

## **5. Resultados Experimentais e Discussões**

### **5.1 Análise Mecânica**

O comportamento da poliamida 12 e PEAD originais foi avaliado tanto à tração, como ao impacto e à excitação sonora, com o objetivo de ter uma referência para que as propriedades pudessem ser comparadas às propriedades dos materiais expostos as diferentes condições de envelhecimento.

#### **5.1.1 Ensaio de Tração**

##### **5.1.1.1 Caracterização do PEAD original**

Os corpos de prova foram submetidos à tração até o limite do cursor do equipamento. Assim, normalmente, não houve ruptura das amostras, mas foi possível construir as curvas de tensão deformação. Onde a deformação foi calculada pela formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde  $L_0$  corresponde o comprimento inicial do corpo de prova medido entre as garras do equipamento e  $\Delta L$  corresponde a extensão do travessão da maquina de tração.

Através da média dos 4 corpos de prova (figura 5.1) foram obtidos os valores das propriedades, como pode ser visto na tabela 5.1 e figura 5.2. È importante ressaltar, que a região elástica, de interesse para a área de projeto, pode ser totalmente levantada usando esse procedimento. Equação 5.1

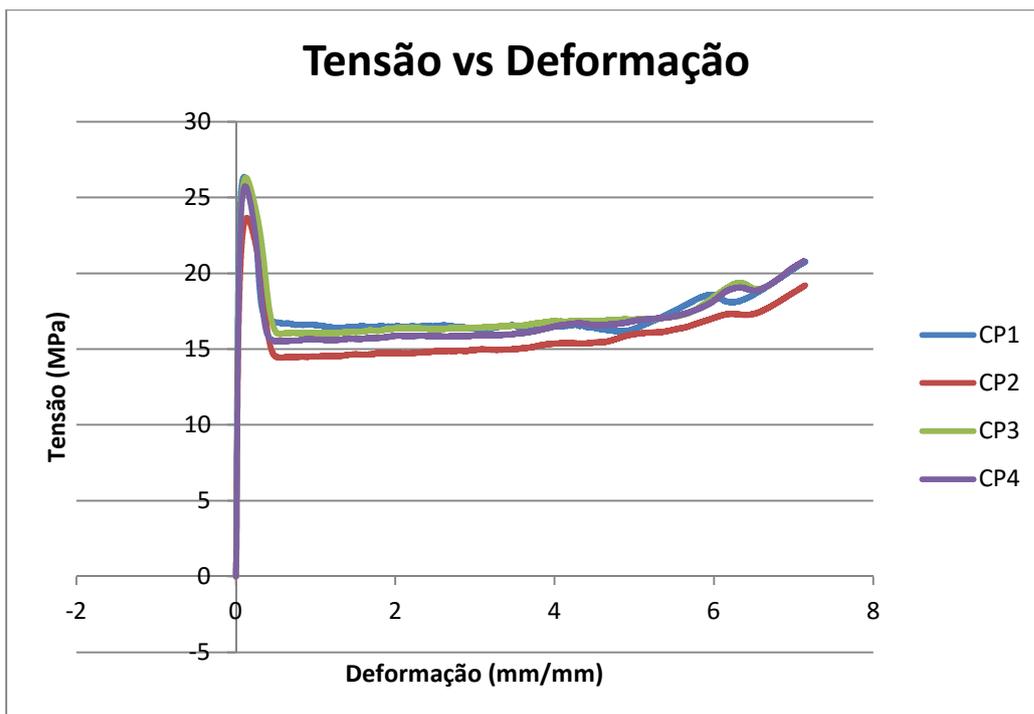


Figura 5.1 Curva Tensão vs Deformação dos 4 corpos de prova.

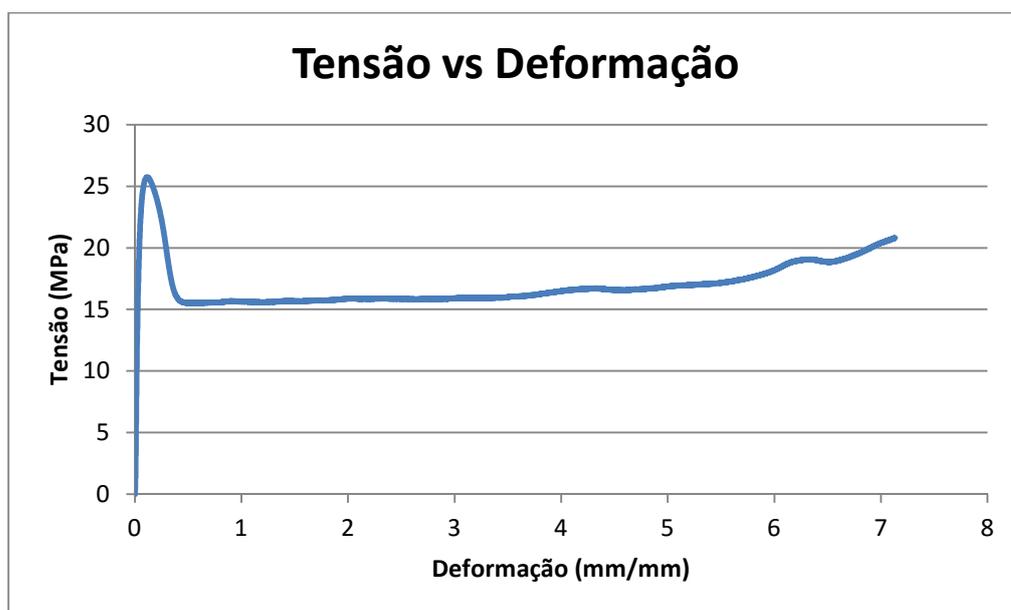


Figura 5.2 Curva Tensão vs Deformação do PEAD original.

**Tabela 5.1 Propriedades Mecânicas do PEAD original.**

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média	Desvio Padrão
Área (mm <sup>2</sup> )	63,5	64,5	64,2	64,4	64,1	0,4
Carregamento Max (N)	1674,0	1526,0	1688,3	1656,3	1636,1	74,6
Tensão de escoamento (MPa)	26,4	23,7	26,3	25,7	25,5	1,2
Def. de escoamento (mm/mm)	0,10	0,13	0,12	0,11	0,12	0,1
Resiliência (J)	2,2	2,5	2,5	2,2	2,4	0,2
Módulo de Elasticidade (MPa)	530,4	358,3	405,0	437,0	432,7	72,7
Deformação Max (%)	714,6	715,0	687,9	712,7	707,6	13,1

A partir dos valores listados na Tabela 5.1, pode-se ver que o PEAD possui uma tensão de escoamento igual a 25,5 MPa e módulo de elasticidade igual a 432,6 MPa, além de apresentar alta ductilidade, já que atingiu uma deformação de 707 % sem que tenha havido ruptura em nenhum corpo de prova (figura 5.3), pois o cursor atingiu o limite máximo do equipamento de tração. Como visto no capítulo 3, na literatura o limite de escoamento do PEAD varia de 18-31 MPa e seu alongamento máximo é de 10- 1500 %, com um módulo de elasticidade 700 - 1400MPa.

Dos dados obtidos apenas o módulo de elasticidade está fora do intervalo da literatura. Porém, esse resultado é esperado quando o ensaio de tração é realizado sem a colocação de um extensômetro, pois há a contribuição elástica do equipamento de ensaio no regime de pequenas deformações. Os valores do módulo descritos nesse trabalho serão, portanto, apenas comparativos e não o valor real do material.

**Figura5.3 Alongamento final do PEAD sem que tenha havido ruptura.**

## 5.1.1.2 Caracterização do PEAD Envelhecido

### 5.1.1.2.1. PEAD Envelhecido na Temperatura ambiente

De modo semelhante ao descrito no item 5.1.1.1, os corpos de prova foram submetidos à tração até o limite do cursor do equipamento, sendo possível caracterizar o comportamento elástico do material, bem como grande parte do seu comportamento plástico, através da média dos 5 corpos de prova figura 5.4. Os valores das propriedades foram obtidos pela média de 5 corpos de prova, como pode ser visto na tabela 5.2 e figura 5.5.

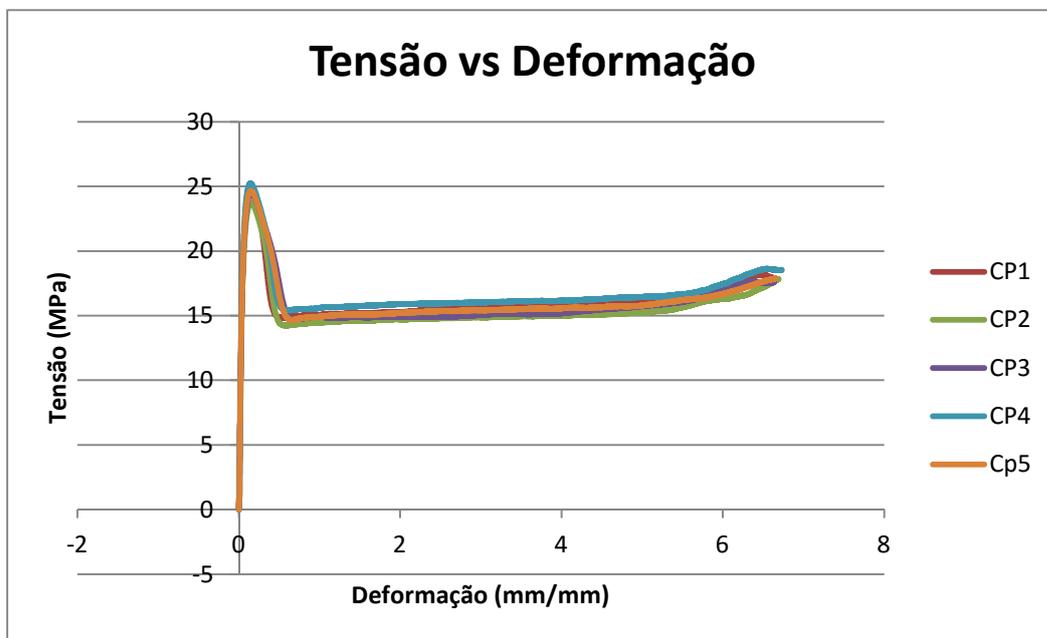


Figura 5.4 Curva Tensão vs Deformação dos 5 corpos de prova de PEAD envelhecidos na temperatura ambiente.

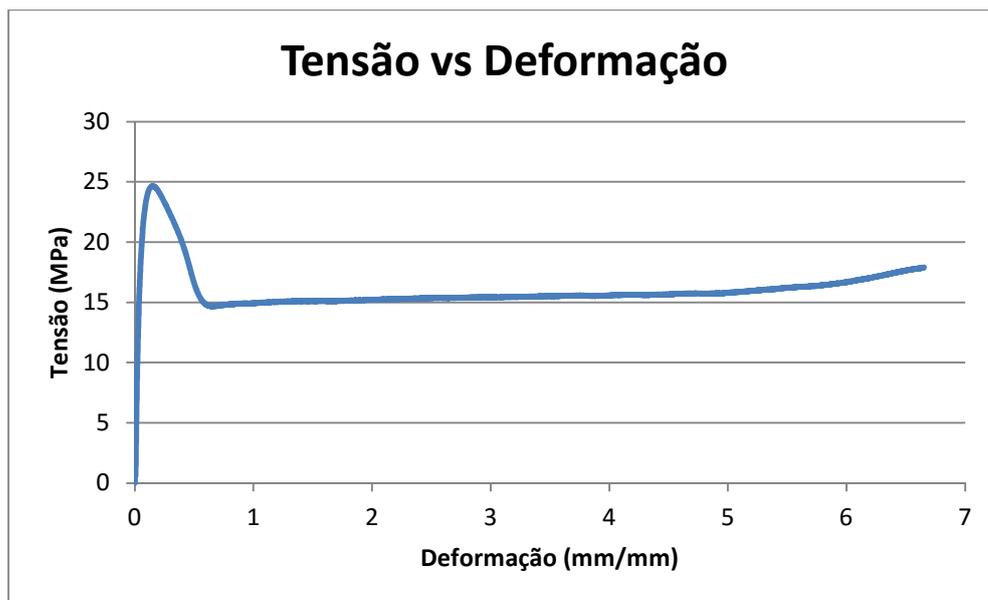


Figura 5.5 Curva Tensão Vs Deformação do PEAD Envelhecido.

Tabela 5.2 Propriedades Mecânicas do PEAD Envelhecido a Temperatura Ambiente.

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Média	Desvio Padrão
Área (mm <sup>2</sup> )	62,7	63,8	63,8	64,1	67,6	64,4	1,9
Carregamento max (N)	1547,5	1514,0	1562,4	1617,5	1668,1	1581,9	61,0
Tensão de escoamento (MPa)	24,7	23,7	24,5	25,2	24,7	24,6	0,6
Def. de escoamento (mm/mm)	0,14	0,15	0,16	0,14	0,15	0,1	0,1
Resiliência (J)	2,7	2,8	3,0	2,7	2,9	2,8	0,1
Módulo de Elasticidade (MPa)	473,7	452,9	467,2	579,7	462,2	487,1	52,3
Alongamento Max (%)	665,4	669,3	663,7	673,4	665,4	667,4	3,9

A partir dos valores listados na Tabela 5.2, pode-se ver que o PEAD possui uma tensão de escoamento igual a 24,6 MPa e módulo de elasticidade igual a 487,1 MPa, além de apresentar alta ductilidade, já que atingiu uma deformação de 667,4 % sem que tenha havido ruptura em nenhum corpo de prova. Pode-se ver que houve uma pequena variação na tensão de escoamento e no módulo de elasticidade do material, como uma redução no alongamento máximo, mais a frente à tabela 5.7 mostrará a variação percentual entre os originais e os corpos de prova envelhecidos, tanto a temperatura ambiente como a 70 0C.

### 5.1.1.2.2.

#### PEAD Envelhecido a 70 °C

Os corpos de prova foram submetidos à tração até o limite do cursor do equipamento, sendo possível caracterizar o comportamento elástico do material, bem como grande parte do seu comportamento plástico. Os valores das propriedades foram obtidos pela média de 5 corpos de prova, como pode ser visto na tabela 5.3 e figura 5.6.

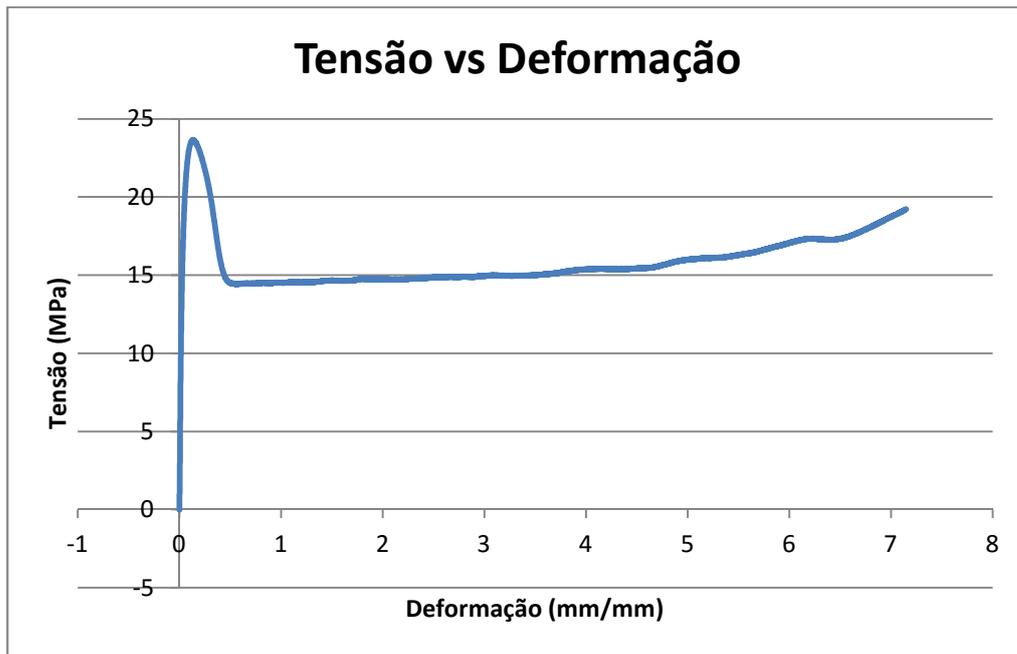


Figura 5.6 Gráfico Tensão Vs Deformação do PEAD envelhecido a 70 °C.

Tabela 5.3 Propriedades Mecânicas do PEAD Envelhecido a 70 °C

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Média	Desvio Padrão
Área (mm <sup>2</sup> )	66,4	65,4	65,5	64,4	64,7	65,3	0,8
Carregamento max (N)	1068,5	1076,8	1558,7	1611,2	1577,4	1378,5	279,8
Tensão de escoamento (MPa)	16,1	16,3	23,8	25,0	24,4	21,1	4,5
Def. de escoamento (mm/mm)	0,15	0,16	0,18	0,13	0,17	0,16	0,02
Resiliência (J)	1,9	2,1	3,3	2,6	3,3	2,6	0,6
Módulo de Elasticidade (MPa)	118,8	174,4	262,7	354,4	299,6	242,0	95,1
Alongamento Max (%)	670,0	650,0	669,0	686,6	668,4	668,8	13,0

A partir dos valores listados na Tabela 5.3, pode-se ver que o PEAD, após envelhecimento, possui uma tensão de escoamento igual a 21,1 MPa e módulo de elasticidade igual a 242,0 MPa, além de apresentar alta ductilidade, já que atingiu uma deformação de 668,8 % sem que tenha havido ruptura em nenhum corpo de prova, pois o cursor atingiu o limite máximo do equipamento de tração. Houve assim uma redução tanto na tensão de escoamento como no módulo de elasticidade (quase 50%). Houve também uma pequena variação no alongamento máximo. As variações percentuais dos resultados serão apresentadas posteriormente (tabela 5.7).

### 5.1.1.3

#### Caracterização da Poliamida 12 original

De modo semelhante ao descrito no item 5.1.1.1, os corpos de prova foram submetidos à tração até o limite do cursor do equipamento, sendo possível caracterizar o comportamento elástico do material, bem como grande parte do seu comportamento plástico, através da média dos 4 corpos de prova figura 5.7. Os valores das propriedades foram obtidos através da média de 4 corpos de prova, como pode ser visto na tabela 5.4 e figura 5.8.

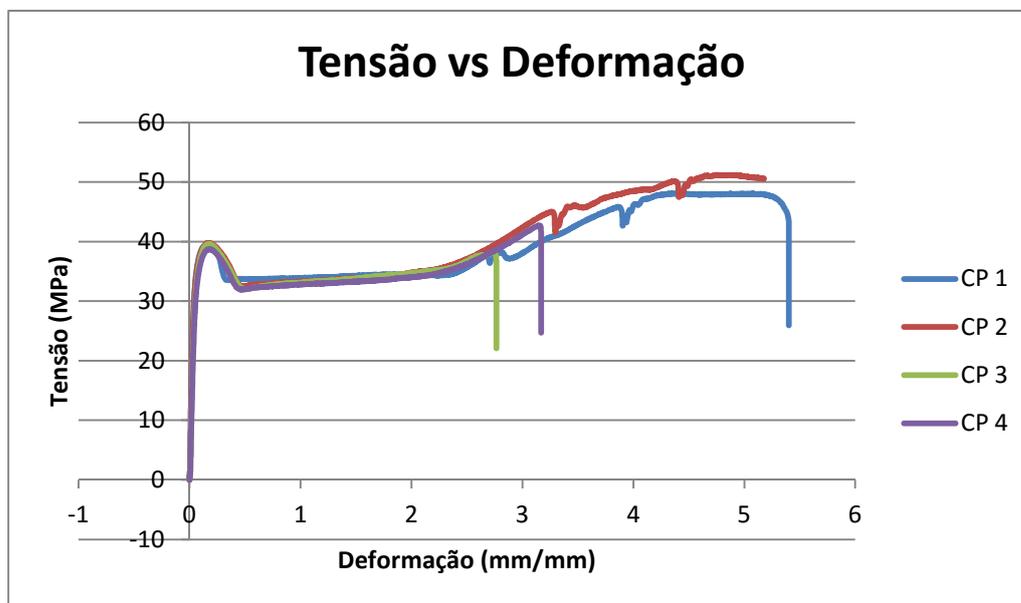


Figura 5.7 Curva Tensão vs Deformação dos 4 corpos de prova de PA 12 (como recebido).

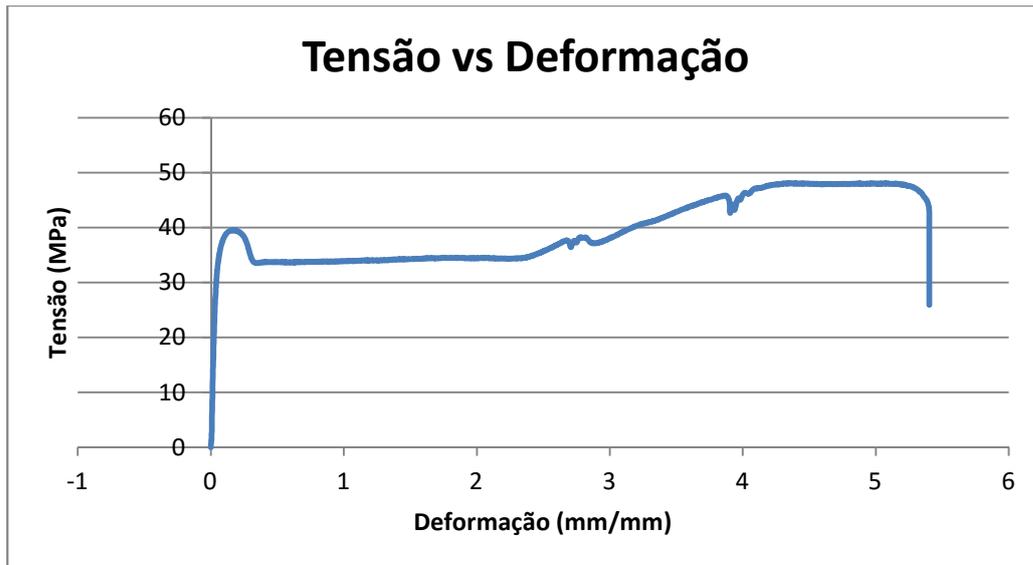


Figura 5.8 Gráfico Tensão vs Deformação da poliamida 12 original.

Tabela 5.4 Propriedades Mecânicas da Poliamida 12 original.

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média	Desvio Padrão
Área (mm <sup>2</sup> )	63,8	61,4	63,0	64,3	63,1	1,2
Carregamento max (N)	3064,4	3146,4	2495,6	2744,8	2862,8	300,0
Tensão máxima (MPa)	48,1	51,2	39,6	42,7	45,4	5,2
Tensão de escoamento (MPa)	39,5	39,8	39,6	38,7	39,4	0,5
Def. de escoamento (mm/mm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Resiliência (J)	5,4	5,9	5,3	5,7	5,6	0,3
Módulo de Elasticidade (MPa)	971,6	762,7	817,6	766,7	829,6	97,9
Alongamento Max (%)	540,2	517,7	276,5	316,9	412,8	135,4

\* valor máximo alcançado  $\neq$  do limite de resistência.

Os resultados obtidos mostram que a poliamida 12 possui uma tensão de escoamento igual a 39,4 MPa e módulo de elasticidade igual a 829,6 MPa, com uma alta ductilidade (412,8 %). No entanto, seu alongamento é muito inferior ao do PEAD, mas suas propriedades mecânicas são maiores. É importante ressaltar que dois dos corpos de prova ensaiados (os corpos de prova CP 3 e CP 4) fraturaram, como mostra a figura 5.9.



**Figura 5.9** Corpos de Prova fraturados da Poliamida 12 original.

Os dados dos dois materiais originais foram agrupados nas figuras 5.10 a 5.13, de modo a permitir uma melhor visualização das diferenças entre as propriedades que foram consideradas como as mais relevantes para o escopo desse trabalho. Observa-se que o desempenho mecânico da poliamida é superior ao do polietileno, como já havia sido comentado.

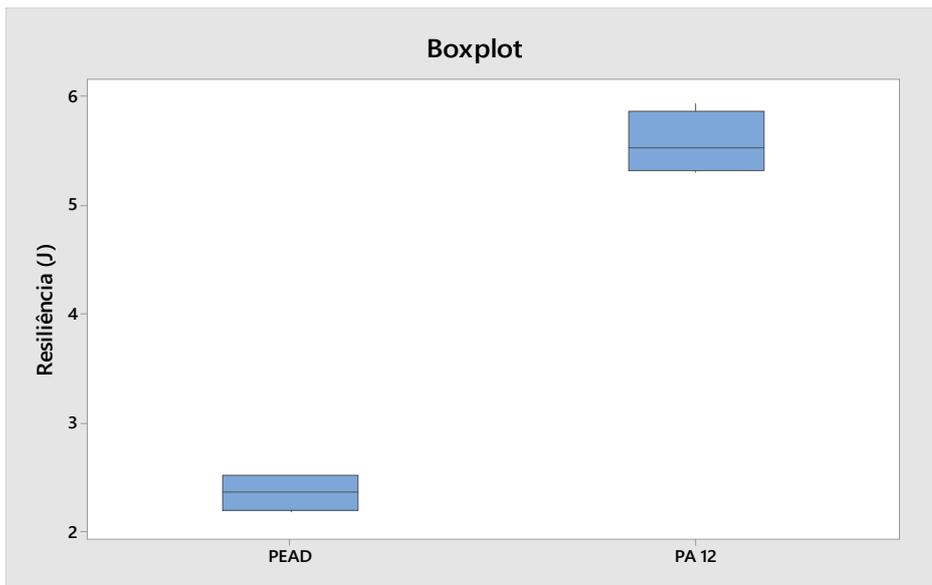


Figura 5.10 Resiliência (ensaio de tração).

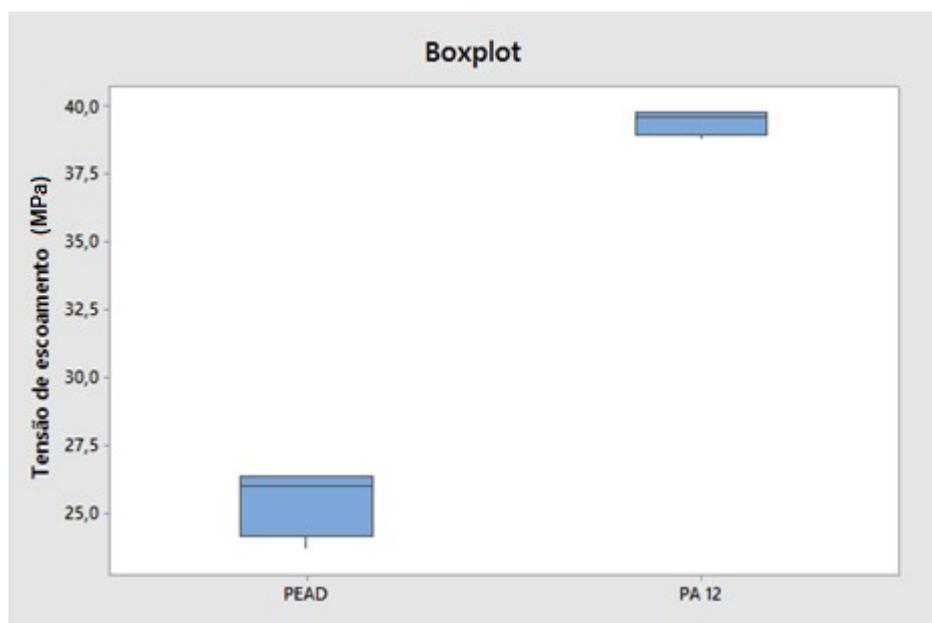


Figura 5.11 Tensão de escoamento (ensaio de tração).

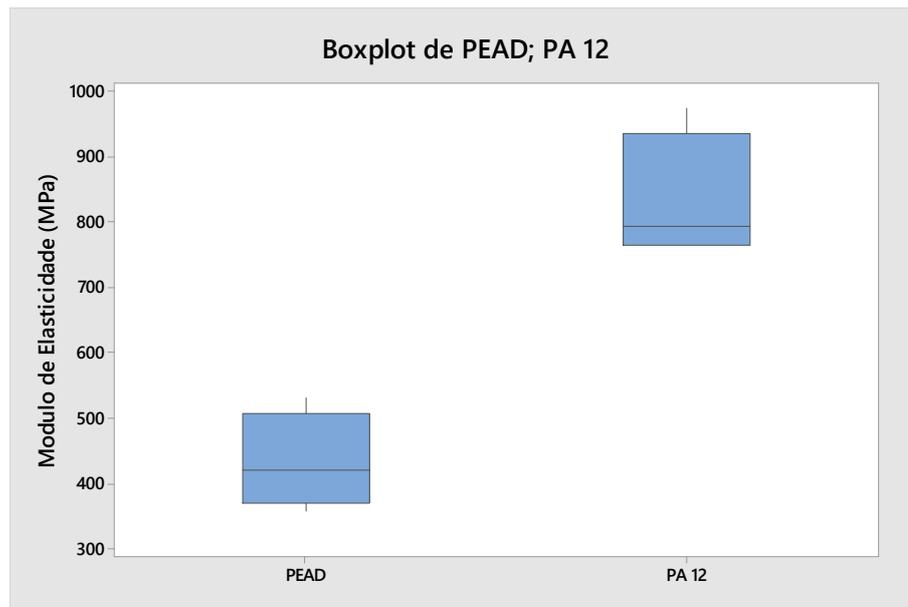


Figura 5.12 Módulo de elasticidade (ensaio de tração).

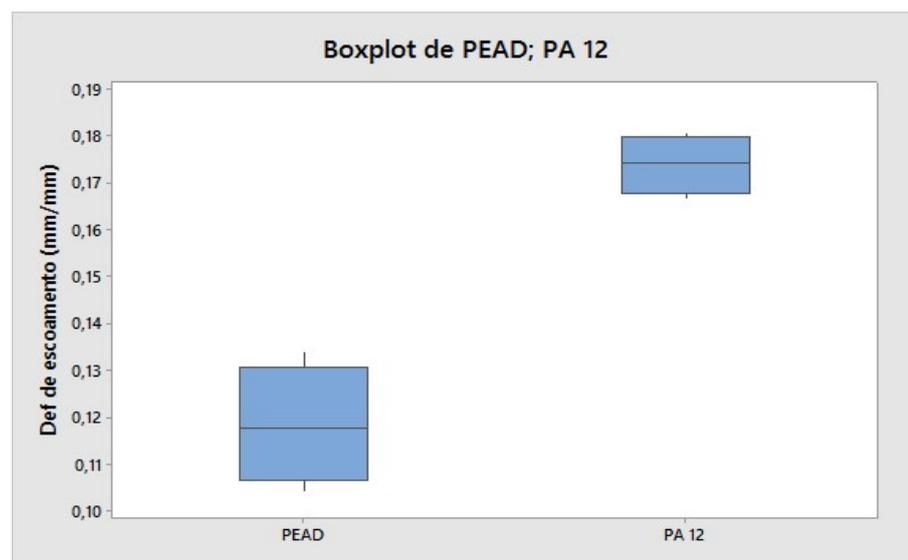


Figura 5.13 Deformação de escoamento (ensaio de tração).

#### 5.1.1.4 Caracterização da Poliamida 12 Envelhecida

##### 5.1.1.4.1. PA 12 Envelhecido a Temperatura ambiente

De modo semelhante ao descrito no item 5.1.1.1, os corpos de prova foram submetidos à tração até o limite do cursor do equipamento, sendo possível caracterizar o comportamento elástico do material, bem como grande parte do seu comportamento plástico, através da media dos 5 corpos de prova figura 5.14. Os

valores das propriedades foram obtidos através da média de 5 corpos de prova, como pode ser visto na tabela 5.5 e figura 5.15.

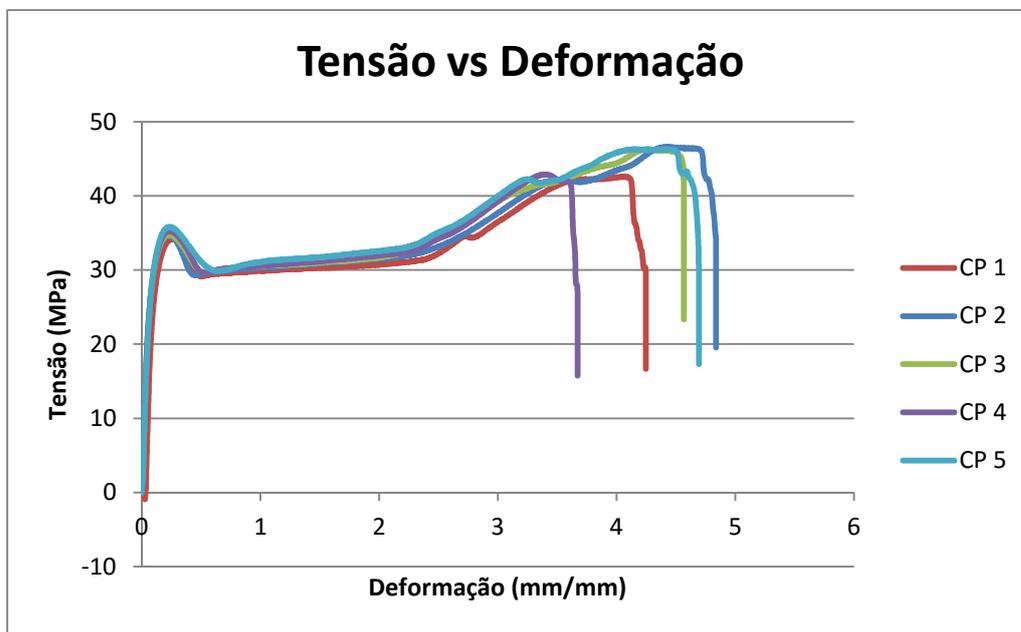


Figura 5.14 Curva Tensão vs Deformação dos 5 corpos de prova de PA 12 (envelhecidos na temperatura ambiente).

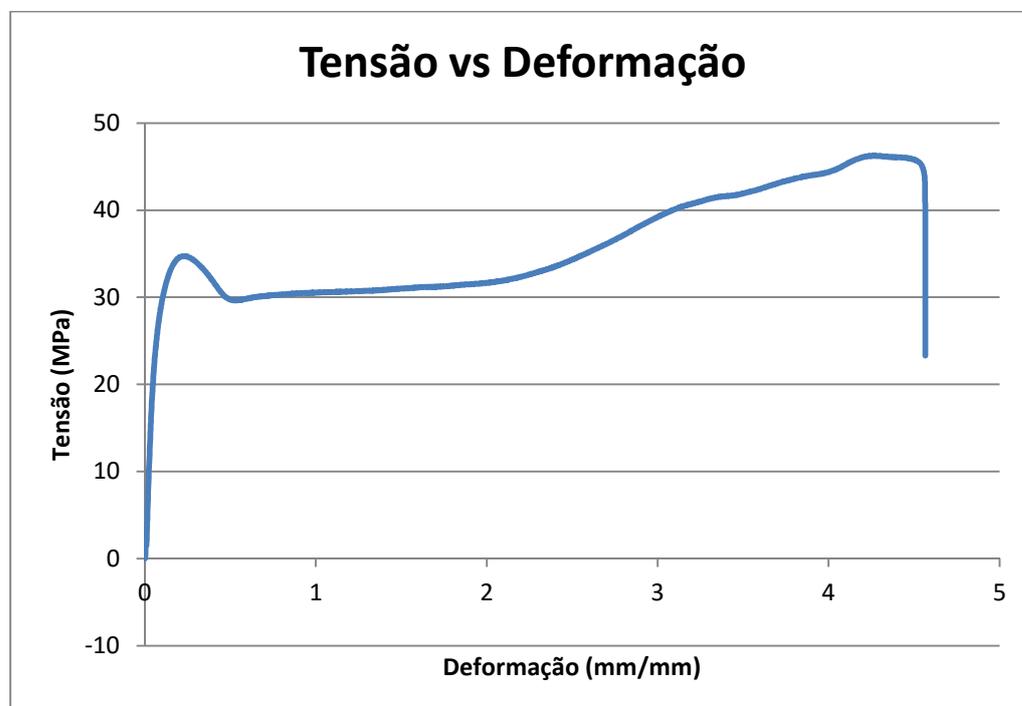


Figura 5.15 Gráfico Tensão Vs Deformação da poliamida 12 envelhecida.

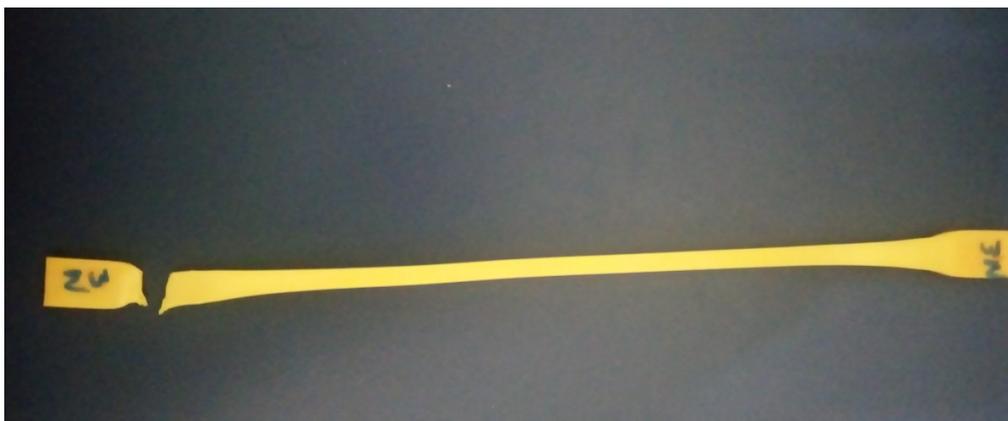
**Tabela 5.5 Propriedades Mecânicas da Poliamida 12 envelhecida a temperatura ambiente.**

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Média	Desvio Padrão
Área (mm <sup>2</sup> )	66,4	62,2	65,0	63,9	64,7	64,4	1,5
Carregamento max (N)	2825,4	2896,6	3005,8	2740,9	2997,3	2893,2	113,3
Tensão máxima (MPa)	42,6	46,6	46,3	42,9	46,3	44,9	2,0
Tensão de escoamento (MPa)	34,2	34,6	34,7	35,3	35,8	34,9	0,6
Def. de escoamento (mm/mm)	0,26	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,0
Resiliência (J)	6,0	6,1	6,2	6,4	6,4	6,2	0,2
Módulo de Elasticidade (MPa)	517,7	499,6	510,9	485,4	462,8	495,3	21,9
Alongamento Max (%)	424,6	483,8	456,6	455,0	469,3	457,9	21,9

\* valor máximo alcançado  $\neq$  do limite de resistência.

Os resultados obtidos mostram que a poliamida 12 possui uma tensão de escoamento igual a 34,2 MPa e módulo de elasticidade igual a 495,3 MPa, com uma boa ductilidade (457,9%). É importante ressaltar que um dos corpos de prova fraturou (CP 3) como mostrado na figura 5.16.

Comparando os materiais originais e os envelhecidos a temperatura ambiente pode-se observar que seu módulo de elasticidade possui uma drástica redução, caindo quase pela metade e a tensão de escoamento possui uma pequena redução, como será mostrado comparativamente na tabela 5.8.



**Figura 5.16 CP 3 envelhecido a temperatura ambiente.**

#### 5.1.1.4.2. PA 12 Envelhecido a 70 °C

De modo semelhante ao descrito no item 5.1.1.1, os corpos de prova foram submetidos à tração até o limite do cursor do equipamento, sendo possível caracterizar o comportamento elástico do material, bem como grande parte do seu comportamento plástico, através da média dos 5 corpos de prova figura 5.17. Os valores das propriedades foram obtidos através da média de 5 corpos de prova, como pode ser visto na tabela 5.6 e figura 5.18.

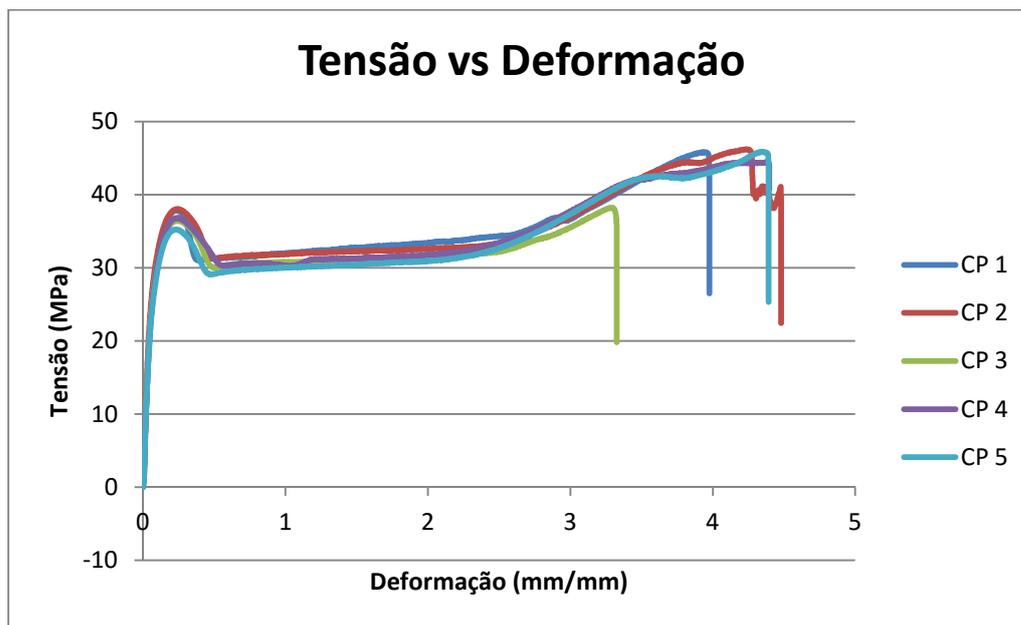


Figura 5.17 Curva Tensão vs Deformação dos 5 corpos de prova de PA 12 (envelhecidos a 70 °C).

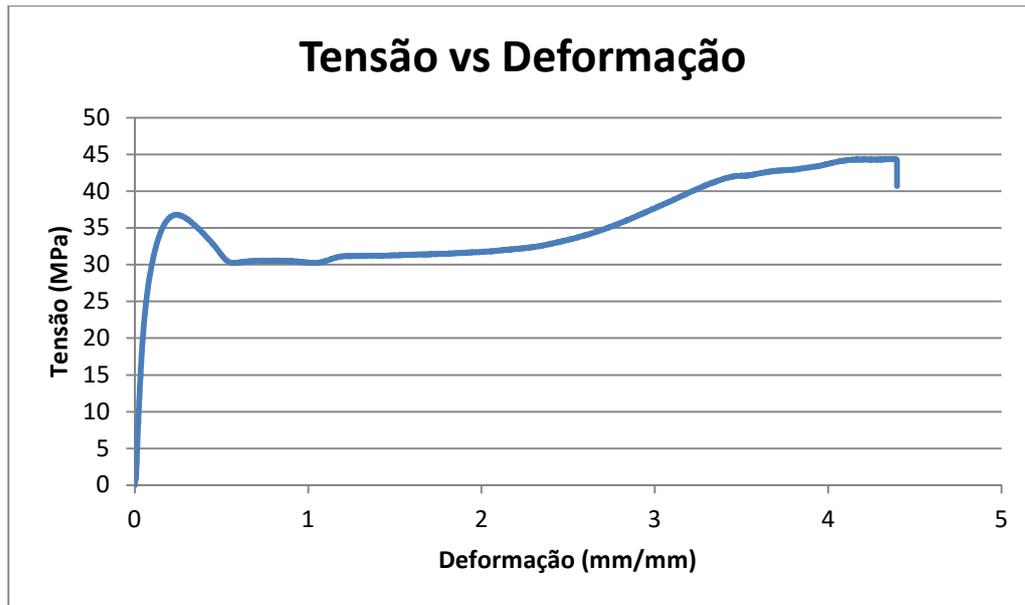


Figura 5.18 Gráfico Tensão Vs Deformação da poliamida 12 envelhecida a 70 °C

Tabela 5.6 Propriedades Mecânicas da Poliamida 12 envelhecida a 70 °C

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Média	Desvio Padrão
Área (mm <sup>2</sup> )	65,4	63,5	64,9	66,1	65,3	65,0	1,0
Carregamento max (N)	2993,1	2934,1	2480,3	2934,0	2993,2	2866,9	218,2
Tensão máxima (MPa)	45,8	46,2	38,2	44,4	45,8	44,1	3,4
Tensão de escoamento (MPa)	37,8	38,0	36,4	36,8	35,2	36,9	1,1
Def. de escoamento (mm/mm)	0,24	0,25	0,24	0,24	0,23	0,24	0,0
Resiliência (J)	6,8	7,3	6,8	6,7	6,2	6,8	0,4
Módulo de Elasticidade (MPa)	611,7	611,6	552,6	536,0	563,3	575,0	34,8
Alongamento Max (%)	397,5	448,1	332,5	439,6	439,1	441,4	48,3

\* valor máximo alcançado ≠ do limite de resistência.

Os resultados mostram que a poliamida 12 possui uma tensão de escoamento igual a 36,9 MPa e módulo de elasticidade igual a 575,5 MPa, com uma boa ductilidade (441,4 %). É importante ressaltar que dois corpos de prova fraturaram (CP 3 e CP 5), como mostra a figura 5.19.

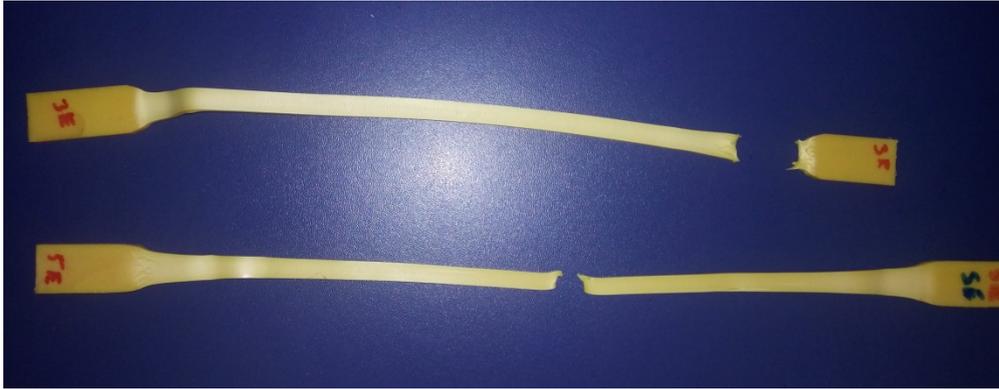


Figura 5.19 CP 3 e CP 5 envelhecidos a 70<sup>0</sup>C.

Comparando os materiais originais e os envelhecidos a temperatura 70 °C pode-se observar que há uma redução no módulo de elasticidade e na tensão de escoamento (tabela 5.8).

Os dados dos dois materiais envelhecidos foram agrupados nas figuras 5.20 a 5.23, de modo a permitir uma melhor visualização das diferenças entre as propriedades.

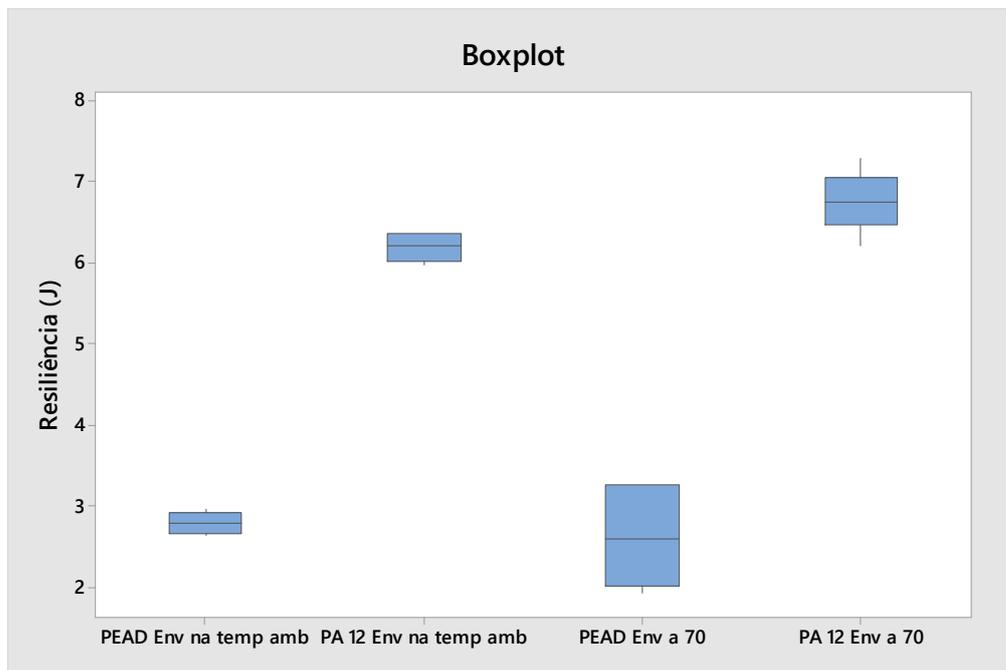
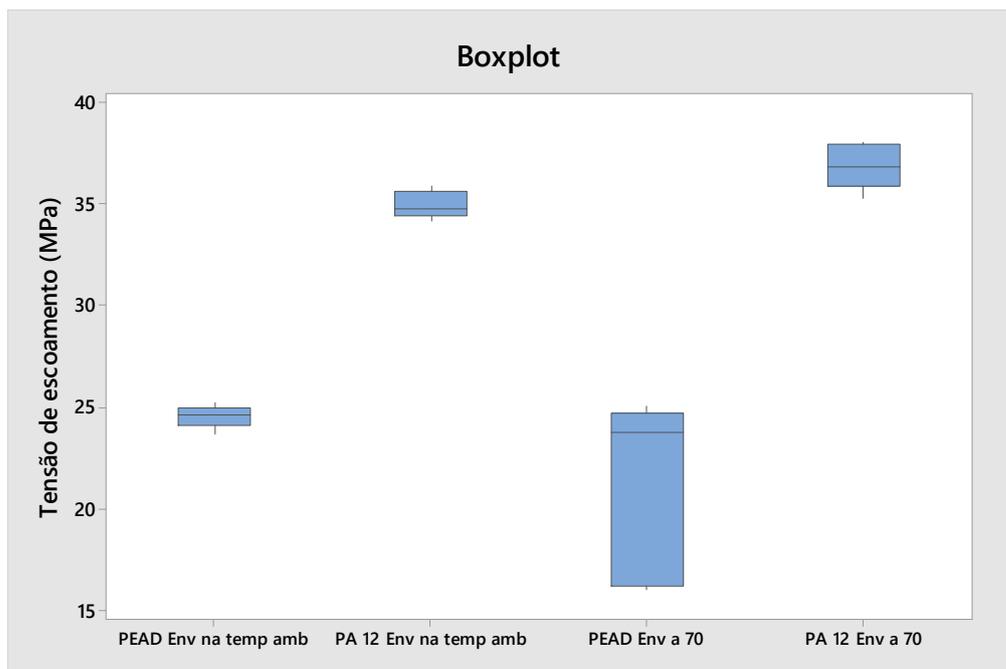
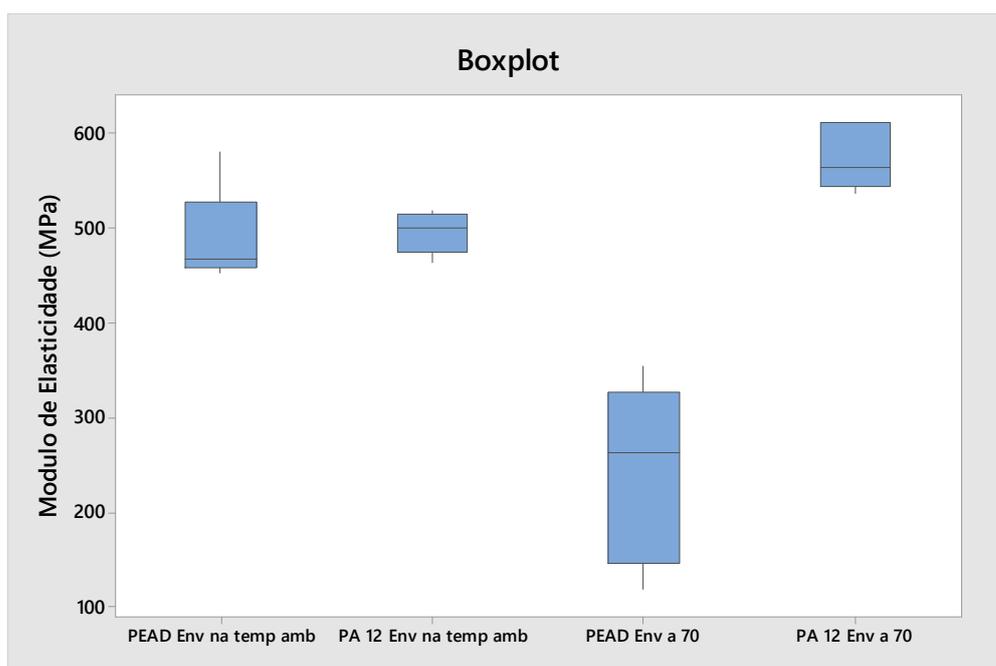


Figura 5.20 Resiliência (ensaio de tração).



**Figura 5.21 Tensão de escoamento (ensaio de tração).**



**Figura 5.22 Módulo de Elasticidade (ensaio de tração).**

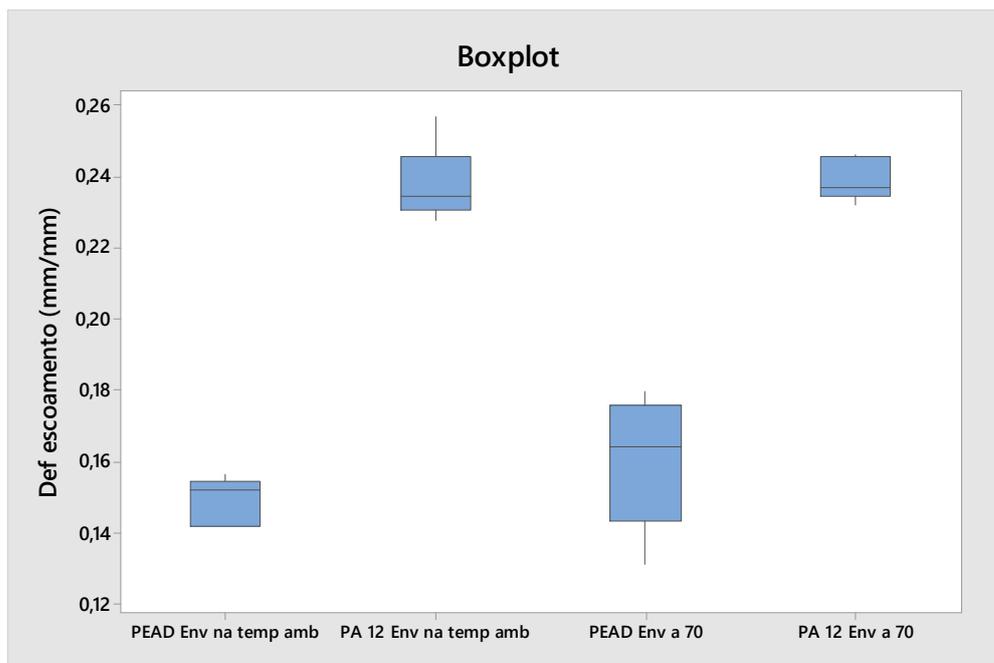


Figura 5.23 Deformação de Escoamento (ensaio de tração).

### 5.1.1.5

#### Comparação entre os materiais envelhecidos e originais

Para uma melhor visualização do efeito do envelhecimento, a tabela 5.7 mostra a variação percentual das propriedades dos materiais envelhecidos tendo como base as propriedades do material original.

Tabela 5.7 Variação percentual das propriedades dos PEAD envelhecidos

	PEAD				
	Original	Env Natural	Env a 70 °C	Original vs Env natural	Original vs Env a 70 °C
Carregamento max (N)	1636,1	1581,9	1378,5	-3,3%	-15,7%
Tensão Maxima (MPa)	25,5	24,6	21,1	-3,7%	-17,2%
Tensão de escoamento (MPa)	25,5	24,6	21,1	-3,7%	-17,2%
Def de escoamento (mm/mm)	0,12	0,15	0,16	25,7%	35,4%
Resiliência (J)	2,4	2,8	2,6	18,6%	11,6%
Módulo de Elasticidade (MPa)	432,7	487,1	242,0	12,6%	-44,1%

Para entender o comportamento das propriedades mecânicas dos polímeros analisados é preciso considerar que esses materiais são polímeros semicristalinos e que contém vazios de dimensões atômicas e moleculares e uma região amorfa,

onde a mobilidade molecular é fortemente influenciada pelo volume livre disponível. O volume livre é formado especialmente pelas irregularidades no empacotamento das cadeias e é fortemente dependente da temperatura [3,25].

A expansão do volume livre permite um maior espaço para ocupação pela água. A presença de água dentro desses polímeros pode ionizar impurezas, promover um aumento no número de ligações secundárias entre as cadeias, aumentando o limite de escoamento, além de facilitar a difusão de pequenas moléculas dentro do polímero [3,25].

Pode-se concluir que houve uma significativa redução (quase 50%) do módulo de elasticidade, uma grandeza que proporciona a rigidez do material, do PEAD envelhecido a 70 °C. A tensão de escoamento também foi reduzida, reduzindo assim a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico, o que faz com que PEAD envelhecido a 70 °C entre no regime plástico sob menores tensões. Esse dado é importante, pois implica que menores tensões de projeto devem ser consideradas para que o dispositivo/estrutura que use o PEAD possa continuar trabalhando no regime elástico sob condições de envelhecimento.

Já o PEAD envelhecido a temperatura ambiente sofreu uma pequena redução na sua tensão de escoamento, de modo que seu emprego prático não chega a ser afetado, pois essa redução certamente está dentro da faixa de fator de segurança usado na prática. Entretanto houve um aumento no módulo de elasticidade, aumentando a rigidez do material. Isso pode ter ocorrido graças à absorção de água do material, modificando suas propriedades.

Vale resaltar que nenhum corpo de prova PEAD sofreu ruptura devido a sua excelente capacidade de se deformar (boa ductibilidade).

A Figura 5.24 mostra as alterações macroscópicas sofridas pelo material devido ao processo de envelhecimento. A figura (1) é tida como a figura de referência, material original (como recebido). Já a figura (2) mostra o material envelhecido a 70 °C, onde pode-se ver que houve degradação, com perda de cor. A figura (3) mostra o material envelhecido a temperatura ambiente, a degradação não é tão visível como nos envelhecidos a 70 °C, mas nota-se também variação na cor do material.

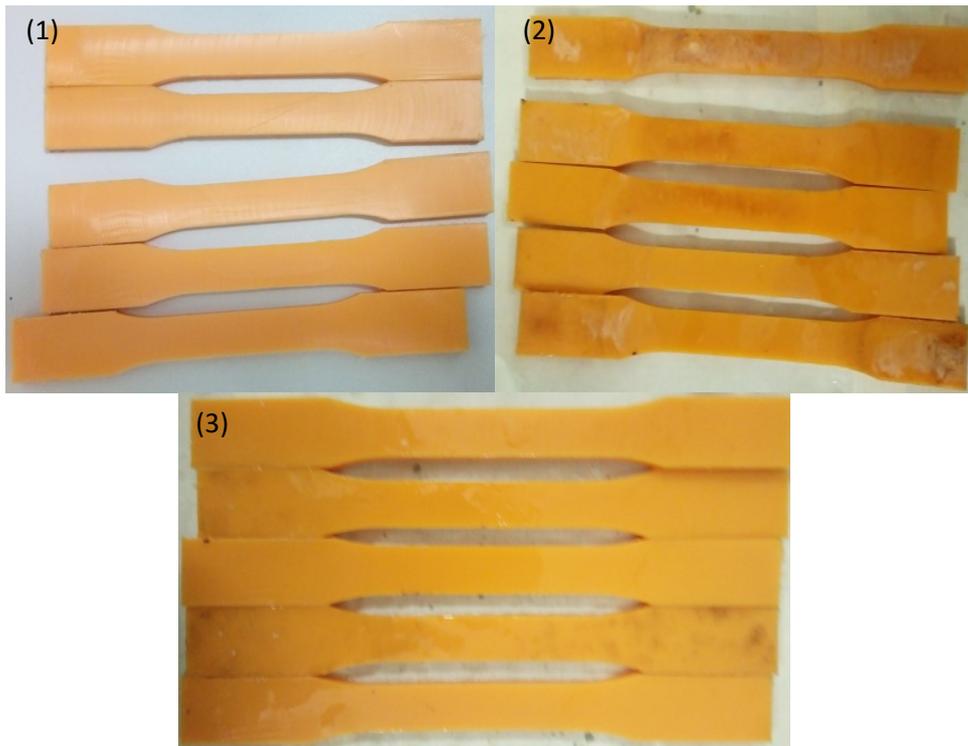


Figura 5.24 Degradação visual nos materiais poliméricos.

Pode-se ver na tabela 5.8 a variação percentual das propriedades da PA 12 envelhecida tendo como base as propriedades dos materiais originais.

Tabela 5.8 Variação percentual das propriedades da PA 12 envelhecidas

PA 12					
	Original	Env Natural	Env a 70 °C	Original vs env natural	Original vs env a 70 °C
Carregamento max (N)	2862,8	2893,2	2866,9	1,1%	0,1%
Tensão Máxima (MPa)	45,4	44,9	44,1	-1,1%	-2,9%
Tensão de escoamento (MPa)	39,4	34,9	36,9	-11,4%	-6,5%
Def de escoamento (mm/mm)	0,17	0,24	0,24	36,2%	37,4%
Resiliência (J)	5,6	6,2	6,8	11,3%	21,4%
Modulo de Elasticidade (MPa)	829,6	495,3	575,0	-40,3%	-30,7%

Pode-se concluir que tanto para o PA envelhecido a 70 °C como para o envelhecido a temperatura ambiente houve uma redução na tensão de escoamento, reduzindo a capacidade do polímero de permanecer no regime elástico, entrando no regime plástico sob menores tensões. Propriedades como: carregamento

máximo e tensão máxima possuem variações que estão dentro do desvio das medidas, por tanto não causam nenhum efeito pratico.

Outra propriedade que teve uma significativa redução foi o módulo de elasticidade, reduzindo a rigidez do material. Entretanto, o material sofreu um aumento na sua deformação de escoamento. Isto é, houve uma deformação maior até o material atingir seu regime plástico. Todos esses resultados indicam um efeito de plastificação da água na poliamida [3,25].

Vale ressaltar que os corpos de prova (CP3 – para envelhecimento a temperatura ambiente) e (CP 3 e CP 5 - para envelhecimento a 70 0C) sofreram fragilização e, conseqüentemente, acabaram fraturando.

A figura 5.25 mostra as mudanças macroscópicas na PA após o envelhecimento. Diferentemente do PEAD, as alterações não ficam tão claras nesses materiais. A figura (1) mostra o material original, usado como parâmetro. A figura (2) mostra a PA que sofreu envelhecimento a temperatura ambiente. Não é possível afirmar que houve degradação no material muito aparente como no polietileno, apenas houve uma variação na cor do material. O mesmo ocorreu na figura (3) material envelhecido a 70 °C, onde pode-se destacar apenas mudanças na cor do material.

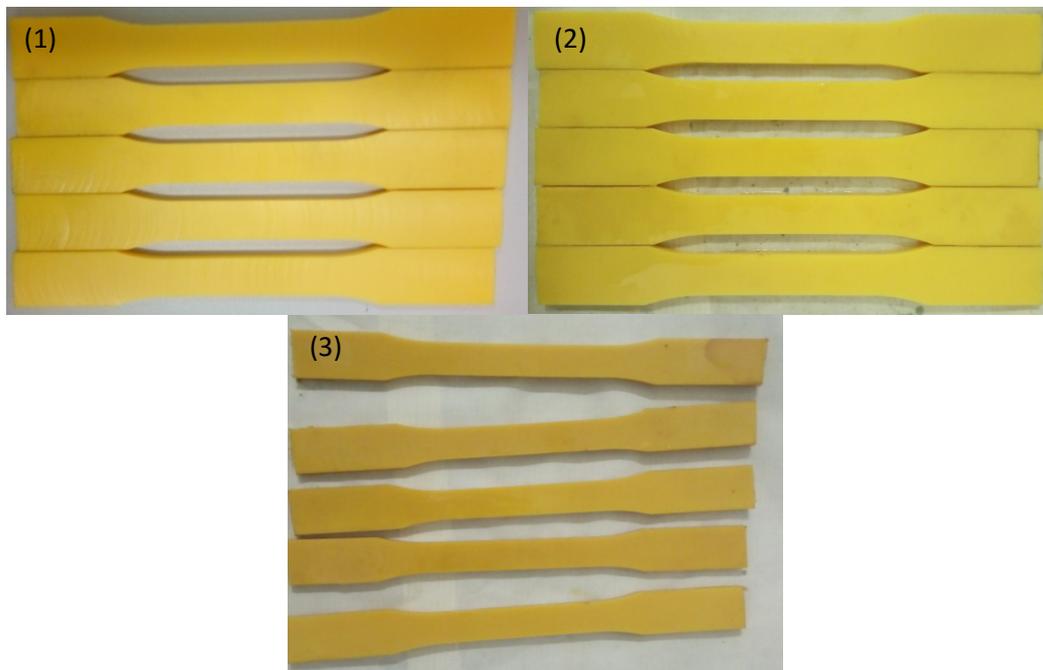


Figura 5.25 Mudanças visuais ocorridas na poliamida 12.

A média, o desvio padrão e as variações das propriedades dos materiais envelhecidos em relação aos originais estão mostradas nas figuras 5.26 a 5.33.

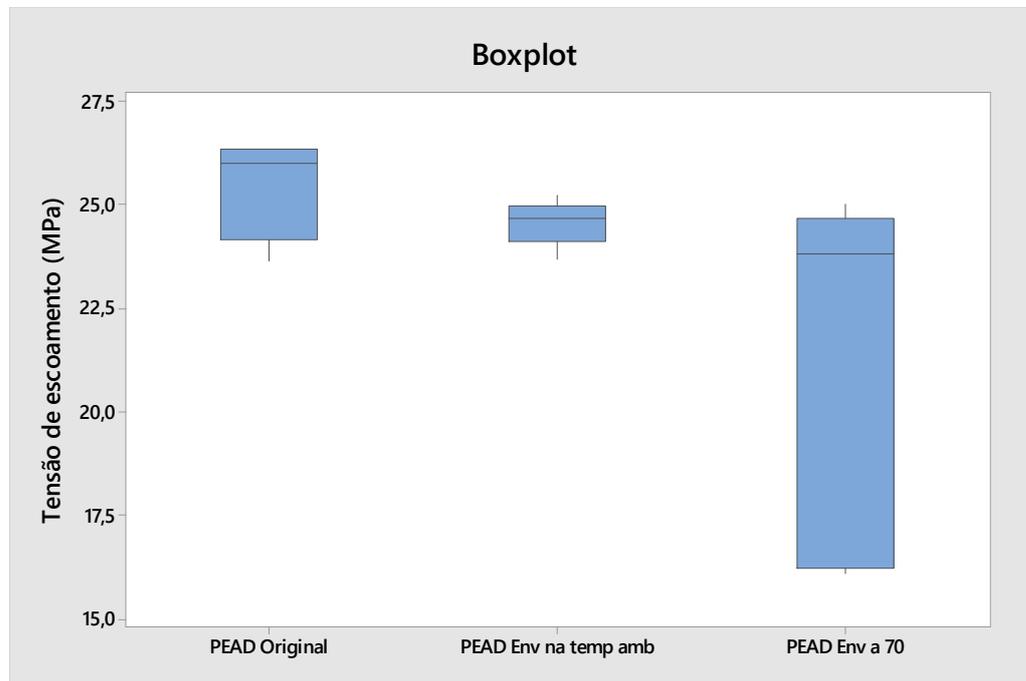


Figura 5.26 Comparação entre a variação da tensão de escoamento do material original e os envelhecidos (PEAD).

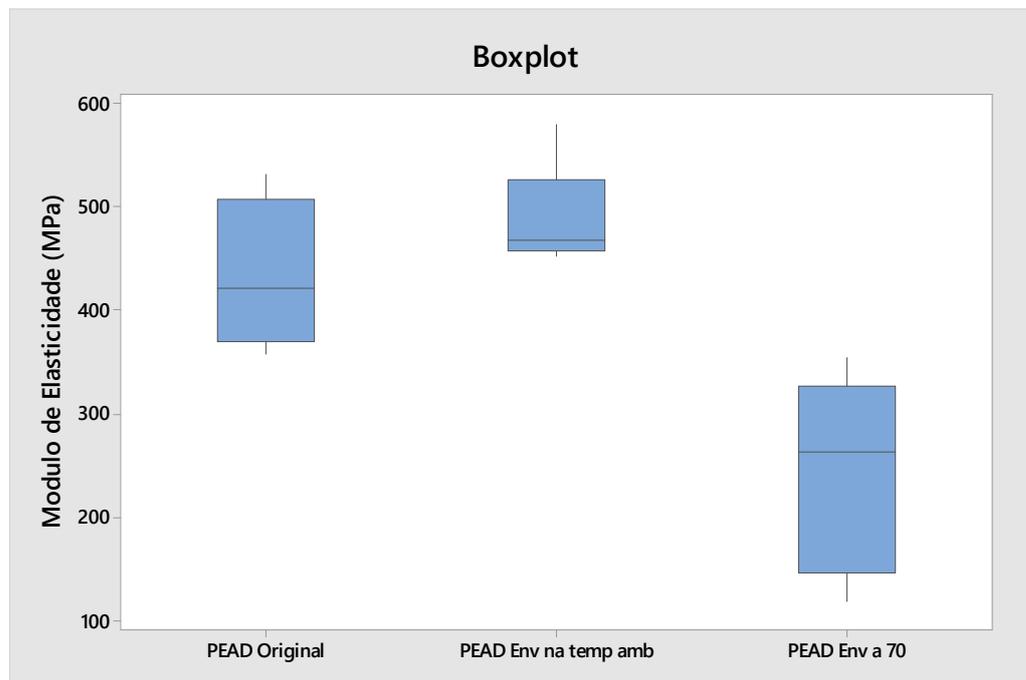


Figura 5.27 Comparação entre a variação do modulo de elasticidade do material original e os envelhecidos (PEAD).

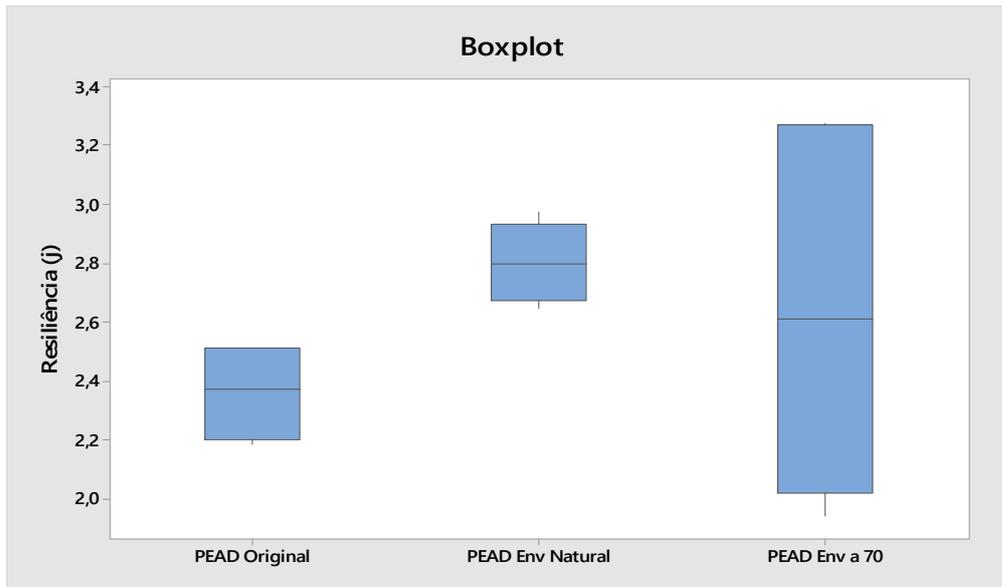


Figura 5.28 Comparação entre a variação da resiliência do material original e os envelhecidos (PEAD).

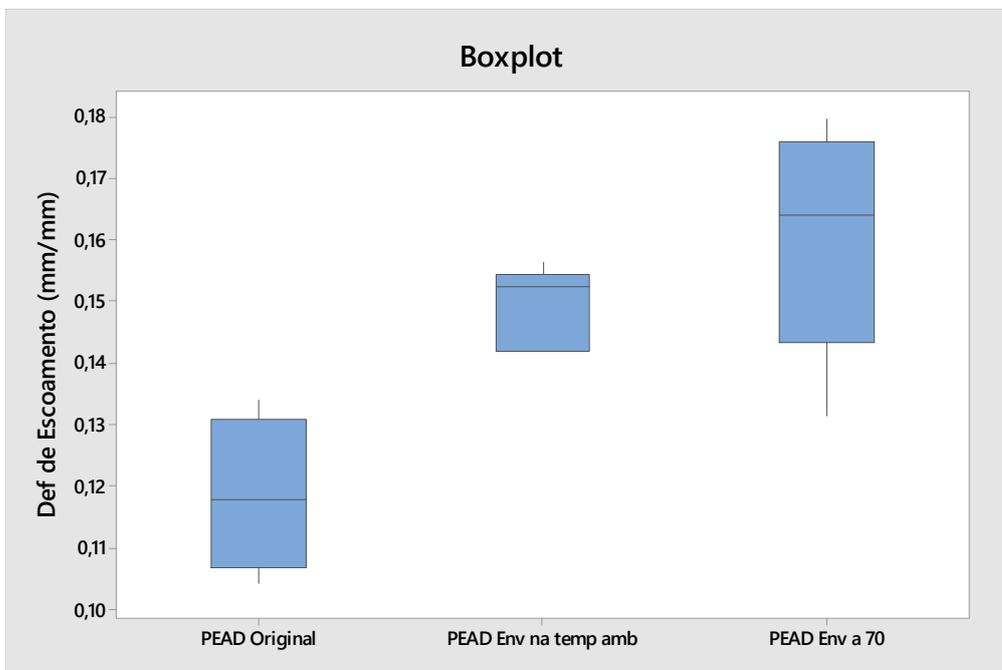


Figura 5.29 Comparação entre a variação da deformação de escoamento do material original e os envelhecidos (PEAD).

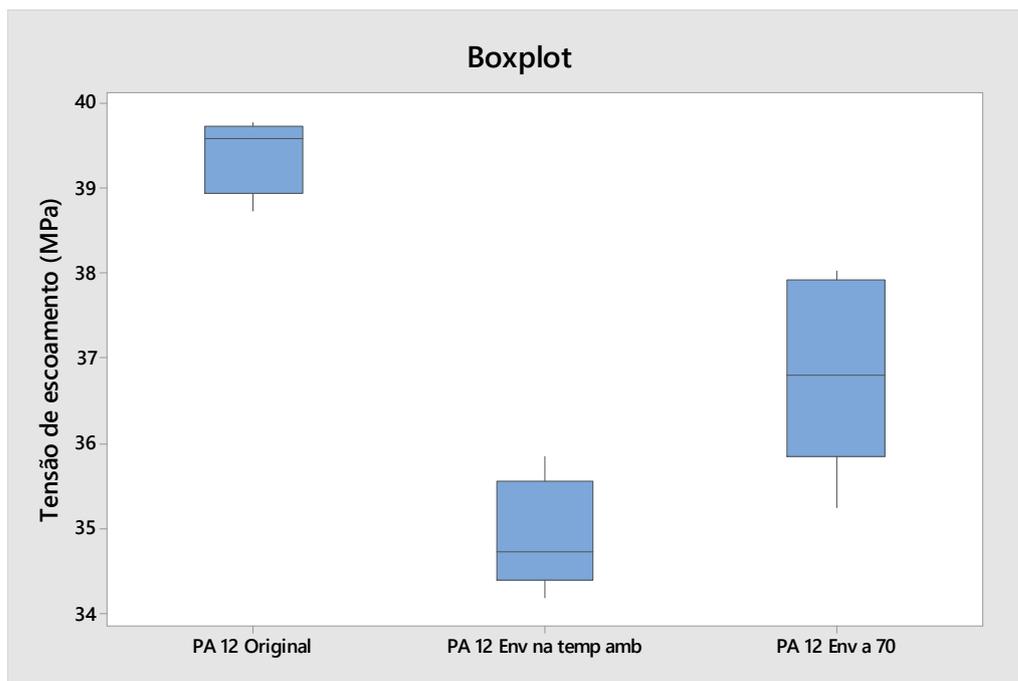


Figura 5.30 Comparação entre a variação da tensão de escoamento do material original e os envelhecidos (PA 12).

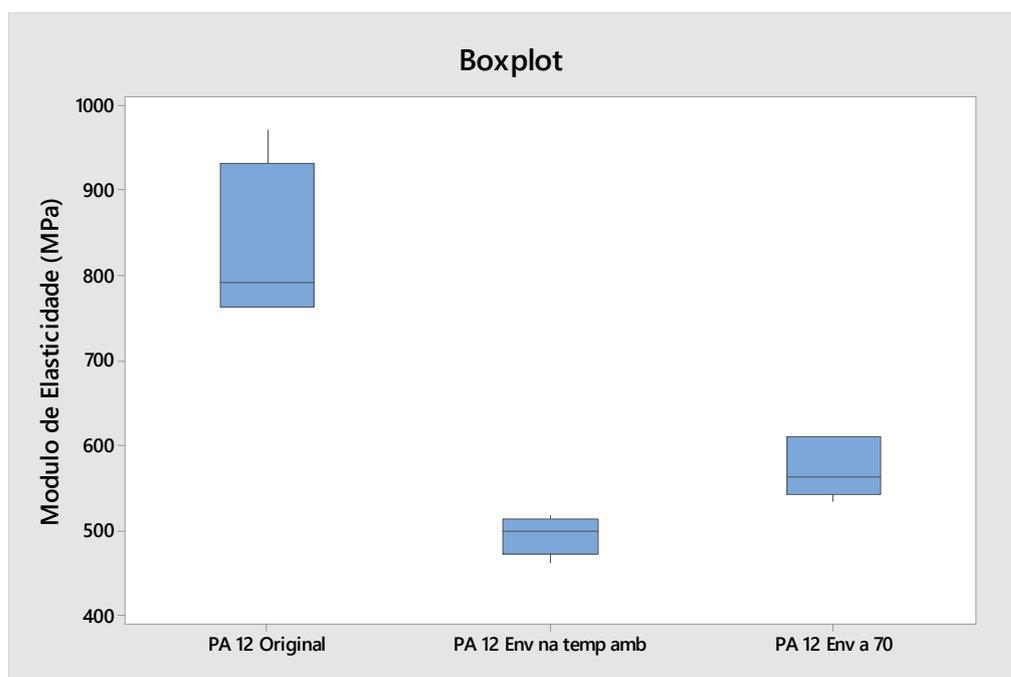


Figura 5.31 Comparação entre a variação do modulo de elasticidade do material original e os envelhecidos (PA 12).

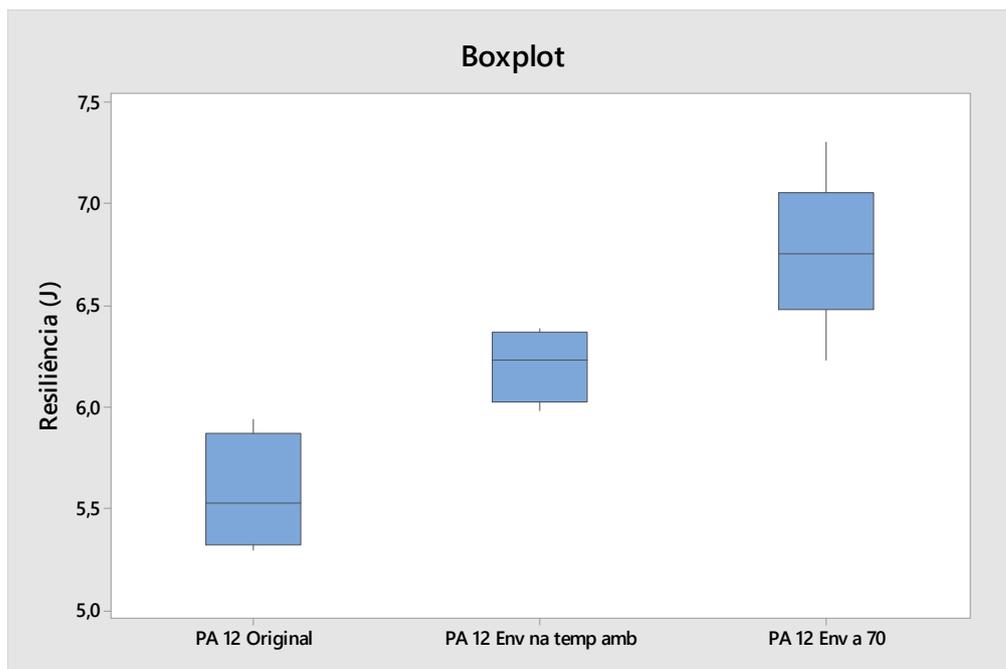


Figura 5.32 Comparação entre a variação da resiliência do material original e os envelhecidos (PA 12).

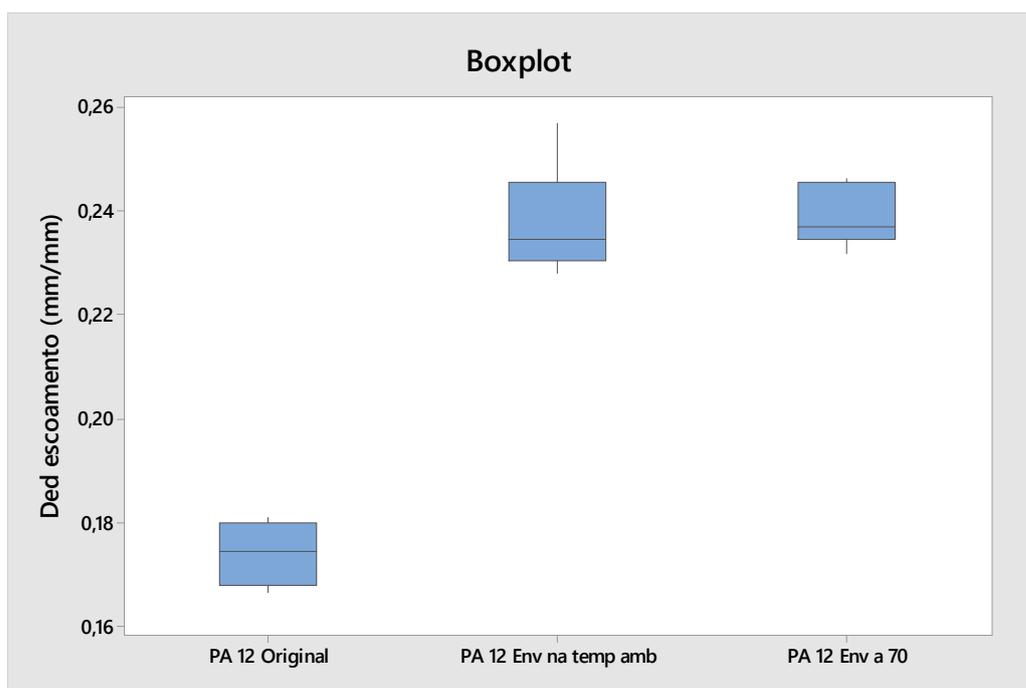


Figura 5.33 Comparação entre a variação da deformação de escoamento do material original e os envelhecidos (PA 12).

## 5.1.2

### Ensaio de Impacto

#### 5.1.2.1

#### Caracterização do PEAD original

Para a caracterização do material como recebido, foram utilizados 12 corpos de prova (figura 5.34) no ensaio de impacto Izod. A máquina de impacto não é instrumentada, portanto a medição da energia absorvida pelo material é calculada basicamente pela diferença de energia potencial.

Os resultados obtidos estão listados na Tabela 5.9. A energia média absorvida pelo PEAD foi de 1,21 J e sua resistência ao impacto relacionada à sua espessura é 0,24 J/mm.

**Tabela 5.9 Propriedades do ensaio de impacto do PEAD original.**

Polietileno			
Corpo de prova	Espessura (mm)	Energia Dissipada (J)	Energia dissipada/Espessura (J/mm)
CP1	5,08	1,24	0,24
CP2	4,98	1,09	0,22
CP3	5	1,21	0,24
CP4	4,94	1,22	0,25
CP5	4,98	1,21	0,24
CP6	5,02	1,33	0,26
CP7	5,05	1,2	0,24
CP8	5,06	1,15	0,22
CP9	5,05	1,18	0,23
CP10	5	1,19	0,24
CP11	5,12	1,12	0,22
CP12	5,01	1,33	0,27
Média	5,02	1,21	0,24
Desvio Padrão	0,05	0,07	0,01
Energia Máxima	5,29 J (Real)	5,38 J (Teórico)	

Deve-se ressaltar que a fratura total dos corpos de prova só ocorreu no retorno do martelo. A figura 5.35 mostra os corpos de prova de PEAD fraturados. Já na figura 5.36 pode-se ver a área da seção transversal fraturada, na qual, macroscopicamente, podem ser observadas 3 regiões com morfologia diferentes. Logo à frente do entalhe existe uma região rugosa, que é seguida por uma região mais lisa e, finalmente, há uma região com aspecto esbranquiçado. O

detalhamento dessa região será descrito na análise por microscopia eletrônica (MEV).

As superfícies de fratura das amostras fraturadas no ensaio de impacto foram analisadas no MEV. A figura 5.37 mostra o PEAD original, onde é possível observar a presença de fibrilações e a formação de grandes estrias, que estão associadas a materiais com boa capacidade de deformação [36,37].



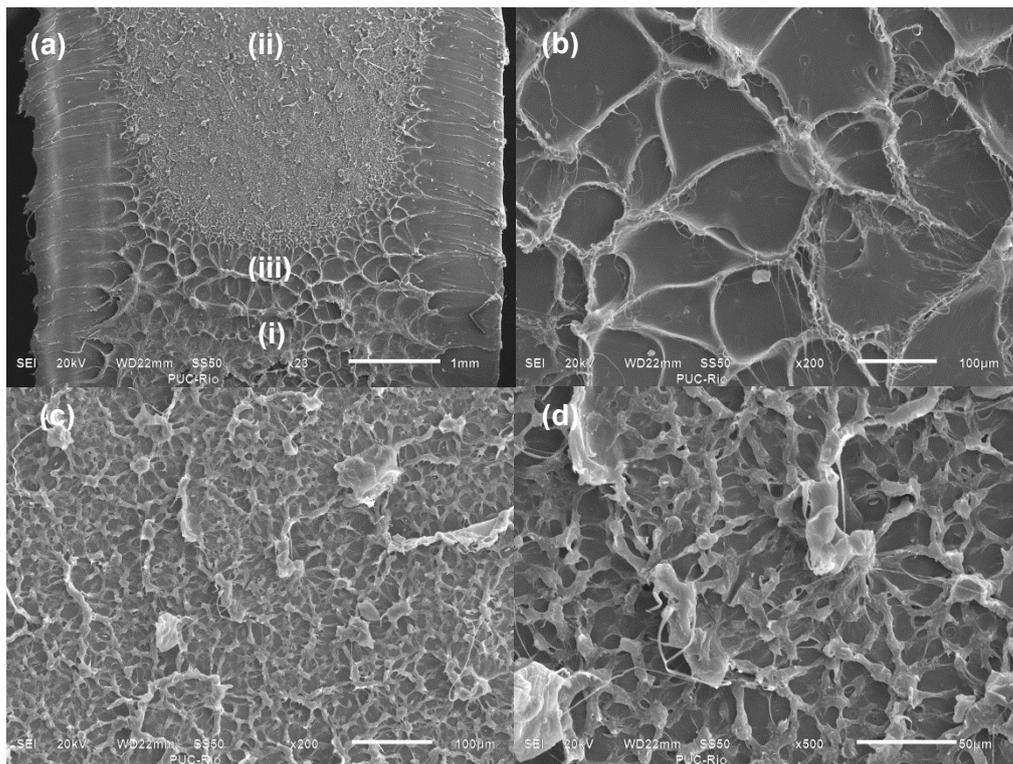
**Figura 5.34** Corpos de prova do PEAD original.



**Figura 5.35** Corpos de prova fraturados.



**Figura 5.36** Área da fratura.



**Figura 5.37** Imagens realizadas no MEV do PEAD original (a,b,c,d) através de diferentes aumentos de 23X, 200X, 200X e 500X respectivamente e diferentes regiões.

A figura 5.37 (a) corresponde a uma imagem de pequena magnificação (23X) da região fraturada, sendo possível identificarmos diferentes regiões correspondentes as outras figuras:

- (i) Corresponde a região (b)
- (ii) Corresponde a região (c)
- (iii) Corresponde a região (d)

### 5.1.2.2

#### Caracterização do PEAD Envelhecido a Temperatura Ambiente

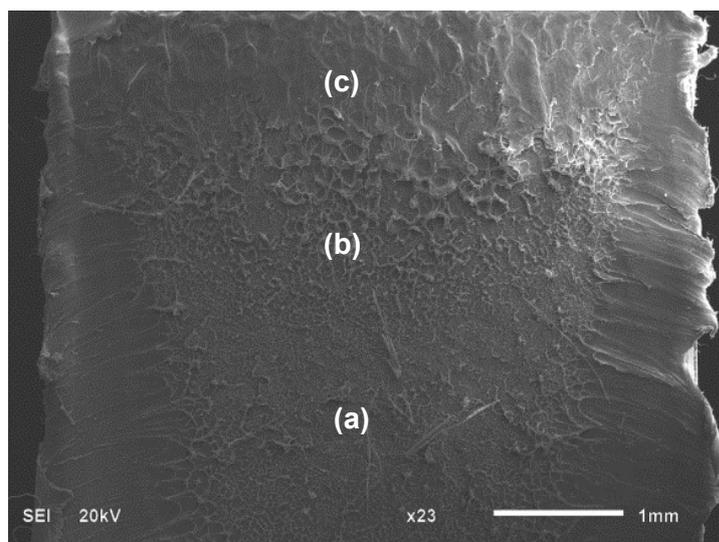
Para a caracterização do material envelhecido, foram utilizados 10 corpos de prova no ensaio de impacto Izod. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 5.10. A energia média absorvida pelo PEAD foi de 1,17 J e sua resistência ao impacto, relacionada à sua espessura, é 0,24 J/mm. A energia do pêndulo usado seria, nominalmente, de 5,38 J. No entanto, devido à dissipação de energia graças à vibração do equipamento, esse valor foi de 5,37 J.

**Tabela 5.10 Propriedades do ensaio de impacto do PEAD envelhecido a temperatura natural.**

PEAD Env Natural			
Corpo de prova	Espessura (mm)	Energia Dissipada (J)	Energia dissipada/Espessura (J/mm)
CP1	5,00	1,19	0,24
CP2	4,93	1,24	0,25
CP3	5,04	1,09	0,22
CP4	4,98	1,20	0,24
CP5	5,07	1,15	0,23
CP6	5,03	1,18	0,23
CP7	4,95	1,24	0,25
CP8	4,94	1,19	0,24
CP9	5,03	1,11	0,22
CP10	4,95	1,14	0,23
Media	4,99	1,17	0,24
Desvio Padrão	0,05	0,05	0,01
Energia Máxima	5,37 J (Real)	5,38 J (Teórico)	

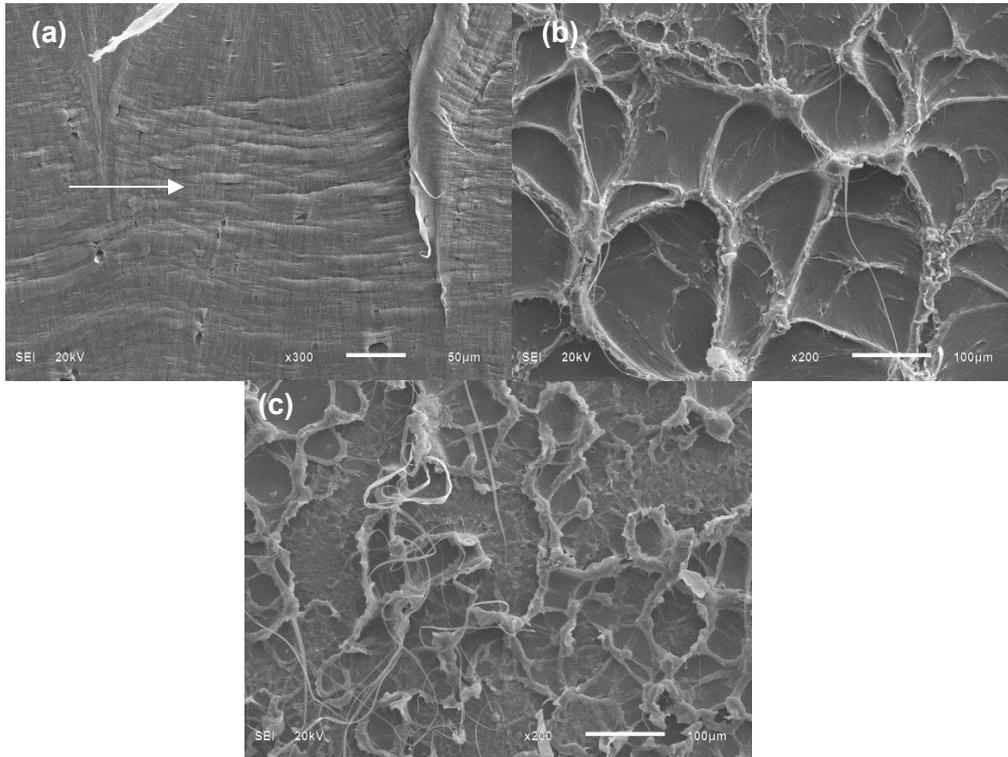
A fratura total dos corpos de prova só ocorreu no retorno do martelo. Em comparação com o material original, praticamente não houve mudança na capacidade do material resistir ao impacto.

A figura 5.38 mostra o PEAD envelhecido na temperatura ambiente, onde é possível observar a presença de fibrilações e a formação de grandes estrias. Pode-se observar a formação de bandas características da fibrilação ( → ) e estrias longas [36,37].



**Figura 5.38 Imagem de pequena magnificação (23X) da região fratura do PEAD envelhecido na temperatura ambiente.**

Na figura 5.38 estão identificadas as diferentes regiões, sob maiores magnificações (300X, 200X, 200X) respectivamente, como mostra a figura 3.39.



**Figura 5.39** Imagem das diferentes regiões da fratura do PEAD envelhecido na temperatura ambiente.

### 5.1.2.3

#### Caracterização do PEAD Envelhecido a 70 °C

Para a caracterização do material envelhecido a 70°C, também foram utilizados 10 corpos de prova no ensaio de impacto Izod. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 5.11. A energia média absorvida pelo PEAD foi de 1,65 J e a resistência ao impacto relacionada à espessura foi de 0,33 J/mm. O pêndulo usado foi o mesmo. Assim, a energia nominal seria de 5,38 J. No entanto, devido à dissipação de energia graças à vibração do equipamento, esse valor foi de 5,32 J.

**Tabela 5.11 Propriedades do ensaio de impacto do PEAD envelhecido a 70°C.**

PEAD Env a 70 °C			
Corpo de prova	Espessura (mm)	Energia Dissipada (J)	Energia dissipada/Espessura (J/mm)
CP1	5,00	1,58	0,32
CP2	4,98	1,78	0,36
CP3	5,09	1,60	0,31
CP4	5,02	1,70	0,34
CP5	5,11	1,52	0,30
CP6	5,12	1,59	0,31
CP7	4,97	1,52	0,31
CP8	5,10	1,71	0,34
CP9	5,03	1,64	0,33
CP10	4,85	1,90	0,39
Media	5,03	1,65	0,33
Desvio Padrão	0,08	0,12	0,03
Energia Máxima	5,32 J (Real)	5,38 J (Teórico)	

Como no envelhecimento a temperatura ambiente, a fratura total dos corpos de prova só ocorreu no retorno do martelo. No caso dos materiais envelhecidos a 70 °C, houve um aumento de aproximadamente 37% da capacidade do material em resistir ao impacto. Isso pode estar relacionado como a absorção de água durante o envelhecimento, tornando o material mais resistente ao impacto.

A figura 5.40 mostra o PEAD envelhecido a 70 °C, onde é possível observar a presença de fibrilações e a formação de grandes estrias. Nota-se que o material envelhecido a 70 °C, possui fibras mais longas e uma maior densidade de fibrilações comparado com o PEAD envelhecido na temperatura ambiente, isso devido ao aumento de tenacidade a fratura, aumentando a capacidade do material se deformar.

A figura 5.40 (a) corresponde a uma imagem de pequena magnificação (23X) da região fraturada, sendo possível identificarmos diferentes regiões correspondentes as outras figuras:

- (i) Corresponde a região (b)
- (ii) Corresponde a região (c)
- (iii) Corresponde a região (d)

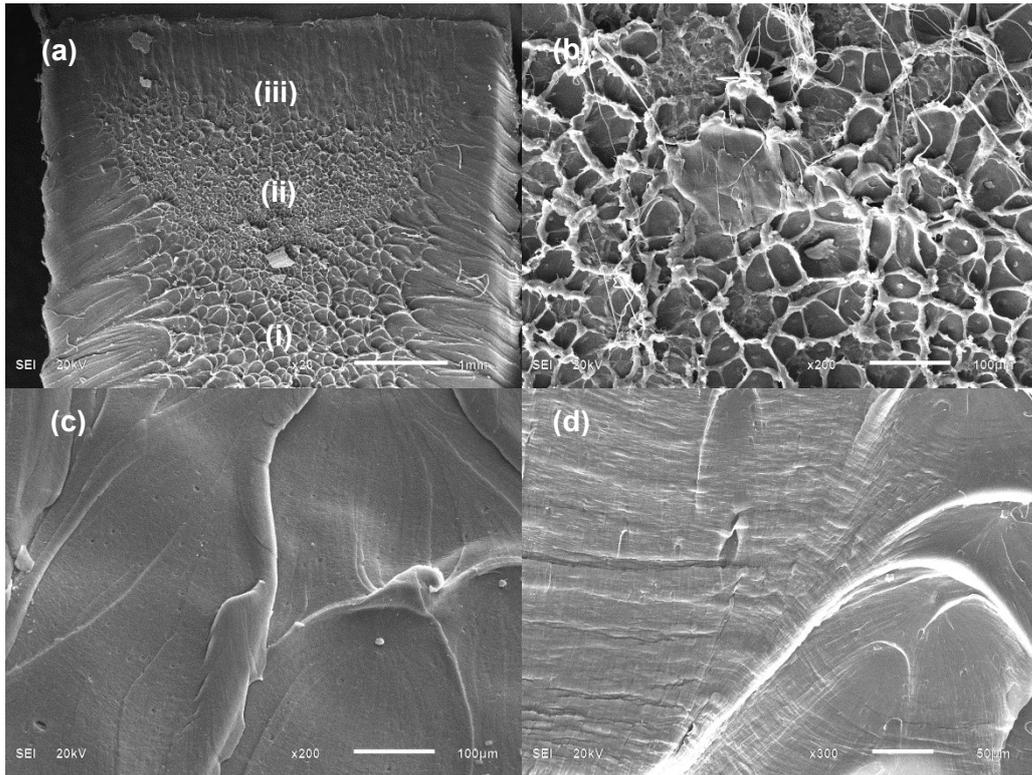


Figura 5.40 Imagens realizadas no MEV do PEAD envelhecido a 70 °C (a,b,c,d) através de diferentes aumentos de 23X, 200X, 200X e 300X respectivamente e diferentes regiões.

A figura 5.41 compara os materiais antes e após o envelhecimento em relação à capacidade de cada um em resistir ao impacto. Houve um aumento na resistência ao impacto dos corpos de prova envelhecidos a 70 °C. Já os corpos envelhecidos a temperatura ambiente sofreram uma pequena diminuição na resistência média ao impacto. Porém a diferença não é significativa.

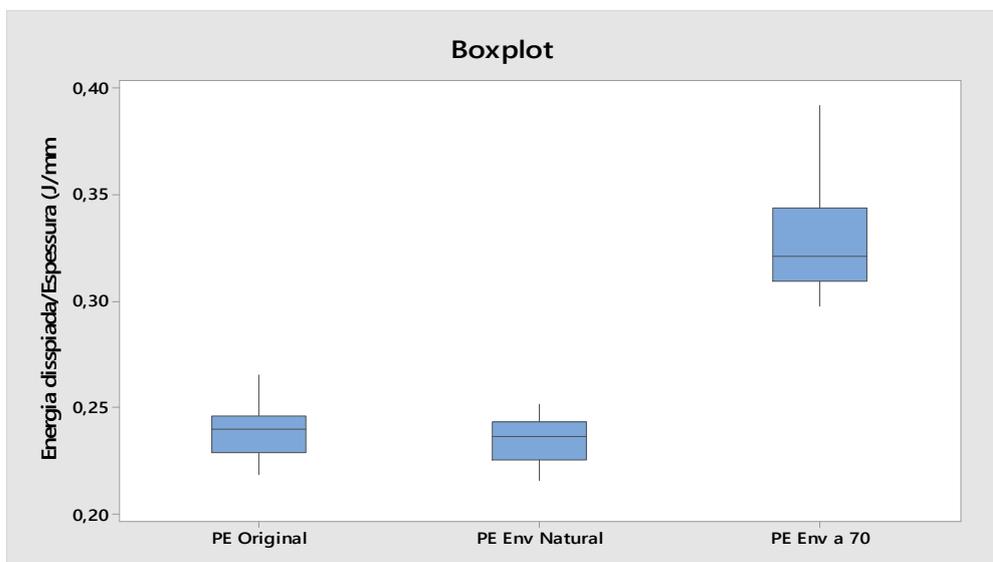


Figura 5.41 Comparação entre a variação da resistência ao impacto do material original e os envelhecidos (PEAD).

Mais notável foi à degradação visual nos materiais após a realização do tratamento de envelhecimento. Na figura 5.42 é feita a comparação entre as amostras submetidas aos diversos ambientes, de forma a uma melhor visualização. Pode-se observar que, na figura (1), o material envelhecido a 70 °C degradou-se e houve uma perda de coloração, em relação ao material original (2); material que serviu de base. Já as amostras na figura (3) são do material envelhecido a temperatura ambiente. Em comparação ao material original (figura (2)), houve pequena alteração de aspecto. No entanto, essa foi muito menor do que a alteração que ocorreu no material submetido a 70 °C (figura (1)).

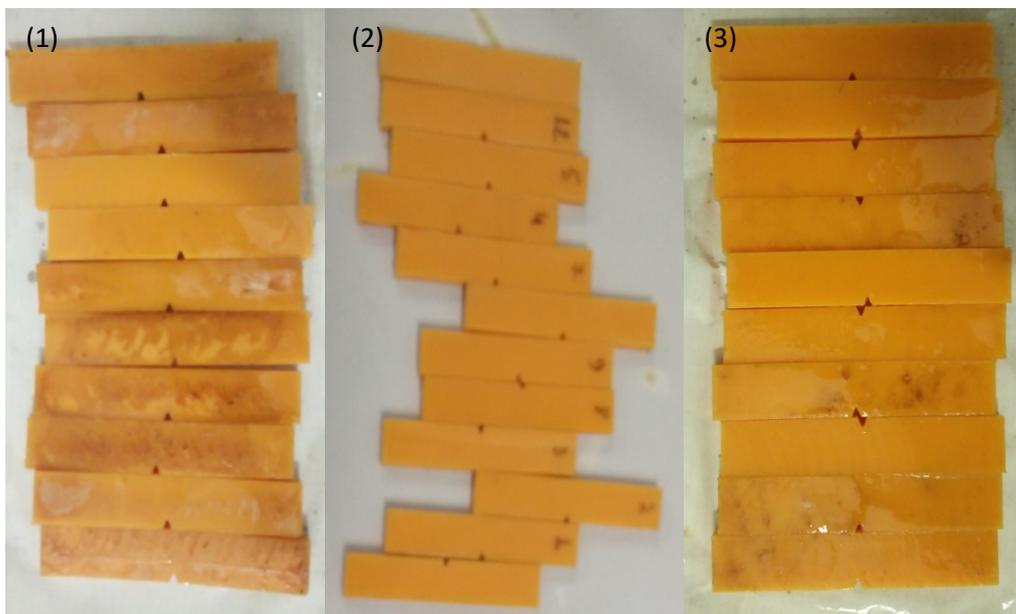


Figura 5.42 Comparação entre o material original e os envelhecidos (PEAD).

#### 5.1.2.4 Caracterização da Poliamida 12 Original

Para a caracterização ao impacto da poliamida também foram utilizados 12 corpos de prova no ensaio de impacto Izod. Os resultados obtidos para todos os corpos de prova estão listados na Tabela 5.12. A energia média absorvida foi de 1,71 J e sua resistência ao impacto foi de 0,34 J/mm. Devido a perdas pela vibração do equipamento, utilizou-se como sendo a energia máxima 5,36 J.

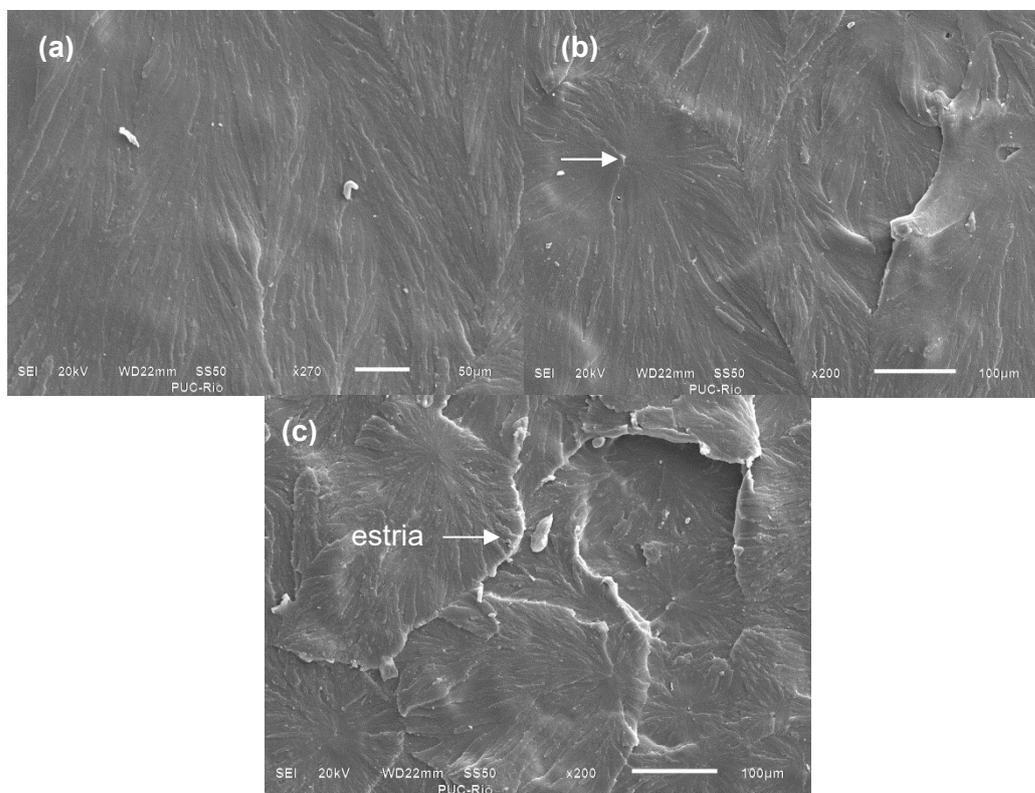
**Tabela 5.12 Propriedades do ensaio de impacto da Poliamida 12 original.**

Poliamida 12			
Corpo de prova	Espessura (mm)	Energia Dissipada (J)	Energia dissipada/Espessura (J/mm)
CP1	5,04	1,76	0,35
CP2	5,05	1,43	0,28
CP3	5,00	1,70	0,34
CP4	5,10	1,74	0,34
CP5	5,11	1,74	0,34
CP6	5,04	1,78	0,35
CP7	5,00	1,79	0,36
CP8	5,00	1,52	0,30
CP9	5,04	1,99	0,39
CP10	5,06	1,70	0,34
CP11	5,01	1,60	0,32
CP12	4,97	1,81	0,36
Média	5,04	1,71	0,34
Desvio Padrão	0,04	0,14	0,03
Energia Máxima	5,36 J (Real)	5,38 J (Teórico)	

A fratura total dos corpos de prova também só ocorreu no retorno do martelo. A figura 5.43 mostra a área da seção transversal onde ocorreu a fratura nos corpos de prova da Poliamida 12. Pode-se observar que, macroscopicamente, a fratura parece ser mais homogênea do que a fratura observada para o PEAD (figura 5.36).

**Figura 5.43 Área da seção fraturada.**

As superfícies de fratura das amostras fraturadas no ensaio de impacto foram analisadas no MEV. A figura 5.44 mostra a PA 12 original, onde pode-se observar uma superfície de baixo relevo. Sob maiores magnificações observa-se a presença de regiões lisas ( → ) associadas a diversos pontos de início de fratura. Essa morfologia é característica da fratura de polímeros [38,39]. A interseção entre as várias facetas mostra a presença de estrias incipientes. As estrias são formadas por cisalhamento e são indicativas de processos de deformação no polímero [36]. Após os envelhecimentos, figuras 5.46 e 5.49, as amostras apresentaram marcas superficiais diferentes, indicativas do efeito do processo de envelhecimento.



**Figura 5.44** Imagens realizadas no MEV PA 12 original (a, b, c) através de diferentes aumentos 270X, 200X e 200X respectivamente e diferentes regiões.

Para uma melhor comparação dos resultados entre os dois polímeros, os dados dos dois materiais foram agrupados em um mesmo gráfico, comparando a energia dissipada/espessura de cada material (figura 5.45).

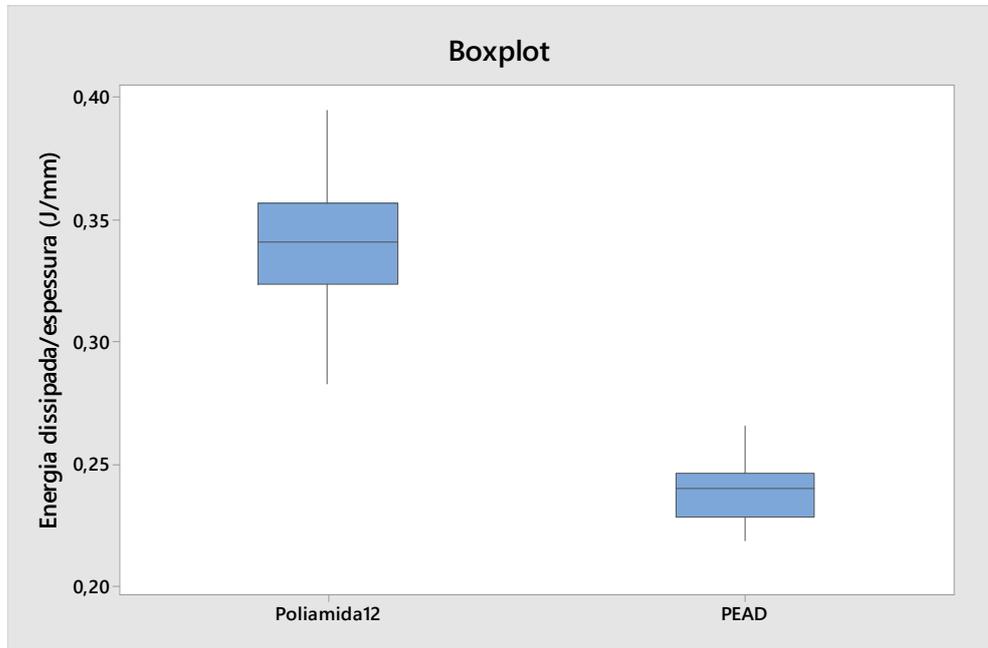


Figura 5.45 Energia dissipada (ensaio de impacto).

#### 5.1.2.5

#### Caracterização da Poliamida 12 Envelhecida a Temperatura Ambiente.

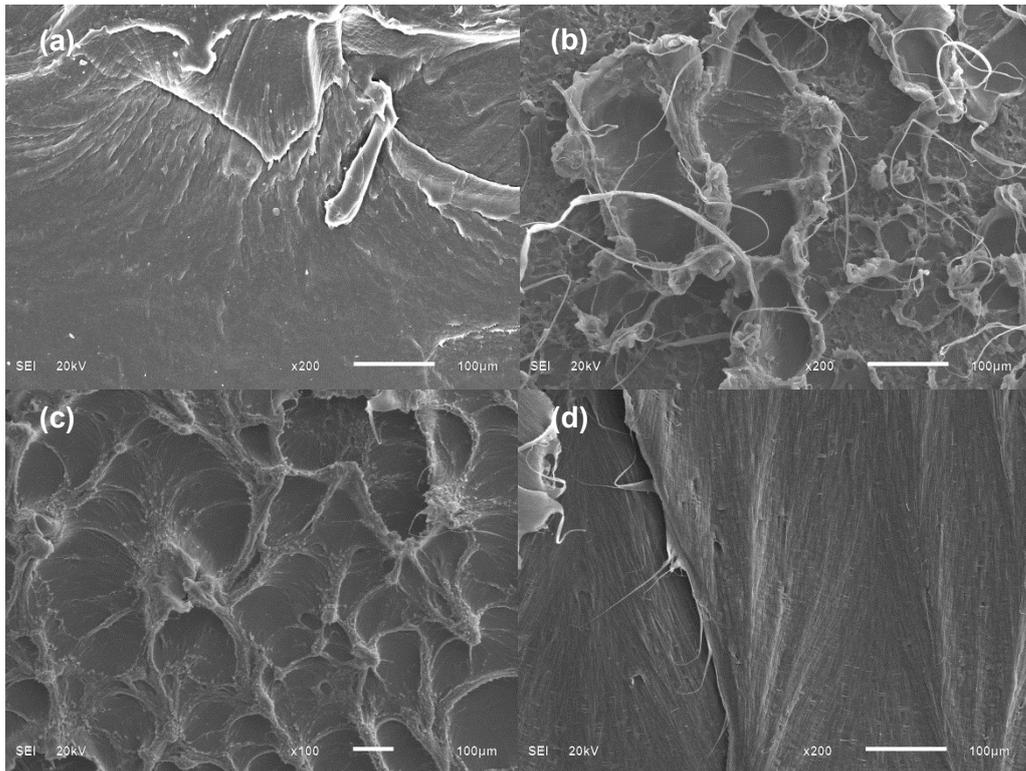
As condições de ensaio da PA 12 após envelhecimento foram semelhantes às condições empregadas para o PE, tendo sido utilizados 10 corpos de prova no ensaio de impacto Izod. Os resultados obtidos para todos os corpos de prova estão listados na Tabela 5.13. A energia média absorvida foi de 3,65 J e a resistência ao impacto foi de 0,72 J/mm. O pêndulo usado foi o de 5,38 J, porém, devido à dissipação de energia graças à vibração do equipamento, o valor real foi de 5,26 J.

**Tabela 5.13 Propriedades do ensaio de impacto da Poliamida 12 envelhecida a temperatura ambiente.**

PA 12 Env Natural			
Corpo de prova	Espessura (mm)	Energia Dissipada (J)	Energia dissipada/Espessura (J/mm)
CP1	5,11	3,69	0,72
CP2	5,16	3,64	0,71
CP3	5,14	3,71	0,72
CP4	5,04	3,66	0,73
CP5	5,05	3,59	0,71
CP6	5,11	3,51	0,69
CP7	5,03	3,62	0,72
CP8	5,11	3,62	0,71
CP9	5,05	3,70	0,73
CP10	5,10	3,72	0,73
Media	5,09	3,65	0,72
Desvio Padrão	0,04	0,06	0,01
Energia Máxima	5,26 J (Real)	5,38 J (Teórico)	

A fratura total dos corpos de prova só ocorreu no retorno do martelo. Em comparação com o material original, nota-se que houve um grande aumento na resistência ao impacto. Esse resultado pode ter ocorrido pela absorção de água, tornando o material mais resistente ao impacto, já que houve um aumento percentual de praticamente 113%.

As superfícies de fratura das amostras fraturadas no ensaio de impacto foram analisadas no MEV. A figura 5.46 mostra a PA 12 envelhecido na temperatura ambiente, pode-se observar a presença de fibrilação e a formação de grandes estrias, que são associadas ao aumento da capacidade de deformação do polímero devido à absorção de água. Os vazios observados são formados por cavitação devido ao campo de tensões existem na ponta da trinca [37].



**Figura 5.46** Imagens realizadas no MEV da PA 12 envelhecido na temperatura ambiente (a,b,c,d) através de diferentes aumentos 200X, 200X 100X e 200X respectivamente e diferentes regiões.

### 5.1.2.6

#### Caracterização da Poliamida 12 Envelhecida 70<sup>0</sup>C

Foram utilizados 10 corpos de prova no ensaio de impacto Izod. Os resultados obtidos para todos os corpos de prova estão listados na Tabela 5.14. A energia média absorvida foi de 3,82 J e a resistência ao impacto foi de 0,75 J/mm. Novamente, o pêndulo usado foi o de 5,38 J, porém, devido à dissipação de energia graças à vibração do equipamento, o valor real foi de 5,27 J.

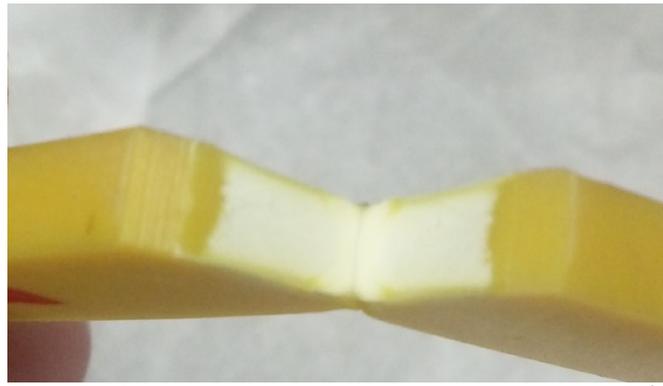
**Tabela 5.14 Propriedades do ensaio de impacto da Poliamida 12 envelhecida a 70°C**

PA 12 Env a 70 °C			
Corpo de prova	Espessura (mm)	Energia Dissipada (J)	Energia dissipada/Espessura (J/mm)
CP1	5,07	3,71	0,73
CP2	5,02	3,89	0,77
CP3	5,07	3,84	0,76
CP4	5,00	4,00	0,80
CP5	5,06	3,66	0,72
CP6	5,13	3,73	0,73
CP7	5,08	3,74	0,74
CP8	5,06	3,92	0,77
CP9	5,03	3,89	0,77
CP10	5,13	3,83	0,75
Media	5,07	3,82	0,75
Desvio Padrão	0,04	0,10	0,02
Energia Máxima	5,27 J (Real)	5,38 J (Teórico)	

A fratura total dos corpos de prova só ocorreu no retorno do martelo. Em comparação com o material original, nota-se que houve um grande aumento na resistência do material, em torno de 123%, aumentando a resistência ao impacto. Desse modo, alguns corpos de prova não fraturaram totalmente (CP 2, CP 4, CP 7, CP 8, CP 9, CP 10), figura 5.47.

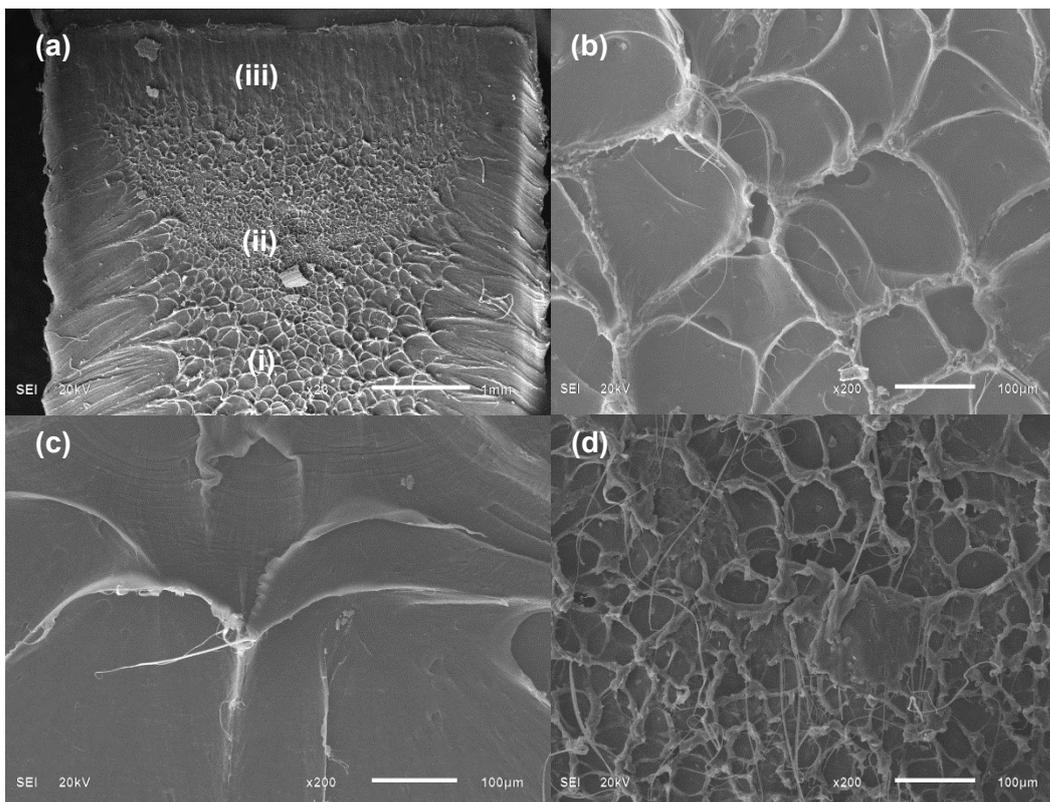
A figura 5.48 mostra a área da seção transversal onde ocorreu a fratura, pode-se observar que, macroscopicamente, a fratura parece homogênea.

**Figura 5.37** Corpos de prova que não fraturaram após o ensaio.



**Figura 5.48** Área da fratura da Poliamida envelhecida a 70 °C.

As superfícies de fratura das amostras fraturadas no ensaio de impacto foram analisadas no MEV. A figura 5.49 mostra a PA 12 envelhecido a 70 °C. Marcas similares, a PA 12 envelhecida na temperatura ambiente, foram observadas para as amostras envelhecidas a 70°C, o que indica também o efeito da água sobre a estrutura/comportamento do polímero.

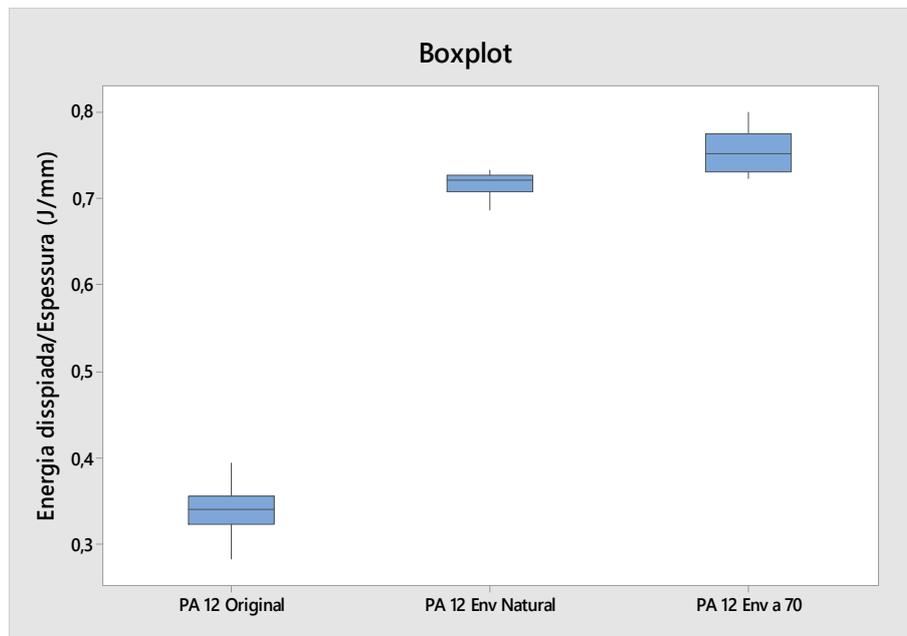


**Figura 5.49** Imagens realizadas no MEV da PA 12 envelhecida a 70 °C (a,b,c,d) de diferentes regiões.

A figura 5.49 (a) corresponde a uma imagem de pequena magnificação (23X) da região fraturada, sendo possível identificarmos diferentes regiões correspondentes as outras figuras:

- (i) Corresponde a região (b)
- (ii) Corresponde a região (c)
- (iii) Corresponde a região (d)

Numa comparação com o material original fica evidente o aumento de resistência ao impacto, como mostra a figura 5.50.



**Figura 5.50** Comparação entre o material original e os envelhecidos.

Visualmente, houve variação da aparência dos materiais envelhecidos, como pode ser visto na figura 5.51. Na figura 5.51, (1) mostra o material original. Comparado com a figura (2), material envelhecido a temperatura ambiente, pode-se ver que houve escurecimento do material. Na figura (3), material envelhecido a 70 °C, fica mais evidente ainda a perda de coloração.

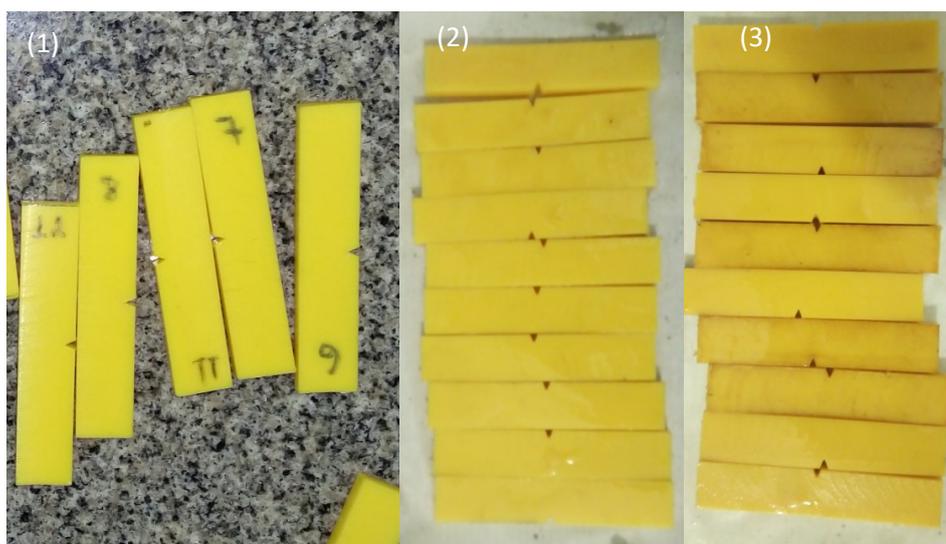


Figura 5.51 Comparação entre o material original e os envelhecidos.

### 5.1.3

#### Ensaio de excitação por Impulso

##### 5.1.3.1

#### Caracterização do PEAD Original

O ensaio de excitação por impulso teve a finalidade de medir a variação do módulo de elasticidade e do fator de amortecimento de maneira não destrutiva. Para a realização desse ensaio cada amostra foi inicialmente medida em 3 pontos diferentes (comprimento, largura e espessura) e pesada, obtendo-se a média e o desvio padrão, como mostrado na tabela 5.15. Os valores do módulo de elasticidade à flexão e do fator de amortecimento são a média de 40 medidas.

Tabela 5.15 Dimensões da amostra.

PEAD				
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)
CP 1	79,88	25,00	5,23	9,75
	79,87	24,94	5,20	9,74
	79,86	24,94	5,16	9,75
Média	79,87	24,96	5,20	9,75
Desvio Padrão	0,01	0,03	0,04	0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,949			

### 5.1.3.2

#### Caracterização do PEAD Envelhecido a Temperatura Ambiente

O mesmo procedimento adotado para o PEAD original foi empregado para aos materiais envelhecidos. Os resultados das dimensões e da massa da amostra de PEAD estão listados na tabela 5.16.

**Tabela 5.16 Dimensões da amostra envelhecida.**

PEAD Env a Temp Ambiente				
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)
CP 1	79,90	25,10	5,25	9,83
	79,89	25,11	5,26	9,83
	79,91	25,09	5,24	9,82
Media	79,90	25,10	5,25	9,83
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,949			

### 5.1.3.3

#### Caracterização do PEAD Envelhecido a 70 °C

Os resultados das dimensões e da massa da amostra de polietileno estão listados na tabela 5.17.

**Tabela 5.17 Dimensões da amostra envelhecida.**

PEAD Env a Temp 70 °C				
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)
CP 1	79,61	25,01	5,38	9,72
	79,60	25,03	5,32	9,73
	79,62	25,02	5,30	9,72
Media	79,61	25,02	5,33	9,72
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,04	0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,949			

O módulo de elasticidade à flexão antes e após o envelhecimento pode ser visto na tabela 5.18. Foi calculada a média e o desvio padrão para cada corpo de prova através da realização de 40 ensaios.

**Tabela 5.18 Módulo de elasticidade a flexão antes e após o envelhecimento.**

Módulo de elasticidade à flexão		
Corpos de prova	Media [GPa]	Desvio Padrão
Polietileno Original	2,06	0,01
Polietileno Env a temp ambiente	2,12	0,01
Polietileno Env a 70 °C	1,90	0,01

Conforme observado na tabela 5.18 houve um aumento do módulo de elasticidade à flexão da amostra envelhecida a temperatura ambiente e houve redução para a amostra envelhecida a 70 °C. O gráfico da figura 5.52 ilustra esse resultado.

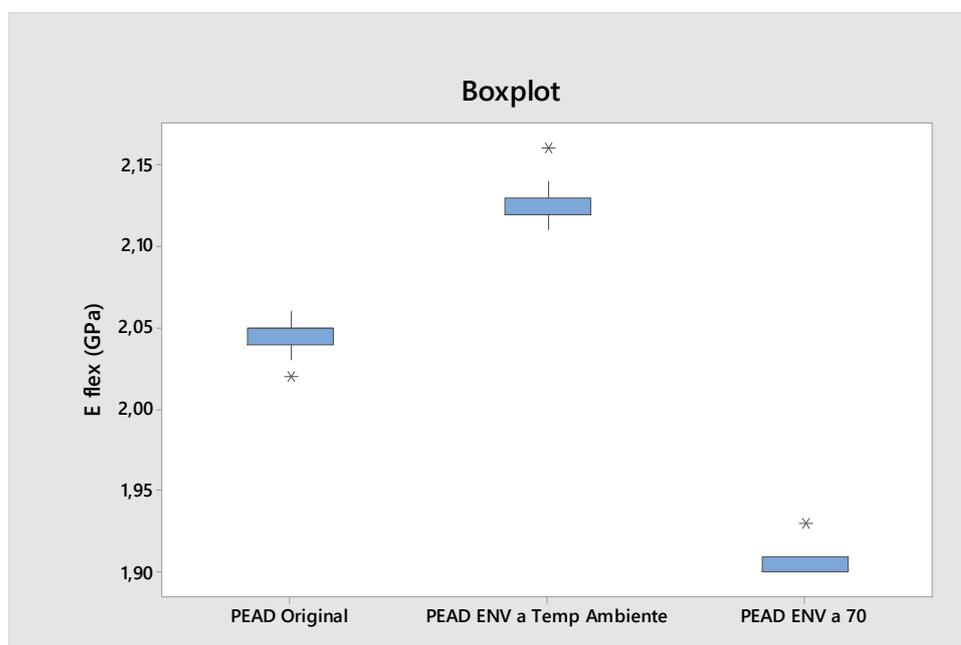


Figura 5.52 Módulo de elasticidade à flexão (ensaio de flexão).

A média e o desvio padrão do fator de amortecimento inicial e a média e o desvio padrão do fator de amortecimento final para os corpos envelhecidos, bem como as suas respectivas frequências, estão listados na Tabela 5.19. Os resultados são apresentados também na figura 5.53.

Tabela 5.19 Fator de amortecimento e suas respectivas frequências do Polietileno envelhecido e original.

PEAD	Amortecimento [ $10^{-3}$ ]		Frequência [Hz]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Corpos de prova				
Polietileno Original	19,15	0,22	1219,20	2,91
Polietileno Env a temp Ambiente	12,48	7,82	1307,81	1,88
Polietileno Env a 70 °C	11,94	8,23	1263,51	2,24

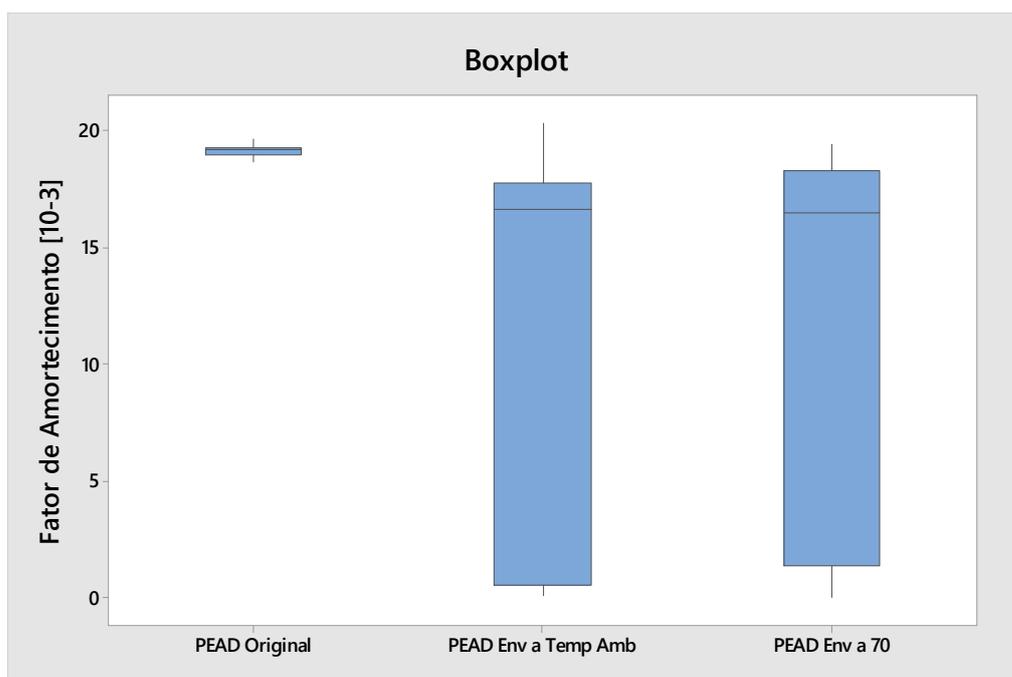


Figura 5.53 – Fator de amortecimento.

#### 5.1.3.4 Caracterização da Poliamida 12 Original

O mesmo procedimento adotado para o PEAD foi empregado para a poliamida. Os resultados das dimensões e da massa da amostra de poliamida estão listados na tabela 5.20.

Tabela 5.20 Dimensões da amostra original.

PA 12				
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)
CP 1	79,92	25,18	5,21	10,28
	79,86	25,16	5,20	10,29
	79,84	25,19	5,16	10,29
Média	79,87	25,18	5,19	10,29
Desvio Padrão	0,04	0,02	0,03	0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,999			

#### 5.1.3.5 Caracterização da Poliamida 12 Envelhecida a Temperatura Ambiente

O mesmo procedimento adotado para os outros corpos de prova foram adotados para as poliamidas envelhecidas. A tabela 5.21 lista as dimensões do corpo de prova e sua respectiva massa.

**Tabela 5.21 Dimensões da amostra envelhecida.**

PA 12 Env a Temp Ambiente				
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)
CP 1	79,61	25,13	5,13	10,20
	79,60	25,14	5,14	10,20
	79,62	25,16	5,16	10,21
Média	79,61	25,14	5,14	10,20
Desvio Padrão	0,01	0,02	0,02	0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,999			

### 5.1.3.6

#### Caracterização da Poliamida 12 Envelhecida a 70 °C

Os resultados das dimensões e da massa da amostra de poliamida estão listados na tabela 5.22.

**Tabela 5.22 Dimensões da amostra envelhecida.**

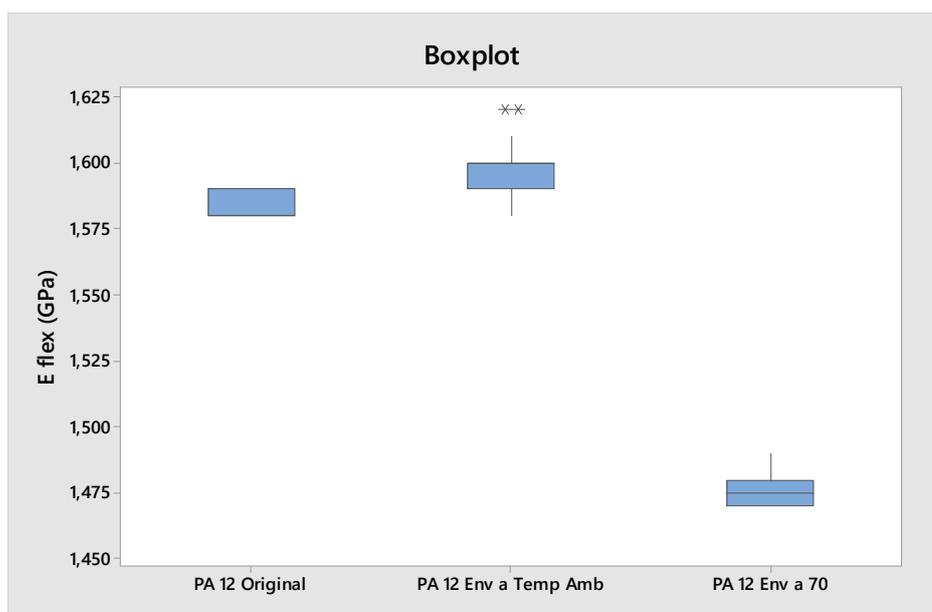
PA 12 Env a Temp a 70 °C				
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)
CP 1	79,73	25,06	5,39	10,23
	79,74	25,07	5,30	10,22
	79,72	25,06	5,30	10,23
Media	79,73	25,06	5,33	10,23
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,05	0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,999			

O módulo de elasticidade à flexão antes e após o envelhecimento está mostrado na tabela 5.23. Foi calculada a média e o desvio padrão para cada corpo de prova pela realização de 40 medidas.

**Tabela 5.23 Módulo de elasticidade a flexão antes e após o envelhecimento.**

Módulo de elasticidade à flexão		
Corpos de prova	Media	Desvio Padrão
Poliamida 12 Original	1,58	0,01
Poliamida 12 Env a temp Ambiente	1,60	0,01
Poliamida Env a 70 °C	1,48	0,01

A poliamida 12 original foi usada como parâmetro, desta forma, pode-se perceber que houve um aumento no módulo à flexão do corpo de prova envelhecido a temperatura ambiente, o que já não ocorreu com o corpo envelhecido a 70°C. A figura 5.54 mostra graficamente os resultados.



**Figura 5.54** Módulo de elasticidade à flexão (ensaio de flexão).

A média e o desvio padrão do fator de amortecimento inicial e a média e o desvio padrão do fator de amortecimento final para os corpos envelhecidos com as suas respectivas frequências, estão listados na Tabela 5.24. O fator de amortecimento final, obtido a partir dos ensaios de excitação por impulso está mostrado na figura 5.55.

**Tabela 5.24** Fator de amortecimento e suas respectivas frequências da Poliamida envelhecido e original.

PA 12 Corpos de prova	Amortecimento [ $10^{-3}$ ]		Frequência [Hz]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Poliamida 12 Original	16,71	0,32	1044,89	0,46
Poliamida 12 Env a temp Ambiente	14,89	1,50	1042,28	1,59
Poliamida Env a 70 °C	16,94	1,25	1053,65	1,36

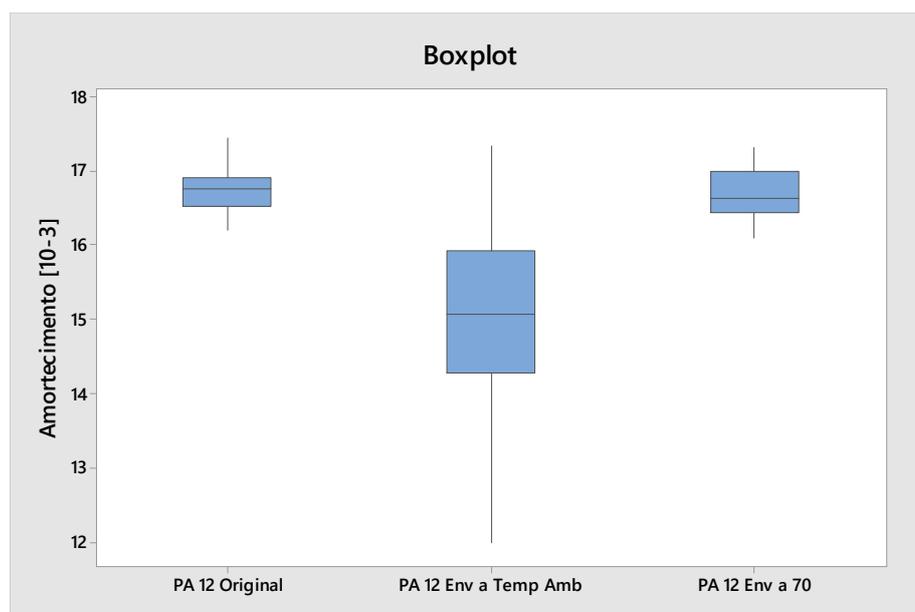


Figura 5.55 – Fator de amortecimento.

### 5.1.3.7

#### Comparação entre os materiais envelhecidos e originais

Para facilitar a visualização das variações nos parâmetros obtidos foi calculada a variação percentual de cada parâmetro com relação ao seu estado inicial. O resultado é mostrado na tabela 5.25.

Tabela 5.25 Variação percentual dos parâmetros obtidos

Corpos	Módulo de elasticidade à flexão	Fator de amortecimento [10 <sup>-3</sup> ]
Polietileno Env a temp ambiente	3,0%	-34,8%
Polietileno Env a 70 °C	-7,5%	-37,6%
Poliamida 12 Env a temp ambiente	1,1%	-10,9%
Poliamida Env a 70 °C	-6,8%	1,4%

Houve uma redução no fator de amortecimento em todos os corpos de prova envelhecidos, com exceção da poliamida envelhecida a 700C. No entanto, houve uma redução bem mais significativa no polietileno. Já em relação ao módulo de elasticidade à flexão, os corpos envelhecidos a temperatura ambiente apresentaram aumento; o que não ocorreu nos corpos envelhecidos a 70 0C, que mostraram redução.

## 5.2 Discussão

É importante ressaltar que para todas as amostras o módulo de elasticidade calculado pelo ensaio de excitação por impulso foi maior que os obtidos pelo ensaio de tração. Isso ocorreu, pois no ensaio mecânico há uma contribuição elástica do equipamento, o que faz com que o módulo de elasticidade seja menor do que o real, isso é esperado para a realização do ensaio sem um extensômetro, como já foi citado antes, além da diferença na velocidade de deformação nos ensaios, sendo o de excitação por impulso muito mais rápido. Quanto maior a taxa de deformação maior o módulo de elasticidade, como é característico dos materiais visco elástico, isso pode ter levado o módulo de elasticidade do PEAD calculado pelo método de impulso ser maior que o módulo da teoria.

Na tabela 5.26 estão agrupadas, para uma melhor visualização, as variações medidas para as propriedades analisadas.

**Tabela 5.26**Variação das propriedades mecânicas.

Propriedades Mecânicas	PEAD Env a Temp amb	PEAD Env a 70 °C	PA 12 Env a Temp amb	PA 12 Env a 70 °C
Carregamento max	-3,3%	-15,8%	1,1%	0,14%
Tensão Máxima	-3,7%	-17,2%	-1,1%	-2,9%
Tensão de escoamento	-3,7%	-17,2%	-11,4%	-6,5%
Def de escoamento	25,7%	35,4%	36,2%	37,4%
Resiliência	18,6%	11,7%	11,3%	21,4%
Módulo de Elasticidade (ensaio de tração)	12,6%	-44,1%	-40,3%	-30,7 %
Energia dissipada/Espessura	-2,7%	37,2%	112,8%	123,0%
Fator Amortecimento [ $10^{-3}$ ]	-34,8%	-37,6%	1,4%	-10,9%
Módulo de elasticidade (ensaio de excitação por impulso)	3,0%	-7,5%	1,1%	-6,8%

• Legenda:

	Sofreu Redução
	Sofreu Aumento

A partir desses dados é possível observar que o PEAD envelhecido a temperatura ambiente sofre pequena redução nas propriedades mecânicas (tensão de escoamento), tornando o material mais suscetível a entrar na zona plástica a menores tensões. O material sofreu um aumento na sua deformação de escoamento, resiliência e módulo de elasticidade. Deve ser ressaltado que houve, qualitativamente, coerência entre os ensaios de tração e de impulso sonoro, pois

em ambos o material sofreu um aumento no módulo de elasticidade. Entretanto, o material sofreu redução na resistência ao impacto (energia dissipada/espessura), o que é coerente, já que houve aumento na rigidez do material (módulo de elasticidade).

A PEAD envelhecida a 70 °C sofreu uma maior redução nas suas propriedades mecânicas (tensão de escoamento) comparada ao PEAD envelhecido à temperatura ambiente. Novamente houve aumento na deformação no escoamento e na resiliência. Porém, diferentemente do PEAD envelhecido a temperatura ambiente houve redução no módulo de elasticidade. Esse resultado novamente é coerente com o ensaio de excitação por impulso. Além do aumento na resistência ao impacto (energia dissipada/espessura), dado que o material sofreu uma diminuição na sua rigidez era esperado aumento na tenacidade ao impacto.

A PA 12 envelhecida a temperatura ambiente sofreu uma redução na sua tensão máxima e na sua tensão de escoamento, que no caso das poliamidas são diferentes. No entanto houve um aumento na deformação de escoamento e na resiliência do material. Houve também uma significativa redução no módulo de elasticidade calculado pelo ensaio de tração o que foi conflitante com o resultado calculado pelo ensaio de impulso sonoro onde foi encontrado um pequeno aumento. No entanto, o fator de amortecimento aumentou, o que para esse caso é consistente, já que o módulo de elasticidade sofreu uma redução. A tenacidade ao impacto sofreu um significativo aumento, o que seria coerente no caso de uma redução do módulo de elasticidade (rigidez).

Finalmente a PA 12 envelhecida a 70 °C, como no caso anterior, também sofreu uma redução na tensão de máxima e tensão de escoamento, havendo ainda aumento na deformação de escoamento e na resiliência do material. No entanto, nesse caso, o módulo de elasticidade sofreu uma redução quando avaliado pelo ensaio de tração e pelo ensaio sonoro, o que torna consistente o aumento da tenacidade ao impacto.

A água pode agir como um plastificante no material tornando-o mais dúctil, ou dependendo da quantidade de água absorvida, do tipo de ligação criada e da temperatura, a água pode ter um efeito de anti-plastificação, aumentando a rigidez do material. Ou seja, o aumento da temperatura pode causar um aumento do volume livre e, isso, pode torná-lo mais flexível. O aumento de temperatura

pode, também, causar aumento da difusão da água na fase amorfa, tornando o material menos resistente (plastificando-o) [3,25].

No caso do PEAD envelhecido a temperatura ambiente houve um aumento no módulo de elasticidade. Esse aumento na rigidez do material pode ter ocorrido graças ao surgimento de novas ligações secundárias (pontes de hidrogênio) causadas pela absorção de água [3,25].