

Processos de Soldagem

Universidade Federal de Minas Gerais

Deptº de Engenharia Mecânica

*Soldagem de Metais
por Ultra-som*

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD

Aluno: José Pedro Pereira Júnior

Sumário

1.Introdução.....	3
2.Descrição do Processo.....	5
2.1.Tipos de soldagem.....	5
2.1.1. Soldagem por fusão e sob pressão.....	6
2.1.2. Baixa pressão de soldagem.....	7
2.2.Fundamentos e características.....	7
2.2.1. Soldagem por ultra-som.....	7
2.2.1.1. Soldagem por ultra-som de plásticos.....	7
2.2.1.2. Soldagem de metais por ultra-som.....	8
2.2.2. Os mecanismos durante a soldagem de metais por ultra-som.....	8
2.2.3. Superfícies irregulares.....	9
2.2.4. Deformações do metal limitada localmente.....	9
2.2.5. Aumento de temperatura na área de soldagem.....	10
2.2.6. Uniões homogêneas e estáveis.....	11
2.2.7. Forças entre 700 e 3000N.....	11
2.3. O equipamento.....	11
2.4. Variáveis do processo.....	12
2.5. Explicação do processo.....	15
3. Considerações Quanto a Segurança.....	16
4. Aplicações e Limitações.....	16
5. Vantagens.....	18
5.1. Principais vantagens do processo.....	18
5.2. Qualidade da solda.....	18
5.3. Controle do processo.....	18
5.4. Desenho dos terminais elétricos (aplicações específicas).....	18
5.5. Flexível para aplicações mais criativas.....	19
5.6. Vida prolongada da ferramenta.....	19
5.7. Controle de qualidade.....	19
5.8. Baixo custo por conexão.....	19
5.9. Exemplos.....	20
6. Aplicações – Exemplos.....	21
7. Bibliografia.....	22

1. Introdução

A energia do ultra-som tem se mostrado uma ferramenta útil em uma larga variedade de aplicações. A união de metais, especificamente metais não ferrosos usados em conexões elétricas, é uma aplicação particularmente útil desta tecnologia. As técnicas comumente usadas soldam os metais através da geração de calor em combinação com fluxos e metais de adição, mas as características destes processos e dos materiais a serem unidos estão em conflito uns com os outros. A soldagem por ultra-som de metais não ferrosos, em conexões elétricas, tem demonstrado eliminar a maioria, se não todos, os problemas associados a soldagem por fusão. De fato, a soldagem por ultra-som de metais está se tornando rapidamente o processo escolhido por engenheiros industriais. Aplicações atuais e comparações de custos operacionais ilustram o grau de aceitação e as vantagens inerentes da soldagem por ultra-som de fios e uniões elétricas.

Histórico

Desde que a primeira máquina de soldagem por ultra-som para metais foi desenvolvido e patentado em 1960 houve avanços tecnológicos significantes que agora fazem do processo uma ferramenta prática de produção. É interessante a nota do primeiro processo de patente solicitada em 1952/53 em que o examinador de patente e seu supervisor não acreditaram que pudessem ser feitas soldas no estado sólido sem o uso de calor, metal de adição, super cola ou similar e pediram permissão para visitar e testemunhar este processo. No começo, materiais aplicados na tecnologia do tubo a vácuo não seriam capazes de produzir altos níveis de energia de ultra-som. Além de serem ineficientes eram caros. O trabalho foi limitado à pesquisa e ao desenvolvimento que demonstraram a promessa do processo e alavancaram sua evolução técnica.

Resumo

A tecnologia da soldagem de metais por ultra-som pode ser usado para diferentes aplicações utilizando adequadamente sua onda de som e as características da energia mecânica de alta frequência. As vantagens das vibrações de onda curtas são as excelentes características direcionais e a alta repetibilidade do sinal. Estas combinações garantem uma perfeita capacidade de localizar uniões defeituosas, determinar as características dos materiais, a espessura e as estruturas das camadas.

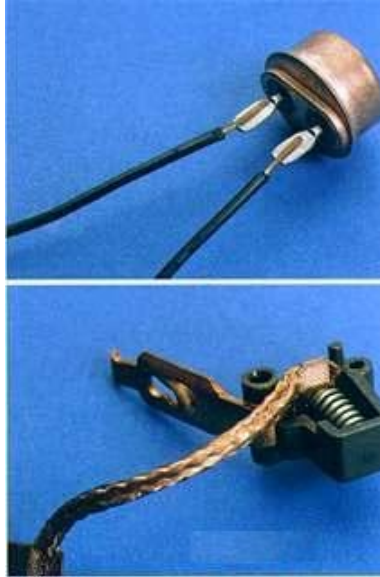


Figura 1: Típicas aplicações da soldagem por ultra-som.

A energia do ultra-som é usada para melhorar a estrutura metalúrgica dos materiais. A irradiação acústica na massa fundida conduz a uma melhora na degasificação e refinamento das estruturas do grão durante o processo de endurecimento. Vibrações mecânicas de alta-frequência têm um efeito altamente depurador. Os picos de pressão (até 1000 bar) não só ajudam a remover as partículas da superfície como também o óleo e a graxa, e destacam também as camadas sólidas de verniz dos corpos dos metais, com a ajuda de vibrações de baixa frequência. Quando combinado com instrumentos abrasivos, a perfuração ultra-sônica pode ser usada como uma técnica de acabamento por moldar materiais que são frágeis e duros de trabalhar como o vidro, cerâmica, etc. A soldagem ultra-sônica é um processo metalúrgico que utiliza vários materiais com diferentes temperaturas de fusão. A tecnologia da soldagem por ultra-som tem provado ser extremamente bem sucedida em várias aplicações acima de tudo em eletrônica (figura 1), indústria elétrica, indústria automotiva, ensaios não destrutivos, limpeza industrial e em alguns outros campos. A vantagem do custo e as melhorias de qualidade obtidas pelo uso desta tecnologia são notáveis.



Figura 2: Equipamento de soldagem por ultra-som com controle de qualidade eletrônico.

O único resultado da soldagem de metais por ultra-som é a baixa radiação de calor sem fusão da massa. O processo é determinado por alguns parâmetros de soldagem que podem ser facilmente monitorados e controlados eletronicamente, que é um pré-requisito para um processo seguro e de qualidade (figura 2).

2. Descrição do Processo

2.1. Tipos de soldagem

Os diferentes processos para união de metais podem ser subdivididos em diferentes categorias dependendo do seu princípio de ação. Estas ligações podem ser em forma fechada, por fricção ou com adição de material (figura 3). Frequentemente, não é possível fazer uma distinção clara entre a forma fechada e a ligação por fricção.

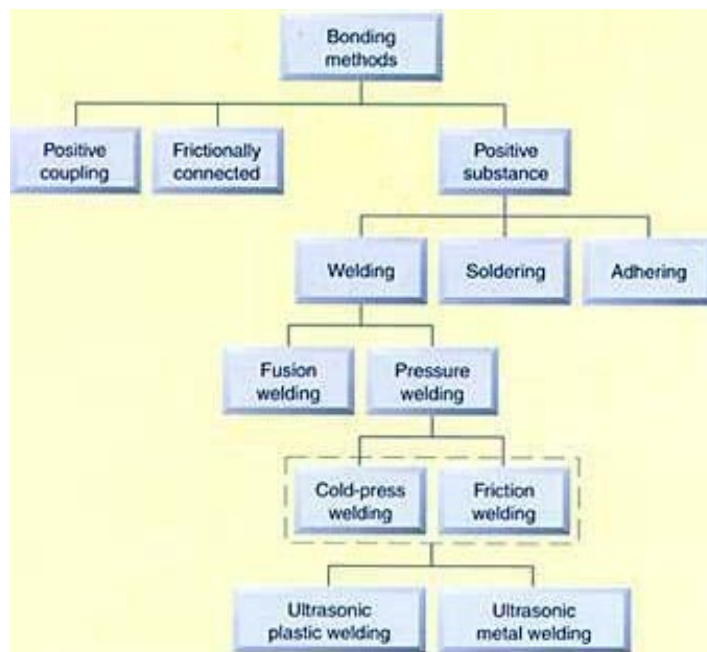


Figura 3: Classificação dos tipos de soldagem pelo princípio de ação.

Uma ligação com adição de material é geralmente inseparável e somente acontece, conforme a denominação, se usar material de adição ou consumível. Os tipos mais freqüentes de junções desta categoria são os adesivos, estanhagem, brazagem e uniões soldadas. Quando há soldagem de materiais, tem que distinguir entre soldagem por fusão e soldagem sob pressão.

2.1.1. Soldagem por fusão e sob pressão

A soldagem por fusão ocorre devido a aplicação de calor no ponto de união dos metais. Ao contrario, a soldagem sob pressão depende da aplicação de altas pressões e/ou altas temperaturas, resultando em uma maleabilidade e deformação na região da solda para que a ligação entre as peças seja feita. A energia requerida para a soldagem é diferente para os dois tipos de processo.

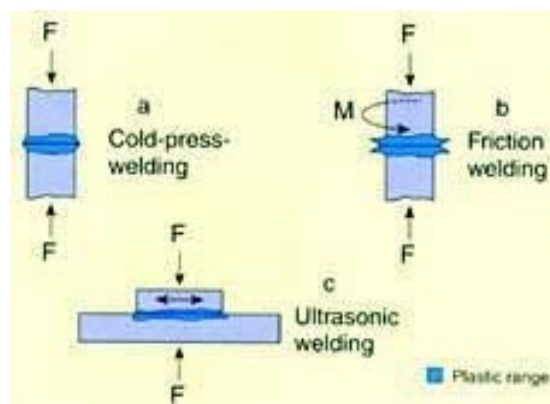


Figura 4: Princípios dos processos de soldagem metálica por pressão baseado em movimento.

A origem da energia, na soldagem por fusão, provem do gás, do arco elétrico, da luz e do arco plasma. A soldagem por ultra-som pertence a categoria da soldagem sob pressão e utiliza o deslocamento e a energia cinética para a união das peças. Dependendo do tipo de deslocamento, uma distinção da soldagem de metais pode ser feita entre a soldagem sob pressão a frio, soldagem por fricção e soldagem por ultra-som. Todos os três processos mostram ser muito similares. A soldagem por ultra-som é uma combinação de soldagem sob pressão a frio e soldagem por fricção, por causa do modo da ação. A figura 4 mostra os diferentes princípios dos processos de soldagem. A soldagem sob pressão a frio ocorre a temperatura ambiente. Aplicando alta pressão em ambas as peças, os materiais se soldarão. Uma forte deformação do material na região da solda explica o processo.

2.1.2. Baixa pressão de soldagem

Durante a soldagem de metais por ultra-som, o movimento de rotação é substituído pela vibração mecânica linear. As superfícies de soldagem são esfregadas periodicamente durante o processo. Isto reduz a pressão exigida se comparada a soldagem por fricção, e o valor final é somente cerca de somente 1% do que é requerido para a soldagem sob pressão a frio.

2.2. Fundamentos e características

2.2.1. Soldagem por ultra-som

Quando se une completamente um material por ultra-som, a energia requerida vem em forma de vibrações mecânicas. A ferramenta de soldagem (sonotrode ou horn) junta-se a uma das partes a serem soldadas e move-se na direção longitudinal. A outra parte permanece imóvel. Agora as partes a serem unidas são simultaneamente pressionadas. A ação simultânea das forças estáticas e dinâmicas causam a fusão das partes sem ter que usar um material de adição. Este procedimento é usado em escala industrial para união de plásticos e metais (figura 5).

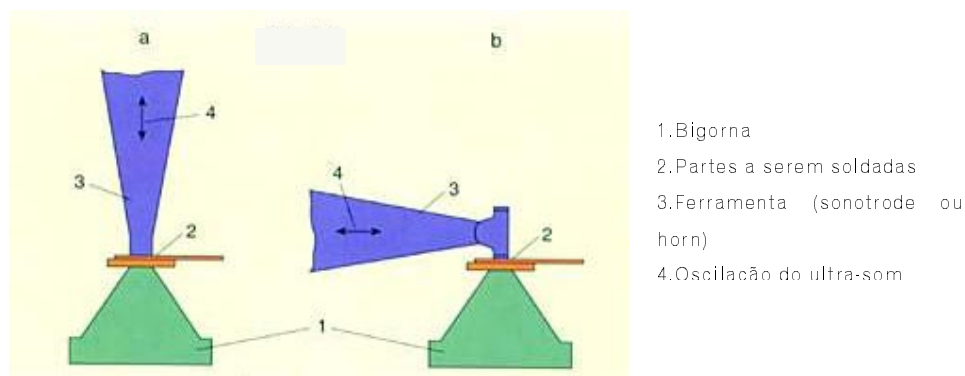


Figura 5: Diferenças do processo de soldagem por ultra-som de plásticos e metais.

2.2.1.1. Soldagem por ultra-som de plásticos

As oscilações são introduzidas verticalmente (figura 5a).

A soldagem ultra-sônica de plásticos é uma tecnologia que tem sido usada a vários anos. Quando se solda termoplásticos, a elevação térmica na região da solda é produzida pela absorção das vibrações mecânicas, da reflexão das vibrações na área da solda e da fricção das superfícies. As vibrações são introduzidas verticalmente. Na área de contração, o calor da fricção é produzido assim que o material é plastificado, forjando uma conexão insolúvel (que não se pode separar) entre as partes, dentro de um curto período de tempo.

O pré-requisito é que ambas as partes trabalhadas tenham pontos de fusão equivalentes. A qualidade da união é mais uniforme porque a transferência de energia e o calor interno liberado permanecem constantes e está limitado à área de união. A fim de obter um ótimo resultado, as superfícies das peças são preparadas para serem adequadas a união por ultra-

som. Além da soldagem de plásticos, o ultra-som também pode ser usado para rebitar ou embutir peças de metal em plástico.

2.2.1.2. Soldagem de metais por ultra-som

Direção horizontal da oscilação (figura 5b).

Enquanto que na soldagem de plástico, vibrações verticais de alta frequência (20 a 70kHz) são usadas para aumentar a temperatura e plastificar o material, a junção de metais é um processo completamente diferente. Ao contrário de outros processos, as partes a serem soldadas não são aquecidas até o ponto de fusão, mas são unidas aplicando pressão e vibrações mecânicas de alta-frequência. Em contraste com a soldagem de plásticos, as vibrações mecânicas usadas durante soldagem de metais são introduzidas horizontalmente. A ferramenta (sonotrode ou horn) não martela o material para elevar sua temperatura e plastifica-lo, mas esfrega as partes a serem soldadas, uma sobre a outra, sob pressão.

2.2.2. Os mecanismos durante a soldagem de metais por ultra-som

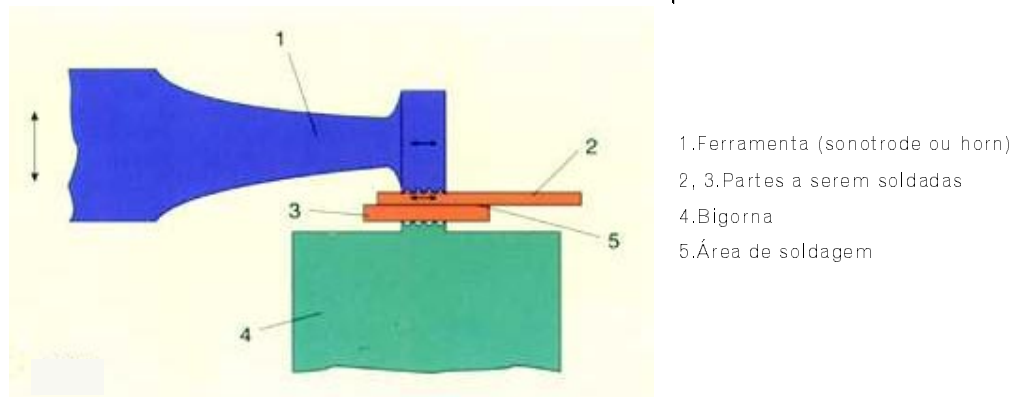


Figura 6: Componentes da soldagem de metais por ultra-som.

Durante a soldagem por ultra-som, um complexo processo é iniciado envolvendo forças estáticas, forças de cisalhamento e um moderado aumento de temperatura na área de soldagem. O valor destes fatores depende da espessura da peça, da estrutura da superfície e de suas propriedades mecânicas. As peças são colocadas entre os suportes da máquina, isto é, a bigorna e a ferramenta (sonotrode ou horn), que oscila horizontalmente a altas frequências (usualmente 20, 35 ou 40 kHz) durante o processo de soldagem (figura 6). É muito comum utilizar a frequência de oscilação (frequência de trabalho) de 20 kHz. Esta frequência está acima da audição humana e, além disso, permite o melhor uso possível da energia. Para processos de soldagem, que requerem somente uma pequena quantidade de energia, podem ser usadas as frequências de trabalho de 35 ou 40 kHz.

2.2.3. Superfícies irregulares evitam o deslizamento

As superfícies da ferramenta (sonotrode ou horn) e da bigorna, ferramentas de soldagem, são usualmente irregulares ou têm uma estrutura frisada ou estriada para segurar as peças a serem soldadas e evitar o indesejável deslizamento (figura 7).

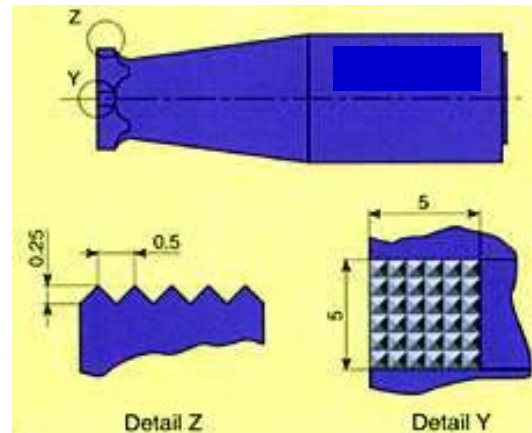


Figura 7: Superfície da ferramenta (sonotrode ou horn).

2.2.4. Deformações do metal limitada localmente

A pressão estática é aplicada entre as superfícies de soldagem num ângulo de 90° . A força (pressão estática) é sobreposta com a força de cisalhamento de alta frequência de oscilação. Enquanto as forças no interior das peças estiverem abaixo do limite de elasticidade linear, as peças não deformarão. Se as forças ultrapassarem um determinado valor limite, deformações locais no material logo vão ocorrer. Estas forças de cisalhamento, a alta frequência, quebram e removem os contaminantes e produzem uma ligação entre as superfícies dos metais. A oscilação adicional faz a deformação das faces aumentar até que uma grande área de soldagem tenha sido produzida. Ao mesmo tempo, há difusão atômica na área de contato e o metal se recristaliza numa estrutura de grãos finos e com as propriedades de um trabalho a frio (figura 8).

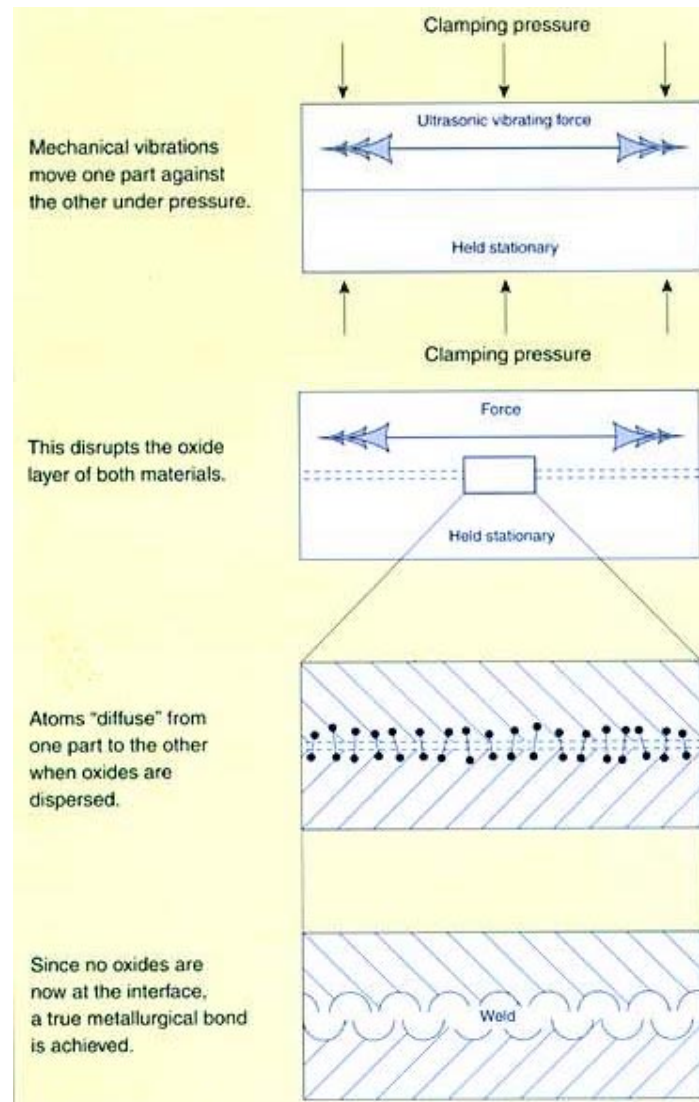


Figura 8: Mecanismos da soldagem de metais por ultra-som.

2.2.5. Aumento de temperatura na área de soldagem

A soldagem de metais por ultra-som é local e limitada às forças de cisalhamento e ao deslocamento das camadas intermediárias. Contudo, não ocorrerá a fusão se a força (pressão), a amplitude e o tempo de soldagem forem ajustados corretamente. Análises microscópicas, utilizando microscópios ópticos e eletrônicos, mostram a recristalização, a difusão e outros fenômenos metalúrgicos. Porém, elas não fornecem nenhuma evidência de fusão entre as superfícies. O uso de dispositivos sensíveis à variações de temperatura, instalados nas camadas intermediárias, mostram que, durante o curto período de tempo de soldagem, há um rápido aumento com uma posterior queda constante da temperatura.

2.2.6. Uniões homogêneas e estáveis

A soldagem de metais por ultra-som não é caracterizado por adesão superficial ou junções colados. É provado que as junções são sólidas, homogêneas e estáveis. Por exemplo, se uma folha fina de alumínio é soldada por ultra-som a uma folha fina de cobre, pode ser facilmente verificado que depois de um certo período de tempo de solda, partículas de cobre aparecem no outro lado da folha de alumínio. Ao mesmo tempo, partículas de alumínio aparecem no outro lado da folha de cobre. Isto mostra que os materiais penetraram uns nos outros -- um processo que é chamado de difusão. Este processo ocorre dentro de frações de segundo.

2.2.7. Forças entre 700 e 3000 N

Com um fornecimento de pressão de aproximadamente seis bar, a força exercida estará na faixa de aproximadamente 700N a 3000N. A pressão pneumática pode ser regulada, para um determinado valor, com o auxílio de um manômetro. O movimento vertical da ferramenta deve ser ajustável afim de evitar uma indesejável deformação das partes a serem soldadas.

2.3. O equipamento

A energia do ultra-som é a energia de vibração mecânica que opera em freqüências além do som audível, ou seja 18 kHz (18 kHz é o limiar superior da faixa de audição humana normal). Três freqüências básicas são usadas; 20, 35 e 40 kHz, dependendo da aplicação. A seleção é baseada nos níveis de potência exigidos, na amplitude de vibração requerida e no tamanho da ferramenta de ultra-som a ser usado. A freqüência é importante porque atua diretamente na potência disponível e no tamanho da ferramenta. É fácil de gerar e controlar altos níveis de potência à baixa freqüência. Além disso, as ferramentas do ultra-som são membros ressonantes cujo tamanho é inversamente proporcional à freqüência operacional delas (figura 9).



Figura 9: Ferramenta (Sonotrode ou Horn).

A geração de energia do ultra-som começa com a conversão de 50 ou 60 Hz da energia elétrica convencional para 20 ou 40 kHz da energia elétrica do power supply (fornecedor de potência) (figura 10).

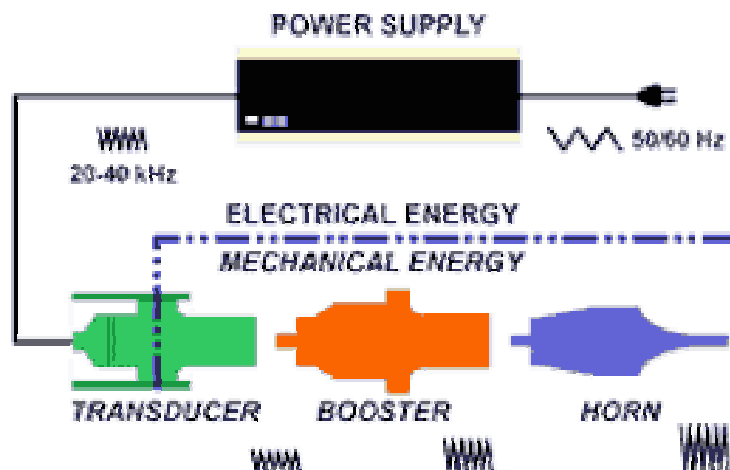


Figura 10: Conversão de potência.

O power supply (fornecedor de potência) também controla a amplitude e a frequência das vibrações. A alta frequência da energia elétrica é transmitida a um conversor eletro-mecânico ou transdutor onde a energia elétrica é convertida em vibrações mecânicas. Estas vibrações são então ampliadas por um transformador de amplitude (amplificador) (booster) e pela ferramenta do ultra-som (sonotrode ou horn) antes de serem aplicadas na peça (figura 11). A amplitude típica de produção da ferramenta de ¼ de superfície de trabalho é 0,0025 polegadas (0,0635mm) a 20 kHz.

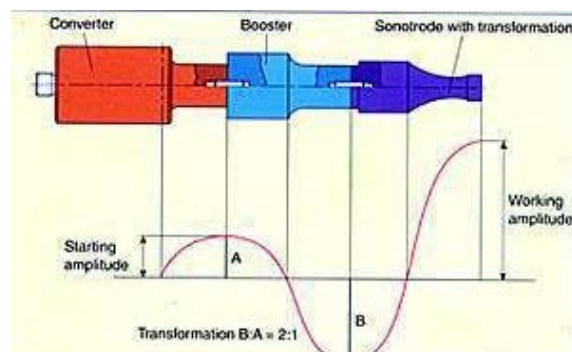


Figura 11: Ampliação das vibrações.

2.4. Variáveis do processo

Há somente três variáveis básicas do processo: amplitude da vibração, força (pressão) e tempo. O resultado final desejado é o valor da energia suficiente para romper óxidos e trazer superfícies opostas para dentro de distâncias atômicas. Estas variáveis são combinadas para

obter esta energia. Potência é uma função da amplitude da ferramenta (sonotrode ou horn) e da força aplicada. A energia é uma função da potência utilizada e do tempo, como definido pelas fórmulas simplificadas a seguir:

$$P = FA$$

P = Potência (Watts)

F = Força (Newtons)

A = Amplitude (Microns)

$$E = PT$$

T = Tempo (Segundos)

E = Energia (Joules)

Estas variáveis do processo são aproximadamente demonstradas por experiências anteriores e ajustadas para satisfazerem as necessidades de aplicações específicas. Em atual produção, estas variáveis são facilmente e exatamente controladas. A amplitude é inicialmente determinada pela seleção do amplificador (booster) e pelo desenho da ferramenta (sonotrode ou horn). A amplitude é automaticamente controlada e regulada pelo power supply (fornecedor de potência). Um moderno power supply é capaz de fazer, eletronicamente, incrementais modificações na produção de amplitudes visando otimizar a regulagem do setup. A força (pressão) é normalmente gerada por uma prensa pneumática que é de fácil ajustagem e regulagem. O tempo é controlado com grande precisão. Dentro de certos limites, as variáveis do ultra-som podem ser modificadas, em relação umas as outras, para alcançar o mesmo resultado (figura 12).

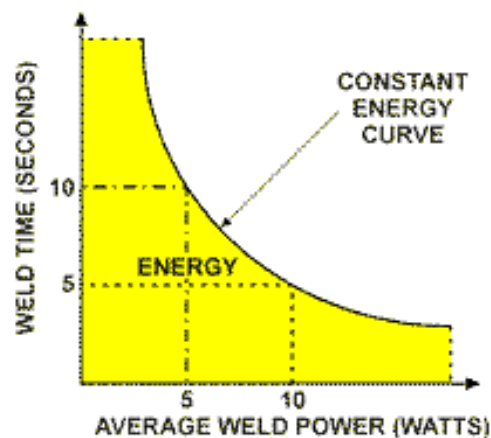


Figura 12: Potência x Tempo.

Mudanças em variáveis não ultra-sônicas, inclusive nas condições da superfície, tamanho ou orientação, normalmente requerem mudanças nas variáveis do processo para assegurar o valor exato da energia que é transmitido para o local da solda. Uma vez que o valor da energia exigida para fazer um solda satisfatória é determinada, excelentes resultados podem ser obtidos assegurando o mesmo valor da energia a ser aplicado a cada solda. Um circuito de

controle de energia continuamente monitora a potência utilizada e integra este valor com o tempo para determinar a energia liberada. A variável tempo é automaticamente ajustada para assegurar que a otimização da energia seja alcançada, garantindo, desse modo, uma qualidade de solda constante (figura 13).

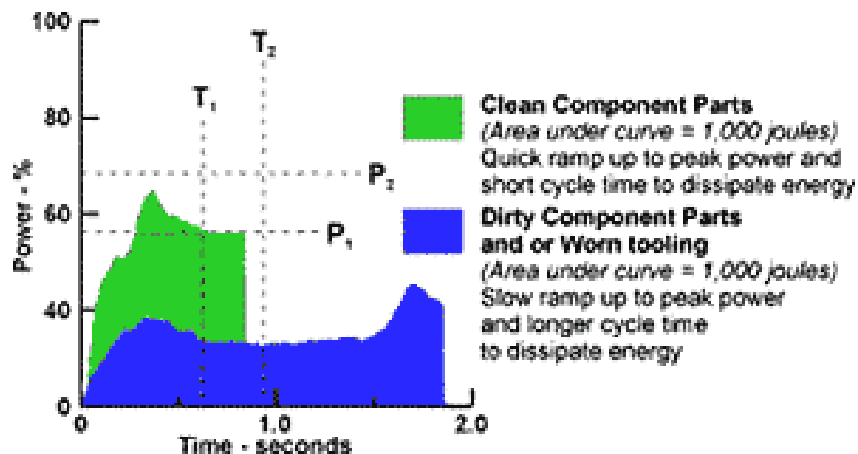


Figura 13: Controle dinâmico do processo.

Este gráfico mostra duas curvas típicas para duas condições de solda. Superfícies sujas (área azul do gráfico) dos metais vibrarão mais livremente, uma contra as outras, até que a contaminação e os óxidos sejam dispersados entre as faces. A partir daí, como as partes estão limpas, os metais base alcançam a distância exigida (atômica) e começam a soldagem. Isto requer mais tempo e, por essa razão, a curva de potência subirá mais lentamente até que a quantidade de energia desejada seja alcançada. A soldagem começa mais cedo na ausência de contaminação (área verde do gráfico) e a curva de potência sobe rápido e alcança níveis de energia exigidos em um curto período de tempo. O circuito de controle de energia monitora a potência e o tempo afim de assegurar que o mesmo valor de energia seja aplicada na solda atual, indiferente das condições das superfícies a serem soldadas.

Valores como os tempos ($T_1 - T_2$) e potências ($P_1 - P_2$) podem ser fixadas como limites. Soldas que excederem os valores ($T_1; P_1$) dispararão um alarme indicando uma solda duvidosa. Intervalos aceitáveis de operação para tempo e potência dão flexibilidade ao processo para conhecer mudanças introduzidas por partes sujas ou fora de especificação. Soldas que causam modificações fora destes intervalos ($T_2; P_2$) ativam alarmes que sinalizam possíveis defeitos.

2.5. Explicação do processo

O processo para soldagem de metais que usa a energia do ultra-som é simples. O principal motivo dos metais não aderirem simultaneamente é porque eles são cobertos com um óxido, como resultado de sua exposição na atmosfera. O alumínio, por exemplo, forma um camada de óxido duro dentro de milésimos de segundo, quando exposto ao oxigênio. Mais adiante veremos que as complicações no processo de união dos metais são comuns em superfícies contaminadas com óleo ou outros materiais (figura 14).

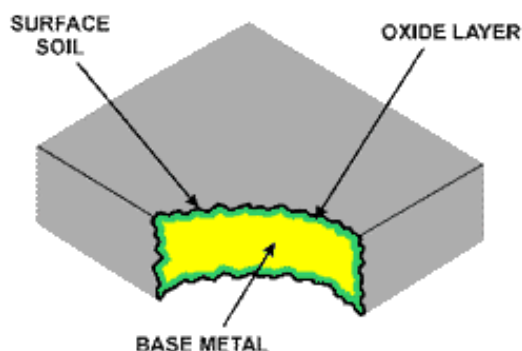


Figura 14: Condições típicas de uma superfície.

Se as superfícies dos metais não tivessem óxidos, sujeiras ou óleos lubrificantes a maioria das máquinas deixariam de funcionar porque superfícies iguais seriam soldadas. Aplicando vibração, força e tempo um soldador realiza uma soldagem por ultra-som. Então, o soldador inicia o processo pressionando e esfregando as peças a serem soldadas, no mesmo ponto, afim de separar e dispersar os óxidos e contaminantes das superfícies (figura 15).

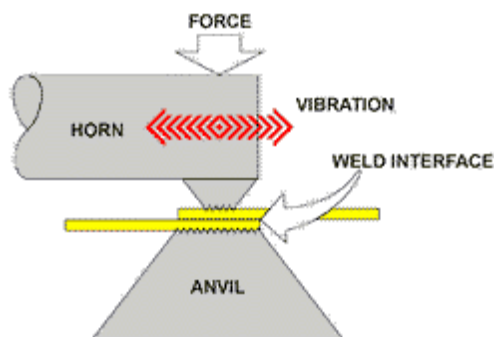


Figura 15: Configuração típica da ferramenta e das peças.

A consequência da limpeza das superfícies dos metais é mante-las firmemente unidas. Os contornos cristalinos das duas superfícies são trazidos para dentro de distâncias atômicas, permitindo uma forte atração dos átomos, criando um ligação metalúrgica sem atingir a temperatura de fusão dos metais (figura 16a e 16b). Este processo é caracterizado pela difusão atômica.

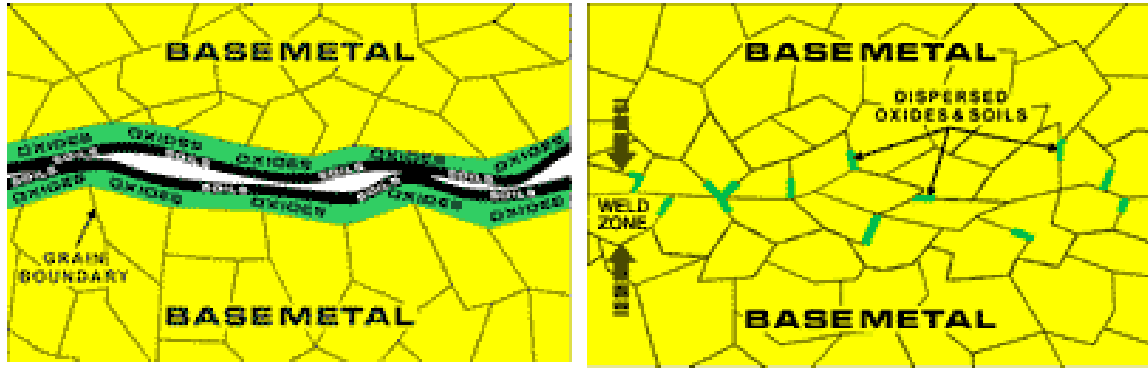


Figura 16: a) Antes da soldagem. b) Depois da soldagem.

Considerando que a soldagem por ultra-som não depende de alcançar a fusão dos metais, as temperaturas de fusão e as condutividades térmicas não são fatores do processo. O processo de soldagem inteiro é realizado em aproximadamente 250 milésimos de segundos.

3. Considerações Quanto a Segurança

O que a soldagem de metais por ultra-som faz em uma única operação os outros processos necessitam de várias etapas para realizar. Além disso elimina materiais de adição, não requer preparação da solda ou limpeza após a solda, usa muita pouca energia (1/30 da soldagem por fusão), não usa nenhuma substância química perigosa, não gera nenhum fumo nocivo e pode ser precisamente controlado e monitorado para assegurar resultados consistentes e de alta qualidade. Finalmente, é um processo a baixa temperatura. Tipicamente, o calor gerado pela fricção não eleva a temperatura das partes soldadas mais do que, aproximadamente, um terço de suas temperaturas de fusão. Considerando que um pequena quantia de calor é gerado não é exigida água de refrigeração para a ferramenta e não há nenhum derretimento ou amolecimento das partes soldadas. Os operadores podem, freqüentemente, tocar a peça imediatamente após a solda.

4. Aplicações e Limitações

- Os metais mais adequados para a soldagem por ultra-som são os metais não ferrosos e algumas de suas ligas. Então, aplicações que envolvem materiais como cobre, alumínio e latão são muito comuns. Materiais contendo chumbo, zinco e estanho não são recomendados para serem soldados por ultra-som. Estes materiais agem como lubrificantes e não permitem a abrasão exigida para realização da soldagem;
- O material que faz face à ferramenta (sonotrode ou horn) é acelerada e desacelerada, sob pressão, a altas freqüências. Como a energia disponível para geradores está limitado a até 4 kW, o tamanho ou a massa do material a ser soldada tem que ser considerada. Como regra

geral partes com até no máximo 10 g podem ser soldadas. Este valor pode ser excedido se o material é relativamente macio de modo que a deformação na área da solda seja absorvida. A parte que faz face a bigorna, isto é, longe da ferramenta, pode ser de qualquer peso;

- Se as peças a serem soldadas têm uma forma desfavorável, a energia da oscilação pode gerar um ponto de tensão que pode conduzir a uma distorção ou até mesmo à quebra. Durante a fase de projeto, a forma das peças tem que ser estudadas e testadas para evitar inconvenientes;
- Para obter uma qualidade de solda constante é importante ter uma superfície uniforme. Contaminação leve é normalmente aceitável, mas quando as partes estão excessivamente contaminadas ou oleosas, suas superfícies serão limpas pela energia da oscilação antes da realização da solda. O tempo requerido para este processo depende da quantidade de impurezas e não pode ser prognosticado. O tempo fixo do processo (tempo de soldagem) reduz, exatamente, esta quantidade de tempo da limpeza e que não está disponível para o processo de soldagem. Devido a isto, não é alcançado o grau necessário de compressão, que é indicado pelo dispositivo de controle (figura 17);

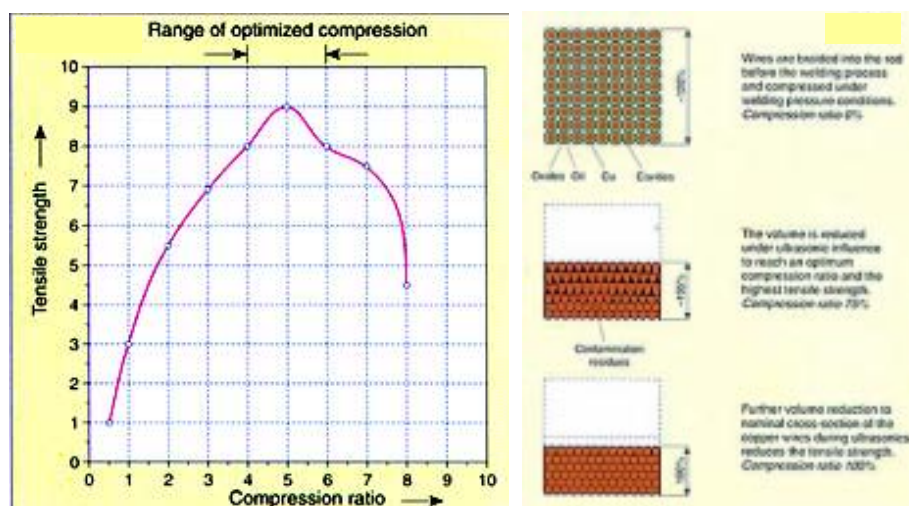


Figura 17; Relação entre a taxa de compressão e a resistência à tração.

- Superfícies revestidas serão avaliadas para determinar se são convenientes para a soldagem por ultra-som. Camadas de níquel, prata, cobre ou alumínio freqüentemente têm um efeito positivo. Efeitos negativos são conhecidos para camadas de estanho, zinco e de superfícies cromadas. Então, materiais que são menos satisfatórios para a soldagem por ultra-som podem obter uniões de boa qualidade aplicando uma camada adequada nas superfícies das peças a serem soldadas.

5. Vantagens

5.1. Principais vantagens do processo:

- Uniões de metais não-ferrosos;
- Baixo período de tempo de soldagem (<1 segundo);
- Nenhum calor é gerado para ser dissipado;
- Nenhum consumível é utilizado;
- Soldas consistentes e ligações mais fortes se comparadas a outros tipos de soldagem;
- Baixo consumo de energia.

5.2. Qualidade da solda:

- Ligação metalúrgica estável;
- União de alta condutividade;
- Corrosão galvânica eliminada;
- Nenhum afrouxamento devido ao ciclo térmico ou a memória do material;
- Não afetado pela vibração;
- Soldagem da maioria das superfícies oxidadas e sujas.

5.3. Controle do processo:

- Todas as variáveis do processo são controladas dinamicamente;
- Controle do tempo, potência e energia da soldagem compensam as variações de limpeza das superfícies, uso da ferramenta e variações da potência de entrada;
- Medida da altura de montagem pré-estabelecida;
- Assegura que os componentes corretos estão presentes ou que o arame está preparado adequadamente;
- Qualidade final controlada.

5.4. Desenho dos terminais elétricos (aplicações específicas):

- Um desenho de terminal acomoda vários tamanhos de arame;
- Economiza nas ferramentas/setup de estampagem dos terminais;
- Economiza nos custos de estoque dos terminais;
- Economiza nos jogos de matrizes e manutenção;
- Uso de materiais dos terminais mais finos;
- Baixo custo das chapas.

5.5. Flexível para aplicações mais criativas:

- Soldagem em grupo;
- Eliminação total dos terminais.

5.6. Vida prolongada da ferramenta:

A ferramenta para soldagem por ultra-som é substituível e de baixo custo. É fabricada de aço-ferramenta de alta qualidade e pode executar mais de um milhão de soldas sem qualquer necessidade de manutenção. Esta importante vantagem assegura excelente qualidade e confiabilidade das longas corridas de produção.

5.7. Controle de qualidade:

Controles computacionais e dispositivos de realimentação regulam, automaticamente, os parâmetros de soldagem e monitoram todas as funções da máquina para assegurar uma soldagem precisa e de qualidade.

Microprocessadores monitoram os ciclos de soldagem através da realimentação do sinal de potência. A potência que é aplicada na solda é integrada durante o tempo de solda para determinar a energia total aplicada. O ciclo de solda é ajustado, automaticamente, para produzir uma solda de perfeita qualidade, indiferente das variações e/ou limpeza das peças. Limites de controle, como o tempo de solda e a potência, podem ser pré-fixados. Se alguma solda sair fora dos limites pré-fixados, um sinal alerta o operador para isolar a montagem suspeita.

O controle final da altura da solda pode ser monitorado por um transducer de deslocamento linear, disponível na maioria dos equipamentos de soldagem por ultra-som. Esta característica chama a atenção para peças perdidas ou carregando impróprio dos fios elétricos. Monitores coloridos de alta resolução, controles de toque na tela e programas simples fazem do sistema um equipamento amigável, até mesmo para o pessoal sem qualificação técnica.

Parâmetros pré-fixados de soldagem podem ser armazenados na memória e chamados imediatamente para facilitar o setup e eliminar os erros do operador. Gráficos do processo de soldagem e dados estatísticos de controle do processo podem ser transferidos e enviados para impressoras, computadores e modems. Isto, não só, assegura a qualidade das peças produzidas, como também, uma melhor manutenção das máquinas.

5.8. Baixo custo por conexão:

Uma comparação dos processos alternativos que levam em consideração materiais, trabalho, custo da ferramenta e potência demonstram claramente o custo da eficiência da soldagem por ultra-som. Um estudo mostrou que a soldagem por ultra-som era 38% do custo da operação Clip and Solder (Estanhagem) e 67% do custo de operação da Soldagem à resistência (tabela

1). Um das vantagens mais surpreendentes, dos terminais soldados por ultra-som, é a habilidade de trabalhar com múltiplos fios simultaneamente. Ferramentas patenteadas disponíveis habilitam o operador a finalizar um trabalho de até vinte fios em menos de dois décimos de segundo, com perfeita qualidade. Este importante desenvolvimento oferece a capacidade de alcançar níveis mais altos de produtividade, ao mesmo tempo que evidencia uma alta qualidade do produto final. Tudo isso ao mais baixo custo por conexão.

Material	Clip & Dip (Estanhagem)	Soldagem à resistência	Ultra-som
Solda a \$2,62/kg, 522,5kg	\$3.018,00	–	–
Fluxo a \$14,00/litro, 870,6litros	\$3.220,00	–	–
Clipes a \$0,005 cada	\$5.000,00	–	–
Energia para o pote de solda, \$0,086/kWh	\$380,00	–	–
Energia para aplicar os clipes	\$365,00	–	–
Energia para a soldagem	–	\$3.500,00	\$258,00
Ferramenta	\$300,00	\$20.000,00	\$1.135,00
Trabalho a \$12,00/h	–	–	–
Solder dip (Mergulhar na solda) a 687,5 peças por hora	\$17.450,00	–	–
Clipping (Grampear, Prender) 152 peças por hora	\$78.950,00	–	–
Manipulação do material e limpeza total do pote de solda, requer 1/2 pessoa	\$12.120,00	–	–
Soldagem à resistência de 300 peças por hora	–	\$40.000,00	–
Soldagem por Ultra-som de 270 peças por hora	–	–	\$44.444,00
Manutenção	\$500,00	\$5.290,00	\$40,00
Total	\$121.303,00	\$68.790,00	\$45.877,00

Tabela 1: Comparação de custos dos métodos de união de fios elétricos (Baseado em um milhão de uniões).

5.9. Exemplos:

Esta característica de baixa temperatura é muito importante quando se solda Cobre em Alumínio. A soldagem por fusão cria um composto intermetálico não condutor e frágil, que

reduz a ductilidade da ligação Cobre - Alumínio. Quando os metais fundidos se misturam, uma liga é formada com uma característica muito frágil para a maioria das aplicações. Considerando que o processo de soldagem por ultra-som não causa fusão, estes intermetálicos e ligas frágeis não são formadas quando estes materiais são soldados.

Quando aquecido em uma atmosfera redutora, o oxigênio contido no cobre pode causar fragilidade e, conseqüentemente, ameaçar a integridade da conexão. Além disso, o arame de cobre usado em equipamentos profissionais é muito condutor e correntes elétricas extraordinariamente altas são necessárias para gerar calor suficiente para efetuar a fusão. Óxidos e contaminantes dos fios, como também o uso do eletrodo mudará drasticamente a resistência da solda e a quantidade de calor produzida. Outros materiais sensíveis a temperatura se beneficiam do mesmo modo. Um bom exemplo é berílio e cobre, material elástico que pode ser parcialmente recozido durante o processo de soldagem por fusão, mas retém suas propriedades elásticas quando soldado por ultra-som.

6. Aplicações - Exemplos:

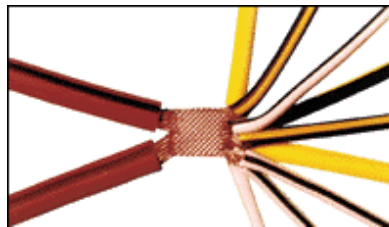


Figura 18: União de armações de fios elétricos automotivos.



Figura 19: Soldagem em conjunto de fios elétricos para cabos de fita (FFC). Soldagens simultâneas são possíveis porque não há nenhuma passagem de corrente elétrica pela área da solda. O processo é insensível a variações de condutividade de arame para arame.

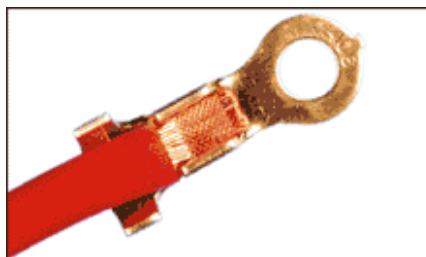


Figura 20: Terminais de fios de grande bitola [8AWG (8.37mm²)] Fio elétrico soldado no terminal de uma conexão crítica do automóvel.



Figura 21: Terminal de múltiplos fios. Uma conexão automotiva incorpora vários fios elétricos.



Figura 22: Juntas de transição, de cobre para alumínio, nas bobinas do motor de arranque de automóveis.

7. Bibliografia:

- [1] <http://www.amtechultrasonic.com/theoryarticle.html>, *Theory of Ultrasonic Welding*.
- [2] <http://staplultrasonics.com/book.htm>, *Ultrasonic Metal Welding*.