

ANTONIO FRANCISCO SAFONT MONTÓ JORGE

**OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE
POLÍMEROS POR ULTRA-SOM**

Trabalho de formatura

Orientador:
Sérgio Duarte Brandi

São Paulo
2003

Índice

Lista de figuras	i
Lista de equações	ii
Lista de tabelas	iii
1. Introdução	pág. 1
1.1 Importância da soldagem por ultra-som	pág. 1
1.2 Justificativa para o estudo	pág. 3
2. Revisão Bibliográfica	pág. 4
2.1.1 Processos aplicados à soldagem de polímeros	pág. 4
2.1.2 Colagem	pág. 4
2.1.3 Fixação mecânica	pág. 5
2.1.4 Soldagem por fusão de polímeros termoplásticos	pág. 5
2.1.4.1 Soldagem por ultra-som	pág. 5
2.1.5 Mecanismo de soldagem por ultra-som	pág. 13
2.1.6 Parâmetros de processo	pág. 14
2.2 Propriedades dos polímeros	pág. 16
2.2.1 Poli (metacrilato) de metila (PMMA)	pág. 16
2.2.2 Policarbonato (PC)	pág. 17
2.3 Soldabilidade	pág. 18
2.3.1 Fonte de aquecimento externo	pág. 18
2.3.2 Fonte aquecimento interno	pág. 18
2.4 Ferramental estatístico	pág. 19
2.5 Viscosimetria	pág. 20
2.5.1 Viscosidade	pág. 20

2.5.2 Viscosidade de soluções diluídas de polímeros	pág. 20
3. Objetivos	pág. 23
4. Materiais e métodos	pág. 24
4.1 Características dos polímeros utilizados	pág. 24
4.1.1 PMMA	pág. 24
4.1.2 PC	pág. 24
4.1 Características do equipamento	pág. 25
4.1.1 Dispositivo de soldagem	pág. 25
4.1.2 Conjunto acústico	pág. 27
4.2 Parâmetros de soldagem	pág. 28
4.3 Método de obtenção de imagens	pág. 28
4.4 Ensaio de tração	pág. 30
4.4.1 Equipamento	pág. 30
4.4.2 Corpos de prova	pág. 30
4.5 Determinação dos ciclos térmicos (procedimento)	pág. 33
4.6 Viscosimetria	pág. 34
5. Resultados	pág. 36
5.1 Área soldada em função dos parâmetros de soldagem	pág. 36
5.1.1 PMMA	pág. 36
5.1.2 PC	pág. 37
5.2 Energia absorvida pela junta durante a soldagem	pág. 38
5.2.1 PMMA	pág. 38
5.2.2 PC	pág. 39

5.3 Ciclo térmico	pág. 40
5.3.1 PMMA	pág. 40
5.3.2 PC	pág. 40
5.4 Ensaio de tração	pág. 41
5.4.1 Propriedades mecânicas	pág. 41
5.4.2 Eficiência da junta soldada	pág. 43
5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura	pág. 44
5.6 Comparação entre as duas direções de injeção	pág. 47
5.6.1 Distribuição F	pág. 47
5.7 Viscosimetria	pág. 48
5.7.1 PMMA	pág. 48
5.7.2 PC	pág. 49
6. Discussão dos resultados	pág. 50
6.1 Variação da área com os parâmetros de soldagem	pág. 50
6.2 Variação da área com as características do material e do sonotrodo	pág. 52
6.3 Ciclos térmicos	pág. 52
6.4 Ensaio de tração	pág. 53
7. Conclusão	pág. 55
8. Agradecimentos	pág. 56
9. Referência Bibliográfica	pág. 57
10. Bibliografia	pág. 57

Lista de figuras

Figura	Pág.
1.1 Peças soldadas por ultra-som	1
1.2 Sonotrodo utilizado para soldagem de embalagens	2
2.1 Esquema do equipamento de soldagem por ultra-som	6
2.2 Módulo gerador	6
2.3 Conversor piezoelétrico	8
2.4 Imagem do conversor	9
2.5 Conjunto acústico	10
2.6 Curvas de carga em função da pressão	11
2.7 Sonotrodos	12
2.8 (a) Esquema de peça irradiada por ultra-som	13
2.8 (b) Representação gráfica da onda mecânica	13
2.9 Diagrama de soldabilidade	15
2.10 Fotografia de junta	16
2.11 Monômero de PMMA	17
2.12 Monômero de PC	18
4.1 Dispositivo fixador	26
4.2 Fixadores	27
4.3 Esquematização para o cálculo de área soldada	29
4.4 Equipamento de ensaio de tração	30
4.5 Corpo de prova	31
4.6 Injetora	31
4.7 Lay-out de injeção	32
4.8 Posicionamento de termopares	34
5.1 Porcentagem de área soldada x tempo (PMMA ,15 psi)	36
5.2 Porcentagem de área soldada x tempo (PMMA ,20 psi)	36
5.3 Porcentagem de área soldada x tempo (PC ,15 psi)	37
5.4 Porcentagem de área soldada x tempo (PC ,20 psi)	37
5.5 Energia absorvida x porcentagem de área soldada (PMMA, 15 psi)	38
5.6 Energia absorvida x porcentagem de área soldada (PMMA, 20 psi)	38
5.7 Energia absorvida x porcentagem de área soldada (PC, 15 psi)	39
5.8 Energia absorvida x porcentagem de área soldada (PC, 20 psi)	39
5.9 Ciclo térmico para PMMA	40
5.10 Ciclo térmico para PC	40
5.11 Corpo de prova de PMMA inteiro	41
5.12 Corpo de prova de PMMA soldado	41
5.13 Corpo de prova de PC inteiro	42
5.14 Corpo de prova de PC soldado	42
5.15 (x) MEV (PMMA)	44
5.16 (x) MEV (PC)	46
6.1 Esquema de fenômeno de transição de energia na junta	50

Lista de equações

Equação	Pág.
2.2 Médias amostrais	19
2.3 Médias amostrais	19
2.4 Médias amostrais	19
2.5 Média das médias amostrais	19
2.6 Variância amostral das médias	19
2.7 Variância amostral de cada grupo	19
2.8 Variância amostral de cada grupo	19
2.9 Variância amostral de cada grupo	19
2.10 Média das variâncias amostrais	20
2.11 Estatística F	20
2.12 Viscosidade relativa	21
2.13 Viscosidade específica	22
2.14 Viscosidade reduzida	22
2.15 Viscosidade inerente	22
2.16 Viscosidade intrínseca	22
2.17 Mark - Houwink	22
4.1 Fração de área soldada	29

Lista de tabelas

Equações	Pág.
4.1 Propriedades do PMMA	24
4.2 Propriedades do PC	25
4.3 Valores para injeção de PMMA	53
5.1 Dados teóricos e medidos da tensão de resistência e ruptura	43
5.2 Eficiência de junta	43
5.3 Teste F para PMMA	47
5.4 Teste F para PC	47
5.5 Material (BASE) PMMA	48
5.6 Massa molar (BASE)	48
5.7 Material da junta	49
5.8 Massa molar (JUNTA)	49

1. Introdução

1.1 Importância da soldagem por ultra-som

Este processo de soldagem de partes poliméricas é utilizado nas mais diferentes áreas da indústria. De todas elas as que mais utilizam este processo são a automobilística, a indústria de embalagens, de eletrodomésticos e de autopeças.

Na indústria automobilística e de autopeças alguns componentes utilizam este processo de soldagem para obtenção de peças, as quais precisão dimensional e a grande quantidade de produção são fatores de tomada de decisão quanto à escolha de um processo de soldagem. Algumas peças que utilizam a soldagem por ultra-som estão apresentadas na figura 1.1.

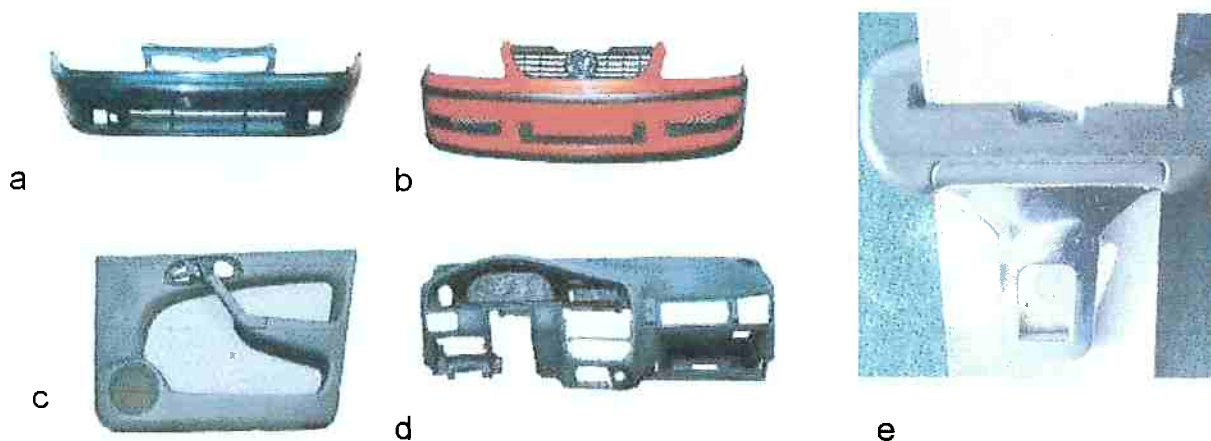


Figura 1.1 – (a) e (b) pára-choques; (c) painel da porta; (d) painel de instrumentos; (e) fivela do cinto de segurança.

Pode-se constatar a importância do processo contando quantas soldas deste tipo ocorrem em um veículo por tipo de conjunto soldado. Apenas tomando como base de cálculo os itens da figura 1.1, pode-se contar: dois conjuntos de

para-choques, um conjunto do painel, dois ou quatro conjuntos para as portas e cinco conjuntos de fivelas para os cintos de segurança.

Na indústria de embalagens não existe processo mais rápido ou mais adequado em termos de proteção ambiental do que a soldagem por ultra-som de embalagens termoplásticas. As vantagens são as seguintes:

- não há contato do alimento com a fonte de calor;
- não há deterioração do conteúdo causado por calor;
- a movimentação do produto não impede a qualidade da soldagem;
- não são necessários aditivos.

Uma foto de soldagem por ultra-som em embalagens é ilustrada na figura 1.2. Observa-se que o sonotrodo tem características geométricas compatíveis com a embalagem a ser soldada.

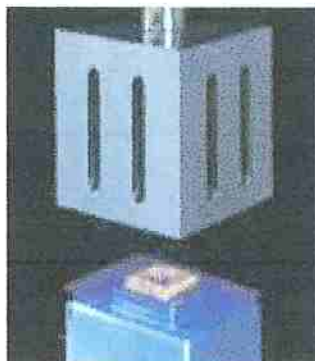


Figura 1.2 – Sonotrodo utilizado para soldagem (selagem) de embalagens.

A soldagem por ultra-som é um dos tipos de soldagem de polímeros que propiciam muitos fenômenos a serem estudados. Porém, é um daqueles que tem menos artigos impressos nos diversos jornais científicos internacionais. Desta

forma, a pesquisa neste tipo de soldagem torna-se interessante pela pouca quantidade de informações referentes à mesma.

1.2 Justificativa para o estudo

A soldagem de polímeros por ultra-som encontra uma vasta área de aplicação nas mais diferentes atividades industriais, desde a confecção de componentes, como lanternas, até a substituição de elementos de fixação em artigos, como painéis de automóveis. É um dos métodos mais importantes de soldagem devido as suas aplicações e versatilidade.

O seu sucesso deve-se principalmente ao tempo de soldagem necessário, geralmente na ordem de 0,1 a 1 segundo. Porém, a parte a ser soldada e o processo dependem diretamente um do outro. Esta interdependência se deve à algumas variáveis que influenciam o processo, tais como a geometria da peça e a área a ser soldada[1]. Algumas destas variáveis foram estudadas durante o trabalho de formatura e serão abordadas nos capítulos posteriores.

Além disto, trata-se de um processo pouco pesquisado nos meios acadêmicos, especialmente no Brasil. Desta forma, o estudo da junção se dará de uma forma semelhante àquela realizada com os metais que, por sua vez, já é bastante consagrada e consolidada.

2. Revisão Bibliográfica

2.1.1 Processos de junção aplicados à soldagem de polímeros

O ponto chave quando se fala em processos de junção de polímeros é a característica do material. Se o polímero é termofixo não podemos utilizar processos baseados em mudança de temperatura e conseqüente mudança de estado físico, uma vez que devido à sua estrutura reticulada, o termofixo não amolece e resfria mantendo suas propriedades. Já os termoplásticos podem ser amolecidos e resfriados dentro de faixas de temperatura sem perder as suas propriedades.

Desta maneira pode-se dizer que os processos mais indicados para termofixos são aqueles que não envolvem variações de temperatura como a colagem e a fixação mecânica e para os termoplásticos podem-se aplicar os outros processos como a soldagem por chapa quente ou ultra-som, além da colagem e da fixação.

2.1.2 Colagem

Na colagem a união se dá por meio de um material intermediário chamado de adesivo. Um adesivo é definido como uma substância capaz de unir materiais através de junção de superfícies. Isto é uma definição geral e inclui termos como cola, cimento e pasta. Vários adjetivos descritivos são aplicados ao termo adesivo para indicar certas características. Estes podem indicar a forma física como, por exemplo, líquido ou fita adesiva. O tipo químico às vezes é indicado, isto é, adesivo de silicato ou adesivo de resina. Os adesivos são uma das técnicas de junção mais antigas, mas a tecnologia de adesivo progrediu muito pouco até o século vinte. Registros mostram que adesivos são usados há mais de três mil de anos. Os adesivos derivados de poços de betume e piche foram usados em estruturas em estruturas antigas.

2.1.3 Fixação mecânica

Na fixação a união se dá por meio de um encaixe entre dois polímeros com características mecânicas diferentes. A peça a ser encaixada na outra deve ser menos rígida que a outra de modo que se deforme durante o encaixe e volte à sua forma original depois do encaixe mantendo as peças unidas.

2.1.4 Soldagem por fusão de polímeros termoplásticos

A soldagem por fusão de termoplásticos ocorre pelo aquecimento das faces a serem soldadas através de uma fonte externa ou interna. O aquecimento se faz até o amolecimento da junta e as peças são pressionadas até o esfriamento da mesma. Como exemplo deste tipo de soldagem temos a soldagem por chapa quente e a soldagem por ultra-som.

2.1.4.1 Soldagem por ultra-som

2.1.4.1.1 Equipamento

Os sistemas de soldagem por ultra-som constam de um gerador que produz altas frequências, geralmente entre 20 a 40 kHz; um booster; um sonotrodo; um conversor e alguns controles pneumáticos, conforme apresentado na figura 2.1. O conversor, o booster e o sonotrodo formam um acoplamento chamado de conjunto acústico, pelos especialistas. Todo o equipamento de ultra-som está descrito nos próximos parágrafos.

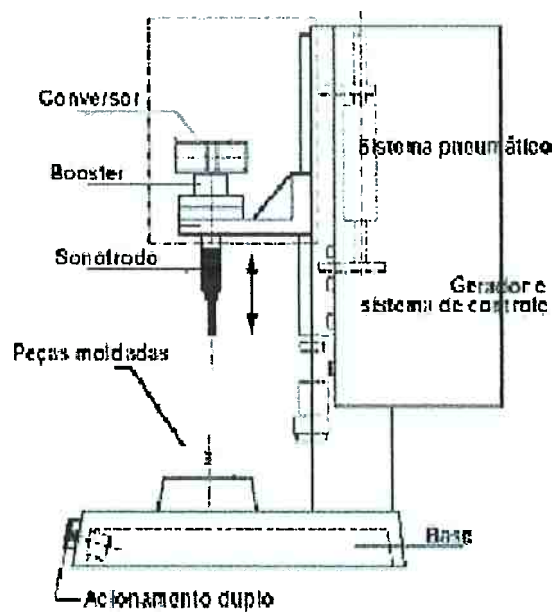


Figura 2.1 – Esquematização de um equipamento de soldagem por ultra-som.

2.2.1.1 Módulo gerador

O módulo gerador é o responsável por transformar a energia elétrica de baixa frequência (60 Hz) e voltagem de 220 V que é obtida na rede elétrica convencional, em energia elétrica de alta frequência (20 kHz) e voltagem de 600 V conforme a figura 2.2 [2]. A energia elétrica nessa voltagem e frequência são transmitidas para o atuador.



Figura 2.2 – Esquema da mudança de voltagem e frequência da energia elétrica num módulo gerador.

2.2.1.2 Atuador

O atuador consiste de uma base, uma coluna, e uma estrutura rígida onde se localiza o conjunto acústico. No atuador, um mecanismo de cabeçote pneumaticamente acionado rebaixa e suspende o conjunto acústico. Existem mecanismos no atuador que controlam a exposição à onda ultra-sônica em função do intervalo de tempo e da taxa de pressão a ser aplicada.

2.2.1.3 Conjunto acústico

O conjunto acústico consiste em três componentes: conversor; booster e sonotrodo. Como cada um deles tem suas características próprias serão descritos separadamente.

a) Conversor:

O conversor tem por função converter energia elétrica em energia mecânica. A energia elétrica é aplicada ao conversor, que nada mais é do que um transdutor eletromecânico. Após a aplicação de energia elétrica sobre seis cristais piezelétricos, que estão internos ao conversor, há a geração de energia mecânica por vibração.

Quando uma voltagem alternada dV é aplicada ao conversor há a geração alternada de um campo elétrico correspondente dE e uma variação alternada dT na espessura dos cristais piezelétricos. Para cada variação na espessura há uma variação correspondente de pressão dP . Assim a aplicação de corrente alternada no conversor gera pressão, iniciada nos cristais e refletidas à extremidade do conversor [3]. A figura 2.3 esquematiza tal raciocínio.



Figura 2.4 - Imagem do posicionamento do conversor e do booster em um equipamento de soldagem por ultra-som Branson 920.

b) Booster:

O booster é o elemento do conjunto acústico que ajusta a amplitude na qual a ponta do sonotrodo irá trabalhar. Fica posicionado entre o conversor e o sonotrodo conforme a figura 2.5, podendo ser de liga de alumínio ou de liga de titânio. A existência do booster se dá pelo fato da soldagem de polímeros por ultra-som depender da amplitude de movimentação do sonotrodo. Como é impossível projetar ou prever a amplitude ideal de um sonotrodo para determinada aplicação, utilizam-se boosters que aumentarão (boosters amplificadores) ou diminuirão (boosters redutores) a amplitude. Assim, é possível se obter o adequado grau de fluxo de energia na peça plástica a ser juntada.

Alguns fatores que determinam a amplitude do sonotrodo são o tipo de polímero a ser soldado; a geometria da peça e a natureza do trabalho a executar.

Existem no mercado boosters que convertem a amplitude de 0,5 a 2,5 vezes a amplitude vinda do conversor.

Nos booster existe uma taxa de ampliação ou redução que corresponde à razão entre as suas áreas inferior e superior, ou seja, ao quadrado da taxa entre os diâmetros inferiores e superior [1], dada pela equação 2.1.

$$A = S_1 / S_2 = (D_1)^2 / (D_2)^2 \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde: A é a taxa de ampliação ou redução; S1 é a área superior do booster; S2 é a área inferior do booster; D1 é o diâmetro médio da parte superior do booster e D2 é o diâmetro médio inferior do booster. As regiões inferiores e superiores do booster estão apresentadas na figura 2.5.

Os boosters são normalmente montados num ponto nodal, que é um ponto de vibração mínima, do movimento axial. Com isso a perda de energia é minimizada e a transmissão de vibrações para a coluna de suporte é evitada.



Figura 2.5 – Imagem de um conjunto acústico pronto para soldagem.

Os produtores de conversores constroem um gráfico, ilustrado na figura 2.6, que analisa a carga em função da pressão, com aumentos diferentes de amplitude. Verifica-se que com menores amplitudes existe maior necessidade de pressão para a obtenção de uma mesma carga. O aumento a que se refere a legenda da figura 2.6 é de quantas vezes o valor de amplitude de saída do conversor é alterada pelo booster.

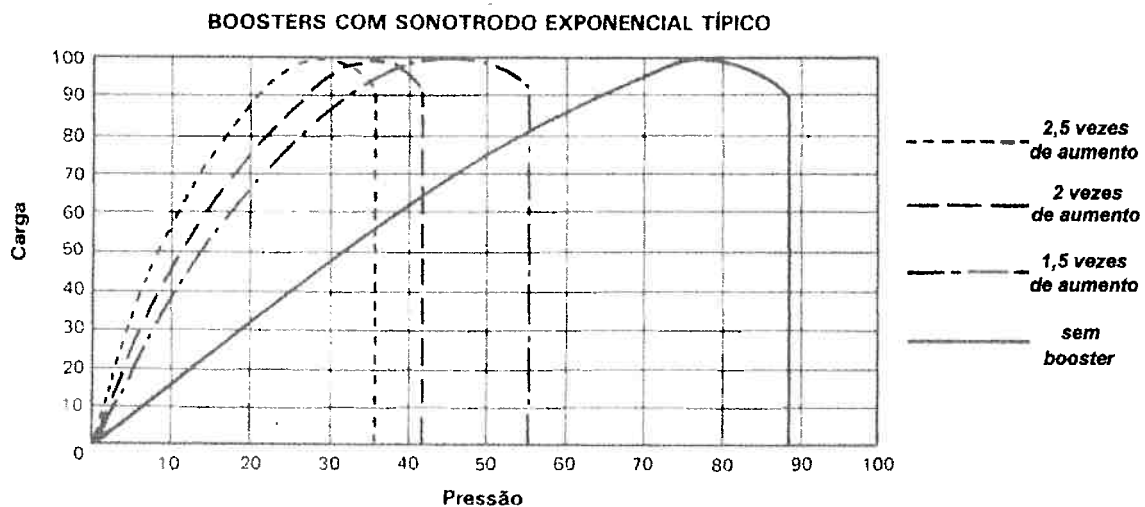


Figura 2.6 – Curvas de carga em função da pressão para diferentes amplitudes de onda [4].

c) Sonotrodo:

A amplitude é uma função do formato do sonotrodo, que é determinado pelo tamanho e formato das peças a serem soldadas.

O sonotrodo é geralmente selecionado ou desenvolvido para as aplicações específicas. Ele é o elemento que aplica pressão nas peças a serem unidas, transferindo vibrações ultra-sônicas do conversor, corrigidas pelo booster, para a peça.

Os sonotrodos são geralmente feitos de ligas de titânio, alumínio ou aço, devido às suas propriedades mecânicas. As ligas de titânio constituem os melhores materiais para a fabricação de sonotrodos, pois aliam alta flexibilidade, suportando distorções, e alta resistência mecânica. Os sonotrodos de alumínio são cobertos por cromo ou níquel, ou outros revestimentos de alta dureza que aumentam a resistência do alumínio.

Os sonotrodos são seções de meio período de onda, ou seja, trabalham somente nos picos positivo e negativo da onda senoidal de 20 kHz. Como o titânio tem velocidade de propagação de onda de 5900 m/s e o alumínio de 5200 m/s, o tamanho médio do sonotrodo é de 130 mm, para frequência de trabalho a 20 kHz.[2]

Os sonotrodos podem ser escalonados, cônicos, exponenciais ou catenoidais. O ganho de amplitude é maior no catenoidal, depois no exponencial, nos cônicos e nos escalonados. Na figura 2.7 encontram-se alguns tipos de sonotrodos.

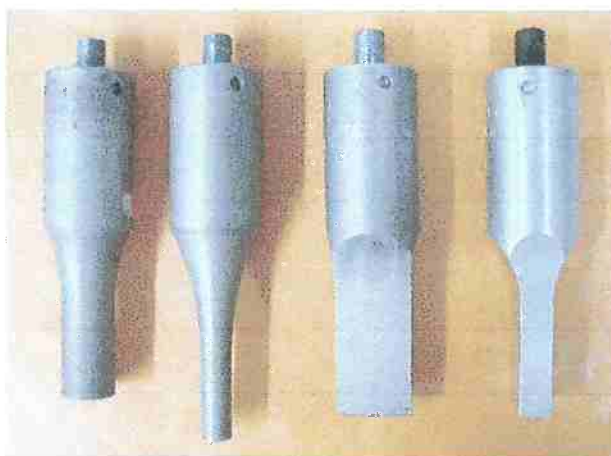


Figura 2.7 – Sonotrodos: a) cilíndrico; b) catenoidal; c) escalonado (seção retangular); d) seção quadrada

O formato do sonotrodo, que determina qual é o seu tipo, determina a amplitude final da onda ultra-sônica. Cada sonotrodo tem uma frequência de sintonia característica determinada pelo fabricante.

2.1.5 Mecanismo de soldagem por ultra-som

Quando os plásticos são unidos na soldagem por ultra-som, as vibrações transversais são transmitidas pelo sonotrodo, como citado. Um campo de onda estacionário se forma na região das partes juntadas, tendo influência decisiva na transmissão e conversão de energia.

Tomando o exemplo de uma peça irradiada por ultra-som, as figuras 2.8 (a) e 2.8 (b) apresentam um padrão de onda estacionária transversal. Zonas bem focalizadas (1 e 2) e regiões fora de foco (3, 4 e 5) são visíveis.



Figura 2.8 (a)

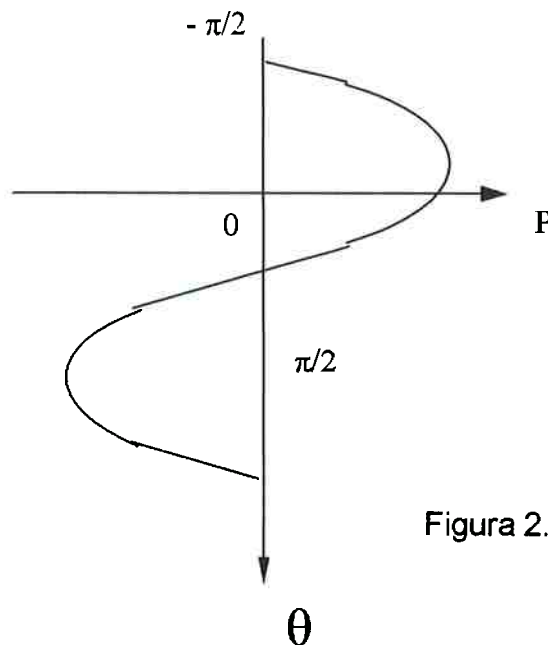


Figura 2.8 (b)

Figura 2.8 (a) – Esquema de peça irradiada por ultra-som

Figura 2.8 (b) – Representação gráfica da onda mecânica

Na figura 2.8(a) a primeira zona bem focalizada ocorre com um comprimento de onda de $1/4 \lambda$, a segunda à $3/4 \lambda$, e a terceira ocorreria à $5/4 \lambda$. Assim a n -ésima ocorreria à $(n-1) * (\lambda/2) + (\lambda/4)$, onde λ é o comprimento de onda. Estas regiões são as zonas de amplitude máxima de vibração, conforme esquematizado na figura 2.8(b). Os pontos de máximo esforços alternados ou pressões alternadas são transferidas ciclicamente num período de meio comprimento de onda ($\lambda/2$) e estão apresentados como uma região amarela na figura 2.8(b).

A aplicação desta onda ultra-sônica é responsável pela junção da peça. Fatores como pressão de junção, amplitude e frequência da onda ultra-sônica, e tipos de polímero a serem soldado determinam o sucesso da solda.

O mecanismo de geração de calor no processo de soldagem por ultra-som é via dissipação viscoelástica devido à deformação cíclica do plástico [5]. Em um material puramente elástico a força aplicada causa taxas de deformação nas partes que estão em fase com ela, assim não há dissipação de energia. Porém as taxas de deformação, em um material puramente viscoso, são proporcionais à força aplicada, mas com uma diferença de fase de 90° , dissipando energia.

2.1.6 Parâmetros de processo

No processo de soldagem de polímeros por ultra-som há três parâmetros que influenciam a qualidade da junta diretamente: a pressão de junção; o tempo de junção; e o tempo de espera.

O tempo de junção é aquele no qual a energia ultra-sônica é aplicada sobre a peça depois que as condições de disparo são obedecidas. O tempo de espera é aquele no qual a força é aplicada sobre a peça depois que a energia ultra-sônica foi desligada. A pressão de junção é a força aplicada pelo conjunto acústico sobre a área submetida à soldagem, sendo responsável pela solidificação da junta logo após a aplicação da onda ultra-sônica.

2.2.3.1 Diagrama de soldabilidade

Os diagramas de soldabilidade correspondem à área dentro de um gráfico específico onde a junta é passível de soldagem. Liu [6] descreve o diagrama de soldabilidade em função do tempo de junção e amplitude de vibração, como apresentado na figura 2.9. Tadmor [7] apresenta o conceito de área de soldagem que pode ser estendido do conceito de área de moldagem em um processo de injeção de termoplásticos.

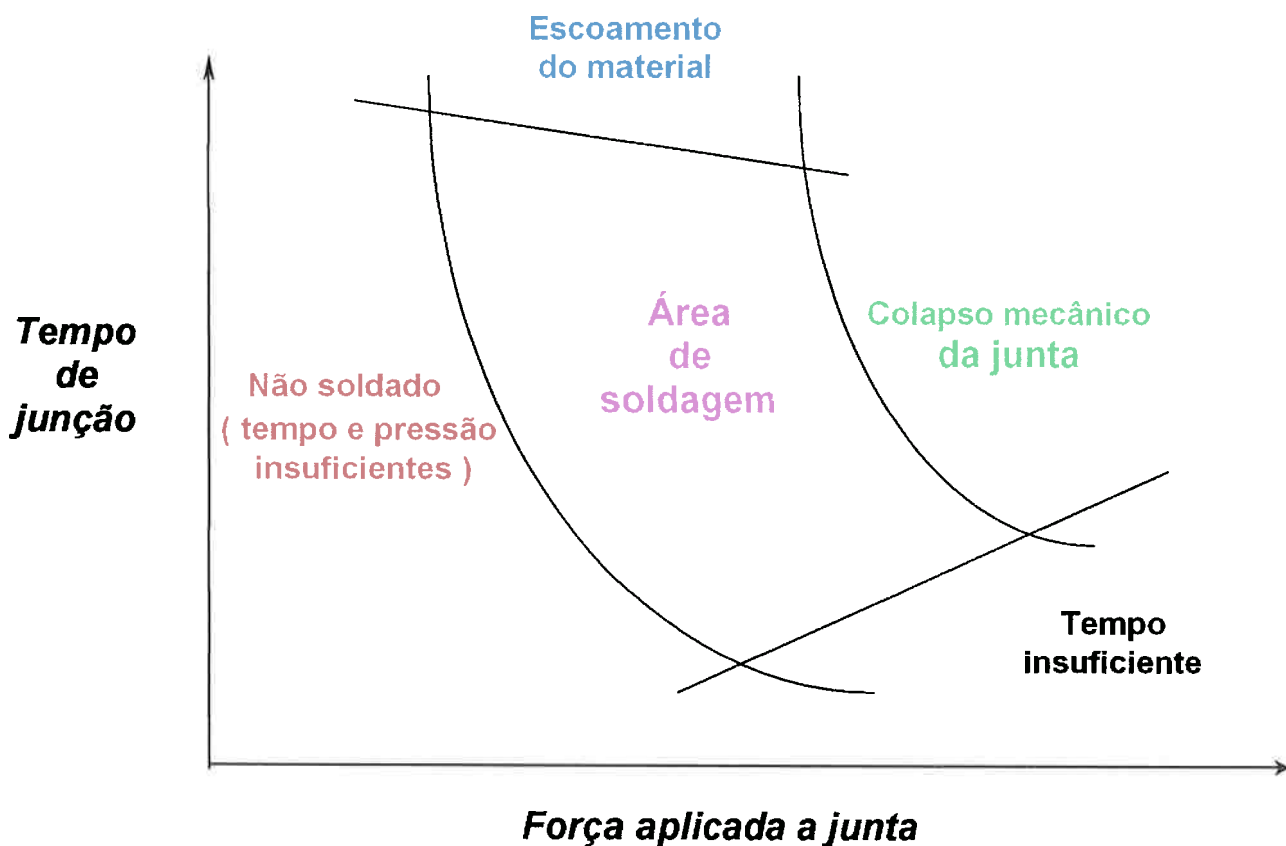


Figura 2.9 – Diagrama de soldabilidade (conforme Liu [3], com o tempo de junção e amplitude de vibração como parâmetros de soldabilidade).

A soldabilidade de um material termoplástico pode ser definida baseada na área de soldagem apresentada na figura 2.9. Dentro da área de soldagem a união da junta ocorreu sem que houvesse escoamento de material para regiões externas à junta.

Fora da área de soldagem podem ocorrer dois fenômenos: a junta não sofrer junção, e a junta sofrer a junção, mas com escoamento de material para regiões externas à mesma. O primeiro fenômeno é explicado pelo fato da energia ultra -sônica aplicada na junta não ser eficaz de proporcionar o atrito necessário na superfície, de forma que a junção ocorra. Assim a superfície fica praticamente intacta.

O segundo fenômeno é explicado pelo fato da pressão de junção aplicada estar acima dos níveis tolerados pela junta, que se encontra com uma certa viscosidade, podendo fluir. Quando a pressão de junção ultrapassa tais níveis, o material da junta escoava para regiões externas das mesmas, como ilustrado na figura 2.10.

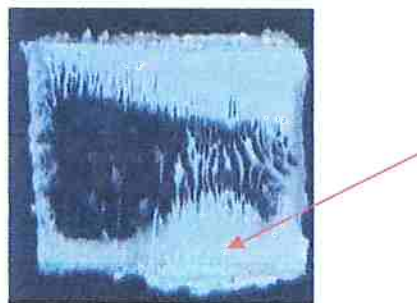


Figura 2.10 – Fotografia de uma junta onde ocorreu escoamento de material.

2.2 Propriedades dos polímeros

2.3.1 Poli (metacrilato) de metila (PMMA)

O PMMA é um termoplástico amorfo utilizado em aplicações automotivas tais como lanternas traseiras, painéis de instrumentos e acessórios; utilidades

como copos, canecas, artigos decorativos, gabinetes, banheiras, utensílios sanitários e demais aplicações como lentes para óculos, visores e painéis eletroeletrônicos, chapas e divisórias.

O tipo de PMMA obtido tem elevada dureza superficial e rigidez. Sua resistência ao impacto é considerada mediana em relação a outros polímeros, pois esse tipo de PMMA tem elevado peso molecular [16].

A cadeia polimérica de PMMA é apresentada na figura 2.11.

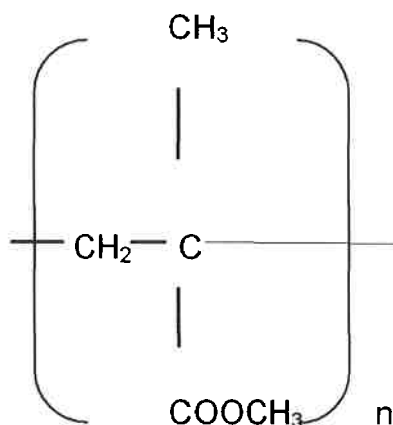


Figura 2.11 – Cadeia polimérica de PMMA.

O PMMA é caracterizado pela transparência; boa resistência química; uma combinação usual de rigidez e densidade; considerável dureza. É considerado como um material que tem boa soldagem [17].

2.3.2 Policarbonato (PC)

O policarbonato é um termoplástico com aplicações automobilísticas tais como lanternas de carros; painéis de instrumentos; capacetes de proteção de motociclistas. Aplicações em componentes elétricos e eletrônicos; discos compactos; conectores; cabines de proteção e engenharia médica. Além disso, ele

é aplicado em misturas poliméricas com ABS, PET, PBT ou TPE, em pára-choques e retrovisores de automóveis.

Algumas de suas propriedades gerais são a tenacidade; rigidez; durabilidade; resistência à oxidação; resistência ao impacto. A cadeia polimérica do PC é apresentada na figura 2.12. Em geral, o policarbonato tem uma boa soldagem [17].

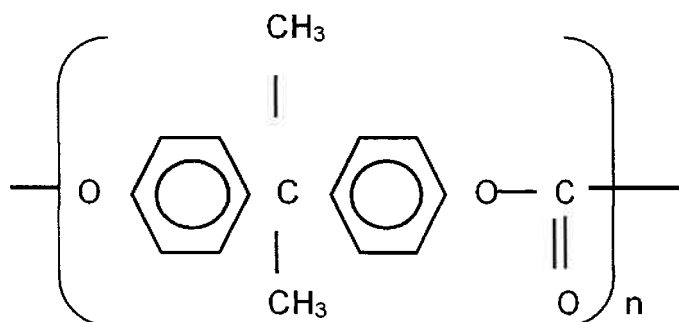


Figura 2.12 – Cadeia polimérica de PC

2.3 Soldabilidade

2.3.1 Fonte de aquecimento externo

No processo de soldagem por ultra-som não há fonte de aquecimento externo como é comum nos processos de soldagem de metais.

2.3.2 Fonte aquecimento interno

O calor gerado no processo de soldagem por ultra-som é originado durante o processo. O calor surge do atrito entre as duas peças a serem soldadas. A

movimentação de uma peça em relação a outra é feita através da onda sonora transmitida pelo sonotrodo.

2.4 Ferramental estatístico

A ferramenta estatística utilizada neste trabalho é o teste F. O teste F analisa se duas ou mais médias são iguais ou diferentes. Essa análise é feita através da variância. A seguir apresenta-se o Processo Geral para um teste de Análise da Variância[19].

Suponha m grupos, cada um com n elementos.

1º Calcular a média amostral para cada grupo:

$$a = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) / n \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$b = (b_1 + b_2 + \dots + b_n) / n \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$c = (c_1 + c_2 + \dots + c_n) / n \quad \text{Eq. 2.4}$$

2º Calcular a média de todas as médias:

$$x = (a + b + c + \dots) / m \quad \text{Eq. 2.5}$$

3º Calcular a variância amostral das médias:

$$S^{*2} = \{ (a - x)^2 + (b - x)^2 + (c - x)^2 + \dots \} / m - 1 \quad \text{Eq. 2.6}$$

4º Calcular a variância amostral para cada grupo:

$$S_a^2 = \{ (a_1 - a)^2 + (a_2 - a)^2 + \dots + (a_n - a)^2 \} / n - 1 \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$S_b^2 = \{ (b_1 - b)^2 + (b_2 - b)^2 + \dots + (b_n - b)^2 \} / n - 1 \quad \text{Eq. 2.8}$$

$$S_c^2 = \{ (c_1 - c)^2 + (c_2 - c)^2 + \dots + (c_n - c)^2 \} / n - 1 \quad \text{Eq. 2.9}$$

5º Calcular a média de todas as variâncias amostrais:

$$S^2 = (S_a^2 + S_b^2 + S_c^2) / m \quad \text{Eq. 2.10}$$

6º Calcular o valor da estatística F:

$$F = nS^{*2} / S^2 \quad \text{Eq. 2.11}$$

7º Recorrer à Tabela A3.6[19] para achar o valor crítico de uma distribuição F com $m - 1$ e $m(n-1)$ graus de liberdade.

8º Se o valor observado da estatística F for maior do que o valor crítico, rejeitaremos a hipótese de que as médias são iguais.

2.5 Viscosimetria

2.5.1 Viscosidade

Viscosidade é a resistência ao escoamento, causada pela fricção interna gerada por moléculas que colidem entre si, dificultando o escoamento devido ao tamanho das cadeias e ao enovelamento entre elas.

A viscosidade é a medida da resistência de um material à fluência. Seus valores variam com a temperatura e diminuem à medida que a temperatura aumenta. A viscosidade de um sistema polimérico depende de vários fatores como: peso molecular do polímero, tensão e velocidade de cisalhamento, temperatura, natureza do solvente no caso de soluções poliméricas.

Proporcionalmente ao aumento da massa molecular de um polímero, podem-se esperar aumentos de viscosidade de suas soluções.

2.5.2 Viscosidade de soluções diluídas de polímeros

Quando uma molécula pequena é dissolvida em um solvente, a viscosidade do sistema varia um pouco. No caso de macromoléculas, a cadeia possui um tamanho maior e assume conformações em zigue-zague ou podem apresentar ramificações, cujo grau e complexidade pode chegar à formação de retículos.

Em consequência disto podem surgir propriedades diferentes no produto, especialmente em relação a solubilidade.

A formação de retículos prende as cadeias entre si impedindo o seu deslizamento. Cada segmento de cadeia pode estar sob a ação de velocidades de fluxo diferentes, acarretando um aumento significativo da viscosidade.

A viscosimetria de soluções diluídas mede, quantitativamente, o aumento de viscosidade, pela presença de partículas do polímero, em um determinado solvente, permitindo assim, obter-se informações a respeito das dimensões das cadeias, formato e tamanho da partícula do polímero e de sua massa molecular.

A medida de viscosidade de líquidos mais usada é a baseada na resistência à fluência através de um capilar. Isto é possível somente quando se conhece a concentração exata da solução e, quando estas estão livres de partículas contaminantes. As soluções não podem ser muito diluídas, pois apresentam a viscosidade muito próxima da viscosidade do solvente puro, dificultando a medida. Por outro lado, não devem ser muito concentradas, pois as interações entre as moléculas do próprio polímero e seu atrito com a parede do capilar dificultam as medidas.

No estudo das soluções diluídas de polímeros é comum determinar a viscosidade da solução em relação ao solvente puro. A relação é denominada viscosidade relativa. Ela foi determinada através da relação.

$$\eta_r = t/t_0$$

Eq. 2.12

A relação entre a diferença dos tempos de escoamento do solvente puro ($t - t_0$) e o tempo de escoamento do solvente puro, t_0 é denominada viscosidade específica.

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 \quad \text{Eq. 2.13}$$

A razão entre a viscosidade específica e a concentração da solução é denominada viscosidade reduzida.

$$\eta_{red} = \eta_{sp} / c \quad \text{Eq.2.14}$$

A razão entre o logaritmo da viscosidade relativa e a concentração é conhecida como viscosidade inerente.

$$\eta_{inh} = \ln \eta_r / c \quad \text{Eq. 2.15}$$

A viscosidade intrínseca é obtida pela extrapolação de um gráfico da relação da η_{red} com a concentração, onde $[\eta]$ exprime o efeito de uma partícula isolada de polímero sobre a viscosidade do solvente.

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} (\eta_{sp} / c) \quad \text{Eq. 2.16}$$

A viscosidade intrínseca se relaciona com a massa molecular do polímero monodisperso pela equação de Mark-Houwink:

$$[\eta] = K \cdot M^a \quad \text{Eq. 2.17}$$

Onde K e a são constantes para um determinado polímero a uma determinada temperatura e solvente.

3. Objetivos

Estudar o comportamento do PMMA e do PC à soldagem por ultra-som em função de parâmetros de soldagem: pressão exercida na junta de soldagem e tempo de soldagem (processo); e de parâmetros de fabricação do componente: direção de injeção do polímero (material).

Obter curva de soldabilidade em função dos parâmetros de soldagem, de fabricação e geometria do sonotrodo.

Obter e analisar os efeitos do ciclo térmico de soldagem no PMMA em várias regiões da junta.

4. Materiais e métodos

4.1 Características dos polímeros utilizados

4.1.1 PMMA

O poli (metacrilato) de metila (PMMA) obtido para a pesquisa foi concedido pela Companhia Química Metacril. O tipo de PMMA doado é o Acrigel 01DH ECL. A tabela 4.1 trás algumas propriedades do PMMA utilizado.

TABELA 4.1 - PROPRIEDADES DO PMMA. TIPO: Acrigel 01DH ECL - FABRICANTE: Metacril [16]

PROPRIEDADES	NORMA	VALORES
Resistência ao impacto Izod	ASTM D-0256	10,0 J/m
Resistência à tração	ASTM D-0638	80,0 MPa
Alongamento	ASTM D-0638	6,0 %
Dureza Rockwell	ASTM D-0785	110,0 R
Temperatura de amolecimento VICAT	ASTM D-1525	110 °C
Temperatura de deflexão térmica HDT	ASTM D-0648	90 °C
Flamabilidade	ISO 3795	27 mm/min
Transparência à luz	ASTM D-1603	90 %
Índice de fluidez	ASTM D-1238	1,5-3,0 g/(10 min)
Densidade	ASTM D-0792	1,17-1,19 g/cm ³
Contração	ASTM D-0955	0,4-0,6 %

4.1.2 PC

Nesta pesquisa foi utilizado um tipo de policarbonato (PC) concedido pela Bayer Polímeros S.A. Este policarbonato é conhecido por Makrolon 2458 que será apresentado a seguir. Este tipo de PC foi escolhido devido às suas aplicações nas mais diversas áreas, principalmente automobilísticas.

O Makrolon 2458 é um policarbonato comercial de fluidez fácil destinado à injeção. Não tem nenhum tipo de aditivo que aumente as suas características de impacto sendo considerado, pelo fabricante, um policarbonato padrão [18].

A tabela 4.2 trás algumas propriedades do PC utilizado.

TABELA 4.2 - PROPRIEDADES DO PC . TIPO: Makrolon 2458 - FABRICANTE: Bayer [18]

PROPRIEDADES	NORMA	VALORES
Resistência ao impacto Izod	ISO 180-4	75 kJ/m ²
Resistência à tração	ISO 527	2300 MPa
Alongamento	ISO 527	> 50%
Temperatura de amolecimento VICAT	ISO 306	144 °C
Temperatura de deflexão térmica HDT	ISO 75	124 °C
Flamabilidade	UL 94 (IEC 707)	Classe HB
Transparência à luz	DIN 5036-1	88%
Índice de fluidez (volumétrico)	ISO 1133	1,2 kg 19 cm ³ /(10 min)
Densidade	ISO 1183	1,2g/cm ³
Índice de fluidez (ponderal)	ISO 1133	1,2 kg 20 g/(10 min)
Contração	ASTM D-0955	0,5-0,7%

4.2 Características do equipamento

4.2.1 Dispositivo de soldagem

Para a soldagem por ultra-som se faz necessário que a amostra não se movimente durante o processo. Assim, constituiu-se a criação de um dispositivo de soldagem que ficou acoplado à mesa da máquina conforme figura 4.1.

O dispositivo de soldagem foi montado a fim de colocar o sonotrodo o mais próximo possível da zona de junção. A sua elaboração se deve ao fato da colocação do sonotrodo próximo à zona de junção pela vantagem de que a vibração não seja desviada para outras partes do produto. O dispositivo de soldagem foi construído em aço inox 304. Trata-se de um aço ferramenta, sendo resistente aos esforços, tais como impacto, justificando a sua escolha.

O dispositivo também tem por função direcionar a região de solda de forma que as superfícies a serem unidas estejam se tocando, garantindo que elas não vibrem junto com o sonotrodo.

Desta forma a junção não depende de fatores ligados à movimentação dos corpos de prova durante a solda. É possível então tratar os dados obtidos em função dos parâmetros de soldagem a serem pesquisados e já apresentados anteriormente, podendo mudá-los sem o inconveniente de adicionar-se um parâmetro indesejável ao estudo.

O processo de soldagem só foi possível com a construção deste dispositivo. Nas figuras 4.1 e 4.2 estão apresentadas duas vistas do dispositivo pronto para um ciclo de soldagem.

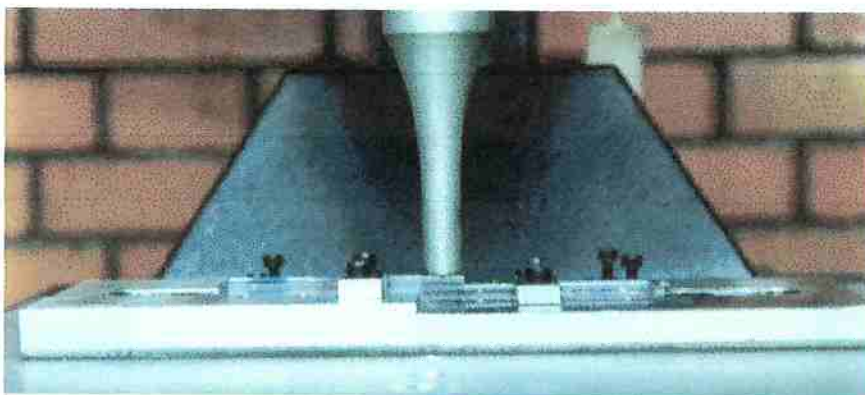


Figura 4.1 – Dispositivo criado para soldagem de polímeros por ultra-som (vista lateral).

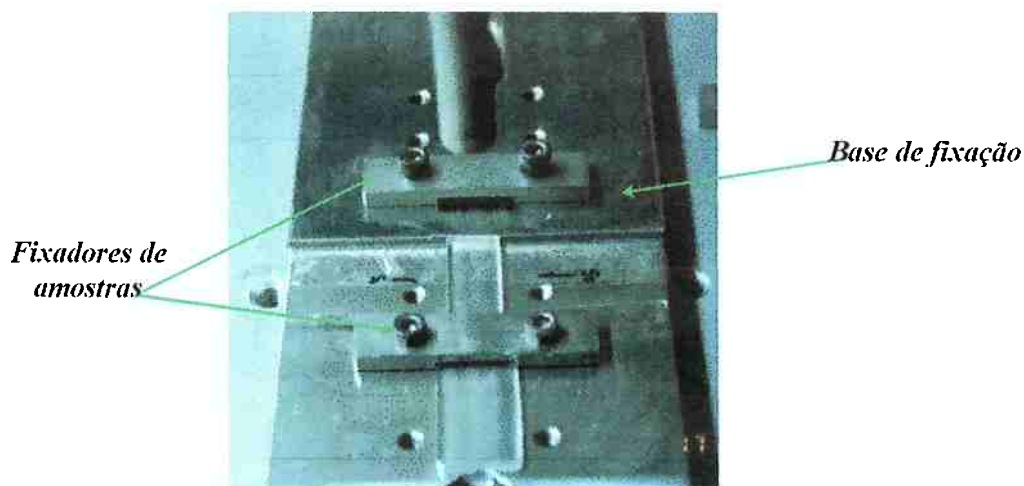


Figura 4.2 – Dispositivo de soldagem de polímeros por ultra-som (vista superior).

As amostras são fixadas neste dispositivo, soldada e retiradas para a análise. Como esquematizado na figura 4.2 o dispositivo é formado por uma base de fixação, que é parafusada na mesa do equipamento de soldagem, e fixadores das amostras, que servem para fixar os corpos de prova a serem unidos, sem que os mesmos sofram qualquer movimentação.

4.2.2 Conjunto acústico

O único booster utilizado para o estudo tinha uma taxa de ampliação de 1,5. Utilizou-se o sonotrodo com uma seção quadrada de 13,5 mm X 13,5 mm. Esta

área foi escolhida, pois facilita a quantificação da área soldada em função dos parâmetros e respeita as dimensões do corpo de prova como será visto adiante.

4.3 Parâmetros de soldagem

O tipo de junta utilizado foi a junta sobreposta. O sonotrodo utilizado foi o catenoidal com cabeçote de secção quadrada 13,5 mm x 13,5 mm. As pressões de soldagem foram de 15 e 20 psi. Os tempos de soldagem: 0,1 a 0,1 s com intervalos de 0,05 s.

O tempo em que a pressão foi mantida após cessada a onda ultra-sônica foi o padrão do equipamento 0,3 segundos e foi mantido constante.

4.4 Método de obtenção de imagens

A determinação da fração de área soldada foi feita obtendo-se imagens da área submetida à solda. A aquisição das imagens foi feita por câmera digital Sony Cibershot. Após a aquisição das imagens, as mesmas passaram por um processo de edição monocromática, transformando-as em imagens no formato preto e branco. Este processo é esquematizado na figura 4.3.

A análise foi feita contando-se o número de pixels preto e branco existentes na figura com o auxílio do programa Image Tool [23].

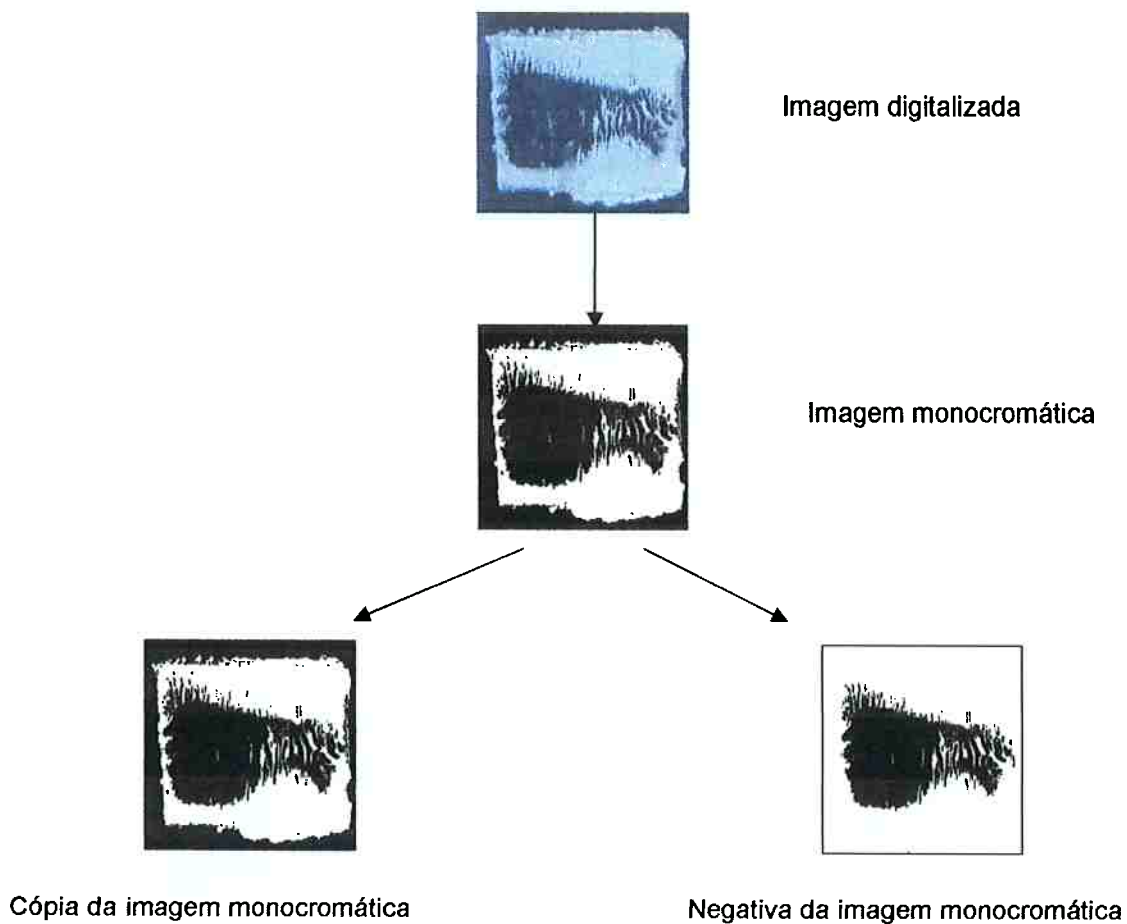


Figura 4.3 – Esquematização para cálculo de área soldada.

Na figura 4.3 obtém-se a imagem, depois a imagem é passada para tons monocromáticos, e convertida em um negativo, sendo posteriormente quantificadas as áreas em função dos tons preto e branco.

A quantificação é feita conforme equação 4.1.

$$\%AS = \%AB / (\%AB + \%AN) \quad \text{eq. 4.1}$$

onde

%AS = a fração de área soldada na área submetida à soldagem;

%AB = é a área branca

%AN = é a área negra

4.5 Ensaio de tração

4.5.1 Equipamento



Figura 4.4 – Torre de tracionamento e processador de dados

4.5.2 Corpos de prova

2.5.2.2 Direções de Injeção

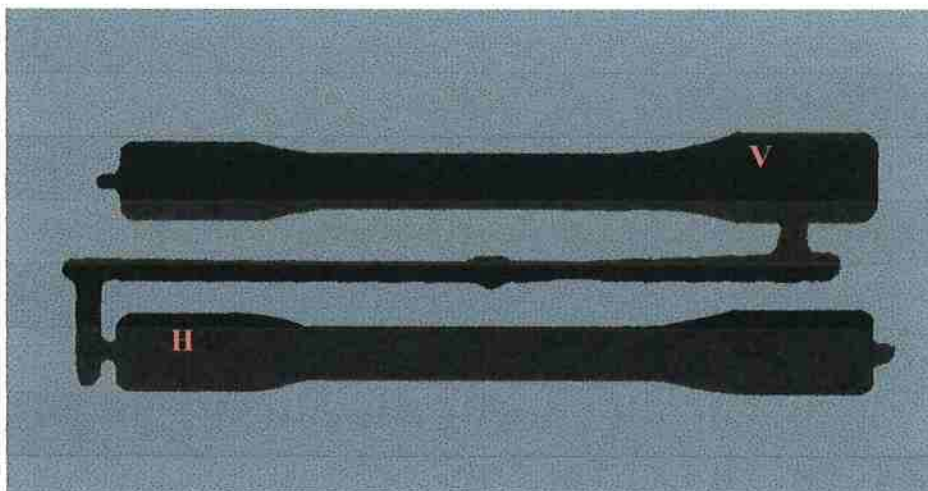


Figura 4.7 – Esquema do lay-out de injeção

O material amolecido entra pelo ponto central dos canais. O material entra nos moldes de duas formas, acompanhando o sentido da maior dimensão da peça ou transversalmente à maior direção da peça. À primeira se deu o nome de H e à segunda de V.

2.5.2.3 Parâmetros de Injeção

Foram injetados corpos de prova de PMMA, uma vez que ainda haviam corpos de prova de PC inteiros disponíveis para os ensaios. Abaixo segue os parâmetros de injeção de PMMA.

TABELA 4.3 - VALORES PARA INJEÇÃO DE PMMA

<i>Parâmetros de injeção</i>	<i>Valores</i>
Velocidade de injeção	60 cm/s
Tempo de injeção	7,0 s
Pressão de recalque	80 atm
Tempo de espera	5,0 s
Tempo de resfriamento	5,0 s
Temperatura da zona de entrada	225 °C
Temperatura da zona de homogeneização	230 °C
Temperatura da zona de plastificação	240 °C
Temperatura da zona de injeção	235 °C
Temperatura do molde	75 °C
Pressão de injeção	160 atm

4.6 Determinação dos ciclos térmicos (procedimento)

Termopares do tipo K com diâmetro de 0,2 mm. Os parâmetros de soldagem utilizados foram: 20 psi e tempo de 0,6 segundos.

Os furos para a colocação dos termopares foram feitos com brocas de 2 mm.

Os termopares foram distribuídos de forma a termos um quadro da variação em toda a junta. A figura 4.8 mostra a distribuição dos termopares na junta.

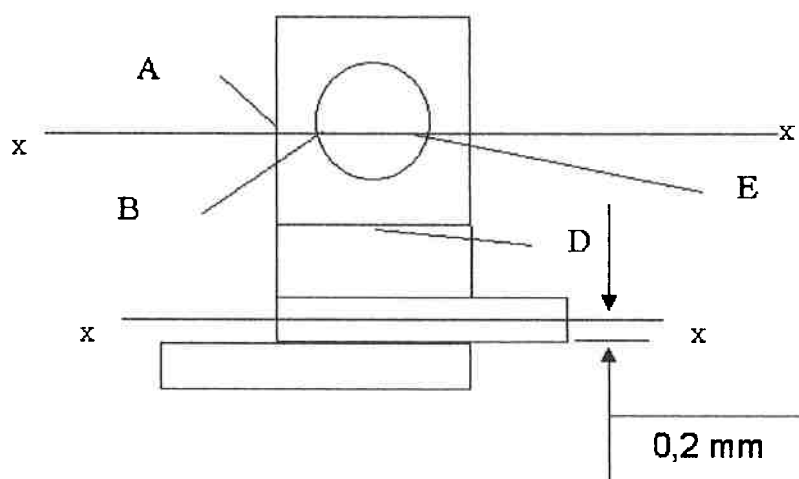


Figura 4.8 - Posicionamento dos termopares

Os dados de temperatura foram adquiridos por uma interface multicanal conectada a um Pc. Apesar do equipamento ser capaz de realizar diversas medições simultâneas, cada ponto foi estudado separadamente. Isto foi feito para diminuir a interferência dos próprios termopares no processo de soldagem.

4.7 Viscosimetria

O viscosímetro foi selecionado pelo diâmetro do capilar tal qual que o tempo de escoamento do fluido fosse na faixa entre 100 e 150 segundos. Foram três leituras com diferenças entre a leitura menores do que 0,1 segundo e tirou-se a média. Usou-se pipeta volumétrica para as diluições. O viscosímetro foi limpo e seco. Foram preparados 25 ml de solução do polímero PMMA em clorofórmio a 1%, para determinada amostra (solução mãe) em balão volumétrico. Foram preparados duas soluções, uma com o material da junta e outra com o material base do corpo de prova. O banho foi preparado com agitação, na temperatura de 26°C. Foram colocados 10 ml de solvente dentro do viscosímetro. Esperou-se 5 minutos para estabilizar a temperatura e mediu-se o tempo de escoamento. Colocou-se 8 ml da solução mãe dentro do viscosímetro com pipeta volumétrica.

Esperou-se 5 minutos para estabilizar a temperatura e, mediu-se o tempo de escoamento. Diluiu-se com mais 2 ml de solvente (total 10 ml). Esperou-se 5 minutos para estabilizar a temperatura e o tempo de escoamento foi medido. O procedimento foi repetido para soluções de 12, 14 e 16 ml.

De posse das anotações das diluições e dos tempos de escoamento, efetuou-se os seguintes cálculos: cálculo da concentração de cada solução em g/ml, cálculo das médias dos tempos, cálculo das viscosidades. Depois de obtida a viscosidade intrínseca, determinou-se a massa molar usando a Equação de Mark-Houwink. Com os seguintes valores para os parâmetros: $a = 0,56$ e $K = 0,0096$.

5. Resultados

5.1 Área soldada em função dos parâmetros de soldagem

5.1.1 PMMA

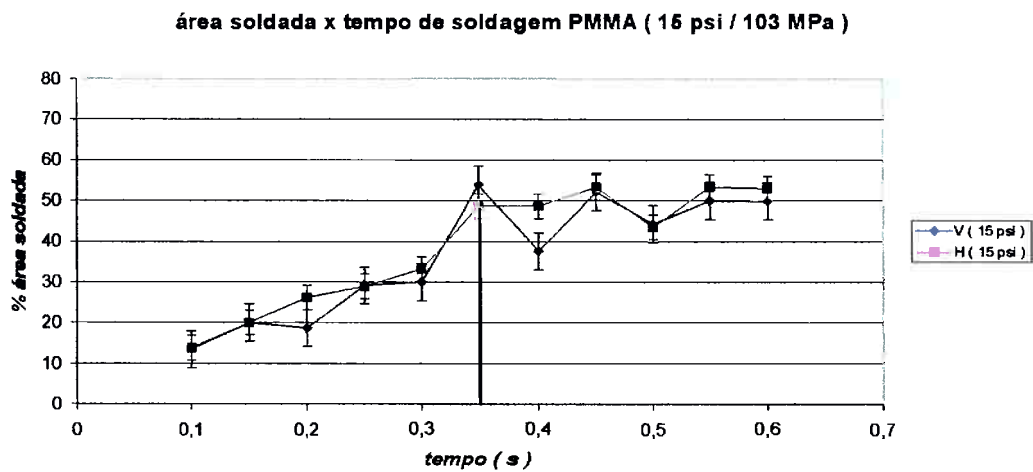


Figura 5.1 - %Área soldada x tempo de soldagem

Nota-se que a área soldada tende a crescer linearmente até um patamar (50 % de área soldada; 0,35 segundos).

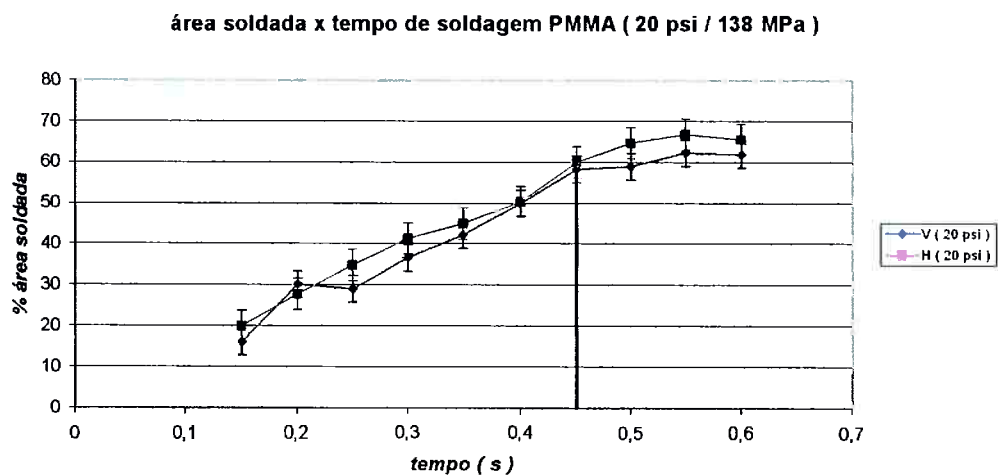


Figura 5.2 – %Área soldada x tempo de soldagem

Nota-se que a área soldada tende a crescer linearmente até um patamar (60 % de área soldada; 0,45 segundos).

5.1.2 PC

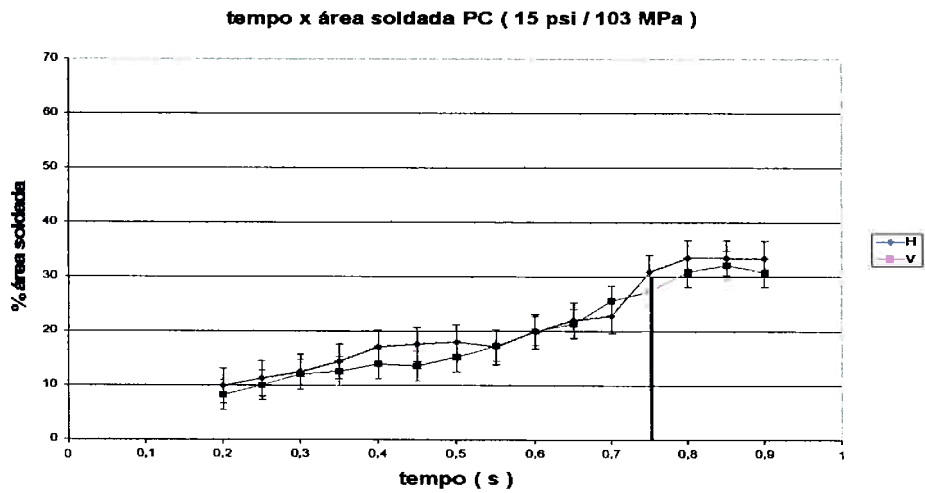


Figura 5.3 – %Área soldada x tempo de soldagem

Nota-se que a área soldada tende a crescer linearmente até um patamar (33 % de área soldada; 0,75 segundos).

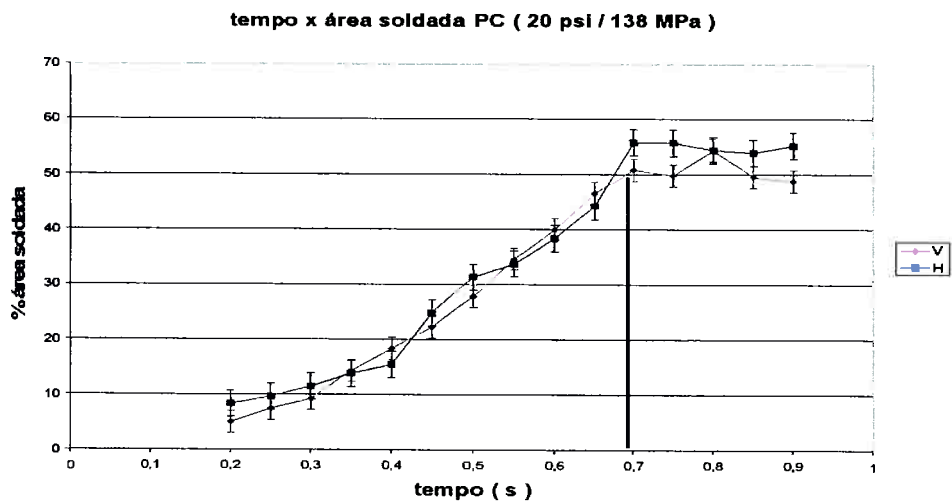


Figura 5.4 – %Área soldada x tempo de soldagem

Nota-se que a área soldada tende a crescer linearmente até um patamar (55 % de área soldada; 0,70 segundos).

5.2 Energia absorvida pela junta durante a soldagem

5.2.1 PMMA

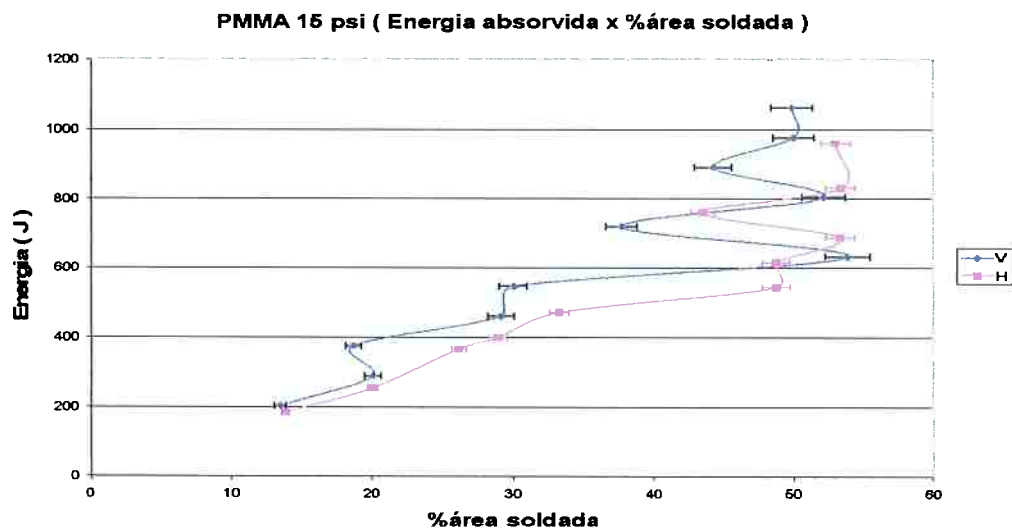


Figura 5.5 - Energia x %Área soldada

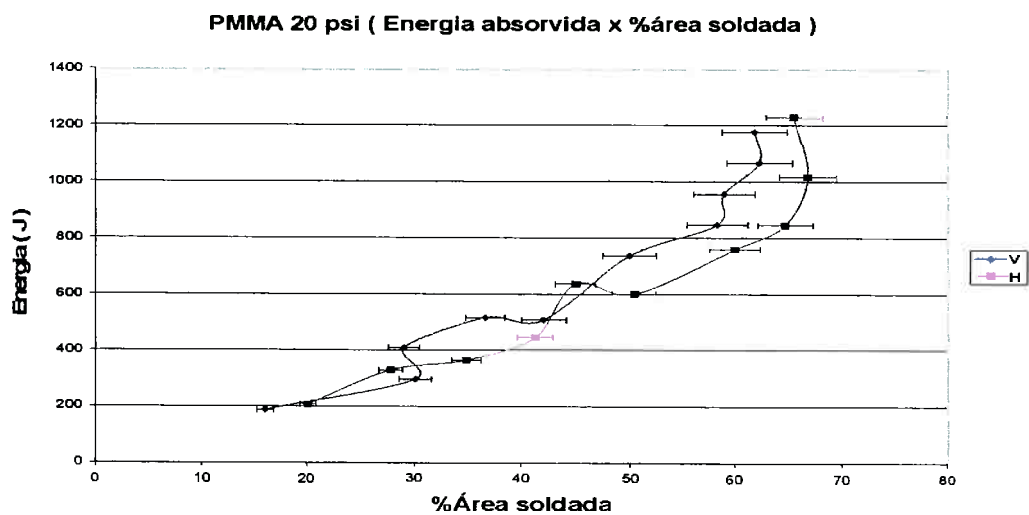


Figura 5.6 – Energia x %Área soldada

5.2.2 PC

PC 15 psi (Energía absorbida x %área soldada)

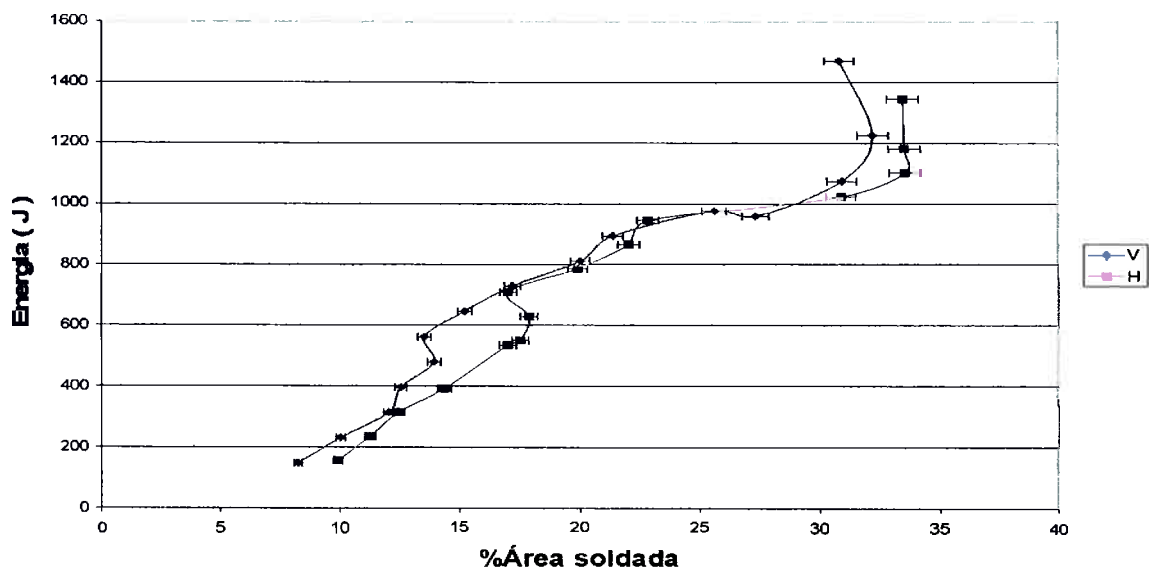


Figura 5.7 – Energía x %Área soldada

PC 20 psi (Energía absorbida x %Área soldada)

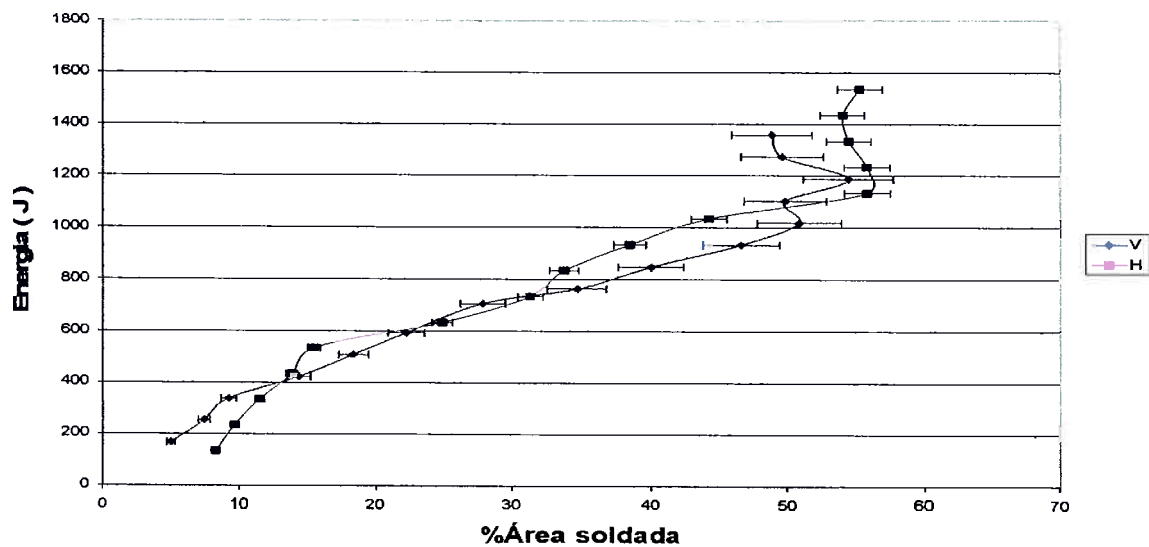


Figura 5.8 – Energía x %Área soldada

5.3Ciclo térmico

5.3.1 PMMA

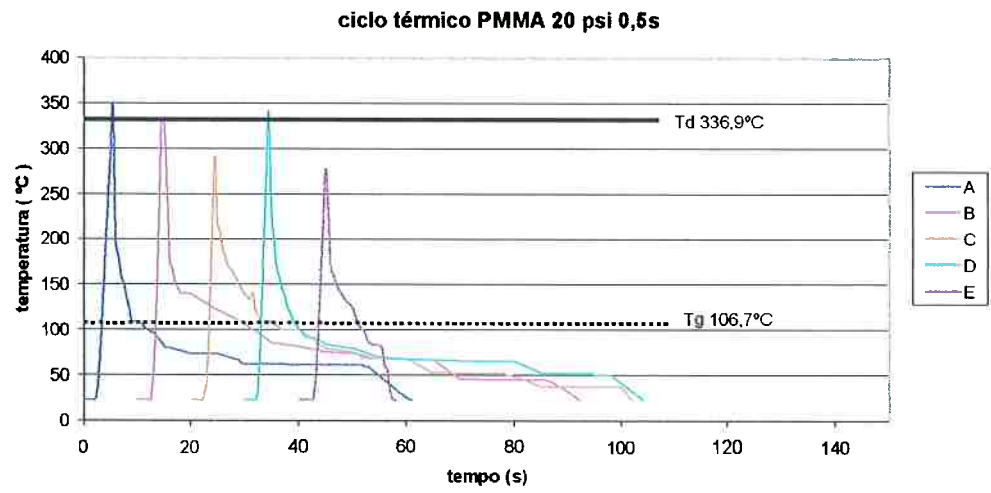


Figura 5.9 – Ciclo térmico PMMA

5.3.2 PC

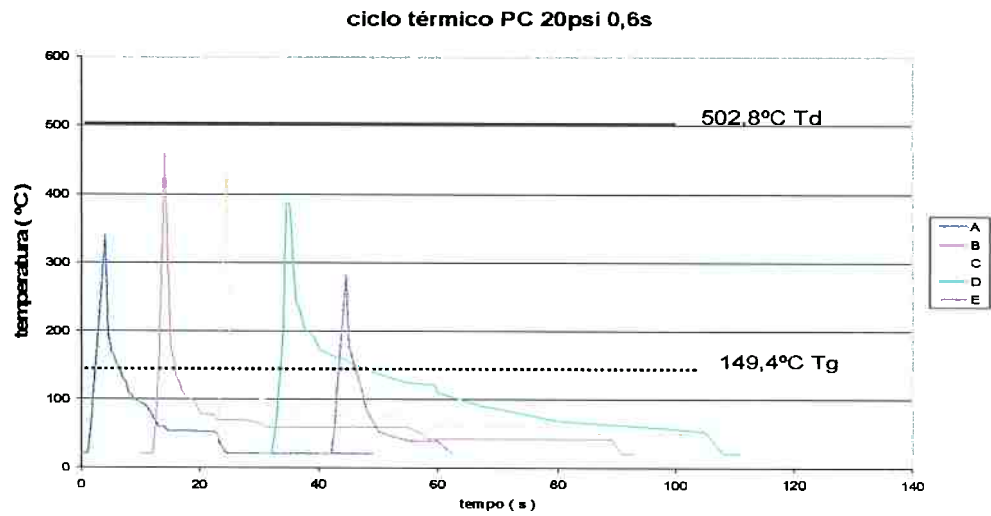


Figura 5.10 – Ciclo térmico PC

5.4 Ensaio de tração

5.4.1 Propriedades mecânicas

5.4.1.1 PMMA – Corpo de prova inteiro

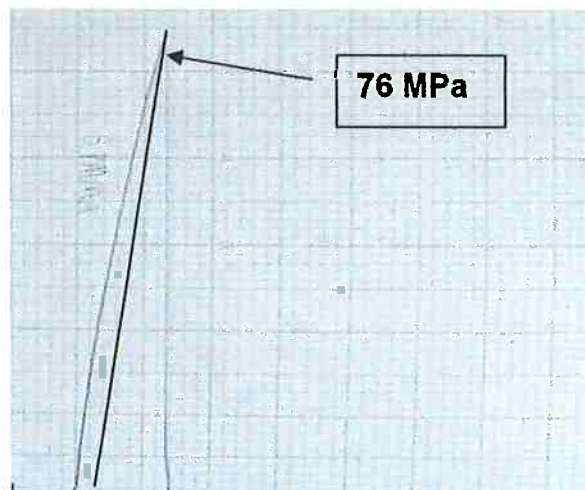


Figura 5.11 – Corpo de prova de PMMA inteiro

5.4.1.2 PMMA – Corpo de prova soldado

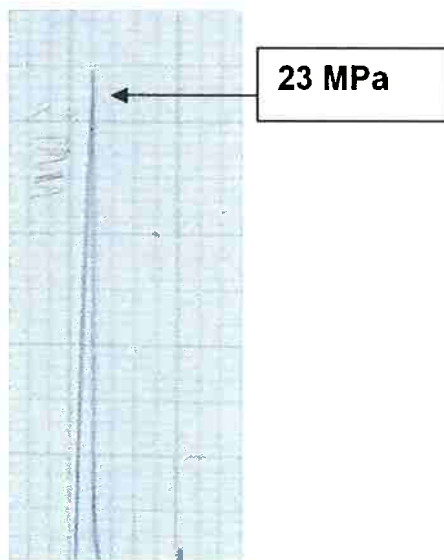


Figura 5.12 – Corpo de prova de PMMA soldado

5.4.1.3 PC – Corpo de prova inteiro

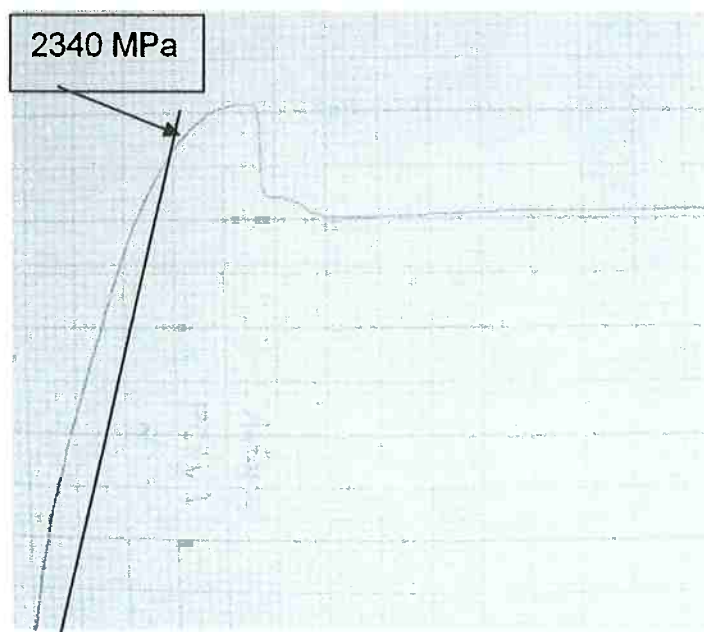


Figura 5.13 – Corpo de PC inteiro

5.4.1.4 PC – Corpo de prova soldado

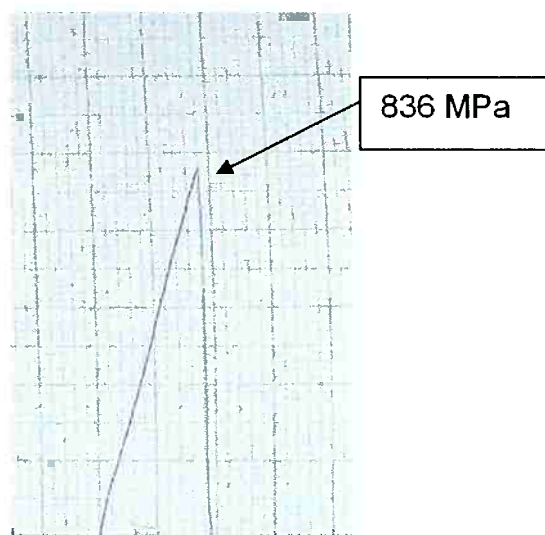


Figura 5.14 – Corpo de PC soldado

5.4.2 Eficiência da junta soldada

Os corpos de prova soldados submetidos ao ensaio tinham 5%, 30% e 45% de área soldada para o PMMA e 6%, 34% e 55% de área soldada para o PC. A diferença nas tensões de resistência e de ruptura de uma porcentagem de área soldada para outra foi menor que 3%, por este motivo foi utilizado na tabela um valor médio.

	σ resistência Literatura (MPa)	σ resistência Medido (MPa)	σ ruptura Medido (MPa)
PMMA inteiro	80,0 (*)	78	76
PMMA soldado	25 – 30	23	23
PC inteiro	2300 (*)	2340	2210
PC soldado	900 – 1000	836	835

Tabela 5.1 – Dados teóricos e medidos de σ resistência e ruptura

(*) – Tabelas 4.1a e 4.2

Eficiência de junta = σ resistência de corpo soldado / σ resistência (corpo inteiro)

Tabela 5.2 – Eficiência de junta

Eficiência de junta PMMA	Eficiência de junta PC
0,2948 → 29,48%	0,3572 → 35,72%

5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

5.5.1 PMMA

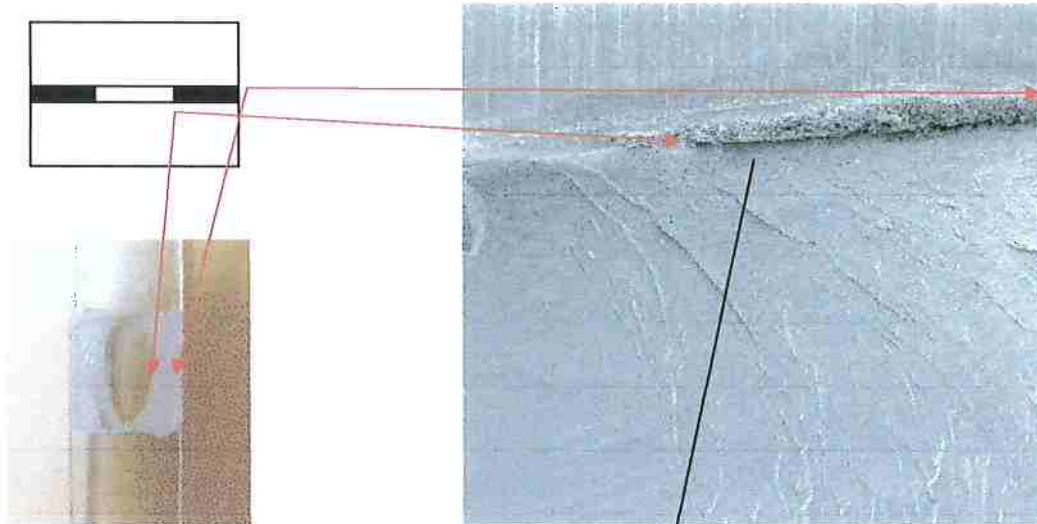


Figura 5.15 a – Foto de junta (topo)

Figura 5.15b – MEV (x33)

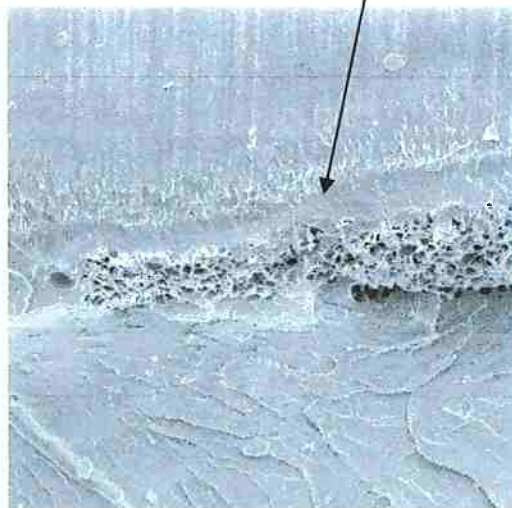


Figura 5.15c – MEV (x 130) Mesma região da 5.15b



Figura 5.15d – MEV (x130) Extremidade da região soldada



Figura 5.15e – MEV (x2320) Descontinuidade no material

5.5.2 PC

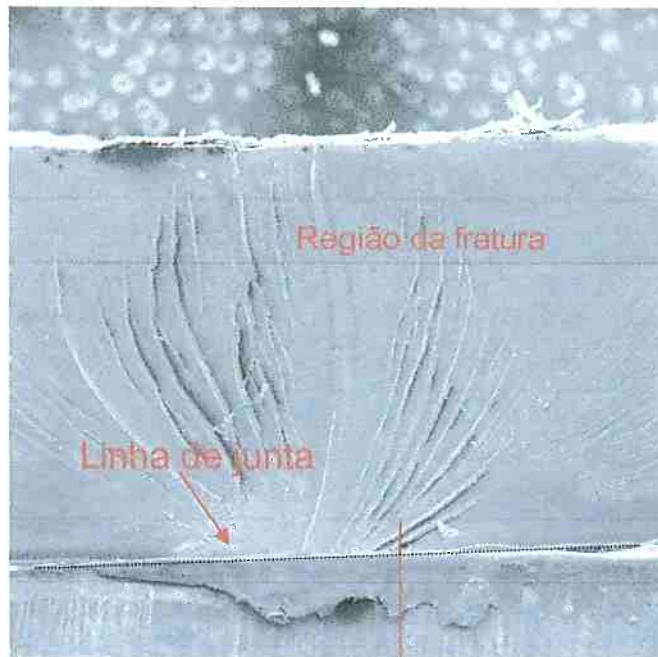


Figura 5.16 a – MEV (x 23) Região da fratura

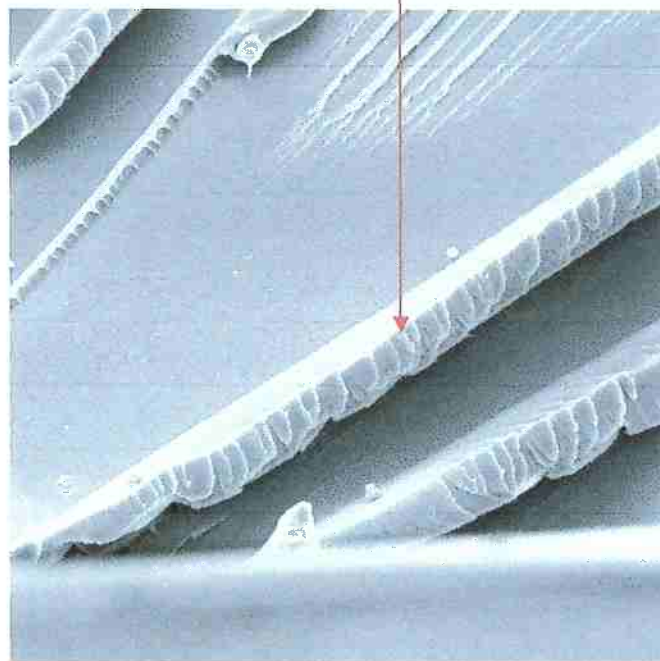


Figura 5.16 b – MEV (x2320) Degraus na zona de fratura.

5.6 Comparação entre as duas direções de injeção

5.6.1 Distribuição F

Os outros parâmetros de soldagem foram fixados de modo a estudarmos somente a influência da direção de injeção.

Quanto aos graus de liberdade, tem-se: $m = 2$, pois são dois grupos a serem comparados e $m(n-1) = 14$, pois $n = 8$ (oito medidas para cada direção).

5.6.1.1 PMMA

Tabela 5.3 – 8 medidas de área soldada para cada direção

H	68,2136	64,739	60,1018	65,1844	61,33	59,8755	62,871	66,087	teste F
V	62,8555	58,9672	56,8602	63,5783	62,9572	63,8773	65,637	64,11	0,948627

Pressão de soldagem: 20 psi

Tempo: 0,5 segundos

5.6.1.2 PC

Tabela 5.4 – 8 medidas de área soldada para cada direção

H	38,4322	36,329	40,67	38,3834	39,652	40,8384	38,4672	38,55	testeF
V	40,02	41,723	37,0239	39,5963	40,221	38,378	40,2	39,7641	0,983

Pressão de soldagem: 20 psi

Tempo de soldagem: 0,6 segundos

Consultando a tabela A3.6 da referência[19] tem-se como valor crítico de F 4,1(significância de 5%). Ou seja, tanto as medidas PMMA como o PC

apresentaram valores de F abaixo do valor crítico, o que indica que a hipótese das médias serem iguais pode ser aceita.

5.7 Viscosimetria

5.7.1 PMMA

Material retirado da região do corpo de prova que não sofre ação do processo de soldagem. Batizou-se de material BASE.

Tabela 5.5 – Material BASE

BASE	Leitura 1 (s)	Leitura2 (s)	Leitura3 (s)
Solvente Puro	126,62	126,38	126,12
Solução 8 ml	160,43	160,53	160,43
Solução 10 ml	158,81	158,78	158,70
Solução 12 ml	151,30	151,32	151,28
Solução 14 ml	148,40	148,38	148,42
Solução 16 ml	145,42	145,18	145,32

Tabela – 5.6 – Massa Molar (Base)

a	0,56
K	0,0096
Viscosidade intrínseca	13,0
Massa molar	379.000

5.7.2 PC

Material retirado da junta soldada. Batizou-se de material JUNTA.

Tabela 5.7 – Material da JUNTA

BASE	Leitura 1 (s)	Leitura2 (s)	Leitura3 (s)
Solvente Puro	126,62	126,38	126,12
Solução 8 ml	157,41	157,38	157,30
Solução 10 ml	151,23	151,26	151,62
Solução 12 ml	146,42	146,46	146,81
Solução 14 ml	144,68	144,56	144,48
Solução 16 ml	142,38	142,17	142,23

Tabela 5.8 – Massa molar (JUNTA)

a	0,56
K	0,0096
Viscosidade intrínseca	11,5
Massa molar	304.000

Observando as tabelas 5.6 e 5.8, nota-se que a massa molar do material base é maior que a massa molar do material da junta.

6. Discussão dos resultados

6.1 Variação da área com os parâmetros de soldagem

Como pode-se observar nas figuras 5.5 , 5.6, 5.7 e 5.8, a área soldada tem uma tendência de crescer linearmente com o tempo de soldagem até um certo patamar, a partir do qual o ganho de área soldada com o tempo de soldagem cai drasticamente.

Este fato ocorre devido a um equilíbrio térmico que ocorre na interface de soldagem, que é o ponto onde as superfícies dos dois corpos de prova que serão soldadas se tocam. A energia sonora transmitida pelo conjunto acústico até as peças a serem soldadas se propaga em meio sólido até atingir a interface. À medida que a temperatura aumenta, o material da junta amolece, dificultando a passagem da energia para a junta. Ou seja, no patamar citado anteriormente e indicado nos gráficos a energia é em sua maior parte absorvida antes de chegar à interface. A figura 6.1 esquematiza a idéia apresentada.

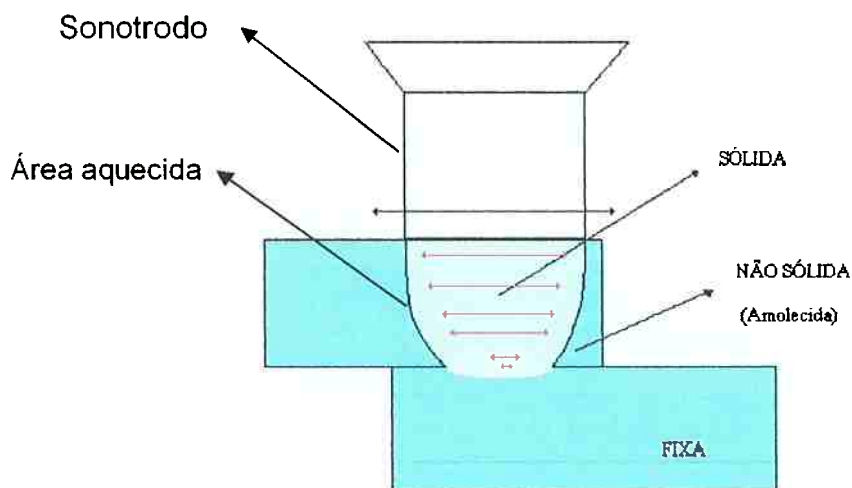


Figura 6.1 – Esquema dos fenômenos de transmissão de energia na junta

As setas vermelhas na figura 6.1 ilustram a variação da energia mecânica. Na parte azul clara, o material encontra-se sólido e transmite a maior parte da energia de vibração. Já na parte cinza da figura, a qual representa o material amolecido na junta, a energia é em sua maior parte absorvida.

Pode-se correlacionar as figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 com as figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8. Nota-se que a região onde ocorre o patamar para porcentagem de área soldada nas figuras 5.1 a 5.4 é a mesma região nas figuras 5.5 a 5.8, onde o gráfico tende a subir quase que verticalmente. Ou seja, a energia fornecida ao sistema continua aumentando, pois o tempo em que a onda é aplicada continua crescendo, mas a quantidade de energia que chega a interface para produzir o atrito é mínima.

Outro parâmetro importante considerado no trabalho foi a pressão exercida na junta enquanto a onda esta sendo aplicada.

Observando as figuras 5.1 e 5.2 referentes ao PMMA e 5.3 e 5.4 referentes ao PC, duas a duas, podemos notar que ocorrem dois fenômenos. Um é o aumento da área soldada e o deslocamento do patamar com o aumento da pressão de 15 psi para 20 psi. O outro é a diminuição da inclinação de um ponto para outro e a diminuição do espaço entre os gráficos H e V.

O aumento da pressão aumenta o contato entre as duas superfícies, favorecendo o atrito entre elas. Uma maior área sofrendo a ação da onda sonora amolece uma maior quantidade de material, resultando em uma área soldada maior.

Quanto ao segundo fenômeno citado, pode-se dizer que o aumento de pressão diminui o efeito de fatores que introduzem erros no sistema, como por exemplo a inclinação de uma peça em relação à outra, devido ao torque nos parafusos dos fixadores.

6.2 Variação da área com as características do material e do sonotrodo

O terceiro parâmetro estudado foi a direção de injeção. A direção de injeção é importante, pois a maneira como o material entra no molde modifica a posição das macromoléculas na região da junta.

Observando o item 5.6 vemos que não há influência da direção de injeção do material para o sonotrodo utilizado.

Trabalhos anteriores realizados com sonotrodos de seção retangular constataram diferenças na quantidade de área soldada de uma direção de injeção para outra. A diferença chegaria até 30% de área soldada a mais para corpos de prova injetados na direção H.

Uma vez que as experiências desenvolvidas neste trabalho não mostraram diferenças na quantidade de área soldada de uma direção de injeção para outra, podemos dizer que parece haver uma ligação entre a direção de injeção e as dimensões da seção do sonotrodo. O sonotrodo retangular tinha sua maior dimensão alinhada com a direção de injeção H.

Uma continuação lógica para o estudo deste processo de soldagem é fazer o levantamento dos dados para um sonotrodo retangular que tivesse sua maior dimensão alinhada com a direção V.

6.3 Ciclos térmicos

Observa-se na figura 5.9, para o PMMA, a temperatura passa da temperatura de transição vítrea do material em todos os pontos da junta estudados e passa da temperatura de degradação do material em dois pontos A e D. Estes pontos corresponde às bordas da junta. Isto indica que a superfície da peça é irregular. O resfriamento irregular da peça ao sair do molde modifica a superfície da peça, deixando-a “côncava”, fazendo com que o contato maior aconteça na borda no momento da soldagem. Esta hipótese é reforçada pela distribuição da área soldada na junta. A área soldada concentra-se ao redor do centro da junta em formas que lembram círculos ou elipses.

Na figura 5.10, temos o ciclo térmico para o PC. Podemos notar que novamente a temperatura passa da T_g em todos os pontos, mas ao contrário do PMMA não chega a alcançar a temperatura de degradação. É um resultado esperado uma vez que a energia total aplicada é quase a mesma e as temperaturas T_g e T_d do PC são bastante superiores ao do PMMA.

6.4 Ensaio de tração

Observando-se as figuras 5.11 , 5.12 e 5.13 , 5.14 duas a duas percebe-se que a resistência mecânica do material soldado é significativamente menor que um material em corpo não soldado. Isto fica evidente ao verificar-se a eficiência de junta na tabela 5.2. Para ambos os materiais a eficiência ficou abaixo dos 40%.

Pode-se notar que o processo de soldagem introduziu defeitos no material de modo a reduzir a sua resistência mecânica.

Para ambos os materiais os corpos de prova soldados romperam de forma frágil (figuras 5.12 e 5.14). Para o PMMA o fato não acrescenta muito, pois o corpo de prova não soldado de PMMA também rompeu de forma frágil, mas observando-se o ensaio para o corpo de PC não soldado (figura 5.13), percebe-se uma grande diferença. O material entra facilmente para a área de deformação plástica. Isto não ocorre para o corpo de prova soldado, o qual teve sua ruptura ainda na fase de deformação elástica.

Observando-se as figuras 5.16 a e 5.16 b nota-se que a o ponto de origem da trinca é na linha de junta, ou seja exatamente na região em que o material é atritado.

A influência do efeito do processo sobre o material e conseqüentemente sobre o seu desempenho fica mais evidente ao analisarmos o PMMA. Sua eficiência de junta ficou por volta de 30%. A seguir será discutido as possíveis causas deste fato.

Como visto anteriormente no ciclo térmico para o PMMA (figura 5.9), a temperatura ultrapassou a temperatura de degradação do material em dois pontos. A hipótese de degradação do material da junta confirmou-se através da

comparação das massas molares do material de junta com o material que não foi submetido ao processo diretamente. Esta comparação foi feita através do processo de viscosimetria (item 5.7). Observando-se as tabelas 5.6 e 5.8 percebe-se a variação das massas molares. Não é uma variação muito grande, uma vez que no momento da extração do material da junta temos na verdade uma mistura de materiais degradados e não degradados. O que importa realmente é que na média a massa molar do material da junta diminui mostrando a degradação de parte do material.

Ao analisar-se o material que compõe a junta por microscopia eletrônica de varredura (figuras 5.15x), note-se o efeito do processo na estrutura do material. O material da junta apresenta-se elevada porosidade, indicando a presença de gases desprendidos durante a degradação.

A elevada presença de descontinuidades no material de junta favorece a concentração de tensões e facilita o surgimento e o deslocamento de trincas, fragilizando o conjunto soldado.

7. Conclusão

A área soldada aumenta com o aumento da pressão exercida à junta e o tempo de soldagem até um patamar, onde a taxa diminui. O ganho de área soldada com o aumento do tempo diminui após o patamar devido à deficiência na transmissão de energia sonora pelo material amolecido.

O aumento da pressão diminui a influência de fatores que introduzem erros de medição no sistema.

A direção de injeção não influi na soldabilidade do PMMA, nem do PC para o sonotrodo com secção quadrada. Este resultado sugere que deve existir uma relação entre dimensão preponderante de sonotrodo e direção de injeção.

O ciclo de temperatura vai além da temperatura de transição vítrea (T_g) para todos os pontos estudados em ambos os materiais. Assim, as cadeias poliméricas começam a se movimentar, favorecendo a interdifusão de pedaços de cadeia entre as duas peças poliméricas e, conseqüentemente, a união das duas partes.

Para o PMMA a temperatura passa da temperatura de degradação em dois pontos da junta, degradando parte do material, modificando a estrutura do material da junta e comprometendo o desempenho do conjunto soldado.

8. Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha mãe e à minha namorada pela compreensão, paciência e apoio.

Agradeço aos professores: Douglas Gouvêa, Nicole Raymonde Demarquette e Wang Shu Hui.

Agradeço aos colegas: Shang, Wanderson e Gilberto.

Agradeço aos técnicos: Lívio, Isabel e Roger.

9. Referência Bibliográfica

- 1) Potente, H. **Ultrasonic Welding – principles and theory in Joining Plastics in Production**. 2.ed. Cambridge - UK, The Welding Institute, Crampton & Sons Limited, 1988.
- 2) Branson Ultrasonics Corporation. **Manual do operador – Soldadoras integradas série 900IW** São Paulo, 1996.
- 3) Profit, A. **The applications of ultrasonic welding in Joining Plastics in Production**. Cambridge – UK, The Welding Institute - Crampton & Sons Limited, 1988.
- 4) Eurosonics Tecnologia Industrial Ltda. **Informe técnico PW-2**. São Paulo, 1983.
- 5) Nonhof, C. J. & Luiten, G.A. **Estimates for Process Conditions During the Ultrasonic Welding of Thermoplastics**. ed. Society of Plastics Engineers in Journal of Polymer Engineering and Science , vol. 36, nº 9, pg. 1177 – 1183, 1996.
- 6) Liu, S. J. **Optimizing the joint strength of ultrasonically welded thermoplastics**. New York, vol. 18, n. 2: p. 125 – 135, Advances in polymer technology, 1999.
- 7) Tadmor, Z.; Gogos, C. G. **Principles of Polymer Processing**; 1ª ed., pág - 55, New York, John Wiley & Sons, 1979.
- 8) Mano, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 1a ed., Ed. Edgard Blucher Ltda., pág 25-26, São Paulo, 1991.

- 9) Brown, M. E. **Introduction to thermal analysis – techniques and applications**. vol. 1., New York, Chapman and Hall, 1988.
- 10) Duval, C. **Inorganic Thermogravimetric Analysis**. ,2a edição, Amsterdam, 1963.
- 11) Brandi, S. D. **Metalurgia da soldagem: Conceitos**. In “Coleção tecnologia SENAI – Soldagem” edited by Ziedas, S. e Tatini, I., SENAI – SP, São Paulo, , pg. 89 – 92, 1997.
- 12) Benatar, A.; **“Weldability of Thermoplastics”**, EWI North American Welding Research Seminar, Columbus, Ohio, 1987;
- 13) Benatar, A.; **“Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites”**, PhD Thesis, Dept. of Mech. Eng., MIT, 1987;
- 14) Benatar, A. et al, **“Methods for fusion bonding thermoplastic composites”**, SAMPE Quarterly, 1986;
- 15) Dara, P. H. et al; **“Thermoplastic matrix composite processing model”**, Interim Report nº 57; 1985;
- 16) Companhia Química Metacril; **“Catálogo técnico de materiais”**; em <http://www.metacril.com.br>, São Paulo, 1999
- 17) **“Informe técnico PW-1 da Eurosonics Tecnologia Industrial Ltda.”**; São Paulo – Brasil, 1983.
- 18) Bayer Polymers S.A **Application Technology Information**. U. K., 1997.
- 19) Downing, D. , Clark J., **“Estatística Aplicada”**; Ed. Saraiva; 1999.

20) Adamowski, J. C., "**Medição de propriedades físicas de líquidos por ultra-som**"; Processo FAPESP 98/00806-3.

21) Moraes, F. de **Desenvolvimento de Transdutores Piezoelétricos Flexensionais usando Otimização Topológica**. Processo FAPESP 00/00841-5, 2000.

22) Costa, M. L. **Efeito do arranjo das fibras na resistência de compósito com resina epóxi na presença de vazio**. ITA – Deptº de Física; TC207-018 do 14º CBECIMAT, 2000;

23) ASTM D 638M – 99, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (metric)**", 1999.

24) UTHSCSA, **Image Tool**. versão 2.00, 1996.

10. Bibliografia

1) Bretas, R. E. S. **Processamento de polímeros** , , São Carlos – BR, DEMa – Universidade Federal de São Carlos, pg. 56-81, 1984.

2) "Manual da placa de aquisição de dados e comando de equipamentos INTERDATA"; Sisdatasolda – Laboratório de Soldagem da UFSC; 1992;

3) Brandup, J., Immergut E.H.; "**Polymer Handbook**", 3ª edição, 1989, John Wiley & Sons, pg 219 e 233;

4) Turri, W.; " **Otimização do processo de soldagem por ultra-som em polímeros**", EPUSP; 2001.

5)Kuae, L. ; Bonesio, Maria C.; Villela, Maria C. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses.** São Paulo, EPUSP, 1991.