

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
Curso de Engenharia Elétrica

EDSON ROCHA LORÊDO JÚNIOR

SOLDA TERMOPLÁSTICA ATRAVÉS DE ULTRASSOM

Itatiba
2012

EDSON ROCHA LORÉDO JÚNIOR – R.A. 002200800436

SOLDA TERMOPLÁSTICA ATRAVÉS DE ULTRASSOM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª Dra Annete Silva Faresarella

Itatiba
2012

À minha esposa Maria Nilva de S. Lorêdo e aos meus pais, pela motivação e apoio durante o período acadêmico, me ajudando em todo e qualquer momento.

AGRADECIMENTOS

A realização desta Monografia só foi possível pela ajuda de inúmeras pessoas. A todos manifesto minha gratidão. E de modo particular:

à prof^a Annete Silva Faesarella pela orientação dedicada e pelo constante estímulo em todas as fases de realização deste trabalho.

aos professores do curso de Engenharia Elétrica que, durante a graduação, contribuíram para minha aprendizagem e conhecimento obtidos ao longo da vida acadêmica.

aos monitores que colaboraram no apoio de ensino em algumas disciplinas fundamentais no curso. Agradecimento especial à Flávia e Adriana.

aos meus colegas de classe que me ajudaram na maioria das disciplinas, auxiliando em trabalhos acadêmicos e nas dúvidas frequentes. Em especial, agradecimento aos colegas Rafael, Marcos, Estefânia, Maicon, Dorival e Diego.

O rio atinge seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos.

(Lao Tse)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma completa pesquisa bibliográfica a respeito de Soldagem Termoplástica por Ultrassom. Além da descrição minuciosa dos tipos de polímeros mais utilizados na indústria automobilística, de eletrodomésticos e de brinquedos, este trabalho mostra também as várias técnicas de soldagem desses materiais, enfatizando a soldagem por ultrassom. Tanto o funcionamento das máquinas para soldagem por ultrassom, quanto à descrição detalhada de cada componente envolvido no processo, é também discutido no presente trabalho. Por fim, o trabalho apresenta as vantagens e desvantagens da utilização da soldagem por ultrassom, em termoplásticos. Ressalta-se a importância do presente trabalho no sentido de que ele abre caminho para pesquisas futuras, podendo contribuir e muito para o conhecimento e tecnologia da soldagem de material termoplástico por ultrassom.

Palavras-chave: soldagem, ultrassom, termoplástico, polímeros.

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive literature review about Welding for Thermoplastic Ultrasound. Besides the detailed description of the types of polymers most widely used in the automotive, appliance and toys, this work also shows the various welding techniques such materials, emphasizing the ultrasound welding. Both the operation of machines for ultrasonic welding, as the detailed description of each component involved in the process, is also discussed in this paper. Finally, the paper presents the advantages and disadvantages of the use of ultrasonic welding in thermoplastics. We stress the importance of this work in the sense that it opens the way for future research, and it can contribute to the knowledge and technology of welding thermoplastic material by ultrasound.

Keywords: welding, ultrasound, thermoplastic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Estrutura molecular do PTFE.....	16
FIGURA 02 – Processo de condensação do nylon 6,6.....	19
FIGURA 03 – Divisão dos plásticos.....	19
FIGURA 04 – Sequência de soldagem chata por corpo quente.....	23
FIGURA 05 – Soldagem por impulso de calor.....	24
FIGURA 06 – Soldagem por atrito rotacional.....	26
FIGURA 07 – Compatibilidade de termoplásticos.....	27
FIGURA 08 – Conjunto acústico.....	28
FIGURA 09 – Gerador ultrassônico e pistola com luva pneumática para resfriamento de 40 kHz e 400W.....	29
FIGURA 10 – Máquina bi-manual de prensa pneumática e gerador de ultrassom.....	30
FIGURA 11 – Transdutores de 20 kHz para geradores de 1000W.....	31
FIGURA 12 – Transformador acústico de 20 kHz.....	32
FIGURA 13 – TA's roxo e prata de 20 kHz.....	32
FIGURA 14 – Zona nodal de três formatos de sonotrodos.....	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Identificação de cores e relações de transformação de amplitude.....	33
TABELA 2 – Vantagens e desvantagens da solda termoplástica por ultrassom.....	37

Lista de Siglas

ABS-	Estireno-butadieno-acrilonitrila
BR-	Polibutadieno
CR-	Policloropreno (Neoprene)
EVA-	Etileno-acetato de vinila
HDPE-	Polietileno de alta densidade
LDPE-	Polietileno de baixa densidade
NBR-	Borracha Nitrílica
NR-	Borracha Natural (Poli-cis-isopreno)
PA-	Poliamida (Náilon)
PAN-	Poliacrilonitrila
PBT-	Polibutileno-tereftalato
PC-	Policarbonato
PCTFE-	Policlorotrifluoroetileno
PET-	Polietileno-tereftalato
PE-	Polietileno
PEEK-	Polieter-eter-cetona
PHFP-	Polihexafluoropropileno
PMMA-	Polimetilmetacrilato
POM-	Polióxido de Metileno
PP-	Polipropileno
PPO-	Polioxi-fenileno
PPS-	Polisulfeto de fenileno
PS-	Poliestireno
PTFE-	Politetrafluoroetileno
PVA-	Poliacetato de Vinila
PVAI-	Poliálcool Vinílico
PVC-	Policloreto de Vinila
PVDC-	Policloreto de Vinilideno

PVDF-	Polifluoreto de Vinilideno
PVF-	Polifluoreto de Vinila
SAN-	Estireno-acrilonitrila
SBR-	Butadieno-estireno (Borracha Sintética)
SBS-	Estireno-butadieno-estireno
SIS-	Estireno-isopreno-estireno
TPX-	Poli-4-metil-penteno-1
VC/AN-	Cloreto de Vinila – Acrilonitrila
VC/VA-	Cloreto de Vinila – Acetato de Vinila
VC/VDC-	Cloreto de Vinila - Cloreto de Vinilideno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Definição dos polímeros.....	14
2.1.1 Divisão dos polímeros pela estrutura química.....	14
2.1.1.1 Polímeros de cadeia carbônica.....	15
2.1.1.2 Polímeros de cadeia heterogênea.....	17
2.1.2 Divisão pelo método de preparação.....	17
2.1.2.1 Polímeros de adição.....	17
2.1.2.2 Polímeros de condensação.....	17
2.1.3 Divisão pelo comportamento mecânico.....	19
2.1.3.1 Termoplásticos.....	20
2.1.3.2 Duroplásticos.....	20
2.1.3.3 Elastômeros.....	20
2.1.4 Divisão quanto ao desempenho mecânico.....	20
2.1.4.1 Termoplásticos convencionais.....	21
2.1.4.2 Termoplásticos especiais.....	21
2.1.4.3 Termoplásticos de engenharia (TE)	21
2.1.4.4 Termoplásticos de engenharia especiais.....	21
2.2 Soldagem dos termoplásticos.....	21
2.3 Compatibilidade de materiais.....	26
3. METODOLOGIA	28
3.1 Funcionamento do equipamento de solda por ultrassom.....	28
3.2 Funcionamento do gerador.....	28
3.3 Conjunto acústico e seus periféricos.....	30
3.3.1 Transdutor.....	30
3.3.2 Transformador acústico.....	31
3.3.3 Sonotrodo.....	33
3.4 Quantidade de energia e amplitude para soldagem.....	36
3.5 Vantagens e desvantagens da soldagem por ultrassom.....	37
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

Com a constante busca de inovações tecnológicas, indústrias investem em substituições de materiais para baratear seus produtos finais. Pensando nisso, na década de 60, foram substituídas partes metálicas dos automóveis por polímeros, denominados termoplásticos. Porém, existia a necessidade da soldagem de peças, muitas vezes de diferentes materiais termoplásticos, nessa peça inteira, injetada. Assim sendo, tornou-se necessário o desenvolvimento de um método específico de soldagem desses polímeros.

Foi justamente essa necessidade que impulsionou as pesquisas sobre soldagem de termoplásticos, surgindo assim, o foco desse trabalho, que é a soldagem termoplástica através de ultrassom.

Mostra-se, no decorrer da revisão bibliográfica, a definição de polímeros e suas divisões, enfatizando o grupo dos termoplásticos. Prosseguindo a revisão, são abordados os principais tipos de soldagem, principalmente pelo método de ultrassom, classificado como atrito interno. Sequencialmente, são relatadas as compatibilidades dos termoplásticos, visto que não se pode soldar um termoplástico com qualquer outro.

Foram abordados, na metodologia, o funcionamento da máquina de soldagem por ultrassom, seus periféricos e também a relação de quantidade de energia e amplitude para soldagem. Por fim relata-se sobre vantagens e desvantagens desse método de soldagem.

A importância desse método de soldagem é a eficiência e fácil manuseio, visto que seu funcionamento não é tão complexo quanto os outros processos e seu uso é o mais requisitado no Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de polímeros

Atualmente, o material termoplástico está presente em inúmeros produtos indispensáveis em nosso cotidiano, por exemplo, compõe partes de automóveis e de eletrodomésticos. Esse termoplástico é um tipo específico de plástico.

A pesquisa de Michaeli et al. (1995, p.6) explica que o plástico não é apenas um material, mas indica um conjunto de materiais com estrutura, qualidade e composição diferentes. Para isso, basta mudar o processo de fabricação ou fazer misturas diferentes.

O plástico é um tipo de polímero por ser um material composto por macromoléculas, que são cadeias formadas pela repetição de uma unidade básica, chamada *mero*. Este nome, polímero, é a junção de *poli* que significa muitos e *mero* que é essa repetição. Pode-se fazer uma analogia, comparando as moléculas de polímeros com um novelo de lã, pois não se consegue remover apenas um fio, assim como não se pode remover uma molécula dos polímeros por estarem fortemente ligados. (GORNÍ, 2003).

Canevarolo (2006) define que além do plástico, a borracha e a fibra também são polímeros por possuírem o mesmo tipo de macromoléculas, porém suas diferenças encontram-se no tipo de monômero (estrutura química), no número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente. Sendo que a borracha é um polímero que pode ser deformada, no mínimo, duas vezes seu comprimento original. Enquanto que a fibra é um corpo que tem uma elevada razão entre o comprimento e as dimensões laterais, orientadas longitudinalmente. Além disso, a fibra possui uma grande resistência à tensão, somente na direção em que está orientada, porém apresentam uma resistência à compressão muito baixa, ou seja, são fracas quando amassadas ou comprimidas. A maioria dessas fibras poliméricas é utilizada na indústria têxtil, sendo tecidas ou costuradas em panos ou tecidos.

Canevarolo (2006) define que o desenvolvimento científico gerou um grande número de polímeros para atender às inúmeras aplicações industriais. Assim, há possibilidade de agrupá-los em quatro diferentes classificações, isto é, quanto à estrutura química, ao seu método de preparação, às suas características tecnológicas, e quanto ao seu comportamento mecânico.

2.1.1 Divisão dos polímeros pela estrutura química

Pode-se analisar o polímero por meio da estrutura química do seu mero. Há duas subdivisões para essa classificação que são polímeros de cadeia carbônica e de cadeia heterogênea.

2.1.1.1 Polímeros de cadeia carbônica

Os polímeros de cadeia carbônica algumas divisões envolvendo poliolefinas, dienos, estirênicos, clorados, fluorados, acrílicos, ésteres e poli (fenol-formaldeído). Esses polímeros são definidos e exemplificados a seguir.

Poliolefinas: são originários de monômeros de hidrocarboneto alifático insaturado contendo uma dupla ligação carbono-carbono reativa.

Os exemplos são PE, PP, TPX, polibuteno ou polibutileno e poliisobutileno.

Dienos: são polímeros derivados de monômeros com dienos, isto é, duas duplas ligações carbono-carbono reativas geram cadeias poliméricas flexíveis com uma dupla ligação residual passível de reação posterior.

Alguns de seus exemplos são BR, aplicado em pneus, CR, utilizado em artigos expostos ao intemperismo, ozônio e água do mar, NBR, usado para fazer mangueiras e demais itens em contato com gasolina em automóveis e NR, provém do coágulo do látex da seringueira e suas principais aplicações são em artigos flexíveis como pneus, mangueiras, correias e *o-rings*.

Estirênicos: como o próprio nome já diz, os estirênicos são polímeros derivados do estireno, hidrocarboneto utilizado na fabricação de materiais sintéticos industriais.

Entre seus exemplos o mais importante é o PS, por ser de baixo custo, ter facilidade em seu processamento e boas propriedades mecânicas. Outros exemplos são o copolímero¹ de SAN, terpolímero de ABS, copolímero em bloco de SBS e copolímero em bloco de SIS e o copolímero aleatório de SBR, que foi originalmente desenvolvido para substituir a borracha natural e sua aplicação está em artefatos flexíveis de baixo custo, como pneus.

Clorados: possuem um ou mais átomos de cloro e boas propriedades mecânicas geradas pelas altas forças intermoleculares devido à polaridade do átomo de cloro.

Um dos exemplos mais importante é o PVC por ser o polímero de maior produção e consumo do mundo. Outros exemplos são o PVDC e alguns copolímeros de VC/VDC usados em embalagens, copolímeros de VC/VA usados para a confecção de discos de vinil e de VC/AN para fibras, sendo que desses copolímeros, o segundo comonômero possui característica específica para uma determinada aplicação. Sendo assim, o VDC é utilizado

¹ É um composto de dois ou mais polímeros com propriedades aprimoradas, obtidos através de processos de polimerização (reação química intermolecular pela qual os monômeros são ligados, na forma de meros, à estrutura molecular da cadeia). As sequências de arranjos dessas combinações são bem variadas ao longo das cadeias poliméricas. (CALLISTER, 2011)

devido às suas boas características de barreira, VA por sua boa propriedade de fluxo e AN excelente habilidade da molécula em se orientar durante deformação.

Fluorados: esses polímeros possuem altas forças intermoleculares geradas pela presença de grandes átomos de flúor, que também dão rigidez à macromolécula dificultando mudanças de conformação.

Entre os exemplos, o PTFE é o mais conhecido e utilizado, devido à sua alta estabilidade térmica, ao seu baixo coeficiente de atrito e inércia química. Outros exemplos são o PCTFE, PVF, PVDF, PHFP e copolímeros do tipo VF/VDF e VDF/HFP (borracha fluorada). A figura 1 mostra a estrutura molecular do PTFE, deve-se observar como os átomos de flúor, que, por serem grandes em relação ao carbono, envolvem a cadeia carbônica, protegendo-a contra reações químicas de degradação, ao mesmo tempo em que dão rigidez à macromolécula, dificultando mudanças de conformação.

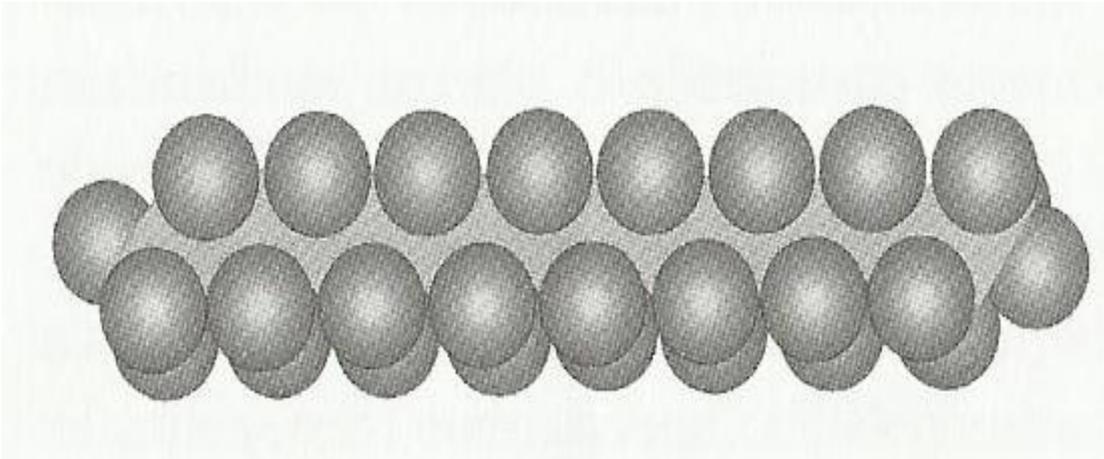


Figura 1 - Estrutura molecular do PTFE (MICHAELI et al., 1995)

Acrílicos: são derivados do ácido acrílico $\text{CH}_2 = \text{CH-CO-OH}$ e metacrílico $\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3)\text{-CO-OH}$.

Os principais exemplos desses polímeros são PMMA, conhecido como acrílico e a PAN, utilizada na fiação. Dos copolímeros formados, o mais importante é a borracha nitrílica (butadieno-acrilonitrila), por ser altamente resistente a combustíveis e solventes orgânicos.

Ésteres: outra divisão são os ésteres, que possui como exemplos o PVA, utilizado na forma de emulsões aquosas para a confecção de tintas, e o PVAI, solúvel em água. Existe também um copolímero PVA/PVAI bastante utilizado para a confecção de cápsulas de medicamentos.

Polifenol-formaldeído: essa divisão é uma classe especial de resinas de fenol-formaldeído. Os exemplos são Baquelite, resinas sólidas de Novolaca e as resinas líquidas de Resol.

2.1.1.2 Polímeros de cadeia heterogênea

Os polímeros de cadeia heterogênea possuem na cadeia principal, além de carbono, um outro heteroátomo.

Os exemplos são o oxigênio, nitrogênio, enxofre e silício. Assim como os polímeros de cadeia carbônica, há algumas divisões citadas a seguir.

Poliéteres: a primeira divisão é dos poliéteres que tem a presença da ligação éter -C-O-C- na cadeia principal.

O principal exemplo é o poliacetal ou poliformaldeído, com ótimas propriedades físico-mecânicas. Outros exemplos são o polietileno óxido, o polipropileno óxido e a mistura de epicloridrina com bisfenol-A, sendo essa última utilizada para produzir a conhecida resina epóxi.

Poliésteres: a segunda divisão trata-se dos poliésteres, cuja ligação é de éster -CO-O- podendo gerar cadeias saturadas ou insaturadas. As cadeias saturadas formam os termoplásticos de engenharia.

Os exemplos são o polietileno tereftalato, utilizado para produzir garrafas (PET), confeccionar vasilhames descartáveis soprados (PETG) e produção de filmes biorientados (PETF). Os poliésteres com cadeias insaturadas são reforçados com fibra de vidro (PIRFV) para confeccionar cascos de barco, pranchas de *surf*, estrutura externa de carros e caminhões.

Policarbonato: a terceira divisão é do policarbonato, cuja ligação é -O-CO-O-.

O único exemplo é o próprio policarbonato (PC) que é um termoplástico de engenharia obtido da policondensação do fosgênio e do bisfenol-A. Esse termoplástico é utilizado para produzir CDs e substituir o vidro em situações críticas, como, por exemplo, janelas de avião, tetos solares transparentes em edifícios.

Poliamida: a quarta divisão é do poliamida, cuja ligação é a amida -NH-CO-, que se subdivide em produtos naturais, como proteínas, seda e lã, e produtos sintéticos, como, por exemplo o náilon. Os produtos sintéticos, no caso o náilon, possuem inúmeros tipos de estruturas químicas, o mais importante é o náilon 6 (policaproamida), os demais são os náilons

11, 12, 6,6, 4,6, 6,10, 6,12. Além desses náilons, também tem inúmeros copolímeros formados por eles.

Poliuretanos: a quinta divisão é dos poliuretanos caracterizados pela ligação -NH-CO-O-. A formação desta ligação envolve a reação de um isocianato e um glicol que produzem CO₂.

Aminoplásticos: a sexta divisão é dos aminoplásticos que são “derivados de materiais iniciais do tipo aminas -C-NH₂.” Os exemplos mais conhecidos são as resinas termofixas de uréia – formaldeído (*synteko*) e a melanina – formaldeído (fórmica).

Derivados da celulose: a sétima divisão são os derivados da celulose, que são obtidos de várias reações químicas diferentes. O exemplo mais importante é do acetato de celulose, outros menos conhecidos são o acetato-butirato de celulose, carboxi-metil-celulose, celulose regenerada.

Siliconas: a última divisão trata-se dos siliconas que apresentam a ligação -Si-O- formando a cadeia principal. O mais conhecido é o silicone (polidimetil silicone).

2.1.2 Divisão pelo método de preparação

Outro tipo de divisão dos polímeros está no método de preparação, sugerido por Carothers em 1929. Subdivide-se em duas classes que são os polímeros de adição e de condensação.

2.1.2.1 Polímeros de adição

Os polímeros de adição são aqueles em que não há perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular. Assumindo-se conversão total, o peso de polímero formado é igual ao peso de monômero adicionado. Normalmente, estes polímeros têm cadeia carbônica.

Exemplos: PE, PP, PVC e PMMA.

2.1.2.2 Polímeros de condensação

Os polímeros de condensação são aqueles originários da reação de dois grupos funcionais reativos com a eliminação de moléculas de baixo peso molecular (água, amônio ou

hidrocloro). Um dos exemplos é o nylon 6,6 (hexametileno adipamida), cuja condensação do radical amina com o radical ácido dos materiais iniciais (hexametileno diamina e ácido adípico) formam uma ligação amida e eliminação de uma molécula de água. Esse processo é mostrado na figura 2.

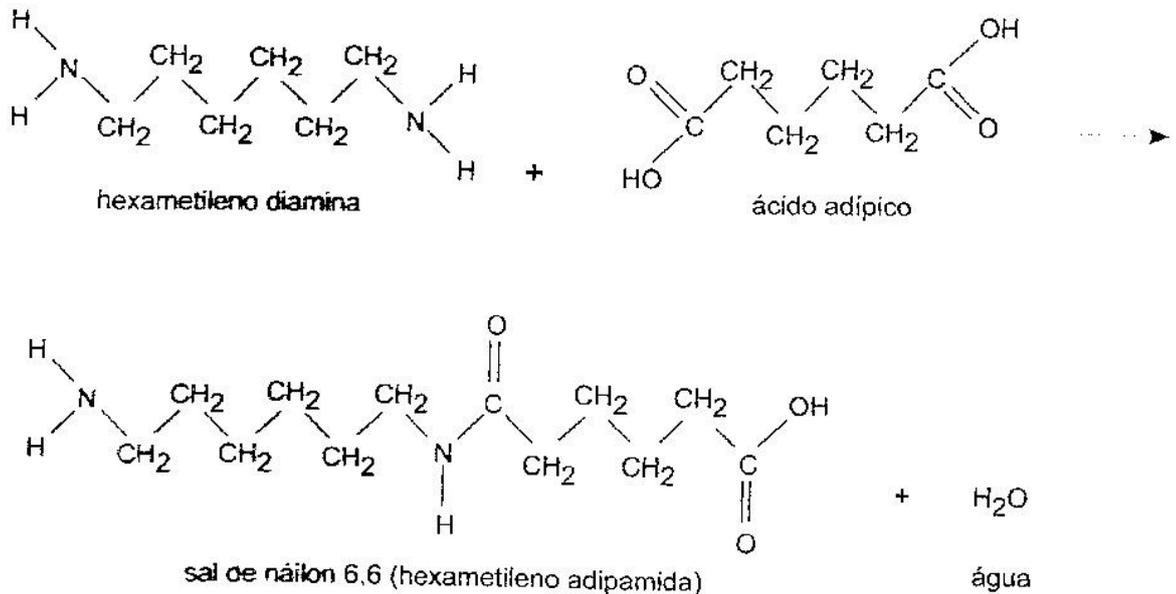


Figura 2 - Processo de condensação do nylon 6,6 (CANEVAROLO, p.52, 2006)

Nesta reação, pode-se observar que é obtido o sal de nylon, que é insolúvel no meio aquoso precipitando da solução. Este é retirado, secado e a seguir polimerizado em altas temperaturas para a obtenção do nylon 6,6.

2.1.3 Divisão pelo comportamento mecânico

A terceira divisão é relacionada ao comportamento mecânico dos polímeros. No caso, os plásticos são divididos em três grupos, segundo a Figura 3. (Michaeli et al.,1995)

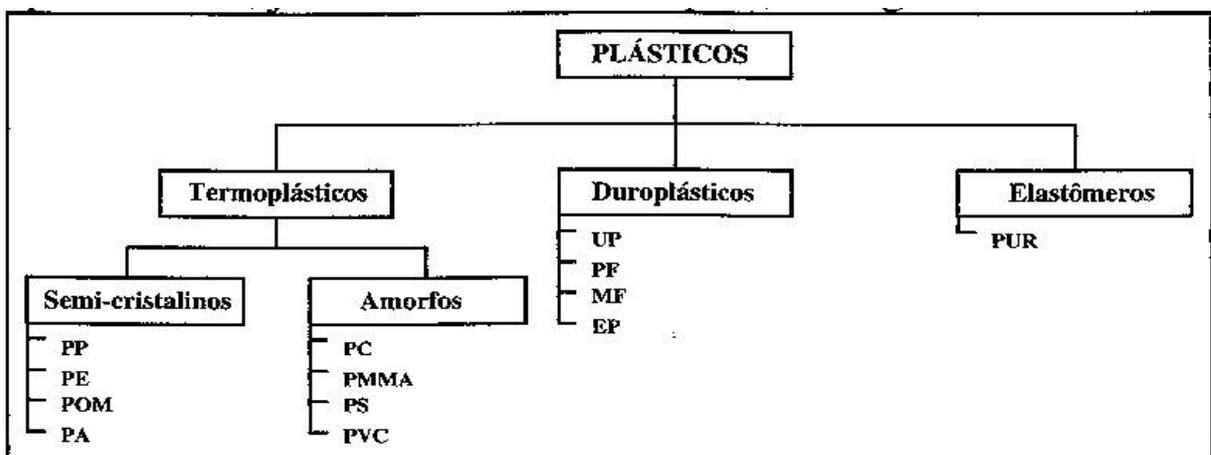


Figura 3 - Divisão dos plásticos (MICHAELI et al.,1995)

2.1.3.1 Termoplásticos

Canevarolo (2006, p.53), define que o primeiro grupo são os termoplásticos (*thermos* = calor; *plasso* = formar) que são fusíveis, devido à possibilidade de serem fundidos inúmeras vezes, e solúveis, por se tratar de materiais solubilizados por vários solventes e também podem variar de maleáveis a rígidos ou frágeis quando estão na temperatura ambiente.

Dentro deste grupo ainda há duas subdivisões citadas a seguir:

Os termoplásticos amorfos (*amorfa* = desordenado), que possuem estado de ordenação molecular semelhante ao vidro e são transparentes. Os exemplos citados são PE, PP, PA e POM.

Os termoplásticos semi-cristalinos, que apresentam uma aparência opaca. Os exemplos são PC, PMMA, PS e PVC.

2.1.3.2 Duroplásticos

O segundo grupo são os duroplásticos (*durus* = rígido), ou termofixos, que são rígidos e estreitamente encadeados em todas as direções. Eles não são deformáveis plasticamente, e nem fusíveis e por isso, extremamente estáveis à variação de temperatura, sendo rígidos e quebradiços. Isso impede o movimento das moléculas e, portanto, uma nova plastificação.

Por exemplo, podemos citar as tomadas elétricas feitas de resina epóxi (EP). (Canevarolo, 2006)

2.1.3.3 Elastômeros

O terceiro grupo são os elastômeros (*elasto* = elástico; *meros* = partes) que não são fusíveis, são insolúveis, mas podem ser amolecidos. Sua estrutura molecular é composta de encadeamento espaçado e por isso é encontrado em estado elástico a temperatura ambiente. Exemplos de elastômeros são as vedações de vidros para conservas, os pneus de veículos e discos de embreagem feitos de poliuretano (PUR), citado na Figura 1. (MICHAELI et al., 1995, p.7 e 8)

2.1.4 Divisão quanto ao desempenho mecânico

Para Canevarolo (2006, p.54), esta classificação leva em conta o desempenho mecânico do polímero quando usado em um item ou peça. Esta classificação é subdividida em 4 grupos para ser melhor definida a seguir.

2.1.4.1 Termoplásticos convencionais

São polímeros de baixo custo, baixo nível de exigência mecânica, alta produção e facilidade de processamento. A produção destes termoplásticos somados corresponde a aproximadamente 90% da produção total de polímeros no mundo.

Os exemplos desta classificação são as poliolefinas (LDPE, HDPE, PP), o poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC).

2.1.4.2 Termoplásticos especiais

São polímeros com um custo levemente superior aos convencionais, mas com algumas características um pouco melhores. Nesta classe têm-se os copolímeros de EVA e SAN e os homopolímeros de PTFE e PMMA. Em dois deles, PMMA e SAN, procura-se alta transparência e em outro, PTFE, alta estabilidade térmica e química.

2.1.4.3 Termoplásticos de engenharia (TE)

A confecção de peças de bom desempenho para aplicações em dispositivos mecânicos (engrenagens, peças técnicas para a indústria eletroeletrônica e automobilística) exige do polímero alta resistência mecânica (rigidez), boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional.

Os exemplos desses TE são as poliamidas (náilons em geral), os poliésteres termoplásticos (PET e PBT), poliacetais (homopolímeros e copolímeros), o PC, copolímero de ABS e PPO.

2.1.4.4 Termoplásticos de engenharia especiais

Em aplicações em que alta temperatura é a exigência maior são utilizados polímeros com grande quantidade de anéis aromáticos na cadeia principal, a qual aumenta a estabilidade térmica para uso ininterrupto a temperaturas acima de 150°C.

Como exemplos, têm-se polímeros contendo enxofre (polisulfonas e PPS), poliimidas (poliimida-poliimida), alguns poliuretanos, PEEK e polímeros de cristal líquido polimérico.

2.2 Soldagem dos termoplásticos

Para a obtenção de produtos acabados compostos de termoplásticos é preciso soldá-los, todavia primeiro há o processo de moldagem sob tensão, da qual fazem parte os processos de extrusão, fundição, calandragem, injeção, prensagem, sinterização. Em seguida, a soldagem faz a união de duas peças, de materiais iguais ou semelhantes, sob calor e

pressão. Estas duas peças são soldadas e resfriadas para atingir a estabilidade de forma. (MICHAELI et al.,1995, p.74)

Michaeli et. al.(1995) expõe alguns processos de soldagem, citados abaixo:

Soldagem por Corpo quente: esse tipo de soldagem possui como característica comum o fato de que o calor é introduzido nas superfícies de união por meio de um corpo. No caso, esse corpo é um metal aquecido eletricamente, passando o calor ao plástico por condução.

Soldagem por radiação: nesse processo, a fusão entre as superfícies de união ocorre através de feixes de calor ou luz, sendo que o material plástico não pode ser transparente, visto que absorveria pouquíssima luz.

Soldagem por indução: outro tipo de soldagem é realizada por indução, cujo processo envolve um material adicional que contém um pó que pode ser ativado magneticamente. Esse material é colocado entre as peças que serão unidas e após a ativação do material por meio de um campo magnético de alta frequência, gerando calor unindo as superfícies após uma determinada pressão.

Soldagem chata com corpo quente: esse tipo de soldagem é bastante utilizado para unir tubos de PP e PE ou para a produção de lanternas traseiras de automóveis. A sequência de soldagem envolve os tempos de ajuste, de aquecimento, de posicionamento e resfriamento. Toda a sequência de soldagem, acima citada, é mostrada na Figura 4.

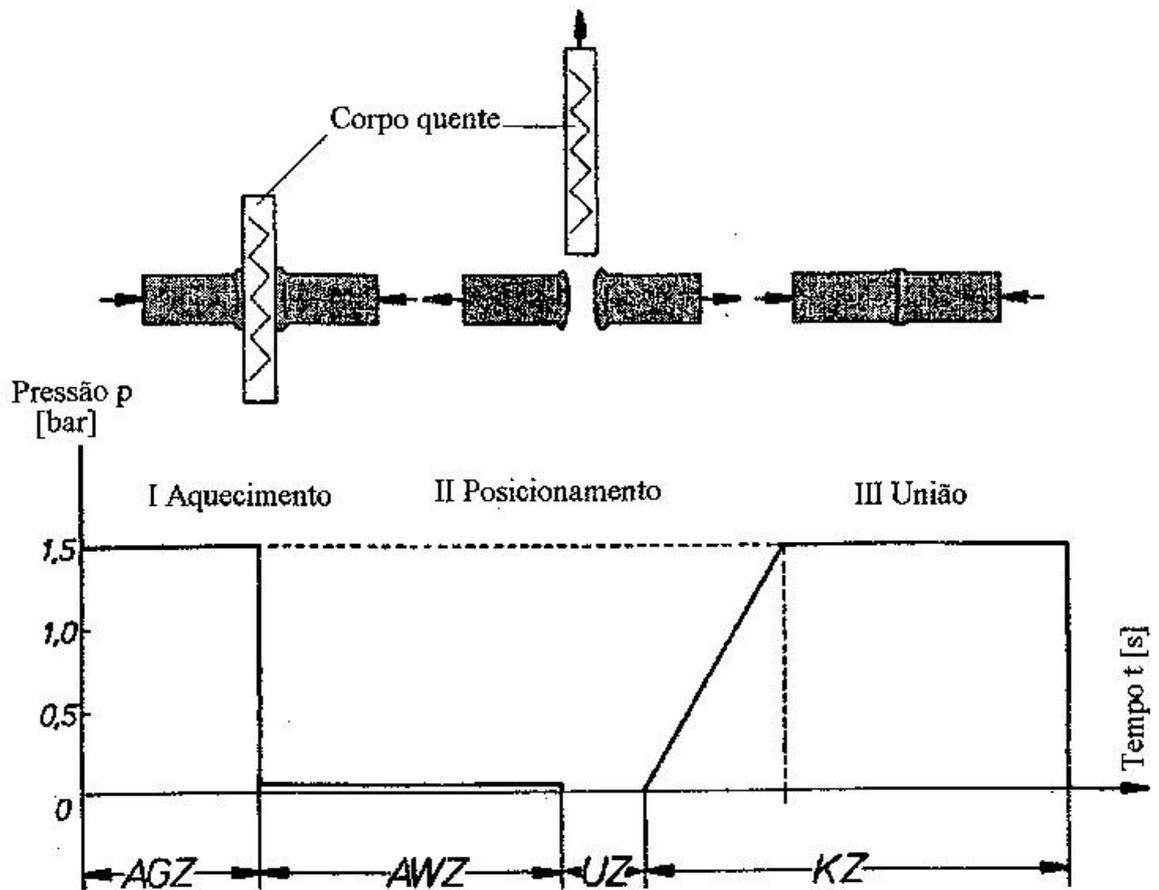


Figura 4 - Sequência de soldagem chata por corpo quente (MICHAELI et al.,1995)

Nesse processo temos:

O tempo de ajuste (AGZ), em que superfícies a serem unidas são ajustadas entre si por fusão. A pressão de 1,5 bar, aproximadamente, atua até que seja possível verificar um bojo² nas margens das superfícies de união.

O tempo de aquecimento (AWZ), em que superfícies são fundidas pelo corpo quente apenas com pressão de contato.

O tempo de posicionamento (UZ), em que o corpo quente é retirado o mais rápido possível.

O tempo de resfriamento (KZ), em que as superfícies a serem unidas são pressionadas entre si e mantidas assim. Com o aumento do resfriamento a pressão é crescente, observando-se o bojo de soldagem. A partir do ponto 3 é mantida uma pressão constante, somente até que a zona de solda atinja uma temperatura específica do processo.

² Saliência convexa

Solda através do impulso de calor: esse processo com corpo quente é mais difundido³. É utilizado apenas para filmes extremamente finos devido à péssima condutibilidade térmica do plástico. Seu grande mercado de aplicação é a indústria de embalagens, para fechamento de recipientes e sacos. A figura 5 apresenta o processo, em discussão.

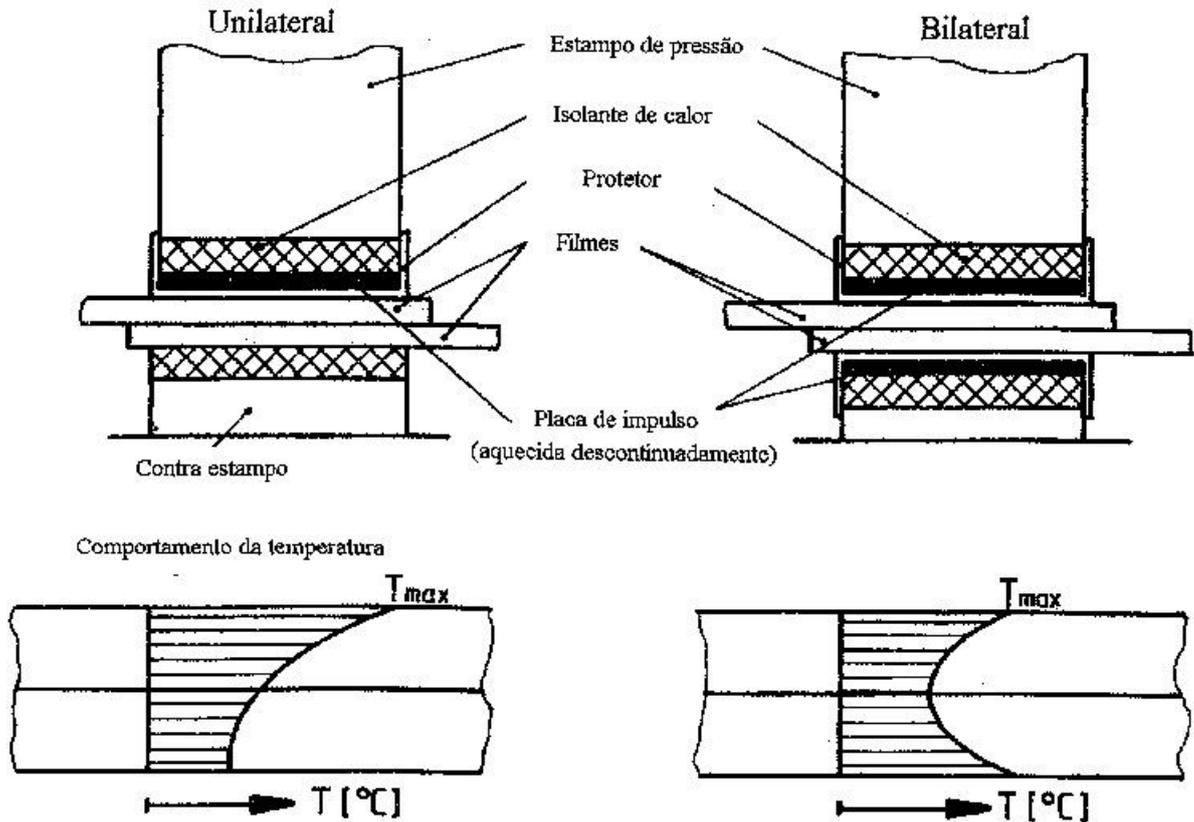


Figura 5 - Soldagem por impulso de calor (MICHAELI et al., 1995)

No processo, os finos trilhos metálicos, revestidos de uma camada antiaderente, são aquecidos por curtos impulsos de alta energia. Estes trilhos passam o calor através de condução aos filmes, que fundem e soldam. Existem os processos unilaterais e bilaterais. No unilaterais o filme é aquecido por trilhos metálicos apenas de um lado e no bilaterais, por ambos os lados.

Os processos geram uma distribuição de calor desfavorável sobre as peças a serem soldadas. É necessário que os pontos de contato dos filmes atinjam a temperatura de fusão sem que o local mais quente atinja a temperatura de degradação do plástico.

Solda através de gás quente: a maioria dos termoplásticos pode ser soldada por este método, mas tem sido aplicada majoritariamente no PVC, em produtos como reservatórios e

³ Espalhado

encanamentos. O processo não é bom para materiais fabricados com carga mineral e é usado somente para unir materiais com espessura maior que 1,5 mm. Não costuma ser aplicado em peças com mais de 9,5mm. As aplicações usuais se encontram em peças grandes, estruturais. O método consiste em aplicar gás quente nas superfícies a serem soldadas e na vareta soldadora. Geralmente utiliza-se ar quente, nitrogênio é utilizado em PE e acetatos, para evitar a oxidação com o ar. A vareta soldadora é constituída do mesmo material das partes a serem ligadas e, à medida que a ferramenta de soldagem passa pela junta, a vareta amolecida é depositada mecanicamente pela área da junta. No resfriamento, as superfícies são unidas pelo material fundido da vareta.

Em termoplásticos os materiais não derretem e escoam, apenas amolecem, e assim o soldador deve aplicar pressão na vareta soldadora para forçar a superfície amolecida sobre a vareta para se criar uma ligação permanente. Varetas com seção triangular preenchem a junta em apenas uma etapa, reduzindo o tempo do processo, obtendo melhor aparência e reduzindo a chance de ocorrer porosidades. Ainda, a vareta triangular pode ser aplicada com uma ferramenta de alta velocidade, que permite uma aparência bem melhor do que se fosse soldada à mão. A velocidade da soldagem à mão pode ser muito aumentada com o uso de revolver, que possui um fluxo de gás quente em sua ponta, e mantém a vareta na posição correta, simplificando a aplicação de uma pressão otimizada no local a ser ligado durante a soldagem. (CRAWFORD, 1998)

Soldagem por atrito: a soldagem por atrito utiliza-se o calor de atrito para fundir o plástico. Sendo que esse processo pode ser classificado em atrito externo e interno.

- O atrito externo, também chamado de atrito rotacional, as peças são soldadas com simetria rotacional. Enquanto uma peça é girada, outra é mantida parada e pressionada contra a rotativa com uma determinada força. As superfícies de junta encaixam-se por fusão. Quando a costura atingir um bojo de soldagem suficientemente grande, o dispositivo de fixação é liberado e a costura⁴ resfria sob pressão. O processo é apresentado na figura 6.

⁴ Ponto localizado entre as superfícies que estão em contato e sendo soldadas

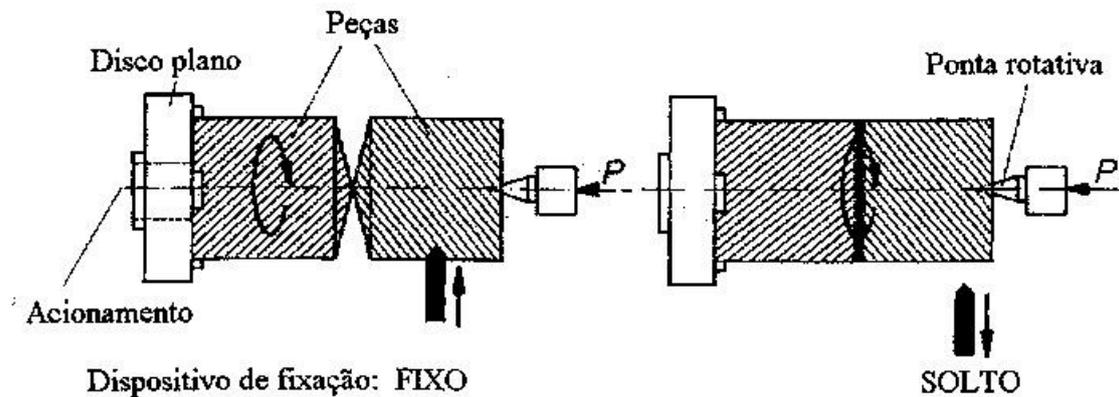


Figura 6 - Soldagem por atrito rotacional (MICHAELI et al.,1995)

- Em relação ao atrito interno este tipo de soldagem, justamente, é o foco deste trabalho. Esta soldagem por atrito interno, normalmente chama-se soldagem por ultrassom.

O uso de vibrações ultrassônicas para soldagem veio para o Brasil na década de 60 e tem crescido sua utilização nos últimos anos. Basicamente o princípio envolve frequências acima de 15 kHz (kHz=mil vibrações por segundo), as mais utilizadas são de 20 e 40 kHz, lembrando que se chama ultrassom devido ao fato de ultrapassar os 18 kHz, audíveis pelo ser humano. Nesse processo, é utilizado um conjunto acústico que converte uma excitação elétrica em vibração, que aplicada ao material gera o aquecimento e a fusão controlada das interfaces.

O ultrassom é empregado principalmente para solda dos seguintes termoplásticos: pet, PP, PC, poliacetal, nylon, acrílico e PS. (CRAWFORD, 1998)

2.3 Compatibilidade de materiais

A maioria dos materiais termoplásticos pode ser soldada pelo ultrassom. Exclui-se desse grupo, os materiais que exigem potências mais altas do gerador de frequência ou pela sensibilidade do termoplástico. Outro fator levado em consideração é a compatibilidade entre eles, como por exemplo, o ponto de fusão dos mesmos, ou seja, os termoplásticos diferentes possuem pontos de fusão distintos, porém, alguns têm pontos de fusão próximos e, por isso, podem ser soldados um com o outro.

A tabela, da figura 7, descreve melhor essa compatibilidade de alguns materiais termoplásticos.

Solda ultra-som															
	● ótima	● parcial	péssima												
	P.S. (poliestireno)	S.A.N.	A.B.S.	Noril	Poliacetal	P.M.M.A. (acrílico)	Acetato de celulose	Poliamida (nylon)	PC (policarbonato)	Poliéster	PE (polietileno)	PP (polipropileno)	P.V.C.	Duracon (celcon)	Delrin
P.S. (poliestireno)	●			●											
S.A.N.		●	●			●									
A.B.S.		●	●			●			●				●		
Noril	●			●											
Poliacetal					●										
P.M.M.A. (acrílico)		●	●			●			●				●		
Acetato de celulose							●								
Poliamida (nylon)								●							
PC (policarbonato)			●			●			●				●		
Poliéster										●					
PE (polietileno)											●				
PP (polipropileno)												●			
P.V.C.			●			●			●				●		
Duracon (celcon)														●	●
Delrin														●	●

Figura 7 - Compatibilidade de termoplásticos (GNULTRASÔNICA, 2010)

3. METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica sobre as técnicas utilizadas para soldagem termoplástica, focando o método por ultrassom e na metodologia, apresentam-se todas as partes de que se compõe o equipamento de geração de ultrassom. Neste item incluem-se também as vantagens e desvantagens da utilização do equipamento ultrassônico.

3.1 Funcionamento do equipamento de solda por ultrassom

O processo de soldagem por ultrassom possui vários periféricos para seu funcionamento. Nas soldadoras por ultrassom, ondas ultrassônicas são geradas por conjuntos acústicos, mostrado na figura 8, sendo este conjunto acústico constituído por um transdutor, um transformador acústico (TA) e uma ferramenta de solda com formato adequado às partes a serem soldadas, chamado de sonotrodo.

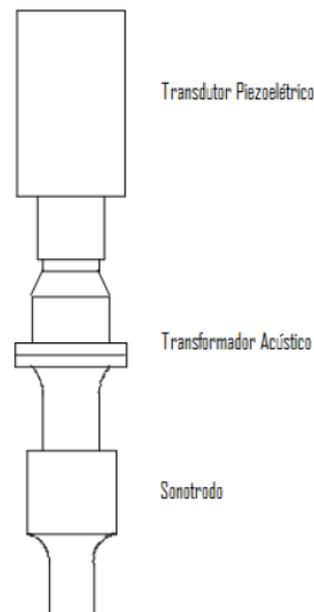


Figura 8 - Conjunto acústico (SONITRON, 1988)

3.2 Funcionamento do gerador

O gerador de ultrassom converte o sinal recebido da rede elétrica, de 220 V e 60 HZ, para 1000 V, numa frequência de 15, 20, 35 ou 40 kHz e o envia para o conjunto acústico. Há duas opções em relação ao uso do gerador:

- O uso em pistola, no caso o operador solde manualmente os termoplásticos, visto que exige pouco esforço do operador. A figura 9 mostra o gerador e ao seu lado uma pistola soldadora;



Figura 9 - Gerador ultrassônico e pistola com luva pneumática para resfriamento de 40 kHz e 400W (Imagem cedida por LS CONTROL AUTOMAÇÃO E SOLDA EM TERMO PLÁSTICO LTDA).

A outra maneira é através da máquina bi-manual pneumática, cujo conjunto acústico é preso e suspenso por uma estrutura metálica. A sua descida é acionada pelos botões chamados bi-manuais e controlada pneumaticamente. O próprio gerador transmite informações do tempo de disparo, solda e fixação. O disparo é o tempo de resposta para a descida do conjunto após ser acionado o bi-manual; a solda é o tempo em que o conjunto permanece ativo, ou seja, soldando as peças; e a fixação é o tempo em que o conjunto fica nas peças, sem soldar, para haver o resfriamento e evitar a má solda, visto que pode grudar no sonotrodo e subir com o conjunto acústico. A figura 10 mostra um exemplo de máquina bi-manual pneumática.



Figura 10 - Máquina bi-manual de prensa pneumática e gerador de ultrassom (GNULTRA-SÔNICA, 2010)

3.3 Conjunto acústico e seus periféricos

O conjunto acústico possui uma frequência de ressonância natural que depende de forma inversamente proporcionais às dimensões de suas partes. Um conjunto acústico de 20 kHz tem aproximadamente o dobro do tamanho de um de similar potência de 40 kHz. (SONITRON, 1988)

As três partes constituintes do conjunto acústico devem apresentar a mesma frequência de ressonância, para tanto são utilizados analisadores de transdutores para garantir a sintonia da frequência. Os três periféricos são sintonizados através da usinagem em fresas, tornos ou retificas. Existe um padrão de formatos dessas peças para determinada frequência, o ajuste de sintonia sempre é realizado, visto que a densidade de qualquer metal varia um pouco, ou seja, não há garantia de que um metal tenha sempre a mesma densidade, conseqüentemente, a mesma frequência.

3.3.1 Transdutor

O transdutor ultrassônico do conjunto acústico converte energia elétrica, recebida de um gerador de alta frequência, em energia mecânica, transmitida para o transformador acústico e sonotrodo. O elemento ativo dos transdutores é um cristal de cerâmica piezoelétrica, ou mais de um, que apresentam o efeito piezoelétrico. O efeito piezoelétrico foi descoberto por Pierre e Jacques Curie, em 1880, e consiste

na variação das dimensões físicas de certos materiais sujeitos a campos elétricos. A figura 11 mostra transdutores de 20 kHz. (PÉCURA, 2004)



Figura 11 - Transdutores de 20 kHz para geradores de 1000W (Imagem cedida por LS CONTROL AUTOMAÇÃO E SOLDA EM TERMO PLÁSTICO LTDA)

3.3.2 Transformador acústico

O sucesso do processamento de termoplásticos por ultrassom depende sempre da amplitude da vibração na face do sonotrodo. Quando variamos essa amplitude, variamos também a velocidade e dessa forma podemos gerar maior ou menor quantidade de calor na junta da soldagem.

O TA, também chamado de *booster*, é acoplado no transdutor controlando os ganhos ou reduções da amplitude de vibração fornecida ao sonotrodo, ou seja, manipula-se a distância que o sonotrodo vibra verticalmente na ordem de micrômetros. Esse controle do ganho ou redução de amplitude é constituído através da forma geométrica de cada TA. O mais comum é o TA verde, mostrado na figura 12, visto que ele apenas conecta o transdutor no sonotrodo, tendo uma relação geométrica de 1:1, ou seja, não fornece ampliameto e nem redução de amplitude.



Figura 12 - Transformador acústico de 20 kHz (Imagem cedida por LS CONTROL AUTOMAÇÃO E SOLDA EM TERMO PLÁSTICO LTDA)

Em alguns casos, são utilizados TA's com ganho ou redução para manipular a amplitude para os termoplásticos, com ponto de fusão baixo ou pouco espessos, utiliza-se TA's redutores, como por exemplo, TA roxo com relação de transformação de 1:0,6. Ou então, materiais com alto ponto de fusão ou muito espessos, é utilizado um TA amplificador, como por exemplo, um TA prata com relação de transformação de 1:2. A figura 13 mostra esses dois tipos de TA's. (SONITRON, 1988)



Figura 13 – TA's roxo e prata de 20 kHz (GNULTRASÔNICA, 2010)

Além do formato geométrico diferente entre os TA's, é realizado um processo de anodização⁵ em seis cores diferentes para facilitar a identificação que codificam sua relação de amplificação e também para protegê-lo contra ferrugem. A tabela 1 indica melhor essa relação de cores com redução, acoplamento e amplificação de amplitude.

⁵ Processo em que o metal recebe um banho de outro material, que tem por finalidade acelerar e controlar a formação da camada de óxido desse metal, originando uma proteção superficial e melhorando certas propriedades, como por exemplo, resistência a mau tempo, dureza superficial, possibilitando uma diversificação de tipos de acabamento. (CPA, 2012)

Tabela 1 – Identificação de cores e relações de transformação de amplitude (SONITRON, 1988)

Aumenta amplitude		Haste de conexão		Reduz amplitude	
Relação	Cor	Relação	Cor	Relação	Cor
1 : 1,5	Ouro	1 : 1	Verde	1 : 0,6	Roxo
1 : 2,0	Prata			1 : 0,5	Azul
1 : 2,5	Preto				

3.3.3 Sonotrodo

Um sonotrodo, feito de duralumínio, aço ou titânio, dependendo da aplicação, vibrando livremente no ar requer pouquíssima energia, porém quando aplicamos uma carga mecânica ao sonotrodo, uma carga elétrica proporcional é aplicada na fonte geradora. O formato geométrico dos sonotrodos varia conforme a potência exigida para soldar o termoplástico. A figura 14 mostra as zonas nodais de três formatos diferentes, indicando o ponto em que teoricamente não há vibração. (SILVA, 2009)

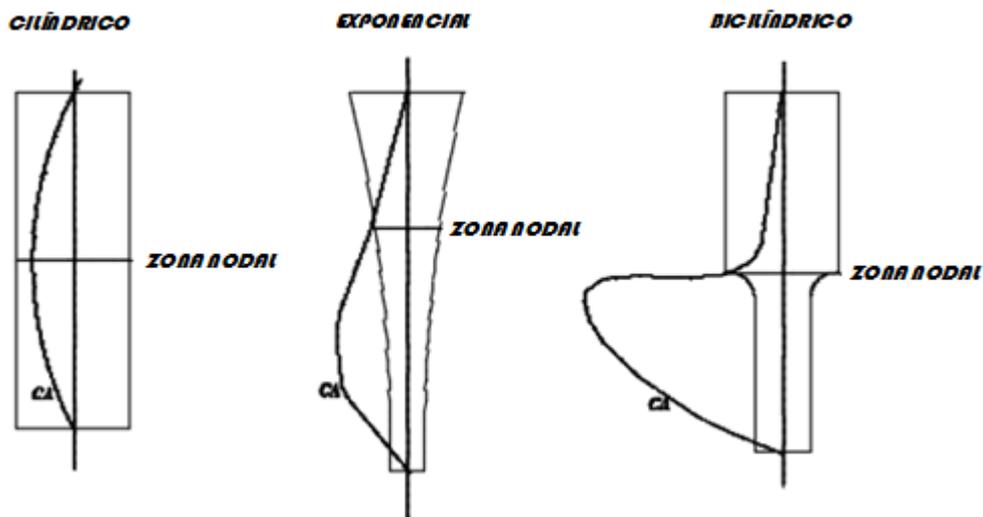
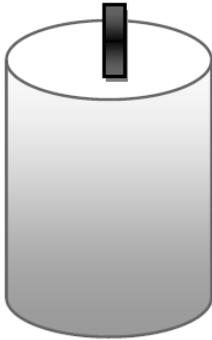


Figura 14 - Zona nodal de três formatos de sonotrodos (SONITRON, 1988)

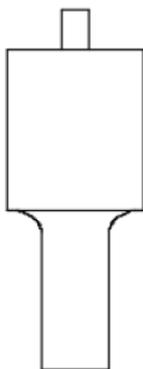
A seguir são descritos os principais formatos geométricos de sonotrodos para aplicações diferentes. Além de terem o formato das pontas semelhante às peças a serem unidas, cada sonotrodo abrange uma área diferente. (LEMOS, 2009)

**CILÍNDRICO**

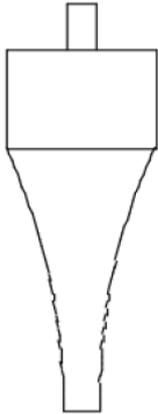
Sonotrodo Cilíndrico: Fabricados em média de 90 mm de diâmetro atingindo até 120 mm, mas quanto maior essa dimensão a condutividade de energia vem a ser problemática devido à sua geometria.

**EXPONENCIAL**

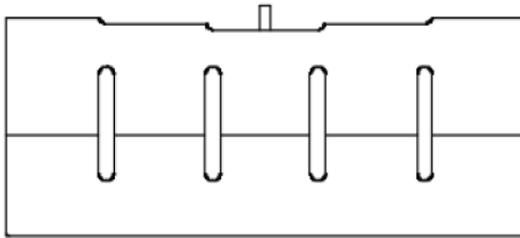
Sonotrodo exponencial possui uma curva de fadiga ideal do material, mas uma pequena amplitude (geralmente 1/3). Este tipo de sonotrodo é o mais utilizado em aplicações de solda em termoplásticos menos espessos ou que possuem baixo ponto de fusão.

**BICILÍNDRICO**

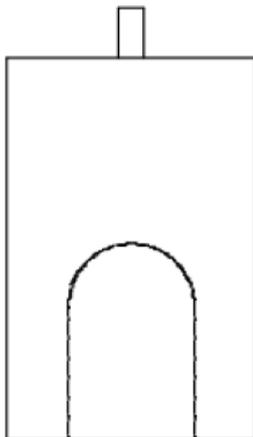
Sonotrodo bicilíndrico é usinado com diâmetros diferentes, mas constantes, com um suave raio na área para uma suave curva nodal. Sua forma permite a colocação na área da face para encaixes de diferentes formas.

**CATENOIDAL**

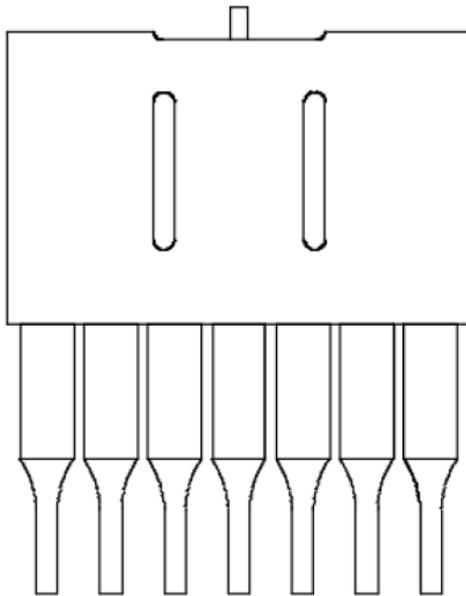
Sonotrodo catenoidal combina as vantagens da curva suave da senóide e possui grande amplitude assim como os bicilíndricos. Seu fator de amplificação pode chegar a 1/8.

**RETANGULAR**

Sonotrodo retangular podem ter uma variação enorme de configuração, podendo atingir de 3 mm a 300 mm de comprimento ou ainda maior. Os sonotrodos retangulares podem ser combinados ou cônicos. Sonotrodos com menos de 90 mm de comprimento são, geralmente, sólidos e acima disso são feitos rasgos para reduzir o esforço lateral e eliminar frequência parasita.

**CÚPULA**

Sonotrodo cúpula possui uma cavidade interior. A espessura das paredes deste tipo de sonotrodo não deve ser inferior a 6 mm, pois podem se tornar muito frágeis e desgastarem rapidamente.

**COMPOSTO**

Sonotrodo composto, ou *master*, possui duas partes, visto que não se consegue usiná-lo como um sonotrodo normal, a base de sustentação é feita de duralumínio e suas pontas em titânio, duralumínio ou aço. Geralmente, é mais utilizado para soldar diferentes partes de uma mesma peça ao mesmo tempo.

3.4 Quantidade de energia e amplitude para soldagem

Sonitron (1988, p.2) define que a quantidade de energia aplicada ao termoplástico depende basicamente da velocidade de contato entre a peça e o sonotrodo, variando alternadamente de forma senoidal. A velocidade na face do sonotrodo é proporcional ao produto da amplitude de deslocamento pela frequência.

O deslocamento da face ou amplitude de face é normalmente em torno de 25 ou 0,0025 mm. A quantidade de energia mecânica (vibração), aplicada à peça, é o produto da velocidade do sonotrodo pela força em reação ao movimento do sonotrodo produzida pela peça, ou seja, para a ação do sonotrodo há uma força contrária da peça. Dentro de certos limites essa força de reação é relacionada com a pressão exercida pela prensa pneumática sobre a peça e também função da área e do material a ser soldado. (SONITRON, 1988)

O produto força x velocidade, determina o fluxo de energia mecânica sobre a peça, porém para obtermos um resultado ideal devemos considerar que cada aplicação requer uma relação específica de força e velocidade, ou seja, a seleção da pressão e amplitude apropriada, para cada aplicação. (SONITRON, 1988)

Usando frequências ultrassônicas, podem-se dosar grandes quantidades de energia em uma determinada carga sem necessitar de grandes deslocamentos ou forças. O uso do ultrassom possibilita a dosagem de grandes quantidades de energia a uma peça termoplástica, sem produzir deformações, rachaduras ou tensões no material. (SONITRON, 1988)

3.5 Vantagens e desvantagens da soldagem por ultrassom

Existem inúmeros processos de soldagem, diferentes para cada tipo de material, verificando as diferentes aplicações. A tabela 2 define as vantagens e desvantagens da solda termoplástica. (LEMOS, 2009)

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da solda termoplástica por ultrassom (LEMOS, 2009)

Vantagens	Desvantagens
<ol style="list-style-type: none"> 1. Junta não apresenta problemas de perda de ajuste; 2. Operação manual ou automática; 3. Pode ser altamente portátil, no caso de utilizar o modo manual com pistola; 4. Custo, em geral, razoável; 5. Juntas isentas de vazamentos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não pode ser desmontada, a separação ocorre apenas quebrando as peças unidas; 2. Pode causar distorções e tensões residuais; 3. Requer habilidade do operador; 4. Pode exigir operações auxiliares de elevado custo e duração, por exemplo, usinagem constante dos sonotrodos;

Esse processo é bastante utilizado em grande escala nas indústrias de produtos eletrodomésticos, automobilísticos e brinquedos, devido às vantagens apresentadas, como por exemplo, o descarte do uso de solventes, cola, presilhas, grampos, proporcionando a redução de custos para as empresas, trazendo rapidez na produção e melhor qualidade nos produtos. Sendo assim, aumenta a qualidade e garantia de estanqueidade⁶ do material soldado.

⁶ Junção impenetrável

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o decorrer dos anos e a necessidade crescente das grandes empresas de produzir produtos cada vez melhores, competitivos e com preços mais acessíveis, o plástico surgiu como um grande aliado nessa nova realidade do processo industrial. Os plásticos surgiram como uma alternativa a produtos pesados e caros, como, por exemplo, metais. Seus processos produtivos são mais limpos, baratos e rápidos comparados com os metais.

Constantes pesquisas de desenvolvimento para aplicação tecnológica dos plásticos são feitas com maior frequência nas indústrias, pois as variabilidades de utilização destes materiais ainda são pouco conhecidas.

Dentro deste cenário, empurrado pela indústria automotiva, que é sem dúvida a que mais utiliza este tipo de processo e a que sempre está investindo em novidades tecnológicas que auxiliam sua produção e deixam seus produtos mais acessíveis, surge à soldagem por ultrassom.

Este procedimento é vantajoso, visto que em comparação com outros processos, acaba sendo mais barato e eficaz. Um exemplo disso é a vibração linear, que pode soldar de uma vez só um painel frontal de um automóvel, porém pode haver falhas em alguns pontos e deformação da peça se não estiver bem ajustados os tempos de solda, fixação e disparo. Por outro lado, a solda por ultrassom não deixa falhas, embora apresente uma demora na soldagem de diversos pontos.

O objetivo deste trabalho foi apresentar como funciona todo o processo de soldagem por ultrassom, desde o funcionamento do aparelho até a compatibilidade de materiais, mostrando que nem sempre se consegue soldar diferentes polímeros, pois possuem estruturas e pontos de fusão diferentes, necessitando, assim, de divisões entre eles. Neste trabalho também foram mostrados os vários tipos de sonotrodos, explicando-se o comportamento de cada um deles.

Uma importante contribuição do presente trabalho é a análise da eficiência do processo de solda por ultrassom, detalhando suas principais utilizações, bem como vantagens e desvantagens do processo.

Alguns outros processos de solda, como por exemplo o processo de soldagem chata com corpo quente, também foram apresentados, porém de forma sucinta, demonstrando a existência destes.

Conclui-se, pelo presente trabalho, que a soldagem em termoplásticos é um forte aliado da indústria de transformação e de inovação tecnológica e tem sido muito importante na melhoria de processos industriais e na eficiência da produção que prima por menor custo do produto final.

Uma vez que no Brasil, o assunto de soldagem por ultrassom se encontra pouco difundido e ainda, pelo fato da utilização de polímeros na indústria termoplástica estar mais focada em processos de transformação (por exemplo: injeção e extrusão) seria muito interessante e viável, para uma etapa futura desse trabalho, um estudo de caso.

A realização desse estudo de caso seria uma maneira de analisar o processo de solda termoplástica por ultrassom, mais profundamente e sem restrições, no que diz respeito a segredos tecnológicos.

Dessa maneira, o presente trabalho abre caminho para pesquisas futuras, que poderão contribuir e muito para o conhecimento e tecnologia da solda termoplástica por ultrassom.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S/A, 2011

CANEVAROLO JÚNIOR, S.V. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artiliber Editora Ltda., 2006.

CPA. **Linha completa de produtos para preparação e acabamento de alumínio**. 2012. Disponível em: <http://www.cpacorantes.com.br/anodizacao.htm>. Acesso: 29 de maio de 2012

CRAWFORD, R. J. **Plastics engineering**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

GNULTRASÔNICA. **Solda Plástica**. 2010. Disponível em: http://www.gnultrasonica.com.br/materias.php?cd_secao=146&codant=&friurl= Acesso: 18 de maio de 2012

GORNI, A.A. **Materiais Poliméricos**. Nov. 2004. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/mg082.html> Acesso: 06 de maio de 2012.

LEMONS, J.F.N. **Soldagem por vibração em materiais termoplásticos**. 2009. 60 f. Monografia (Tecnólogo em Produção com ênfase em Plástico) – Centro Paula Souza, Centro Tecnológico da Zona Leste, São Paulo (SP).

MICHAELI, W. et al. **Tecnologia dos Plásticos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1995.

PÉCURA, J. D. **Ultra-som (2004)**. FORP-USP. Nov. 2004. Disponível em: <http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>. Acesso: 26 de maio de 2012

SILVA, L.C.A. **Soldagem de termoplásticos por ultrassom**. 2009. 53 f. Monografia (Tecnólogo em Produção com ênfase em Plástico) – Centro Paula Souza, Centro Tecnológico da Zona Leste, São Paulo (SP).

SONITRON, **Guia prático de soldagem de plásticos por ultrassom**, 1988.