



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPTº DE ENGª METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**LABORATÓRIO DE JUNÇÃO DE MATERIAIS**

**USP**  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

---

## ***TRABALHO DE FORMATURA***

### **TÍTULO:**

**“Otimização do processo de soldagem por  
ultra-som em polímeros similares”**

***Autor: Wagner Fernando Turri***

***Orientador: Profº Dr. Sérgio Duarte Brandi***  
***Co-orientadora: Profª Drª Nicole Raymonde Demarquette***

## ÍNDICE

|   | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| <i>1) Introdução</i>  | <i>01</i>     |
| <i>1.1) Justificativas para o estudo</i>                        | <i>01</i>     |
| <i>2) Revisão bibliográfica</i>                                 | <i>02</i>     |
| <i>2.1) Soldagem por ultra-som</i>                              | <i>02</i>     |
| <i>2.1.1) Equipamento</i>                                       | <i>02</i>     |
| <i>2..1.1.1) Módulo Gerador</i>                                 | <i>03</i>     |
| <i>2.1.1.2) Atuador</i>   | <i>03</i>     |
| <i>2.1.1.3) Conjunto acústico</i>                               | <i>03</i>     |
| <i>a) Conversor</i>   | <i>04</i>     |
| <i>b) Booster</i>   | <i>05</i>     |
| <i>c) Sonotrodo</i>   | <i>07</i>     |
| <i>2.2) Mecanismo de soldagem por ultra-som</i>                 | <i>09</i>     |
| <i>2.3) Importância da soldagem por ultra-som</i>               | <i>10</i>     |
| <i>2.4) Parâmetros referentes ao processo de soldagem</i>       | <i>12</i>     |
| <i>2.4.1) Diagramas de soldabilidade</i>                        | <i>12</i>     |
| <i>2.5) Propriedades dos polímeros</i>                          | <i>14</i>     |
| <i>2.6) Temperatura de transição vítreia (<math>T_G</math>)</i> | <i>15</i>     |
| <i>2.7) Temperatura de degradação (<math>T_D</math>)</i>        | <i>17</i>     |
| <i>2.8) Soldabilidade</i>                                       | <i>19</i>     |
| <i>2.9) Ultra-som</i>   | <i>22</i>     |
| <i>3) Materiais e métodos</i>                                   | <i>24</i>     |
| <i>3.1) Materiais</i>   | <i>24</i>     |

|   | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| <i>3.1.1) Poli (metacrilato) de metila (PMMA)</i>                               | 24            |
| <i>3.1.2) Policarbonato (PC)</i>  | 25            |
| <i>3.2) Dispositivo de soldagem</i>   | 27            |
| <i>3.3) Adequação do sistema de ar comprimido</i>                               | 29            |
| <i>3.4) Análise por ultra-som</i>   | 30            |
| <i>3.4.1) Cálculo de coeficiente de absorção (<math>\alpha</math>)</i>          | 33            |
| <i>3.5) Conjunto acústico para soldagem</i>                                     | 34            |
| <i>3.6) Características geométricas dos corpos de prova</i>                     | 34            |
| <i>3.7) Tipo de junta para a soldagem</i>                                       | 35            |
| <i>3.8) Determinação de área em PMMA</i>  | 35            |
| <i>3.9) Corpos de prova</i>   | 37            |
| <i>3.9.1) Obtenção dos corpos de prova</i>                                      | 37            |
| <i>3.9.1.1) Injetora</i>  | 37            |
| <i>3.9.1.2) Direção de injeção</i>  | 40            |
| <i>3.10) Método para determinação de ciclos de temperatura durante soldagem</i> | 41            |
| <i>4) Resultados</i>  | 48            |
| <i>4.1) Análise microscópica</i>  | 48            |
| <i>4.1.1) Microestruturas do PMMA</i>   | 48            |
| <i>4.2) Diagramas de soldabilidade de PMMA</i>                                  | 50            |
| <i>4.3) Diagramas de soldabilidade de PC</i>                                    | 54            |
| <i>4.4) Ensaios mecânicos</i>   | 55            |
| <i>4.5) Curvas de área soldada</i>  | 58            |

|   | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| <i>4.5.1) PMMA</i>  | 58            |
| <i>4.5.2) PC</i>  | 65            |
| <i>4.5.3) PMMA X PC</i>   | 67            |
| <i>4.6) Análise por ultra-som</i>                               | 71            |
| <i>4.6.1) PMMA</i>  | 71            |
| <i>4.6.2) PC</i>  | 72            |
| <i>4.6.3) Coeficiente de absorção (<math>\alpha</math>)</i>     | 74            |
| <i>4.7) Temperatura de transição vítreia (<math>T_G</math>)</i> | 75            |
| <i>4.8) Temperatura de degradação (<math>T_D</math>)</i>        | 78            |
| <i>4.9) Temperaturas dos ciclos de soldagem</i>                 | 79            |
| <i>5) Discussão e conclusões</i>                                | 92            |
| <i>5.1) Análise microscópica</i>                                | 92            |
| <i>5.2) Diagramas de soldabilidade</i>                          | 93            |
| <i>5.3) Quantidade de área soldada</i>                          | 93            |
| <i>5.3.1) PMMA</i>  | 93            |
| <i>5.3.2) PC</i>  | 96            |
| <i>5.3.3) PC X PMMA</i>   | 96            |
| <i>5.4) Resultados acústicos</i>                                | 97            |
| <i>5.5) Ensaios mecânicos</i>                                   | 98            |
| <i>5.6) Temperaturas dos ciclos de soldagem</i>                 | 100           |
| <i>6) Agradecimentos</i>  | 102           |
| <i>7) Referências bibliográficas</i>                            | 104           |

| <b>ÍNDICE DE FIGURA:</b>   | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <i>Figura 2.1 – Esquematização de um equipamento de soldagem por ultra-som</i>   | 02            |
| <i>Figura 2.2 – Esquema da mudança de voltagem e freqüência da energia elétrica num módulo gerador</i>                         | 03            |
| <i>Figura 2.3 – Esquematização de um conversor piezelétrico em operação</i>  | 04            |
| <i>Figura 2.4 – Imagem do posicionamento do conversor e do booster em um equipamento de soldagem por ultra-som Branson 920</i> | 05            |
| <i>Figura 2.5 – Imagem de um conjunto acústico pronto para soldagem</i>  | 07            |
| <i>Figura 2.6 – Curvas de carga em função da pressão para diferentes amplitudes de onda</i>                                    | 07            |
| <i>Figura 2.7 – Sonotrodos</i>   | 08            |
| <i>Figura 2.8 – (a) Peça irradiada por ultra-som<br/>(b) Pressão de junção P em função de sen (<math>\theta</math>)</i>        | 09            |
| <i>Figura 2.9 – Peças que utilizam soldagem por ultra-som</i>  | 11            |
| <i>Figura 2.10 – Sonotrodo utilizado para soldagem de embalagens</i>   | 12            |
| <i>Figura 2.11 – Diagrama de soldabilidade</i>   | 13            |
| <i>Figura 2.12 – Fotografia de uma junta onde ocorreu escoamento de material</i>   | 14            |
| <i>Figura 2.13 – Esquematização dos cadiinhos utilizados no DSC</i>  | 16            |
| <i>Figura 2.14 – Curva típica obtida no DTA com evento endotérmico</i>   | 16            |
| <i>Figura 2.15 – Esquematização de um sistema eletrônico de pesagem para TGA</i>   | 17            |
| <i>Figura 2.16 – Curvas típicas obtidas com TGA</i>  | 19            |
| <i>Figura 2.17 – Ilustração de rugosidades na superfície de junção</i>   | 20            |
| <i>Figura 2.18 – Esboço sobre a difusão intermolecular em polímeros</i>  | 21            |

|  | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| <i>Figura 2.19 – Ilustração de curva e dados obtidos com análise por ultra-som</i>                                   | 22            |
| <i>Figura 3.1 – Cadeia polimérica do PMMA</i>  | 25            |
| <i>Figura 3.2 – Cadeia polimérica de PC</i>  | 26            |
| <i>Figura 3.3 – Dispositivo criado para soldagem de polímeros por ultra-som (vista lateral)</i>                      | 28            |
| <i>Figura 3.4 – Dispositivo de soldagem de polímeros por ultra-som (vista superior)</i>                              | 28            |
| <i>Figura 3.5 – Unidade de tratamento de ar comprimido instalado para uso no equipamento de soldagem</i>             | 29            |
| <i>Figura 3.6 – Esquema do acoplamento utilizado no ultra-som</i>  | 30            |
| <i>Figura 3.7 – Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som</i>  | 31            |
| <i>Figura 3.8 - Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som</i>  | 32            |
| <i>Figura 3.9 – Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som</i>  | 32            |
| <i>Figura 3.10 – Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som (ampliação da área hachurada da figura 3.9)</i> | 33            |
| <i>Figura 3.11 – Características geométricas dos corpos de prova obtidos por injeção</i>                             | 35            |
| <i>Figura 3.12 – Junta sobreposta determinada para soldagem</i>  | 35            |
| <i>Figura 3.13 – Esquematização para cálculo de área soldada em PMMA</i>   | 36            |
| <i>Figura 3.14 – Máquina injetora e equipamentos</i>   | 37            |
| <i>Figura 3.15 – Direções de injeção nos corpos de prova para estudo</i>   | 41            |
| <i>Figura 3.16 – Pontos de coleta de dados de temperatura durante a junção</i>                                       | 42            |
| <i>Figura 3.17 – Aparato para furação das amostras</i>   | 43            |

| Página   |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 3.18 – Esquematização de montagem de sistema de aquisição de dados</i>   | <b>45</b> |
| <i>Figura 3.19 – Ilustração da junta com termopares antes da junção</i>  | <b>46</b> |
| <i>Figura 3.20- Ilustração da junta com termopares durante a junção</i>  | <b>46</b> |
| <i>Figura 4.1 – (a) Microestrutura de uma junta de PMMA onde ocorreu a junção<br/>(b) Microestrutura de uma junta de PMMA onde não houve a soldagem analisada no MEV</i> | <b>49</b> |
| <i>Figura 4.2 – Montagem de uma junta submetida à soldagem por ultra-som</i>   | <b>50</b> |
| <i>Figura 4.3 – Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PMMA na direção H e V</i>  | <b>51</b> |
| <i>Figura 4.4 – Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PMMA na direção H</i>  | <b>52</b> |
| <i>Figura 4.5 – Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PMMA na direção V</i>  | <b>52</b> |
| <i>Figura 4.6 – Falha devido a escorregamento da junta implicando na fratura da mesma</i>  | <b>53</b> |
| <i>Figura 4.7 – Expulsão de material pela junta</i>  | <b>53</b> |
| <i>Figura 4.8 – Fratura do corpo de prova na área submetida à junção</i>   | <b>53</b> |
| <i>Figura 4.9 – Junta com falta de solda</i>   | <b>53</b> |
| <i>Figura 4.10 – Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PC na direção H</i>   | <b>54</b> |
| <i>Figura 4.11 - Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PC na direção V</i>   | <b>55</b> |
| <i>Figura 4.12 – Gráfico de tensão versus deformação no PMMA obtido por injeção na direção H</i>   | <b>56</b> |

| Página   |    |
|--|----|
| <i>Figura 4.13 – Gráfico de tensão versus deformação numa junta de PMMA soldada por ultra-som testada por ensaio de cisalhamento</i>                   | 57 |
| <i>Figura 4.14 – Curva de áreas soldadas em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção H</i>    | 58 |
| <i>Figura 4.15 – Curva de áreas soldadas em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção V</i>    | 59 |
| <i>Figura 4.16 – Curvas de área soldada para a pressão de 103,4 kPa em função da direção de injeção</i>  | 59 |
| <i>Figura 4.17 – Curvas de área soldada para a pressão de 137,9 kPa em função da direção de injeção</i>  | 60 |
| <i>Figura 4.18 – Curvas de área soldada para a pressão de 206,8 kPa em função da direção de injeção</i>  | 60 |
| <i>Figura 4.19 – Curva de potência de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção H</i> | 61 |
| <i>Figura 4.20 – Curva de potência de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção V</i> | 62 |
| <i>Figura 4.21 – Curva de energia de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção H</i>  | 62 |
| <i>Figura 4.22 – Curva de energia de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção V</i>  | 63 |
| <i>Figura 4.23 – Curvas de energia em função do tempo de soldagem para a pressão de soldagem de 103,4 kPa</i>  | 63 |
| <i>Figura 4.24 – Curvas de energia em função do tempo de soldagem para a pressão de soldagem de 137,8 kPa</i>  | 64 |

| Página   |    |
|--|----|
| <i>Figura 4.25 – Curvas de energia em função do tempo de soldagem para a pressão de soldagem de 206,8 kPa</i>                          | 64 |
| <i>Figura 4.26(a) – Curvas de área de soldagem em PC para a pressão de junção de 15 psi em função das direções de injeção</i>          | 65 |
| <i>Figura 4.26(b) – Curvas de área de soldagem em PC para a pressão de junção de 20 psi em função das direções de injeção</i>          | 66 |
| <i>Figura 4.26(c) – Curvas de área de soldagem em PC para a pressão de junção de 25 psi em função das direções de injeção</i>          | 66 |
| <i>Figura 4.26(d) – Curvas de área de soldagem em PC para a pressão de junção de 30 psi em função das direções de injeção</i>          | 67 |
| <i>Figura 4.27 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 15 psi na direção de injeção H</i> | 68 |
| <i>Figura 4.28 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 20 psi na direção de injeção H</i> | 68 |
| <i>Figura 4.29 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 30 psi na direção de injeção H</i> | 69 |
| <i>Figura 4.30 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 15 psi na direção de injeção V</i> | 69 |
| <i>Figura 4.31 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 20 psi na direção de injeção V</i> | 70 |
| <i>Figura 4.32 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 25 psi na direção de injeção V</i> | 70 |
| <i>Figura 4.33 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para a pressão de junção de 30 psi na direção de injeção V</i> | 71 |
| <i>Figura 4.34 – Curva de atenuação acústica para PMMA</i>   | 72 |

|  | Página |
|--|--------|
| <i>Figura 4.35 – Curva de análise acústica para o PC</i>   | 73     |
| <i>Figura 4.36 – Gráfico comparativo com valores de coeficiente de absorção</i>  | 74     |
| <i>Figura 4.37 – Curva obtida no DTA para determinação da <math>T_G</math> em PMMA</i>   | 76     |
| <i>Figura 4.38 – Curva obtida no DTA para determinação da <math>T_G</math> em PC</i>   | 77     |
| <i>Figura 4.39 – Curva obtida com o <math>T_D</math> para o PMMA</i>   | 78     |
| <i>Figura 4.40 - Curva obtida com o <math>T_D</math> para o PC</i>   | 79     |
| <i>Figura 4.41 – Gráfico de temperatura para pressão de junção de 15 psi e tempo de junção de 0,25 s</i>                             | 86     |
| <i>Figura 4.42 – Gráfico de temperatura para pressão de junção de 20 psi e tempo de junção de 0,60 s</i>                             | 86     |
| <i>Figura 4.43 – Gráfico de temperatura para pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,30 s</i>                             | 87     |
| <i>Figura 4.44 – Gráfico de temperatura para pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,60 s</i>                             | 87     |
| <i>Figura 4.45 – Gráfico de temperatura para pressão de junção de 30 psi e tempo de junção de 0,25 s</i>                             | 88     |
| <i>Figura 4.46 – Gráfico de temperatura para pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,80 s</i>                             | 88     |
| <i>Figura 4.47 – Gráfico com curvas de temperatura durante a soldagem em função do tempo de ciclo para PMMA</i>                      | 90     |
| <i>Figura 4.48 – Gráfico com curvas de temperatura durante a soldagem em função do tempo de ciclo para PMMA</i>                      | 91     |
| <i>Figura 5.1 - Representação da ordenação de um conjunto de macromoléculas na direção H com a seta indicando o canal de injeção</i> | 95     |

|  | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| <i>Figura 5.2 – Representação da ordenação de um conjunto de macromoléculas na direção V com a seta indicando o canal de injeção</i> | 95            |
| <i>Figura 5.3 - Comparativo entre os canais de injeção em corpos de prova de tração</i>  | 98            |
| <i>Figura 5.4 - Corpo de prova fraturado numa região acima da área de soldagem</i>   | 99            |
| <i>Figura 5.5 - Esquematização do plano de fratura nas amostras analisadas na pesquisa</i>   | 99            |

| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b>   | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <i>Tabela 3.1 – Propriedades do PMMA a ser utilizado na pesquisa</i>   | 25            |
| <i>Tabela 3.2 – Propriedades do PC a ser utilizado na pesquisa</i>   | 27            |
| <i>Tabela 3.3 – Valores para a injeção de PMMA</i>   | 40            |
| <i>Tabela 3.4 – Valores para a injeção de PC</i>   | 40            |
| <i>Tabela 3.5 – Posições dos pontos para a obtenção dos dados de temperatura</i>   | 43            |
| <i>Tabela 4.1 – Valores de resistência no PMMA</i>   | 56            |
| <i>Tabela 4.2 – Resultados de ensaio de cisalhamento em juntas soldadas de PMMA</i>  | 57            |
| <i>Tabela 4.3 – Dados obtidos com análise ultra-sônica das amostras de PMMA em função das direções de injeção</i>                                | 72            |
| <i>Tabela 4.4 – Dados obtidos com análise ultra-sônica das amostras de PC em função das direções de injeção</i>                                  | 73            |
| <i>Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de absorção acústica em função das direções de injeção para PMMA e PC</i>                                 | 74            |
| <i>Tabela 4.6 – Comparação de valores experimentais e obtidos na literatura para a <math>T_G</math></i>  | 78            |
| <i>Tabela 4.7 – Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PMMA com pressão de junção de 15 psi e tempo de junção de 0,25 s</i>  | 80            |
| <i>Tabela 4.8 – Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PMMA com pressão de junção de 20 psi e tempo de junção de 0,60 s</i>  | 80            |
| <i>Tabela 4.9 – Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PMMA com pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,30 s</i>  | 81            |
| <i>Tabela 4.10 – Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PMMA com pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,60 s</i> | 81            |

| <i>Página</i>   |    |
|---|----|
| <i>Tabela 4.11 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PMMA com pressão de junção de 30 psi e tempo de junção de 0,25 s</i> | 82 |
| <i>Tabela 4.12 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PMMA com pressão de junção de 30 psi e tempo de junção de 0,80 s</i> | 82 |
| <i>Tabela 4.13 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PC com pressão de junção de 15 psi e tempo de junção de 0,25 s</i>   | 83 |
| <i>Tabela 4.14 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PC com pressão de junção de 20 psi e tempo de junção de 0,60 s</i>   | 83 |
| <i>Tabela 4.15 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PC com pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,30 s</i>   | 84 |
| <i>Tabela 4.16 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PC com pressão de junção de 25 psi e tempo de junção de 0,60 s</i>   | 84 |
| <i>Tabela 4.17 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PC com pressão de junção de 30 psi e tempo de junção de 0,25 s</i>   | 85 |
| <i>Tabela 4.18 –Dados de temperatura e tempo em função dos parâmetros para PC com pressão de junção de 30 psi e tempo de junção de 0,80 s</i>   | 85 |

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| <b>SIGLA</b>         | <b>NOME</b>                                       |
|----------------------|---|
| <i>ABS</i>           | <i>Acrilonitrila-butadieno-estireno</i>           |
| <i>PP</i>            | <i>Polipropileno</i>                              |
| <i>PS</i>            | <i>Poliestireno</i>                               |
| <i>PE</i>            | <i>Polietileno</i>                                |
| <i>PEAD</i>          | <i>Polietileno de alta densidade</i>              |
| <i>PEBD</i>          | <i>Polietileno de baixa densidade</i>             |
| <i>PMMA</i>          | <i>Poli (metacrilato) de metila</i>               |
| <i>PC</i>            | <i>Policarbonato</i>                              |
| <i>DMTA</i>          | <i>Análise térmica dinâmica mecânica</i>          |
| <i>ASTM</i>          | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| <i>SPE</i>           | <i>Society of Plastics Engineers</i>              |
| <i>T<sub>G</sub></i> | <i>Temperatura de transição vítreia</i>           |
| <i>T<sub>D</sub></i> | <i>Temperatura de degradação</i>                  |
| <i>DTA</i>           | <i>Differential Thermal Analysis</i>              |
| <i>TGA</i>           | <i>Thermogravimetric Analysis</i>                 |
| <i>MEV</i>           | <i>Microscópio Eletrônico de Varredura</i>        |

## 1) INTRODUÇÃO

### 1.1) Justificativas 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.

O seu sucesso se esconde principalmente no tempo de solda necessário, geralmente na ordem de 0,1 a 1 segundo. Porém, a parte a ser soldada e o processo dependem diretamente um do outro, devido 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 científicos, 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 consagrada.

## 2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta parte estão apresentados todos os estudos feitos para a conclusão do trabalho de formatura. Tais estudos são fontes de um trabalho de seis meses de leitura e detalhamento dos objetivos.

### 2.1) Soldagem por ultra-som:

#### 2.1.1) Equipamento:

Os sistemas de soldagem por ultra-som constam de um gerador que produz altas freqüências, 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.

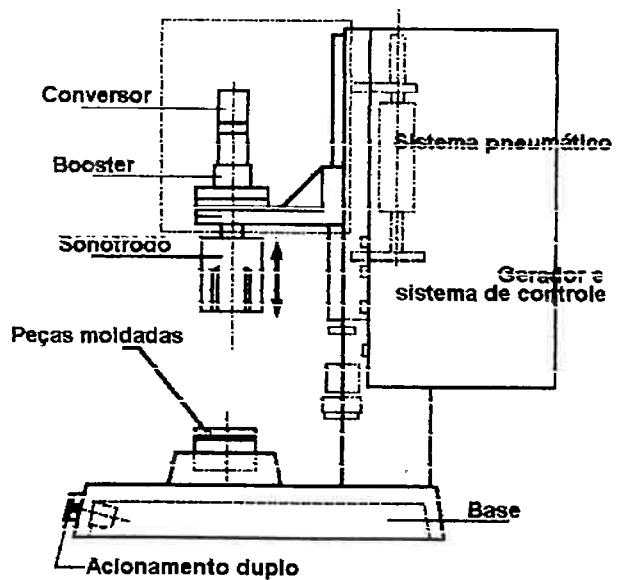


Figura 2.1 – Esquematização de um equipamento de soldagem por ultra-som.

### 2.1.1.1) Módulo gerador:

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



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

### 2.1.1.2) 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 pneumáticamente 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.

### 2.1.1.3) 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.

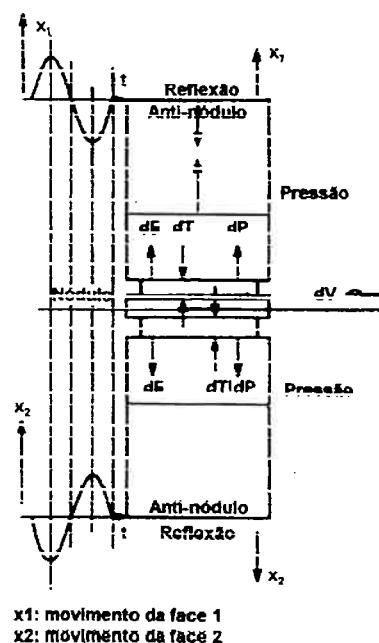


Figura 2.3 – Esquematização de um conversor piezelétrico em operação.

alternadas, ele se expande e se contrai, devido aos cristais piezelétricos. Esta movimentação resulta numa conversão de energia acima de 90%, que é aconselhável para uma boa solda [2].

O conversor é um elemento feito de alumínio e tratado com revestimento de alta dureza, como níquel ou cromo, por exemplo. Na figura 2.4 está apresentado um conversor com revestimento de níquel.

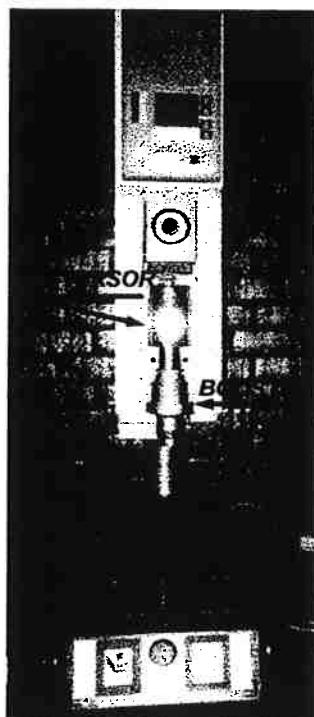


Figura 2.4- Imagem do posicionamento do conversor e do booster em um equipamento de soldagem por ultra-som Branson 920.

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.

$$A = \frac{S_1}{S_2} = \frac{(D_1)^2}{(D_2)^2} \quad (2.1)$$

onde, A é a taxa de ampliação ou redução;  $S_1$  é a área superior do booster;  $S_2$  é a área inferior do booster;  $D_1$  é o diâmetro médio da parte superior do booster e  $D_2$  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.

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.

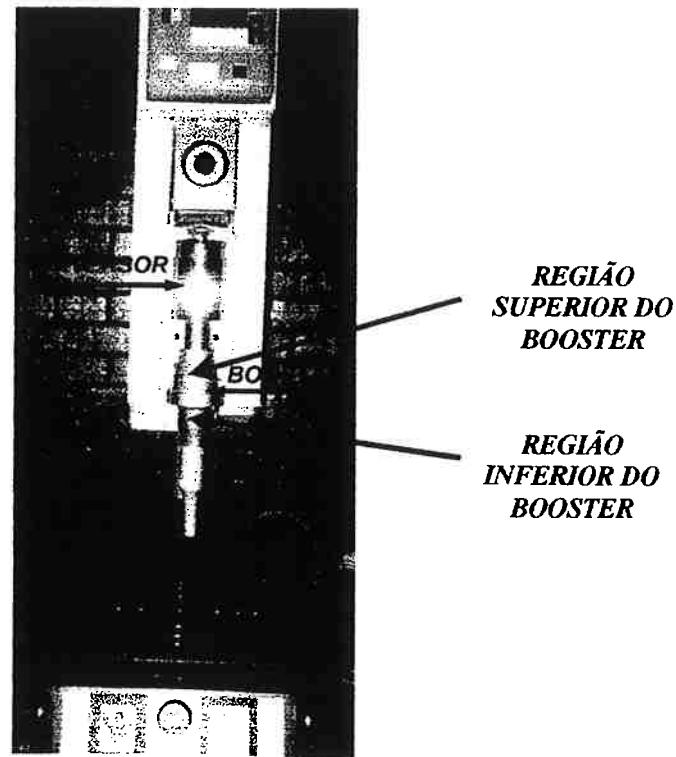


Figura 2.5 – Imagem de um conjunto acústico pronto para soldagem.

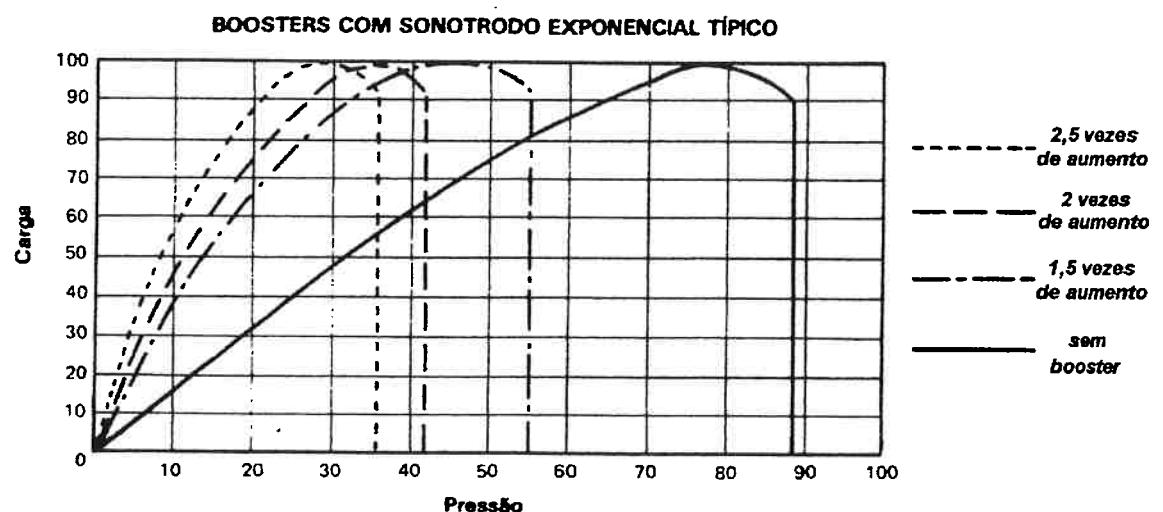


Figura 2.6 – Curvas de carga em função da pressão para diferentes amplitudes de onda [4]. O aumento a que se refere a quantas vezes o valor de amplitude de saída do conversor é alterada pelo booster.

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 freqüência 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.

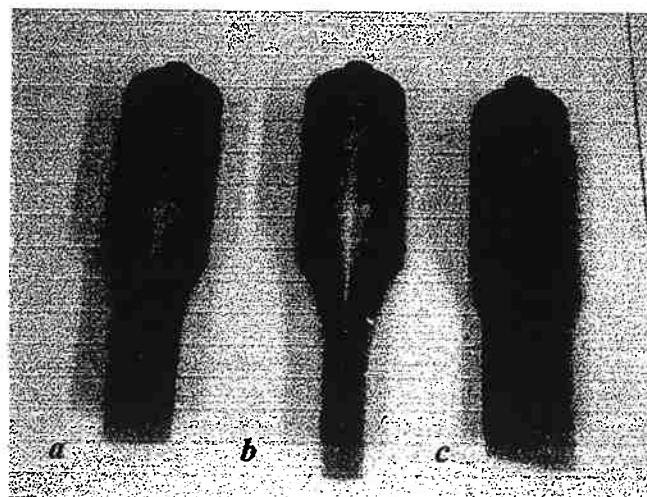


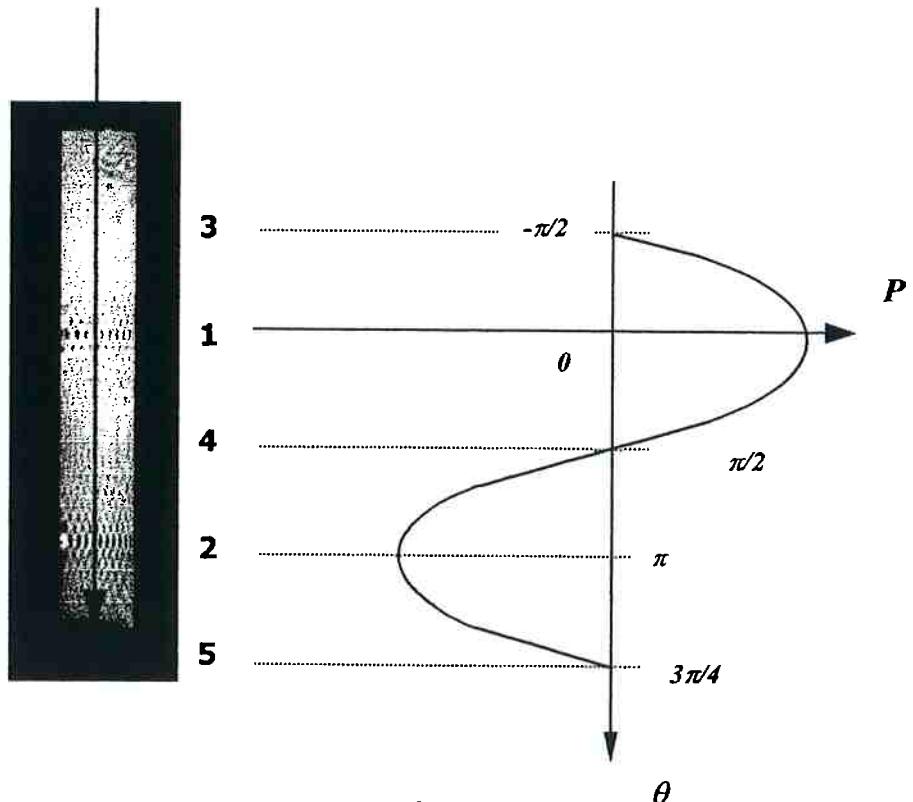
Figura 2.7 – Sonotrodos: a)cilíndrico; b) catenoidal; c) escalonado (seção retangular).

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

## 2.2) Mecanismo de soldagem por ultra-som:

Quando os plásticos são unidos na soldagem por ultra-som, as vibrações longitudinais 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 (b) apresentam um padrão de onda estacionária longitudinal. Zonas bem focalizadas (1 e 2) e regiões fora de foco ( 3, 4 e 5 ) são visíveis. Nesta figura a onda ultra-sônica é aplicada na direção da seta.



*Figura 2.8(a) –  
Peça irradiada  
por ultra-som  
(conforme  
referência 3).*

*Figura 2.8(b) – Pressão de junção  $P$  em função de  $\sin(\theta)$*

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  $\lambda$  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 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  $90^\circ$ , dissipando energia.

### 2.3) Importância da soldagem por ultra-som:

A soldagem por ultra-som em polímeros é um dos métodos para a junção de partes poliméricas 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 onde a precisão dimensional e a grande quantidade de produção são fatores de tomada de decisão quanto a escolha de um

processo de soldagem. Algumas peças que utilizam a soldagem por ultra-som estão apresentadas na figura 2.9.

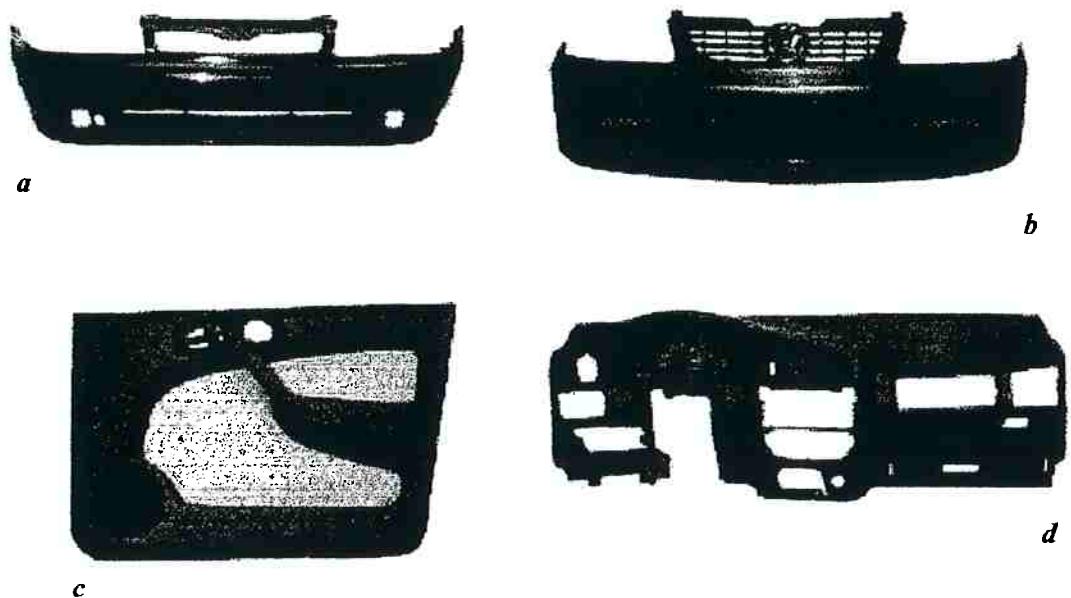


Figura 2.9 – (a) e (b) pára-choques onde há soldagem de suportes e reforços, além do farol de neblina; (c) painel da porta onde há soldagem do medalhão, da tela do alto-falante, grampos e puxador da porta; (d) painel de instrumentos onde há a soldagem das grelhas.

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; e não são necessários aditivos. Uma foto de soldagem por ultra-som em embalagens é ilustrada na figura 2.10. Observa-se que o sonotrodo tem características geométricas compatíveis com a embalagem a ser soldada.

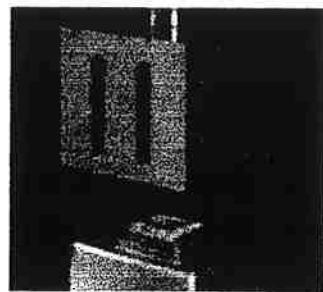


Figura 2.10 – Sonotrodo utilizado para soldagem (selagem) de embalagens.

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.

#### 2.4) Parâmetros referentes ao processo de soldagem:

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.

##### 2.4.1) Diagramas 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 2.11. 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.

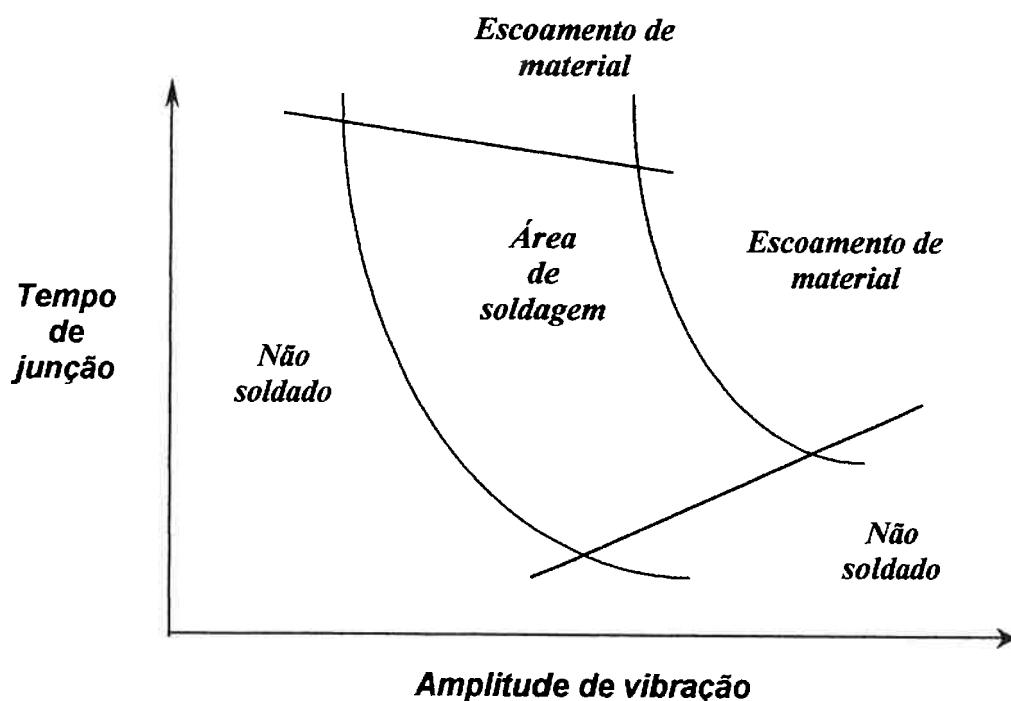


Figura 2.11 – Diagrama de soldabilidade (conforme Liu<sup>(3)</sup>, com o tempo de junção e amplitude de vibração como parâmetros de soldabilidade).

A soldabilidade de um material termoplástico pode ser definida baseada na área de soldagem apresentada na figura 2.11. 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 escoa para regiões externas das mesmas, como ilustrado na figura 2.12.

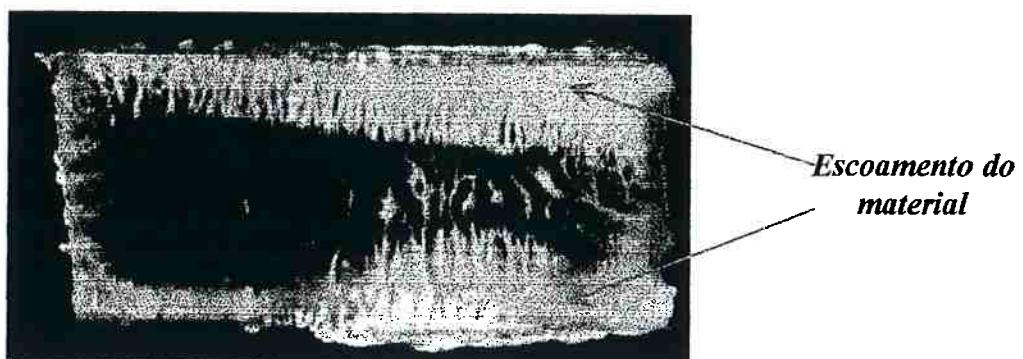


Figura 2.12 – Fotografia de uma junta onde ocorreu escoamento de material.

## 2.5) Propriedades dos polímeros:

Além dos parâmetros relacionados ao processo de soldagem há outros relacionados às características do material submetido à soldagem. Dentre eles há um parâmetro acústico e outro termodinâmico.

Alguns polímeros soldam mais facilmente do que outros devido a algumas propriedades, como a atenuação acústica e a temperatura de transição vítreia que estão ligadas às características estruturais dos polímeros.

A atenuação acústica é uma propriedade física que está ligada à absorção da energia, gerada por ondas, pelo polímero através de suas macromoléculas. Esta propriedade pode ser analisada através das propriedades mecânicas do polímero (como módulo de elasticidade) em função da temperatura. A cada temperatura há uma

mudança neste módulo de elasticidade, que são perceptíveis a temperaturas acima da transição vítreia. Com a mudança do módulo de elasticidade é possível calcular a atenuação acústica do material, para uma determinada temperatura.

A transição vítreia, por sua vez, é associada à região amorfa dos polímeros. Ela é uma transição de segunda ordem e representa a temperatura em que há a mobilidade das cadeias moleculares, devido à rotação de grupos laterais em torno de ligações primárias, que se torna restrita pela coesão intermolecular [8]. Abaixo da temperatura de transição vítreia não há mobilidade das cadeias macromoleculares fazendo com que o material se torne mais rígido. Assim, acima da temperatura de transição vítreia há a mobilidade das cadeias macromoleculares e o material se torna menos rígido.

#### 2.6) Temperatura de transição vítreia ( $T_g$ ):

Para a obtenção da temperatura de transição vítreia,  $T_g$ , utilizou-se o método do DTA (Differential thermal analysis), onde a amostra e o material de referência são mantidos à mesma temperatura. Ou seja,  $\Delta T = T_A - T_R = 0$ , onde  $T_A$  é a temperatura da amostra e  $T_R$  a temperatura do material de referência.

O DTA é o método mais simples e o mais utilizado em análises térmicas. A diferença de temperatura  $\Delta T$  é gravada enquanto a amostra e o referencial são submetidos à mesma rotina de aquecimento.

O aparato utilizado está esquematizado na figura 2.13, onde um bloco simples com duas cavidades simétricas (uma para amostra e outra para o referencial) é aquecido em um forno.

Um evento endotérmico ( $\Delta H$  positivo, como uma fusão) ocorre na amostra e a temperatura da mesma,  $T_A$ , fica abaixo da temperatura do referencial,  $T_R$ , a qual segue o programa de aquecimento. Se os dados dos termopares são medidos ( $\Delta T$  em função de

$T_R$ ) o resultado vai ser similar ao da figura 2.14. Para um evento endotérmico a resposta ocorre no sentido inverso.

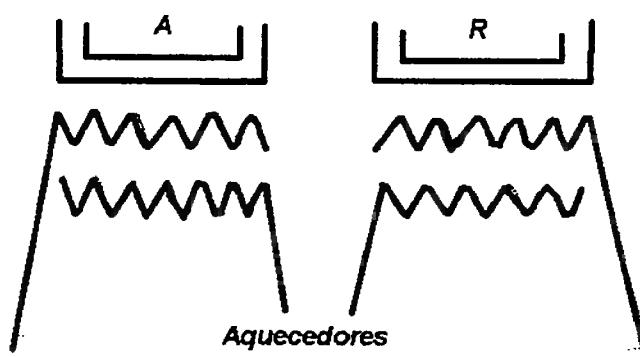


Figura 2.13 – Esquematização dos cadinhos utilizados no DSC (A= amostra e R= referencial) [9].

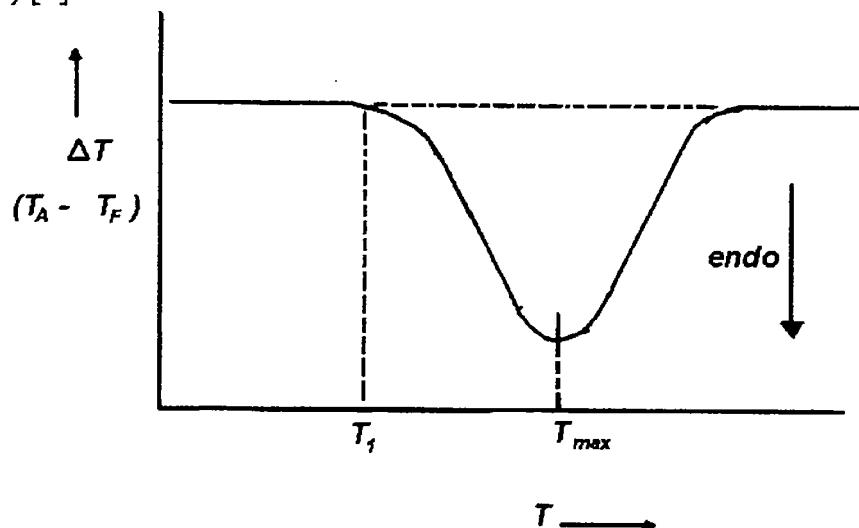


Figura 2.14 – Curva típica obtida no DTA com evento endotérmico [9].

Além disso, o referencial deve ter algumas características tais como: a não ocorrência de eventos térmicos até a temperatura determinada para a medição; não reagir com a amostra ou com os termopares; e tanto a capacidade térmica quanto a condutividade térmica do referencial devem ser similares as da amostra.

Tanto a alumina como o carbeto de silício são muito utilizados como referenciais em amostra inorgânicas, enquanto que para amostras orgânicas utiliza-se óleo de silicone.

## 2.7) Temperatura de degradação ( $T_D$ ):

Para a determinação da temperatura de degradação utilizou-se o TGA (thermogravimetric analysis), onde são tomadas medidas de mudanças na massa da amostra em função da temperatura com o auxílio de uma termobalança. Tal balança deve estar enclausurada em um sistema com atmosfera controlada (figura 2.15).

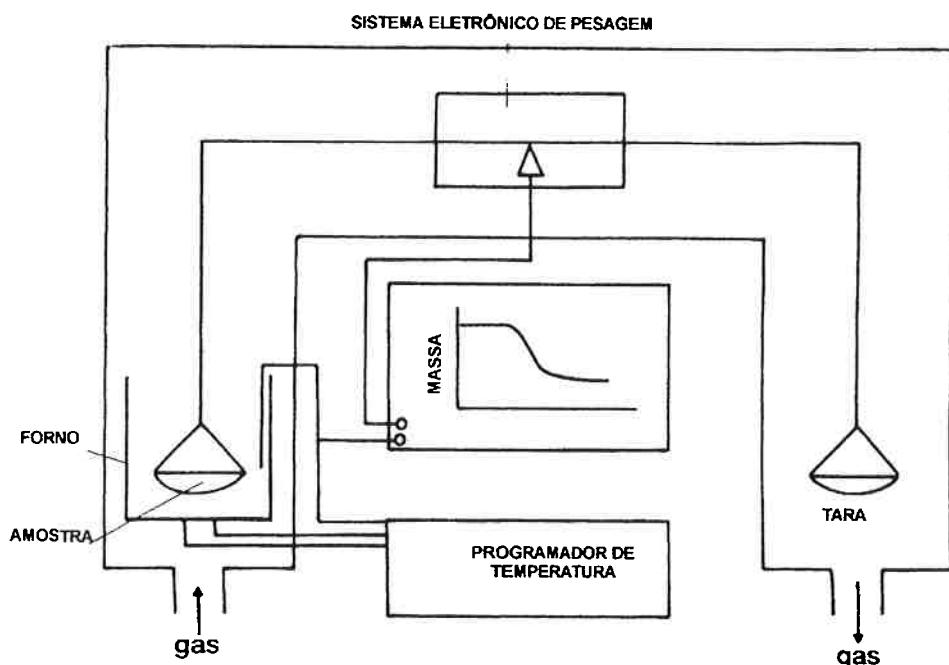


Figura 2.15 – Esquematização de um sistema eletrônico de pesagem para TGA [9].

Durante o processo a temperatura da amostra,  $T_A$ , estará atrasada em relação à do forno,  $T_F$ , não podendo ser medida rapidamente sem a interferência no processo de pesagem. A diferença,  $T_F - T_A$ , tem que ser maior do que 30 °C, dependendo ainda das condições de operação. Este atraso é marcado quando se opera em vácuo ou em atmosferas com fluxo rápido e com altas taxas de aquecimento.

As medidas de temperatura são usualmente feitas por termopares, sendo um para a amostra e outro para a regulagem da temperatura do forno.

No TGA é possível obter diversas curvas características para cada tipo de amostra analisada [10], como ilustrado na figura 2.16. As interpretações são as seguintes:

- Curva tipo I – A amostra não teve decomposição e nem perda de matéria volátil até a temperatura mostrada. Nenhuma informação é obtida, sendo que transformações de fase, fusões, polimerizações entre outros eventos podem ter acontecido.
- Curva tipo II – Uma rápida perda de massa inicial é observada como característica da desorção e da secagem da amostra.
- Curva tipo III – É a representação da decomposição da amostra em um estágio simples. A curva pode ser utilizada para definir limites de estabilidade dos reagentes, determinação da estequiometria e da cinética de reação.
- Curva tipo IV – É a indicação de múltiplos estágios de decomposição com intervalos estáveis. Novamente, a temperatura limite de estabilidade dos reagentes pode ser determinada pela curva.
- Curva tipo V – Também representa uma decomposição com múltiplos estágios, sem a formação de intervalos estáveis.
- Curva tipo VI – Apresenta um ganho de massa resultado da reação da amostra com a atmosfera ao redor. Um exemplo típico é o de oxidação de um metal.

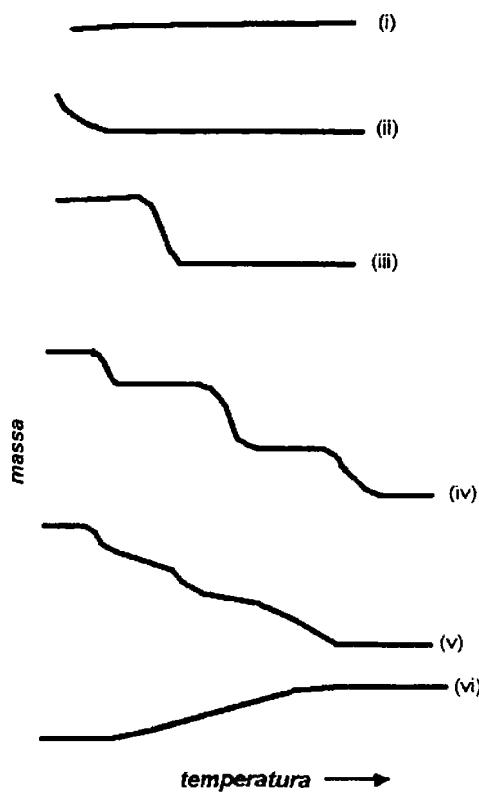


Figura 2.16 – Curvas típicas obtidas com o TGA [10].

### 2.8) Soldabilidade:

A soldabilidade, por sua vez, pode ser entendida como a facilidade com que uma junta soldada é fabricada de tal maneira que preencha os requisitos de um projeto bem executado. É possível desdobrar o conceito de soldabilidade em três partes: operacional; do material; e em serviço [11].

A soldabilidade operacional está ligada à facilidade de execução da junta. Na soldagem por ultra-som as variáveis que estarão inseridas nesse conceito são a pressão de junção; amplitude de onda (característica do processo); tipo de sonotrodo. Também as características do material a ser soldado, como a taxa de transferência de calor no processo; temperatura vítreia e de fusão estão englobadas nessa área.

A soldabilidade do material é vista como as mudanças estruturais e morfológicas do elemento soldado durante seu aquecimento; fusão ou amolecimento (para polímeros amorfos); solidificação e resfriamento. Tais mudanças serão pesquisadas a fim de caracterizar a soldabilidade da junta no decorrer do processo de junção. As mudanças de estrutura da zona de soldagem estarão intimamente ligadas às diferenças de propriedades mecânicas da peça soldada.

A soldabilidade em operação está ligada ao tempo de vida útil do elemento soldado. Esta informação pode ser obtida através de ensaios mecânicos destrutivos e não-destrutivos no elemento unido.

Benatar [12] cita que a soldabilidade é uma função da habilidade de aquecimento do polímero, do escoamento e da mobilidade de cadeias do polímero (difusão das cadeias poliméricas). A habilidade de aquecimento do polímero está ligada à técnica utilizada para soldagem e a propriedades físicas dos polímeros, como difusividade e capacidade térmica. Na soldagem por ultra-som todas estas características mais as aquelas de ordem viscoelásticas do polímero devem ser analisadas.

Duas partes de um polímero a serem unidas não têm toda a superfície de junção em contato devido a rugosidades presentes na superfície conforme ilustrado na figura 2.17. Quando se estabelece uma zona de aquecimento na junta é necessária uma aplicação contínua de pressão (pressão de junção ou soldagem) entre as partes. Tal pressão tem várias funções, entre elas a de deformar as rugosidades no intervalo de aplicação da onda ultra-sônica.

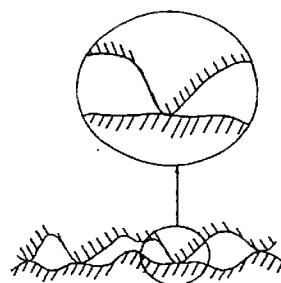


Figura 2.17 – Ilustração de rugosidades na superfície de junção [12].

Em temperaturas elevadas é possível modelar o processo de escoamento do material através da utilização da lei de potência para fluidos [13-15]. Um termoplástico com baixa viscosidade pode proporcionar o contato mais rápido do que um polímero com uma viscosidade alta. Com o aumento da temperatura há o decréscimo da viscosidade de forma que o escoamento viscoso ocorre rapidamente.

Para a viscosidade ser tão baixa a fim do escoamento viscoso ocorrer, polímeros amorfos tem a necessidade de serem aquecidos acima da  $T_g$  e polímeros semicristalinos tem que ser aquecidos a temperaturas acima da temperatura de fusão ( $T_m$ ).

Uma vez que o contato superficial entre as juntas é estabelecido, a difusão intermolecular e o emanharamento das cadeias são necessários para completar o processo de formação de uma boa solda. Este processo pode ser analisado na figura 2.18.

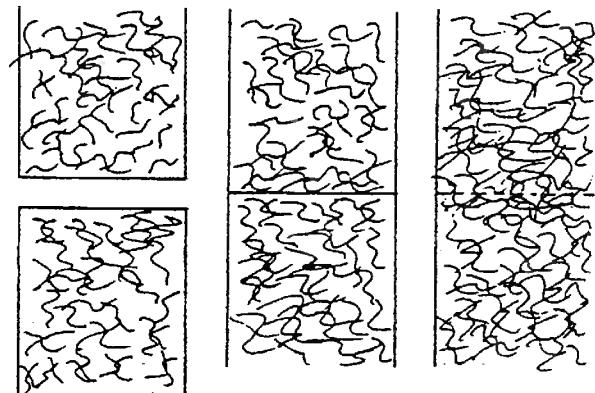


Figura 2.18 – Esboço sobre a difusão intermolecular em polímeros [12].

Desta forma é possível imaginar que polímeros com um peso molecular menor tenham uma difusividade melhor e soldem mais rápido do que aqueles que tem um peso molecular maior. Também é possível perceber que polímeros com um grau maior de complicaçāo (entenda-se como complexidade da molécula) têm uma difusividade menor e, por sua vez, uma soldabilidade menos eficaz.

### 2.9) Ultra-som:

Ondas ultra-sônicas são aquelas ondas que têm uma freqüência acima de 18 kHz, operando dentro do intervalo que é chamado por ultra-sônico. Na análise por ultra-som para se determinar à freqüência de operação é necessário saber qual a espessura do material a ser estudado, pois o comprimento de onda estará ligado a esta variável, pois há a necessidade da amostra ter uma espessura maior do que o comprimento da onda.

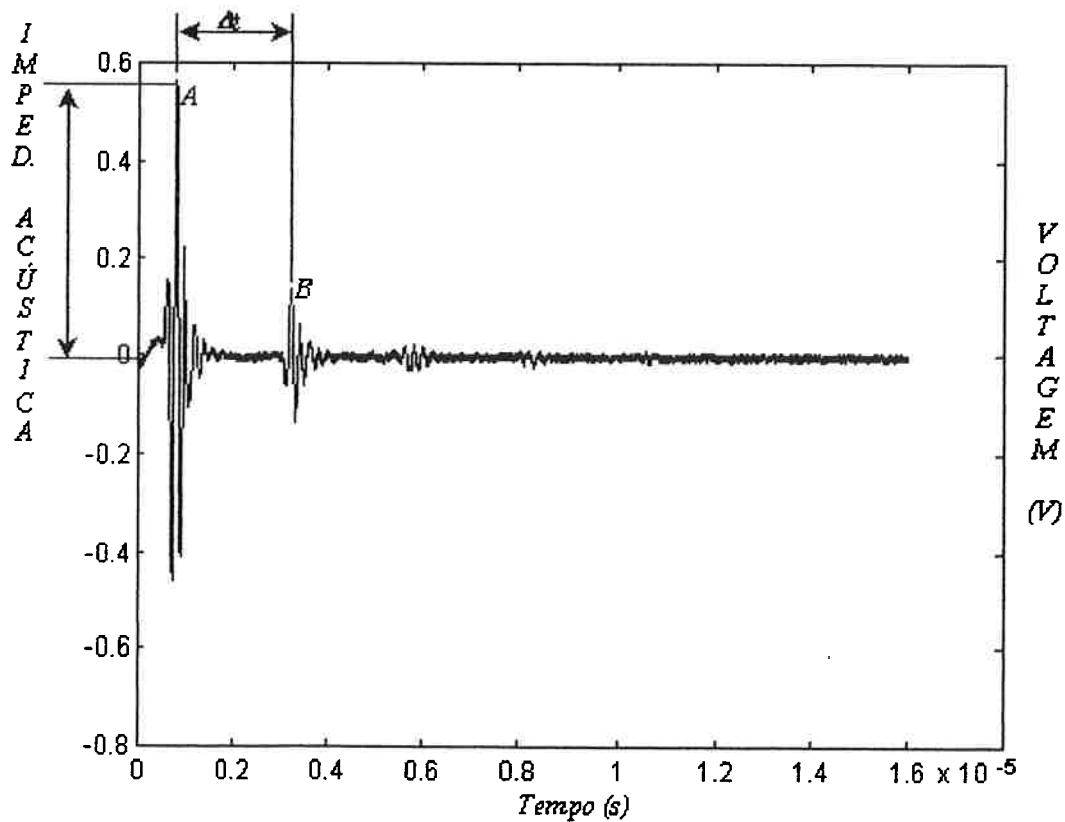


Figura 2.19 – Ilustração de curva e dados obtidos com análise por ultra-som.

A onda ultra-sônica quando aplicada a qualquer material fornece curvas que apresentam vários dados característicos do material. Dados como atenuação acústica, velocidade de propagação da onda no meio, freqüência de ressonância, impedância acústica entre outros podem ser extraídos conforme ilustrado na figura 2.19.

O decaimento que existe entre os picos A e B, correspondem respectivamente à emissão e recepção da onda, sendo conhecido como atenuação acústica que é a propriedade do material em absorver a onda. A velocidade de propagação da onda é função do intervalo de tempo existente entre os picos A e B, que é o intervalo entre a emissão e recepção da onda pelo equipamento.

Já a impedância acústica é função da amplitude da onda. Assim, ondas que tem uma amplitude relativamente baixas têm uma impedância acústica alta e vice-versa.

### 3) MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1) Materiais:

Nesta parte os materiais que serão utilizados no estudo são apresentados com suas propriedades e características. Todos eles foram concedidos por diferentes empresas.

Primeiramente são apresentadas as aplicações comerciais do polímero, sua cadeia polimérica e uma tabela com as propriedades obtidas nos fornecedores para caracterizar o tipo de polímero. De todas as propriedades, as que estão relacionadas à pesquisa são: resistência à tração; alongamento; índice de fluidez e densidade.

##### 3.1.1) Poli (metacrilato) de metila (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.

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 3.1. As propriedades do tipo de PMMA a ser pesquisado estão alocadas na tabela 3.1.

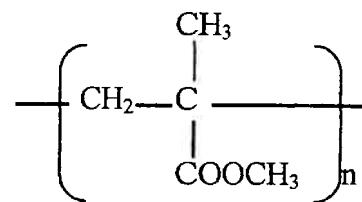


Figura 3.1 – Cadeia polimérica de PMMA

Este tipo de 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 por campo próximo e uma soldagem razoável por campo distante [17].

**TABELA 3.1**  
**PROPRIEDADES DO PMMA A SER UTILIZADO NA PESQUISA [16]**  
**TIPO: Acrigel 01DH ECL – FABRICANTE: Metacril**

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

(\*) valores mínimos.

### 3.1.2) Policarbonato (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 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. As propriedades do Makrolon 2458 encontram-se nas tabelas 3.2. A cadeia polimérica do PC é apresentada na figura 3.2.

Em geral, o policarbonato tem uma boa soldagem tanto por campo próximo como por campo distante [17].

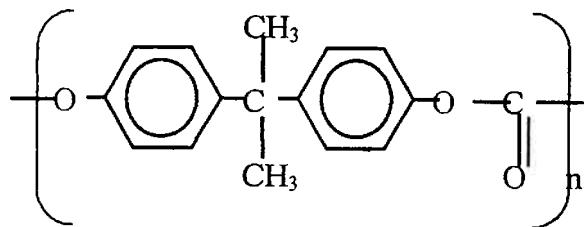


Figura 3.2 – Cadeia polimérica de PC

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].

**TABELA 3.2**  
**PROPRIEDADES DO PC A SER UTILIZADO NA PESQUISA [18]**  
**TIPO: Makrolon 2458 - FABRICANTE: Bayer**

| PROPRIEDADES                               | NORMA                  | CONDIÇÕES DE ENSAIO | VALORES                      |
|--|------------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>Resistência ao impacto Izod</b>         | ISO 180-4 <sup>A</sup> | 23 °C               | 75 kJ/m <sup>2</sup>         |
| <b>Resistência à tração</b>                | ISO 527                | 1 mm/min            | 2300 MPa                     |
| <b>Alongamento (nominal)</b>               | ISO 527                | 50 mm/min           | > 50%                        |
| <b>Temperatura de amolecimento VICAT</b>   | ISO 306                | 50 N; 50 K/h        | 144 °C                       |
| <b>Temperatura de deflexão térmica HDT</b> | ISO 75                 | 1,80 MPa            | 124 °C                       |
| <b>Flamabilidade</b>                       | UL 94 (IEC 707)        | 0,8-2,6 mm          | Classe HB                    |
| <b>Transparência à luz</b>                 | DIN 5036-1             | 1 mm                | 88%                          |
| <b>Índice de fluidez (volumétrico)</b>     | ISO 1133               | (300 °C)<br>1,2 kg  | 19 cm <sup>3</sup> /(10 min) |
| <b>Índice de fluidez (ponderal)</b>        | ISO 1133               | (300 °C)<br>1,2 kg  | 20 g/(10 min)                |
| <b>Densidade</b>                           | ISO 1183               |                     | 1,2 g/cm <sup>3</sup>        |
| <b>Contração</b>                           | ASTM D-0955            |                     | 0,5-0,7%                     |

### 3.2) 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 3.3.

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 vibrarão 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 o estudo.

O processo de soldagem só foi possível com a construção deste dispositivo. Nas figuras 3.3 e 3.4 estão apresentadas duas vistas do dispositivo pronto para um ciclo de soldagem.

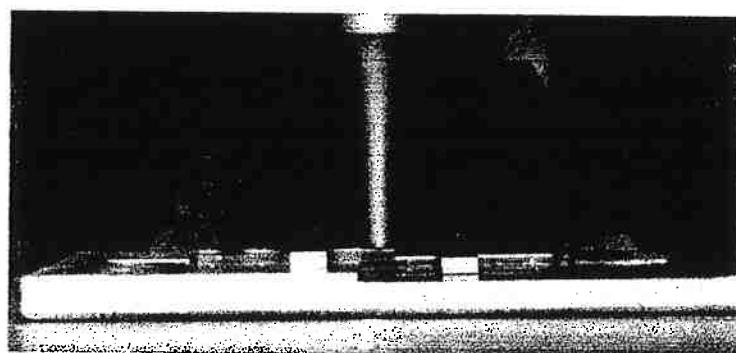


Figura 3.3 – Dispositivo criado para soldagem de polímeros por ultra-som (vista lateral).

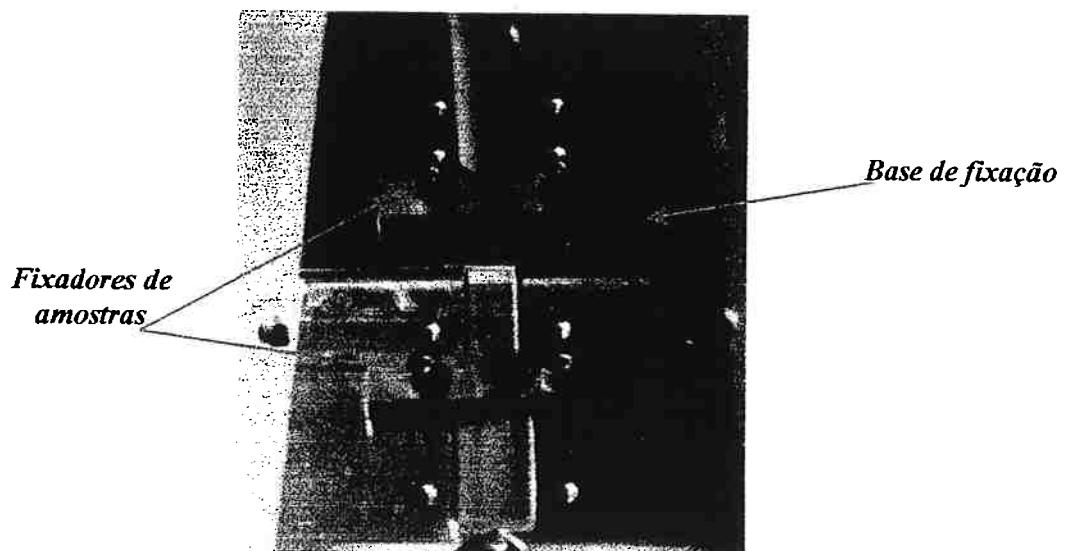


Figura 3.4 – Dispositivo de soldagem de polímeros por ultra-som (vista superior).

As amostras são fixadas neste dispositivo, soldada e retiradas para a análise. Como esquematizado na figura 3.4 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.

### 3.3) Adequação do sistema de ar comprimido:

Antes de colocar o equipamento de soldagem em operação foi necessário readequar o sistema de ar comprimido que fornece ar ao sistema pneumático da máquina. Tal necessidade ocorreu pelo fato do equipamento necessitar de ar com menos de 10% de umidade e isento de partículas maiores do que  $5 \mu\text{m}$ .

Assim foi necessário um estudo, a fim de descrever a extensão do problema, determinar alternativas para a solução deste, realizando-se cotações, a compra da solução e instalação da mesma.

Para a retenção da umidade e de impurezas efetuou-se a compra e a instalação de um sistema de tratamento de ar comprimido consistindo de: secador de ar, filtros coalescentes e um filtro em Y, que foram acoplados à rede de ar comprimido conforme figura 3.5, solucionando o problema.

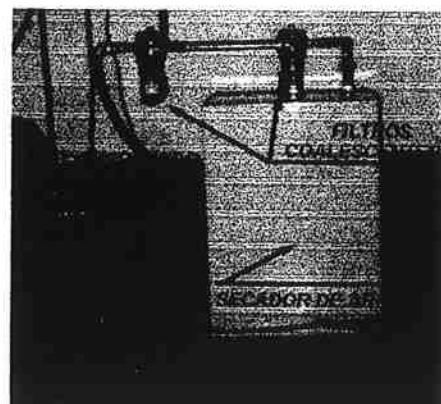


Figura 3.5 – Unidade de tratamento de ar comprimido instalado para uso no equipamento de soldagem.

### 3.4) Análise por ultra-som:

Um sistema de análise por ultra-som foi montado, onde as amostras de poli(metacrilato) de metila (PMMA), e policarbonato (PC) foram analisadas no sentido da obtenção dos dados acústicos destes materiais em função da direção de injeção na temperatura ambiente.

O equipamento de inspeção por ultra-som (que foi cedido por Adamovski [19]) consistindo de um transdutor e um osciloscópio acoplado a um sistema de aquisição de dados. O transdutor é o elemento que entra em contato com a superfície da amostra e emite ondas com freqüência ultra-sônicas, de 5 MHz. O osciloscópio é o responsável por apresentar os sinais e enviá-los para a placa de aquisição de dados. Na figura 3.6 é apresentado um esquema de todo o equipamento.

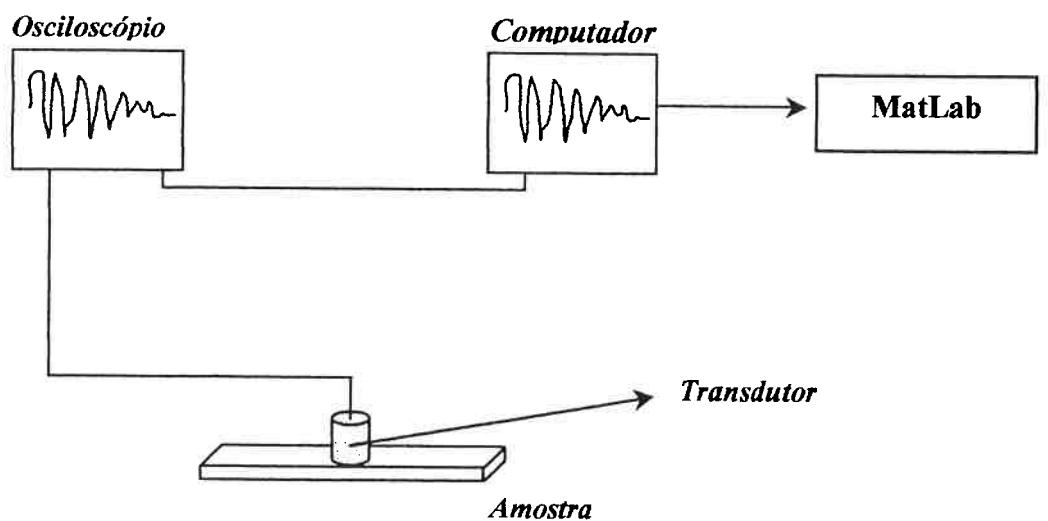


Figura 3.6 – Esquema do acoplamento utilizado no ultra-som.

Após a emissão da onda ela penetra a amostra e é refletida pela superfície inferior desta amostra. Porém esta reflexão ocorre com perda de amplitude da onda. Esta perda de amplitude, como citado anteriormente, é a atenuação acústica do

material. No equipamento tais dados aparecem no osciloscópio com uma curva semelhante à apresentada na figura 3.7.

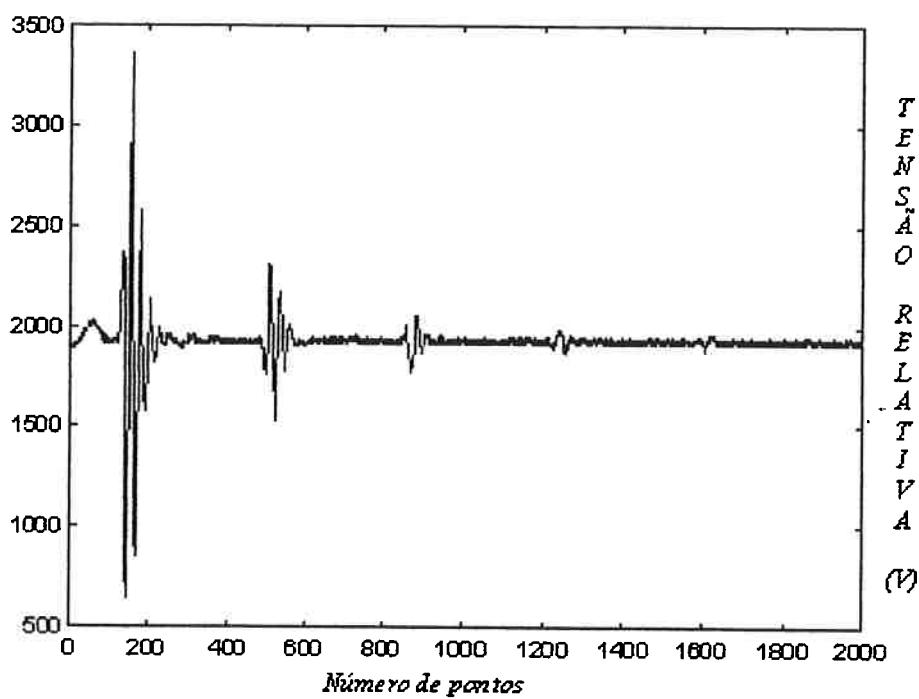


Figura 3.7 – Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som.

Os dados são obtidos em forma de sinais elétricos e fornecidos a uma placa de aquisição de dados que os armazena. Após este armazenamento, feito com o auxílio de um programa de computador (desenvolvido por [20]), os dados são passados para o programa MatLab a fim de tornar possível a obtenção das curvas, ou melhor, de parte das curvas (semelhantes às da figura 3.5) geradas na análise, e que aparecem no osciloscópio.

Porém a curva da figura 3.7 é obtida com dados da tensão relativa em função do número de pontos coletados. Esta tensão relativa é um dado relacionado a cada ponto coletado em função do primeiro sinal obtido. Assim, há a necessidade da conversão dos dados em tensão obtida de cada sinal em função do tempo relativo a cada ponto. Após este tratamento obtém-se a curva ilustrada na figura 3.8, onde a tensão relativa do transdutor é transformada obtendo-se a tensão real. Com o tratamento do número de

pontos em função do tempo em que os mesmos foram coletados obtém-se a curva da figura 3.9. Todo este tratamento é feito no programa MatLab.

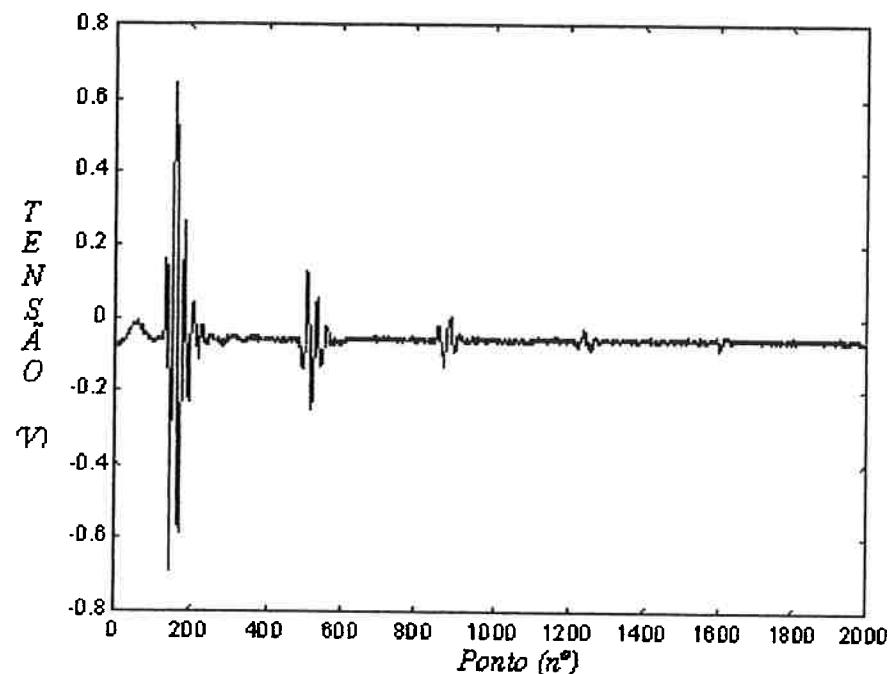


Figura 3.8 - Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som.

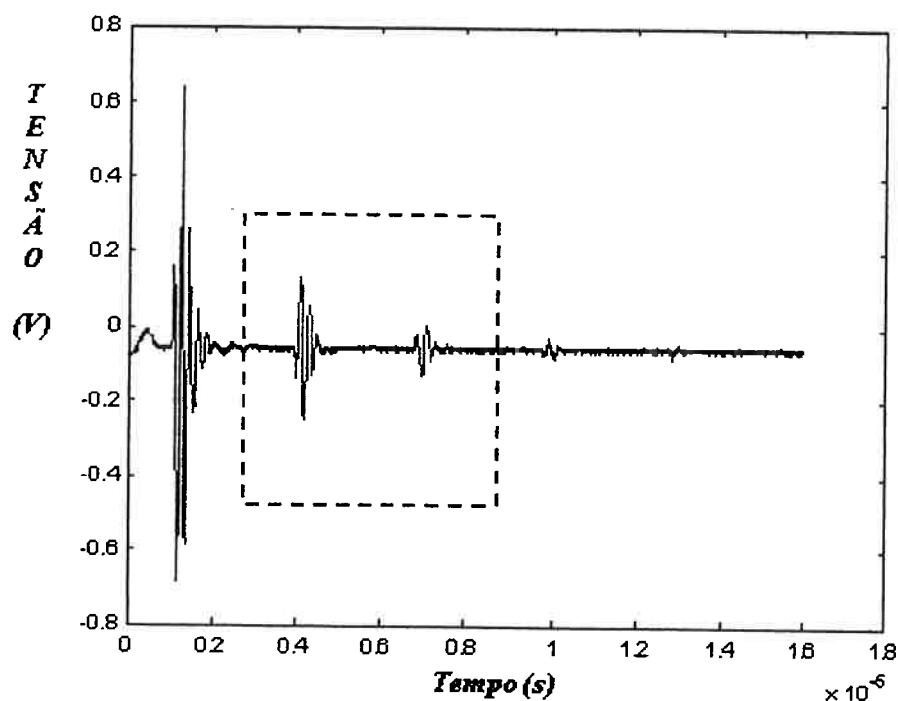


Figura 3.9 - Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som.

Como apresentado na figura 3.9, a ampliação da área hachurada é apresentada na figura 3.10 e é obtida solicitando-se ao programa MatLab que apresente o gráfico a seguir no intervalo de tempo solicitado.

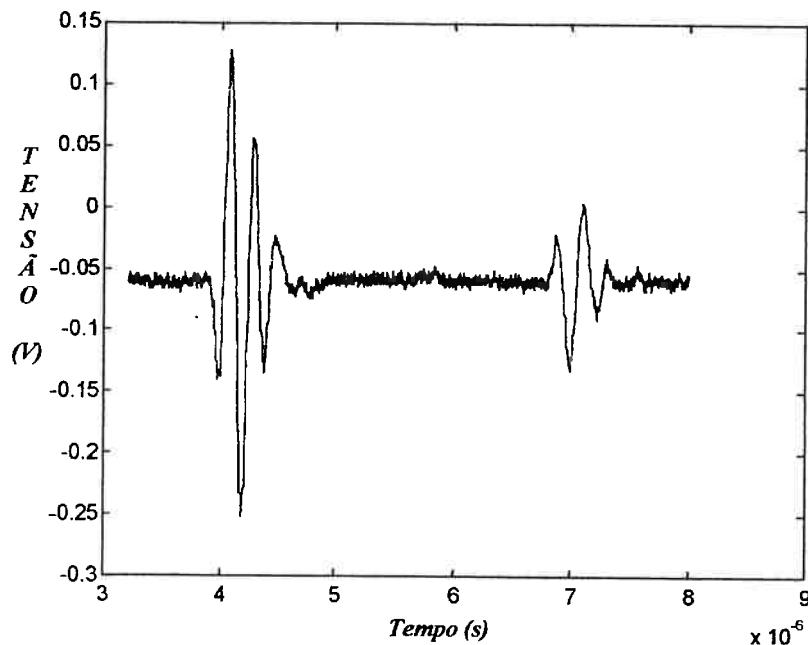


Figura 3.10 - Curva obtida com o auxílio de análise por ultra-som (ampliação da área hachurada da figura 3.9).

### 3.4.1) Cálculo de coeficiente de absorção ( $\alpha$ )

Para o cálculo do coeficiente de absorção utilizou-se os dados de atenuação acústica obtidos com as curvas dos materiais semelhantes as da figura 3.10 e com a utilização da equação 3.1. [21]

$$A = -20 \cdot \log\left(\frac{V_{rec}}{V_{env}}\right) \quad (3.1)$$

onde,

$A$  é a absorbância em dB;

$V_{rec}$  é voltagem recebida no ensaio de ultra-som;

$V_{env}$  é a voltagem enviada no ensaio de ultra-som.

Ainda a relação  $V_{\text{rec}}/V_{\text{env}}$  pode ser considerada como a atenuação acústica  $\beta$ , de forma que:

$$A = -20 \cdot \log(\beta) \quad (3.2)$$

Sabendo-se a distância  $t$  percorrida pela onda ultra-sônica e a absorbância é possível determinar o coeficiente de absorção  $\alpha$ , em dB/mm, conforme a equação 3.3. [4]

$$\alpha = \frac{\beta}{t} \quad (3.3)$$

### 3.5) Conjunto acústico para soldagem:

O único booster utilizado para o estudo tinha uma taxa de ampliação de 1,5. Entre os três tipos de sonotrodos apresentados na figura 2.7, utilizou-se o sonotrodo escalonado com uma seção retangular de 30,2 mm X 12,8 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.

### 3.6) Características geométricas dos corpos de prova:

Os corpos de prova obtidos por injeção como descrito no item anterior, para ambas as direções de injeção, têm as características geométricas ilustradas na figura 3.11, conforme norma ASTM D 638M.

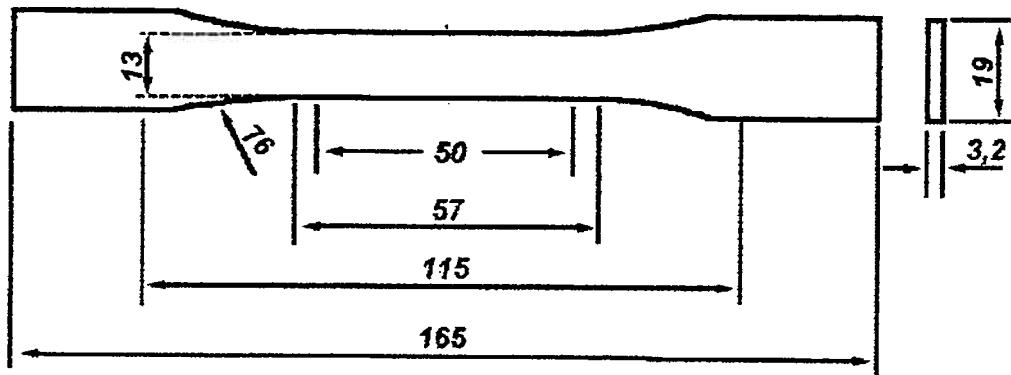


Figura 3.11- Características geométricas dos corpos de prova obtidos por injeção. [22]

### 3.7) Tipo de junta para a soldagem:

Tanto para a soldagem em PMMA quanto para a soldagem de PC foi determinada uma área de 12,8 mm X 30,2 mm que foi submetida à soldagem para a obtenção de uma junta sobreposta, como ilustra a figura 3.12.

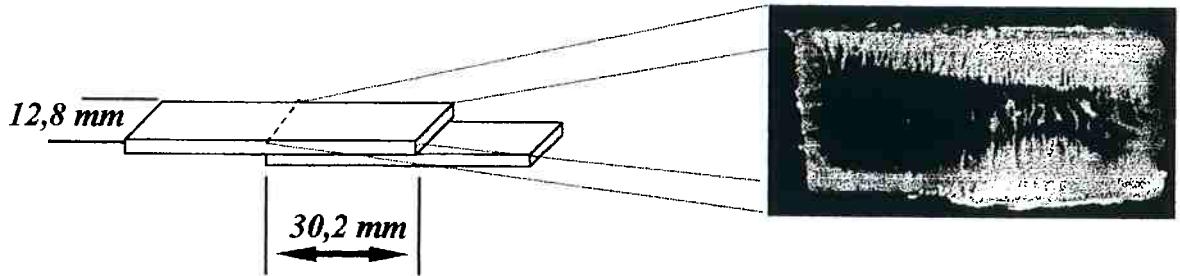


Figura 3.12 – Junta sobreposta determinada para a soldagem.

### 3.8) Determinação de área em PMMA:

A determinação da fração de área soldada no PMMA foi feita obtendo-se imagens da área submetida à solda. 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 3.13.

A análise foi feita contando-se o número de pixels preto e branco existentes na figura com o auxílio do programa Image Tool [23]. Os resultados obtidos estão apresentados no próximo capítulo.

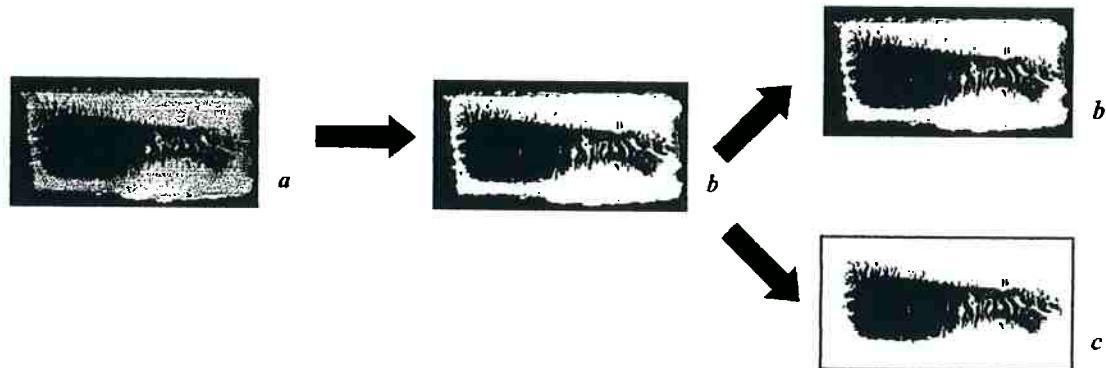


Figura 3.13 – Esquematização para cálculo de área soldada em PMMA.

Nesta figura obtém-se a imagem como ilustrada na figura *a*, depois a imagem é passada para tons monocromáticos como na figura *b*, e convertida em um negativo como na figura *c*, sendo posteriormente quantificadas as áreas em função dos tons preto e branco.

A quantificação é feita conforme equação 3.4.

$$\%AS = \frac{\%AB}{\%AB + \%AN} \quad (3.4)$$

onde

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

$\%AB$  = é a área branca correspondente à figura 3.9b;

$\%AN$  = é a área negra correspondente à figura 3.9c.

### 3.9) Corpos de prova:

#### 3.9.1) Obtenção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram injetados em uma matriz de injeção que possibilitou a obtenção dos corpos de prova em função das diferentes direções de injeção.

##### 3.9.1.1) Injetora

Para o manuseio da injetora se faz necessário um rápido treinamento, com leitura de catálogos técnicos sobre o seu funcionamento e acompanhamento do seu funcionamento. A partir disso foi possível injetar os polímeros.

O processo de injeção foi realizado numa máquina de injeção DEMAG ERGO TECH PRO 35-115 apresentada na figura 3.14. O molde de injeção continha os dois tipos de corpos de prova a serem pesquisados, obtidos pela diferença da direção de injeção.

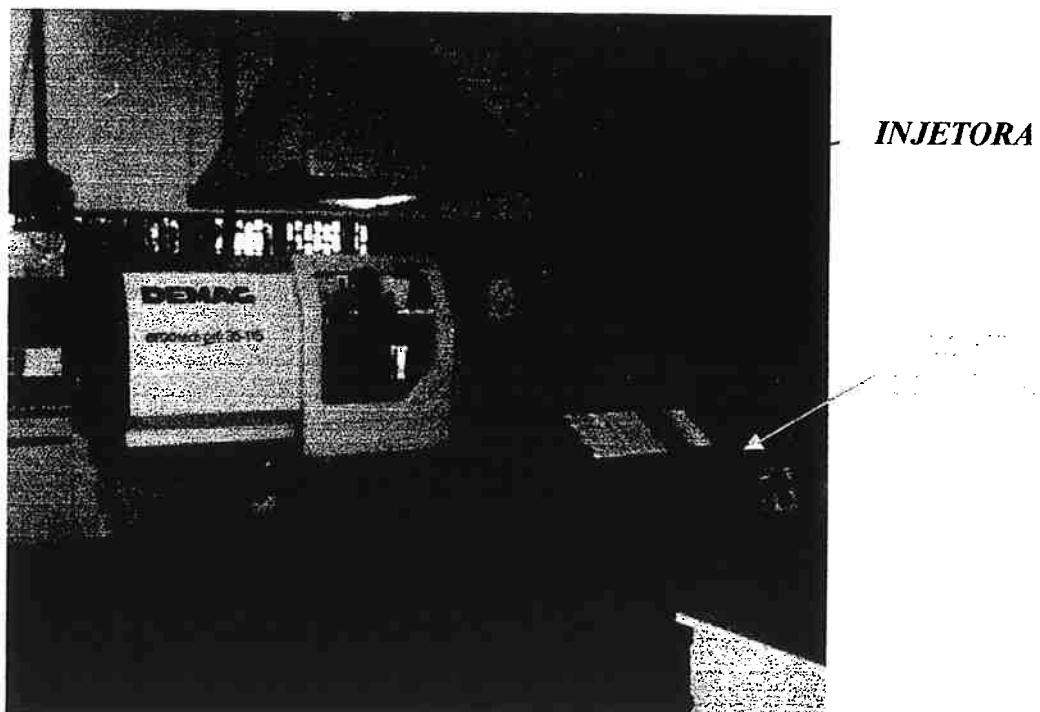


Figura 3.14 – Máquina injetora e equipamentos.

O processo de injeção pode ser dividido em cinco partes: entrada do material na rosca; aquecimento do material; injeção do fundido no molde; resfriamento da peça; e retirada da peça [24]. A injetora utilizada tem um parafuso reciproco para a injeção do polímero. Sua função é fundir e misturar o material.

O plástico sólido (conhecido por "pellets") é levado à rosca onde há zonas de aquecimento que fundem o plástico. Na injetora utilizada existem quatro zonas de aquecimento. As temperaturas são crescentes na direção de injeção, ou seja, na zona 1 a temperatura é menor do que na zona 2; na zona 2 menor do que na 3 e na zona 3 menor do que na 4.

Como cada polímero tem temperaturas de transição vítreia e de fusão diferentes, as temperaturas de cada zona são características dos mesmos. Na zona 1, denominada por zona de entrada, o polímero sólido sofre o primeiro gradiente de temperatura. A zona 2, conhecida por zona de homogeneização, tem por função homogeneizar o fundido. A zona 3 , conhecida por zona de plastificação, tem por função garantir que o polímero estará no estado viscoso. Na zona 4, a zona de injeção, tem-se a temperatura de injeção, que é a temperatura na qual o fundido entrará no molde.

Esta temperatura é importante, pois é a determinante na injeção de todo o fundido no molde, visto que o mesmo tem que se encontrar acima da temperatura de fusão. Depois de fundido o material converge e flui através de um bocal o qual o leva até o molde.

A injeção do fundido no molde ocorre a altas pressões. O parafuso gira e é movimentado axialmente, na direção de injeção, através de comandos hidráulicos. Essa movimentação aplica pressão ao fundido que é injetado no molde, durante um tempo designado por tempo de injeção. Essa pressão é conhecida por pressão de injeção.

Após a injeção o plástico fundido é mantido sob altas pressões dentro do molde durante um tempo de espera. Durante esse tempo para que o fundido não tome direção

contrária à de injeção é aplicada uma pressão de recalque. Além disso, é aplicada uma quantidade adicional de polímero no molde para evitar contração devido ao resfriamento e à solidificação.

O próximo passo é o resfriamento do fundido dentro do molde. Assim o parafuso e o molde ficam um intervalo de tempo sem se movimentar. Esse intervalo de tempo é chamado de tempo de resfriamento. Durante esse tempo o parafuso continua aplicando a pressão de recalque. A temperatura do molde é controlada por um trocador de calor (soft control na figura 3.14) que injeta um refrigerante a uma determinada temperatura nas paredes do molde.

Após essa etapa, o parafuso se movimenta em sentido contrário ao da injeção, sendo preenchido pelo polímero no estado sólido. O fundido remanescente é acomodado em um espaço cilíndrico na frente do parafuso que é criado pelo seu movimento axial para trás. O molde se abre, e um extrator empurra a peça obtida para fora do molde. O molde se fecha e reinicia-se um novo ciclo de injeção.

Assim as principais variáveis do processo de injeção são:

- As temperaturas do cilindro (zonas de aquecimento);
- As pressões de injeção e de recalque;
- Os tempos de injeção, de espera, e de resfriamento;
- Temperatura do molde.

Os valores das variáveis de injeção utilizadas para a obtenção dos corpos de prova estão alocadas nas tabelas 3.3 para o PMMA, e 3.4 para o PC.

**TABELA 3.3  
VALORES PARA INJEÇÃO DE PMMA**

| <i>Parâmetros de injeção</i>          | <i>Valores</i> |
|---------------------------------------|----------------|
| Pressão de injeção                    | 160 atm        |
| 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          |

**TABELA 3.4  
VALORES PARA A INJEÇÃO DE PC**

| <i>Parâmetros de injeção</i>          | <i>Valores</i> |
|---------------------------------------|----------------|
| Pressão de injeção                    | 180 atm        |
| Velocidade de injeção                 | 65 cm/s        |
| Tempo de injeção                      | 6,0 s          |
| Pressão de recalque                   | 80 atm         |
| Tempo de espera                       | 5,0 s          |
| Tempo de resfriamento                 | 5,0 s          |
| Temperatura da zona de entrada        | 240 °C         |
| Temperatura da zona de homogeneização | 250 °C         |
| Temperatura da zona de plastificação  | 260 °C         |
| Temperatura da zona de injeção        | 250 °C         |
| Temperatura do molde                  | 85 °C          |

### 3.9.1.2) Direção de injeção

A direção de injeção é um outro parâmetro de interesse no sentido da descrição da mudança da soldabilidade, como já descrito. Em relação à direção de injeção foram analisadas as mudanças dos valores de área soldada nas amostras submetidas à soldagem.

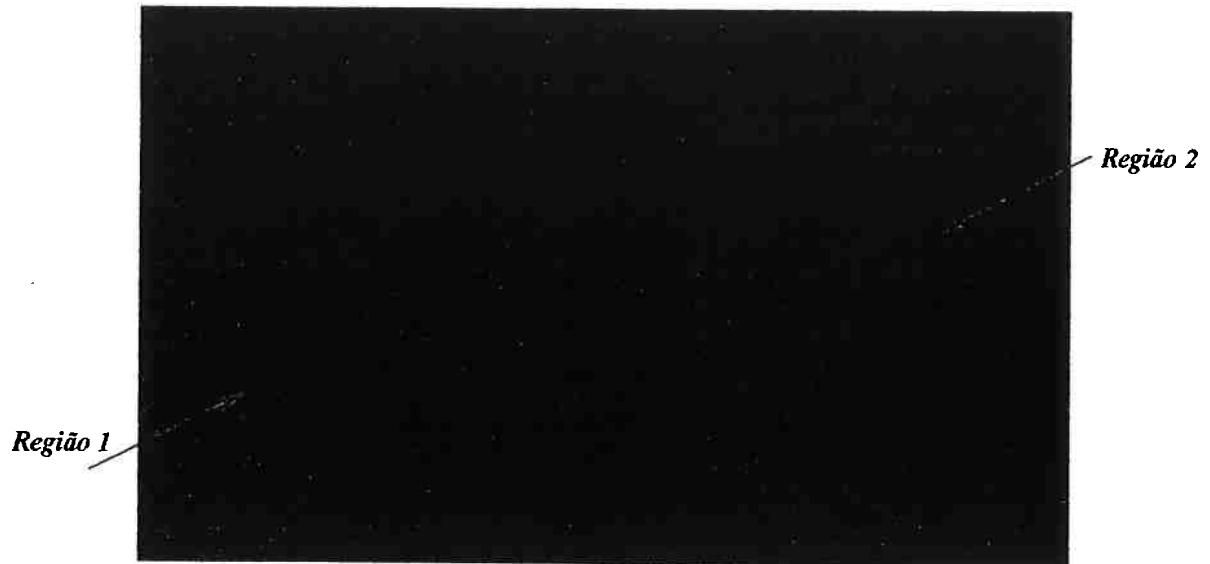


Figura 3.15 – Direções de injeção nos corpos de prova para estudo.

Os corpos de prova foram injetados em duas direções: na direção paralela ao ensaio de tração; e na direção transversal ao ensaio de tração. Os corpos de prova que tem a direção de injeção paralela ao ensaio de tração são injetadas na região 1 da figura 3.15, denominados por direção horizontal (H), e os corpos que tem direção transversal são injetados na região 2 da mesma figura, denominados por direção vertical (V).

Na direção horizontal as macromoléculas estão arranjadas de maneira mais ordenada, na direção do fluxo de injeção, tendendo a um escoamento laminar. Assim quando o material fundido preenche o molde este tem uma direção definida das macromoléculas em quase todas regiões do corpo injetado. Já na direção vertical elas têm um grau de orientação menor, pelo fato do fluxo encontrar uma barreira logo após entrar no molde, uma das paredes do molde, que gera um escoamento mais turbulento no interior deste.

### 3.10) Método para determinação de ciclos de temperatura durante a soldagem:

Foi elaborado um método para a determinação de ciclos de temperatura durante a soldagem das amostras de PMMA e PC, denominados por ciclos térmicos de soldagem.

Inicialmente foi necessário determinar-se às regiões submetidas à junção que seriam interessantes para a obtenção de dados referentes às temperaturas durante a soldagem. Para a obtenção de tais dados foram determinados oito pontos estratégicos, para o mapeamento da superfície submetida à junção e da amostra em função de sua espessura. Tal mapeamento pode ser analisado na figura 3.16.

Na tabela 3.5 os pontos coloridos da figura 3.16 estão com as indicações e com os valores nos respectivos eixos coordenados ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) em função do ponto zero ( $0, 0, 0$ ).

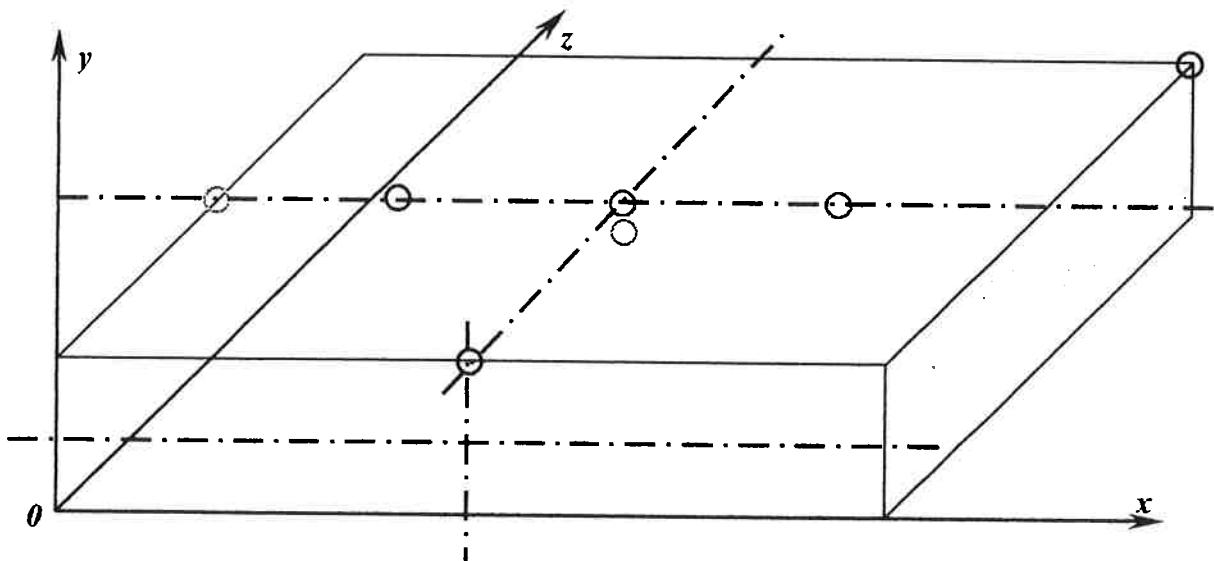


Figura 3.16 – Pontos de coleta de dados de temperatura durante a junção.

**TABELA 3.5**  
**POSIÇÕES DOS PONTOS PARA A OBTENÇÃO DOS DADOS DE**  
**TEMPERATURA**

| Ponto | Cor do ponto | Valor em x<br>(mm) | Valor em y<br>(mm) | Valor em z<br>(mm) |
|-------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A     |              | 0,00               | 3,28               | 6,57               |
| B     |              | 7,55               | 3,28               | 6,57               |
| C     |              | 15,10              | 3,28               | 6,57               |
| D     |              | 15,10              | 3,28               | 0,00               |
| E     |              | 22,60              | 3,28               | 6,57               |
| F     |              | 30,20              | 3,28               | 13,14              |
| G     |              | 15,10              | 2,46               | 6,57               |
| H     |              | 15,10              | 1,64               | 6,57               |

Com a determinação dos pontos foi necessário furar os pontos G e H, pois os mesmos foram os únicos que estavam alocados no interior dos corpos de prova e fora da superfície de junção. Sendo assim montou-se um aparato (figura 3.17) que facilitaria a execução destes furos, que deveriam ter um diâmetro relativamente pequeno para não interferir no fluxo de calor entre a amostra e o termopar do tipo K com diâmetro de 0,2 mm.

Sendo assim, o aparato teria dois furos guias feitos em um suporte de acrílico para facilitar o acompanhamento da furação. Estas guias estão indicadas na figura 3.17 pelos círculos vermelhos.

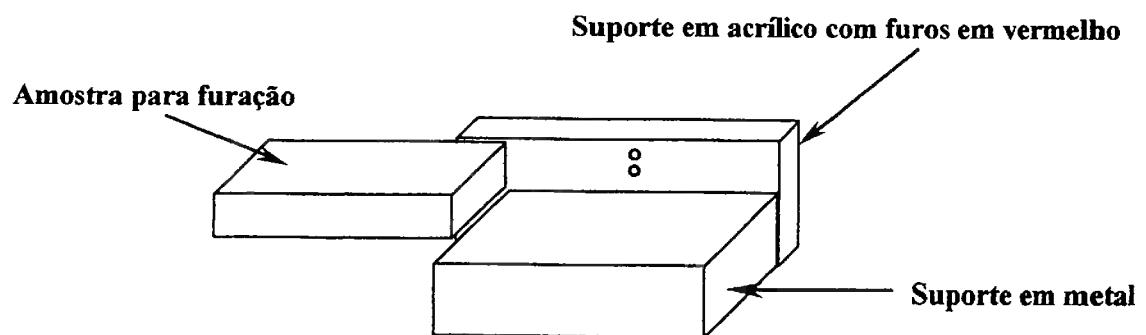


Figura 3.17 – Aparato para furação das amostras.

Inicialmente tentou-se fazer furos com 0,2 mm de diâmetro utilizando brocas especiais, porém o furo era muito pequeno para a passagem do fio do termopar e no caso do PMMA o furo se fechava após a retirada da broca.

Em uma segunda tentativa foram feitos furos com 0,5 mm de diâmetro, os quais mostraram-se suficientemente grandes para a passagem do fio para o termopar. No caso do PMMA, para este diâmetro de broca, os furos não se fechavam permitindo a passagem do fio.

A segunda etapa seria montar os termopares utilizando-se fios de Cromel (que tem polaridade positiva) e Alumel (que tem polaridade negativa). Desta forma, foi necessário soldar as pontas de dois fios com polaridade diferente para a obtenção de oito termopares. Tal soldagem era feita utilizando um sistema de capacitores que depois de solicitados descarregavam a carga desejada nas pontas dos dois fios.

Após a colocação dos termopares no interior da amostra, tais furos eram fechados com uma resina epoxídica que garantiu o fluxo de calor da amostra para o termopar.

Além do mais, os termopares teriam que obter os dados de temperatura nos pontos desejados, nunca antes ou depois, ou seja, eles deveriam estar em contato físico no ponto desejado.

Todo este cuidado deve ser tomado, pois os termopares tomam as medidas de temperatura no primeiro ponto de contato entre os fios. Assim, a solda era feita na ponta dos fios certificando-se que durante a aquisição dos dados de temperatura o termopar não estaria coletando dados de outro ponto a não ser o desejado.

Em seguida os termopares foram isolados com uma capa termo-retrátil de polietileno modificado, que quando aquecido diminuía de tamanho, isolando os fios dos termopares a fim de evitar contato com a mesa do equipamento de soldagem de plásticos, evitando-se medidas errôneas de temperaturas e o curto do equipamento de

soldagem e de aquisição de dados. Mesmo com esse isolamento foi necessário deixar um comprimento de 1 cm sem isolamento na ponta dos dois fios para a soldagem dos mesmos e colocação no pontos ilustrados na figura 3.16.

A terceira etapa era a instalação da placa de aquisição de dados INTERDATA [25]. Com a instalação da placa houve a necessidade de instalação de um amplificador dos sinais dos termopares, que por sua vez foi conectado a placa que está no computador. Sendo assim, montou-se um sistema semelhante ao da figura 3.18.

A última etapa consistia em alocar os termopares nos pontos determinados na tabela 3.5 e fixa-los na mesa de forma que não houvesse nenhuma movimentação durante a soldagem das amostras, evitando que ocorresse mudança de posicionamento dos termopares. Desta forma, a figura 3.19 ilustra o formato final da junta com os termopares antes da soldagem, e a figura 3.20 durante a junção.

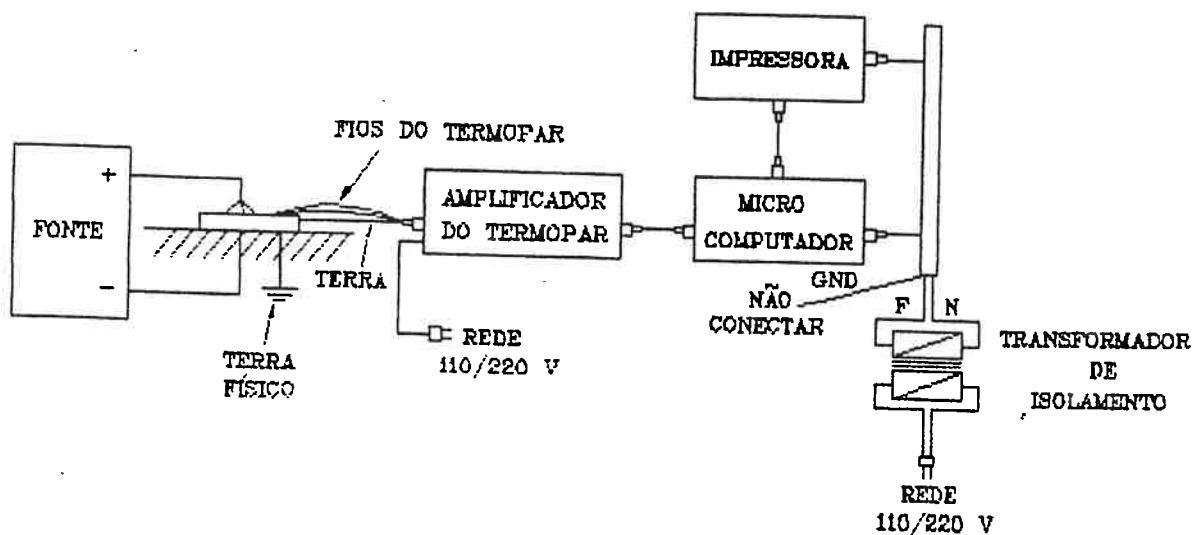


Figura 3.18 – Esquematização de montagem de sistema de aquisição de dados [3].

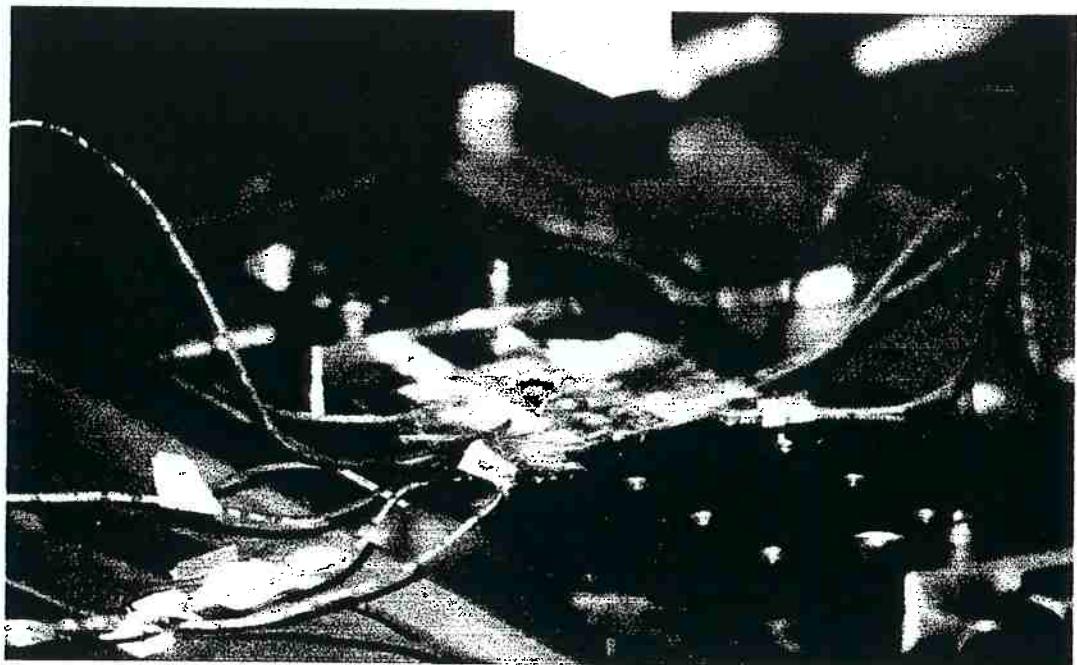


Figura 3.19 – Ilustração da junta com termopares antes da junção.

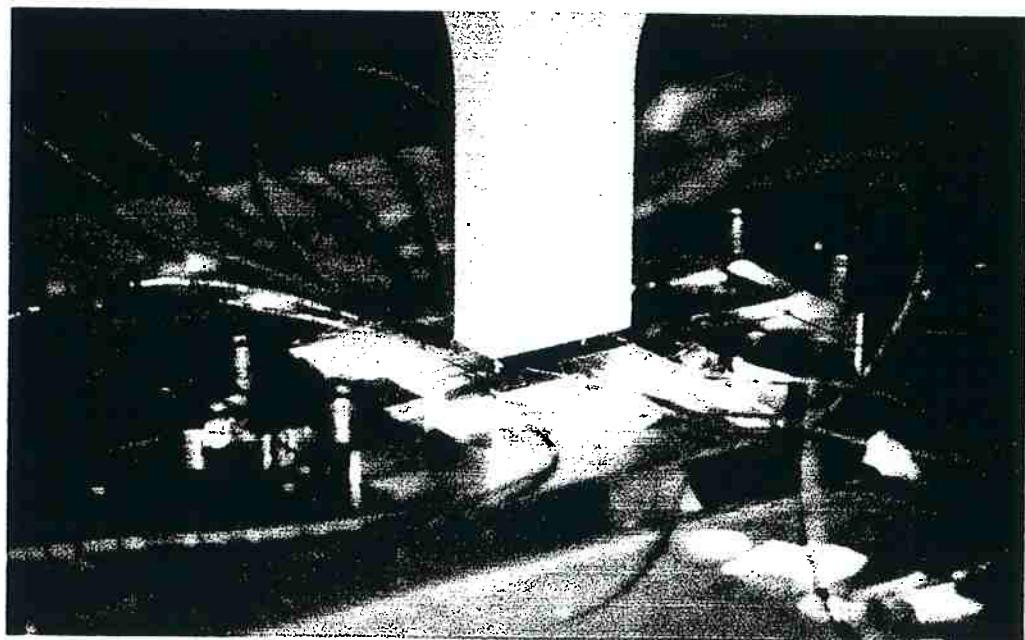


Figura 3.20 – Ilustração da junta com termopares durante a junção.

Após todo este procedimento foram determinados seis pares de parâmetros em função da pressão de junção e do tempo de junção, sendo que para cada par destes

parâmetros foram analisadas três amostras a fim da obtenção da temperatura média de cada ponto de coleta e de seu respectivo erro padrão.

Os pares de parâmetros foram utilizados tanto para o PMMA quanto para o PC na tentativa de comparar o comportamento destes materiais sem a variação de incógnitas que atuam diretamente na quantidade de área soldada, temperaturas durante o ciclo de soldagem, os quais foram interesses deste estudo.

## 4) RESULTADOS

Neste item estão apresentados todos os resultados obtidos no decorrer da pesquisa. A discussão de cada um dos resultados estará reservada ao próximo capítulo deste trabalho.

### 4.1) Análise Microscópica:

Neste item serão ilustradas as microestruturas dos polímeros previamente soldados. Estas microestruturas foram obtidas através de fratura criogênica e análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises foram feitas somente em PMMA para a comprovação do fenômeno de soldagem gerando mudanças óticas na região de junção.

Para o PC não foi analisada a junta microscopicamente, pois o tipo estudado é transparente e sofreu as mesmas mudanças óticas, percebidas no PMMA, na região de junção. Desta forma, tomou-se que as regiões onde ocorreu ou não a soldagem no PMMA são iguais as do PC em função de uma análise macroscópica semelhante.

#### 4.1.1) Microestruturas do PMMA

As microestruturas obtidas para o PMMA são muito interessantes e comprovam que a região onde a interface fica opaca, perdendo propriedades óticas como a transparência, ocorreu a soldagem. Enquanto que a região onde a interface continua transparente, não houve a soldagem.

As figuras 4.1 (a), 4.1 (b), e 4.2 apresentam a junta de PMMA, soldada à pressão de 15 psi, tempo de soldagem de 0,450 s e tempo de espera de 0,200 s.

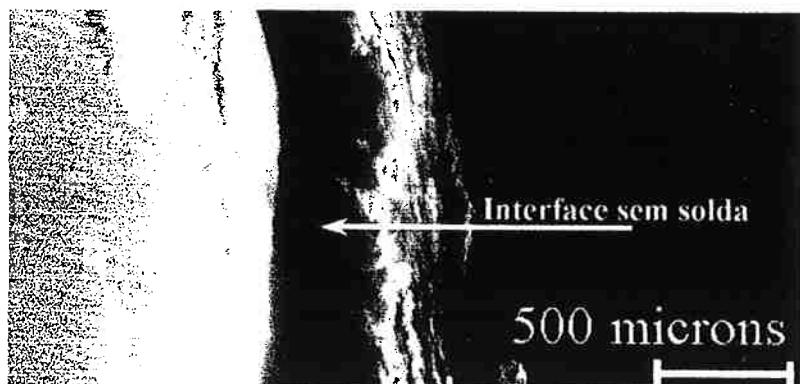


Figura 4.1 (a) – Microestrutura de uma junta de PMMA onde ocorreu a junção (análise no MEV com aumento de 100 X).

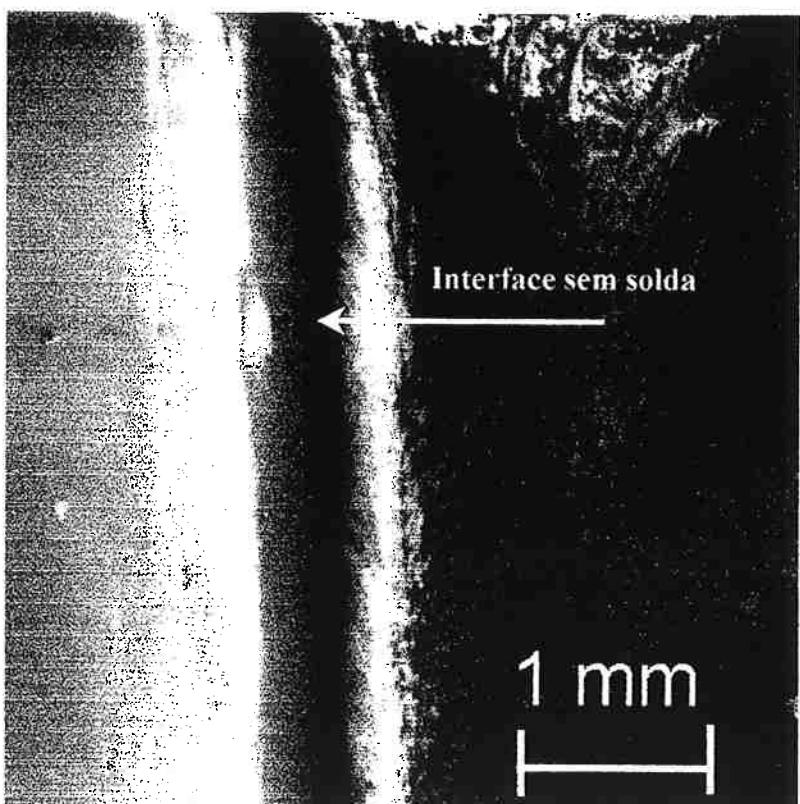


Figura 4.1 (b) – Microestrutura c  
uma junta de PMMA onde nã  
houve a soldagem analisada n  
MEV (aumento de 42 X).

Para entender tal fenomologia as morfologias obtidas em função do caráter de soldagem das juntas, monta-se um esquema na figura 4.2, onde há três micrografias distintas da área submetida à soldagem.

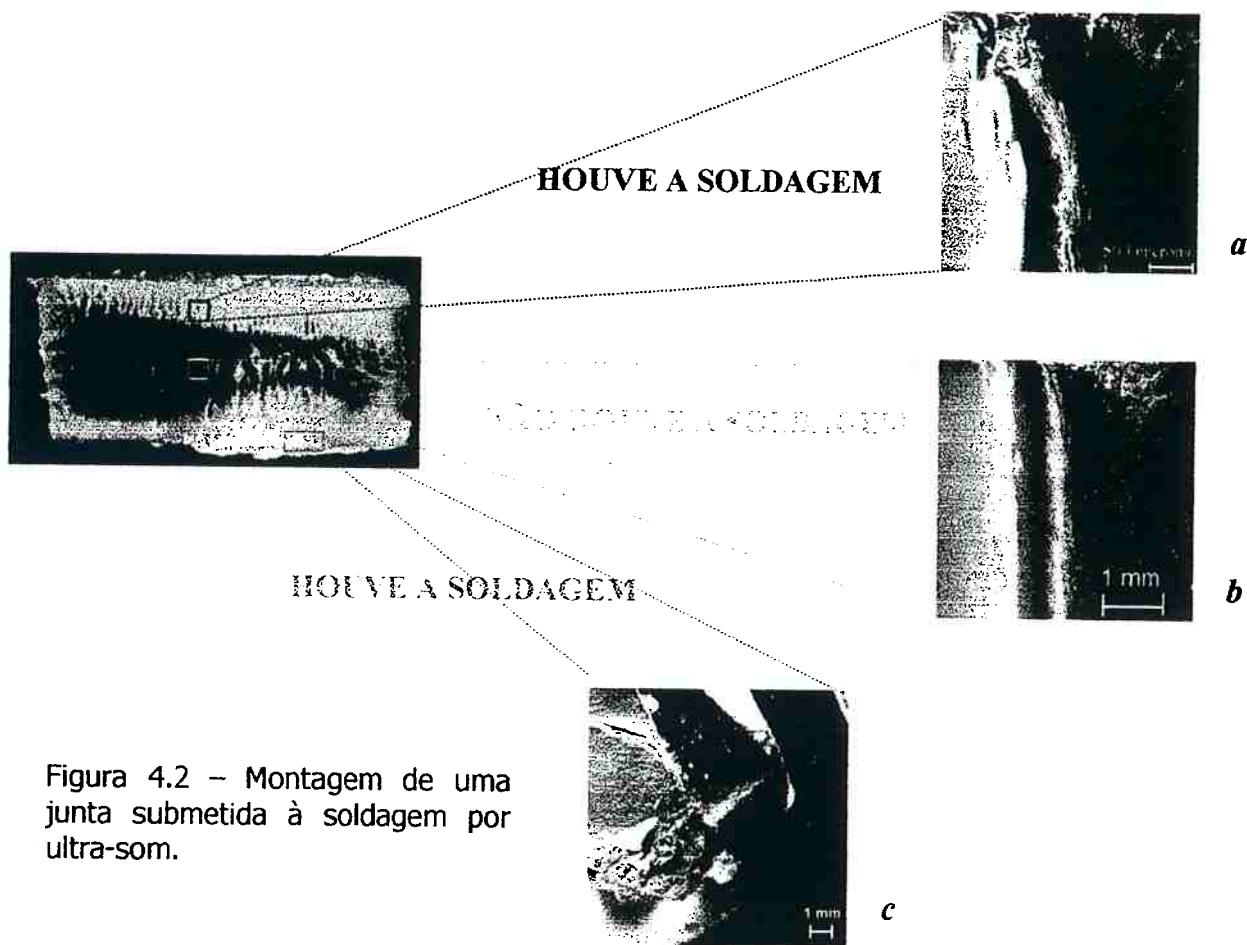


Figura 4.2 – Montagem de uma junta submetida à soldagem por ultra-som.

Com a montagem da figura 4.2 é possível perceber os três tipos de micrografias de junção possíveis de serem obtidas no PMMA.

#### 4.2) Diagramas de soldabilidade de PMMA:

Os diagramas de soldabilidade para o PMMA foram obtidos em função dos parâmetros do processo, já determinados, e das direções de injeção das amostras. A figura 4.4 ilustra a curva de soldabilidade para os corpos de prova independentemente

das direções de injeção. As curvas tracejadas vermelhas indicam a janela operacional onde a soldagem foi percebida sem a ocorrência de problemas na junta.

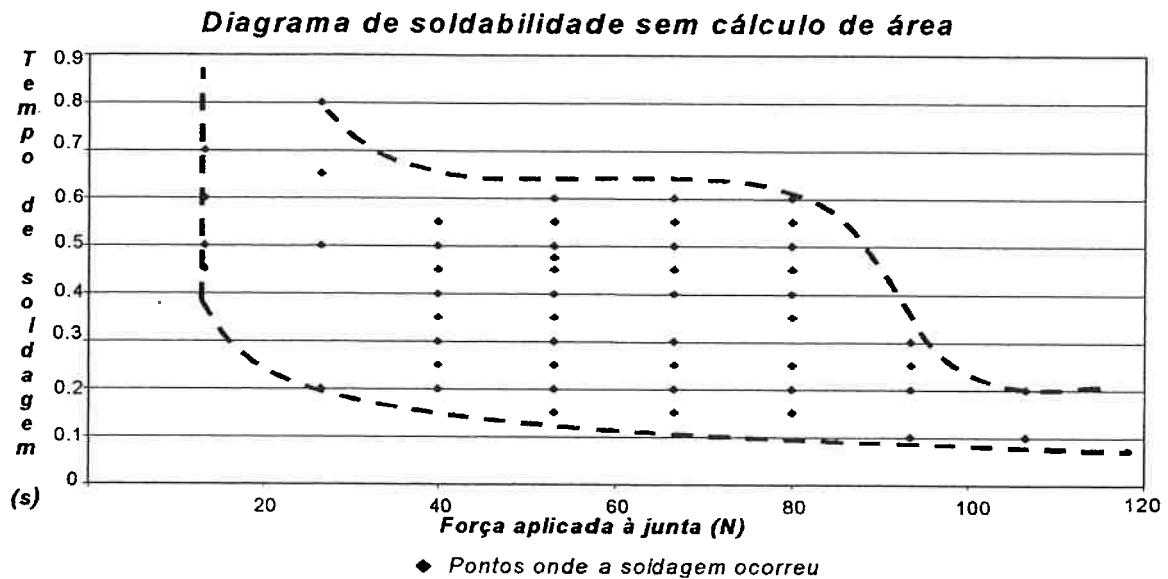


Figura 4.3 - Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PMMA na direção H e V.

As regiões externas às linhas vermelhas na figura 4.3 tem dois significados. Dentro do intervalo entre as linhas tracejadas vermelhas ocorreu a soldagem sem a ocorrência de problemas na junta.

Fora deste intervalo percebe-se que houve problemas de soldagem. Entre os problemas que podem ocorrer na junta estão os seguintes: escorregamento da superfície de junção; expulsão de material pela junta; e quebra do corpo de prova na região de junção na área à direita da curva tracejada superior. Além destas falhas pode ocorrer a falta de solda nas regiões à esquerda da curva tracejada inferior. Tais ocorrências estão ilustradas nas figuras 4.6 a 4.9.

As curvas obtidas nas figuras 4.4 e 4.5 estão em função das áreas médias soldadas obtidas. As cores das curvas são referentes a pontos de mesma cor, que tem as suas porcentagens de área indicadas na respectiva legenda. A figura 4.4 para a direção horizontal e a figura 4.5 para a direção horizontal. Nestas curvas os pontos apresentados

correspondem ao logaritmo da pressão aplicada numa junta com as dimensões da figura 3.11 com os respectivos tempos de soldagem.

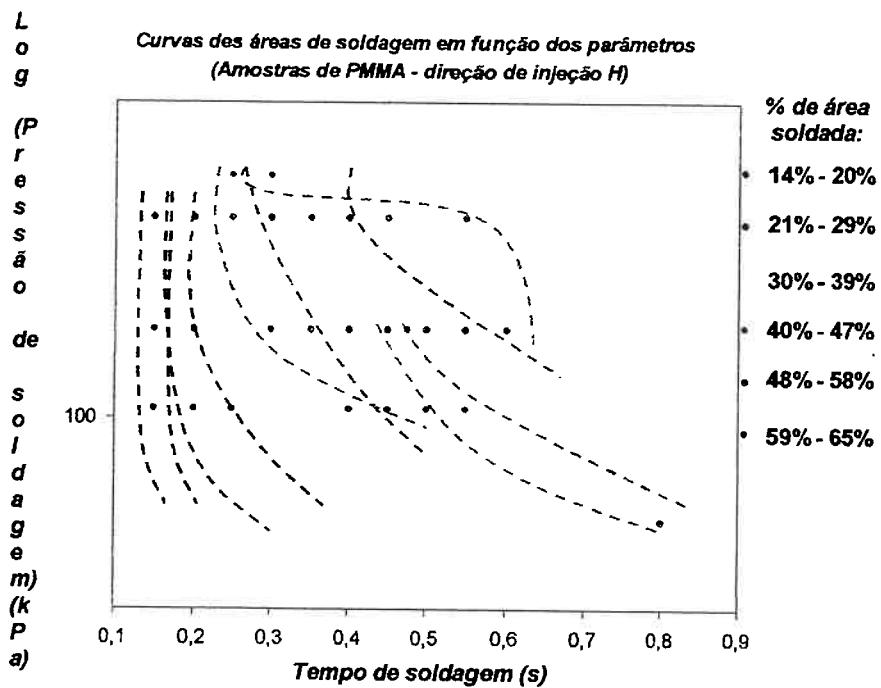


Figura 4.4 - Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PMMA na direção H.

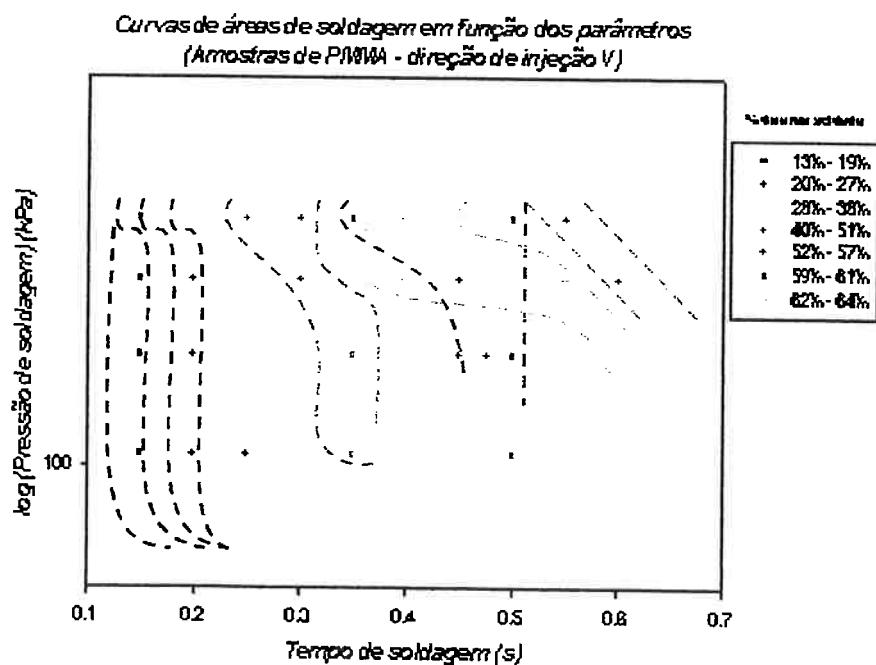


Figura 4.5 - Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PMMA na direção V.

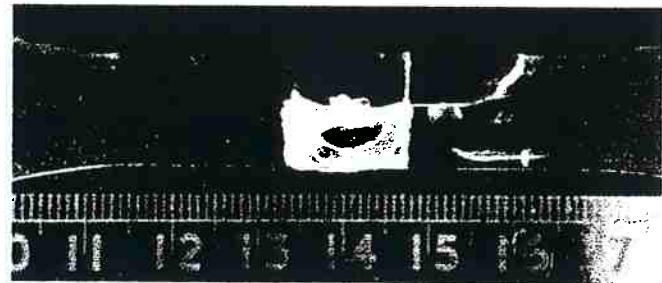


Figura 4.6 – Falha devido a escorregamento da junta implicando em fratura da mesma.

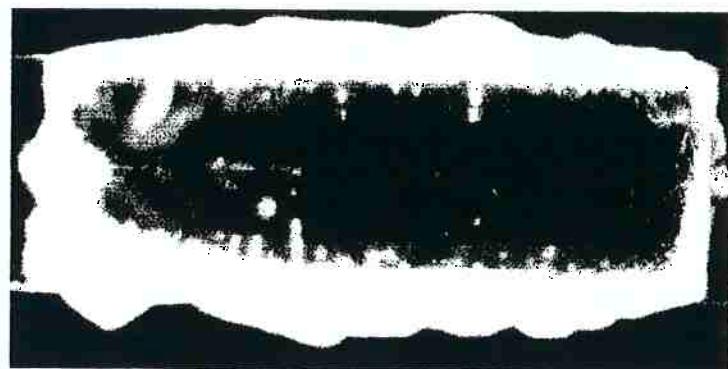


Figura 4.7 – Expulsão de material pela junta.

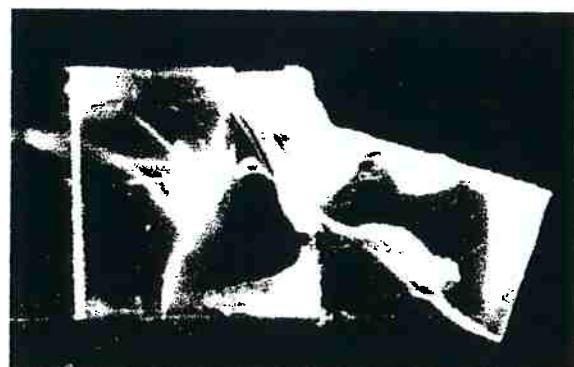


Figura 4.8 – Fratura do corpo de prova na área submetida à juncção

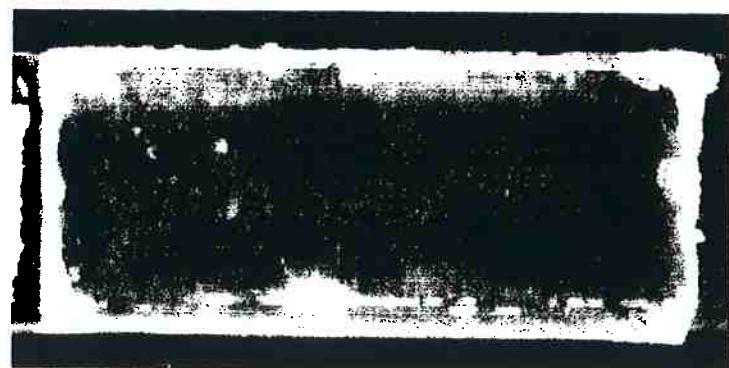


Figura 4.9 – Junta com falta de solda.

#### 4.3) Diagramas de soldabilidade de PC:

As figuras 4.10 e 4.11 apresentam os diagramas de soldabilidade para as amostras de PC em função das direções de injeção H e V. Nestes gráficos estão descrevidas regiões onde se obtém as quantidades de áreas soldadas conforme apresentando nas legendas. Os dados estão plotados em função do tempo de soldagem e do logaritmo da pressão de soldagem.

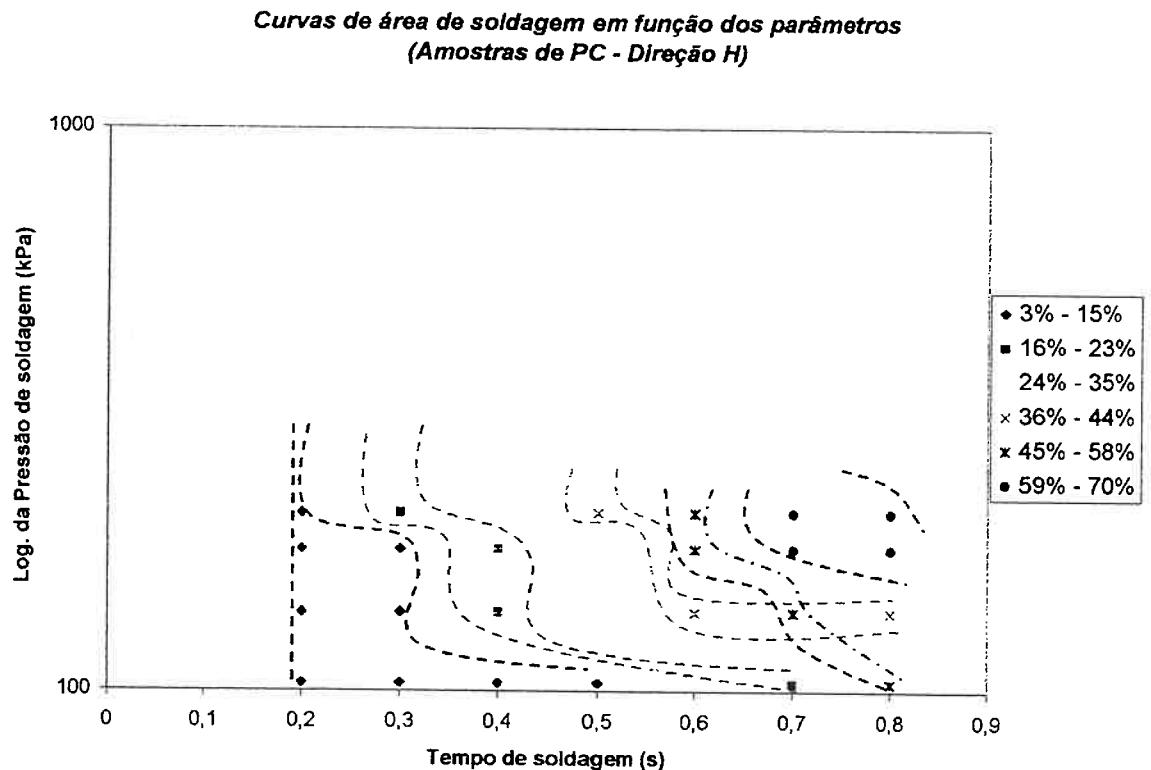


Figura 4.10 - Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PC na direção H.

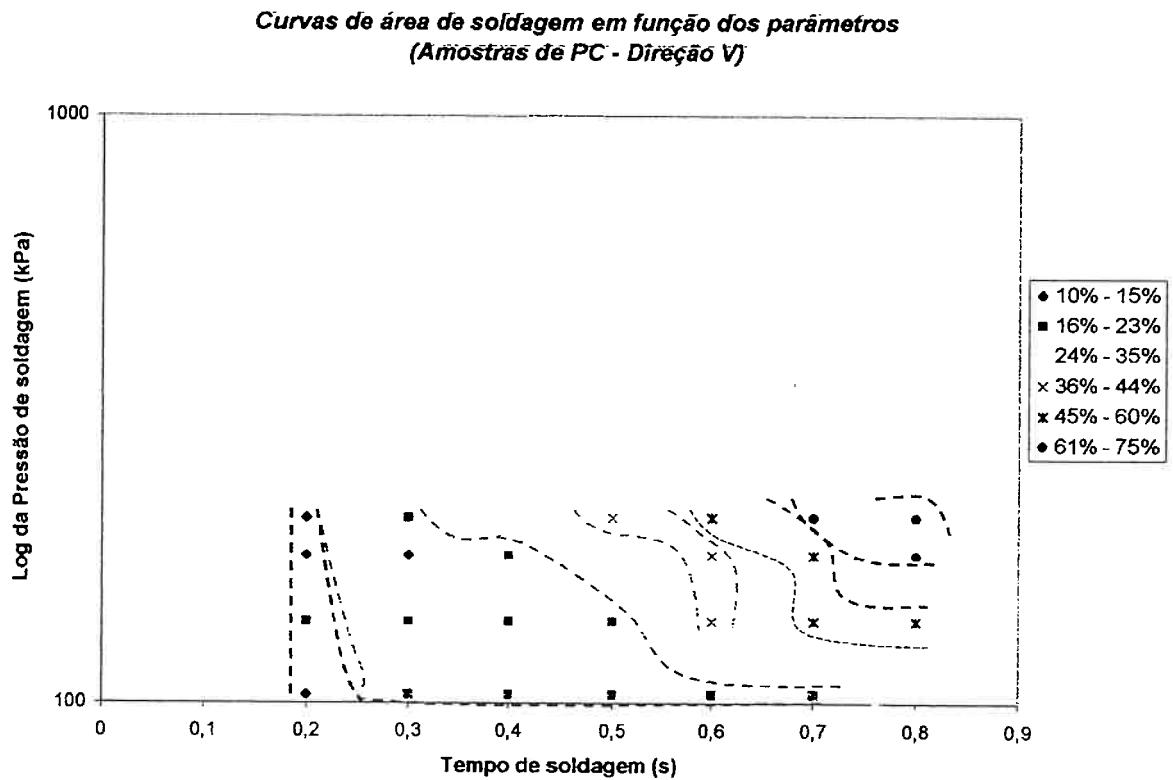


Figura 4.11 - Diagrama de soldabilidade com os pontos onde a soldagem ocorreu para as amostras de PC na direção V.

#### 4.4) Ensaios mecânicos:

Foram realizados ensaios de tração em amostras de PMMA sem solda e ensaios de cisalhamento em amostras de PMMA previamente soldadas.

No ensaio de tração os resultados foram diferentes do previsto pelo fornecedor do material, pois a resistência à tração e a deformação do material foram menores do que aquelas esperadas. Os valores obtidos pelo fornecedor e os valores que foram obtidos no estudo estão apresentados na tabela 4.1.

**TABELA 4.1**  
**VALORES DE RESISTÊNCIA NO PMMA.**

|                            | <i>Resultado esperado</i> | <i>Resultado alcançado</i>   |
|----------------------------|---------------------------|--|
| Resistência à tração (MPa) | 80,0 <sup>1</sup>         | $50,2 \pm 0,4$ <sup>2</sup> (1)<br>$47,5 \pm 1,1$ <sup>2</sup> (2) |
| Deformação na ruptura (%)  | -                         | $19,0 \pm 2,1$ <sup>2</sup>  |
| Alongamento (%)            | 6,0 <sup>1</sup>          | $1,7 \pm 0,7$ <sup>2</sup>   |

<sup>1</sup> - Conforme a Comp. Química Metacril<sup>(11)</sup>;

<sup>2</sup> - Resultados com erro padrão;

(1) - Resultado da tensão de escoamento;

(2) - Resultado da tensão de ruptura.

A curva tração versus deformação para o conjunto de cinco corpos de prova de PMMA testados conforme norma ASTM D 638 M, obtidos por injeção na direção H está apresentada na figura 4.12.

**Curva tensão X deformação no PMMA**

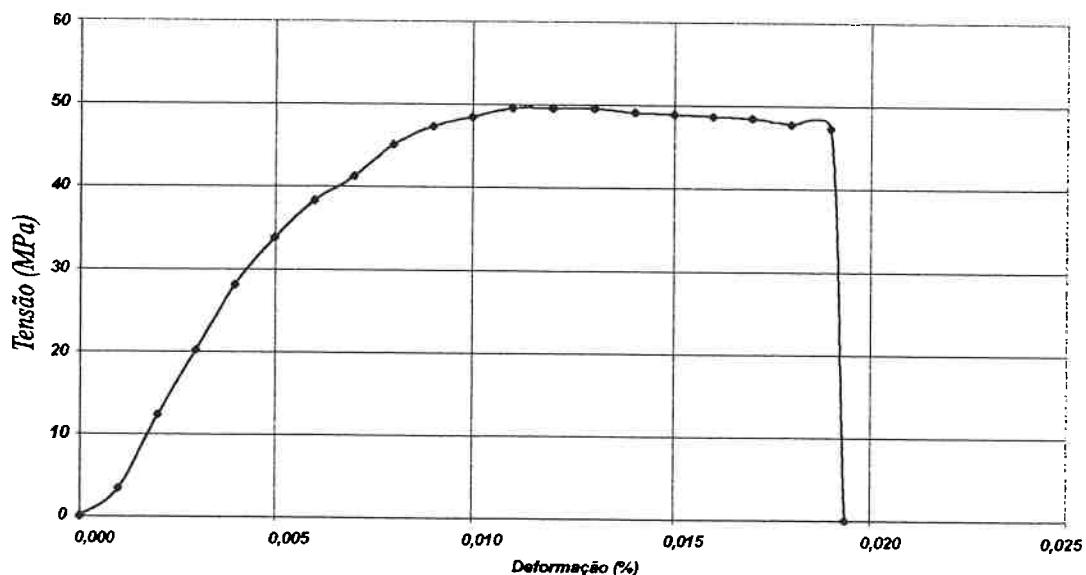


Figura 4.12 - Gráfico de tensão versus deformação no PMMA obtido por injeção na direção H.

Para o ensaio de cisalhamento obtém-se uma curva de tensão X deformação que está ilustrada na figura 4.13. Os resultados estão apresentados na tabela 4.2.

*Curva tensão x deformação para teste de cisalhamento em PMMA*

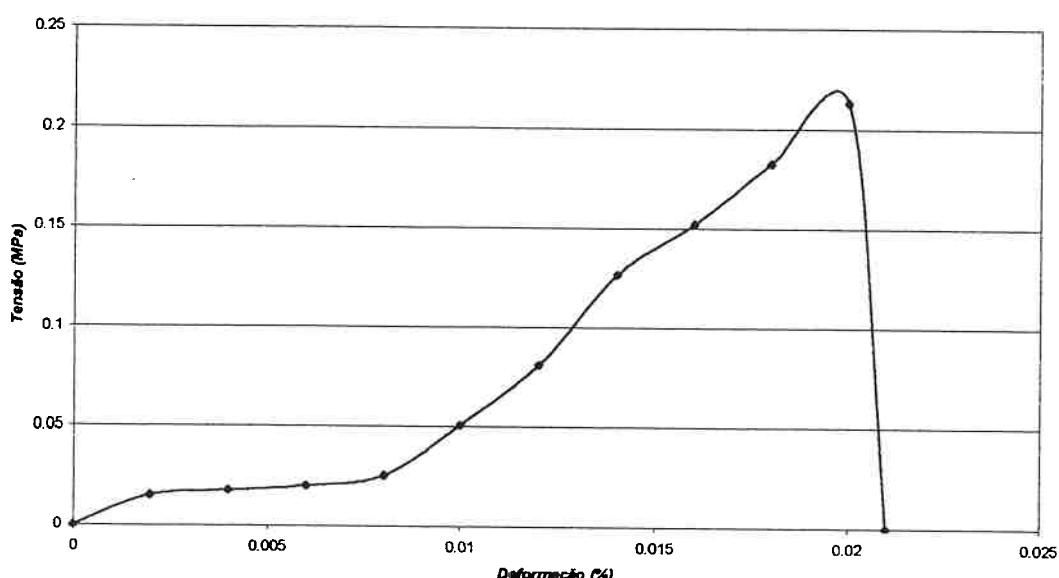


Figura 4.13 - Gráfico de tensão versus deformação numa junta de PMMA soldada por ultra-som testada por ensaio de cisalhamento.

Os corpos de provas ensaiados por cisalhamento, num total de três, foram unidos com pressão de junção de 15 psi, tempo de soldagem de 0,450 s, e tempo de espera de 0,200 s. A área média de soldagem obtida com estes parâmetros foi de 43%.

**TABELA 4.2**  
**RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO EM JUNTAS SOLDADAS DE PMMA.**

|   |                  |
|---|------------------|
| Resistência mínima ao cisalhamento <sup>1</sup> (MPa) | $0,21 \pm 0,02$  |
| Deformação na ruptura <sup>1</sup> (%)                | $2,00 \pm 0,15$  |
| Resistência à ruptura com solda <sup>2</sup> (MPa)    | $18,91 \pm 1,51$ |
| Resistência à ruptura sem solda <sup>2</sup> (MPa)    | $47,5 \pm 1,1$   |

<sup>1</sup> Área cisalhada de 30,2 mm X 12,8 mm

<sup>2</sup> Área tracionada de 19,0 mm X 3,2 mm

Com os dados das tabelas 4.1 e 4.2 determina-se a eficiência da junta que corresponde à fração de resistência à ruptura de uma peça com solda em relação à mesma resistência de uma peça sem solda. Desta forma, obtem-se uma eficiência de

39,8% que é considerada ideal em juntas metálicas. Sendo assim, para a junta estudada esta idealização pode ser também estendida.

#### 4.5) Curvas de área soldada:

##### 4.5.1) PMMA

Tanto para o PMMA quanto para o PC foram obtidas curvas de dados de áreas de soldagem em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem para ambas direções de injeção.

As figuras 4.14 e 4.15 são gráficos que ilustram curvas de áreas soldadas para as pressões de junção de 103,4 kPa (15 psi); 137,9 kPa (20 psi); e 206,8 kPa (30 psi) em função de tempos de soldagem de 0,1 s a 0,7 s para amostras de PMMA na direção H e V, respectivamente.

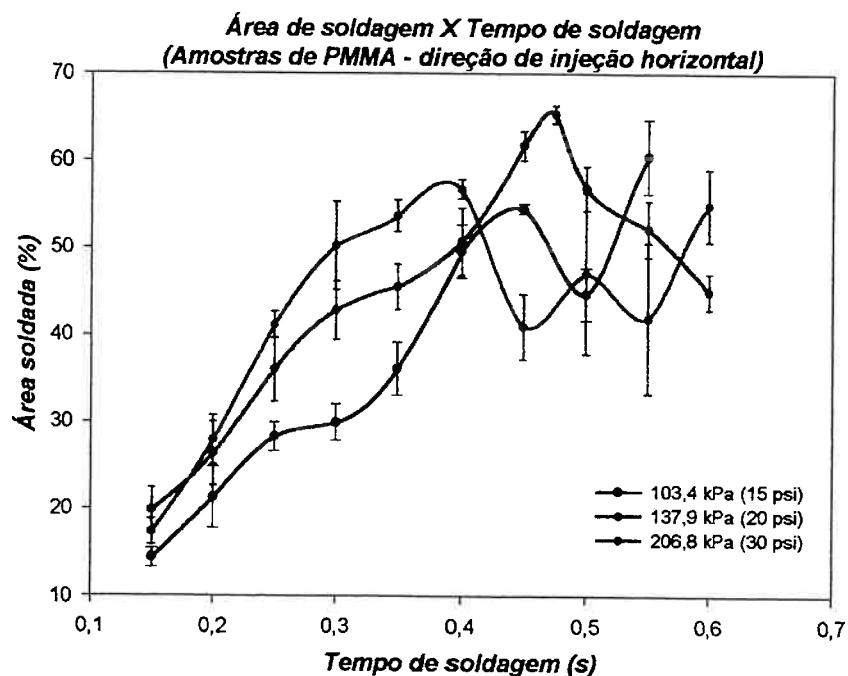


Figura 4.14 – Curva de áreas soldadas em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção H.

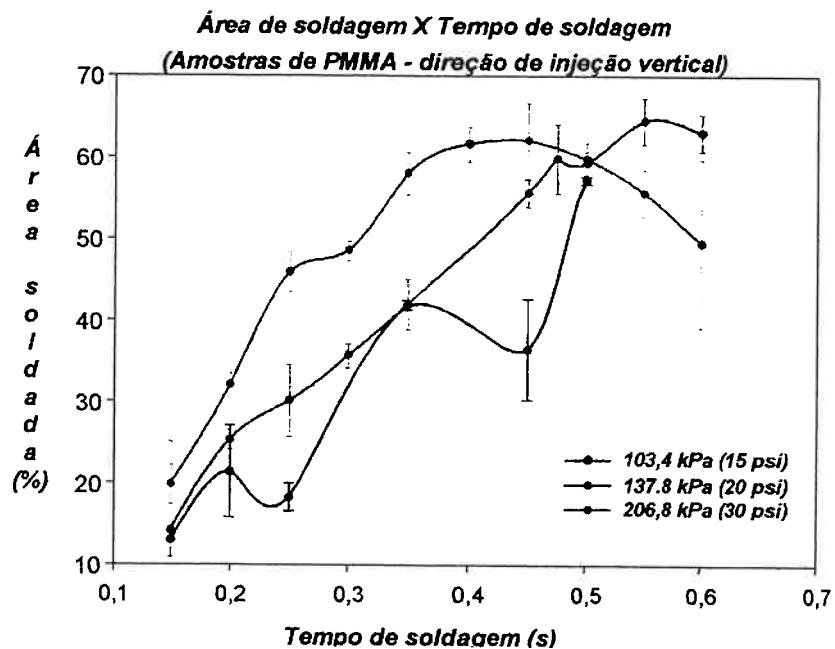


Figura 4.15 – Curva de áreas soldadas em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção V.

Para uma análise mais qualitativa e comparativa foram elaboradas as curvas comparativas para cada pressão de junção estudada nas diferentes direções de injeção como apresentado nas figuras 4.16 a 4.18.

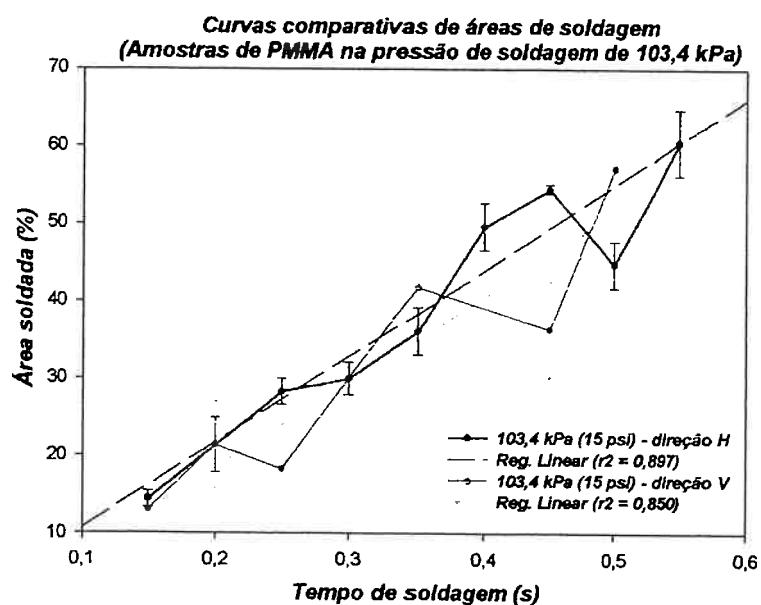


Figura 4.16 – Curvas de área soldada para a pressão de 103,4 kPa em função da direção de injeção.

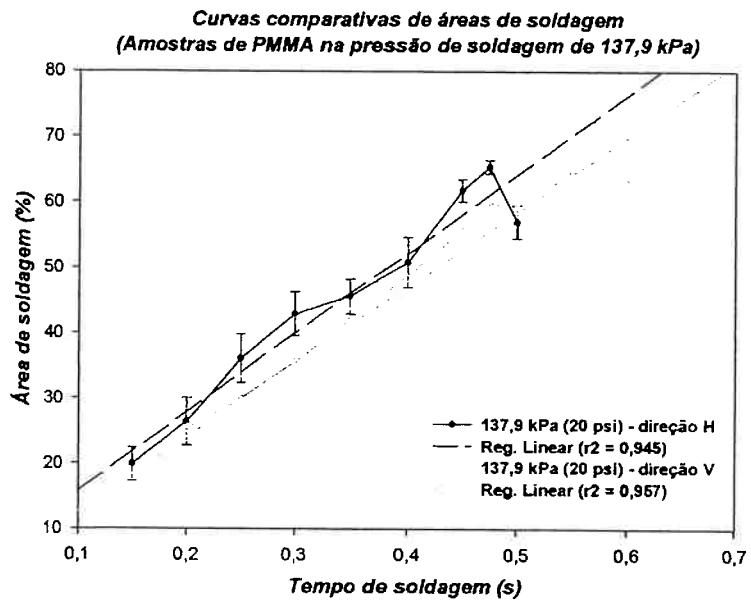


Figura 4.17 – Curvas de área soldada para a pressão de 137,9 kPa em função da direção de injeção.

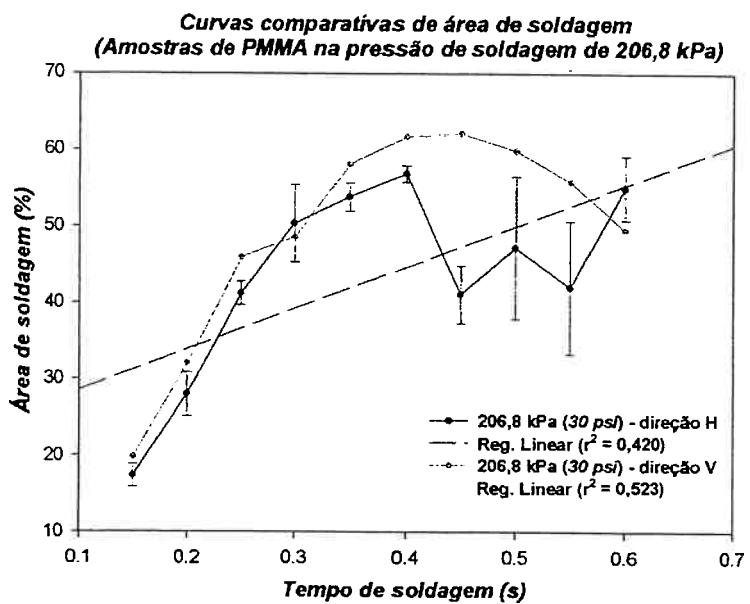


Figura 4.18 – Curvas de área soldada para a pressão de 206,8 kPa em função da direção de injeção.

Além das curvas apresentadas o equipamento de soldagem por ultra-som possibilitou a obtenção de um dado importante, a potência utilizada em cada ciclo de

soldagem. Com este dado obteve-se curvas de potência em função do tempo de soldagem em diferentes pressões de soldagem como as mostradas nas figuras 4.19 e 4.20.

Com a potência e o tempo de soldagem calcula-se a energia dispensada no ciclo de soldagem, sendo uma mera multiplicação dos valores de potência e do tempo de soldagem. Desta forma, obtiveram-se curvas de energia em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem com uma regressão linear dos pontos obtidos, como as apresentadas nas figuras 4.21 e 4.22 em função das direções de injeção, e nas figuras 4.23 a 4.25 em função das pressões de soldagem.

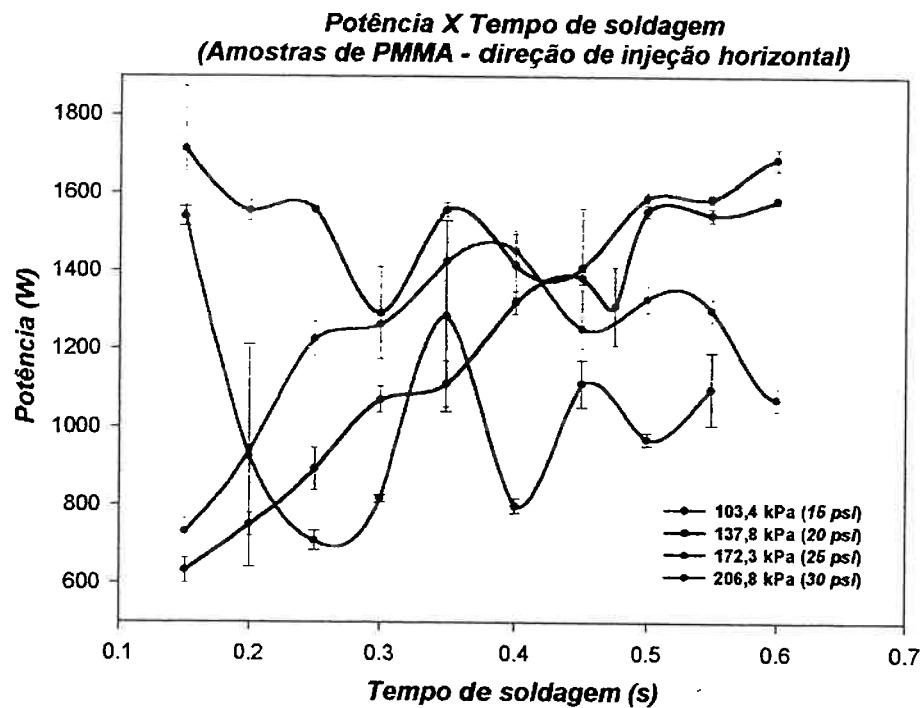


Figura 4.19 – Curva de potência de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção H.

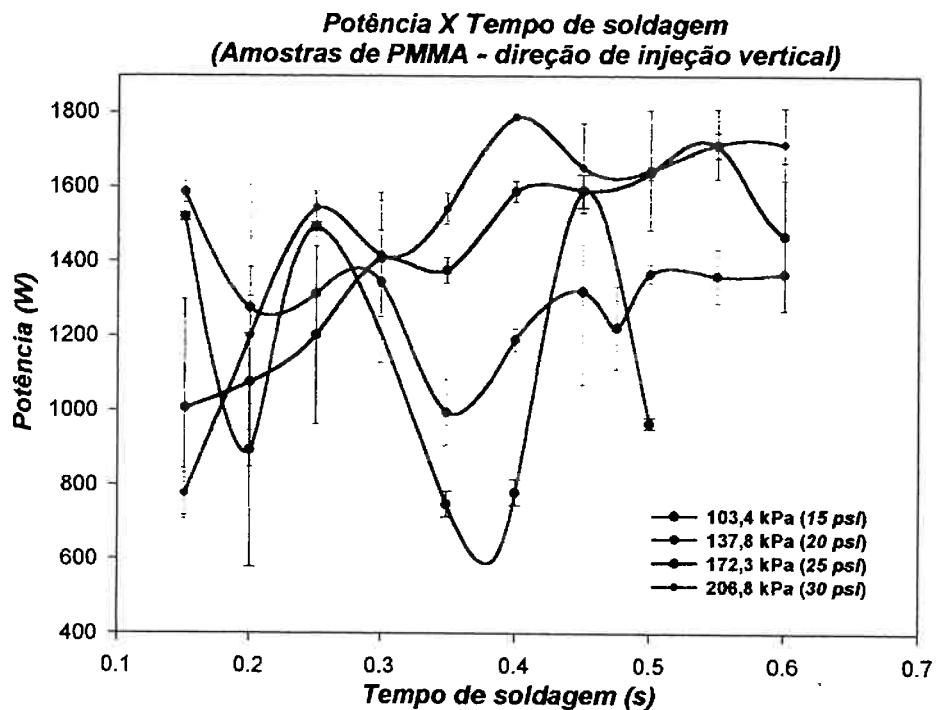


Figura 4.20 – Curva de potência de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção V.

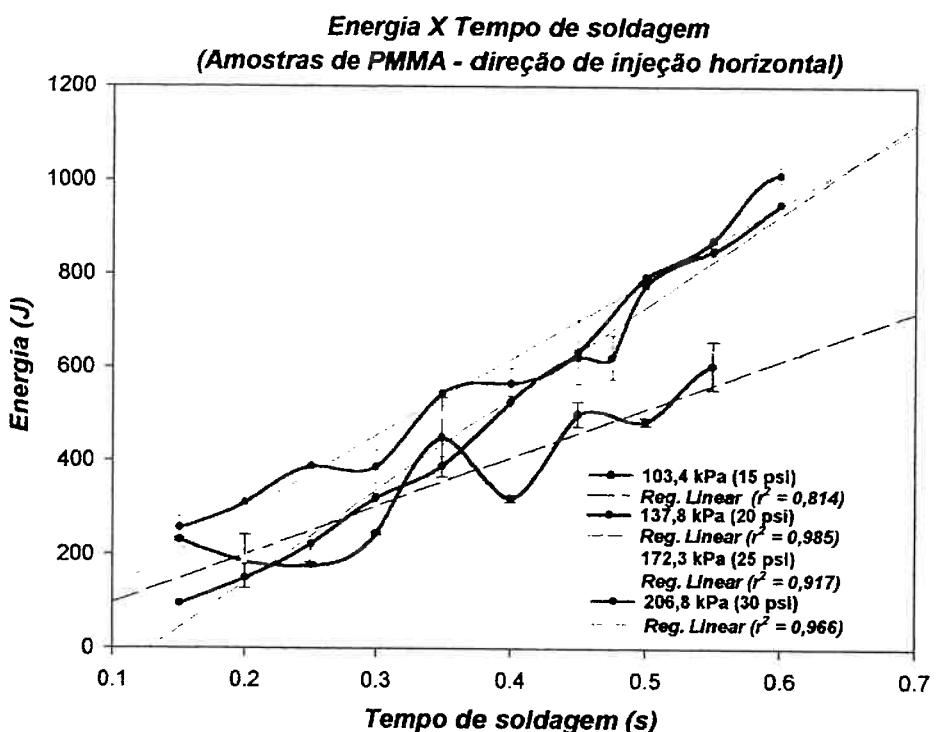


Figura 4.21 – Curva de energia de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção H.

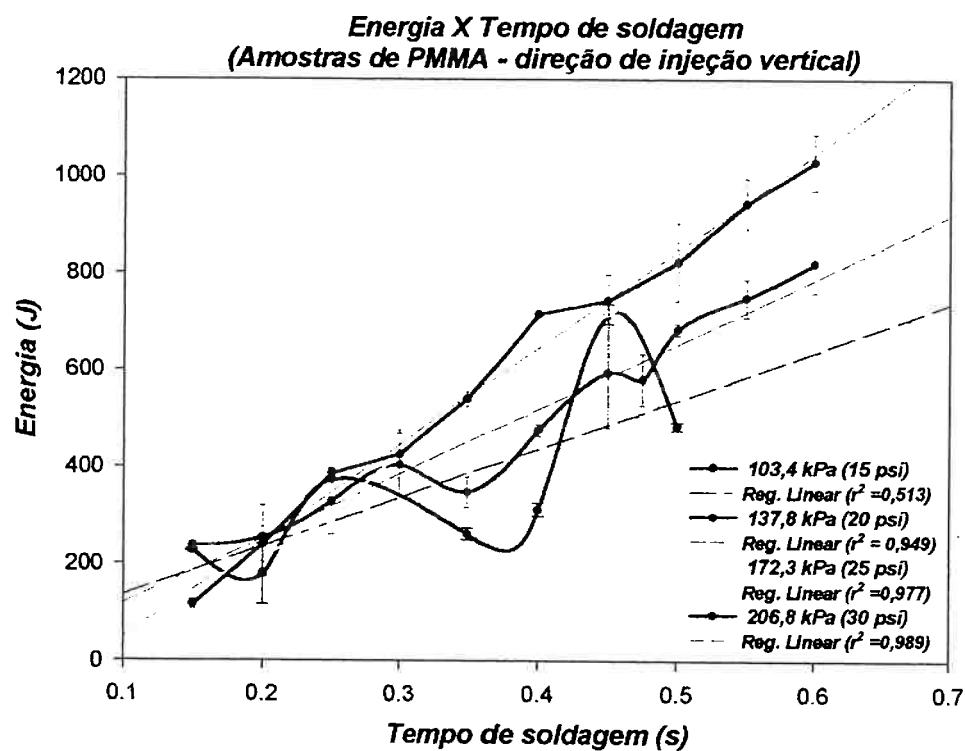


Figura 4.22 – Curva de energia de ciclo em função do tempo de soldagem para diferentes pressões de soldagem. Amostras com direção de injeção V.

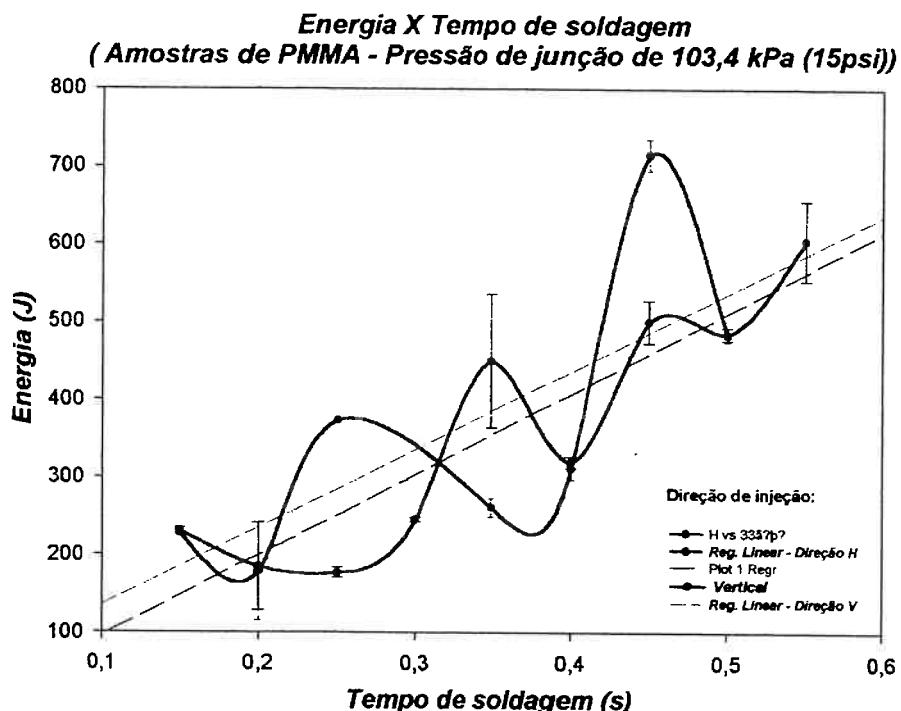


Figura 4.23 – Curvas de energia em função do tempo de soldagem para a pressão de soldagem de 103,4 kPa.

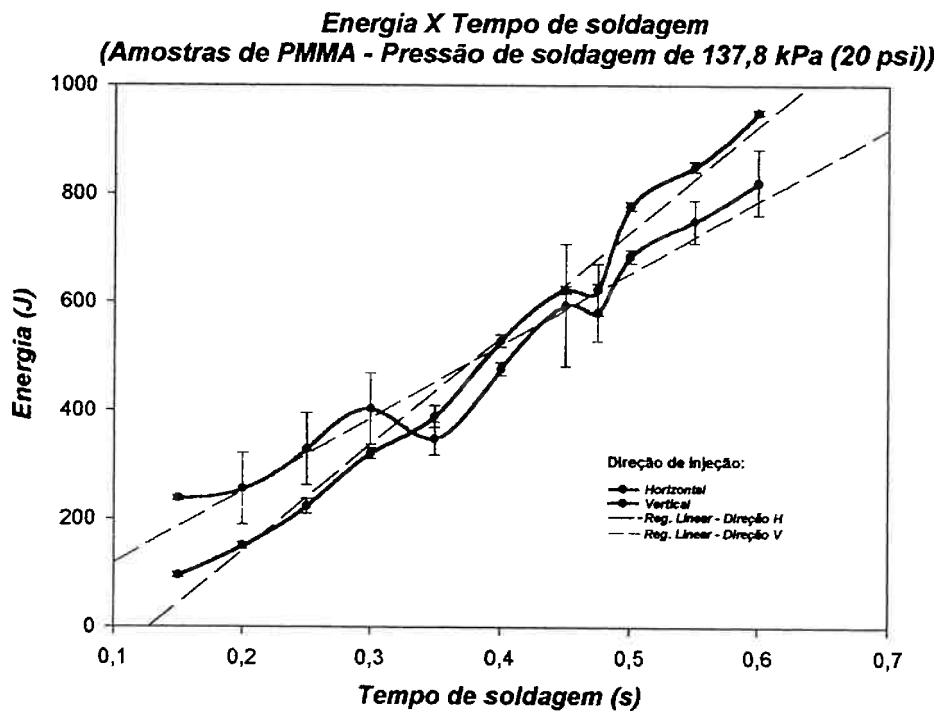


Figura 4.24 – Curvas de energia em função do tempo de soldagem para a pressão de soldagem de 137,8 kPa.

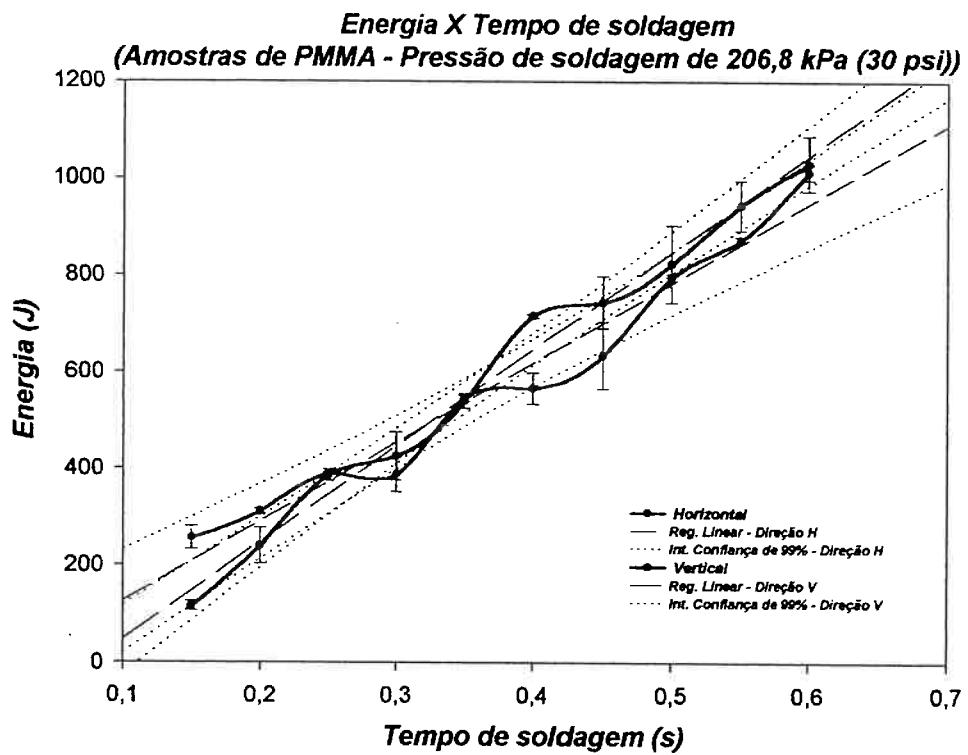


Figura 4.25 – Curvas de energia em função do tempo de soldagem para a pressão de soldagem de 206,8 kPa.

#### 4.5.2) PC

Nas figuras de 4.26(a) a 4.26(d) estão apresentados os gráficos de quantidade de área de soldagem obtidas com as amostras de PC em função das direções de injeção H e V.

As curvas destes gráficos são uma comparação entre as direções de injeção H e V para os parâmetros estudados. As linhas cheias compreendem aos valores de área soldada em relação aos pontos que são os valores médios e os desvios-padrões em função de cada par de parâmetros estudados. Desta forma, são traçadas a regressão linear representada pelas linhas pontilhadas e a confiabilidade a 95 % representada pela linha tracejada. As linhas vermelhas correspondem às amostras na direção de injeção V e as linhas pretas a direção H.

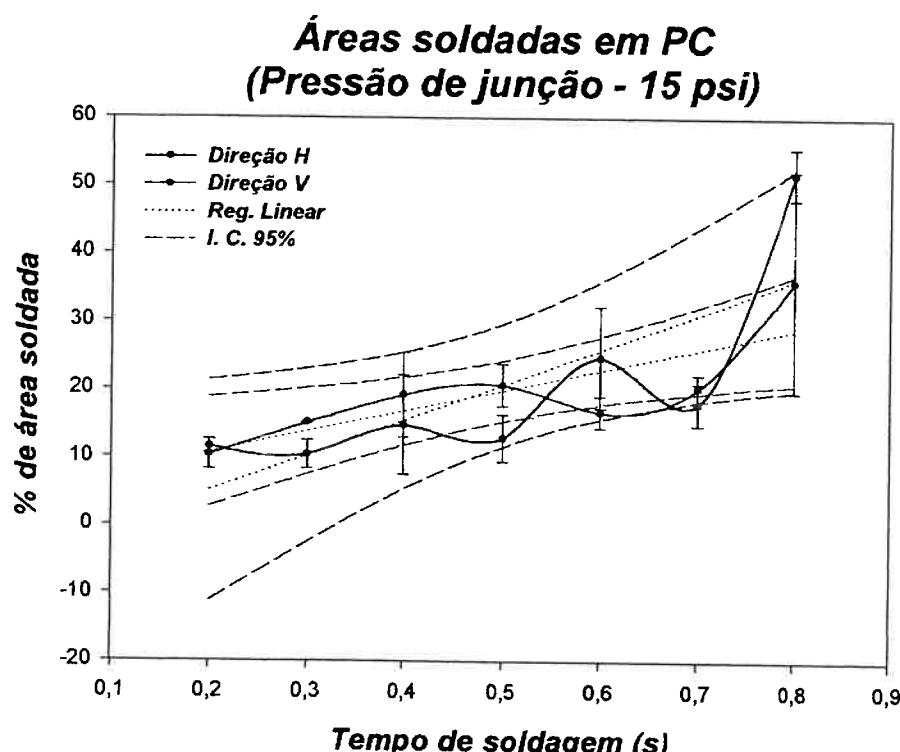


Figura 4.26(a) – Curvas de área de soldagem em PC para pressão de junção de 15 psi em função das direções de injeção.

**Áreas soldadas em PC  
(Pressão de junção - 20 psi)**

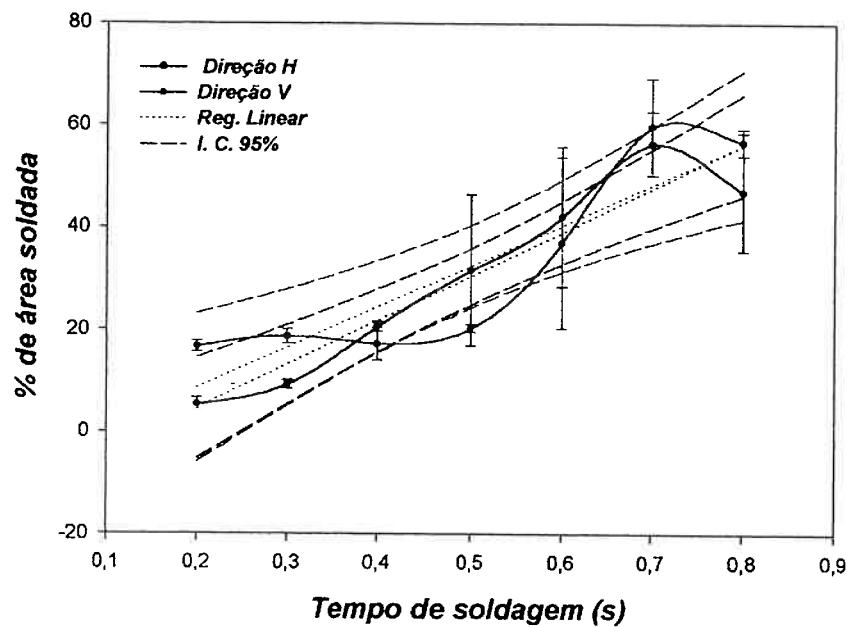


Figura 4.26(b) – Curvas de área de soldagem em PC para pressão de junção de 20 psi em função das direções de injeção.

**Áreas soldadas em PC  
(Pressão de junção - 25 psi)**

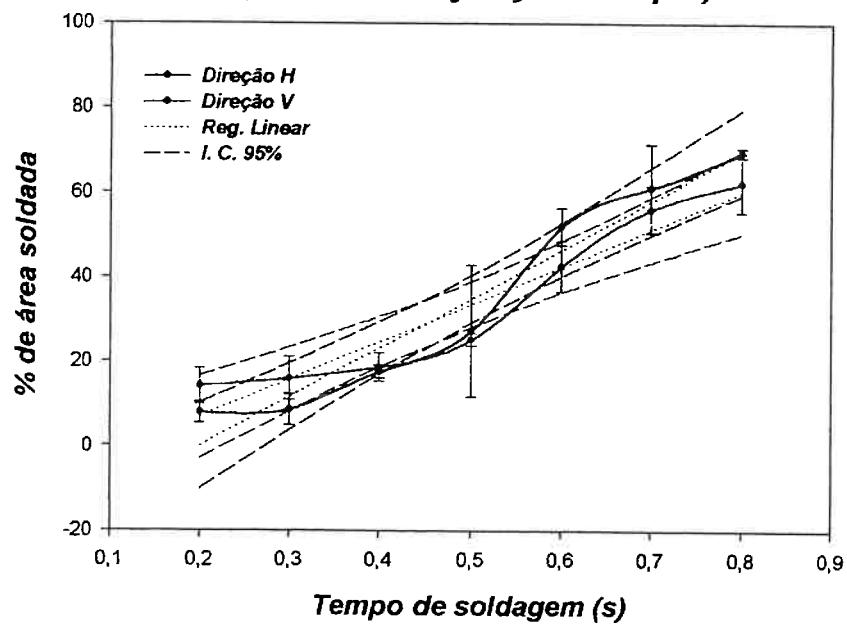


Figura 4.26(c) – Curvas de área de soldagem em PC para pressão de junção de 25 psi em função das direções de injeção.

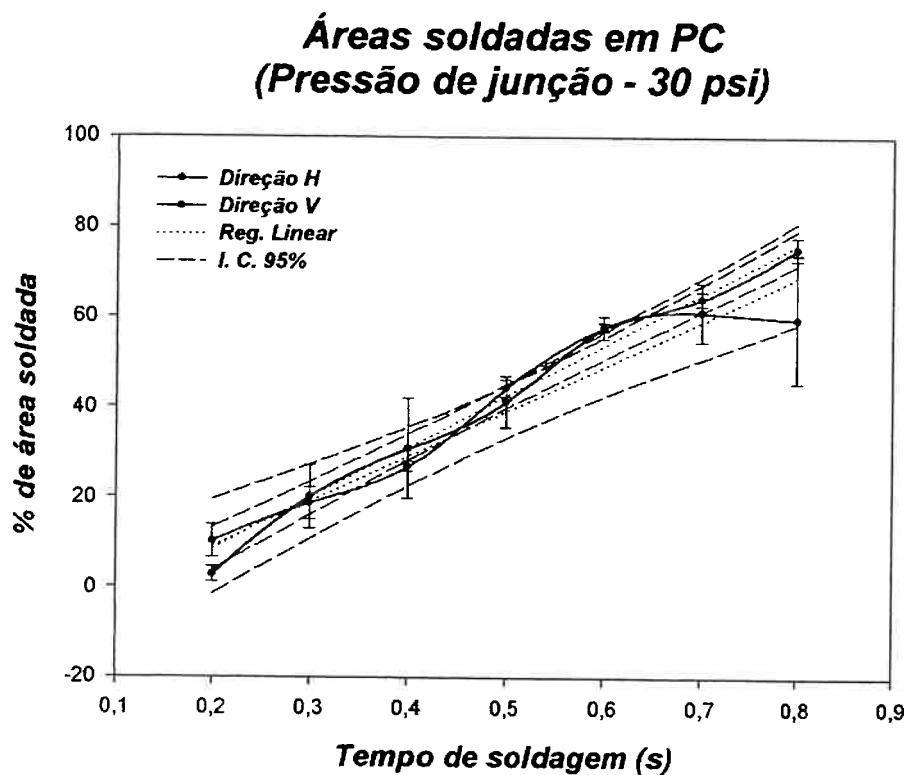


Figura 4.26(d) – Curvas de área de soldagem em PC para pressão de junção de 30 psi em função das direções de injeção.

#### 4.5.3) PMMA X PC

Nos gráficos das figuras 4.27 a 4.33 estão apresentados os dados de área de soldagem obtidos para o PC e para o PMMA de forma que seja possível comparar os valores. Nas legendas a palavra I.C. indica intervalo de confiança, que é de 95%, e Reg.Linear significa regressão linear dos pontos da amostragem. A comparação é feita em função das direções de injeção e dos dois materiais estudados. Para cada ponto foram obtidas três amostras a fim de determinar-se as médias e os desvios-padrões.

As curvas azuis são dados referentes às amostras de PMMA e as curvas vermelhas aos dados de PC.

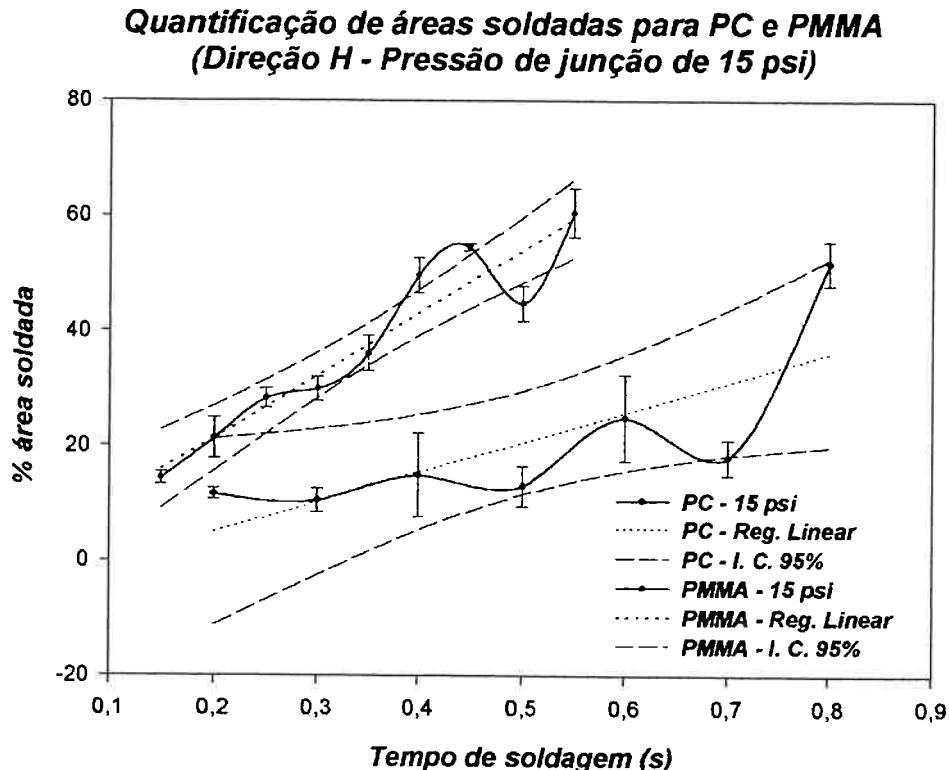


Figura 4.27 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 15 psi na direção de injeção H.

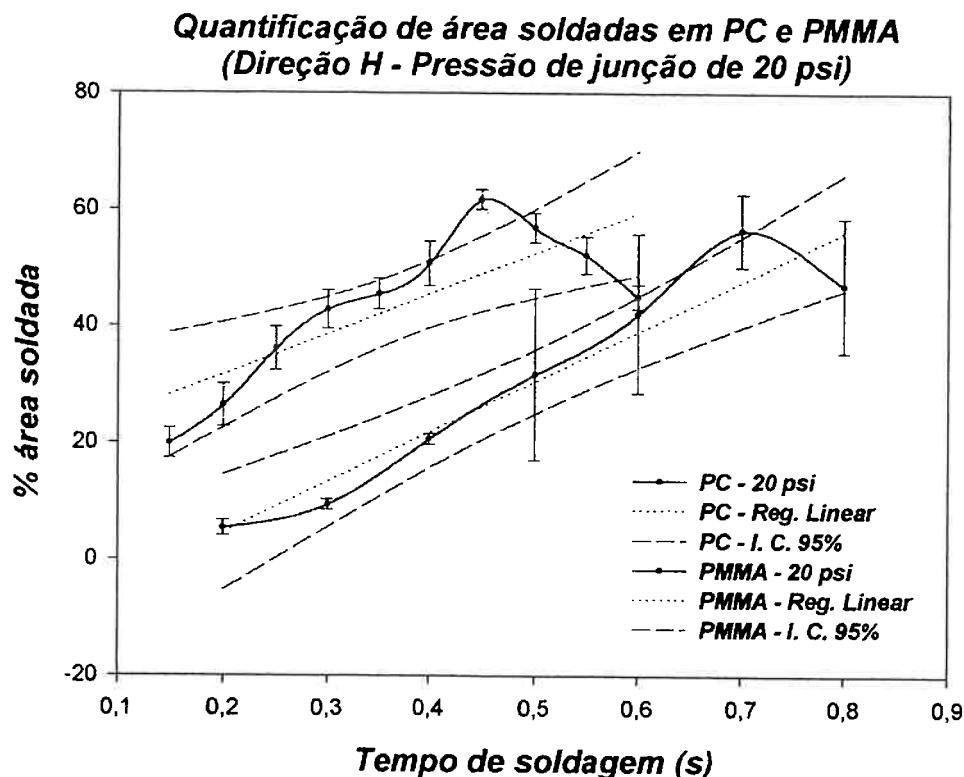


Figura 4.28 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 20 psi na direção de injeção H.

**Quantificação de áreas soldadas de PC e PMMA  
(Direção H - Pressão de junção de 30 psi)**

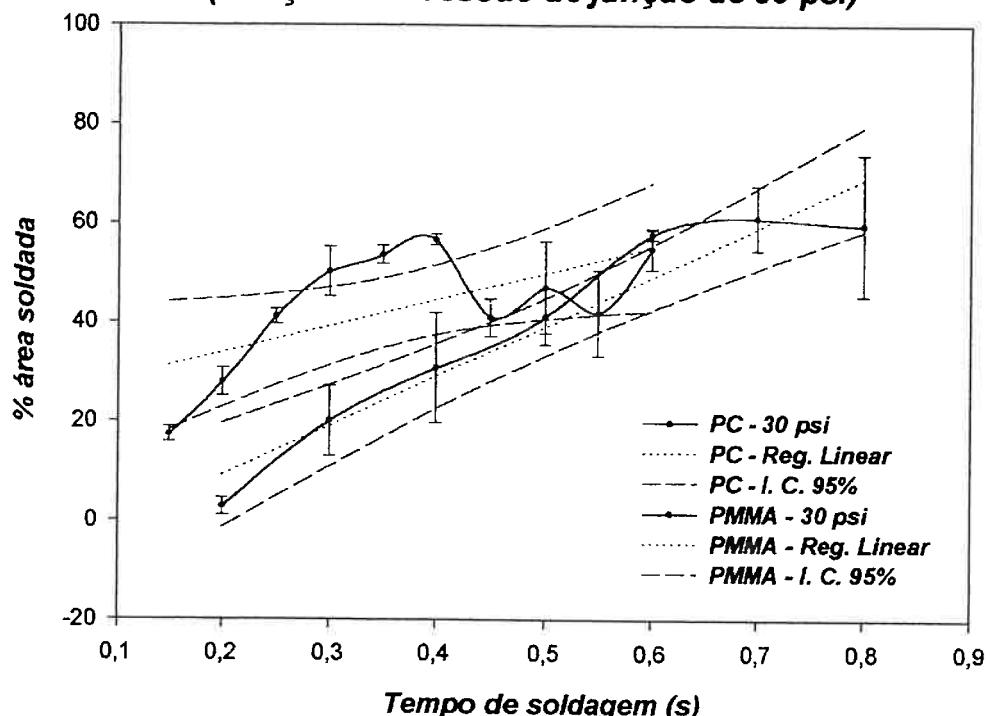


Figura 4.29 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 30 psi na direção de injeção H.

**Quantificação de áreas soldadas em PC e PMMA  
(Direção V - Pressão de junção de 15 psi)**

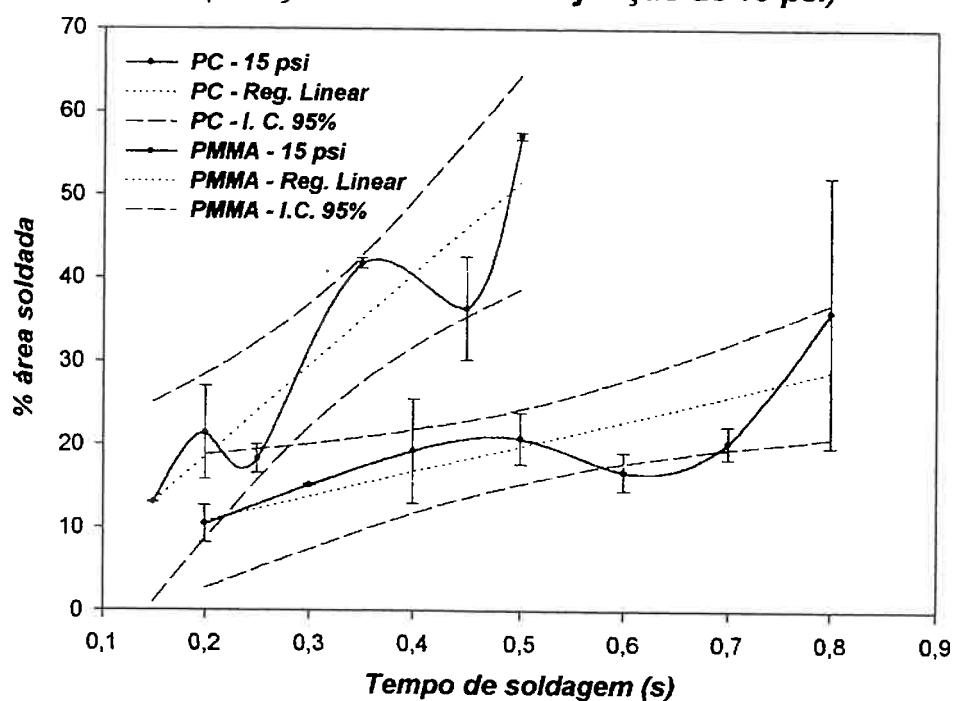


Figura 4.30 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 15 psi na direção de injeção V.

**Quantificação de áreas soldadas em PC e PMMA  
(Direção V - Pressão de junção de 20 psi)**

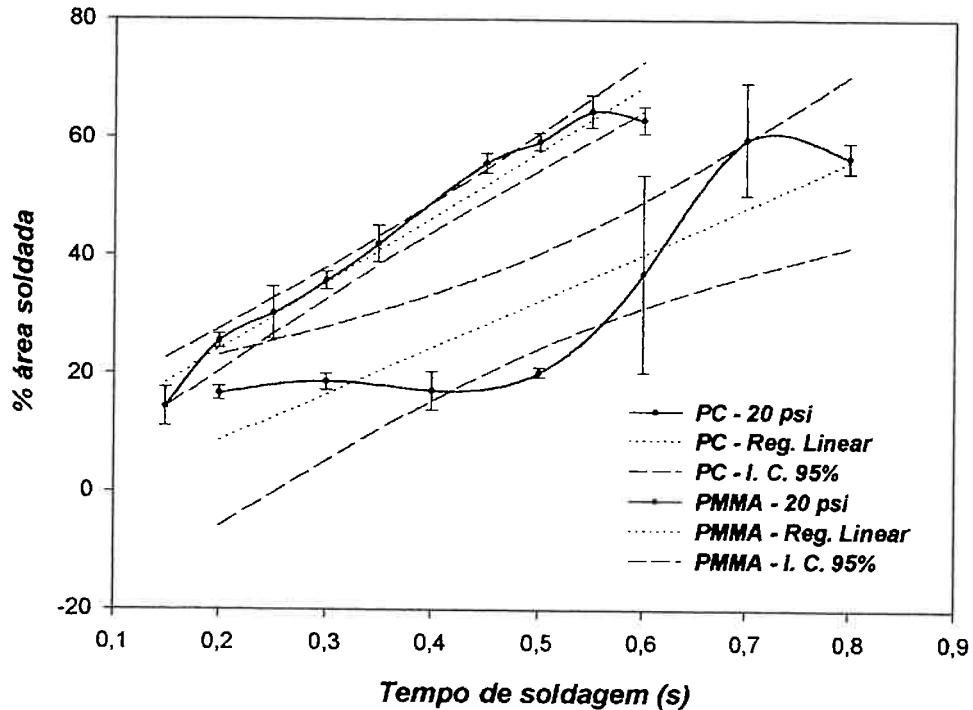


Figura 4.31 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 20 psi na direção de injeção V.

**Quantificação de áreas soldadas em PC e PMMA  
(Direção V - Pressão de junção de 25 psi)**

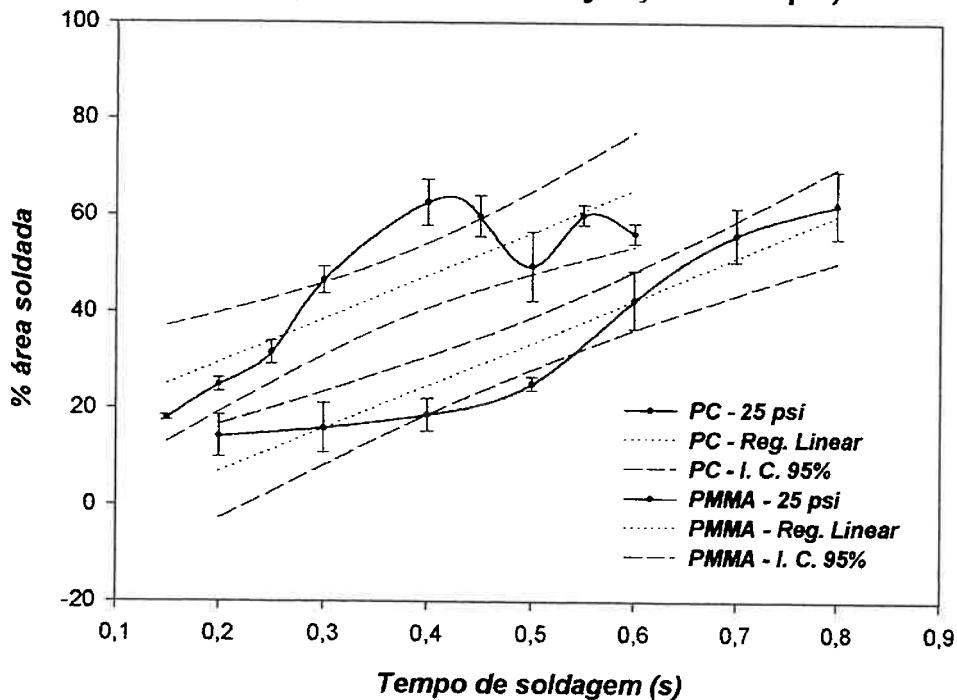


Figura 4.32 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 25 psi na direção de injeção V.

**Quantificação de áreas soldadas em PC e PMMA  
(Direção V - Pressão de junção de 30 psi)**

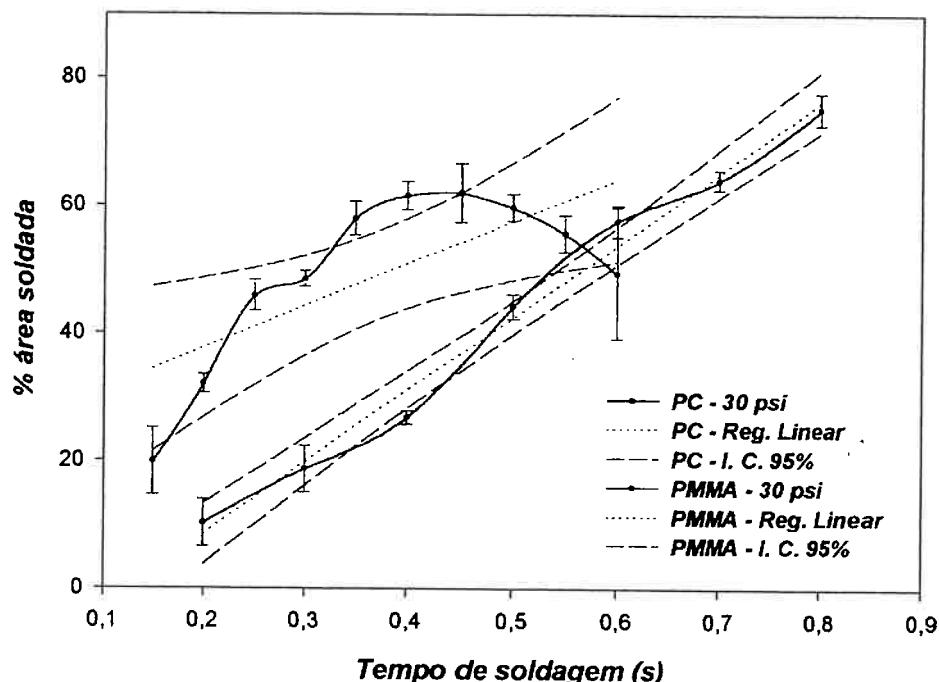


Figura 4.33 – Curvas de área de soldagem comparativa entre PMMA e PC para Pressão de junção de 30 psi na direção de injeção V.

#### 4.6) Análise por ultra-som:

Para a análise por ultra-som foram tomadas sete amostras determinando-se a média e o desvio-padrão dos resultados coletados.

##### 4.6.1) PMMA

As amostras de PMMA apresentaram uma curva de ultra-som semelhante a apresentada na figura 4.34, onde a tensão emitida e/ou recebida pelo transdutor está em função do tempo no qual onda é emitida e recebida pelo mesmo. A tabela 4.3 apresenta os valores de atenuação acústica e o intervalo de emissão e recepção da onda ultra-sônica pelo transdutor para as direções V e H.

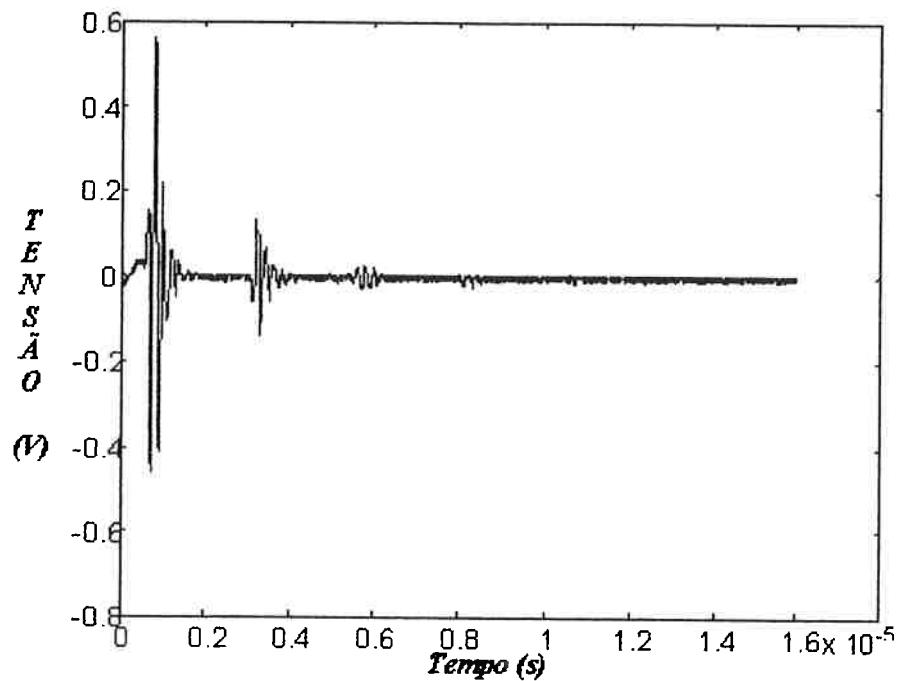


Figura 4.34 – Curva de atenuação acústica para PMMA.

**TABELA 4.3**  
**DADOS OBTIDOS COM ANÁLISE ULTRA-SÔNICA DAS AMOSTRAS DE PMMA EM FUNÇÃO DAS DIREÇÕES DE INJEÇÃO.**

| <b>DIREÇÃO V</b>       |                         | <b>DIREÇÃO H</b>       |                         |
|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Atenuação acústica (%) | Intervalo de tempo (μs) | Atenuação acústica (%) | Intervalo de tempo (μs) |
| 77,23                  | 2,40                    | 65,20                  | 2,48                    |
| 80,83                  | 2,55                    | 65,54                  | 2,40                    |
| 76,04                  | 2,57                    | 77,07                  | 2,52                    |
| 85,97                  | 2,52                    | 77,28                  | 2,54                    |
| 76,16                  | 2,54                    | 62,36                  | 2,42                    |
| 79,77                  | 2,55                    | 65,44                  | 2,43                    |
| 78,69                  | 2,54                    | 80,79                  | 2,54                    |
| <b>MÉDIA</b>           | <b>79,241</b>           | <b>2,524</b>           | <b>70,525</b>           |
| <b>DESVIO PADRÃO</b>   | <b>3,465</b>            | <b>0,056</b>           | <b>7,523</b>            |
| <b>ERRO PADRÃO</b>     | <b>1,310</b>            | <b>0,021</b>           | <b>0,059</b>            |
| <b>I.C. DE 95%</b>     | <b>3,205</b>            | <b>0,052</b>           | <b>0,022</b>            |
| <b>I.C. DE 99%</b>     | <b>4,857</b>            | <b>0,079</b>           | <b>0,055</b>            |
|                        |                         |                        |                         |
|                        |                         |                        |                         |

#### 4.6.2) PC

Para o PC a análise acústica permitiu a obtenção de curvas semelhantes à da figura 4.35, onde a tensão emitida e/ou recebida pelo transdutor está em função do

tempo no qual onda é emitida e recebida pelo mesmo. A tabela 4.4 apresenta os valores de atenuação acústica e o intervalo de emissão e recepção da onda ultra-sônica pelo transdutor para as direções V e H.

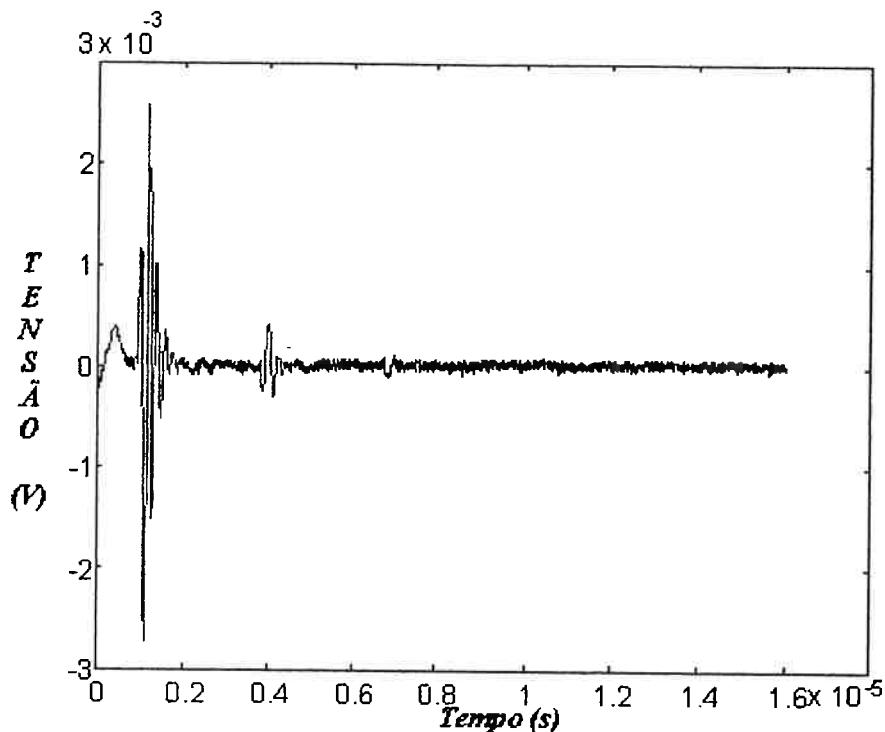


Figura 4.35 – Curvas de análise acústica para o PC.

**TABELA 4.4**  
**DADOS OBTIDOS COM ANÁLISE ULTRA-SÔNICA DAS AMOSTRAS DE PC EM**  
**FUNÇÃO DAS DIREÇÕES DE INJEÇÃO.**

|                      | <b>DIREÇÃO V</b>       |                               | <b>DIREÇÃO H</b>       |                               |
|----------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|
|                      | Atenuação acústica (%) | Intervalo de tempo ( $\mu$ s) | Atenuação acústica (%) | Intervalo de tempo ( $\mu$ s) |
| 83,77                | 2,78                   | 83,77                         | 2,78                   |                               |
| 84,53                | 2,82                   | 84,53                         | 2,82                   |                               |
| 84,16                | 2,84                   | 84,16                         | 2,84                   |                               |
| 89,11                | 2,81                   | 89,11                         | 2,81                   |                               |
| 87,53                | 2,82                   | 87,53                         | 2,82                   |                               |
| 84,05                | 2,82                   | 84,05                         | 2,82                   |                               |
| 83,80                | 2,86                   | 83,80                         | 2,76                   |                               |
| <b>MÉDIA</b>         | <b>85,2758</b>         | <b>2,870</b>                  | <b>84,2935</b>         | <b>2,831</b>                  |
| <b>DESVIO PADRÃO</b> | <b>2,1418</b>          | <b>0,027</b>                  | <b>1,6866</b>          | <b>0,015</b>                  |
| <b>ERRO PADRÃO</b>   | <b>0,8095</b>          | <b>0,010</b>                  | <b>0,6375</b>          | <b>0,006</b>                  |
| <b>I.C. DE 95%</b>   | <b>1,9809</b>          | <b>0,025</b>                  | <b>1,5598</b>          | <b>0,014</b>                  |
| <b>I.C. DE 99%</b>   | <b>3,0015</b>          | <b>0,038</b>                  | <b>2,3635</b>          | <b>0,022</b>                  |

#### 4.6.3) Coeficiente de absorção ( $\alpha$ )

Para a determinação do coeficiente de absorção acústica ( $\alpha$ ) e da absorbância (A) foram utilizados os dados de atenuação acústica extraídos das tabelas 4.3 e 4.4 e as equações 3.1, 3.2, e 3.3. Os resultados estão apresentados na tabela 4.5 em função das direções de injeção H e V. Os dados do coeficiente de absorção estão ilustrados no gráfico da figura 4.36.

**TABELA 4.5**  
**VALORES DE COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DAS**  
**DIREÇÕES DE INJEÇÃO PARA PMMA E PC.**

| PMMA     |             | PC          |             |
|----------|-------------|-------------|-------------|
|          | Direção V   | Direção H   | Direção V   |
| A (dB)   | 2,02 ± 0,12 | 3,03 ± 0,01 | 1,38 ± 0,01 |
| $\alpha$ | 0,308 ±     | 0,462 ±     | 0,211 ±     |
| (dB/mm)  | 0,005       | 0,018       | 0,002       |

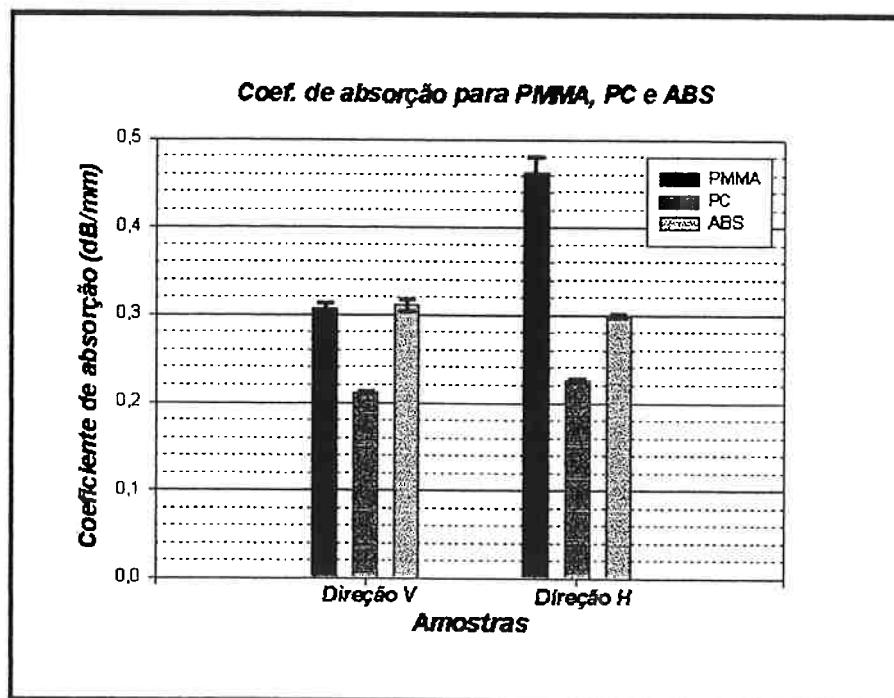


Figura 4.36 – Gráfico comparativo com valores de coeficiente de absorção.

#### 4.7) Temperatura de transição vítreo ( $T_g$ ):

Como citado foram obtidas as temperaturas de transição vítreo para amostras de PMMA e PC com fim de unir estes dados com os obtidos na determinação dos ciclos de temperatura durante a soldagem.

Como já explicado, a determinação da  $T_g$  se dá analisando a parte da curva onde é percebida uma queda da mesma, indicando um evento endotérmico, que neste caso está relacionado à  $T_g$ .

A curva obtida com o equipamento de DTA fornece valores de energia (em mW) e temperatura em função do tempo de aquecimento da amostra, sendo possível determinar a temperatura graficamente.

Para a determinação da temperatura necessita-se, primeiramente, determinar a inflexão da curva de energia. Determinada a inflexão traça-se uma linha vertical (linha tracejada na figura 4.37) até cruzar com a curva da temperatura. Nesta intersecção traça-se uma linha horizontal até o eixo das coordenadas obtendo-se a temperatura. A figura 4.37 ilustra tais curvas na obtenção da  $T_g$  do PMMA e a figura 4.38 para o PC.

### Transição vítreia em PMMA

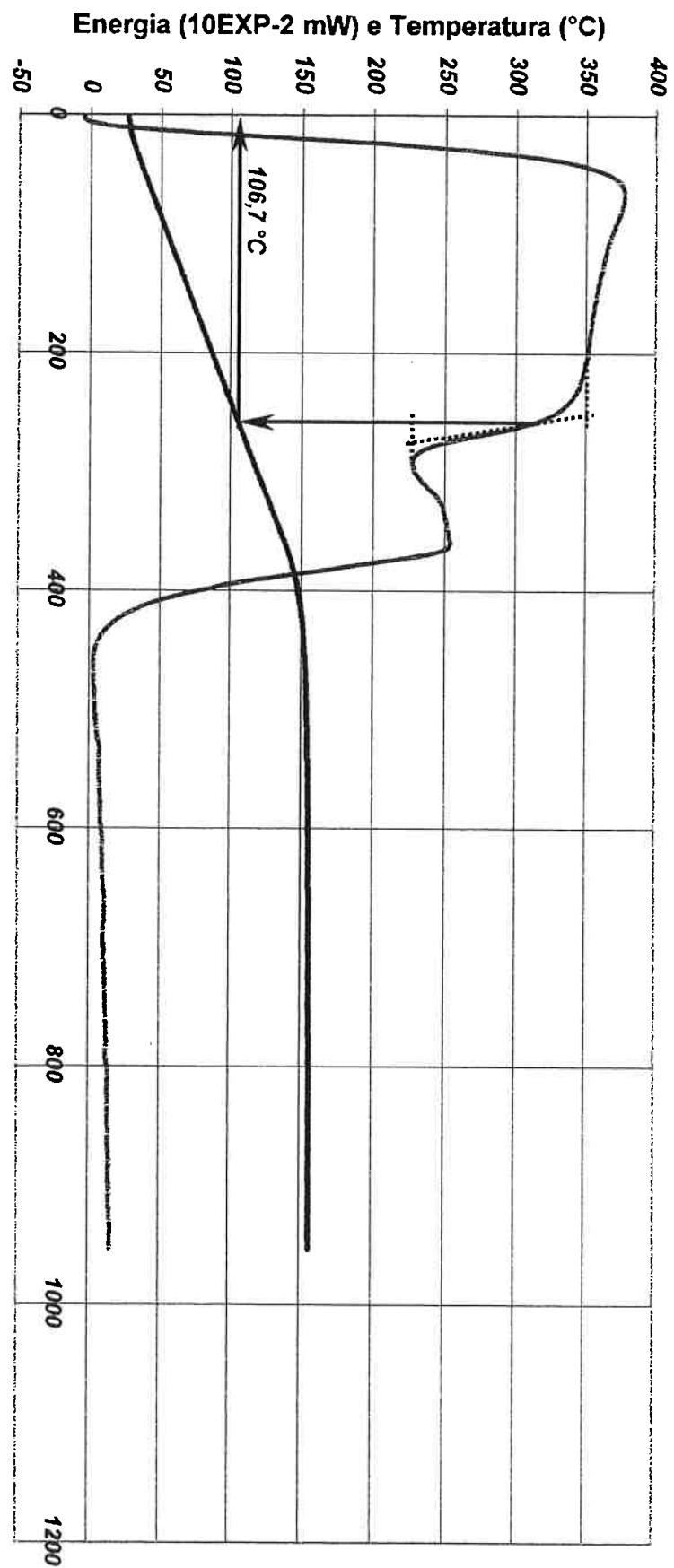


Figura 4.37 – Curva obtida no DTA para determinação de  $T_g$  em PMMA.

### Transição vitrea em PC

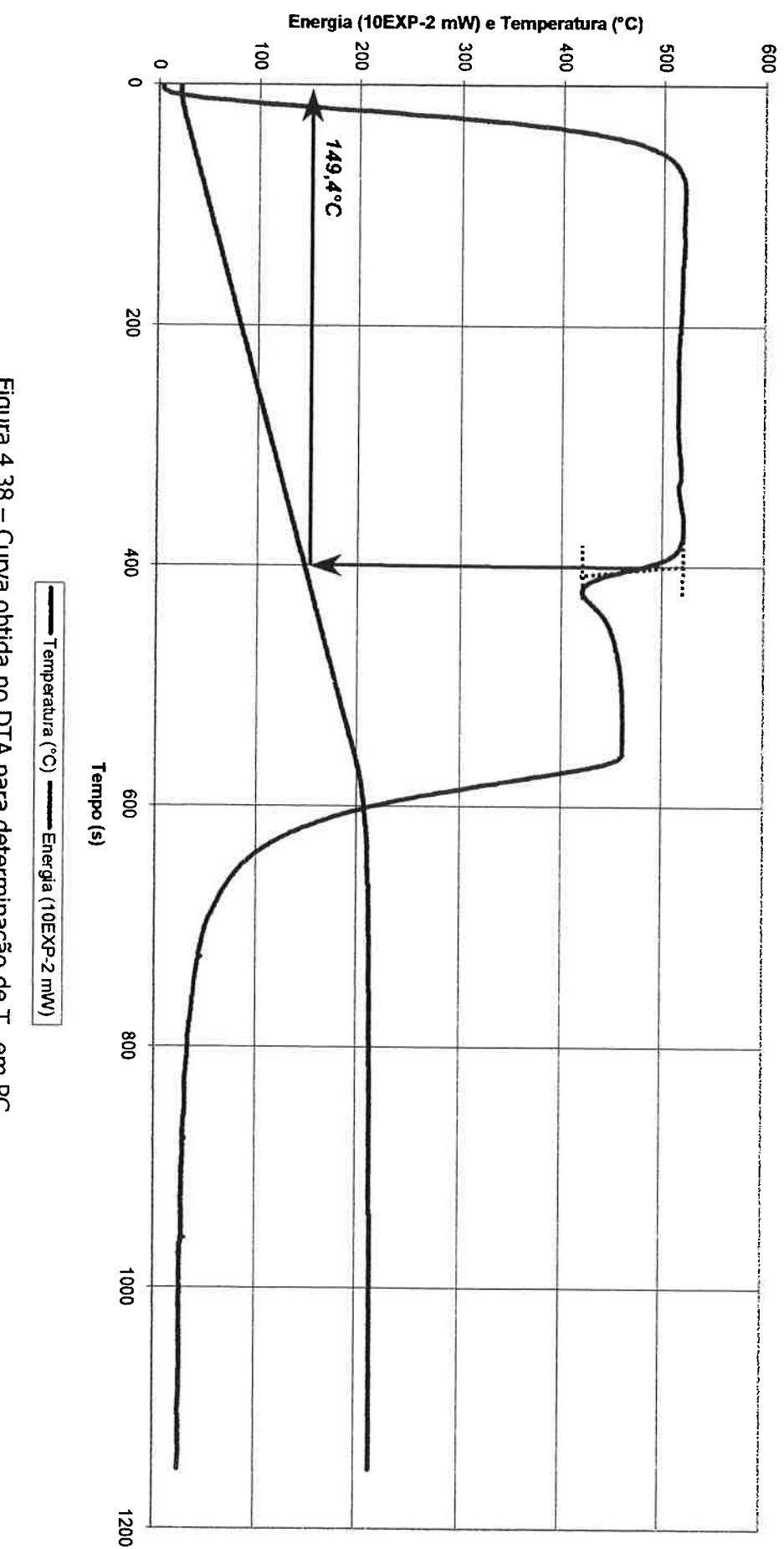


Figura 4.38 – Curva obtida no DTA para determinação de  $T_g$  em PC.

Desta forma os gráficos da figura 4.37 e 4.38 apresentaram valores próximos aos determinados pela literatura [26], conforme a tabela 4.6 apresenta.

**TABELA 4.6**  
**COMPARAÇÃO DE VALORES EXPERIMENTAIS E OBTIDOS NA LITERATURA**  
**PARA A  $T_g$**

|              | <b>PMMA</b> | <b>PC</b> |
|--------------|-------------|-----------|
| Experimental | 106,7 °C    | 149,4 °C  |
| Literatura   | 105,0 °C    | 162,0 °C  |

#### 4.8) Temperatura de degradação ( $T_d$ ):

As temperaturas de degradação foram obtidas utilizando-se o TGA. As curvas estão apresentadas a seguir, sendo a figura 4.39 para o PMMA e a figura 4.40 para o PC. Nestas figuras o eixo das abscissas indica a temperatura e o eixo das coordenadas a quantidade de massa relativa à massa inicial.

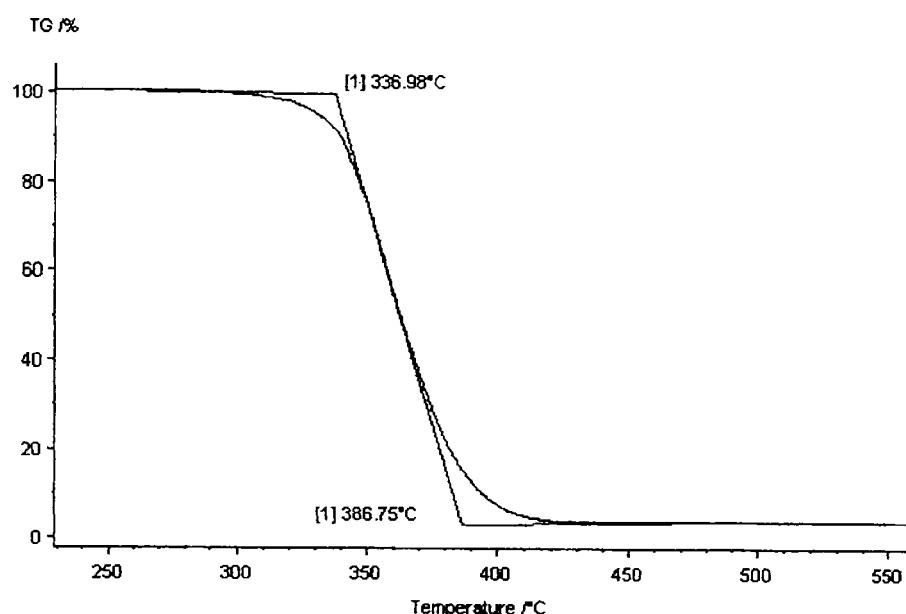


Figura 4.39 – Curva obtida com o  $T_d$  para o PMMA.

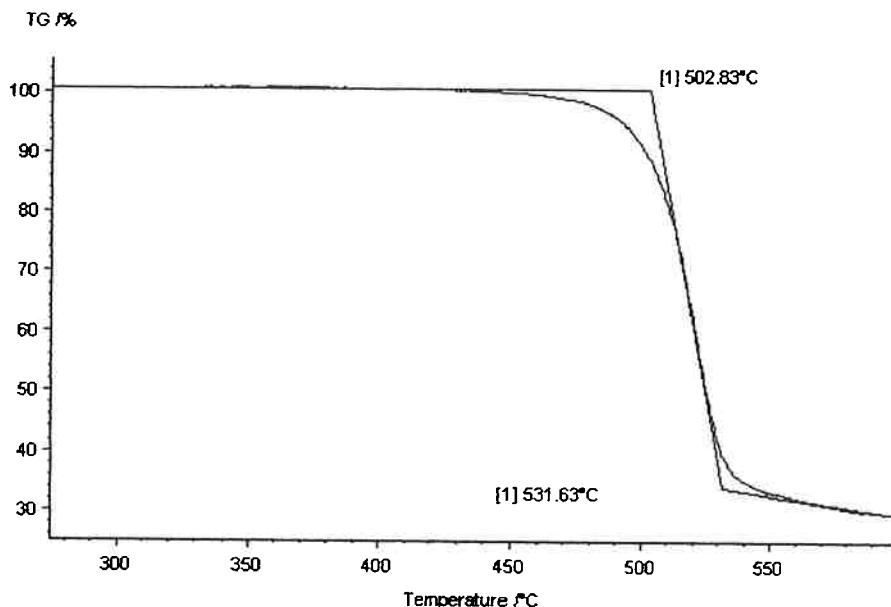


Figura 4.40 – Curva obtida com o  $T_D$  para PC.

#### 4.9) Temperaturas dos ciclos de soldagem:

Os resultados das análises das temperaturas dos ciclos durante a junção foram realizados de forma a comparar os picos de temperatura, os intervalos de tempo nos quais a junta permanece com temperaturas acima da  $T_G$  e da  $T_D$  em função dos pontos de coleta de dados.

Foram obtidas três amostras para cada par de parâmetros. Os pares de dados analisados estão apresentados nas tabelas 4.7 a 4.18 com as suas respectivas temperaturas médias e erro padrão.

Nesta tabela ainda são mostrados dados referentes ao intervalo de tempo no qual as amostras ficaram com temperaturas acima da temperatura de transição vítreia,  $T_G$ , e da temperatura de degradação,  $T_D$ . Além disso, a temperatura ambiente está indicada por  $T_A$ , ou seja, 22 °C.

**TABELA 4.7**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA  
 PMMA COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 15 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,25 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 238,00 ± 6,08            | 1,80 ± 0,06                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 245,33 ± 11,86           | 1,57 ± 0,10                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 222,75 ± 2,66            | 1,34 ± 0,05                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 238,50 ± 18,50           | 2,18 ± 0,12                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 200,66 ± 7,22            | 1,17 ± 0,11                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 217,00 ± 12,00           | 1,38 ± 0,22                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.8**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA  
 PMMA COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 20 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,60 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 219,50 ± 20,50           | 4,89 ± 2,13                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 350,33 ± 18,02           | 4,71 ± 0,91                       | 0,28 ± 0,16                       |
| <b>Ponto C</b> | 362,67 ± 5,89            | 4,81 ± 0,89                       | 0,34 ± 0,08                       |
| <b>Ponto D</b> | 270,50 ± 4,50            | 12,62 ± 2,22                      | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 244,50 ± 32,50           | 2,45 ± 0,89                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 272,00 ± 13,00           | 8,87 ± 3,45                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.9**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA  
 PMMA COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 25 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,30 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 317,00 ± 22,00           | 3,00 ± 0,64                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 344,00 ± 33,00           | 2,63 ± 0,55                       | 0,14 ± 0,14                       |
| <b>Ponto C</b> | 302,50 ± 12,50           | 2,45 ± 0,31                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 241,33 ± 18,55           | 3,87 ± 0,73                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 244,00 ± 12,00           | 1,16 ± 0,14                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 329,50 ± 1,50            | 2,40 ± 0,04                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.10**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA  
 PMMA COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 25 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,60 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 341,66 ± 6,96            | 8,66 ± 0,72                       | 0,15 ± 0,09                       |
| <b>Ponto B</b> | 384,67 ± 13,65           | 4,35 ± 0,04                       | 0,42 ± 0,01                       |
| <b>Ponto C</b> | 370,50 ± 10,50           | 5,37 ± 0,17                       | 0,39 ± 0,01                       |
| <b>Ponto D</b> | 321,33 ± 14,33           | 8,48 ± 1,26                       | 0,07 ± 0,06                       |
| <b>Ponto E</b> | 258,67 ± 6,96            | 4,35 ± 0,60                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 373,33 ± 3,17            | 5,66 ± 0,82                       | 0,40 ± 0,02                       |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.11**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA  
 PMMA COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 30 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,25 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 151,50 ± 24,50           | 1,08 ± 1,04                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 311,33 ± 26,91           | 2,21 ± 0,24                       | 0,06 ± 0,06                       |
| <b>Ponto C</b> | 317,33 ± 20,21           | 2,57 ± 0,44                       | 0,07 ± 0,06                       |
| <b>Ponto D</b> | 269,00 ± 9,61            | 2,94 ± 0,33                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 210,50 ± 37,50           | 1,83 ± 0,75                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 276,00 ± 28,79           | 1,81 ± 0,32                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.12**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA  
 PMMA COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 30 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,80 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 369,67 ± 4,25            | 5,49 ± 0,93                       | 0,57 ± 0,02                       |
| <b>Ponto B</b> | 318,00 ± 8,50            | 12,89 ± 0,99                      | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 301,33 ± 7,88            | 13,27 ± 0,59                      | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 372,67 ± 0,89            | 5,04 ± 0,62                       | 0,48 ± 0,03                       |
| <b>Ponto E</b> | 289,33 ± 15,19           | 8,21 ± 0,53                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 390,00 ± 17,47           | 4,97 ± 0,27                       | 0,47 ± 0,22                       |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.13**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA**  
**PC COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 15 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,25 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 218,00 ± 11,00           | 0,46 ± 0,08                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 190,50 ± 0,50            | 0,40 ± 0,04                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 177,50 ± 5,50            | 0,27 ± 0,01                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 224,00 ± 12,00           | 0,79 ± 0,01                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 181,00 ± 10,00           | 0,36 ± 0,03                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 202,00 ± 17,00           | 0,46 ± 0,08                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.14**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA**  
**PC COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 20 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,60 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 292,00 ± 6,00            | 1,70 ± 0,18                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 235,67 ± 0,33            | 1,10 ± 0,05                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 347,67 ± 10,33           | 1,95 ± 0,18                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 342,67 ± 4,18            | 4,37 ± 0,70                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 202,12 ± 12,00           | 1,36 ± 0,07                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 288,50 ± 11,50           | 1,38 ± 0,18                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.15**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA**  
**PC COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 25 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,30 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 231,33 ± 9,26            | 0,75 ± 0,11                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 223,33 ± 5,92            | 0,64 ± 0,05                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 253,00 ± 5,57            | 0,80 ± 0,02                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 265,00 ± 17,19           | 0,78 ± 0,06                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 237,21 ± 12,50           | 0,92 ± 0,04                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 252,33 ± 19,32           | 0,79 ± 0,12                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.16**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA**  
**PC COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 25 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,60 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 362,00 ± 18,10           | 2,48 ± 0,13                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 299,67 ± 11,33           | 1,85 ± 0,16                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 396,00 ± 17,00           | 2,46 ± 0,16                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 369,50 ± 5,50            | 8,98 ± 0,36                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 335,50 ± 22,50           | 2,94 ± 0,04                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 481,50 ± 5,50            | 3,20 ± 0,01                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.17**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA**  
**PC COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 30 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,25 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 344,00 ± 2,00            | 1,38 ± 0,16                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 343,67 ± 16,25           | 1,33 ± 0,09                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 330,33 ± 12,99           | 1,30 ± 0,09                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 302,00 ± 6,93            | 1,78 ± 0,09                       | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 206,50 ± 6,50            | 0,65 ± 0,11                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 350,67 ± 10,33           | 1,34 ± 0,06                       | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

**TABELA 4.18**  
**DADOS DE TEMPERATURA E TEMPO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS PARA**  
**PC COM PRESSÃO DE JUNÇÃO DE 30 psi E TEMPO DE JUNÇÃO DE 0,80 s.**

|                | Temperatura de pico (°C) | Tempo acima da T <sub>G</sub> (s) | Tempo acima da T <sub>D</sub> (s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Ponto A</b> | 392,67 ± 16,74           | 3,34 ± 0,14                       | 0                                 |
| <b>Ponto B</b> | 301,00 ± 16,20           | 2,32 ± 0,13                       | 0                                 |
| <b>Ponto C</b> | 461,33 ± 8,50            | 3,45 ± 0,28                       | 0                                 |
| <b>Ponto D</b> | 407,00 ± 20,00           | 15,27 ± 0,47                      | 0                                 |
| <b>Ponto E</b> | 290,33 ± 2,73            | 4,72 ± 0,14                       | 0                                 |
| <b>Ponto F</b> | 499,67 ± 4,67            | 4,3 ± 0,19                        | 0                                 |
| <b>Ponto G</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |
| <b>Ponto H</b> | T <sub>A</sub>           | 0                                 | 0                                 |

Para um estudo comparativo entre os dados de PMMA e PC presentes nas tabelas anteriores foram elaborados os gráficos das figuras 4.41 a 4.46.

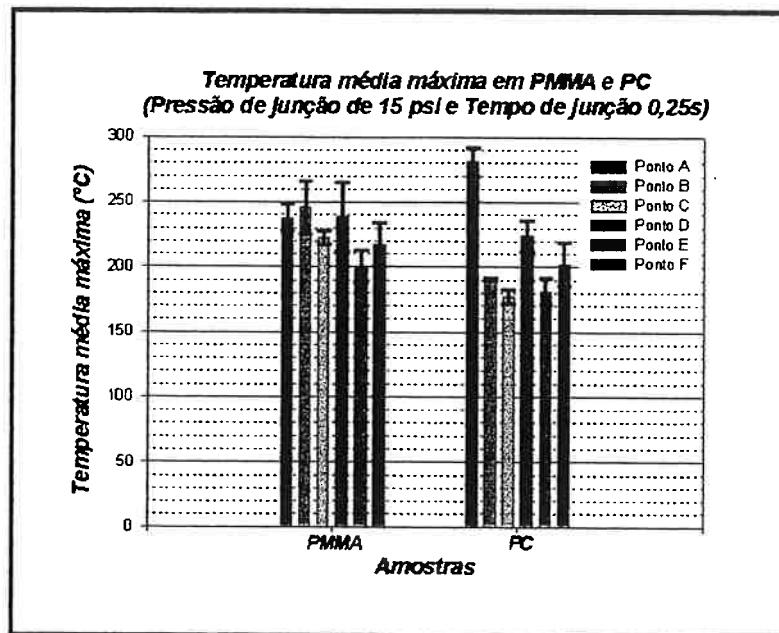


Figura 4.41 - Gráfico de temperatura para Pressão de junção de 15 psi e Tempo de junção de 0,25 s.

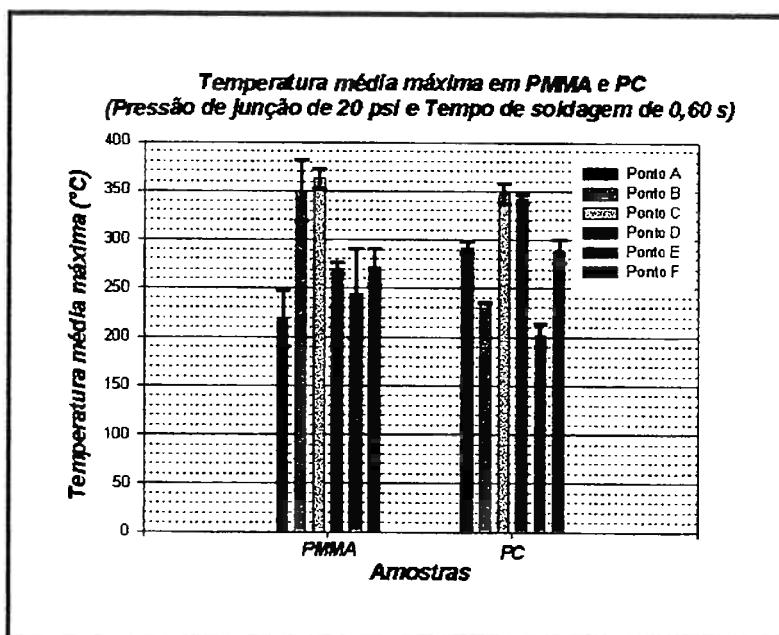


Figura 4.42 - Gráfico de temperatura para Pressão de junção de 20 psi e Tempo de junção de 0,60 s.

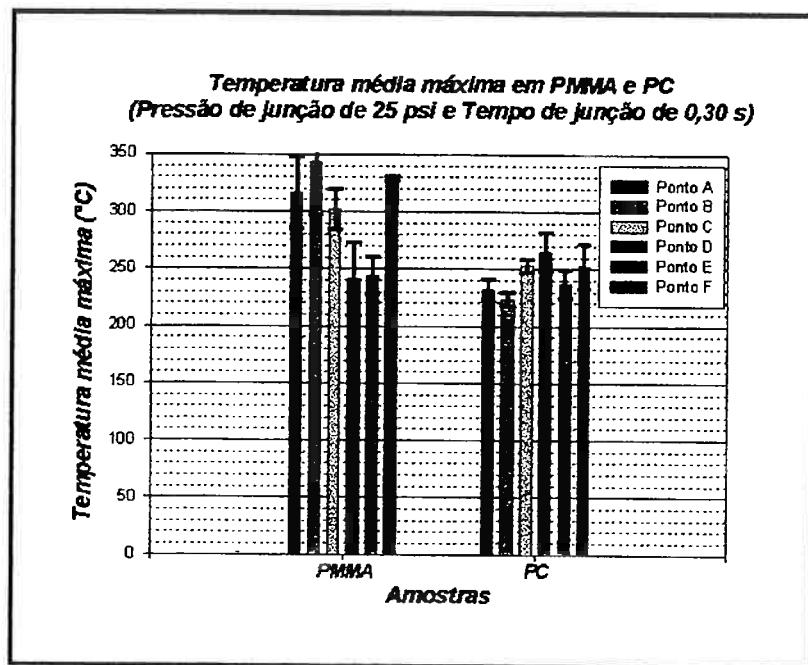


Figura 4.43 - Gráfico de temperatura para Pressão de junção de 25 psi e Tempo de junção de 0,30 s.

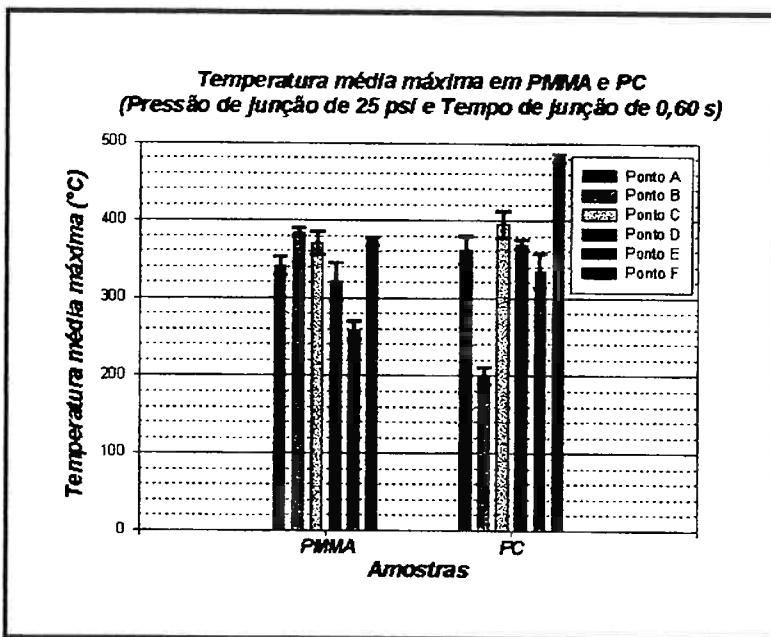


Figura 4.44 - Gráfico de temperatura para Pressão de junção de 25 psi e Tempo de junção de 0,60 s.

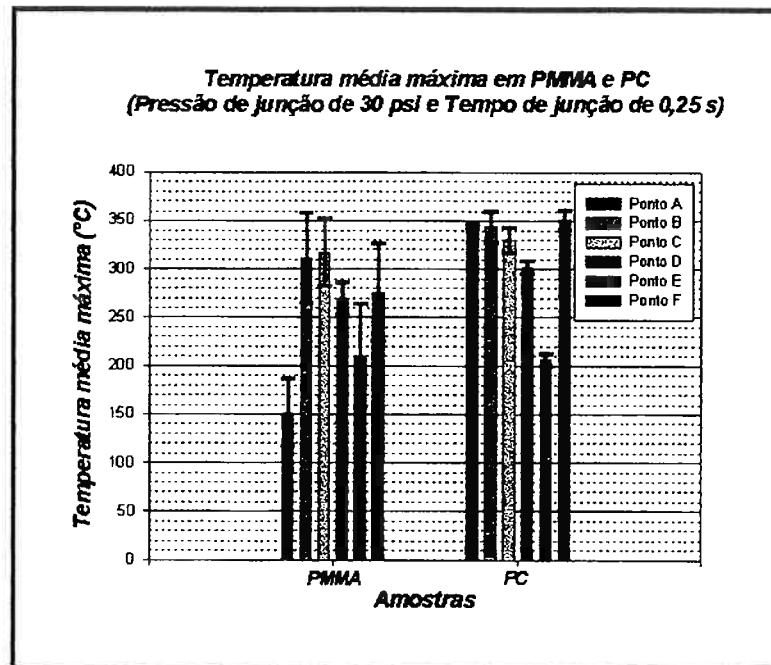


Figura 4.45 - Gráfico de temperatura para Pressão de junção de 30 psi e Tempo de junção de 0,25 s.

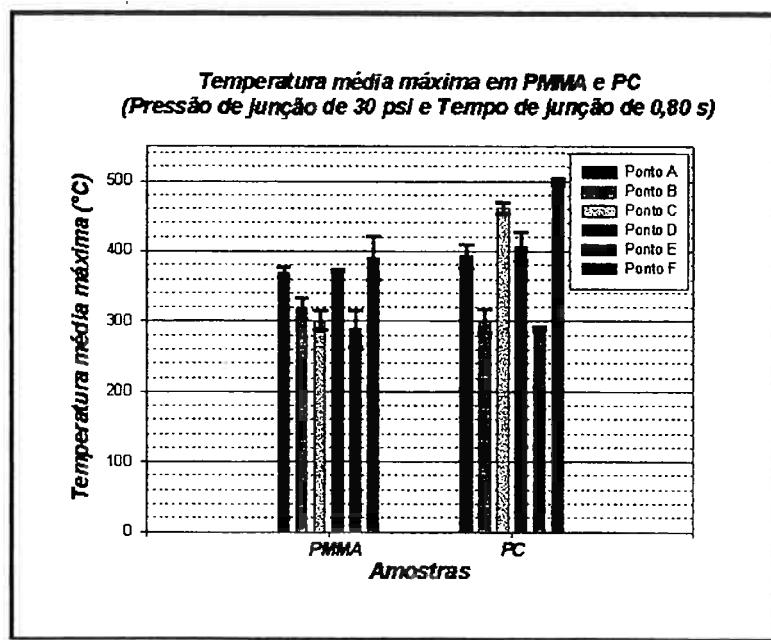


Figura 4.46 -Gráfico de temperatura para Pressão de junção de 25 psi e Tempo de junção de 0,80 s.

O processo de obtenção de dados referente às temperaturas das amostras durante a soldagem foi feita com a geração de gráficos da temperatura em função do tempo de ciclo. Ensaios preliminares comprovaram que 120 segundos após o momento inicial de soldagem as amostras de PMMA e PC já se encontravam à temperatura ambiente. As curvas apresentadas nos gráficos das figuras 4.47 e 4.48 apresentam os ciclos de temperatura para PMMA e PC respectivamente.

Cada gráfico tem um conjunto de oito curvas, cada uma representando um ponto de coleta de dados, conforme a figura 3.15. As curvas estão deslocadas no eixo das abscissas por motivo didático, evitando-se que elas estejam uma em cima da outra dificultando a sua visualização. Assim, todas as curvas têm o mesmo ponto de início comum em relação à temperatura inicial de 22°C e tempo de ciclo inicial 0 segundos.

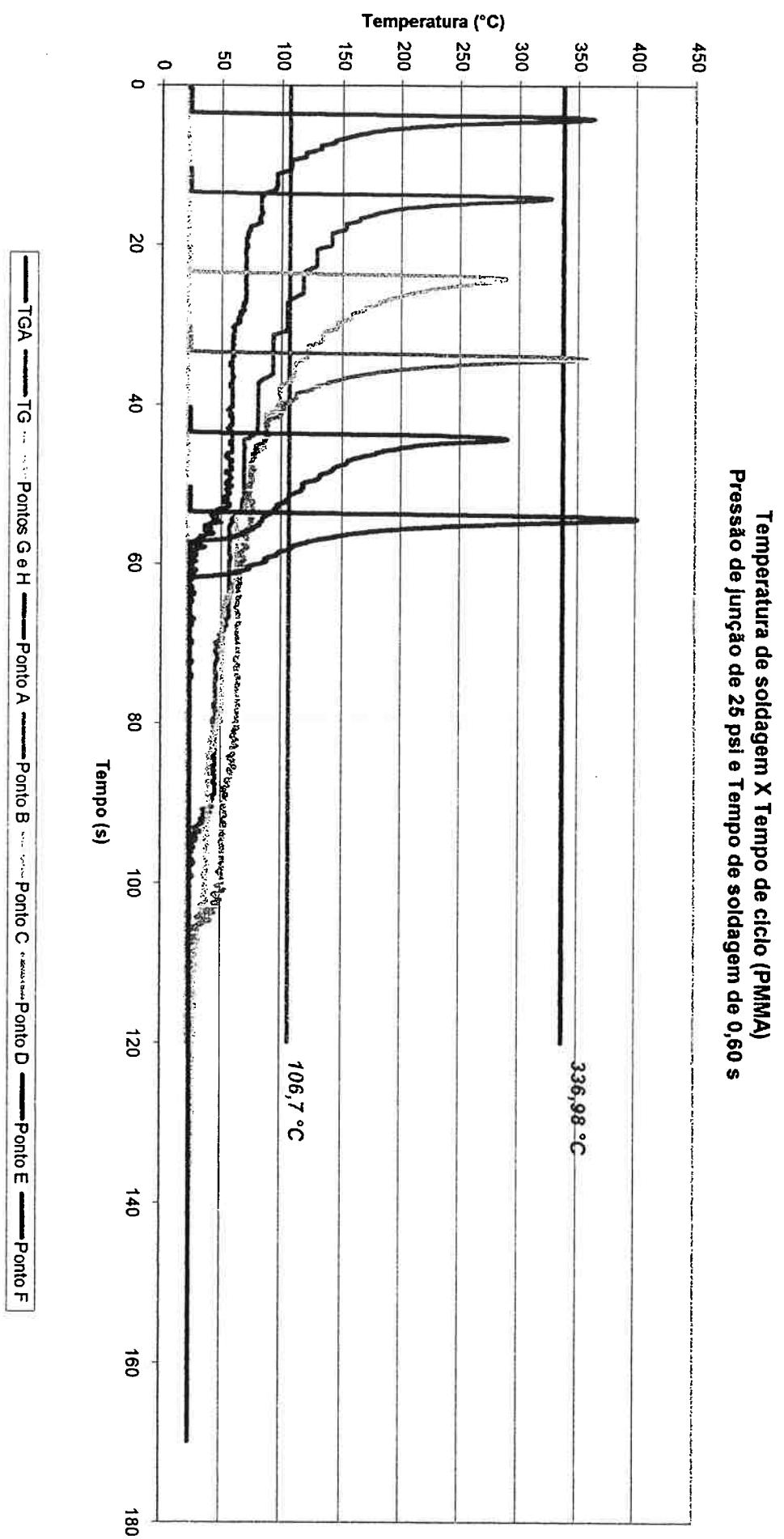
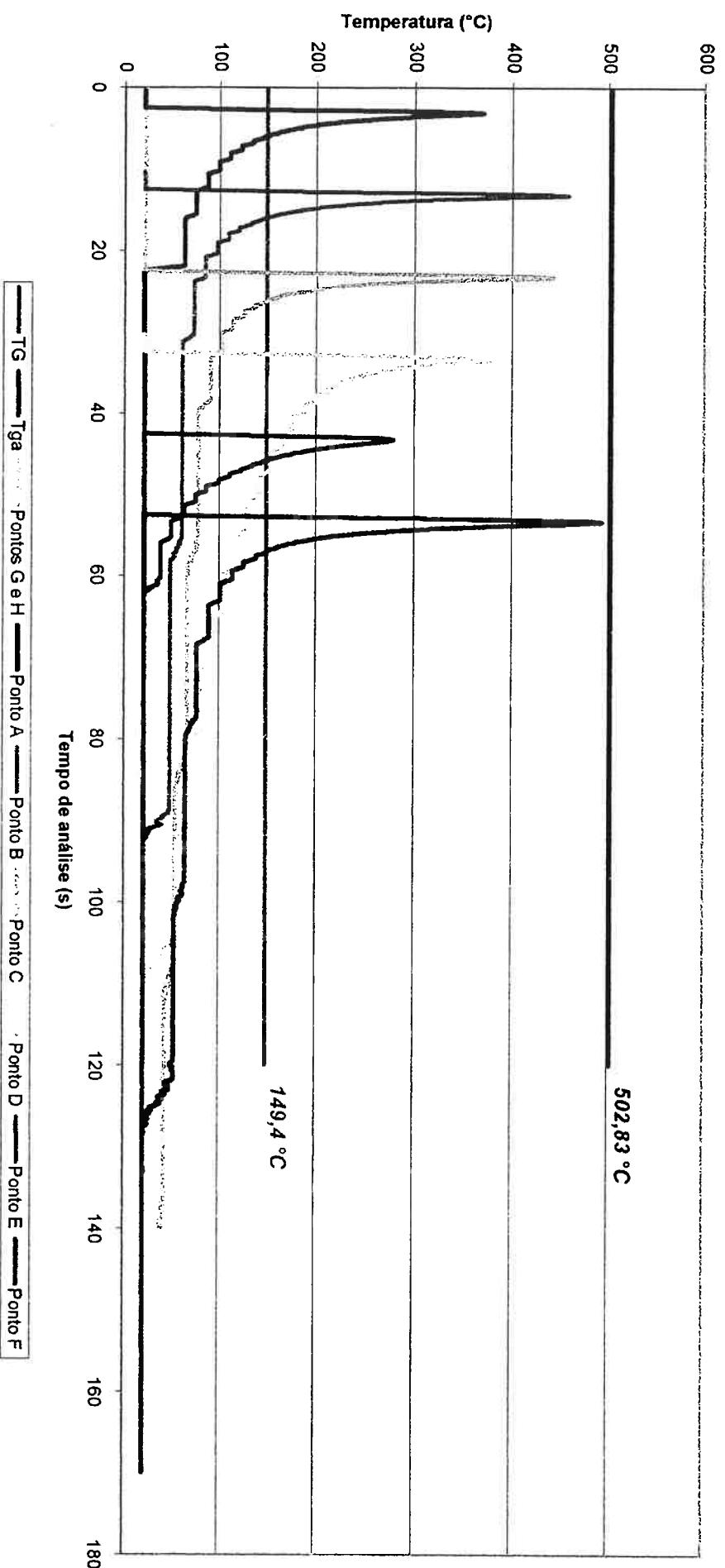


Figura 4.47 – Gráfico com curvas de temperatura durante a soldagem em função do tempo de ciclo para PMMA.

**Temperatura de soldagem X Tempo de ciclo de análise (PC)  
Pressão de junção de 30 psi e Tempo de junção de 0,80 s**



**Figura 4.48 - Gráfico com curvas de temperatura durante a soldagem em função do tempo de ciclo para PC.**

## 5) DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no último item serão discutidos e analisados nas páginas a seguir.

### 5.1) Análise microscópica:

Na micrografia da figura 4.1(a) percebe-se que a junção ocorreu. A região branca indicada pelas setas é a interface entre as juntas onde ocorreu a interação entre as macromoléculas que estavam na superfície do material. Ou seja, esta região é aquela onde ocorreu a soldagem. Ao contrário, na micrografia da figura 4.1(b) há uma fissura (de cor mais escura) que corresponde ao espaço que permaneceu entre as duas superfícies após a aplicação da onda ultra-sônica para a junção das mesmas. Desta forma esta região é aquela onde a soldagem não ocorreu.

A figura 4.2(a) mostra a aparência da junção na região onde o PMMA ficou opaco. O fato de o PMMA ficar opaco se deve a mudanças de propriedades óticas que ocorreram na interface. Por sua vez, a figura 4.2(b) mostra a aparência da junta submetida à soldagem, porém sem a interação das superfícies, sem a junção. Esta região é justamente aquela onde o PMMA continua transparente (fundo é preto), indicando que as propriedades óticas continuaram sendo semelhantes àquelas de antes do processo de soldagem.

Porém, na figura 4.2(c) está ilustrada a micrografia da junta numa região próxima à sua borda. Percebe-se que ocorre um fluxo de material para fora da junta, que no diagrama de soldabilidade é a região indicada pelo escoamento de material, fora da região interior às linhas vermelhas da figura 4.3. Esse fluxo ocorre durante a soldagem, enquanto a pressão de junção é aplicada. Nessa região ocorre a junção obtida pela vibração intramolecular, e uma expulsão de material proporcionada pela pressão aplicada. Com o estudo foi possível detectar que tal fenômeno ocorre quando as pressões foram superiores a 206,8 kPa (30 psi).

## 5.2) Diagramas de soldabilidade:

Analizando-se o diagrama de soldabilidade do PMMA, figuras 4.4 e 4.5, é perceptível o aumento da quantidade de área de soldagem em função do aumento da pressão de soldagem ou/e do tempo de soldagem. Porém, há um limite dado pela última curva no canto direito superior de cada gráfico, onde a junta obtida não sofreu nenhum tipo de problema que acarrete na sua anulação.

Para a direção H observa-se que uma quantidade de área soldada é obtida com pressões e tempos de soldagens menores do que os necessários às amostras na direção de injeção V.

Para as amostras de PC percebe-se o mesmo fenômeno observado pelo PMMA como ilustra as figuras 4.10 e 4.11.

Desta forma, para ambos os materiais, o aumento da pressão de soldagem e o aumento do tempo de soldagem (sozinhos ou em conjunto) acarretam no aumento da quantidade de área soldada até um limite determinado por problemas na junta ilustradas nas figuras 4.6 a 4.9.

Além disso, as amostras de direção de injeção H apresentam uma quantidade de área soldada maior do que as amostras de direção de injeção V para os mesmos valores de pressão e tempo de soldagem.

## 5.3) Quantidade de área soldada:

### 5.3.1) PMMA

Analizando as curvas de área de soldagem em função do tempo de soldagem (conforme figuras 4.16 a 4.18) foi possível verificar que as amostras com direção de injeção H tiveram uma porcentagem de área soldada relativamente maior (de 3% a 6% em média) se comparadas com

as amostras de direção de injeção V para as pressões de soldagem de 103,4 kPa (15 psi) e 137,9 kPa (20 psi) com um índice de correlação linear considerado dentro dos limites estatísticos ( $r^2 > 0,85$ ).

Para a pressão de 206,8 kPa (30 psi) não foi possível verificar qual direção fornece uma área de soldagem maior, pelo fato do índice de correlação linear estar abaixo de 0,85. Desta forma, para esta pressão não há a diferenciação sobre qual a direção onde a área soldada é maior.

Tal resultado era esperado pelo fato da diferente forma de arranjo em que as macromoléculas estão alocadas em cada tipo de amostra em função da direção de injeção. Na direção H provavelmente o conjunto de macromoléculas tem um arranjo espacial, de forma a se obter um certo grau de orientação das mesmas. Ou ainda, neste tipo de direção as macromoléculas tendem a ter um menor grau de emaranhamento em relação à direção V.

Esta diferença de emaranhamento das macromoléculas pode ser observada por um pacote adicional de energia descarregado pelo equipamento nas juntas com direção de injeção V em relação à direção H (figuras 4.23 a 4.25), obtendo-se, mesmo assim, uma quantidade de área soldada menor.

Na direção de injeção V o conjunto de macromoléculas, provavelmente, deve ter um grau de orientação inferior ao alcançado pela direção H, podendo também as macromoléculas estar mais emaranhadas, devido ao fato do fluxo de material durante a injeção no material não ter uma orientação definida. Nas figuras 5.1 e 5.2 é possível analisar está discussão verificando a possível disposição das macromoléculas em função do canal de injeção (seta vermelha).

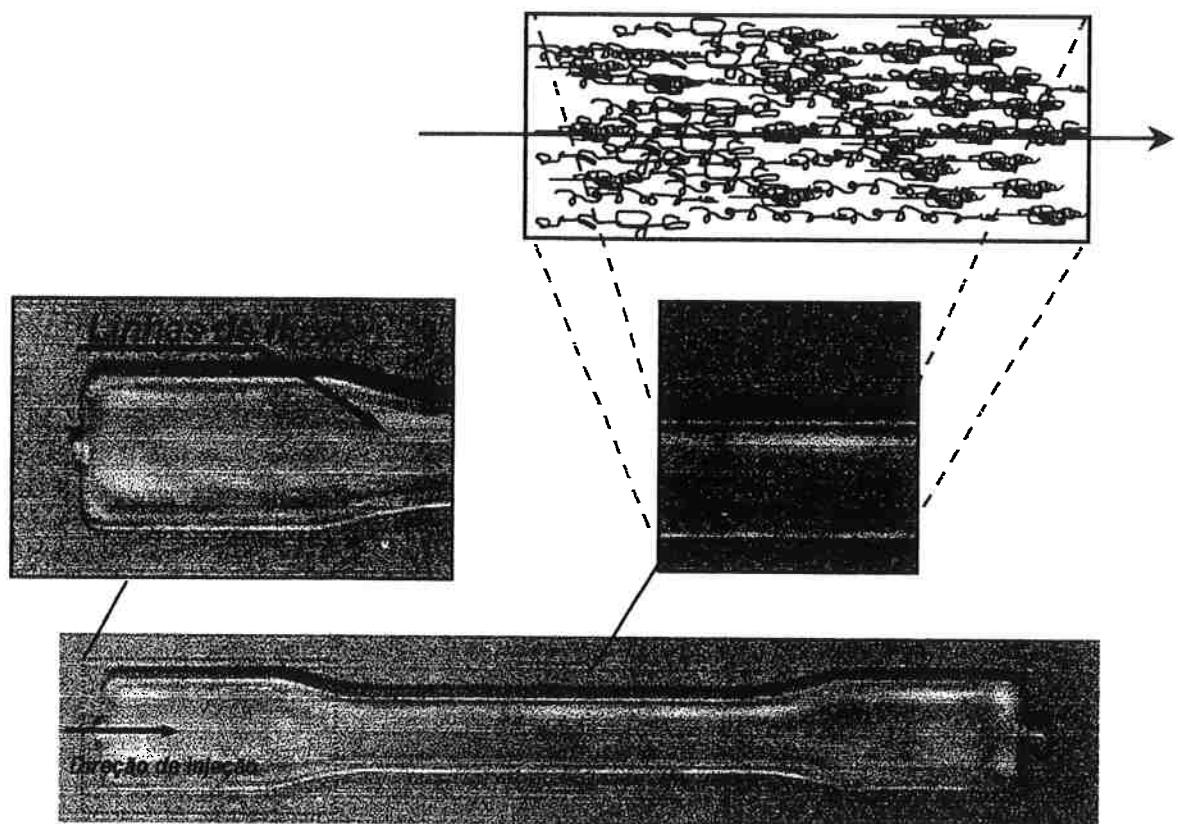


Figura 5.1 – Representação da ordenação de um conjunto de macromoléculas na direção H com a seta indicando o canal de injeção.

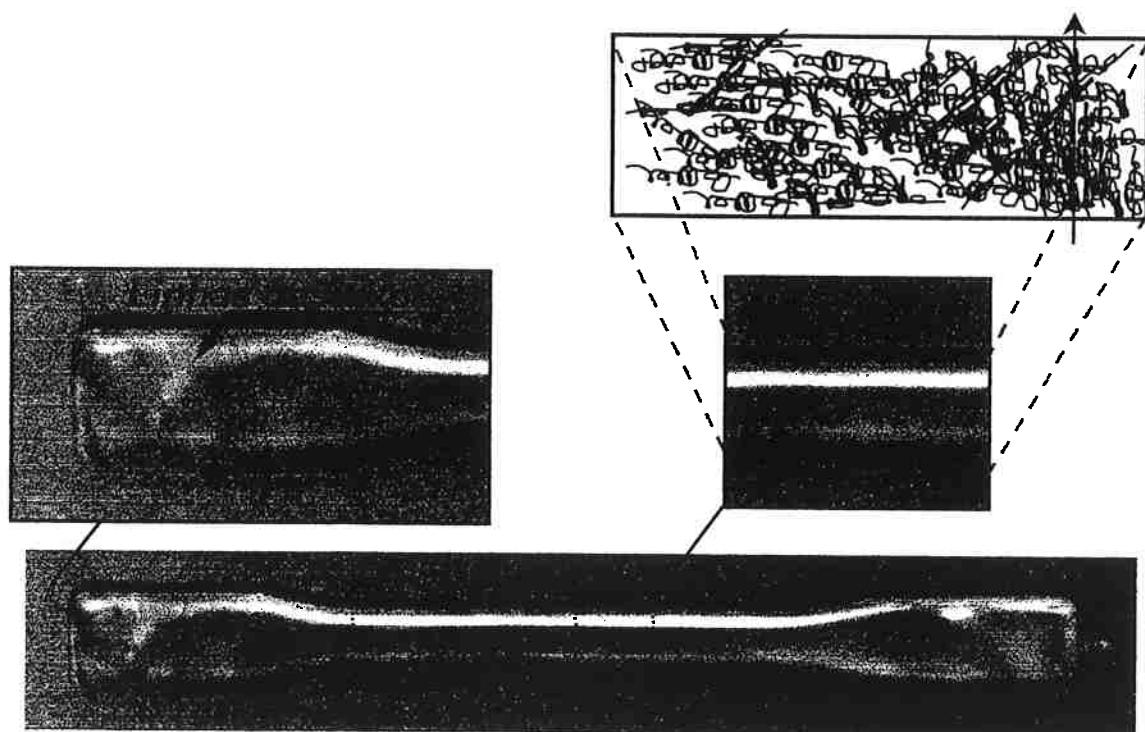


Figura 5.2 – Representação da ordenação de um conjunto de macromoléculas na direção V com a seta indicando o canal de injeção.

Além disso, as diferenças entre as áreas de soldagens obtidas para o PMMA se devem ao fato de seu coeficiente de absorção acústica ( $\alpha$ ) ser muito diferente em função da direção de injeção, como ilustra a tabela 4.5. Sendo assim, pode-se concluir dois fatos.

Primeiramente, a diferença de quantidade de área de soldagem obtida em função das direções de injeção está diretamente ligada a diferenças de coeficiente de absorção da onda ultra-sônica. E, como em ambas as direções o polímero foi injetado com os mesmos parâmetros de injeção, pode-se concluir que a orientação das cadeias influí diretamente na capacidade de soldagem, que resulta em diferentes quantidades de área soldada.

### 5.3.2) PC

Os resultados de área soldada para o PC comprovam que não existe diferença na área soldada para este tipo de polímero, conforme figuras 4.26(a) a 4.26(d), em função das direções de injeção H e V, nas mais diferentes condições de pressão e tempo de junção, considerando-se um intervalo de confiança de 95%.

Isso se deve ao fato da diferença de coeficiente de absorção do PC ter valores próximos para as duas direções de injeção estudadas, indicando que a diferenciação da direção de injeção não afeta o material, como ilustra a tabela 4.5.

### 5.3.3) PC X PMMA

Com a análise das figuras 4.27 a 4.33 é possível verificar que as quantidades de área obtidas para o PMMA sempre são maiores do que as obtidas com a junção do PC em função dos parâmetros de junção (pressão, tempo e direção de injeção), considerando-se um intervalo de

confiança de 95%. Este resultado independe das direções de injeção estudadas. Com isso, a soldabilidade do PMMA é mais alta do que a do PC, mesmo sendo o seu coeficiente de absorção mais alto do que o do PC, como ilustra a tabela 4.5.

Outra característica do material que está ligado a uma maior quantidade de área soldada no PMMA em relação ao PC está ligado ao índice de fluidez de ambos materiais. Comparando-se a tabela 3.1 e 3.2 verifica-se que o índice de fluidez do PC é de 6 a 10 vezes maior do que o do PMMA. Assim, a viscosidade do PMMA é menor o que acarreta em uma menor quantidade de material amolecido expulso para fora da junta, resultando numa quantidade de área soldada maior.

Este resultado da quantidade de área soldada em função da viscosidade (ou índice de fluidez) vai de encontro com a idéia de Benatar [13-14] e Dara [15] que teorizam a lei de potência para fluidos, indicando que um termoplástico com baixa viscosidade pode proporcionar o contato mais rápido do que um polímero com uma viscosidade alta. O que Benatar e Dara indicam por contato pode ser comprovado pela quantidade de áreas soldadas analisadas neste relatório.

#### 5.4) Resultados acústicos:

Os resultados apresentados na tabela 4.5 mostraram que para a direção H, o intervalo de tempo para a atenuação acústica é menor do que para a direção V. Assim no corpo de prova injetado na direção H a freqüência de ressonância é mais alta do que na direção V.

A atenuação acústica no corpo de prova injetado na direção H é maior do que para o corpo de prova na direção de injeção V. Considerando-se que a onda ultra-sônica tem uma energia associada, responsável pela capacidade de soldabilidade do polímero pode-se concluir

com estes dados que tal energia tem um grau de retenção maior nos corpos de prova com direção de injeção H.

Desta forma, a capacidade de retenção da onda na interface das amostras com direção H é maior do que na direção V, acarretando em um aumento da quantidade de área soldada. Além disso, as amostras de PMMA apresentaram valores de atenuação acústica e de área soldada maiores do que as amostras de PC.

Com isso a atenuação acústica é diretamente proporcional à quantidade de área soldada obtida em uma junta.

### 5.5) Ensaios mecânicos:

No ensaio de tração do corpo de prova sem a soldagem percebeu-se uma diferença nos resultados obtidos em relação aos esperados. Esta diferença pode estar ligada ao processo de injeção, onde vale citar que o molde utilizado difere do apresentado pelo fornecedor, justamente na forma do canal de injeção do material. O canal de injeção obtido injeta o polímero nas partes inferiores da peça como na figura 5.3(a), enquanto que o utilizado pelo fornecedor injeta o polímero no meio da peça, como ilustrado na figura 5.3(b).

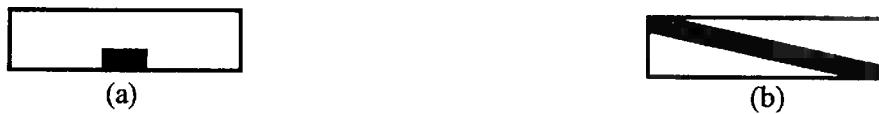


Figura 5.3 - Comparativo entre os canais de injeção em corpos de prova de tração (a área vermelha compreende ao canal de injeção). Na figura 5.3(a) está o corpo de prova obtido na pesquisa e na figura 5.3(b) o obtido pelo fornecedor.

Para os ensaios de cisalhamento da junta notou-se que os corpos de prova foram fraturados em regiões análogas à região que foi submetida à soldagem.

Desta forma, só foi possível determinar o esforço mínimo que resiste a junta. Outra hipótese é considerar que o ensaio não foi uniaxial, pois a tração de ruptura foi menor do que

àquela observado nas amostras sem a junção. Mesmo assim, determinou-se qual foi o esforço solicitado na junta, sendo possível estimar um valor mínimo de resistência da mesma. Assim as juntas suportaram esforços que tem um valor mínimo semelhante à tensão máxima (tensão de escoamento) a qual resistiu o corpo de prova.

Na figura 5.4 está ilustrada a fratura que ocorreu numa seção do corpo de prova que não corresponde à região de soldagem. O que ocorreu foi um ensaio de tração puro, pois o corpo foi tracionado e fraturado num plano perpendicular ao da força aplicada (setas vermelhas), conforme esquematizado na figura 5.5.

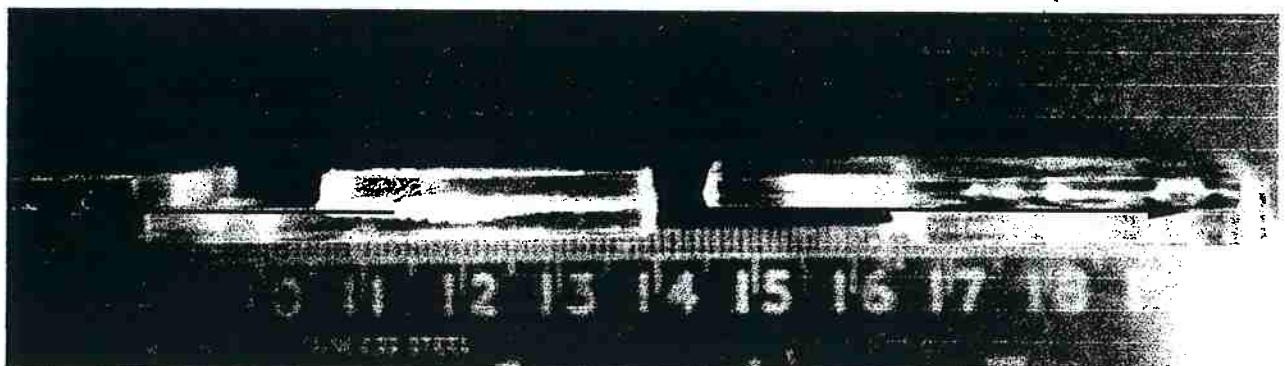


Figura 5.4 - Corpo de prova fraturado numa região acima da área de soldagem.

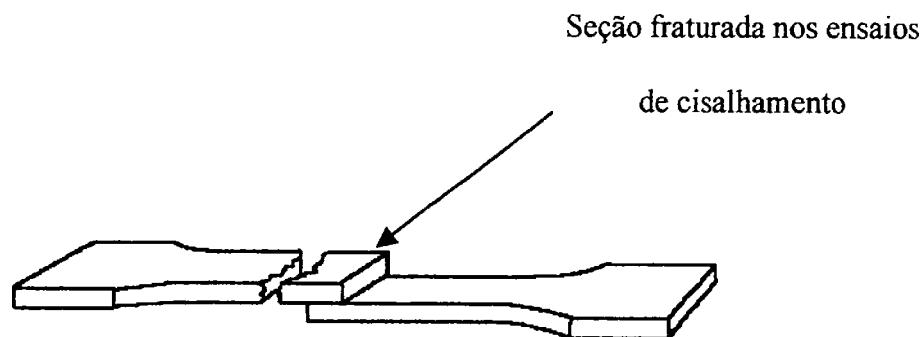


Figura 5.5 - Esquematização do plano de fratura nas amostras analisadas na pesquisa (sem escala).

A fratura ocorreu na região apresentada na figura 5.5 pelo fato da área obtida por soldagem resistir mais aos esforços mecânicos do que a área solicitada por tração do próprio material. Assim, pode-se concluir que a solda obtida é de boa qualidade.

### 5.6) Temperatura dos ciclos de soldagem:

Com o estudo foi possível concluir que o aumento do tempo de junção acarreta em aumento da temperatura de pico e do tempo no qual a temperatura permanece acima da  $T_g$ , conforme as tabelas 4.9 e 4.10 (para o PMMA), 4.15 e 4.16 (para PC), onde a pressão de junção é constante (25 psi) e o tempo de junção varia. Além disso, o aumento de tempo de junção aumenta diretamente o tempo no qual a temperatura permanece acima da  $T_d$ , para o PMMA.

Comparando-se as tabelas 4.7 e 4.9 (para PMMA) e 4.14 e 4.16 (para PC) é possível concluir que o aumento da pressão de junção acarreta em aumento das temperaturas de pico e do tempo no qual a temperatura permanece acima da  $T_g$ . O aumento da pressão de junção, assim como o tempo de junção, influí no aumento da  $T_d$ .

Todos os casos onde a temperatura excedeu a  $T_d$  estão ligados ao fato do material ser o PMMA, e para o PC não houve nenhum momento em que a temperatura durante a soldagem ultrapassou a sua temperatura de degradação. Porém uma comparação entre o PMMA e o PC não foi fácil, analisando-se as figuras 4.41 a 4.46, pelo fato dos valores de temperatura variarem muito sem uma lógica aparente.

Foi possível verificar que para pressão de junção de 15 psi e tempo de junção de 0,25 s, as temperaturas alcançadas pelo PC são mais altas ou semelhantes às alcançadas pelo PMMA, com exceção ao ponto A.

Já para pressões de 20 psi as amostras de PMMA tiveram temperaturas máximas superiores ou semelhantes às alcançadas pelo PC, exceto no ponto A.

Para a pressão de junção de 25 psi as temperaturas de PMMA estiveram acima às do PC para o tempo de junção de 0,30 s, e para o tempo de junção de 0,60 s também com exceção do ponto F.

Para a pressão de junção de 30 psi as temperaturas de PMMA e PC foram semelhantes, com exceção dos pontos A e F. Isto se explica, pelo fato de ambos materiais chegarem a um

limite onde suas temperaturas máximas de soldagem passam a ser muito próximas, com diferentes taxas de resfriamento em função de seus coeficientes de condutibilidade térmica.

Além disso, os pontos A e F apresentam instabilidades em relação ao PC e PMMA e aos parâmetros de soldagem pelo fato de se tratarem de pontos que estão em regiões de contorno.

A condutibilidade térmica pode ser averiguada analisando-se o tempo no qual as amostras permaneceram acima da  $T_g$  durante o processo. Comparando tais valores nas tabelas os tempos de PMMA sempre foram superiores aos obtidos com o PC para os mesmos parâmetros de junção. Sendo assim, a condutibilidade térmica do PC é maior do que a do PMMA, o que justifica que o resfriamento do PC seja mais rápido do que o do PMMA.

## 6) AGRADECIMENTOS

Cabe o agradecimento a todos aqueles que de alguma forma suportaram e auxiliaram o andamento de todo este trabalho.

Um agradecimento especial à FAPESP pela Bolsa Auxílio Processo 99/00908-3 e Jovem Pesquisador Processo 95/9113-2 que auxiliaram o desenvolvimento de todo o trabalho.

Aos professores que orientaram este trabalho, Profº Dr. Sérgio Duarte Brandi e Profa Drª Nicole Raymonde Demarquette, responsáveis por apresentar-me o mundo científico, sem o qual não haveria o desenvolvimento de minha massa crítica.

A Cia. Química Metacril pela doação de 15 kg de poli (metacrilato) de metila e a Bayer Polímeros pela doação de 25 kg de policarbonato. Sem a doação de tais empresas não seria viável o desenvolvimento do estudo desde de seu inicio.

Aos companheiros do Laboratório de Junção de Materiais: Antonio José Ramirez Londoño; Claudia Patricia Sérna Girardo; Manoel Carrera Neto; Kátia Marquez Martorano; Élcio Michiharu Ishizuka; José Vinicius de Carvalho Gavioli; Rômulo Nagumo; e Francisco de Paula Pinheiro , pelas dúvidas sanadas, pelos conhecimentos na área de soldagem, e pelos momentos de reflexão e confraternização gerados nos Congressos da ABS e do SIICUSP.

As técnicas do Laboratório de Análise e Processamento de Polímeros: Juliana Cândice de Moraes; Elaine Palmezan; Érica Weiruth Ambrozin; Sarah Santos de Almeida; e Melissa Rossatto pela injeção dos corpos de prova e auxílios nos diversos Congressos. Aos colegas do Laboratório de Análise de Materiais Poliméricos: Lincoln Silva Gomes; Augusto Teruo Morita; Paulo Henrique Pierin Macaúbas; José Carlos Moreira; Guillermo Palmer Martin; Ocileide Custódio da Silva ; Adriana Martinelli de Sousa, pelos conhecimentos na área de polímeros e pelos momentos de reflexão e confraternização em diversos Congressos, principalmente o 14º CBECIMAT e o 6º ABPOL.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais: Ivo de Macedo Gomes; Márcia Pereira da Silva; e Maria Cristina Biasoli, por terem suportado os meus momentos de impaciência frente a alguma burocracia. Em especial aos técnicos Antonio Lívio da Silva, José Rubens Beserra de Carvalho, e Danilo A. de Almeida Filho que ajudaram numa das partes mais difícil do trabalho, a confecção dos dispositivos.

A Profª Drª Wang Shu Hui pela utilização dos equipamentos de DMTA e pela ajuda nos esclarecimento de dúvidas.

Ao Engº Raúl Gohr Jr. do Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina pela assessoria no funcionamento da placa Interdata.

Ao Profº Dr. Júlio César Adamowski do Departamento de Engenharia Mecânica pela utilização de seus equipamentos de análise por ultra-som, e ao seu técnico Fábio de Moraes pelo auxílio na utilização do MatLab.

Por fim, aos meus pais, irmãos, e minha namorada que sempre me incentivaram no desenvolvimento deste estudo, entendendo o motivo de alguns finais de semana que passei longe deles, ou em Congressos ou nos laboratórios.

## 7) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Potente, H.; "Ultrasonic Welding – principles and theory" in "Joining Plastics in Production", 1988, Cambridge – UK, Crampton & Sons Limited – The Welding Institute;
- 2) Branson Ultrasonics Corporation; "Manual do operador – Soldadoras integradas série 900IW"; 1996; São Paulo – Brasil;
- 3) Profit, A.; "The applications of ultrasonic welding" in "Joining Plastics in Production", 1988, Cambridge – UK, Crampton & Sons Limited – The Welding Institute;
- 4) "Informe técnico PW-2 da Eurosonics Tecnologia Industrial Ltda.", 1983; São Paulo – Brasil;
- 5) Nonhof, C. J. & Luiten, G.A.; "Estimates for Process Conditions During the Ultrasonic Welding of Thermoplastics", edited by Society of Plastics Engineers in Journal of Polymer Engineering and Science, 1996, vol. 36, nº 9, pg. 1177 - 1183;
- 6) Liu, S. J., "Optimizing the joint strength of ultrasonically welded thermoplastics", Advances in polymer technology, New York, vol. 18, n. 2: p. 125 – 135, 1999;
- 7) Tadmor, Z.; Gogos, C. G., "Principles of Polymer Processing"; 1<sup>a</sup> ed. em inglês, New York, John Wiley & Sons, 1979, p. 55
- 8) Mano, E. B.; "Polímeros como materiais de engenharia", 1<sup>a</sup> ed. em português, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda., 1991, p 25-26
- 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", Elsevier, Amsterdan, 2<sup>nd</sup> edition, 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, 1997, pg. 89 – 92;
- 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 all, "Methods for fusion bonding thermoplastic composites", SAMPE Quarterly, 1986;
- 15) Dara, P. H. et all; "Thermoplastic matrix composite processing model", Interim Report nº 57; 1985;
- 16) Companhia Química Metacril; "Catálogo técnico de materiais"; em <http://www.metacril.com.br>, 1999, São Paulo.

- 17) "Informe técnico PW-1 da Eurosonics Tecnologia Industrial Ltda.", 1983; São Paulo – Brasil;
- 18) Application Technology Information by Bayer Polymers S.A.; ATI 8004 d,e; 1997, United Kingdom;
- 19) Adamowski, J. C., "Medição de propriedades físicas de líquidos por ultra-som"; Processo FAPESP 98/00806-3;
- 20) Moraes, F. de; Projeto: "Desenvolvimento de Transdutores Piezoelétricos Flextensionais usando Otimização Topológica", Processo FAPESP 00/00841-5, 2000;
- 21) Costa, M. L. et al; "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;
- 22) ASTM D 638M – 99, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (metric)", 1999
- 23) UTHSCSA, "Image Tool", versão 2.00, 1996;
- 24) Bretas, R. E. S.; "Processamento de polímeros", 1984, São Carlos – BR, DEMa – Universidade Federal de São Carlos, pg. 56-81;
- 25) "Manual da placa de aquisição de dados e comando de equipamentos INTERDATA"; Sisdatasolda – Laboratório de Soldagem da UFSC; 1992;
- 26) Brandup, J., Immergut E.H.; "Polymer Handbook", 3ª edição, 1989, John Wiley & Sons, pg 219 e 233;