

## 5 Discussão dos resultados

É importante observar a ausência de dados na literatura sobre soldagem de poliamida 12 pelo processo de termofusão, para comparação específica com os dados obtidos nesta Dissertação. A análise dos resultados foi realizada considerando somente os dados obtidos nesta pesquisa e comparando os mesmos, quando possível, com outros dados da literatura, porém não necessariamente envolvendo soldagem de poliamida 12.

### 5.1. Ensaio de tração

Para todas as condições de soldagem estudadas, os valores dos limites de resistência das amostras das juntas soldadas, quando comparadas nas condições com e sem rebarba, não apresentaram diferenças significativas como mostrado na tabela 4-3 e tabela 4-4. Estes resultados indicam que a presença de rebarba não é um elemento fragilizante ou redutor da resistência das juntas soldadas. Porém os corpos-de-prova que apresentavam rebarba se romperam em tempos menores.

No entanto, quando comparamos o valor do LR do tubo na condição de como recebido é observada uma redução em torno de 17 a 18% para o material com rebarba e de 16 a 18% para o material sem rebarba. Estes resultados mostram que ocorre uma redução do LR após a soldagem do material e a presença de rebarbas parece não possuir uma influência significativa. A condição que apresenta a maior redução no valor do LR foi o conjunto 3, onde a temperatura de soldagem foi de 220°C, com tempo de resfriamento de 5 minutos e resfriamento final em água. Este resultado poderia indicar que o tempo de 5 minutos e a temperatura de 220°C não tenham sido suficientes para que o houvesse a cura, no entanto nenhum dos resultados obtidos por DSC (Tabela 4-7) ou RX (Tabela 4-12) mostram qualquer indicação de alteração, como por exemplo na cristalinidade da junta.

A umidade absorvida do ar age como plastificante nas poliamidas, pois elas possuem propriedade higroscópica. Essa ação diminui a resistência à tração e

rigidez, porém confere melhor resistência ao impacto [52]. Isto deve-se ao fato de que as moléculas da água afastam as cadeias, enfraquecendo as interações intermoleculares e diminuem então a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e a cristalinidade do material.

Alternativamente, os parâmetros de soldagem podem ser ajustados para compensar os efeitos da água absorvida [53].

A deformação das juntas soldadas não foi considerada, devido à diferença de comportamento mecânico entre a o cordão de solda e o material de base. Porém, em aspectos qualitativos é possível analisar a ductilidade das amostras através da redução da espessura e largura dos corpos-de-prova.

Tanto a amostra do conjunto 5 soldada a 220°C, quanto a amostra do conjunto 6, soldada a 240°C e resfriadas em água, se deformaram bastante antes da ruptura, com valores altos de redução de espessura e largura (28% - 31%).

## 5.2. Ensaio de Rigidez

Os resultados dos ensaios de rigidez das amostras dos tubos na condição de conforme recebido apresentaram valores de rigidez mais baixos do que os valores apresentados pelos tubos soldados (Tabela 4-5). Isso pode ser justificado pelo fato da rigidez apresentar grande dependência da espessura da parede do tubo. Como as juntas soldadas possuem o cordão de solda e também rebarba, esse material em excesso pode afetar as propriedades de rigidez, conferindo maiores valores.

Para que o tubo sofra deflexão, o raio de curvatura deve apresentar mudanças. A curvatura axial gera uma deformação radial, que resulta em ovalização do tubo. A rigidez radial do tubo,  $EI_r$  pode ser considerada como uma função do módulo de elasticidade à flexão ( $E$ ) e da espessura de parede ( $t$ ) do tubo, uma vez que o momento de inércia axial do tubo ( $I_r$ ) está relacionado com a espessura (16) [3].

$$I_r = \frac{t^3}{12} \quad (16)$$

### 5.2.1 Influência da temperatura de soldagem

As comparações feitas entre os conjuntos soldados com mesmo tempo de resfriamento sob pressão, e tipo de resfriamento, variando somente a temperatura, como mostrado na figura 4-2 e figura 4-3, demonstraram que a temperatura de soldagem não influenciou o limite de resistência das juntas soldadas.

No entanto na avaliação da rigidez o conjunto 2, entre todos os conjuntos, é o que apresenta maior rigidez, resistindo portanto à deformação sob uma força de aproximadamente 10KN. Para todas as outras condições de soldagem não houve variação no valor de rigidez obtido.

De acordo com as análises termogravimétricas as temperaturas de soldagem utilizadas (220°C e 240°C) estão bem abaixo das temperaturas de degradação térmica, (conjuntos soldados, os quais estão entre 430,61°C – 436,32°C), conforme tabela 4-9.

Deste modo é possível afirmar que os parâmetros utilizados não permitiram a ocorrência de degradação térmica em relação ao material original, com temperatura inicial de degradação de 437°C.

### 5.2.2 Influência do tipo de resfriamento

Os resultados dos testes de tração, Figura 4-4 e Figura 4-5, indicaram que nas juntas resfriadas em água existe uma tendência a apresentar maior limite de resistência, sendo estes em média de 4 a 5 MPa mais altos. No entanto, as juntas resfriadas em água apresentaram menor rigidez nos testes por compressão.

A menor rigidez apresentada pelas juntas dos conjuntos 5 e 6 pode ser justificada pelo resfriamento forçado em água. A ação plastificante da água no material, provoca uma separação entre as macromoléculas do polímero, promovendo a flexibilidade [54].

Para o tempo de resfriamento com aplicação de pressão de 11 minutos os conjuntos 1 e 5 soldados a 220°C, apresentaram grau de cristalinidade similares, assim como o conjunto 2 soldado a 240°C. No entanto o conjunto 6 apresentou cristalinidade menor como indicado na Tabela 4-7.

Observa-se que o conjunto 6 soldado à mesma temperatura (240°C) que o conjunto 2, possui o mesmo valor de rigidez dos conjuntos soldados a 220°C

indicando que possivelmente o tipo de resfriamento possa ter contribuído para esta diferença, porque independente da temperatura de soldagem, o resfriamento ao ar aumenta a rigidez da junta (Figura 4-12 e Figura 4-13) sendo a maior rigidez a 240°C com resfriamento ao ar.

Estes resultados sugerem que o tipo de resfriamento aliado a temperatura de soldagem podem interferir na cristalinidade da amostra e portanto na sua ductilidade.

### **5.3. Influência do tempo de resfriamento com pressão**

O processo de cura resulta de reações químicas entre macromoléculas localizadas na superfície do material, e tem sido recentemente estudado em polímeros policondensados lineares, como as poliamidas [55].

Na fase de resfriamento, as peças são unidas sob pressão, fazendo com que o material fundido flua para fora da interface polimérica ao mesmo tempo em que ocorre o resfriamento e a solidificação das peças soldadas. Devido à estrutura molecular final e às possíveis tensões residuais geradas durante o resfriamento da junta, é importante manter a pressão durante esta fase a fim de evitar uma deformação das peças [53].

A microestrutura final da junta soldada, formada durante a fase de resfriamento, influencia as propriedades mecânicas e químicas do material. Uma vez que o material se cristaliza a partir da massa fundida, a difusão intermolecular durante esta fase cria os núcleos cristalinos e os emaranhamentos das regiões amorfas, os quais determinam a resistência de união da junta soldada.

As pressões aplicadas durante a soldagem geram as forças de cisalhamento no fluxo de material fundido, as quais por sua vez promovem a orientação das moléculas poliméricas [8]. A orientação molecular paralela pode resultar em soldas fracas, devido a presença de tensões residuais. Isto ocorre porque as moléculas são forçadas a permanecerem num estado esticado (oposto ao estado normal da molécula polimérica), podendo ser imobilizadas durante a solidificação, dependendo da taxa de cura [15]. O tempo de cura, entre outros parâmetros, irá contribuir para a resistência da junta.

Para os testes e tração (Figura 4-6 e Figura 4-7) observa-se que para o tempo de resfriamento mais longo, de 11 minutos, tanto para as amostras com rebarba ou sem rebarba e independente da temperatura de soldagem, ocorre uma tendência para o aumento do LR. Isso permite mais tempo para a difusão intermolecular, promovendo melhores envoltórios e arranjos entre as moléculas das cadeias poliméricas. Para materiais como a poliamida, as quais têm uma viscosidade de fusão baixa, isto pode significar uma melhora da resistência da junta soldada [53].

Os tubos soldados que passaram por resfriamento mais lento (11 minutos) apresentaram menores valores de rigidez, Figura 4-14 e Figura 4-15, indicando menor resistência à deformação por compressão, e portanto maior ductilidade.

O grau de cristalinidade de 13% do conjunto 6, resfriado por 11 minutos foi o menor de todos os conjuntos. Estes resultados indicam que deve haver uma interação entre todos os parâmetros de soldagem, pois a combinação de soldagem a 240°C, mesmo com um tempo de cura menor, porém com resfriamento em água, levou a um grau de cristalinidade de 16% (conj. 4), sendo este o maior entre os conjuntos estudados.

#### **5.4. Sobre a cristalinidade da Poliamida 12**

A utilização de diferentes técnicas para a obtenção de dados experimentais é uma prática comum em pesquisa. Isto permite a verificação da coerência entre os resultados obtidos e a busca de justificativas.

Nesta dissertação foram utilizadas duas técnicas para a obtenção da cristalinidade das amostras estudadas: Difração de Raios X e DSC.

No entanto, não foi possível comparar os resultados de cristalinidade obtidos pelas duas técnicas. Enquanto a técnica por DSC indica uma redução da cristalinidade após soldagem independente dos parâmetros utilizados, a técnica por DRX indica um aumento desta cristalinidade. Estes resultados indicam a necessidade de repetição dos testes e/ou reavaliação por outra técnica, como por exemplo FTIR [56].

O método DSC é considerado por muitos pesquisadores como a melhor ferramenta para encontrar o grau de cristalinidade de uma amostra, pois está relacionado com variáveis termodinâmicas, como a variação de entalpia associada com o volume livre [57].

Os resultados da obtenção da fração cristalina de uma amostra através da difração de raios X podem sofrer interferências dependendo do ângulo utilizado (baixo ou grande).

A técnica por difração seria a mais indicada quando não se conhece um cristal individual com alta perfeição, isto é, com 100% de cristalinidade e variação de entalpia confiável obtida por DSC, que possa ser comparada com a da amostra.

Entre os conjuntos soldados a 240°C, as amostras correspondentes aos conjuntos 2 e 6 não serão consideradas na análise por DRX, porque não estão em acordo com a tendência mostrada pelos outros conjuntos, apresentando valores muito acima dados encontrados (Tabela 4-12), sendo a cristalinidade de 64% a cristalinidade máxima, restando apenas o conjunto 4.

Porém, os resultados de cristalinidade por DRX obtidos para os conjuntos soldados a 220°C indicaram coerência, pois os conjuntos 1, 3, e 5 mostram um aumento de cristalinidade em relação a amostra na condição como recebida, sendo o maior aumento (15%) para o conjunto 1.

Os resultados encontrados por DSC indicam que as amostras das juntas soldadas apresentam maior grau de cristalinidade em relação às amostras das rebarbas. Isto pode ter sido causado devido velocidade de resfriamento mais lento no interior da junta soldada que na superfície (rebarbas). O maior tempo de cristalização pode gerar uma estrutura mais cristalina.

Considerando os resultados de resistência mecânica, embora existam outros fatores a serem considerados, é possível sugerir que os testes de cristalinidade por DSC estão em acordo com os resultados obtidos. Porque estes mostraram tendência ao aumento do limite de resistência de amostras com grau de cristalinidade menor.

De acordo com a literatura quanto maior a cristalinidade, mais elevada deve ser a rigidez [7] ou seja o material é mais resistente. Neste caso, embora o conjunto 2 apresente maior rigidez, o LR foi similar aos outros conjuntos e possui a menor cristalinidade que a PA 12 na condição de como recebido.

Estes resultados parecem indicar que a contribuição do material de base para o valor de rigidez encontrado foi maior do que a junta soldada.