac{1}{2}} + 3,0 \quad (13)$$

A carga limite de falha para a solda é determinada pela relação:  $L = \frac{S_{y_{PM}} * w * t}{2}$  (14)

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 <sup>(18)</sup>. 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.

## 5 FATORES E VARIÁVEIS QUE AFETAM A QUALIDADE DA SOLDA <sup>(19)</sup>

O controle da qualidade de um processo de solda por resistência <sup>(19)</sup> 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.

### 5.1 Corrente de Soldagem, Pressão e Força no Eletrodo

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:  $Q=I^2.R.t.$ . 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.

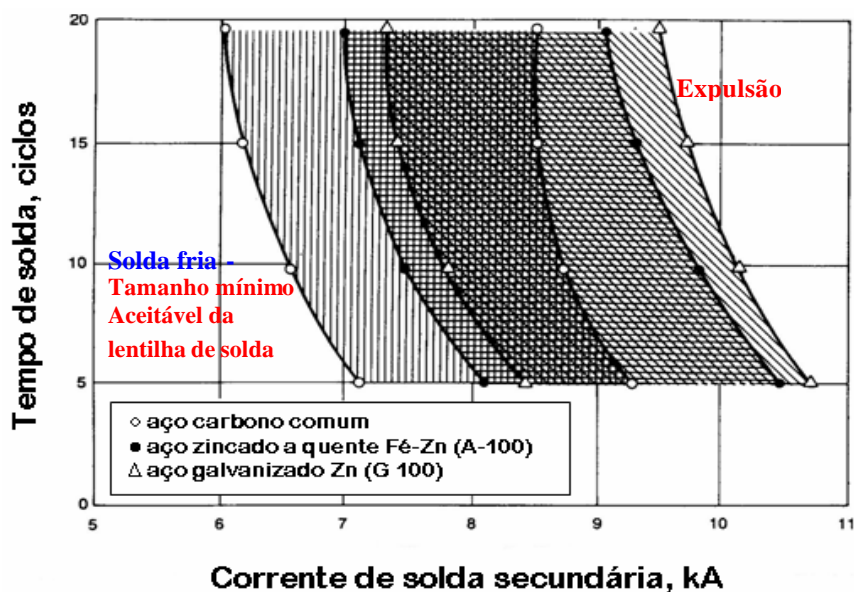
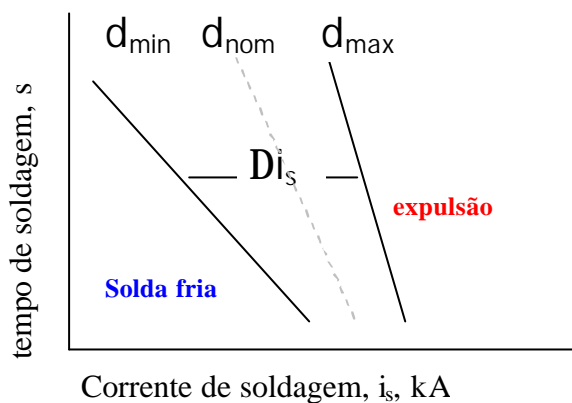
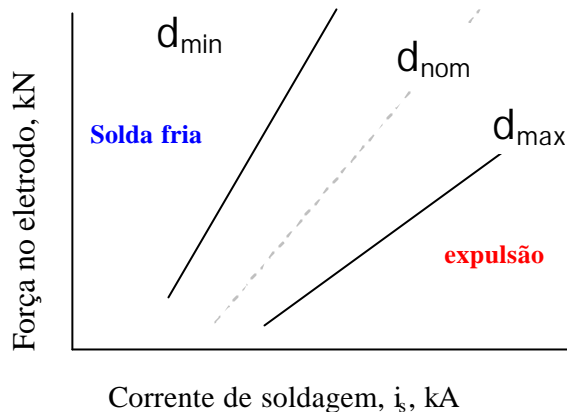


Figura 8 – Tempo de soldagem X corrente secundária de solda para obter lóbulos de soldabilidade para chapas de aço de 0,8 mm. Parâmetros do eletrodo: força 1,8 kN , diâmetro da ponta 5,0 mm.

Conforme mostra a Figura 8, o revestimento de Zinco é bastante problemático para a solda resistiva, pois requer a utilização de uma alta corrente de solda, se compararmos aos outros materiais da figura e mantendo-se o tempo de solda constante. O maior problema do revestimento de Zinco, entretanto, é que com a aplicação de muitos pontos (como no caso da produção automotiva), ele adere aos eletrodos, prejudicando imensamente a qualidade da solda (às vezes impedindo-a). Por isso, é importante também que a espessura da camada de revestimento seja muito bem controlada pelo fabricante. Finalmente, quando da utilização de chapas com esse revestimento, deve-se verificar as condições dos eletrodos em intervalos menores de tempo, limando-os ou trocando-os.

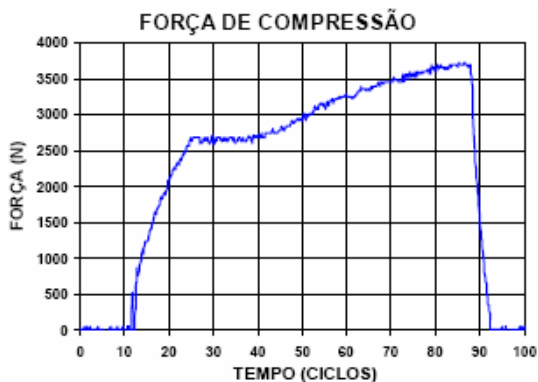


(a) Força no eletrodo = constante

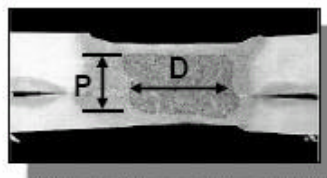


(b) tempo de soldagem = constante

Figura 9. Esquematização da relação tempo de soldagem, força no eletrodo e corrente de soldagem sob a dimensão da lentilha de solda. (a) força constante no eletrodo (b) tempo constante de solda. Segundo Bilha 2004.



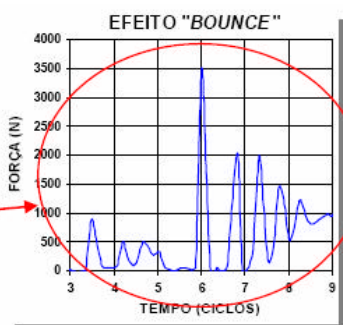
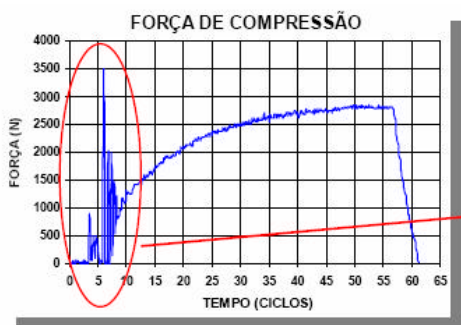
(a)



Força (N)	D(mm)	P(mm)
2000	4,4	2,6
3200	3,4	2,4

(b)

Figura 10 – Influência da força de fechamento ou compressão dos eletrodos vs. tempo de soldagem. Segundo Valdir 2004. (a) registro típico (b) valores da força de compressão vs. diâmetro da lentilha e penetração.



Sem "Bounce"

Nº Pontos	D(mm)	P(mm)
1	4,0	2,5
300	4,5	2,2
800	5,0	2,1

Com "Bounce"

Nº Pontos	D(mm)	P(mm)
1	4,0	2,5
300	4,7	2,1
800	5,3	1,8



Desgaste MAIOR !

Figura 11 – Influência da força de fechamento ou compressão dos eletrodos e o surgimento do fenômeno de um transiente de instabilidade do início do fechamento dos eletrodos "Bounce".

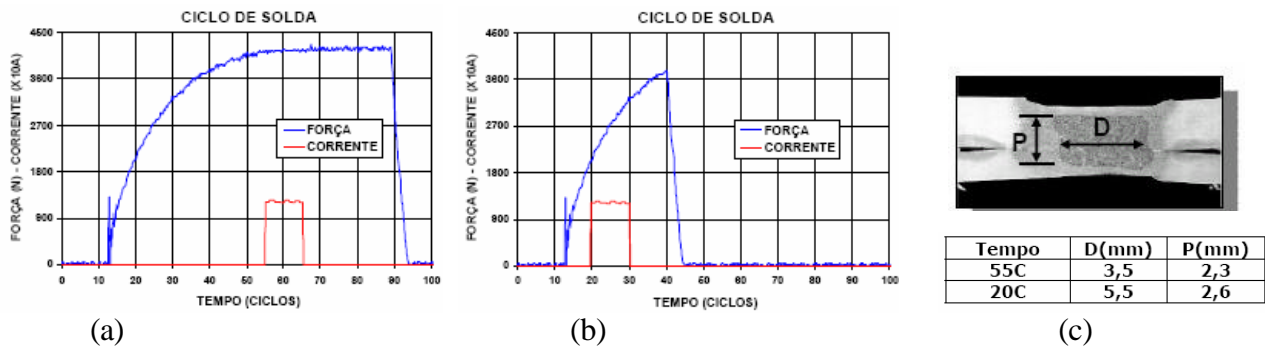


Figura 12 – Influência do tempo de soldagem para uma força constante de fechamento ou compressão dos eletrodos. Segundo Valdir 2004. (a) registro típico (b) valores do tempo de soldagem vs. diâmetro da lentilha e penetração.

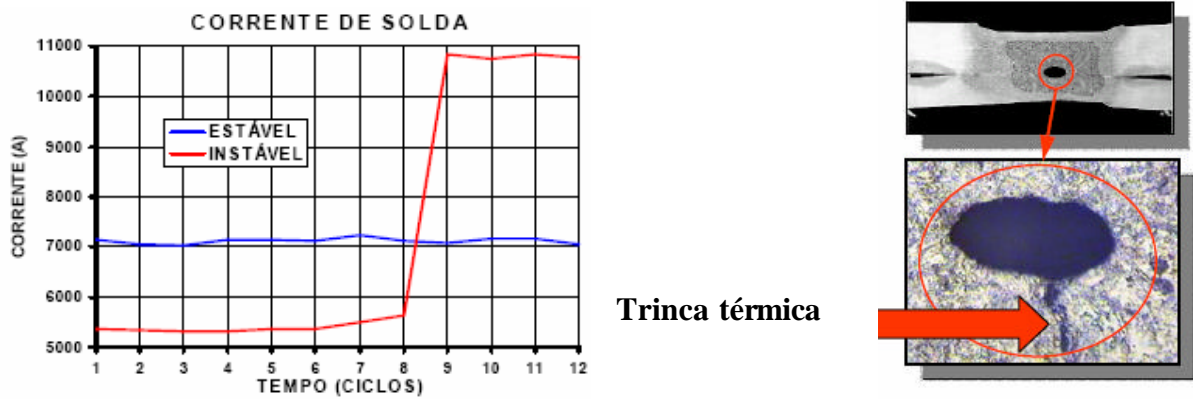


Figura 13 – Efeito da instabilidade da corrente de solda no surgimento de porosidade e trincas térmicas na lentilha de solda. Segundo Valdir 2004

## 5.2 Condições do Eletrodo e Geometria (Figuras 14 e 15)

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.

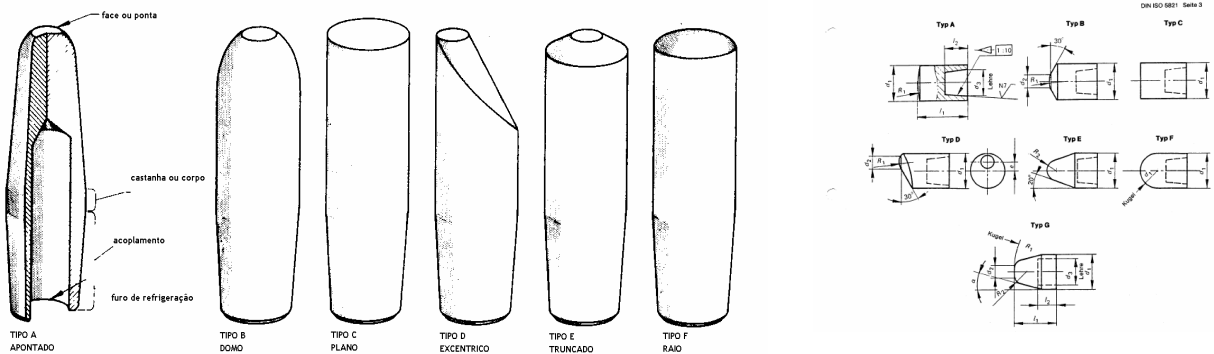


Figura 14 Configurações de face  
Figura 15 - ponta dos eletrodos de solda a ponto ISO 5182 e RWMA.

### 5.3 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 tensão 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.

Tabela 2 - Efeito da vazão de água sobre os atributos geométricos de diâmetro da lentilha e profundidade de penetração em uma solda a ponto.

Vazão, litros/minuto	2,8			1,4		
Nº de pontos	1	600	800	1	350	550
Diâmetro, mm	4,0	4,5	5,0	4,0	4,4	<b>6,0</b>
Penetração, mm	2,5	2,2	2,1	2,5	2,2	<b>0 solda fria</b>

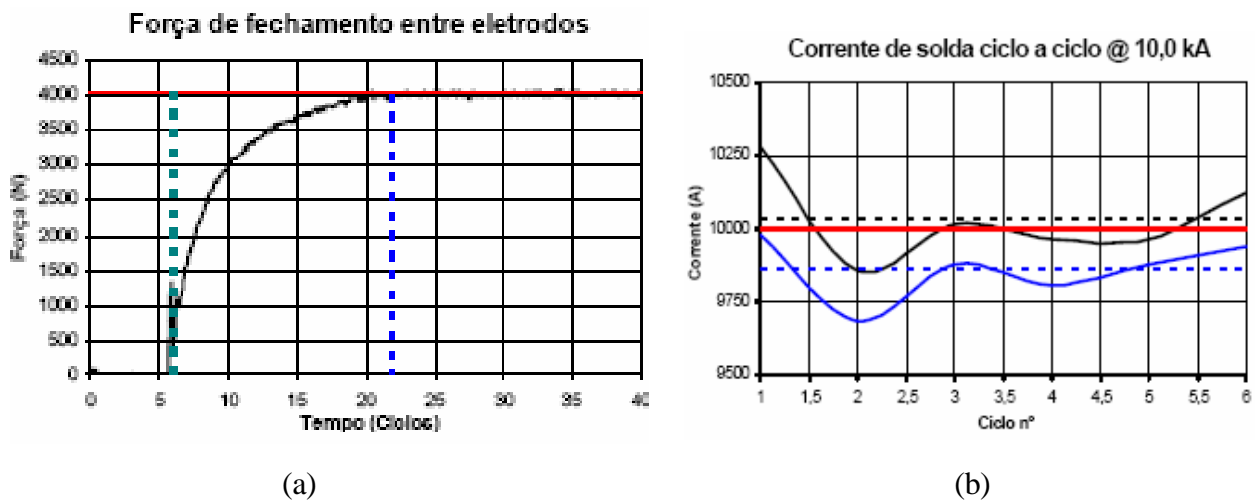


Figura 16 – Correlação força do eletrodo, tempo e corrente em função do tempo de soldagem de um ponto de solda resistiva.

Corrente	D(mm)	P(mm)
7100 A	4,0	2,5
6300 A	3,4	2,4

(a)

FP	D(mm)	P(mm)
0,445	4,0	2,5
0,489	3,6	2,4

(b)

Figura 17 – Relação parâmetros elétricos do processo de soldagem resistiva sobre a geometria da lentilha de solda (a) efeito da variação eficaz da corrente (b) efeito do fator de potência

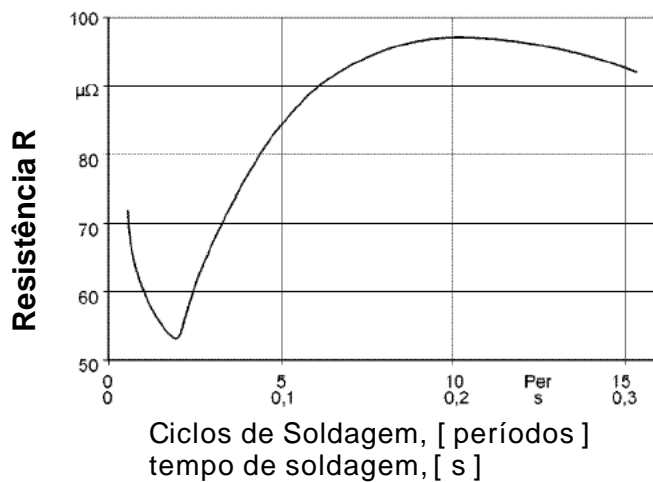


Figura 18 – Corrente em função do tempo de soldagem.

#### 5.4 Fases de correção

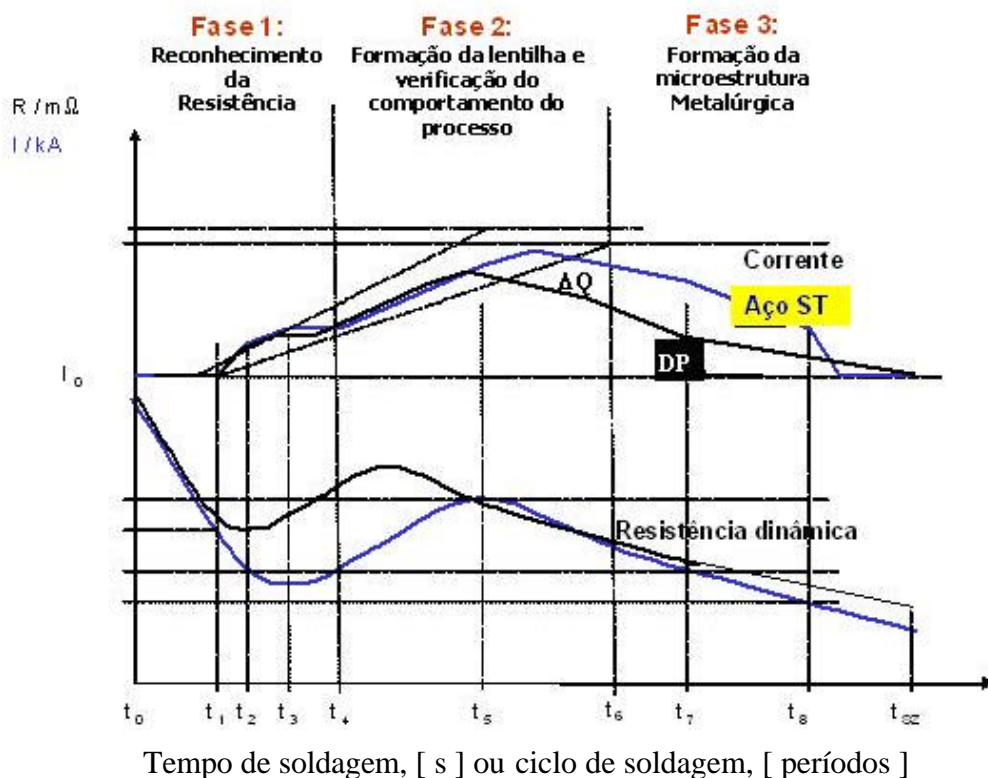


Figura 19. Comportamento da corrente e da resistência vs. tempo e seu comportamento de ajuste em um processo de solda a ponto resistiva, contrastando curvas de evolução do processo para chapas de aço carbono (ST) e para aços dual-phase (DP) usados na engenharia automotiva.

A queda da resistência dinâmica é mais acentuada no aço St. O aço Dp mostra menor queda da resistência, mais rapidamente em relação ao instante  $t_0$ , de modo que a recuperação da resistência é mais rápida. O valor máximo atingido é maior e ocorre em instante anterior ao aço St. Para este, o valor máximo ocorre no instante em que a resistência no aço DP já se encontra em declínio. Na trajetória da corrente, notamos que até o instante de maior resistência para o aço St (já em declínio para o DP) os seus valores são muito próximos para os dois aços. O pico da corrente ocorre instantes após a resistência máxima, e sua queda é mais acentuada no aço St.

## 6. DESCONTINUIDADES NA SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA <sup>(18)</sup>

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.

### 6.1 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).

### 6.2 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 2 abaixo mostra os principais tipos, as causas e os efeitos de algumas condições indesejadas na solda.

Tabela 2 – Relação causa – efeito para as falhas na solda resistiva a ponto de chapas

	<b>Modo de Falha</b>	<b>Causas</b>	<b>Efeitos</b>
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);



## 7. MICROESTRUTURA METALGRÁFICA DE UM PONTO DE SOLDA RESISTIVA

### 7.1 – Componentes Microestruturais de um Ponto de Solda Aprovado

Microestrutura metalográfica básica de um ponto de soldas de boa qualidade consistindo de um núcleo bainítico com grãos colunares direcionados preferencialmente no sentido vertical, contornado por uma zona termicamente afetada (ZTA), diminuindo progressivamente para a microestrutura inalterada do metal de base.

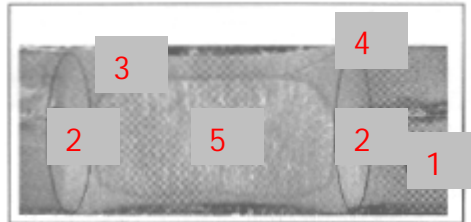


Figura 20 – Seção transversal de um ponto de solda resistiva

- (1) metal base – não termicamente afetado.
- (2) Zona de aquecimento acima de 723 °C (reação eutetóide – formação de perlita)  
- transformações de fase via reação eutetóide
- (3) Recristalização do metal de base encruado
- (4) Linha de fusão da lentilha
- (5) Zona fundida, solidificação com grãos orientados.

### 7.2 – Ponto Colado ou Solto

Este efeito ocorre devido às temperaturas no centro da chapa não atingirem a temperatura para fusão das mesmas, provocada por uma área de contato do eletrodo com alta resistência à passagem da corrente, ou a falta da mesma. O aspecto metalográfico deste defeito pode ser visto na figura 21.



Figura 21 – aspecto metalográfico de um ponto colado ou solto.

### 7.2 – Lentilha pequena / Falha no ponto

Isso pode ocorrer em virtude de diversos fatores como: alta corrente e baixo tempo de solda, o que provoca um aquecimento muito rápido e localizado, não permitindo a correta formação da lentilha; apontamento incorreto dos eletrodos, que acarreta a diminuição da sua área de contato, afetando a passagem da corrente e pressão exercida pelos mesmos; assentamento das chapas ruim, o que afeta a resistência na interface, entre outros.



Figura 22 – Falha no ponto de solda



Figura 23 – Lentilha pequena



### 7.3 – Ponto de solda queimado

Um ponto de solda queimado é um defeito surgido em geral devido uma forte endentação (força no eletrodo) ou corrente excessiva, e durante sua formação tem se uma forte tendência a surgirem microtrincas ou fissuras superficiais. Análise mais preocupante destas trincas fica por conta de que, apesar das mesmas serem relevantes se forem consideradas em função do ensaio metalográfico, não são possíveis de serem detectadas pelos parâmetros comumente medidos no ensaio de tração, muito menos pelos ensaios de dobramento ou destacamento com martelo e talhadeira.

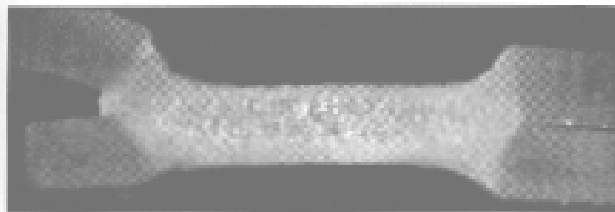


Figura 24 - Seção transversal de ponto de solda queimado por excessiva endentação.



Figura 25 – Superfície do ponto de solda resistiva apresentando microtrincas.

### 7.4 Profundidade de Fusão<sup>(20)</sup>

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.

## 8. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Foram feitas doze peças – Figura 26 – para serem utilizadas como corpos de prova, com dimensões baseadas nas definidas por Zhou et al<sup>(17)</sup>, conforme mostrado abaixo.

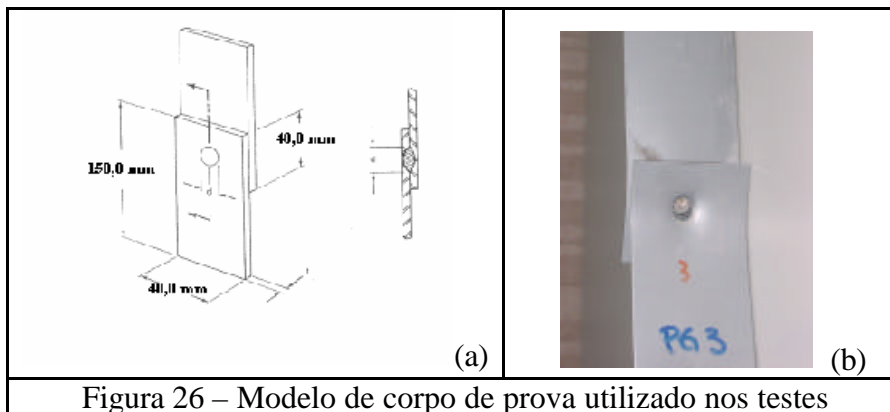


Figura 26 – Modelo de corpo de prova utilizado nos testes

Com isso, foram ensaiados seis corpos de prova feitos 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 *galvaneal* (zinco – ferro) nas duas faces, espessura de 0,65 mm, especificação BGA OL 45A45A GMB EMS 1508 BH, conforme tabela 2.

Tabela 3 – 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<0,9mm	t=0,9mm		t = 0,6 mm		t = 0,6 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 três programas de solda, com os parâmetros abaixo mostrados na tabela 3.

Tabela 4 – Programas de soldagem

Programa de solda 1		Programa de solda 2		Programa de solda 3	
<b>Pré-pressão</b>	650 ms	<b>Pré-pressão</b>	700 ms	<b>Pré-pressão</b>	700 ms
<b>1ª solda</b>	300 ms / 4,0 kA	<b>1ª solda</b>	280 ms / 4,0 kA	<b>1ª solda</b>	200 ms / 4,0 kA
<b>1º resfriamento</b>	0	<b>1º resfriamento</b>	0	<b>1º resfriamento</b>	0
<b>Ramp-up</b>	20 ms / 3,0 kA	<b>Ramp-up</b>	20 ms / 3,0 kA	<b>Ramp-up</b>	20 ms / 3,0 kA
<b>2ª solda</b>	220 ms / 10,0 kA	<b>2ª solda</b>	300 ms / 10,0 kA	<b>2ª solda</b>	260 ms / 8,2 kA
<b>Ramp-down</b>	20 ms / 3,0 kA	<b>Ramp-down</b>	20 ms / 3,0 kA	<b>Ramp-down</b>	20 ms / 3,0 kA
<b>2º resfriamento</b>	20	<b>2º resfriamento</b>	0 ms	<b>2º resfriamento</b>	0
<b>Força aplicada</b>	3500 N	<b>Força aplicada</b>	2800 N	<b>Força aplicada</b>	1900 N

Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração das juntas soldadas conforme norma ABNT

CP	Progr.de Solda	Esp. [mm]	Largura [mm]	Área [mm <sup>2</sup> ]	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

## 9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 9.1 Ensaio de tração

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

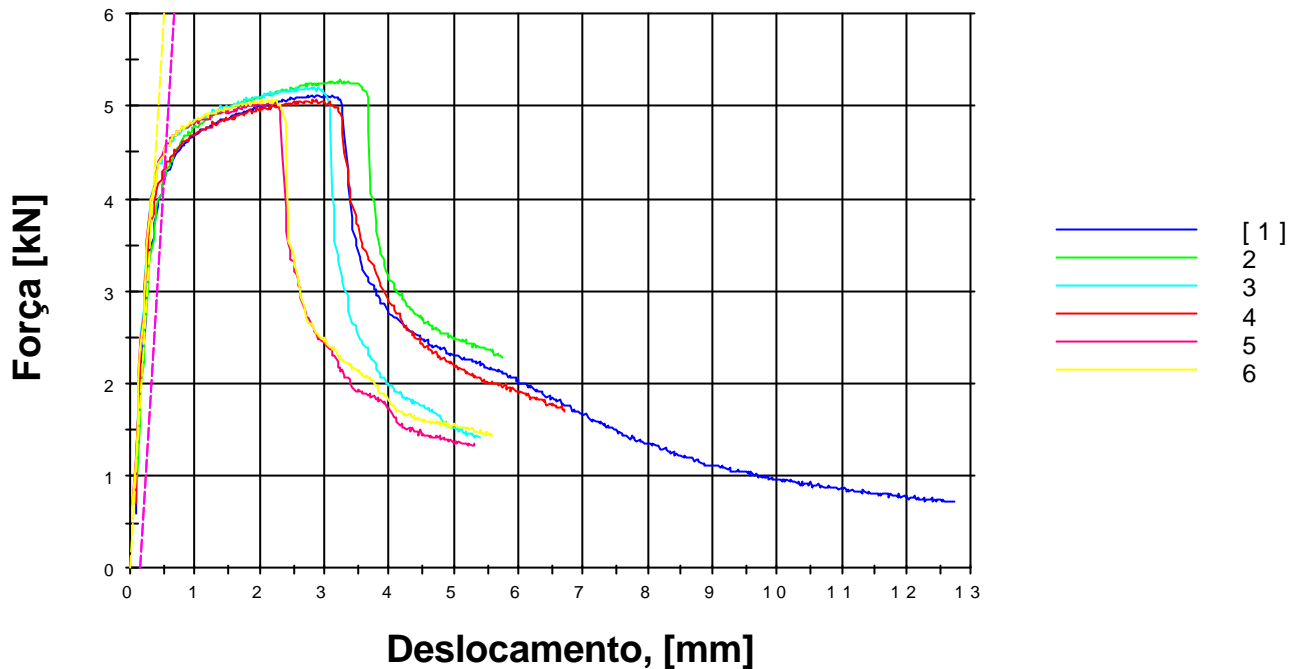


Figura 26 – Curva força deslocamento para os ensaios realizados

Os valores da carga máxima das amostras foram próximos, o que indica que a influência da variação da força de soldagem na resistência mecânica foi pequena, desde que mantidos fixos os demais parâmetros. Entretanto, a ductilidade (avaliada pelo deslocamento ocorrido até o momento da ruptura, em milímetros) mostrou-se sensível, indicando que em condições de uso essa solda pode apresentar comportamentos diferentes. Esses valores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resistência Mecânica e Ductilidade da junta soldada

CP	1	2	3	4	5	6
P <sub>máx.</sub> [kN]	5,13	5,30	5,20	5,09	5,07	5,08
U <sub>máx.</sub> [mm]	3,26	3,69	3,09	3,26	2,36	2,41

Podemos observar que o comportamento das juntas soldadas refletem a força aplicada durante a soldagem, ou seja, os valores decrescem na medida em que a força aplicada diminui. Verificamos que os maiores valores são dos corpos de prova 1 e 2, soldados com o Programa 1, em que utilizamos a força de 3500 N. Os valores intermediários são dos corpos 3 e 4, soldados com o Programa 2 (força de 2800 N), e conseqüentemente, os menores valores são dos corpos 5 e 6, soldados com o programa 3 (força de 1900 N).

## 9.2 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 27.

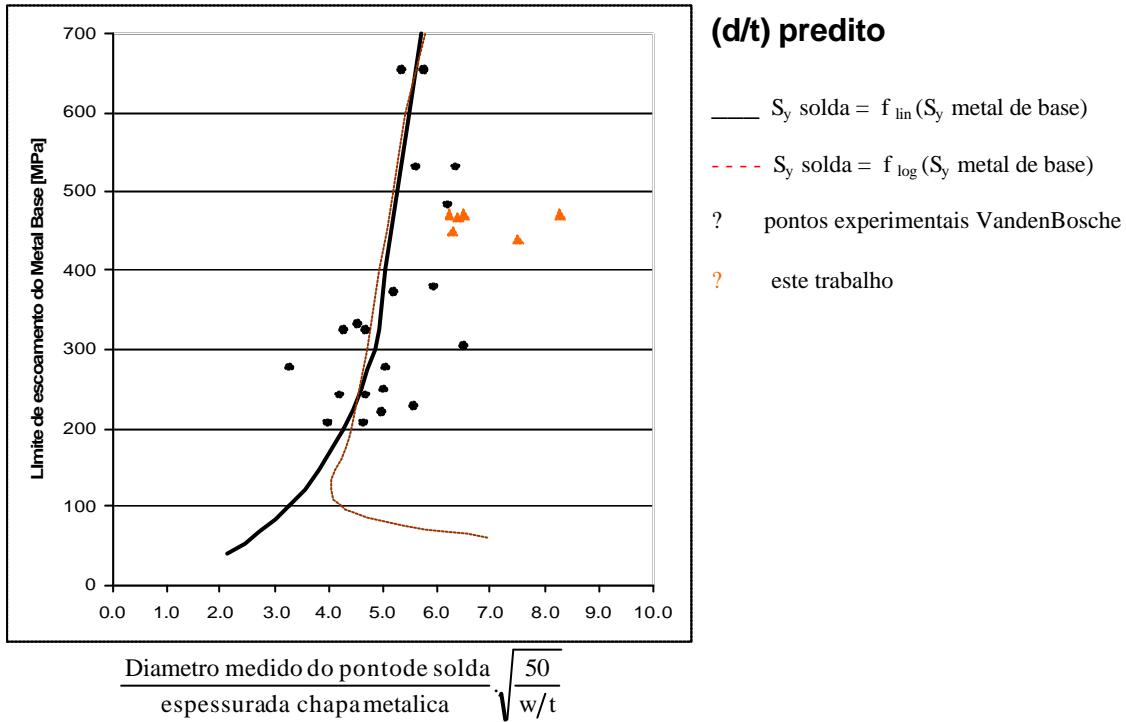


Figura 27– Comparação entre os dados experimentais e o desempenho predito pelo modelo.

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. A relação entre  $S_{y\text{metal de base}}$  e  $S_{y\text{ solda}}$  é estabelecida através de uma análise de regressão. A curva resultante da regressão linear é definida por:

$$S_{yWM} = 1,54 * S_{yPM} + 572 \text{ MPA} \quad (15)$$

Através de uma regressão exponencial, é transformada em

$$S_{yPM} = 1,54 * e^{1,7 * 10^{-3} * S_{yPM}} \quad (16)$$

Essa equação, por sua vez, pode ser transformada na forma logarítmica:

$$S_{yPM} = \frac{\ln S_{yPM} - 3,92}{1,69 * 10^{-3}} \quad (17)$$

A figura 27 revela uma tendência nas informações fornecidas pelos testes que mostra o grau de correlação com as relações preditas. A performance de  $(d/t)_c$  gerado da regressão exponencial de  $S_{yPM}$  e  $S_{yWM}$  não é inteiramente válida já que é prevista uma alteração na performance da solda na

região de limite de escoamento abaixo de 200 MPa. Entretanto, esse tipo de fenômeno não foi observado em nenhuma análise metalográfica das ligas.

Por essa razão deverá ser assumido que existe uma relação linear entre o limite de escoamento do metal base e do metal soldado, e que essa curva é o melhor modelo da performance da solda.

Assim como o grau de correlação entre o gerador de  $(d/t)_c$  e os dados dos ensaios, é óbvio que a relação diâmetro-espessura requerida para causar falha na ZTA é sub-predita.

A equação

$$\left(\frac{d}{t}\right)_c = \left(1,5 \cdot \frac{S_{YPM} \cdot w}{S_{YWM} \cdot t}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

deve ser modificada para fazer uma relação  $(d/t)_c$  mais conservativa, enquanto é adicionado à ela um maior nível de confiabilidade. Modificando  $(d/t)_c$  de maneira que a relação  $d/t$  possa ser realmente predita, dentro de um determinado grau de probabilidade, requer simplesmente uma comparação direta entre o  $(d/t)_M$  vindo dos dados experimentais e do  $(d/t)_c$  calculado para os mesmos testes, utilizando  $(w/t)_M$  e  $S_{YPM} \cdot S_{YWM}$  gerados da equação 15. A plotagem de  $(d/t)_M$  versus  $(d/t)_c$  deverá resultar em correspondência unitária, caso a teoria esteja realmente correta. Entretanto, a regressão linear desses valores produz uma relação mais aproximada à

$$\left(\frac{d}{t}\right)_M = 0,6 \cdot \left(\frac{d}{t}\right)_c + 1,7 \quad (19)$$

com os valores dos dados experimentais distribuídos normalmente sobre essa linha.

### 9.3 Modelo preditivo da relação diâmetro-espessura medida em função da predita

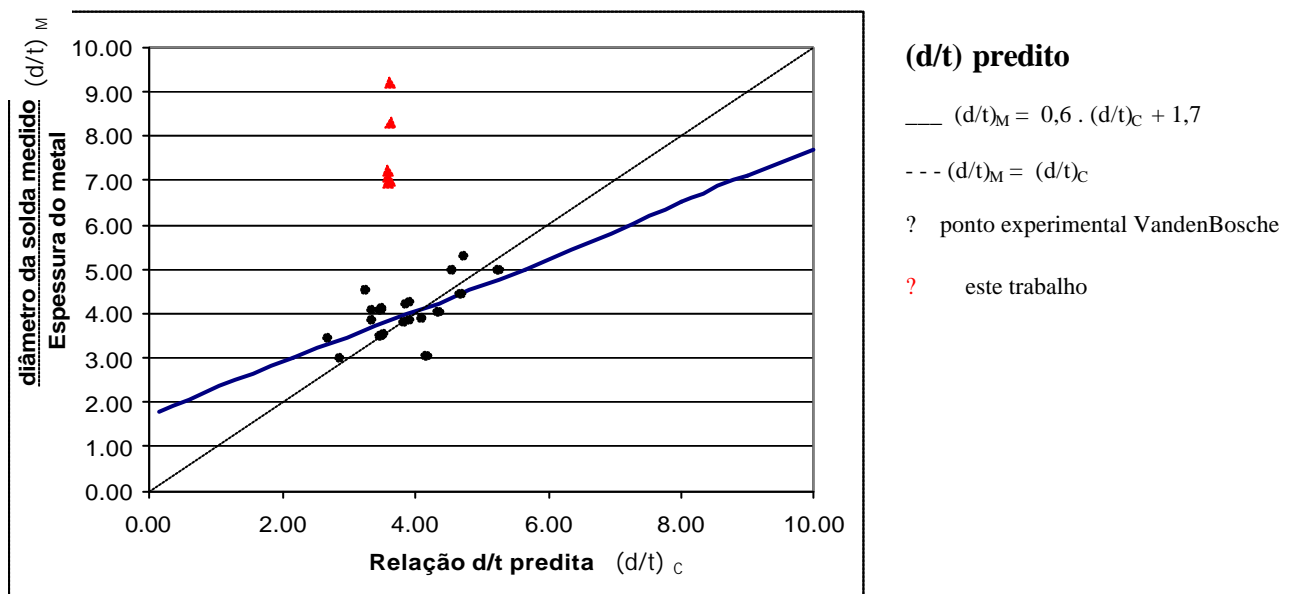


Figura 28 – Comparação entre os a relação  $d/t$  predita e a medida nos testes

Do mesmo modo, o posicionamento dos resultados na Figura 28 nos indica que, apesar de maiores que os mostrados no modelo, são coerentes na relação  $d/t$  predita, reforçando a veracidade do modelo.

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

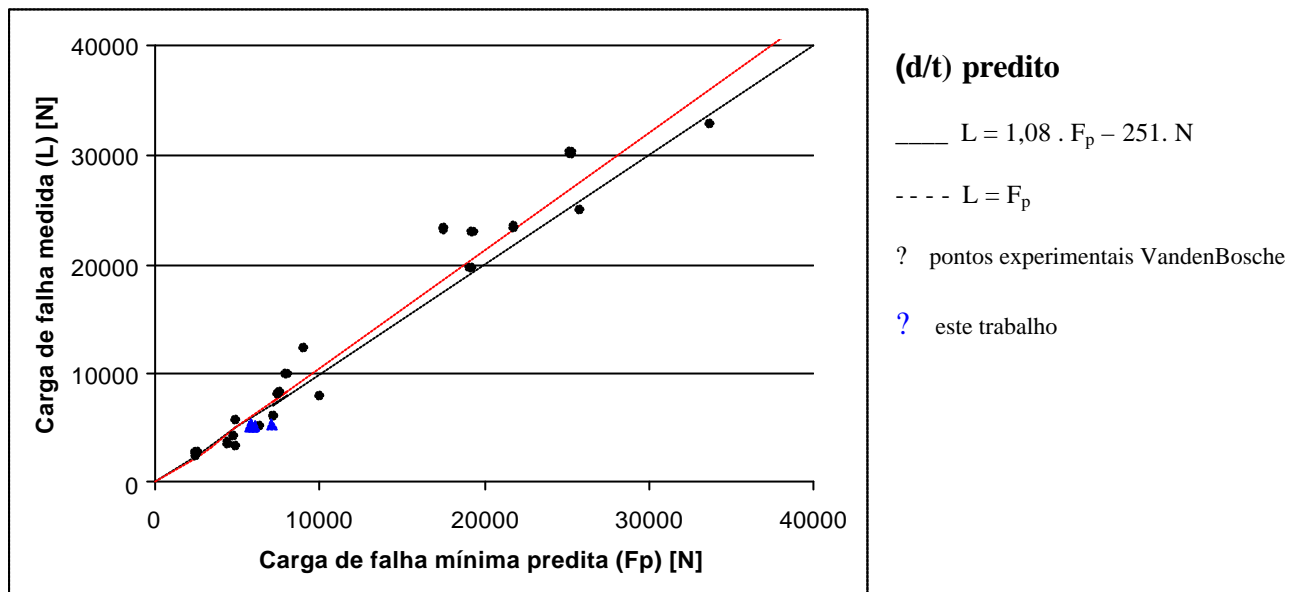


Figura 29 – Comparação entre a carga de falha mínima predita e a medida nos testes.

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 VandenBosche se ajusta ao material e às condições em que realizamos os testes.

## 9.5 Modelo de um Ponto de Solda através da Análise de Elementos Finitos

Existem outras maneiras de predição da falha de um ponto de solda, como por exemplo, o método dos elementos finitos. Existem dois tipos de modelos de pontos de solda para cálculo das tensões na análise de elementos finitos: modelos detalhados e modelos simplificados. Os modelos detalhados normalmente consistem em um grande número de elementos sólidos para um simples ponto, e as placas conectadas pelo ponto de solda são também modeladas por elementos sólidos. Os modelos simplificados normalmente contêm, em contraste, um número limitado de barras e/ou elementos de barras rígidas e as placas são modeladas como elementos de casca.

Os modelos detalhados podem fornecer rigidez e tensões confiáveis, mas são impraticáveis para estruturas com vários milhares de pontos, como uma carroceria automotiva. Os modelos simplificados são atrativos para um grande número de estruturas e usualmente são capazes de representar a rigidez, mas as tensões não são ainda satisfatórias devido à forma simples das malhas.

O modelo consiste em um modelo de raios sem o uso de elementos sólidos (Figura 30), onde o ponto de solda é modelado por uma barra cilíndrica com o diâmetro da lentilha de solda e conectada através de elementos rígidos dentro do modelo em casca. As barras rígidas transferem três graus de translação e um grau de rotação, referentes à um sistema de coordenadas localizado no centro do modelo

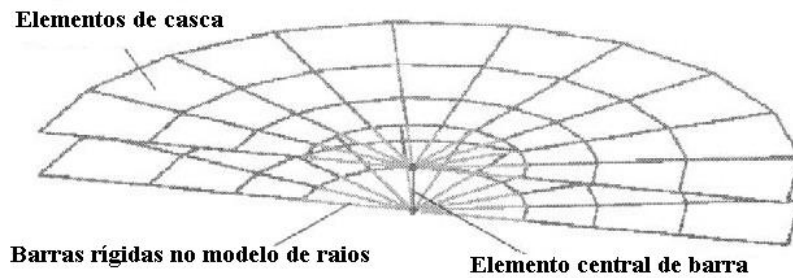


Figura 30 – Modelo Simples de um Ponto de Solda pela Análise de Elementos Finitos

Os efeitos não lineares como a plasticidade, grandes deformações e contatos entre as chapas não são considerados.

## 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 27, 28 e 29:

1. Pode ser visto na Figura 26 (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.

## 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] Annual Report 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] American Welding Society, 2003. Recommended Practice for Automotive Resistance Welding.AWS D8.7 (Draft).
- [5] Spinella, D. J.1994. Using fuzzy logic to determine operating parameters for resistance spot welding of aluminum. Sheet Metal Welding Conference VI, Detroit, Mich.
- [6] Newton, C. J., Browne, D. J., Thornton, M. C., Boomer, D. R., and Keay, B. F. 1994. The fundamentals of resistance spot welding aluminum. Sheet Metal Welding Conference VI, Detroit, Mich.



- [7] Keller, F., & Smith, D. W. 1944. Correlation of the strength and structure of spot welds in aluminum alloys. *Welding Journal* 23(1): 23-s to 26-s.
- [8] McMaster, R. C., & Lindrall, F. C. 1946. The interpretation of radiographs of spot-welds in alclad 24S-T and 75S-T aluminum alloys. *Welding Journal* 25(8): 707-s to 723-s.
- [9] Heuschkel, J. 1952. The expression of spot-weld properties. *Welding Journal* 31(10): 931-s to 943-s.
- [10] Sawhill, J. M., & Baker, J. C. 1980. Spot weldability of high-strength sheet steels. *Welding Journal* 59(1): 19-s to 30-s
- [11] Thornton, P. M., Krause, A. R., & Davies, R. G. 1996. The aluminum spot-weld. *Welding Journal* 75(3): 101-s to 108-s.
- [12] Ewing, K. W., Cheresch, M., Thompson, R., & Kukucheck, P. 1982. Static and impact strengths of spot-welded HSLA and low carbon steel joints. SAE Paper 820281.
- [13] Dickson, D. 1981. Welding in the automotive industry. Committee of Sheet Steel Producers, Report 81-5, AISI.
- [14] Waldir, 2004, II Encontro Soldares, Instituto de Engenharia, Sao Paulo, outubro 2004.
- [15] Bilha, F. , II Enconro Soldares, Instituto de Engenharia, Sao Paulo, outubro 2004.
- [16] Stocco, D. III Simpósio Internacional da VDI sobre tecnologia de Automotivos, São Paulo - SP