

# **Materiais de Construção Mecânica II**

2012/2013



## **Polímeros**

Relatório dos trabalhos teóricos e práticos

Autores:

Grupo 3M12-11

André Ferreira (em06019)

Carlos Gonçalves (em09106)

Vasco Branco (em10099)

Docentes:

Prof. António Torres Marques

Dr. Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

## Índice

PARTE 2 – TRABALHOS PRÁTICOS .....	4
P2.1 – Introdução .....	4
P2.2 – Identificação de polímeros .....	5
P2.2.1 – Metodologia de identificação .....	5
P2.2.2 – Procedimento experimental e síntese dos resultados obtidos.....	6
P2.2.3 – Análise dos resultados .....	9
P2.2.4 – Conclusões .....	11
P2.2.5 – Metodologia para medição da dureza Shore D .....	11
P2.2.6 - Resultados dos ensaios.....	12
P2.2.7 – Análise dos resultados .....	12
P2.2.8 – Conclusões .....	13
P2.3 – Ensaio à tracção.....	14
P2.3.1 - Metodologia .....	14
P2.3.2 - Resultados do ensaio.....	15
P2.3.3 – Análise dos resultados .....	16
P2.3.4 – Conclusões .....	17
P2.4 – Ensaio à tracção a diferentes velocidades.....	18
P2.4.1 - Metodologia .....	18
P2.4.2 - Resultados dos ensaios.....	18
P2.4.3 – Análise dos resultados .....	20
P2.4.4 – Conclusões .....	22
P2.5 – Ensaio à tracção com relaxação e com fluência .....	23
P2.5.1 – Metodologia .....	23
P2.5.2 - Resultados dos ensaios.....	24

P2.5.3 – Análise dos resultados.....	25
P2.5.4 – Conclusões .....	26
P2.6 – Conclusões gerais.....	27
P2.7 – Resolução do exercício de dimensionamento .....	28
P2.8 – Bibliografia.....	31
P2.9 – Recursos na internet .....	32
P2.10 – Anexos .....	33

## **PARTE 2 – TRABALHOS PRÁTICOS**

### ***P2.1 – Introdução***

O presente relatório engloba todos os trabalhos práticos realizados nas aulas de MCMII relativas à parte de polímeros durante o corrente ano letivo. Os trabalhos práticos tiveram como objetivo aprofundar o conhecimento relativo à identificação de polímeros, aos ensaios de tração, suas normas, análise, sendo ainda estudado o efeito da viscoelasticidade e o estudo da fluência e relaxação. Finalmente foi ainda estudado um caso simples de dimensionamento de um componente simples em material polimérico.

## P2.2 – Identificação de polímeros

### P2.2.1 – Metodologia de identificação

Os testes a serem efetuados, e por ordem, são os presentes na tabela do anexo 1, e que de seguida são explicados mais pormenorizadamente. Esta metodologia permite identificar vinte e cinco polímeros, em que um dos quais é o da nossa amostra.

#### 1. Avaliação de densidade:

Tomando como valor de referência a densidade/massa volúmica da água de  $1000\text{Kg/m}^3$  e sabendo que a esmagadora maioria dos polímeros se encontra muito próximos desse valor (Fig. 1) tanto por valores superiores como por inferiores, podemos fazer uma análise quantitativa da densidade do polímero constatando a sua reação em termos de flutuação, ao ser colocado num recipiente com água.

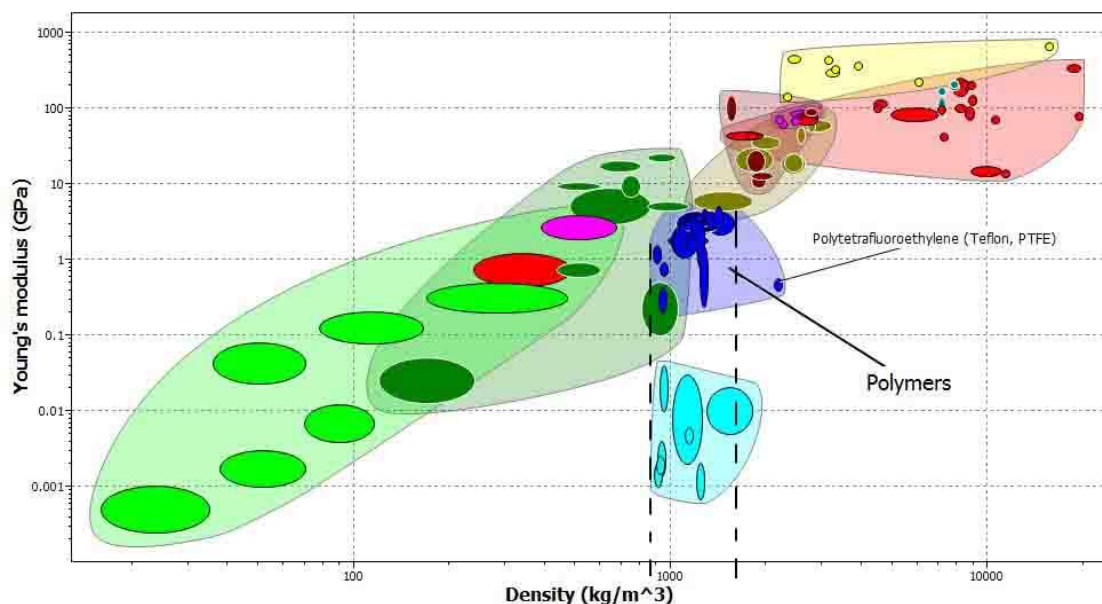


Fig. 1 – Os polímeros têm, na sua grande maioria, uma densidade muito próxima à da água ( $1000\text{kg/m}^3$ ). (CES Edupack, 2012)

Neste teste devem ser tidos em conta algumas considerações:

1) se o material se apresentar em forma de espuma, será necessário raspar o material para dentro do recipiente. Isto porque sob a forma de espuma, o ar presente no interior desce artificialmente a densidade do objeto, e pode levar a conclusões erradas a propósito da flutuação do polímero.

2) a possibilidade da formação de bolhas que aderem à superfície da amostra, que tal como na situação anterior, deflacionam a densidade aparente. Para tal dever-se-á lavar a amostra com detergente e colocar na água onde vai ser feito o teste gotas de detergente na proporção de 2 duas por copo de água.

#### 2. Teste da chama:

A reação ao calor pode ser avaliada submetendo a amostra a uma chama durante alguns segundos analisando-se depois a inflamabilidade, o tempo de duração da combustão caso ocorra e a cor e cheiro

do fumo emitido, se identificável, após extinção da chama. Este passo de identificação do cheiro é realizado em conjunto com a parte da inflamabilidade, mas só entra como fator de eliminação de opções entre o passo 5 e 6, se necessário.

### **3. Ataque com Tetracloreto de Carbono:**

Este teste de resistência química trata-se de colocar a amostra num recipiente contendo tetracloreto de carbono, durante 1-3 minutos e analisar a superfície quanto ao toque – se fica pegajoso/viscoso – e quanto ao aspeto da superfície – se fica com um aspeto baço. A 3ª opção será manter-se inalterado.

Em relação a este teste e ao seguinte há que ter em atenção a perigosidade de inalação dos gases, pelo que é aconselhável fazer ambos os ensaios em local arejado.

### **4. Ataque com Acetato de Etilo:**

Este teste segue um procedimento e objetivos semelhantes ao anterior, com a diferença do solvente a utilizar.

### **5. Teste de dureza:**

Consiste em avaliar a reação da amostra ao riscar com a unha, notando a presença de riscos ou identações resultantes. Foi-nos concedida a possibilidade de medir a dureza da amostra com um durómetro, e assim obter uma avaliação da dureza mais objetiva. Esta será feita de acordo com um procedimento específico que será apresentado e discutido mais à frente no relatório.

### **6. Teste da fratura**

É quebrada a amostra e analisada a fratura quanto à fragilidade / ductilidade e branqueamento nas zonas mais tensionadas.

## **3. Materiais Utilizados**

1. Tabela identificação de Polímeros Termoplásticos
2. Recipiente com água
3. Pinça
4. Gobelé
5. Vareta
6. Hotte
7. Luvas
8. Serra
9. Torno
10. Limatão
11. Tetracloreto de carbono
12. Bico de Bunsen
13. Acetato de etilo

## **P2.2.2 – Procedimento experimental e síntese dos resultados obtidos**

### **1. Avaliação de densidade:**

Para verificar a flutuação, a amostra foi mergulhada em água num recipiente. Após a imersão, a amostra voltou rapidamente à superfície. A amostra foi também raspada com um limatão e os grãos

resultantes foram de novo imersos. Mais uma vez as partículas regressaram à superfície, confirmando os resultados anteriores.

Com este teste reduziu-se o número de polímeros possíveis para sete.

## **2. Teste da chama:**

Com o auxílio de uma pinça, a amostra foi submetida à chama de um Bico de Bunsen na Hotte, durante alguns segundos. A combustão da mesma iniciou-se e retirou-se então a amostra da ação da chama do Bico de Bunsen. Verificou-se a existência de fumos e a duração da chama e apagou-se a chama por meio de sopro. Esta parte do teste não nos elimina nenhuma opção pelo que foi realizado apenas para análise posterior no presente relatório. Já sem chama, procedeu-se então à tentativa de identificação do cheiro dos fumos.

Comparando estes resultados com os resultados previstos na tabela reduziram-se as hipóteses para três polímeros passando-se então ao teste de ataque químico.

## **3. Ataque com Tetracloro de Carbono:**

Este teste foi realizado com luvas para evitar o contacto do solvente químico com a pele. O solvente foi vertido para um gobelé com a ajuda de uma vareta. Depois, a amostra foi introduzida no gobelé durante 1 minuto, não se verificando nenhum ataque à mesma o período de exposição foi alongado aos três minutos.

Posto isto, as hipóteses possíveis ficaram apenas duas e, dada a sequência lógica da tabela, seria possível avançar para o último teste. Porém, a fim de eliminar eventuais dúvidas realizou-se adicionalmente um segundo ataque químico.

## **4. Ataque com Acetato de Etilo:**

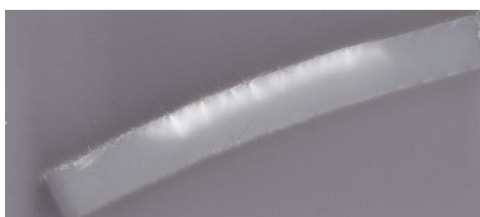
Os procedimentos foram idênticos aos anteriores e verificou-se uma vez mais que a amostra não é atacada.

## **5. Teste de dureza:**

Tentou-se riscar a amostra com a unha, em diversas direções e sentidos, não sendo verificadas quaisquer alterações na amostra.

## **6. Teste da fratura:**

A amostra foi apertada num torno e com um alicate foi forçada a sua flexão. Apesar de não se conseguir levar a peça à fratura, verificou-se o branqueamento da zona sujeita à tração.



**Fig. 2 – Aspeto da amostra após deformação à flexão.**

Tabela 1 – Síntese dos resultados obtidos

Teste	Resultado
Comportamento em água	Flutua-Sólido
Comportamento face a uma chama	Arde (inflamável) sem libertar fumo negro
Solvente 1: carbon tetrachloride:	Não é atacado
Solvente 2: ethyl acetate Arranjar com a unha	Não é atacado
Cheiro dos fumos depois da chama ter sido extinguida	Suave cheiro a vela queimada
Teste da fratura:	Branqueamento da zona deformada

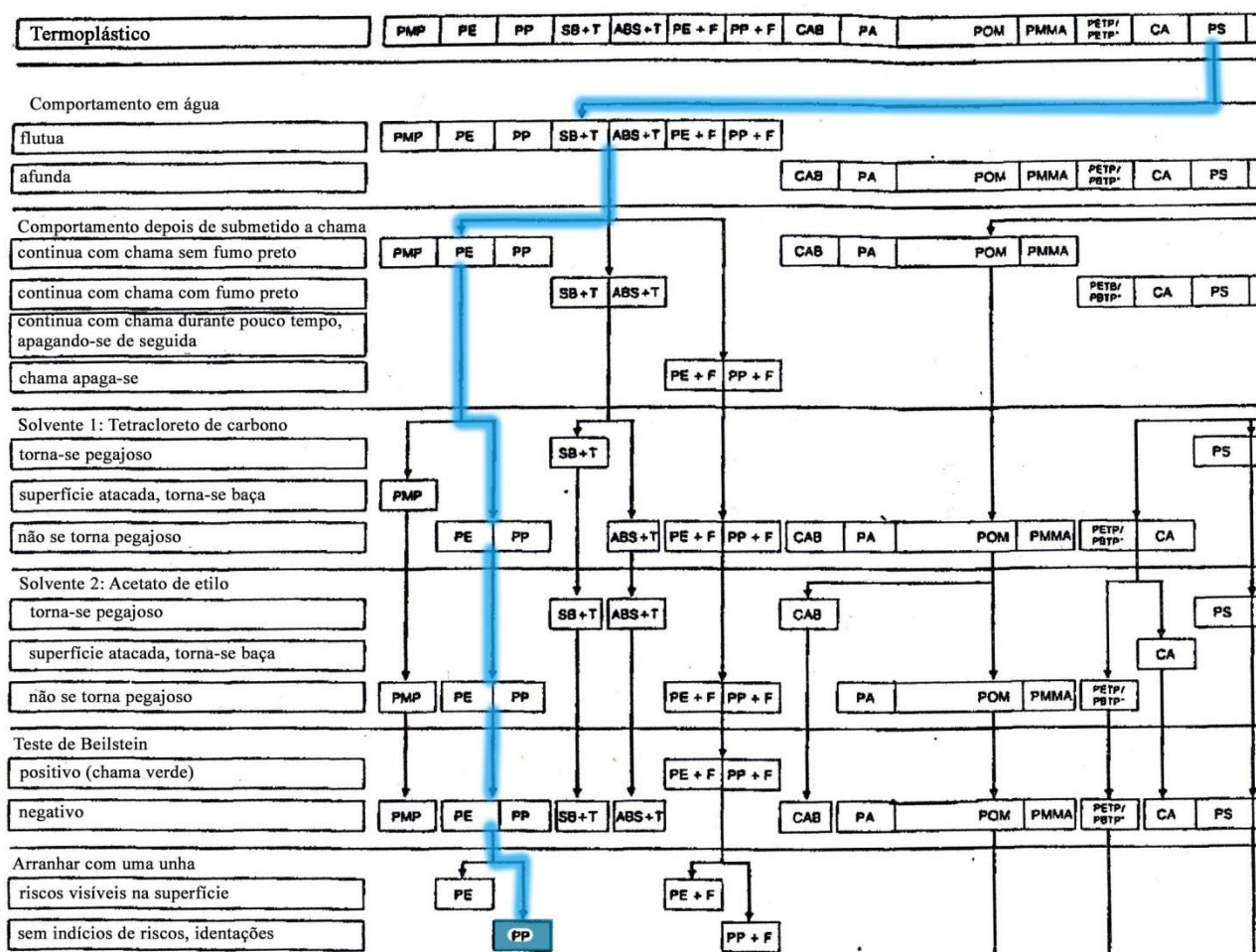


Fig. 3 – Seguimento lógico da metodologia.

### P2.2.3 – Análise dos resultados

#### - Análise da avaliação da densidade

Sabemos (Smith, 1998) que a densidade do polipropileno é de  $900 \text{ kg/m}^3$ , pelo que comparando com a da água que é  $1000 \text{ kg/m}^3$ , é inferior e deve portanto flutuar. O facto de não termos usado água destilada não terá influenciado os resultados uma vez que mesmo o polipropileno cristalino, que é o que possui maior densidade, só tem  $950 \text{ kg/m}^3$ .

#### - Combustão e fumo

A combustão de um polímero pode dividir-se em 5 fases: aquecimento, pirólise, ignição, combustão e extinção. A pirólise ocorre quando a temperatura de decomposição é atingida, que no caso do polipropileno é de 320 a  $400^\circ\text{C}$ . A esta temperatura os polímeros libertam algumas das seguintes substâncias:

- Gases combustíveis, tais como alcanos, alcenos, formaldeído e monóxido de carbono;
- Gases não combustíveis, tais como vapor d'água e dióxido de carbono;
- Gases corrosivos, tais como cloreto de hidrogénio e brometo de hidrogénio;
- Líquidos, usualmente fragmentos das cadeias poliméricas;
- Partículas sólidas tais como fuligem, fibra de vidros e cargas minerais;
- Radicais livres.

Se a estas substâncias se fornecer energia com uma fonte de ignição a combustão do polímero iniciar-se-á. Estequiometricamente a combustão do polipropileno pode escrever-se:  $2\text{C}_3\text{H}_6 + 9\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ . Assim verifica-se que para que a combustão seja completa, por cada duas moles de polipropileno são necessárias 9 mol de oxigénio. Define-se assim o índice de oxigénio que é a quantidade mínima de oxigénio para que a combustão seja completa.

Tabela 2 – Índice de oxigénio de alguns polímeros (Hilado, 1982)

Polímero	Índice de Oxigénio	Polímero	Índice de Oxigénio
Polietileno (Allied 1220)	17	Algodão	19
Polipropileno	18	Poliacrilonitrila (Plexiglas)	17
Hercules (Profax PC072)		Nylon 6-6 (BASF AK3)	25
Poliestireno (Koppers 8)	18	Epoxi (Araldite 6005 / TONOX)	27
Poli(cloreto de vinila) Union Carbide QSAH-7)	40	Acetato de celulose	19
Poli(tetraflúor-etileno) (Du Pont Teflon 6)	95		

Esta quantidade é garantida ou não em função do oxigénio presente na sala onde se deu a combustão. Sabendo que numa combustão incompleta, para além de CO<sub>2</sub> e vapor de água há a formação de produtos visíveis como carbono e CO, a não verificação de fumos na nossa amostra indica que esta foi completa.

Como aparte, pode-se constatar na Tabela 2, que há polímeros com índices de oxigénio bastante superiores e a concentração de oxigénio na sala pode não ser suficiente para garantir a combustão completa. Para estes apenas duas situações podem ocorrer. Ou a combustão se dá com insuficiência de oxigénio e por isso surgem os produtos visíveis enumerados anteriormente, ou a combustão é extinta quando a amostra é retirada da chama. A nosso ver, este teste estabelece a distinção entre os polímeros aquando do teste da chama com base no índice de oxigénio e num valor médio de concentração atmosférica de oxigénio. No caso do polipropileno o seu baixo índice de oxigénio terá sido suficiente para garantir a combustão completa, permanecendo a chama ativa até ser apagada propositadamente, e para a não visualização quaisquer fumos durante a mesma.

([http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14281998000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14281998000100005&script=sci_arttext))

#### - Reação química com o tetracloreto de carbono e com o acetato de etilo

Existem diversos fatores que influenciam a solubilidade de um polímero, entre os quais o seu grau de cristalinidade, o seu peso molecular e a interacção entre cadeias existentes. Para polímeros termoplásticos, a solubilização do polímero por um determinado solvente é possível quando as interações entre as moléculas do solvente e as cadeias poliméricas apresentam uma magnitude superior à magnitude de interações entre as cadeias poliméricas.

Nesse caso, as moléculas de solvente são capazes de romper as ligações fracas (van der Waals) que unem as cadeias poliméricas e substituí-las por ligações também de van der Waals mas um pouco mais fortes entre o solvente e o polímero. Com a redução do grau de interacção entre cadeias do polímero submetido à ação de um solvente efetivo, essas ganham maior liberdade de se moverem umas em relação às outras levando à desintegração e solubilização do material. Tendo isso em conta, existem variações das forças de ligação van der Waals entre as cadeias dos termoplásticos que nos permitem distingui-los. No caso do presente relatório, nenhum dos solventes terá sido capaz de quebrar essas ligações entre as cadeias, pelo que as amostras se apresentaram inalteradas.

### - Arranhar com unha

Este teste permite identificar entre o polipropileno e o polietileno, sendo o primeiro insensível a riscos manuais e o segundo sensível aos mesmos, ficando com indentações e marcas. Tendo o nosso provete não apresentado qualquer alteração depois de se ter tentado riscar com as unhas, foi possível concluir que era o polipropileno.

### P2.2.4 – Conclusões

O polímero identificado neste trabalho, de acordo com a metodologia resumida no anexo 1, foi o polipropileno, sendo que flutuou em água, não foi atacado por nenhum dos reagentes, ardeu continuamente sem fumo e não foi suscetível de ser riscado com a unha. Em análise feita a esses resultados, foi depois possível confirmar teoricamente o seu motivo e veracidade.

### P2.2.5 – Metodologia para medição da dureza Shore D

De acordo com a norma ISO 868<sup>1</sup>, deverão ser seguidos os seguintes passos para a medição da dureza:

- Colocar o provete horizontalmente sobre uma superfície horizontal dura. Segurar o durómetro numa posição vertical, com a ponta do indentor a pelo menos 9 mm de qualquer aresta do material a testar;
- Aplicar pressão tão rapidamente quanto possível sem causar choque, mas apenas a necessária para encostar as faces do provete e do durómetro;
- Fazer a leitura após se estabelecer contacto firme entre as superfícies (~1s) e/ou após 15s;
- Realizar 5 medições em posições afastadas a pelo menos 6 mm umas das outras e determinar o valor médio.

Ao compararmos o procedimento definido pela norma com o modo com que nós procedemos, verificamos que desde já:

- Apenas realizamos 3 dos 5 ensaios recomendados, num total 6 ensaios em vez dos 10 recomendados, 3 para a dureza imediata e 3 para a dureza após 15 segundos.
- Devido às pequenas dimensões do objeto fornecido, não foi possível realizar os ensaios a pelo menos 6 mm de distância uns dos outros nem garantir uma distância de 9 mm de qualquer aresta como se pode ver na Fig. 4 de peça de teste.



Fig. 4 – Pontos de medição da dureza na amostra

### P2.2.6 - Resultados dos ensaios

Os resultados das medições efectuadas estão indicados nas abelas. O tempo entre cada medição foi inferior a 15s e a temperatura ambiente era de cerca de 20°C.

Tabela 3 – Medição da dureza Shore-D

Ensaio	Medição
1º	62
2º	61
3º	62
média	61.7

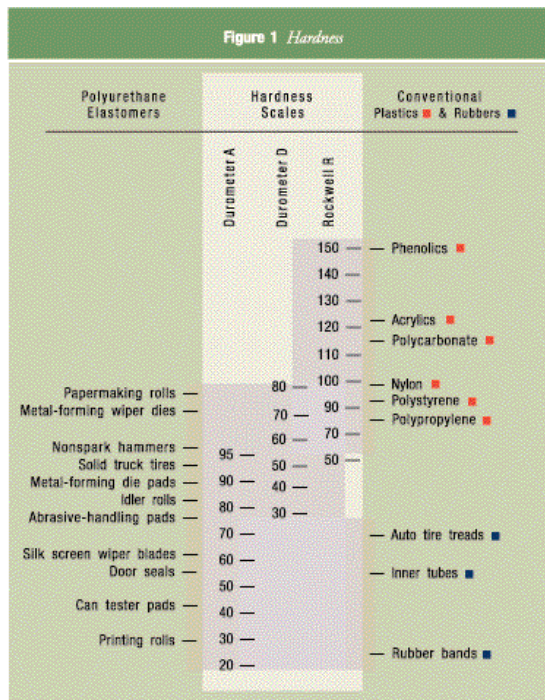
Tabela 4 - Medição da dureza Shore-D após 15s

Ensaio	Medição
1º	56
2º	58
3º	58
média	57.3

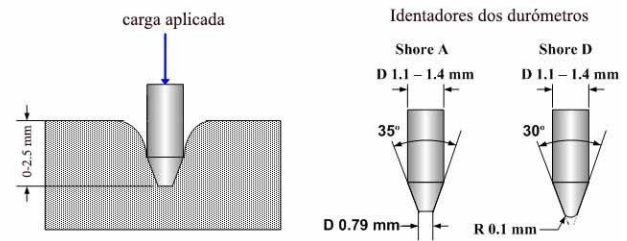
### P2.2.7 – Análise dos resultados

Enquanto que a escala A da dureza shore é utilizada para polímeros e elastómeros macios a maioria dos restantes polímeros pode ser a sua dureza medida pela escala D. Daí que no primeiro caso a pressão a aplicar pelo indentador do durómetro seja menor que no segundo (Fig. 5) sendo a carga aplicada a força exercida pelo instrumentador. Sendo o polipropileno um polímero termoplástico duro, a escala D é a mais adequada.

Relativamente à dureza imediata, e comparando com a Fig. 6, podemos verificar a concordância da dureza medida com a tabelada. Em relação à dureza pós 15s, podemos verificar que houve uma diminuição da dureza, isto é, resistência à indentação, com o tempo. Esta diminuição é devida à resiliência do polipropileno, ou seja, a sua capacidade de se deformar em regime elástico.



**Fig. 6 - Durezas de alguns materiais e relação dureza Shore-A, Shore-D e Rockwell R [Int3]**



**Fig. 5 – Ilustração relativa ao indentador dos durómetros e as suas dimensões de acordo com a norma ISO 572. [Int3]**

## P2.2.8 – Conclusões

Apesar de algumas diferenças relativamente à norma que estabelece o método de medição de dureza shore D, e portanto com algum erro por elas introduzido, a dureza shore D do provete de polipropileno medida encontra-se de acordo com os valores tabelados para o material de aprox. 62.

Verificou-se ainda uma diminuição dessa dureza com a permanência do indentador no provete ao fim de 15s para 57 relevando a capacidade de absorção de energia em regime elástico do polipropileno.

## P2.3 – Ensaio à tracção

### P2.3.1 - Metodologia

O ensaio à tração foi efetuado tendo em conta a norma ISO 5272 numa máquina universal de ensaios TIRA test 2705 num provete de polipropileno. Devido a complicações relativas ao horário da aula, a velocidade de tração teve de ser a 75 mm/s a qual não se encontra nas velocidades recomendadas pela referida norma. Pelo mesmo motivo foi apenas realizado 1 ensaio de tração e não 5 como recomendado.

Para a medição do módulo de elasticidade a norma recomenda uma velocidade o mais perto possível de 1% do comprimento entre amarrações, que neste caso seria 1.17 mm/min.

Para evitar o escorregamento do provete nas garras, a superfície deste na zona de amarração foi lixada de maneira a aumentar o seu atrito e, por consequência, a sua aderência às garras da máquina. Com o mesmo objetivo foram ainda colocados pedaços de lixa dos lados do provete na zona de amarração.

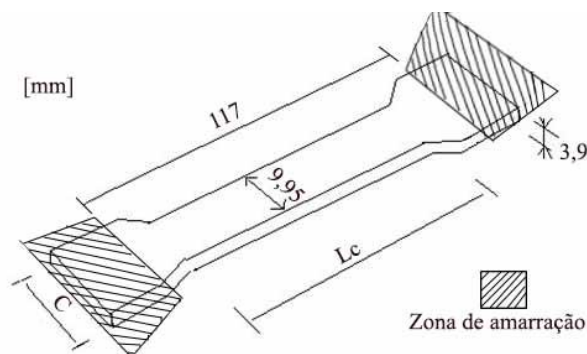


Fig. 7 – Representação esquemática do provete utilizado

No entanto, mesmo com essas medidas preventivas não é possível eliminar totalmente o escorregamento, pelo que foram feitas duas marcas a 25mm do centro do provete para, findo o ensaio, e juntando as duas partes do provete resultantes da fratura, se comparar a distância entre elas. Daí se pode tirar a deformação para  $L_0 = 50\text{mm}$  que deverá dar superior à real visto estarmos a desprezar o resto do provete, em especial a secção não constante.

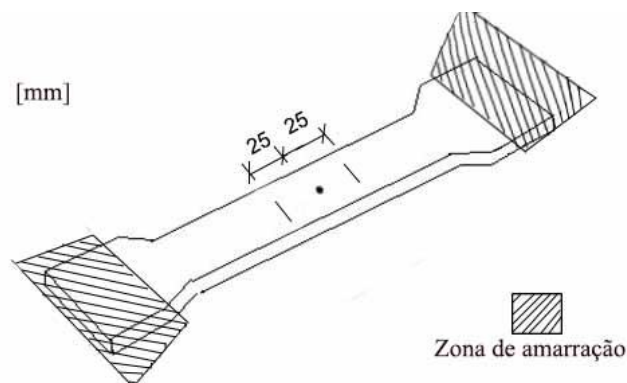




Fig. 8 - Provete utilizado no ensaio

### P2.3.2 - Resultados do ensaio

Finalizado o ensaio foram retirados os dados (tempo,  $\Delta l$  e força) que a máquina enviou durante a realização do mesmo para uma folha Excel e gerados gráficos com o mesmo software. Assim obtiveram-se os seguintes gráficos:

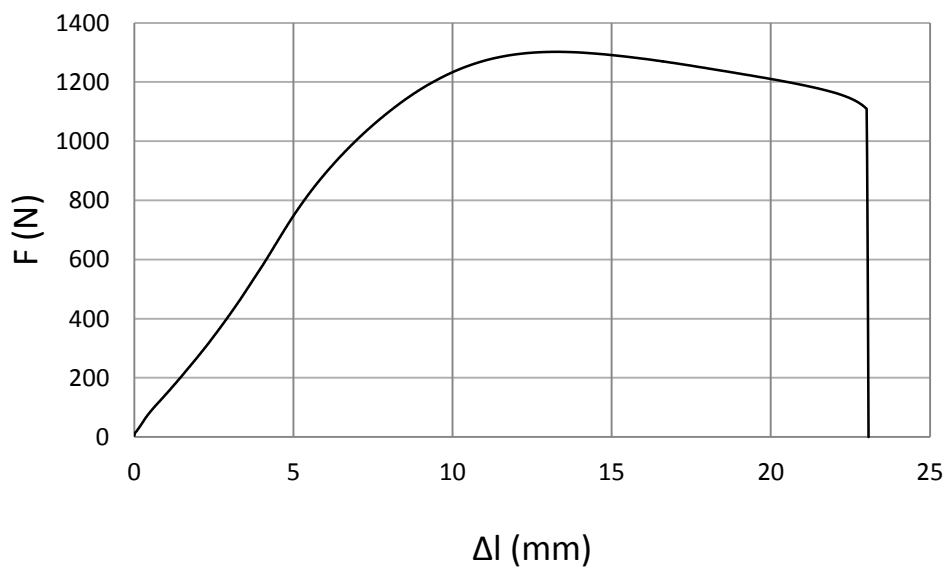


Fig. 9 - Ensaio de tração no provete da fig. 7 de polipropileno a 75 mm/min.

O diagrama tensão vs deformação (Fig. 10) foi obtido a partir das fórmulas

$$\sigma_i [MPa] = \frac{F_i [N]}{S_0 [mm^2]} \quad , \quad S_0 = 9.95 \cdot 3.9 = 38.8 \text{ mm}^2$$

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{l_i - 117}{117}$$

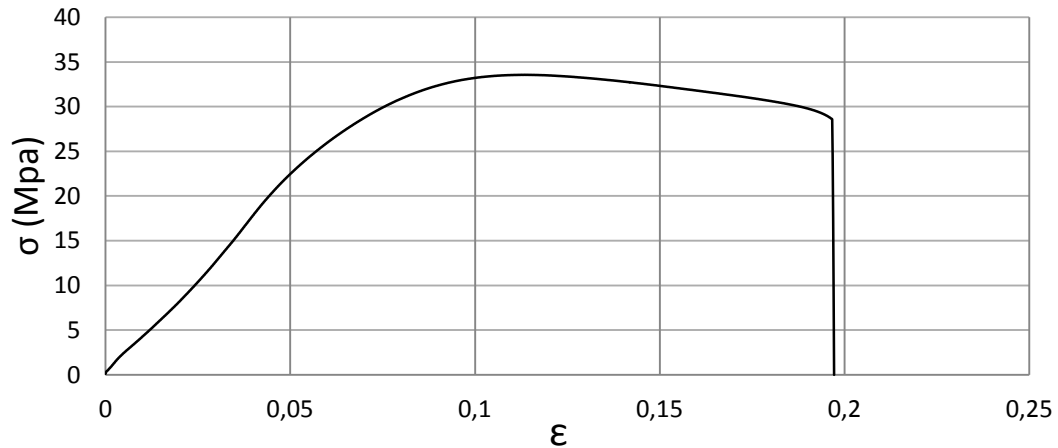


Fig. 10 - Ensaio de tração tensão vs deformação do polipropileno a 75 mm/min.

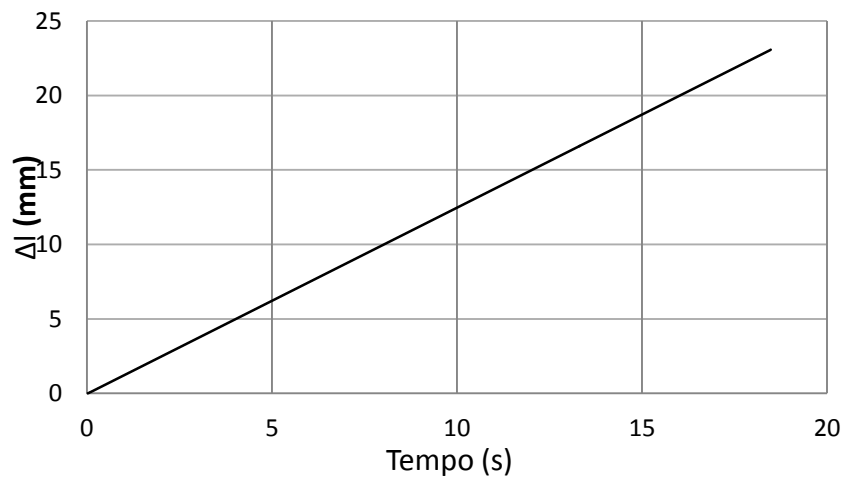


Fig. 11 - Variação da deformação com o tempo.

Juntando as partes fraturadas do provete obteve-se uma distância entre marcas de 54 mm ,ao que corresponde uma deformação de 8%.

### P2.3.3 – Análise dos resultados

Da Fig. 11 podemos verificar que A velocidade de ensaio efetiva foi constante e dos dados podemos obter o valor efetivo a partir do último valor útil de  $\Delta l$  e tempo. Assim,

$$\frac{\Delta l_f [mm]}{t_f [s]} = \frac{23,07}{18,48} \cdot 60 = 74,90 \text{ mm/min}$$

Relativamente à análise do provete, podemos retirar a tensão de rotura que corresponde à tensão máxima sofrida pelo provete. A tensão de limite de elasticidade foi encontrada traçado uma paralela ao gráfico entre as deformações 0.0005 e 0.0025 (ISO725), colocada a 0.002 de deformação e achando a sua interseção com a curva do gráfico. Traçado uma paralela com a mesma inclinação da anterior, e com interseção no último ponto antes da rotura, encontra-se a deformação após rotura no eixo das abcissas.

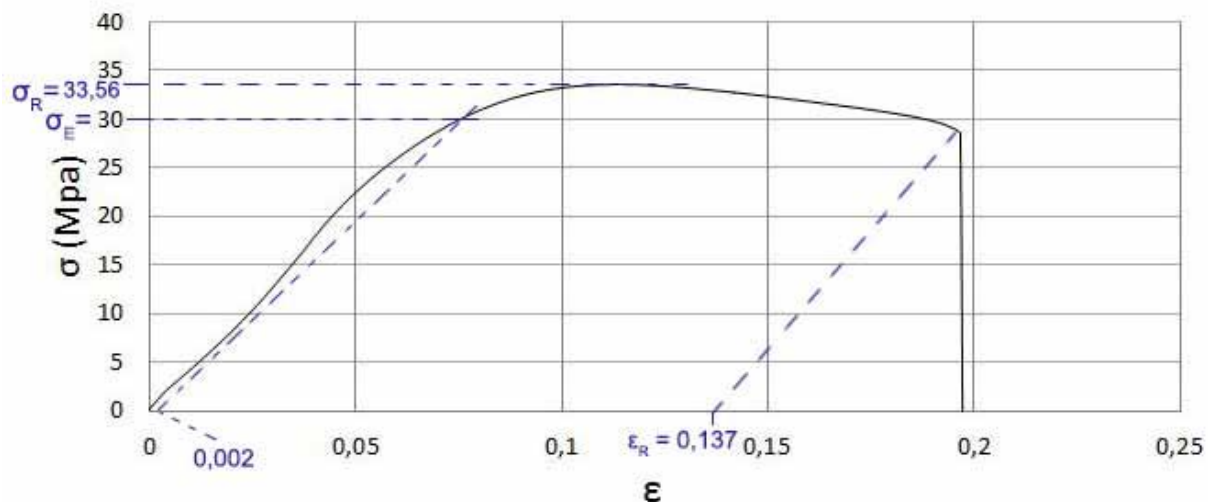


Fig. 12 - Determinação das tensões de rotura, limite elástico e extensão após rotura.

O módulo de elasticidade deve ser determinado, de acordo com a mesma norma, por uma tangente à curva entre as deformações 0.05 e 0.25 (%). O primeiro valor não é zero devido à possibilidade de escorregamento na zona de amarração que geralmente se dá no início. Apesar do forte erro induzido pela elevadíssima velocidade de tração determinou-se o valor do módulo de elasticidade

$$E = \frac{\sigma_{0.25} - \sigma_{0.05}}{\epsilon_{0.25} - \epsilon_{0.05}} = \frac{1.38 - 0.49 \text{ [MPa]}}{0.00248 - 0.000598} = 0.472 \text{ GPa}$$

É de notar que o módulo de elasticidade obtido é bastante inferior ao esperado de 0,9-1,4 GPa (CES Edupack, 2012). Uma provável razão é o escorregamento do provete nas amarras, visto ser bastante comum em ensaios deste tipo com a referida máquina tal acontecer.

Tal escorregamento vem a ser confirmado pela deformação de 8% obtida pela medição das distâncias entre marcas que deu inferior aos 13,7% calculados a partir dos valores fornecidos pela máquina para o provete completo, quando deveria dar superior em condições ideais, sem escorregamento.

Muito provavelmente devido à elevada velocidade a que o ensaio foi realizado,  $\epsilon_r$  deu bastante inferior ao esperado de 100-500% (CES Edupack, 2012).

### P2.3.4 – Conclusões

Foi possível analisar e estudar vários parâmetros importantes num ensaio de tração, tais como a tensão de rotura e tensão limite de elasticidade, que se encontram dentro dos valores esperados, o módulo de elasticidade, um pouco abaixo do esperado devido a escorregamentos nas amarras e deformação após rotura bastante abaixo do tabelado, possivelmente devido à elevada velocidade a que o ensaio foi realizado.

## P2.4 – Ensaio à tracção a diferentes velocidades

### P2.4.1 - Metodologia

A partir de 5 provetes de polietileno de alta densidade, submeteu-se cada um dos provetes a um ensaio de tração com velocidades diferentes numa máquina de ensaios universal TIRA Test 2705. De acordo com a norma ISO572 o ideal para tais velocidades seria de 50 ; 5 ; 0,5 ; 0,05 ; 0,005 mm/min, no entanto por motivos de tempo só nos foi possível realizar os ensaios a 500 ; 250 ; 50 ; 25 e 5 mm/min.

Além disso, idealmente seria usado o mesmo provete em todos os ensaios para reduzir erros induzidos por diferentes características do provete, no entanto é impossível realizar mais do que um ensaio num provete que já ultrapassou a sua tensão de rotura sem comprometer seriamente o ensaio de tração seguinte. Por esse motivo, foram usados provetes diferentes para cada ensaio de tração.

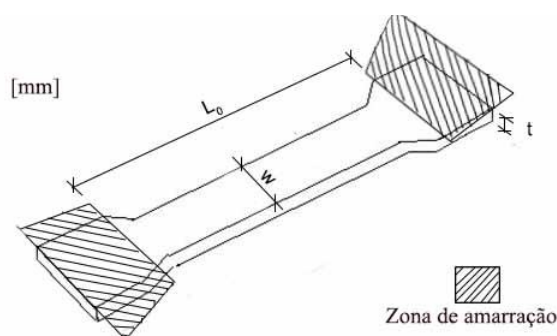


Fig. 13 - Diagrama representativo dos provetes utilizados.

Tabela 5 – Dimensões dos provetes utilizados

Velocidade (mm/min)	$L_0$ (mm)	$w$ (mm)	$t$ (mm)
V=500	82	10,2	4,05
V=250	81,5	10,05	4,05
V=50	79	10,05	4,05
V=25	79	9,95	4,05
V=5	78,5	10,15	4,05

### P2.4.2 - Resultados dos ensaios

Retirados e organizados os valores enviados pela máquina para uma volha de excel e apresentando-os sob a forma gráfica, obtemos a .

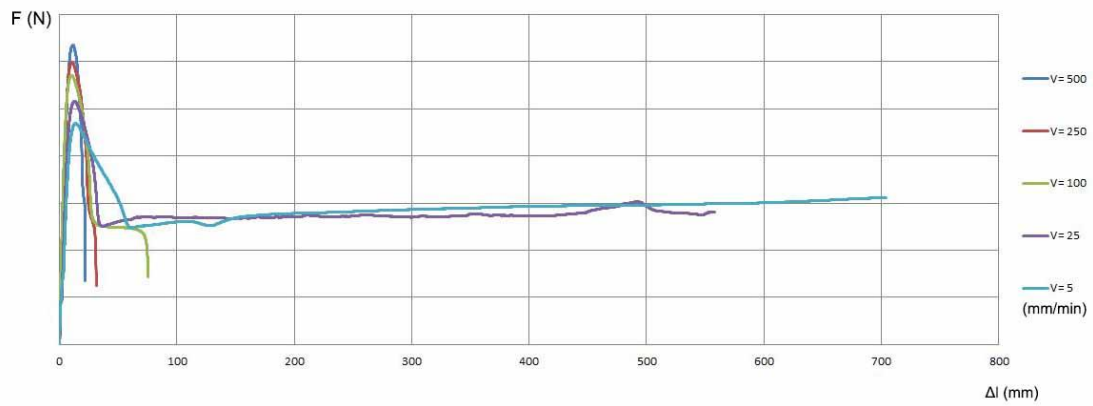


Fig. 14 - Ensaio de tração dos provetes de HDPE a diferentes velocidades de deformação.

Colocando em escala logarítmica para uma melhor visualização das diferenças entre as curvas

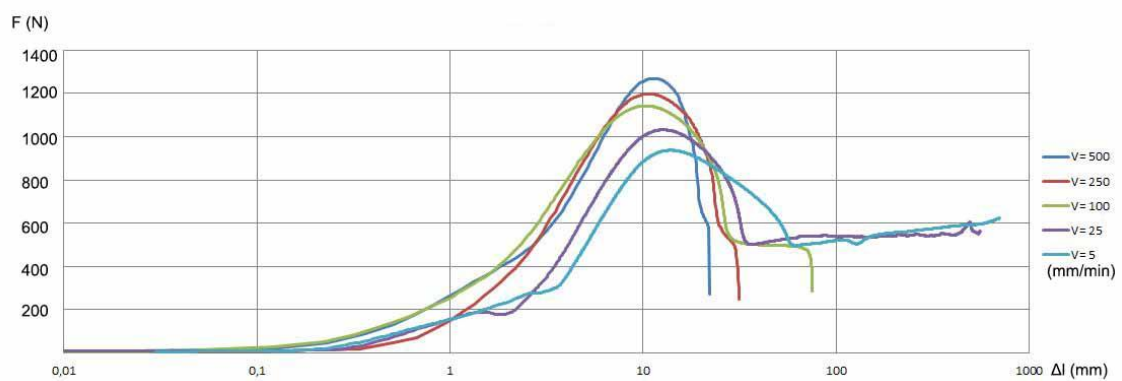


Fig. 15 - Ensaio de tração dos provetes de HDPE a diferentes velocidades de deformação, em escala logarítmica.

Passando para tensão vs deformação a partir da secção dos provetes e do comprimento inicial dos provetes ( $L_0$ ) obtemos

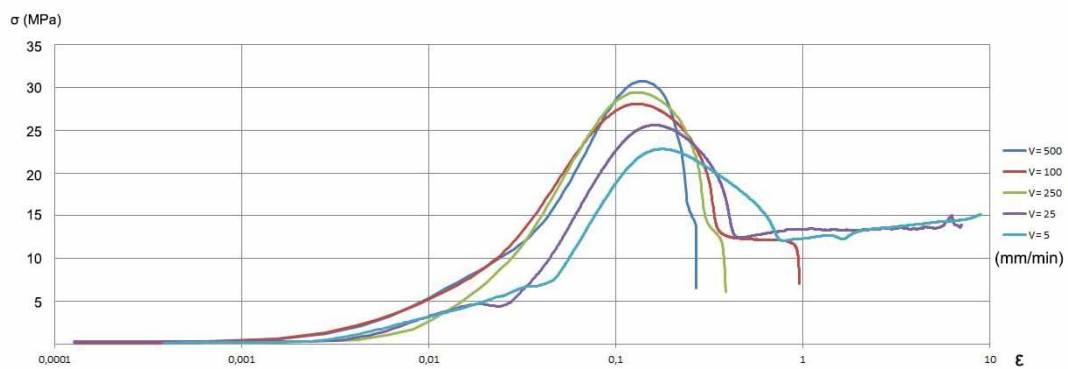


Fig. 16 - Ensaio de tração a diferentes velocidades de deformação para provetes de HDPE, escala logarítmica, tensão vs deformação.

### P2.4.3 – Análise dos resultados

Seguindo a metodologia descrita na norma ISO 52722, utilizada anteriormente no ensaio de tração do polipropileno, os módulos de elasticidade para os provetes podem ser calculados por:

$$E = \frac{\sigma_{0.25} - \sigma_{0.05}}{\varepsilon_{0.25} - \varepsilon_{0.05}}$$

Por este processo obter-se-iam alguns dos valores para os módulos um pouco distantes da realidade uma vez que ocorreram escorregamentos nestes ensaios no início dos mesmo. Há que notar especialmente os casos  $v=25$  e  $v=5$  onde tal fenómeno é claramente nítido na redução repentina da inclinação da curva no início (Fig. 17). Assim, o método utilizado, menos rigoroso, será o da determinação dos módulos de elasticidade a partir da tangente à zona de cada curva com maior inclinação a seguir às zonas onde ocorreram escorregamentos, isto é, para valores de tensão entre 10 e 15 MPa

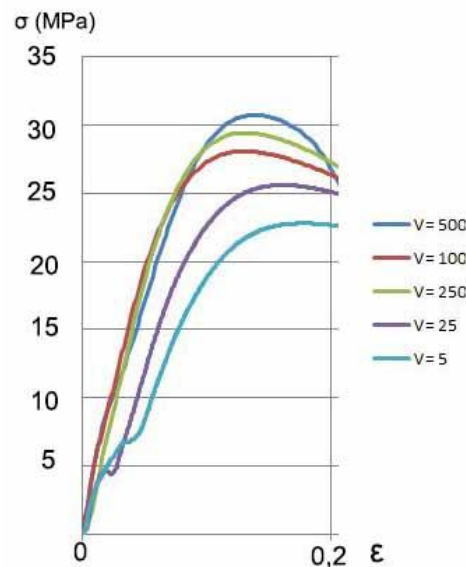


Fig. 17 - Pormenor da fase inicial dos ensaio de tração a diferentes velocidades do HDPE.

Tabela 6 - Módulos de elasticidade para cada velocidade de ensaio em provetes HDPE.

Velocidade do ensaio: v (mm/s)	Módulo de elasticidade: E (GPa)
500	0,541
250	0,402
100	0,370
25	0,273
5	0,195

Daqui pode-se já observar que o valor de E está a dar abaixo do esperado de 0,6 – 0,9 GPa (CES Edupack, 2012), discrepância essa que pode ser pelo menos em parte atribuída aos escorregamentos existentes entre as amarras da máquina e os provetes.

À parte dessa imperfeição dos ensaios, verifica-se ainda um aumento de E com o aumento da velocidade do ensaio.

As tensões de rotura máxima podem ser obtidas fazendo

$$\sigma_{r_i} = \frac{F_{\max_i}}{S_{0_i}}$$

ou traçando uma tangente a cada curva no seu ponto máximo.

**Tabela 7 - Velocidade de ensaio e tensões de rotura verificadas nos provetes de HDPE.**

Velocidade do ensaio: v (mm/s)	Tensão de rotura: $\sigma_r$ (MPa)
500	30,74
250	29,43
100	28,09
25	25,60
5	22,80

Estes valores estão dentro de valores aceitáveis,  $\sigma_r$  (HDPE) = 20,7 - 44,8 MPa (CES Edupack, 2012) sendo que apenas o último serve como comparativo, visto os ensaios de tração de determinação da tensão de rotura serem realizados a velocidades dessa ordem.

Ademais, tal como com E, também é possível verificar uma relação direta entre velocidade de ensaio e  $\sigma_r$ .

Por análise da Fig. 17 nota-se uma tendência para a extensão após rotura aumentar com a diminuição da velocidade do ensaio.

Passando à análise da velocidade de deformação com a tensão, que tem importância para o estudo da viscoelasticidade do material, por manipulação algébrica podemos obter

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\left(\frac{l}{L_0}\right)}{dt} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{V}{L_0}$$

Assim, para cada valor de tensão máxima, velocidade de deformação e comprimento inicial do provete, podemos obter o gráfico representado na Fig. 18, que nos mostra uma relação direta entre tensão aplicada e velocidade de deformação.

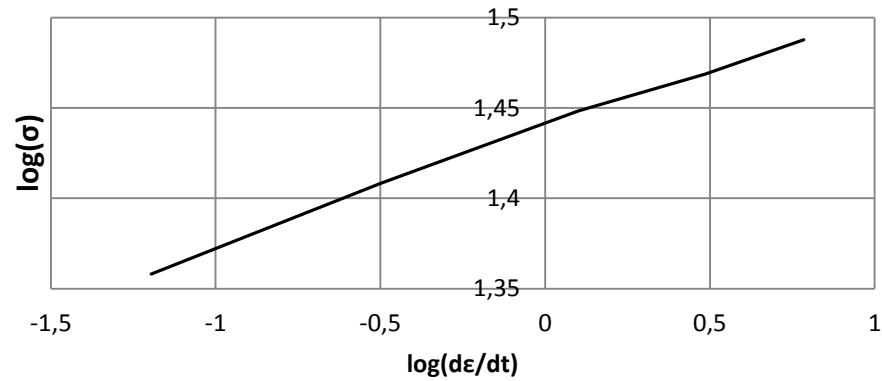


Fig. 18 - Gráfico tensão vs velocidade de deformação logaritmizados para o ensaio de tração do HDPE a diferentes velocidades.

Esta curva faz sentido se pensarmos que os polímeros apresentam propriedades viscoelásticas, e que para um fluido viscoso,

$$\sigma = \mu \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido. A inclinação da reta será uma constante que estará relacionada com as propriedades viscosas do HDPE.

#### P2.4.4 – Conclusões

Foi estudado o efeito da velocidade de ensaios de tração em provetes de HDPE e verificadas a sua influência em diversos parâmetros do material, nomeadamente o módulo de elasticidade e a tensão de rotura que se viu seguirem uma relação direta com a variação de velocidade, a extensão após rotura, que possui uma relação inversa com a mesma, e a taxa ou velocidade de deformação que aumenta diretamente com a tensão aplicada.

## P2.5 – Ensaio à tracção com relaxação e com fluência

### P2.5.1 – Metodologia

O ensaio de relaxação será efetuado com uma máquina universal de ensaios TIRA Test 2705, impondo uma velocidade de movimento das amarras máxima (500 mm/s) e um tempo de espera de 180 s entre cada patamar de deformação. O ensaio de fluência não pode ser realizado por limitações da mesma máquina. Além disso, a variação das deformações findos os 180s, devia ser instantânea, algo que não é possível, pelo que os ensaios virão com um erro representado a tracejado na Fig. 19. O provete a utilizar será o esquematizado na Fig. 20 de HDPE.

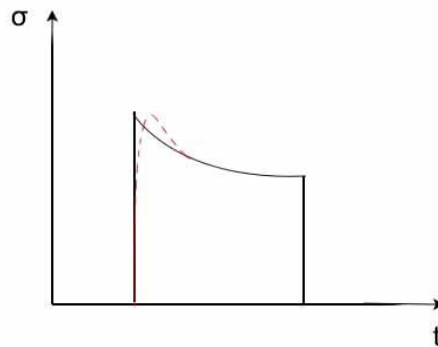


Fig. 19 - Diagrama representativo do ensaio de relaxação ideal (a cheio) vs real (a tracejado e cheio)

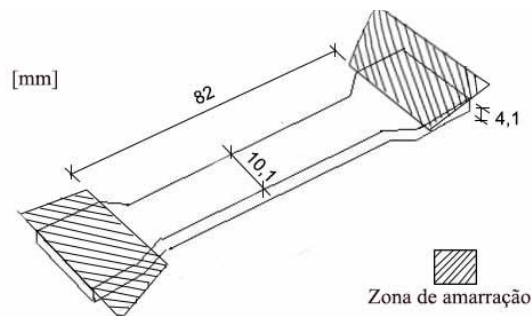


Fig. 20 - Diagrama representativo do provete utilizado para os ensaios de relaxação e com fluência.

### P2.5.2 - Resultados dos ensaios

A variação de comprimento dos provetes com o tempo foi a representada na Fig. 21.

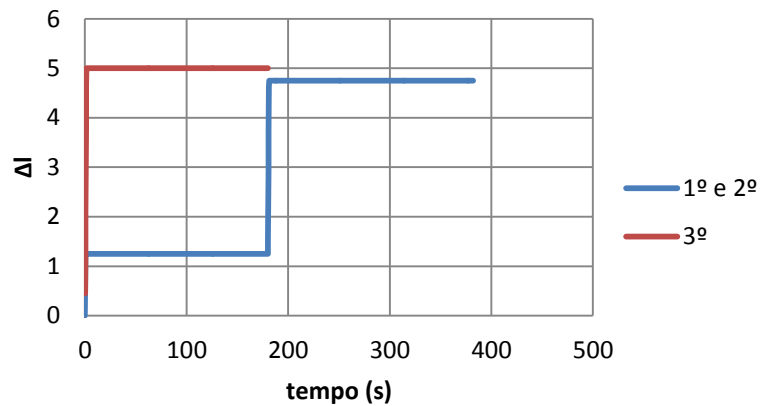


Fig. 21 - Ensaio de relaxação tal como foi efetuado. Na 3ª fase (3ª variação da distância entre as garras da máquina) ocorreu um escorregamento excessivo, pelo que essa parte teve de ser repetida do início.

Colocando os dados de modo a sobrepor o momento em que a máquina altera a distância entre garras, em  $t=0$ s obtém-se o gráfico força vs tempo do ensaios de relaxação (Fig. 22)

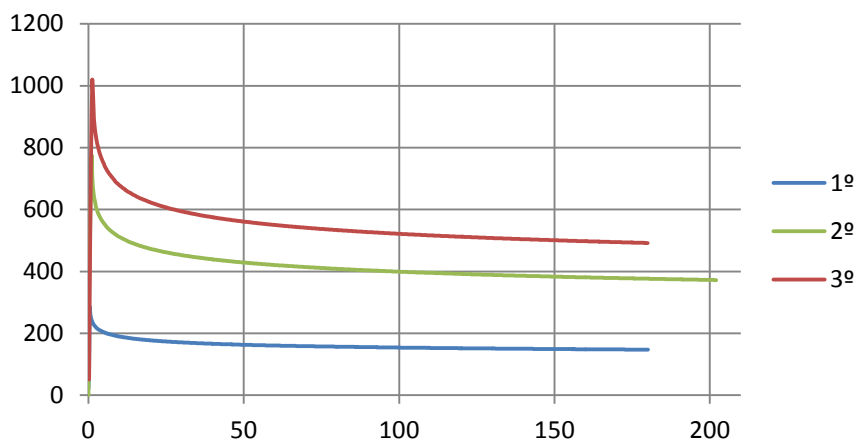


Fig. 22 - Ensaio de relaxação do HDPE com o momento das curvas da alteração da deformação sobrepostas em  $t=0$ .

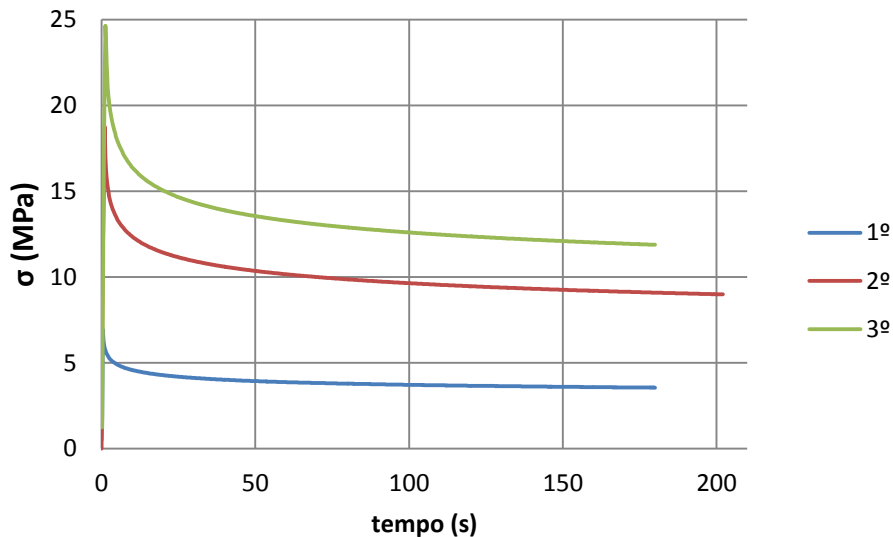


Fig. 23 - Ensaio de relaxação tensão vs tempo do HDPE.

### P2.5.3 – Análise dos resultados

Verifica-se em todos os casos uma diminuição da tensão com o tempo, que é maior quanto maior for a deformação aplicada.

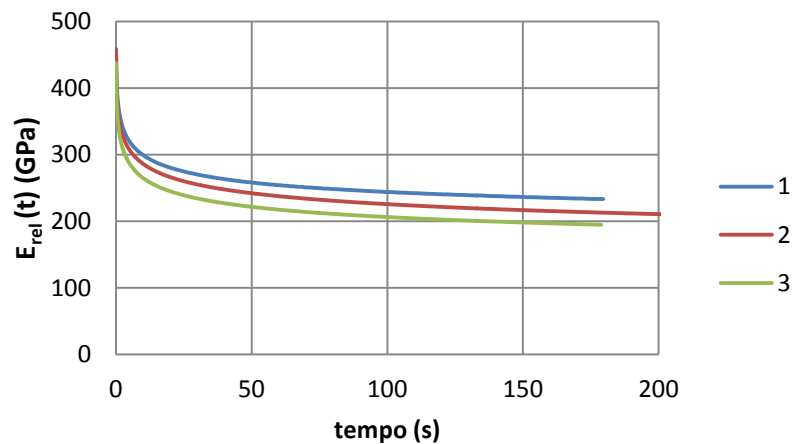


Fig. 24 - Gráfico do módulo de relaxação vs tempo

Se as curvas da variação do módulo de relaxação estivessem sobrepostas, poderíamos concluir que em todos os ensaios nos encontrávamos segundo o modelo viscoelástico. Por não estarem, apenas podemos assumir no primeiro ensaio nos encontrávamos segundo esse modelo, e nos dois seguintes já não.

Logaritmizando o valor de  $E_{rel}$  para o 1º ensaio, obteríamos o gráfico da Fig. 25. Como o modelo que estamos a utilizar é muito simplificado, aquele não é, como devia ser, uma reta. Assim, a única hipótese que nos resta para extrair o tempo de relaxação seria traçar uma reta para um valor (por exemplo, ignorando os primeiros 10-20 segundos, onde ocorre uma brusca variação do  $\log(E_{rel})$ ). O declive da reta, permitir-nos-ia extrair o tempo pretendido, de acordo com a expressão

$$\text{declive} = -\frac{1}{t_{rel}}$$

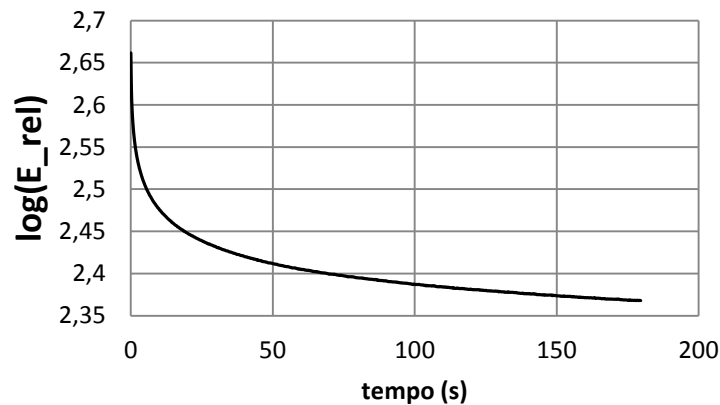


Fig. 25 – Gráfico logaritmo do módulo de relaxação vs tempo.

#### P2.5.4 – Conclusões

Foi possível determinar e observar a variação do módulo de relaxação com o tempo, não estando as suas curvas sobrepostas, pelo que é provável já a partir do segundo ensaio não nos encontrarmos segundo o modelo viscoelástico. Além disso, foi explicitado um método, se bem que a título educativo visto ser baseado num modelo simplista, de determinar o tempo de relaxação para o ensaio (o primeiro) que se encontrava segundo o modelo viscoelástico.

### ***P2.6 – Conclusões gerais***

Com estes trabalhos práticos foi-nos possível aprofundar o conhecimento relativo aos materiais poliméricos, nomeadamente pela aprendizagem de um método simples de identificação de polímeros, pelo estudo de ensaio de tração de um provete de um polímero conhecido e determinação das propriedades que dele se puderam extrair, variado a velocidade a que o mesmo foi efetuado e verificando as alterações ocorridas e finalmente por um ensaio de relaxação para mais uma vez enfatizar e estudar as propriedades viscoelásticas dos polímeros.

### P2.7 – Resolução do exercício de dimensionamento

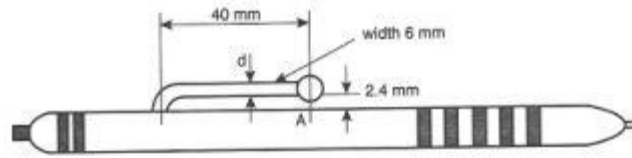


Fig. 26 – Caneta a dimensionar (Marques, Nevers, 2010)

1. Qual a espessura necessária para que sejam verificadas as condições de dimensionamento?
2. Qual a tensão máxima quando se coloca no bolso?

Caso A : Polipropileno

Caso B : HDPE

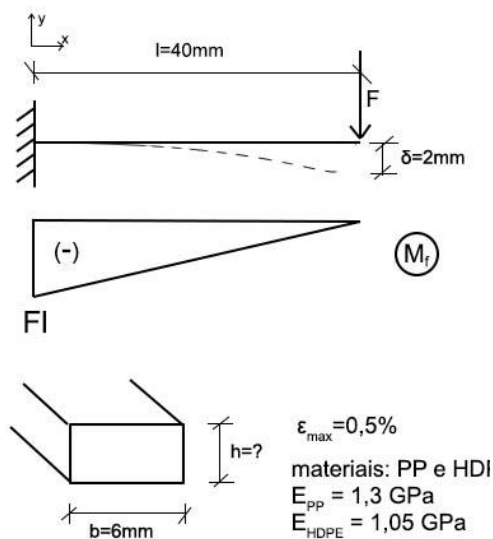


Fig. 27 - Análise estrutural do clipe da caneta.

$$\sigma = E\varepsilon = 1300 \cdot 10^6 \cdot 0.005 = 6.5 \text{ MPa}$$

Sabemos que o deslocamento pode ser dado por

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

E que o momento causado pela força F é dado por

$$Mz = FL \quad (2)$$

Pondo em ordem à força e igualando as equações (1) e (2)

$$\frac{3\delta EI}{l^3} = \frac{Mz}{l} \rightarrow \frac{3\delta EI}{l^2} = Mz \quad (3)$$

Além disso, sabemos que a tensão normal é dada por

$$\sigma = -\frac{M_z \cdot y}{I_z} + \frac{M_y \cdot z}{I_y} + \frac{N}{A} \quad (4)$$

Que neste caso podemos simplificar para

$$\sigma = \frac{M_z \cdot y}{I_z} \quad (5)$$

Visto não existirem forças normais nem segundo z, e não estarmos interessados em distinguir forças de compressão de tração. Pondo (5) em ordem a  $M_z$  e substituindo em (3).

$$\frac{3\delta EI}{l^2} = \frac{l\sigma}{y} \rightarrow \frac{3\delta E}{l^2} = \frac{\sigma}{y} \quad (6)$$

A distância ao eixo neutro,  $y$ , é  $\frac{h}{2}$  visto se tratar de um paralelepípedo de altura  $h$ . Substituindo em (6) ficamos então com

$$\frac{3\delta E}{l^2} = \frac{2\sigma}{h} \rightarrow h = \frac{2\sigma l^2}{3\delta E} \quad (7)$$

Para o caso A (PP)

$$h = \frac{2 \cdot 6.5 \cdot 40^2}{3 \cdot 2 \cdot 1.3 \cdot 10^3} = \frac{\left(\frac{N}{mm^2}\right) \cdot mm \cdot mm}{mm \cdot \left(\frac{N}{mm^2}\right)} = 2. (6)mm$$

Para o caso B (HDPE)

$$\sigma = 1050 \cdot 0.005 = 5.25 \text{ MPa}$$

$$h = \frac{2 \cdot 5.25 \cdot 40^2}{3 \cdot 2 \cdot 1.05 \cdot 10^3} = 2. (6)mm$$

Como impomos a deformação e a flecha a altura do objeto independe do material.

### 3. Qual a tensão máxima ao fim de uma semana?

Uma semana tem  $60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 7 = 604800 \text{ s} \approx 6.05 \cdot 10^5 \text{ s}$ . Assim a tensão máxima determina-se a partir das curvas tensão-tempo dos dois materiais. Sendo que os diagramas do PP e do HDPE são muito semelhantes, foi usado o do PP para os dois.

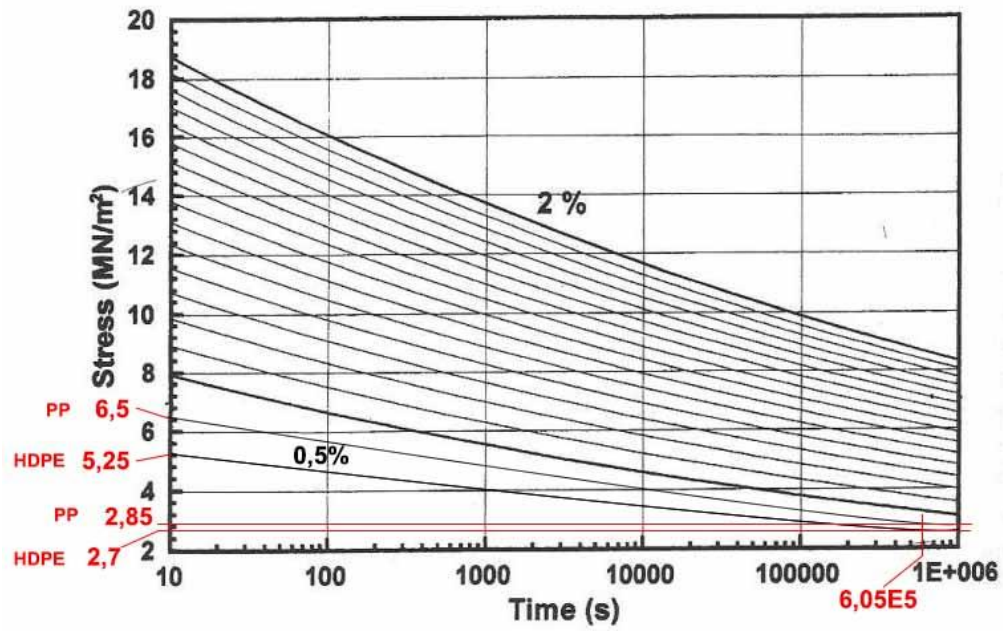


Fig. 28 - Curvas de tensão-tempo do PP e determinação da tensão após uma semana para o PP e HDPE. (Marques, Neves, 2010)

Outra hipótese seria o uso de diagramas tensão-deformação, que para o caso do polipropileno daria:

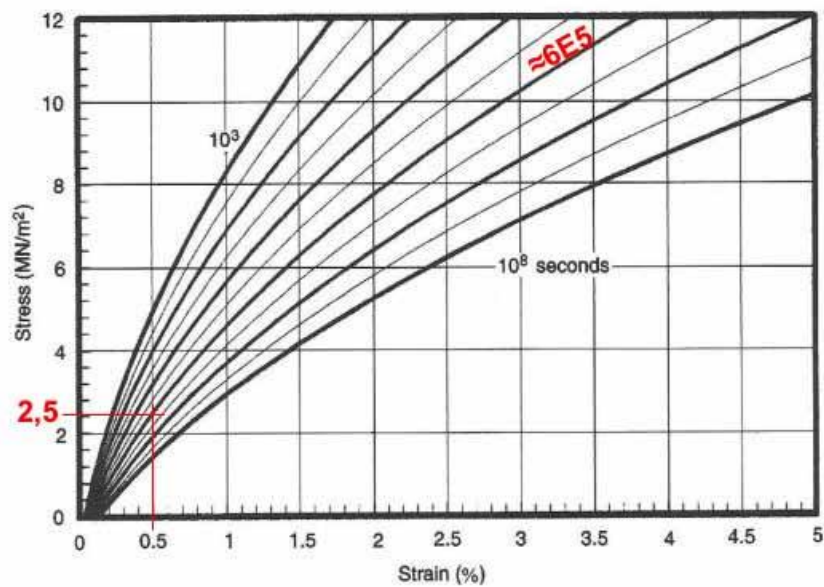


Fig. 29 - Curvas de tensão-deformação do PP e determinação da tensão após uma semana para um clipe de PP. (Marques, Neves, 2010)

**P2.8 – Bibliografia**

- 1 ISO 868:2003: Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness).
- 2 BS EN ISO 527-1:1996 : Plastics — Determination of tensile properties.
- 3 Marques, A. T., Neves, P. C. (2010). *Materiais de Construção Mecânica II*.
- 4 Hilado, C. J. (1982). *Flammability Handbook for Electrical Insulation*", Technomic Publishing Company.
- 5 Granta CES Edupack 2012, versão 11.9.9
- 6 William F. Smith (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*". McGraw-Hill – Brasil, 3ª edição.

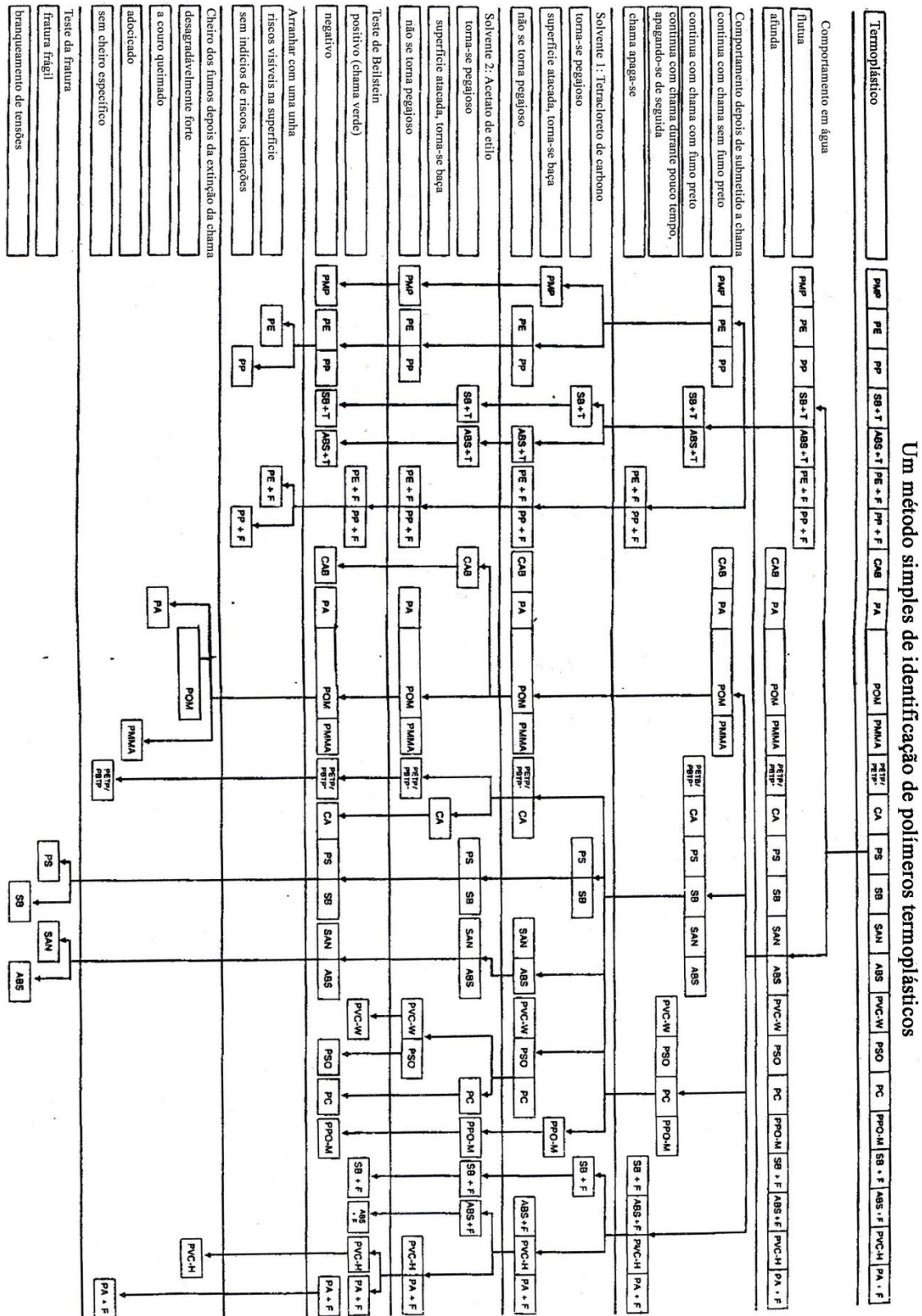
***P2.9 – Recursos na internet***

[Int1] <http://www.campusplastics.com/>

[Int2] [www.calce.umd.edu/general/Facilities/Hardness\\_ad\\_.htm#3.1](http://www.calce.umd.edu/general/Facilities/Hardness_ad_.htm#3.1)

P2.10 – Anexos

Anexo 1 – Um método simples de identificação de polímeros



N.N.Werkstoffblatt 110. 1, BASF, Ludwigshafen, 1973.