

$$Q = K \times R \times I^2 \times T$$

Onde: Q = Calor gerado K = Constante de proporcionalidade R = Resistência elétrica I = Intensidade de Corrente T = Tempo de solda

2.2 Resistências elétricas

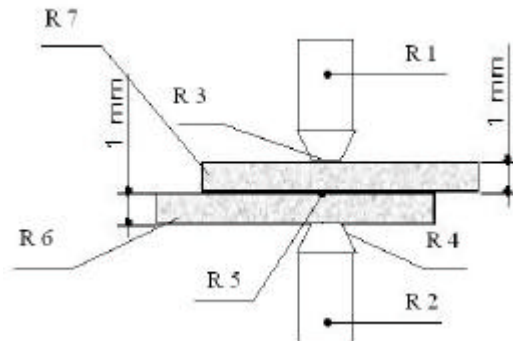


Figura 5 .Resistências Elétricas

Observando a figura, temos :

R₁ e R₂ : Resistência elétrica dos próprios eletrodos

R₃ e R₄ : Resistência elétrica que se forma nos contatos peças –eletrodos

R₅ : Resistência elétrica que se forma no contato entre as chapas (peças)

R₆ e R₇ : Resistência elétrica das próprias chapas (peças).

O valor de R₅ deve ser o maior de todos, portanto é nesta região que há maior geração de calor por efeito Joule e conseqüentemente ocorre a fusão e a formação da lentilha de solda . O valor de R₃ e R₄ deve ser o mais baixo possível e é fortemente aumentado quando há incrustações de óxidos e tintas. Isto provoca o superaquecimento na região de contato eletrodo – peça produzindo soldas explosivas, fusão do eletrodo e conseqüentemente introdução deste no ponto de solda, podendo provocar fragilização e trincas. As referidas incrustações provocam ainda a aderência do eletrodo à chapa, além do seu amolecimento e desgaste.

2.3 . Formação da Lentilha de Solda

O diâmetro ou forma da lentilha feito por esse processo, depende do diâmetro da superfície de contato do eletrodo (superior ou inferior), do calor desenvolvido durante o tempo de passagem da corrente elétrica e da pressão aplicada.

De acordo com a espessura das peças a serem soldadas, o diâmetro da lentilha e a pressão aplicada devem ser maiores, para se obter uma resistência mecânica proporcional à seção do corte. As ilustrações mostram a seqüência de solda em uma peça.

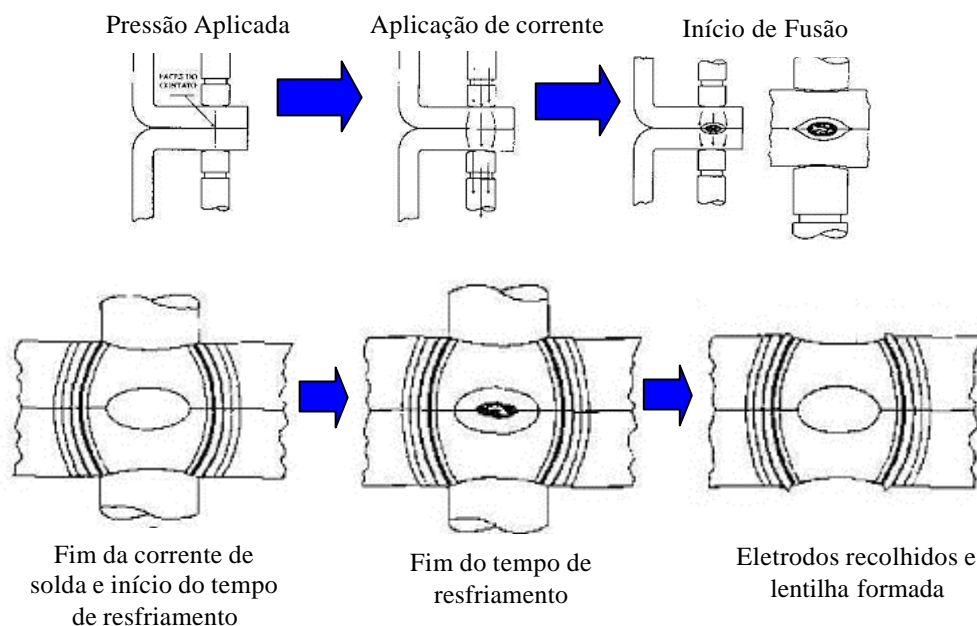


Figura 4 . Esquema do processo de soldagem

3. Distribuição de temperaturas e Zonas Metalúrgicas

A geração de calor conforme descrito no item 2.2 , produz o perfil de temperatura como mostra a fig (6), onde é possível observar uma faixa de temperaturas variando de 200° C a 1490°.

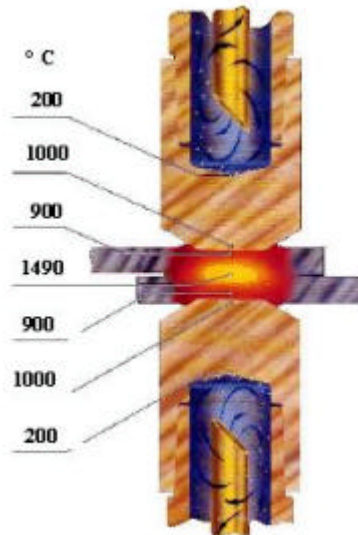


Figura 6 .Distribuição de temperaturas

A intensidade da corrente gera calor nas superfícies de contato das chapas , devido ao aumento da resistência à passagem da corrente, oferecida pelas superfícies irregulares e oxidadas. O calor desenvolvido é retido nesse ponto e são atingidas temperaturas elevadas, causando a fusão das chapas a serem soldadas. Pode ser observado que a temperatura máxima e o calor ocorrem nas interfaces das chapas e que diminuem rapidamente para os materiais e as interfaces dos eletrodos, onde há um ligeiro aumento de temperatura.

Com isso será formada uma “lentilha” de solda, termo que utilizaremos a partir de agora para definir a região onde houve fusão entre as chapas.

De acordo com os diagramas de resfriamento, perceberemos que será formada uma estrutura predominantemente bainítica, como veremos no item (5).

3. Ultra – Som

O ultra-som tem larga utilização em todos os ramos de indústria que necessitam assegurar a qualquer custo a qualidade de seus produtos. Com o ultra-som é possível verificar qualidade de soldas, medir espessuras diversas, controlar vasos de pressão, fadiga em asas de aeronaves e centenas de outras aplicações. Um grande exemplo são as indústrias de extração e refino de petróleo, que necessitam constantemente monitorar seus dutos e reservatórios de armazenamento, para evitar qualquer risco de vazamento. Uma empresa referência desta técnica no Brasil, por exemplo é a Petrobrás.

Como todo processo, a técnica de ultra-som convencional apresenta algumas limitações, sendo uma delas a existência de uma região de grandes turbulências na saída do transdutor, conhecida no meio, como zona morta. Com isso, a medição de pequenas espessuras e a detecção de descontinuidades nas proximidades da superfície são comprometidas, inviabilizando totalmente a medição de pontos de solda, onde na maioria das vezes as espessuras estão na faixa de 1 a 3 mm .



Figura 7. Sonograma característico de transdutor convencional

Com esse panorama, o objetivo então passou a ser estabilizar essa região de grandes turbulências, para que os equipamentos pudessem ter estabilidade de medida nessa região. Para isso, seria necessário desenvolver um novo transdutor, assim como um software dedicado e exclusivo para esse controle.

Foi desenvolvido, então, após uma série de estudos, um novo transdutor e um software, e os testes começaram a ser realizados.

A grande inovação foi a construção desse novo transdutor, que tem como diferencial a colocação de uma coluna d'água entre o cristal piezoelétrico e a peça a ser testada. Além disso, na face de contato do transdutor foi colocada uma membrana elástica que tem como função se amoldar a forma côncava do ponto de solda, direcionando o feixe sônico de maneira mais uniforme.

A função da coluna d'água basicamente é eliminar a região de grandes turbulências do som. Com isso, conseguimos efetuar medições de pequenas espessuras a partir da face de contato da membrana elástica.

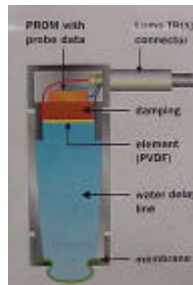


Figura 8. Transdutor Solda a Ponto

3.1. Interpretação dos Resultados

Os resultados gráficos indicam o tipo de descontinuidade encontrada no ponto de solda em questão, e é fundamental que os operadores do equipamento tenham total compreensão dos gráficos, e que variáveis estão envolvidas naquele sinal.

As figs. (9,10,11,12, e 13) representam exemplos de gráficos do equipamento de ultra-som, onde o objetivo será determinar que tipo de efeito metalúrgico causou o sinal.

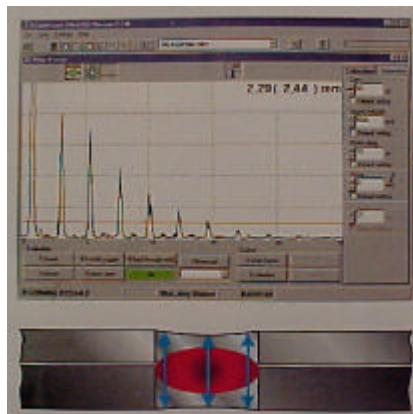


Figura 09 .Lentilha em ordem

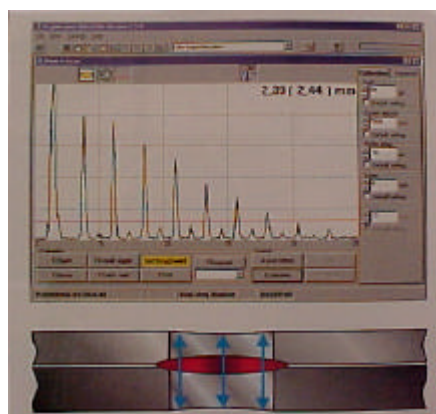


Figura 10 .Ponto colado

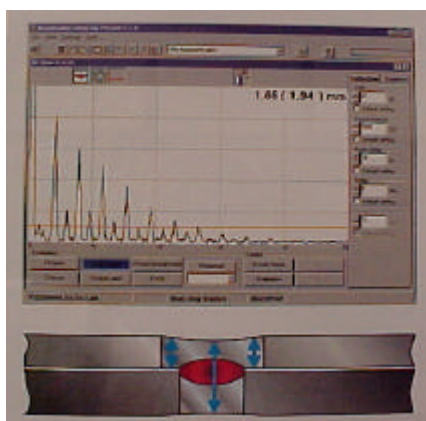


Figura 11 .Lentilha pequena



Figura 12 .Ponto solto

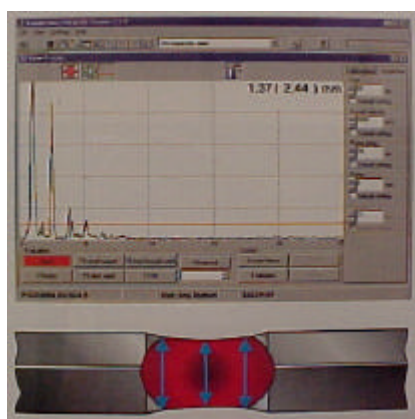


Figura 13 . Ponto Queimado

Atualmente podemos afirmar com certeza que todos os operadores da DaimlerChrysler, por exemplo, conseguem identificar e segregar os pontos considerados não em ordem, de acordo com o tipo de critério adotado pela empresa.

O grande diferencial está, portanto no fato do operador ter conhecimento do tipo de fenômeno metalúrgico que envolveu a criação deste sinal, e para isso foi então acionado o Laboratório de Ensaio Não Destrutivo, numa parceria com o Laboratório Metalográfico do Centro Tecnológico da Qualidade da DaimlerChrysler, para que então pudesse ser feito um trabalho de parceria conforme descrevemos abaixo.

4. Materiais e Métodos

No Laboratório, tanto quanto na prática são utilizadas chapas estampadas, normalmente aço baixo carbono, soldadas por resistência à ponto, em máquinas de solda microprocessadas, utilizando geralmente eletrodos de ponta cônica, ligas de Cu (mais utilizadas Cu – Cr – Zr e Cu – Cr).

Os materiais de ensaio são o ultra-som UPI – 50, fabricante Scanmaster, digital, cabos de fibra óptica e transdutores especiais com coluna d'água, frequência de 20 MHz, e diâmetros variados.

Os pontos de solda foram seccionados transversalmente através de corte abrasivo, preparados metalograficamente por procedimentos usuais e atacados com solução de 98% de volume de álcool e 2% de volume de HNO_3 . As amostras foram analisadas metalograficamente em um microscópio óptico, com até 1000 X de aumento.

O procedimento utilizado foi a pré- programação do equipamento, utilizando padrões internacionais e as informações das unidades da empresa que já possuíam este equipamento. Após esta programação, os subconjuntos soldados foram ensaiados com o ultra-som, tendo seus relatórios e gráficos salvos e, após devidamente identificados, foram levados ao laboratório metalográfico para posterior corte e análise.

Os resultados do ensaio metalográfico foram preservados para análise e equalização dos parâmetros de soldagem e do equipamento, processo redundante até que o processo se estabilize.

5. Resultados e Discussão

Conforme fig (14) , a estrutura metalúrgica básica de um ponto de solda em ordem consiste em um núcleo de estrutura baínítica, com grãos colunares direcionados preferencialmente no sentido vertical, contornado por uma região termicamente alterada, diminuindo progressivamente para uma estrutura praticamente inalterada junto às superfícies das chapas.

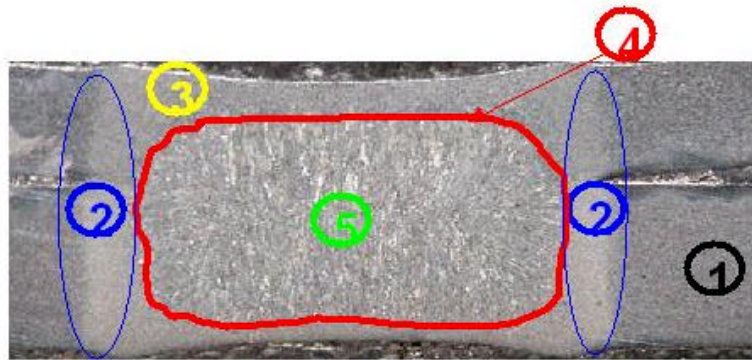


Figura 14 . Seção transversal de em ponto de solda .(1) Material da chapa não afetado pelo calor; (2) Zona de aquecimento acima de 723°C , material com início de alterações na microestrutura; (3) Recristalização do metal base encruado; (4) Linha de fusão da lentilha; (5) Zona fundida, cristalização orientada.

Nos itens a seguir veremos os resultados metalográficos de cada ponto testado e sua relação com os gráficos mostrados anteriormente.

5.1. Ponto Colado/Ponto Solto

Mostrados nas figs (10) e (12) respectivamente, mostram na tela uma longa sequência de ecos múltiplos. No ponto colado, os ecos múltiplos são de um ponto a princípio em ordem, mas com baixa atenuação do som . já o ponto solto mostra uma longa sequência de ecos, mas com espessura de apenas uma das chapas a serem soldadas. Este efeito acontece devido às temperaturas no centro das chapas não atingirem a temperatura para a fusão das mesmas, provocada por uma área de contato do eletrodo com alta resistência à passagem da corrente, ou a falta da mesma. O efeito metalúrgico pode ser observado na fig (15).



Figura 15. Ponto Colado

5.2. Lentilha Pequena/Falha no Ponto

Da fig (11), mostra na tela uma sequência de ecos da espessura do ponto, intercalados por pequenos ecos de espessura de uma única chapa. A disposição dos ecos intermediários é popularmente conhecida como “chapéu de Napoleão”. O efeito metalúrgico pode ser observado nas figs (16) e (17) .

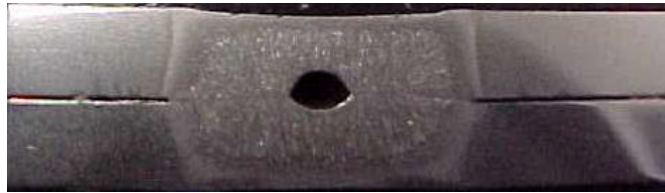


Figura 16. Falha no Ponto de Solda



Figura 17. Lentilha pequena

5.3. Ponto Bom

Na fig (09) , é definido com uma curta sequência de ecos, com boa atenuação de som. A estrutura é mostrada abaixo



Figura 18. Ponto de solda em ordem

5.4 . Ponto de Solda Queimado

Da fig (13) , caracteriza-se como um ponto onde há uma grande região fundida da lentilha de solda, aumentando a capacidade de absorção do som , resultando um gráfico com uma curta sequência de ecos. Uma outra possibilidade é a presença de um gráfico muito semelhante ao de um ponto bom, porém com uma indentação superior a 20% da soma das espessuras das chapas .

Este foi o foco do estudo, na realidade, pois é um defeito que usualmente não era detectado nos antigos ensaios de martelo e talhadeira, ou até pelos ensaios de tração, ainda utilizados .Devido a sua excessiva corrente ou indentação, durante a sua formação existe o sério risco de este ponto apresentar trincas superficiais.



Figura 19 .Secção transversal de Ponto de Solda Queimado por excessiva indentação

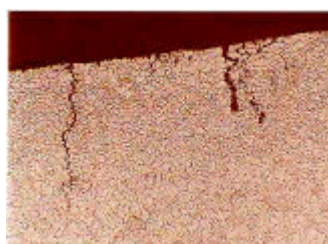


Figura 20. Superfície do ponto de solda apresentando microtrincas

A análise mais preocupante destas trincas fica por conta que, apesar de as mesmas serem relevantes se forem consideradas sob a ótica do ensaio metalográfico, não são percebidas nos ensaios de tração, muito menos nos ensaios de martelo e talhadeira.

No ultra-som, esta indicação também não aparece, pois estas trincas se localizam paralelas ao feixe sônico, porém podemos determinar a presença destas trincas de maneira indireta, utilizando-se das informações que a máquina nos oferece como ponto queimado.

Este é o grande ponto de evolução do ultra-som. Existem diversas vertentes que defendem que a utilização do ponto queimado normalmente, sob a alegação de que existe a fusão do ponto de solda, o que realmente é verdade. É importante ressaltar que realmente estas trincas não afetariam em um primeiro momento a qualidade do ponto de solda em questão. Por um outro lado, quando estamos falando de um componente veicular, por exemplo, foco do nosso estudo, temos que pensar que estas estruturas soldadas sofrem esforços em múltiplos sentidos, e a o termo fadiga passa a ser fator decisivo durante o projeto, e a posterior fabricação destes componentes.

Assim, o autor realizou um experimento visando comparar o efeito destas trincas no que diz à respeito da vida em fadiga dos componentes soldados, chegando à conclusão que as trincas relativas ao ponto queimado amortecem a vida do componente em cerca de 40% (vide tab. 1), valor preocupante, considerando que muitos dos pontos de solda aplicados na estrutura são considerados pontos de segurança do veículo. Estes pontos passariam despercebidos se não utilizarmos a técnica do ultra-som com muito critério.

O experimento foi realizado no Centro de Laboratórios Mecânicos da UNIFEI, utilizando uma máquina MTS de ensaios de tração, adaptada com um software de fadiga, e se encontra em fase final de tabulação de dados, sendo possível apenas fornecer dados preliminares (dados atualizados até Março/2002).

	Até 20% indentação (Parâmetro A)	Mais de 20% indentação (Parâmetro B)
Limite de resistência à tração	25000 N	25000 N
Fadiga (0 – 14 KN até ruptura)	24663 ciclos	14871 ciclos

Tabela 1. Resultados experimentais

6. Conclusões

Enfim, com este respectivo trabalho podemos chegar as seguintes conclusões:

- Não basta aos operadores ter apenas um conhecimento na técnica de ultra-som, mas também entender e “enxergar” a metalurgia do ponto de solda, fazendo com que os gráficos na tela passem a ter um significado mais amplo do que “Bom” ou “Ruim”. Com isso decisões mais rápidas possam ser tomadas em campo, diminuindo consideravelmente os custos de refugo e retrabalho, ponto fundamental hoje, se considerarmos a velocidade frenética das linhas de produção.

- Através do Ultra - Som é possível mapear quase todos as discontinuidades existentes em pontos de solda, mesmo indiretamente (dependendo do nível de treinamento e uniformidade da produção), onde a confirmação vem sempre de um ensaio metalográfico, como apoio. Por isso, é fundamental na opinião dos autores que, exista, no mínimo na fase de implantação da técnica, uma estrutura de apoio aos ensaios, que servirá tanto como suporte técnico, quanto treinamento aos operadores. Com isso é possível certificar e atestar a confiabilidade do equipamento.

- Através do Ensaio de Ultra – Som é possível detectar uma série de discontinuidades que só seriam vistas ao microscópio, aumentando o grau de confiabilidade do equipamento e se aproximando muito dos dados teóricos fornecidos em tabelas de fabricantes.

	Martelo e Talhadeira	Metalografia, Tração	Ultra-som
Custo / Veículo (US\$)	5150	7270	1210
Deteção de defeitos (%)	20	99	95

Tabela 2. Valores Médios do mercado Norte – Americano – 1999 – AEI – set 2001

7. Agradecimentos

À DaimlerChrysler do Brasil Ltda, pelo suporte financeiro e autorização para a divulgação do trabalho, ao Centro Unversitário UNIFEI pelo apoio técnico aos ensaios, e em especial aos srs. Rodrigo Magnabosco, Mauro de Souza

Paraíso e a toda equipe de Técnicos e Engenheiros dos Laboratórios de Metalografia e Ensaio Não Destrutivos do Centro Tecnológico da Qualidade de Materiais da DaimlerChrysler.

8. Bibliografia

Alich, F. ; Weber,S ; Wilcke,B ,2000, “Ultraschall – Prüfausicht”, Interne Schulungsunterlagen . DaimlerChrysler AG ; MPV Mess und Prüftechnik Vogt GmbH
Leite, P.,1977, “Ensaio Não Destrutivos”, ABM ,8º Edição
Wainer, E. ; Brandi,S.; Mello,F., Soldagem,Princípios e Metalurgia.
Tomer, A ; 1990, Structure of metals through optical microscopy .ASM international
ASM ; 1972, Metals handbook . Vol. 7 – Atlas of Microstructures.
ASM ;1973, Metals handbook .Vol. 8 – Metallography , Structures and Phase diagrams.

DEFECTS FOUND IN SPOTWELD CHARACTERIZATION USING ULTRASOUND TECHNIQUE, SUPPORTED BY METALLOGRAPHY TESTS.

Danilo Stocco

DaimlerChrysler do Brasil – Av. Alfred Jurzykowski , 562 – São Bernardo do Campo – SP - Brasil
danilo.stocco@daimlerchrysler.com

Roque Gonçalves

DaimlerChrysler do Brasil – Av. Alfred Jurzykowski , 562 – São Bernardo do Campo – SP - Brasil
roque.goncalves@daimlerchrysler.com

Abstract: The Spotweld Ultrasound technique presents today a very strong application in the automotive industry, due to its high-speed test, automation capability, sensible cost reduction and automatic evaluation. On the other hand, it is very important for the operators possess the total comprehension, not just about the equipment operation, like turn on and execute the test, but also have the comprehension of the metalurgical concepts involved in the test, concepts that establish the automatic evaluation of the spotweld, that is, what really means the graphics that appear on screen, and which kind of variables are involved in these signals. Thinking about this, the Materials Quality Technology Center of DaimlerChrysler had developed this work, that consists in verify, supported by metalography tests, the “translation” of the graphics from the ultrasonic equipment, certifying the total efficiency and reliability of the test, beyond linearize the equipment’s setup in agreement with the welding process of the company. This way, it becomes possible to the operators and programmers of the equipment detect the probable process imperfection cases, using only nondestructive inspection, increasing considerably the reliability rank of the equipment to approximately 95%

Keywords: Ultrasound, spotweld