

# **Materiais de Construção Mecânica II**

2010/2011



Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**FEUP**

## **Polímeros**

Relatório dos trabalhos teóricos e práticos

Autores:

Grupo 3M6-4

Diogo Neto (em11035)

Pedro Macedo (em11039)

Docentes:

Prof. António Torres Marques

Eng. Paulo Carvalho Neves

## Índice

PARTE 1 – TRABALHO TEÓRICO .....	4
P1.1 – Introdução .....	4
P1.2 – Produção de Fibras de Carbono .....	9
P1.2.1 – Processo de Fabrico da Fibra de Carbono .....	9
P1.2.2 – Tecidos de Fibra de Carbono .....	13
P1.3 – Resinas.....	14
P1.3.1 – Resina Epóxico .....	15
P1.4 – Produção de Quadros de Bicicleta .....	17
P1.4.1 – Transferência de Resina por Moldação (RTM).....	18
P1.5 – Conclusões.....	20
P1.6 – Bibliografia .....	21
PARTE 2 – TRABALHO PRÁTICO.....	22
P2.1 – Introdução .....	22
P2.2 – Identificação de polímeros.....	23
P2.2.1 – Metodologia de identificação .....	23
P2.2.2 - Resultados dos ensaios .....	25
P2.2.3 – Análise dos resultados.....	26
P2.2.4 – Polietileno.....	27
P2.2.5 – Conclusões.....	28
P2.2.6 - Resultados dos ensaios .....	28
P2.3 – Ensaio à tracção.....	29
P2.3.1 - Metodologia .....	29
P2.3.2 – Resultados/Análise dos ensaios .....	30
P2.3.3 – Conclusões.....	33

P2.3.3 – Bibliografia .....	33
P2.4 – Ensaio à tracção a diferentes velocidades.....	34
P2.4.1 - Metodologia .....	34
P2.4.2 - Resultados dos ensaios .....	35
P2.4.3 – Conclusões.....	37
P2.5 – Resolução do Exercício de Dimensionamento .....	38

## PARTE 1 – TRABALHO TEÓRICO

### Quadros de Bicicletas de Ciclismo em Fibra de Carbono

#### *P1.1 – Introdução*

Leonardo da Vinci idealizou e transpôs para manuscritos, datados de 1490, desenhos de uma máquina muito semelhante às modernas bicicletas, dotada inclusivamente de pedais e tracção por corrente. No entanto, não existe qualquer exemplar produzido pelo mesmo.

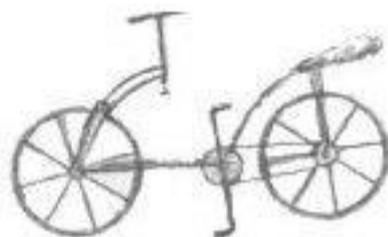


Figura 1 – Bicicleta idealizada por Leonardo da Vinci; [1]

Na França, em 1790, surgiu um transporte, baptizado de celerífero, criado pelo Conde de Sivrac. A sua construção era baseada na união de duas rodas do mesmo tamanho, através de uma tábua de madeira na qual o condutor sentava. O movimento era originado pelo respectivo condutor, apoiando alternadamente os pés no chão. O veículo foi sucesso imediato, especialmente entre os jovens, apesar da dificuldade de lhe conferir a direcção desejada.



Figura 2 - Celerífero; [2]

Em 1817, na Alemanha, o Barão Drais aperfeiçoou o celerífero instalando um eixo vertical na roda dianteira, permitindo guiar o engenho. A este novo veículo concedeu-se o nome de Draisiene, figura 3.



Figura 3 – Draisiene;[3]

Na Escócia, por volta de 1855, é instalado, por intermédio do ferreiro Kirkpatrick MacMillan, um mecanismo biela manivela numa bicicleta que tinha por base a Draisiene. Desenvolveu assim o veículo que ficou conhecido como velocípede, figura 4. Este dispositivo deu a bicicleta mais rapidez e estabilidade.



Figura 4 – Velocípede;

O francês Pierre Michaux, em 1865, melhorou o velocípede, trocando a roda da dianteira pela de trás, substituindo o mecanismo biela manivela por pedais, provocando grande avanço na tecnologia, figura 5.

Pierre Michaux era um ferreiro fornecedor de peças para carruagens em Paris durante as décadas de 1850 e 1860. Em 1864, formou a sociedade “Michaux et Cie” com os irmãos Oliver e, distingue-se por ter sido a primeira empresa a construir bicicletas com pedais, o velocípede. A fábrica tinha 200 operários, apresentando uma produção de cerca de 140 bicicletas por ano, sendo cada unidade vendida pela exagerada quantia de 450 francos, na época. O design do quadro era sinuoso e constituído por duas peças que eram produzidas em ferro fundido em vez de madeira. Este avanço tecnológico, na área dos materiais, que permitiu uma produção em massa. Com um quadro em ferro fundido as bicicletas tornaram-se mais elegantes. No entanto, tornou-se evidente que os mesmos, devido ao formato sinuoso que tinham, não eram suficientemente fortes para as solicitações a que estavam sujeitos.

Este engenho ganhava adeptos a cada dia que passava. Assim, em toda a Europa se multiplicavam os esforços para o aperfeiçoar e, rapidamente se sucediam um após o outro. [4]

O crescente número de entusiastas que se deslocavam neste veículos, para realizar excursões, campismo ou por mero prazer, obrigou as autoridades políticas a criar caminhos especiais para os velocípedes, com o objectivo de evitar que se misturassem com charretes e carroças. Surgia o ciclo-turismo.



Figura 5 – Velocípede com pedais na roda da frente; [5]

No ano de 1868 em Paris, decorreu a primeira prova masculina, vencida pelo inglês James Moore, no Parque Saint' Cloud e a primeira prova feminina, no parque Bordelais, no dia 1º de Novembro. [6]

Em 1870 é criado o biciclo, figura 6. É uma bicicleta que tinha por base o velocípede no entanto, o aumento do diâmetro da roda da frente permitia maiores velocidades. Contudo, era muito difícil manter o equilíbrio.



Figura 6 – Biciclo; [7]

A primeira bicicleta a possuir um sistema com corrente ligada às rodas foi projectada por H.J.Lawson, no ano de 1874. Seu terceiro modelo, a Bicyclette, foi desenhado em 1879. Esta bicicleta apresentava maior estabilidade e segurança.



Figura 7 – Bicyclette; [8]

O inventor Robert Thompson, também contribuiu para o desenvolvimento da bicicleta através da colocação de travões e de tiras de borracha coladas aos aros das rodas, que posteriormente foram substituídas pelos pneus, uma descoberta do James Boyd Dunlop em 1887 e pelo Edouard e André Michelin em 1891.

Entre 1880 e 1881, o inventor inglês John Kemp Starley projectou uma bicicleta com as características das que conhecemos hoje, figura 8.



Figura 8 – Bicicleta de Starley; [9]

Após a criação desta bicicleta, e até aos dias de hoje, têm sido desenvolvidas sucessivamente modificações técnicas como os sistemas de mudanças, a roda livre e nos materiais utilizados.

Uma vez que estavam criadas as condições necessárias surgiu a modalidade ciclismo. A Inglaterra foi o primeiro país que promoveu uma regulamentação, criando o "Bicycle Union". No ano de 1892 foi fundada a Internacional Cyclist Association que agrupava as Federações Nacionais dos Estados Unidos, Bélgica, França, Canadá, Alemanha, Holanda, Inglaterra e Itália. Esta associação promoveu os primeiros campeonatos do Mundo de ciclismo. Em 1893 devido a uma polémica com os órgãos italianos, surge a União Ciclista Internacional.

Em Portugal, esta é uma das modalidades mais apreciadas. Por este motivo foi criada a "Volta a Portugal em Bicicleta" que cativa milhares de espectadores. Este género de prova é muito exigente fisicamente para o atleta, assim, é essencial disponibilizar uma bicicleta que proporcione o melhor rendimento possível. Dado o mediatismo destas provas, estão-lhe associadas grandes empresas patrocinadas, que possibilitam o encaixe de grandes receitas das equipas. Existe pois poder económico para as equipas de ciclismo adquirirem bicicletas caras com a tecnologia de ponta. Isto leva a que as empresas produtoras de bicicletas invistam dinheiro no seu

aperfeiçoamento, abrindo espaço para a aplicação de novos materiais como é o caso das fibras de carbono.

Os materiais a base de carbono têm uma baixa massa específica e apresentam excelentes propriedades termo-mecânicas. Esta característica permite que sejam utilizados como componentes estruturais mesmo quando trabalham a altas temperaturas (1000 °C). Para obter estes materiais é necessário realizar um processo denominado por pirólise onde matéria orgânica como resina ou fibras poliméricas são convertidas, acima de 800 °C num material carbonoso. Entre os anos 50 e 60, o desenvolvimento tecnológico no processamento das matérias-primas possibilitou a produção de fibras de carbono de alta resistência à tracção. [11]

As fibras de carbono podem, posteriormente, ser combinadas com outros materiais, como por exemplo resinas, permitem a obtenção de produtos com excelentes propriedades mecânicas. No mercado estão disponíveis diversos tipos de resina que, como é de esperar, conferem propriedades ao produto deferentes.

Estes produtos têm sido aplicados em equipamentos de diversas tecnologias, desde a produção aeroespacial até ao fabrico de calçado. Na figura 9, pode ver-se, um exemplo da aplicação destes materiais numa bicicleta de corrida de alta competição.



Figura 9 – Bicicleta de corrida com quadro em fibra de carbono; [10]

## P1.2 – Produção de Fibras de Carbono

As fibras de carbono são obtidas a partir de fibras orgânicas ricas em carbono tais como a fibra de poliacrilonitrila (PAN), os poliimidos, os poliamidos e álcool polivinílico, que, como já foi referido anteriormente, são sujeitas a um processo termoquímico denominado pirólise, efectuado em condições controladas de tensão, atmosfera, tempo e principalmente temperatura.

Estas fibras poliméricas são provenientes do carvão ou do alcatrão, um derivado do petróleo.

Normalmente, utiliza-se a poliacrilonitrila na produção das fibras de carbono, pois, de todas as fibras referidas anteriormente, esta é aquela que confere melhores propriedades mecânicas ao produto final. A poliacrilonitrila é um polímero obtido da polimerização da acrilonitrila, ou seja, da uma reacção de adição, onde os monómeros se ligam um de cada vez para formar uma macro molécula linear. [12]

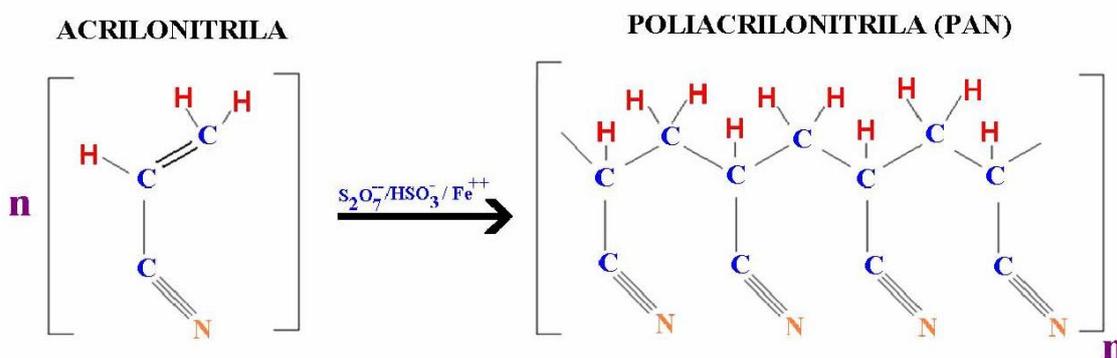


Figura 10 – Reacção de polimerização da Acrilonitrila; [12]

### P1.2.1 – Processo de Fabrico da Fibra de Carbono

Inicialmente, as fibras de poliacrilonitrila são alinhadas e, é-lhes imposta uma tensão que, com vapor de água, provocam o seu alongamento, figura 11.

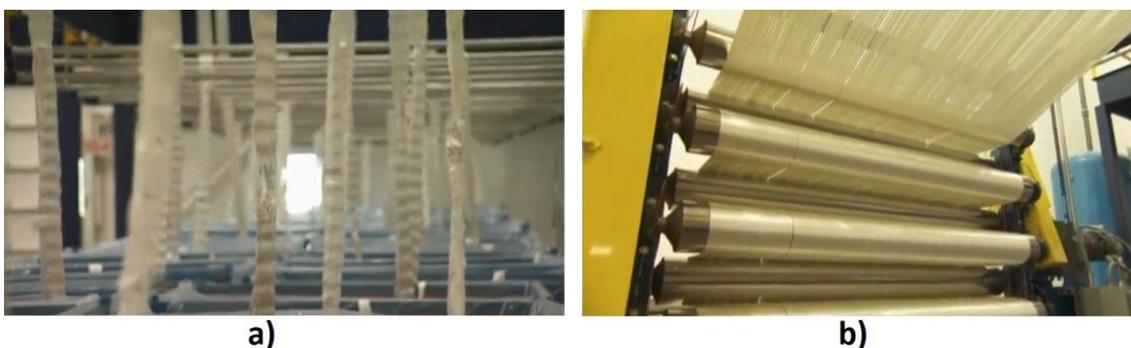


Figura 11 – a) PAN; b) PAN depois de entrar na máquina; [12]

Posteriormente, ocorre a oxidação, com um aquecimento constante e controlado até cerca de 250°C. Isto proporciona o aparecimento de ligações transversais entre as cadeias moleculares, criando uma estabilização físico-química, figura 12.



Figura 12 – Oxidação do PAN; [13]

Após o processo de oxidação, realiza-se o de carbonização em atmosfera inerte a alta temperatura. O gás mais utilizado neste processo é o Árgon e uma temperatura na ordem dos 1000°C. No momento em que ocorre a pirólise (reação de análise ou decomposição que ocorre pela acção de altas temperaturas) começam a surgir subprodutos devido à decomposição gasosa. Inicia-se a contracção do material, aumentando assim sua rigidez mecânica. Concluído este processo obtém-se um tipo de fibra de carbono, figura 13, com elevada tensão, contudo com baixo módulo de elasticidade.



Figura 13 – Fibra de Carbono; [13]

Para aumentar o módulo de elasticidade, pode-se efectuar o processo de grafitação. Consiste num tratamento térmico que oscila entre os 2000°C e 3000°C que, como se pode ver na figura 14, proporciona o ordenamento dos cristais, aproximando-se da estrutura ideal do cristal de grafite. As propriedades físicas, como condutividade térmica e condutividade eléctrica, também se alteram com este processo, fazendo com que o material se torne melhor condutor eléctrico e térmico.

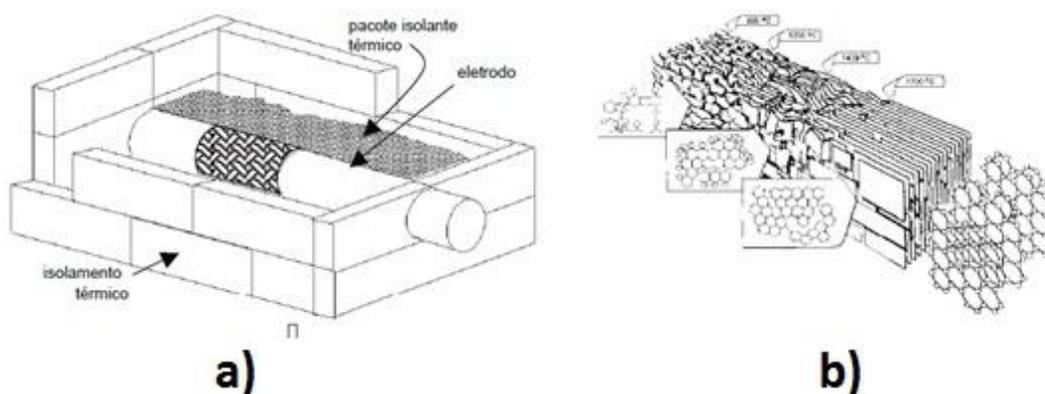


Figura 14 – a) Representação esquemática do forno tipo Castner para executar o processo de grafitação do carbono; b) Representação das mudanças na microestrutura amorfa para estrutura cristalina; [12]

Usando grafite cristalina de estrutura hexagonal de cadeia fechada com a forma de lâminas de 3,35 Ångstrons, uma vez que esta possui propriedades físicas diferentes nos sentidos longitudinal e transversal do cristal, permite obter-se uma fibra de carbono com alta resistência mecânica.

É de salientar que na obtenção da fibra, a utilização inicial de um material cuja formação é um tecido orgânico esticado, a orientação da sua estrutura molecular é ordenada, obtendo-se um cristal que contém camadas alinhadas paralelamente ao eixo das fibras. Depois de ocorrer o processo de grafitação, a estrutura resultante são fibras chamadas de "fibrilas", que são fibras extremamente finas compostas de 15 camadas de cristal.

Após as operações de oxidação, carbonização e grafitação as fibras de carbono obtidas apresentam as vantagens e desvantagens expostas na seguinte tabela.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada resistência à tracção;</li> <li>• Elevado módulo de elasticidade longitudinal;</li> <li>• Baixa massa específica;</li> <li>• Elevada condutividade eléctrica;</li> <li>• Elevada estabilidade dimensional;</li> <li>• Baixo coeficiente de dilatação térmica;</li> <li>• Bom comportamento a elevadas temperaturas de serviço;</li> <li>• Inércia química excepto em ambientes fortemente oxidantes;</li> <li>• Boas características de amortecimento estrutural;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzida resistência ao impacto;</li> <li>• Elevada condutividade térmica;</li> <li>• Baixa deformação antes da fractura;</li> <li>• Baixa resistência à compressão;</li> <li>• Custo elevado;</li> </ul>

Resumindo, podemos obter diversas fibras de carbono, com propriedades mecânicas diferente, conforme o avanço da operação de produção. Na figura 15 está representado um esquema onde são distinguidos dois tipos de fibra de carbono.

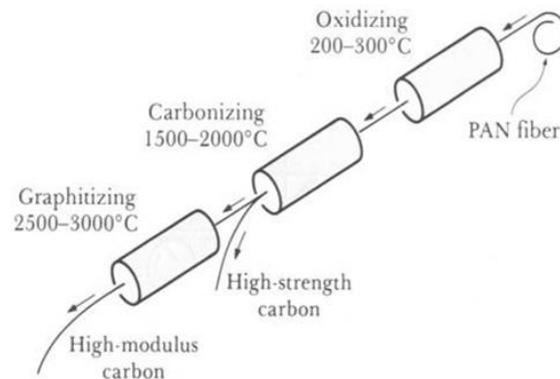


Figura 15 – Esquema dos processos de produção de fibra de carbono.

Na presente figura 16 estão expostos as propriedades mecânicas de vários materiais. Como podemos observar, de todos os materiais presentes, aquele que apresenta a melhor relação peso/resistência mecânica é a fibra de carbono.

**Basic Mechanical Properties of Fibres and Other Engineering Materials**

Material Type	Tensile Str. (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Typical Density (g/cc)	Specific Modulus
Carbon HS	3500	160 - 270	18	90 - 150
Carbon IM	5300	270 - 325	18	150 - 180
Carbon HM	3500	325 - 440	18	180 - 240
Carbon UHM	2000	440+	20	200+
Aramid LM	3600	60	145	40
Aramid HM	3100	120	145	80
Aramid UHM	3400	180	147	120
Glass - E glass	2400	69	25	27
Glass - S2 glass	3450	86	25	34
Glass - quartz	3700	69	22	31
Aluminium	460	72	28	26
Titanium	9300	110	45	24
Steel (bulk)	620	207	78	26
Steel (stainless)	1450	197	79	25
Steel (extruded)	2410	207	78	26

Figura 16 – Tabela com as propriedades de diversos materiais.

### P1.2.2 – Tecidos de Fibra de Carbono

Na produção de peças, é muitas vezes necessário cobrir grandes extensões e, o manuseamento de filamentos torna-se complicado devido à técnica de produção utilizada. Assim surgiu a necessidade de criar tecidos, a partir dos filamentos, para aumentar a produtividade. Aproveitando o desenvolvimento do sector têxtil, utilizam-se os teares convencionais para obter os respectivos tecidos. Na figura 17 pode-se observar uma linha de produção de tecido de fibra de carbono.

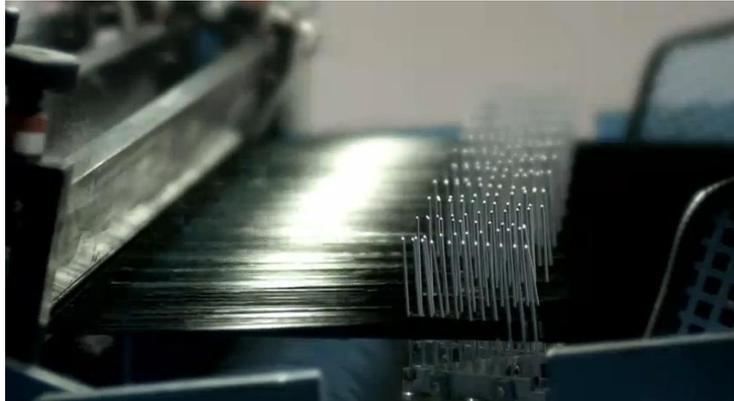


Figura 17 – Tear trabalhando com fibras de carbono. [19]

Outra solução passa pela produção de entrançados (braiding) que originam tubos que podem ser aplicados em situações mais específicas, como por exemplo os tubos das bicicletas, figura 18.



Figura 18 – Fibra de carbono entrançada. [19]

### P1.3 – Resinas

No mercado está disponível vários tipos de resinas que apresentam propriedades mecânicas diferentes umas das outras e, por este motivo a necessidade de empregar cada uma delas dependem da aplicação em causa e do estado de tensão a que esta sujeita a estrutura. As principais resinas são o poliéster, o viniléster e epóxida. Na tabela seguinte são apresentadas as vantagens e as desvantagens da utilização de cada uma. [15]

	Vantagens	Desvantagens
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facil de usar;</li> <li>• Mais barata de todas estas resinas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriedades mecânicas moderadas;</li> <li>• Altas emissões de estireno em moldes abertos;</li> <li>• Encolhimento na cura alto</li> <li>• Gama limitada do tempo de trabalho;</li> </ul>
Viniléster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia química muito alta;</li> <li>• Propriedades mecânicas superiores à do poliéster;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para obter altas propriedades altas é necessario realizar uma pós-cura;</li> <li>• Alto teor em estireno;</li> <li>• Custo mais elevado do que o do poliéster;</li> <li>• Encolhimento na cura alto</li> </ul>
Epóxida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevadas propriedades mecânicas e térmicas;</li> <li>• Alta resistência à água;</li> <li>• Longo tempo de trabalho disponível;</li> <li>• A resistência à temperatura pode ser de 140°C molhada a 220°C seca;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais caro do que o viniléster;</li> <li>• Mistura crítica;</li> <li>• Tratamento corrosivo;</li> </ul>

Como podemos observar pela figura 19 constatamos que a resina com maior tensão de ruptura é a epóxida e, por este motivo é utilizada na construção dos quadros de bicicleta.

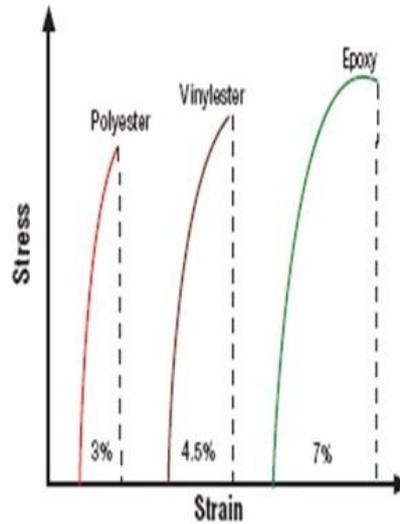


Figura 19 – Curvas tensão-deformação típicas das resinas para uma cura durante 5h a 80°C;

### P1.3.1 – Resina Epóxido

A resina epóxido pertence à família dos polímeros termoendurecíveis, sendo as mais frequentes, produtos de uma reacção entre epiclórídria e bisfenol-a. Esta, quando misturada com o catalisador endurece. Este processo é denominado tecnicamente por cura que consiste na reticulação interna (*crosslinking*) devido à acção do calor. O produto resultante é insolúvel em solventes. Uma vez que este processo não dá origem a produtos de reacção durante a cura apresenta uma pequena contracção. Estas resinas têm também uma boa adesão a outros materiais, boa resistência química, ao meio ambiente e à água, tem boas propriedades mecânicas (tração, compressão, corte, choque, abrasão, etc), tem boas propriedades de isolamento térmico e eléctrico e é impermeável.

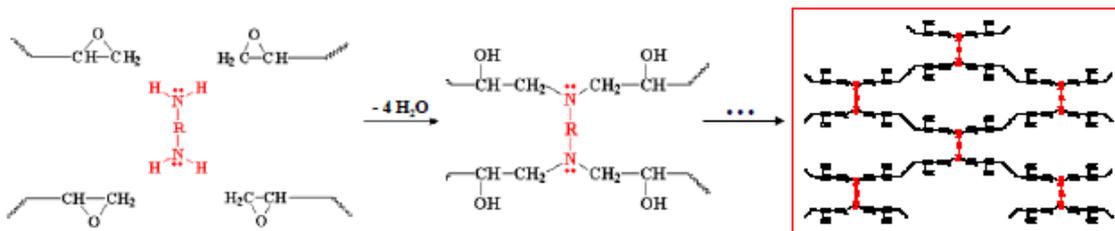


Figura 20 – Estrutura molecular da resina epóxida.

Para a Araldite 2015, um produto da Huntsman, podemos observar na figura 21 o tempo de cura da resina para diversas temperaturas. [17]

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	12	7.5	4	1	-	-
LSS > 1N/mm <sup>2</sup>	minutes	-	-	-	-	17	6
Cure time to reach	hours	21	13	6	2	-	-
LSS > 10N/mm <sup>2</sup>	minutes	-	-	-	-	35	7

LSS = Lap shear strength.

Figura 21 – Tempo de cura da Araldite para determinada temperatura. [18]

Como se pode observar a temperatura é uma variável dependente no processo de cura, verificando-se uma diminuição apreciável do tempo de cura com o aumento da temperatura.

Para o mesmo produto existe uma relação tensão/temperatura, que está exposto na figura 22, verificando-se que para uma temperatura de 20°C a tem uma tensão na ordem dos 20 MPa.

#### Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: (a) = 7 days at 23°C; (b) = 24 hours at 23°C + 30 minutes at 80°C

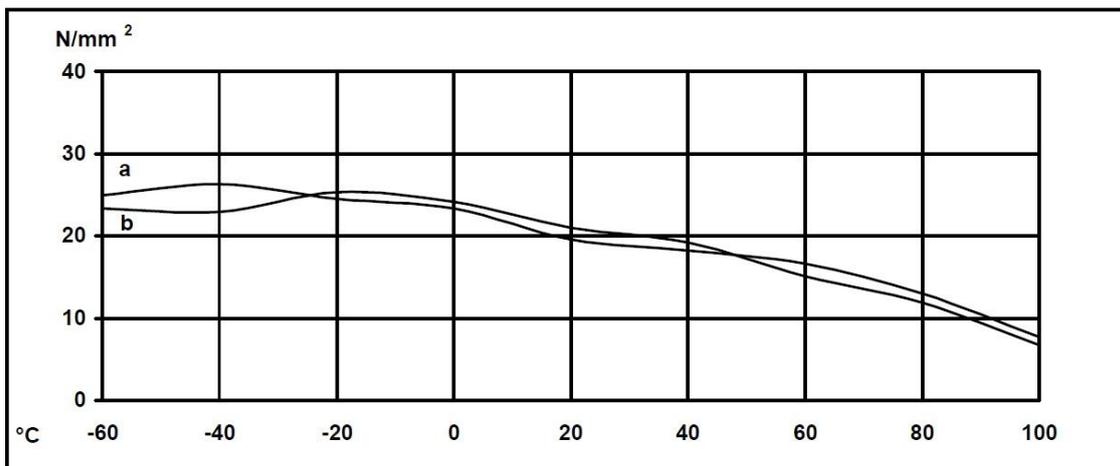


Figura 22 – Curvas tensão/temperatura. [18]

### P1.4 – Produção de Quadros de Bicicleta

Num quadro de bicicleta as maiores tensões ocorrem nas juntas e articulações, figura 23. Assim a construção destas estruturas tem uma grande influência no design e processo de construção do quadro de bicicleta. Para evitar estes problemas, inerentes à descontinuidade do material nas juntas, há uma necessidade de reduzir ou eliminar o número de juntas na estrutura do quadro.

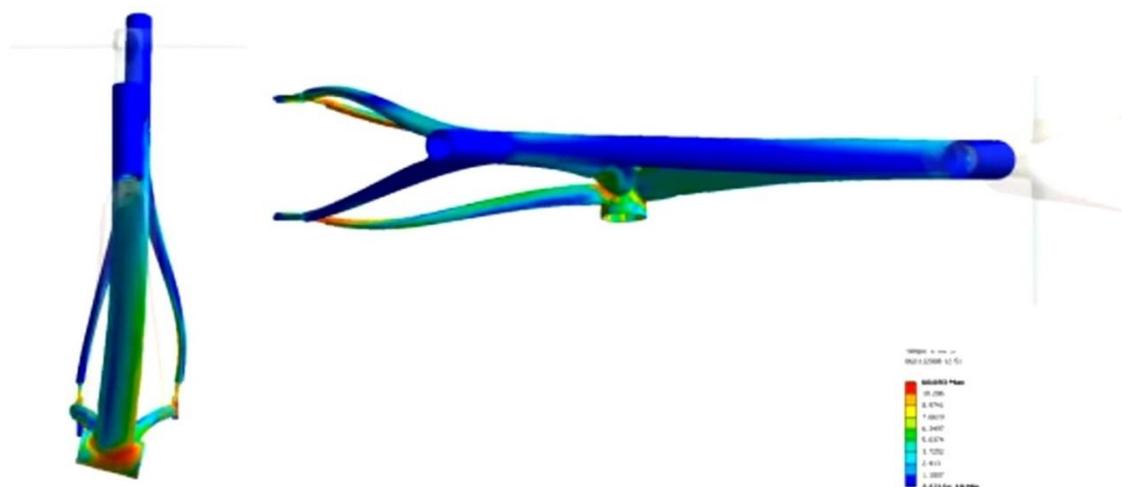


Figura 23 – Análise Estrutural. [21]

O ideal seria construir um quadro como sendo uma única peça, isto é, uma estrutura sem juntas. Contudo, a sua fabricação com alta qualidade e com a segurança necessária para o atleta, é de elevado grau de dificuldade e muito cara. O maior impedimento está relacionado com a grande dificuldade de produzir de forma confiável uma alta compactação, a pressões uniformes, do composto laminado durante o processo de cura. Com isto, pode dizer-se que a complexidade de fabricação de um quadro sem juntas produz laminados com baixa qualidade.

Visto que a obtenção de um quadro de bicicleta sem juntas implica vários problemas, então a solução passa por fazer a estrutura do quadro em pequenas peças, moldando-as separadamente (Resin Transfer Moulding – RTM), e posteriormente, submetendo-as a processos de colagem. Desta forma, é possível obter maior optimização, maior desempenho, um processo de fabrico mais simples e um desempenho estrutural muito melhor para cada componente. [20]



Figura 24 – Componentes constituintes do quadro.

### P1.4.1 – Transferência de Resina por Moldação (RTM)

Para a produção de quadros de bicicleta, utiliza-se o processo de RTM. Assim, como se pode observar pela figura 25, colocam-se varias camadas de tecidos envolvendo um macho que é colocado dentro do molde. É importante notar que os tecidos devem ser colocados em diferentes direcções para garantir que a estrutura suporte forças axiais, torsionais e momentos flectores.

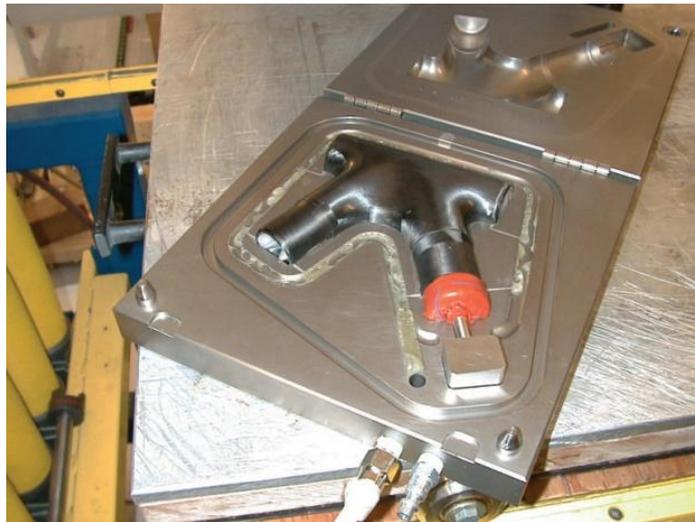


Figura 25 – Exemplo de um molde utilizado no processo de RTM. [20]

Terminada a moldação, fecha-se o molde e, uma resina líquida pré-catalisada é injectada para o seu interior, impregnando a pré-forma fibrosa seca depositada no interior deste. Quando o molde se encontrar totalmente preenchido e a fibra saturada pela resina, submete-se a um processo de cura. No fim o compósito moldado é retirado do molde, obtendo-se o componente da figura 26. [15]



Figura 26 – Peça obtida pelo processo de RTM. [20]

Na figura 27, está exposto um esquema do procedimento utilizado no processo de RTM.

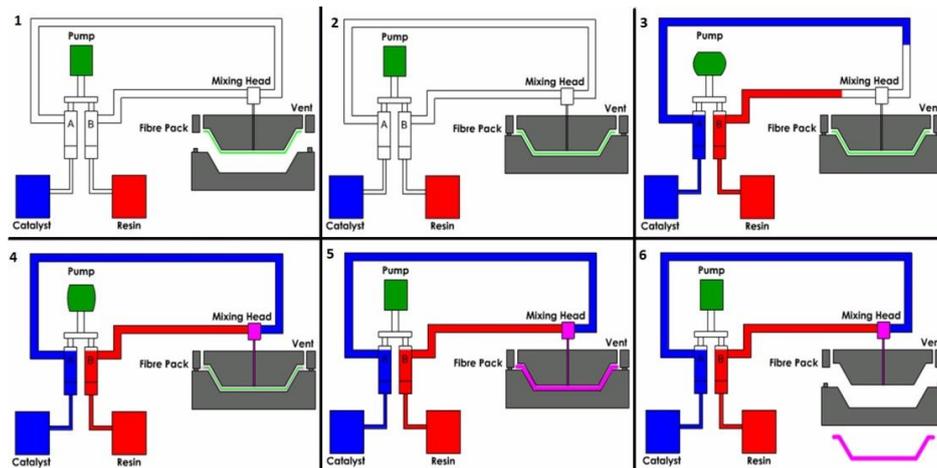


Figura 27 – Sequência de implementação do processo de RTM. [15]

Para a obtenção de uma peça de um compósito com qualidade dependente bastante do preenchimento completo da cavidade do molde com resina e consequentemente da expulsão do ar. A impregnação da resina é influenciada por diversos factores tais como as propriedades químicas e reológicas da resina líquida, orientação ou anisotropia da pré-forma fibrosa, temperatura do molde, pressão de injeção e características superficiais entre a fibra e a resina.

As propriedades mecânicas de compósitos moldados por RTM dependem do volume de fibras depositadas e, em muitos casos, podem ser melhoradas com o seu aumento. No entanto, quando o aumento é exagerado, requerem maiores pressões de injeção, o que pode afectar significativamente as propriedades do componente moldado final.

O RTM apresenta muitas vantagens sobre outros processos de fabrico de compósitos, incluindo baixo custo de mão-de-obra, ferramentas simples, ciclos de tempo satisfatórios, fabricação de estruturas complexas com qualidade, além de não requerer uso de pré-impregnados.

Após obtidas todos os componentes, os quais são definidos por cada empresa, aplica-se a resina epóxida na junta adesiva e posteriormente unem-se os componentes. Antes de iniciar a cura, toda a estrutura é suspensa através de gabaris, para garantir a forma, como se pode observar na figura 28.



Figura 28 – Estrutura montada no gabari.

### ***P1.5 – Conclusões***

Através deste trabalho podemos constatar, que a fibra de carbono é um material com excelentes propriedades mecânicas aliado a um baixo peso específico. Por este motivo, é aliciente utiliza-la em peças estruturais onde a redução do peso influencia o rendimento. A título de exemplo temos as bicicletas e carros de alta competição, raquetes de ténis e tacos de basebol.

Verificamos também que estão disponíveis vários tipos de resina no mercado, no entanto aquela que confere melhores propriedade mecânicas é a epóxico.

Em relação às fibras de carbono, verificamos que estas têm origem em precursores orgânicos de carbono, sendo o mais utilizado a poliácridonitrila uma vez que confere melhores propriedades mecânicas às fibras de carbono. Contudo podem-se obter fibras com alto ou baixo módulo de elasticidade, dependendo da aplicação ou não do processo de grafitação.

De todos os processos de produção de materiais compósitos, aquele que mais se adequa para a produção dos componentes do quadro de uma bicicleta é o de transferência de resina por moldagem (RTM).

## P1.6 – Bibliografia

- [1] <http://www.tudosobrerodas.pt/i.aspx?imc=2489&ic=5785&o=3919&f=5785>;
- [2] <http://biciletasdelsur.galeon.com/historia.html>;
- [3] <http://www.chiconet.com.br/cbx750/historia/historia.htm>;
- [4] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_Michaux](http://pt.wikipedia.org/wiki/Pierre_Michaux);
- [5] <http://www.foldingcyclist.com/folding-bike-history.html>;
- [6] <http://www.tudosobrerodas.pt/i.aspx?imc=2489&ic=5785&o=3919&f=5785>;
- [7] <http://temadecasalindo.blogspot.com/2010/06/referencias-e-imagens.html>;
- [8] [http://www.google.pt/search?hl=pt-PT&rlz=1T4GFRE\\_pt-PTPT381PT381&q=H.J.Lawson+bike&um=1&ie=UTF-8&tbn=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei= fTvTreNDYqW8gPJt43HDw&biw=784&bih=765&sei= TvTra8Blb38QP1qvSiCg](http://www.google.pt/search?hl=pt-PT&rlz=1T4GFRE_pt-PTPT381PT381&q=H.J.Lawson+bike&um=1&ie=UTF-8&tbn=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei= fTvTreNDYqW8gPJt43HDw&biw=784&bih=765&sei= TvTra8Blb38QP1qvSiCg);
- [9] [http://www.google.pt/search?sourceid=navclient&aq=hts&oq=&hl=pt-PT&ie=UTF-8&rlz=1T4GFRE\\_pt-PTPT381PT381&q=John+Kemp+Starley](http://www.google.pt/search?sourceid=navclient&aq=hts&oq=&hl=pt-PT&ie=UTF-8&rlz=1T4GFRE_pt-PTPT381PT381&q=John+Kemp+Starley);
- [10] <http://www.trekbikes.com/es/es/>
- [11] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_de\\_carbono](http://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono)
- [12] Msc. Nilton Pereira Alves, Msc Carlos Alberto Brito e Eng. Elson Garcia – “Um novo termoplástico obtido com a Glicerina de Biodiesel”;
- [13] <http://www.youtube.com/watch?v=kaog8Mc4xxw>;
- [14] Luiz Cláudio Pardini e Adriano Gonçalves – “Processing of thermo-structural carbon-fiber reinforced carbon composites”, Artigo;
- [15] Prof. Manuel Freitas e Prof. Arlindo Silva – “Materiais Compósitos”, Instituto Superior Técnico;
- [16] Relatório 37/87 – NCE, *Emprego de Resinas Epoxi na Construção*, LNEC, Lisboa, Fevereiro de 1987, pp. 2-28.
- [17] Carbon composite sports bike, Application news;
- [18] Araldite® 2015 (AV 5308 / HV 5309-1), Huntsman;
- [19] <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=leST0vfDuhw>
- [20] Bike frame races carbon consumer goods forward, REINFORCEDplastics– July/August 2003;
- [21] <http://www.youtube.com/watch?v=SVcel1VRUtM>;

## PARTE 2 – TRABALHO PRÁTICO

### *P2.1 – Introdução*

O presente relatório agrupa um conjunto de conceitos que foram abordados ao longo das aulas práticas da cadeira de Materiais de Construção Mecânica II. Nelas, foi estudado os materiais poliméricos, sendo objecto de estudo a identificação de polímeros, o ensaio à tracção a velocidade constante, ensaio à tracção com relaxação e com fluência e efectuar a resolução de um exercício de dimensionamento.

## ***P2.2 – Identificação de polímeros***

### **P2.2.1 – Metodologia de identificação**

- Ensaio de avaliação de densidade:  
Nesta análise pretende-se determinar qualitativamente a densidade do polímero tendo por base a água. Ou seja, mergulhando a amostra na água, por inspecção, constatar se esta fica submersa ou se flutua e se é espuma ou sólida.
- Ataque com Tetracloreto de Carbono:  
Este ensaio consiste em introduzir a amostra numa solução de tetracloreto de carbono, durante 3 minutos e, verificar o seu comportamento, se não é atacada, se começa a ficar viscosa ou se a superfície é atacada, produzindo acabamento “mate”.  
A exposição a concentrações elevadas deste composto pode afectar o sistema nervoso central e causar degenerescência do fígado e dos rins, podendo levar ao coma e até morte. Por estes motivos, é necessário ter o máximo de cuidado quando se estiver a manusear com o Tetracloreto de carbono.
- Ataque com Acetato de Etilo:  
Este ataque foi realizado de forma análoga ao do tetracloreto de carbono, porém a solução utilizada foi o acetato de etilo.  
Trata-se de um líquido incolor que é um óptimo solvente, pouco volátil mas muito inflamável. A exposição a concentrações excessivas deste produto pode provocar dor de cabeça e é irritante para os olhos e para a pele assim, deve-se manusear de forma cuidada este produto.
- Sentir a amostra e medir a dureza:  
Este passo consiste em realizar uma avaliação visual e táctil à amostra. É requerido que se tente riscar a amostra com a unha e verificar o sucedido.
- Cortar a Amostra:  
Neste passo pretende-se avaliar o modo de corte e as superfícies resultantes. Para tal, utilizou-se um xizato com os devidos parâmetros de segurança. Utilizou-se a tabela da figura 2.2.1 como orientação da avaliação. [1]

Material	Corte
Polietileno de baixa densidade	Corta-se suave e facilmente.
Polietileno de alta densidade	Fácil de cortar; faces suaves.
Polipropileno	Fácil de cortar; faces razoavelmente macias.
Policloreto de vinilo, rígido	Razoavelmente fácil de cortar; faces macias.
Policloreto de vinilo, flexível	Fácil de cortar; superfícies macias.
Poli-estireno	Razoavelmente difícil de cortar; mas alguns graus de poliestireno modificado podem ser cortados mostrando faces macias.
Poli-estireno expandido	Tende a ralar.
Acrilonitrilo-butadieno-estireno	Razoavelmente fácil de cortar; faces macias.
Acetato de celulose	Fácil de cortar; superfícies macias.
Nitrato de celulose	Fácil de cortar; superfícies macias.
Filme de poliéster	Razoavelmente fácil de cortar; superfícies macias. O arrancamento pode provocar arestas irregulares.
Polimetacrilato de metil	Estilhaça ao cortar.
Poliamida	Razoavelmente fácil de cortar; superfícies macias.
Acetal	Razoavelmente difícil de cortar; arestas macias.
Espuma de poliuretano	Usualmente não se desfaz quando se corta.

Figura 2.2.1 – Tabela relativa ao corte da amostra; [1]

- Comportamento após exposição a uma chama:  
Submetendo a amostra a uma chama, com as devidas precauções e segurança, avaliar qual dos seguintes comportamentos se verifica: continua a arder sem fumo preto, continua a arder com fumo preto, continua a arder por um curto período de tempo, formando a coke-like mass, e depois apaga-se, ou a chama apaga-se.
- Cheirar a amostra após a extinção da chama:  
Uma vez que era desconhecido o tipo de produto que se estava a manusear, neste teste devia-se ter cuidado, sobretudo, com a elevada exposição ao fumo proveniente da amostra, pois poderia conter toxicidades. Através da tabela da figura 2.2.2 verificam-se quais os possíveis cheiros com que nos poderíamos confrontar.

Material	Cheiro
Polietileno	Vela queimada
Polipropileno	Vela queimada
Policloreto de vinilo, rígido	-
Policloreto de vinilo, flexível	Cloro
Poliestireno	Borracha queimada
Acrilonitrilo-butadieno-estireno	Borracha queimada
Acetato de celulose	Formaldeído
Nitrato de celulose	
Polimetacrilato de metil	Alho ou resina de dentista
Nylon	Cabelo queimado
Acetal	Cabelo queimado
Espuma de poliuretano	Acre

Figura 2.2.2 – Tabela relativa ao cheiro da amostra após a extinção da chama; [1]

- Medição da dureza:
 

Após consulta da norma ASTM D 2240 – 68, verificou-se que a realização da medição de dureza deve ter em conta os seguintes passos:

  - Colocar o provete horizontalmente sobre uma superfície dura;
  - Segurar o durómetro numa posição vertical, com a ponta do indentor a pelo menos 12mm de qualquer aresta;
  - 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);
  - Efectuar 5 medições em posições afastadas no mínimo 6mm umas das outras;
  - Realizar o ensaio a uma temperatura de  $23\pm 2$  (°C);
  - Ter em conta as condições de humidade relativa, caso as propriedades do polímero em análise variem com a mesma;

Comparando o procedimento definido pela norma com o que efectuamos, verifica-se que apenas se realizaram 3 dos 5 ensaios recomendados. O provete fornecido tem apenas 4mm de espessura e, as características definidas na norma implicam que este tenha no mínimo 6mm de espessura. No entanto é de salientar que para durezas shore D acima de 50, podem ser usados provetes até 3mm de espessura. Em termos superficiais podemos dizer que o provete respeita todas as condições impostas, desde que não se faça o teste em cima das marcas de extracção do provete do molde.

### P2.2.2 - Resultados dos ensaios

Os resultados de cada teste estão agrupados na tabela da figura 2.2.3:

1º - Avaliação de densidade:	Flutua e é sólido;
2º - Ataque com Tetracloreto de Carbono:	Não é atacada;
3º - Ataque com Acetato de Etilo:	Não é atacada;
4º - Sentir a amostra e medir a dureza:	Vestígios de riscos visíveis;
5º - Cortar a Amostra:	Fácil de cortar; Faces suaves;
6º - Comportamento após exposição uma chama:	Continua a arder sem fumo preto;
7º - Cheirar a amostra após extinção da chama:	Vela queimada;
8º - Medição da dureza:	65; 66; 65;

P2.2.3 – Análise dos resultados

Após obtenção dos resultados referentes a cada experiência, utilizou-se um diagrama da figura 2.2.3 para, por exclusão de partes determinar qual o polímero com que estávamos a lidar. A curva vermelha representa a selecção dos polímeros conforme o resultado obtidos nas experiências.

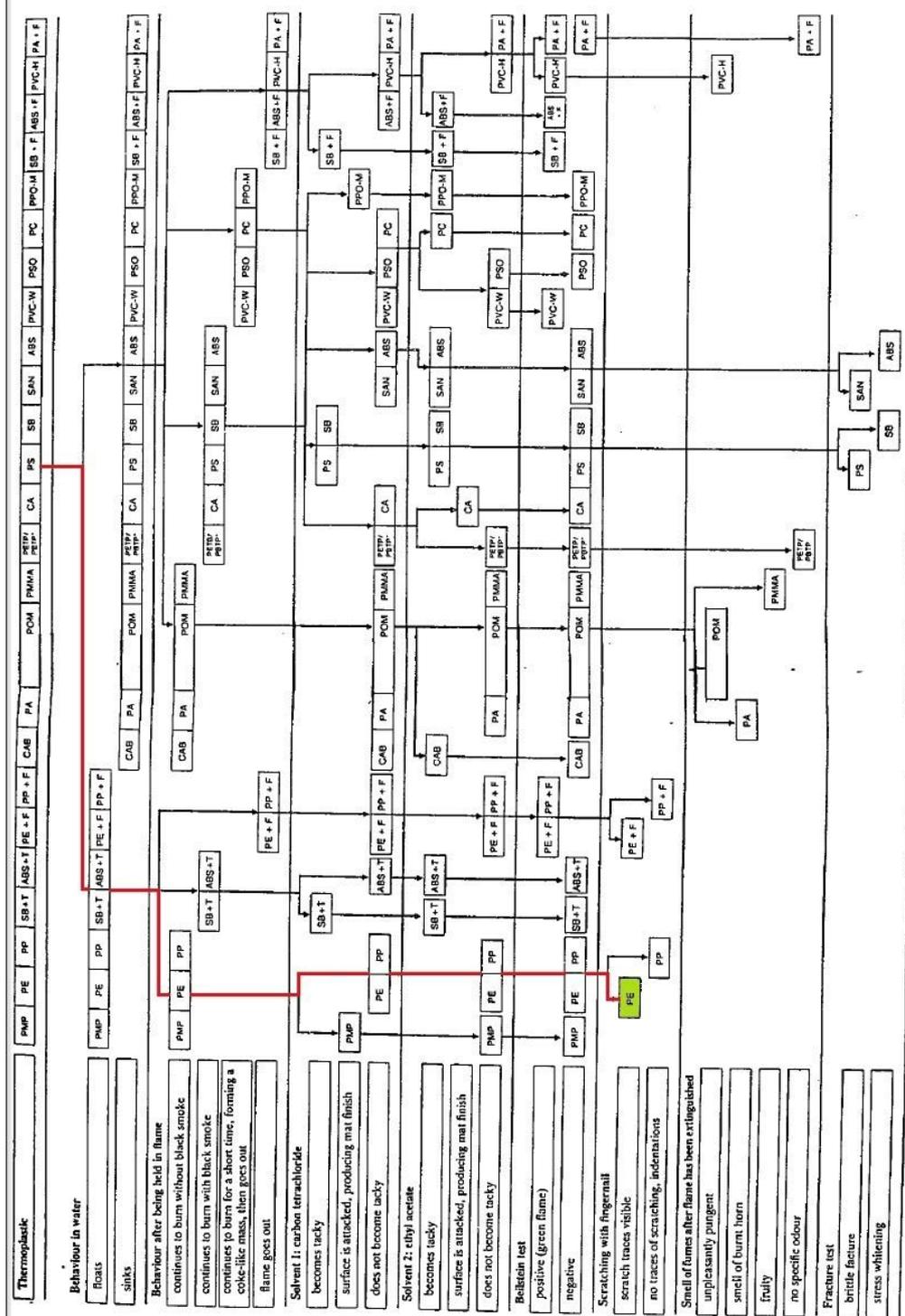


Figura 2.2.3 – Tabela de identificação de polímeros;

Como se pode verificar neste diagrama apenas estão descritos 6 dos 8 testes realizados, no entanto conseguiu-se verificar-se que o nosso material era o polietileno.

Através do teste de cheiro, conseguiu confirmar-se que o tipo de material já encontrado. No entanto, com o teste de cortar amostra conseguiu-se especificar que o material era polietileno de alta densidade. Estes dois últimos testes tiveram por base, como já foi referido, as tabelas da figura 2.2.1 e 2.2.2.

## P2.2.4 – Polietileno

O polietileno é um polímero sintetizado pela junção de monómeros de etileno através de uma reacção de adição. Inicialmente aquece-se uma molécula iniciadora para produzir um radical muito activo com capacidade de atacar a molécula de etileno de forma a gerar um novo radical que por sua vez reage com outra molécula de etileno e assim sucessivamente. Constrói-se assim uma longa cadeia de grupos  $\text{CH}_2$ . A unidade repetitiva do polímero é  $-(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n$  e,  $n$  é o número de repetições que, normalmente é muito elevado. [2]

O polietileno apresenta resistência a altas temperaturas, impermeabilidade, não é tóxico, baixa densidade em relação aos metais e, boa resistência à tensão, compressão e tracção.

Este polímero é principalmente utilizado em filmes finos, como embalar alimentos congelados ou para sacos com diversos fins. Pode ser também utilizado para produção de recipientes de detergentes, sabão líquido, tinta ou gelados.

Os polietilenos estão divididos em três tipos e, são diferenciados pela sua densidade. Deste modo, existe o de baixa, média e elevada densidade. De seguida, exibem-se as propriedades mecânicas de cada um deles.

Em relação à densidade, o polietileno de baixa densidade apresenta uma gama de valores 918 a 940 ( $\text{kg/m}^3$ ), enquanto o de alta densidade os valores variam entre 947 e os 955 ( $\text{kg/m}^3$ ).

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Shore D	38.0 - 60.0
Tensile Strength, Ultimate	2.80 - 56.5 MPa
Tensile Strength, Yield	7.70 - 136 MPa
Elongation at Break	13.5 - 800 %
Elongation at Yield	13.0 - 400 %
Modulus of Elasticity	0.110 - 0.449 GPa
Flexural Modulus	0.0248 - 1.38 GPa
Tensile Impact Strength	94.5 - 315 $\text{kJ/m}^2$
Izod Impact, Notched	0.427 - 5340 J/cm

Figura 2.2.4 – Propriedades mecânicas do polietileno de baixa densidade; [4]

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Shore D	59.0 - 63.0
Tensile Strength, Ultimate	9.20 - 33.0 MPa
Tensile Strength, Yield	9.00 - 22.8 MPa
Elongation at Break	16.0 - 1210 %
Elongation at Yield	8.00 - 13.0 %
Modulus of Elasticity	0.240 - 0.840 GPa
Flexural Modulus	0.480 - 0.970 GPa
Tensile Impact Strength	130 - 353 kJ/m <sup>2</sup>
Izod Impact, Notched	1.44 - 5.60 J/cm

Figura 2.2.5 – Propriedades mecânicas do polietileno de média densidade; [4]

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Shore D	55.0 - 76.0
Tensile Strength, Ultimate	10.0 - 43.0 MPa
Tensile Strength, Yield	11.0 - 43.0 MPa
Elongation at Break	3.20 - 2080 %
Elongation at Yield	6.60 - 44.0 %
Modulus of Elasticity	0.565 - 1.57 GPa
Flexural Modulus	0.280 - 1.81 GPa
Tensile Impact Strength	34.0 - 349 kJ/m <sup>2</sup>

Figura 2.2.6 – Propriedades mecânicas do polietileno de alta densidade; [4]

## P2.2.5 – Conclusões

Através da aplicação das experiências realizadas, verifica-se uma fácil e fiável determinação do polímero em causa.

Constatou-se que este polímero apresenta resistência a altas temperaturas, impermeabilidade, não é tóxico, baixa densidade em relação aos metais e, boa resistência à tensão, compressão e tracção.

Em termos de aplicações é muito utilizado como filmes finas para diversos fins, como por exemplo, sacos ou películas para embalar alimentos.

## P2.2.6 - Resultados dos ensaios

[1] Documento de apoio às aulas práticas M.C.M. II; António Torres Marques, Paulo Carvalho Neves, Janeiro 2010;

[2] Chang, Raymond; Química, 8ªEdição; Mc Graw Hill;

[3] PE, CES Edupack, 2011;

[4] <http://www.matweb.com/index.aspx>

## P2.3 – Ensaio à tracção

### P2.3.1 - Metodologia

Este ensaio consiste em submeter um provete, no caso de polietileno, com a configuração exposta na figura 2.3.1 á tracção uniaxial a uma velocidade de 200mm/min. Com este teste pretende-se obter o módulo de elasticidade, a tensão limite elástica, a tensão máxima e a energia de deformação.



Figura 2.3.1 – Provete utilizado no ensaio;

Após a colocação do provete, formam retiradas as suas medidas, nomeadamente o comprimento entre amarras, largura e espessura. Estas dimensões encontram-se ilustradas na figura 2.3.2.

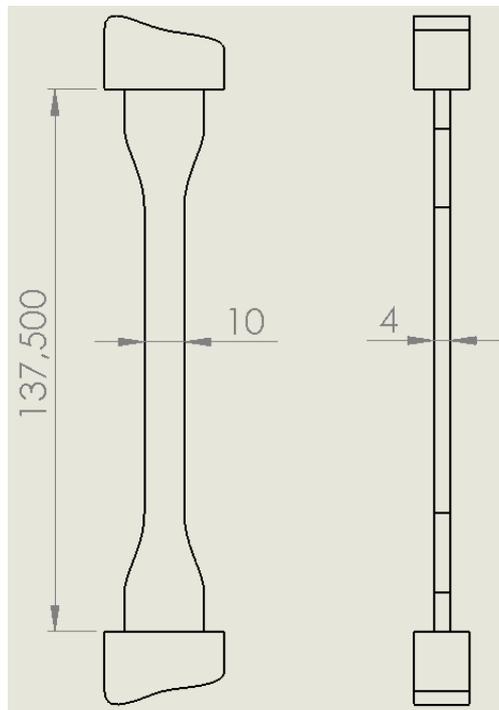


Figura 2.3.2 – Dimensões do provete;

### P2.3.2 – Resultados/Análise dos ensaios

Da realização do ensaio foram obtidos os valores do tempo, deslocamento e força numa folha de Excel. De forma atingir os resultados pretendidos foram efectuados todos os cálculos nessa mesma folha.

Uma vez que para a análise que se pretende efectuar é necessário o gráfico tensão/deformação, utilizaram-se estas duas relações para obter o respectivo gráfico:

$$\bullet \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{4 \times 10} \rightarrow \left( \frac{N}{mm^2} \right) = (MPa)$$

$$\bullet \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} = \frac{\Delta l F}{137,5} \rightarrow \left( \frac{mm}{mm} \right)$$

Deste processamento de dados construiu-se o seguinte gráfico tensão/deformação:

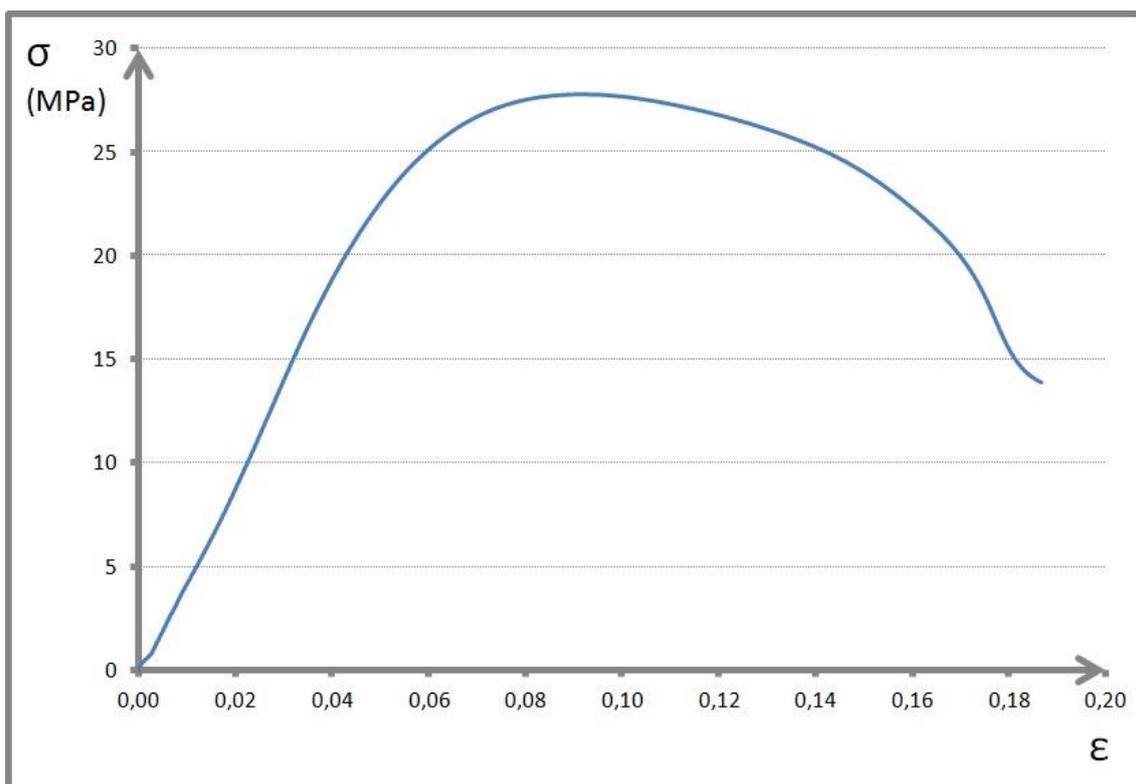


Figura 2.3.3 – Curva da tensão vs deformação;

Através deste gráfico pode-se agora estudar o comportamento do material na zona elástica. Para obter o módulo de elasticidade pode-se efectuar um cálculo analítico ou utilizar a folha de cálculo. No cálculo analítico, retirando dois pontos da zona elástica, o declive correspondente à recta que une esses mesmos dois pontos é o

módulo de elasticidade. Assim, considerando os pontos  $A \rightarrow (\epsilon_A, \sigma_A) \rightarrow (0,0130; 5,4420)$  e  $B \rightarrow (\epsilon_B, \sigma_B) \rightarrow (0,0380; 17,9300)$ , temos um módulo de elasticidade igual a:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{17,9300 - 5,4420}{0,0380 - 0,0130} = 499,52 \text{ (MPa)}$$

Pelo Excel, efectua-se uma análise individual dos dados referentes à zona elástica construindo, com esses mesmos dados um gráfico tensão/deformação, figura 2.3.4. À curva representada consegue-se associar uma linha de tendência com a respectiva equação.

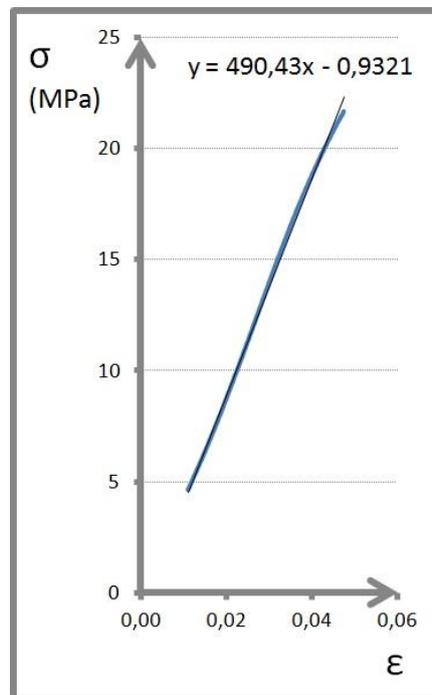


Figura 2.3.4 – Curva da tensão vs deformação (Zona Elástica);

Como se pode observar pela figura 2.3.4, a equação da recta tem um declive com o valor 490,43 (MPa) que, corresponde ao módulo de elasticidade. A equação define a tensão como variável dependente e a deformação como variável independente, ou seja:

$$\sigma(\epsilon) = 490,43\epsilon - 0,9321$$

Outro parâmetro que se pretende calcular é a tensão limite elástico. Este tensão verifica-se quando o material deixa de apresentar um comportamento elástico passando para um plástico. Procedendo ao cálculo da intersecção entre a recta anteriormente obtida com a curva tensão/deformação referente a todo o ensaio

consegue-se identificar esse ponto. Para realizar este cálculo utilizou-se a folha de cálculo e, obteve-se desta forma uma tensão de 20,66 (MPa).

A tensão máxima suportada pelo provete pode ser obtida por inspecção dos resultados até se encontrar o maior valor lá exposto. Outra maneira é aplicar uma função do Excel, chamada “MAXIMO”, a qual devolve o maior valor de entre os seleccionados. Assim, a tensão máxima registada tem o valor de 27,77 (MPa).

Em relação à energia de deformação, esta pode ser obtida pela área abaixo da linha do gráfico tensão/deformação. Uma vez que não dispomos de uma equação da curva que possibilite o cálculo da área recorrendo à integração. No entanto é possível realizar uma aproximação que resulta do somatório de pequenas áreas rectangulares e triangulares como ilustra a figura 2.3.5.

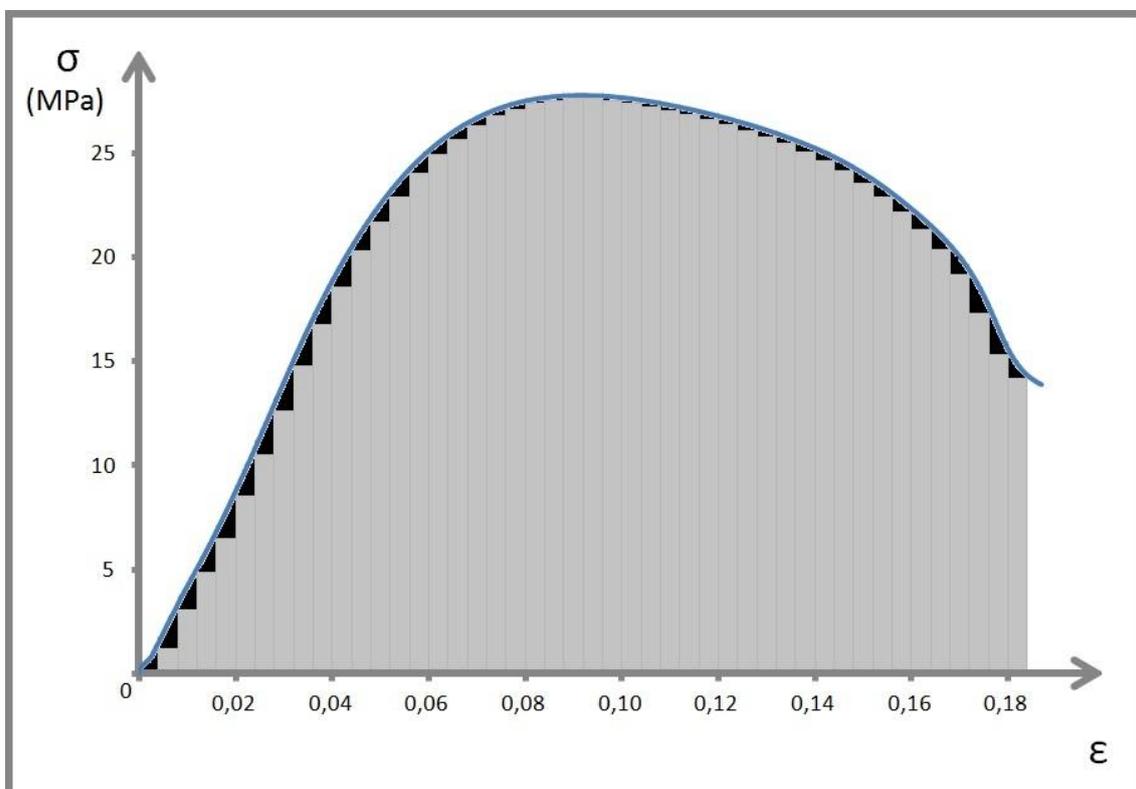


Figura 2.3.5 – Cálculo da Energia;

Para um intervalo entre  $\varepsilon_i$  e  $\varepsilon_{i+1}$  a área abaixo da curva é dada pela soma da área do rectângulo com a área do triângulo. Assim:

- $A_{\blacksquare} = l \times h = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot \sigma_1$
- $A_{\triangle} = \frac{l \times h}{2} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\sigma_2 - \sigma_1)}{2}$

A área total desse intervalo de deformação resume-se a:

$$A_T = A_{\blacksquare} + A_{\triangle} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot \sigma_1 + \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\sigma_2 - \sigma_1)}{2} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{2}$$

Implementando esta equação no Excel estendendo a todo o intervalo, obtemos um valor para a energia de deformação de 3,9297 (J).

Através da figura 2.3.6, retirada da base de dado CES Edupack 2011, pode-se verificar que os resultados obtidos no ensaio de tracção encontram-se dentro da gama esperada para o polietileno.

### Mechanical properties

Young's modulus	0.262	-	0.517	GPa
Compressive modulus	* 0.262	-	0.517	GPa
Flexural modulus	0.275	-	0.722	GPa
Shear modulus	* 0.091	-	0.18	GPa
Bulk modulus	* 0.978	-	1.03	GPa
Poisson's ratio	* 0.43	-	0.448	
Shape factor	3.9			
Yield strength (elastic limit)	9.65	-	19.3	MPa
Tensile strength	13.1	-	27.6	MPa
Compressive strength	* 11.6	-	23.2	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 18.3	-	38.6	MPa
Elongation	100	-	965	% strain
Hardness - Vickers	* 2.9	-	5.8	HV
Hardness - Rockwell M	* 29	-	31	
Hardness - Rockwell R	* 40	-	50	
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 5.24	-	11	MPa
Fracture toughness	* 1.26	-	3.79	MPa.m <sup>0.5</sup>
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.0774	-	0.153	

Figura 2.3.6 – Polietileno de Média Densidade, Propriedades Mecânicas; [1]

### P2.3.3 – Conclusões

Dadas as propriedades mecânicas obtidas no ensaio, verifica-se que este material possui uma resistência à solicitação relativamente elevada, podendo assim ser utilizado como elemento estrutural.

Perante os resultados, verifica-se que o polietileno é de média densidade, contudo apresenta-se no limite superior da gama dos valores das propriedades, ou seja, é um polímero com tendência para alta densidade.

### P2.3.3 – Bibliografia

[1] PE, CES Edupack, 2011;

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

### P2.4.1 - Metodologia

Com esta experiência pretendia-se determinar o módulo de relaxação, no caso do polietileno. Assim, realizou-se um ensaio à tracção com relaxação, a uma velocidade de 250mm/min, de forma a submeter o provete a uma deslocação inicial de 4,5mm originando uma deformação inicial no material. O objectivo desta experiência consiste em verificar o que acontece à curva de tensão vs tempo após um determinado período de tempo, calculando o tempo característico de relaxamento ( $\tau$ ). Um material viscoelástico apresenta simultaneamente características viscosas e elásticas. A viscosidade depende da escala de tempo da experiencia quanto comparada com a escala de tempo do material (tempo de relaxação). O modelo de Maxwell é o modelo básico de um fluido, porque a resposta a longo prazo correspondente a uma tensão constante aplicada é idêntica à de um fluido, isto é, continua a deformar-se. Outro modelo é o de Kelvin-Voigt é o modelo básico de um sólido, porque a resposta a longo prazo correspondente a uma tensão constante aplicada é idêntica à de um sólido, isto é, deixa de deformar-se.

Na figura 2.4.1 pode observar-se as curvas teóricas deste tipo de ensaio. No gráfico tensão vs tempo, entre o intervalo de tempo  $[t_0, t_i]$  encontra-se a parte da curva que será objecto de estudo. Os restantes valores serão então desprezados.

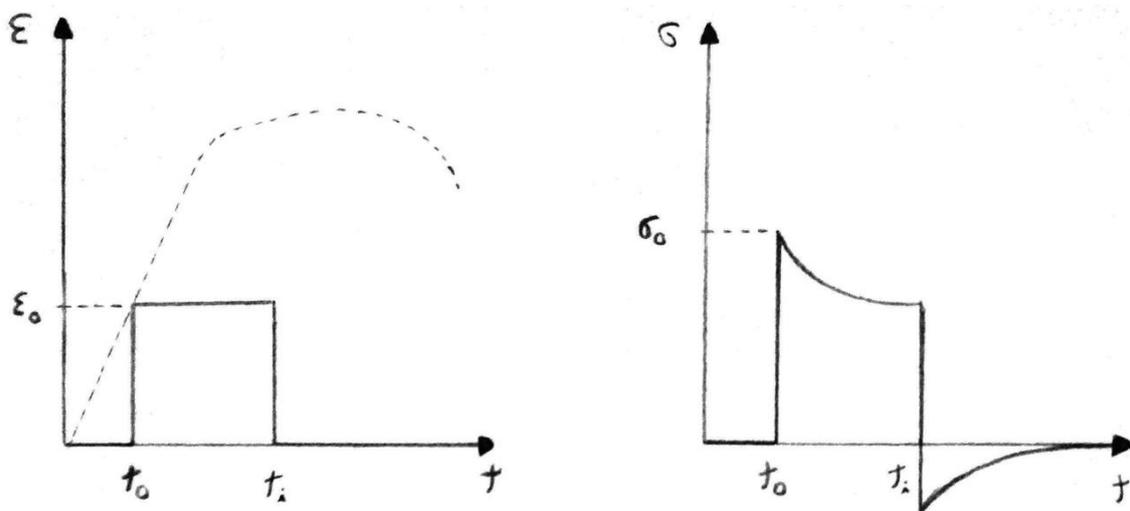


Figura 2.4.1 – Curvas teóricas de carga;

Para calcular o tempo característico de relaxamento ( $\tau$ ) podemos implementar dois métodos com auxílio de uma folha de cálculo de Excel que será descrito mais a frente.

Após a colocação do provete, formam retiradas as suas medidas, nomeadamente o comprimento entre amarras, largura e espessura. Estas dimensões encontram-se ilustradas na figura 2.4.2.

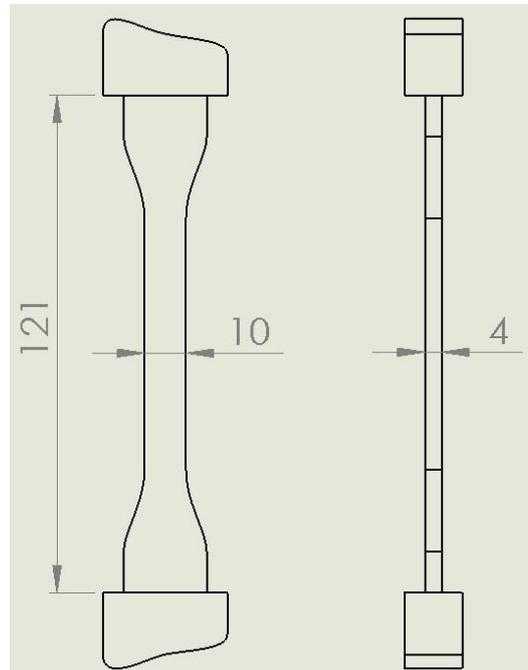


Figura 2.4.2 – Dimensões do provete (mm);

### P2.4.2 - Resultados dos ensaios

Como foi referido anteriormente executaram-se dois métodos na folha de cálculo para atingir os resultados. Estes métodos aplicam a mesma equação, no entanto, o grau de desenvolvimento é diferente. A equação utilizada para o primeiro método foi,

- $\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

enquanto que para o segundo método implementou-se,

- $\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \Leftrightarrow \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} \Leftrightarrow \ln \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = -\frac{t}{\tau}$

Com a realização do ensaio foram obtidos os valores do tempo, deslocamento e força numa folha de Excel.

Uma vez que para a análise que se pretende efectuar é necessário o gráfico tensão/tempo, utiliza-se a seguinte relação para obter o respectivo gráfico:

$$\bullet \sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{4 \times 10} \rightarrow \left( \frac{N}{mm^2} \right) = (MPa)$$

O  $\sigma_0$  corresponde à tensão máxima verificada no instante inicial do ensaio. Procedendo à manipulação das duas equações com auxílio da folha de cálculo, obtêm-se resultados com os quais é possível elaborar duas curvas (uma para cada equação), associando a cada uma a respectiva linha de tendência. Isto permite obter aproximações das curvas, que como podemos ver pela figura 2.4.3 e 2.4.4 são bastante grosseiras, no entanto uma tem um erro menor mas é irrelevante face a grandeza dessa diferença.

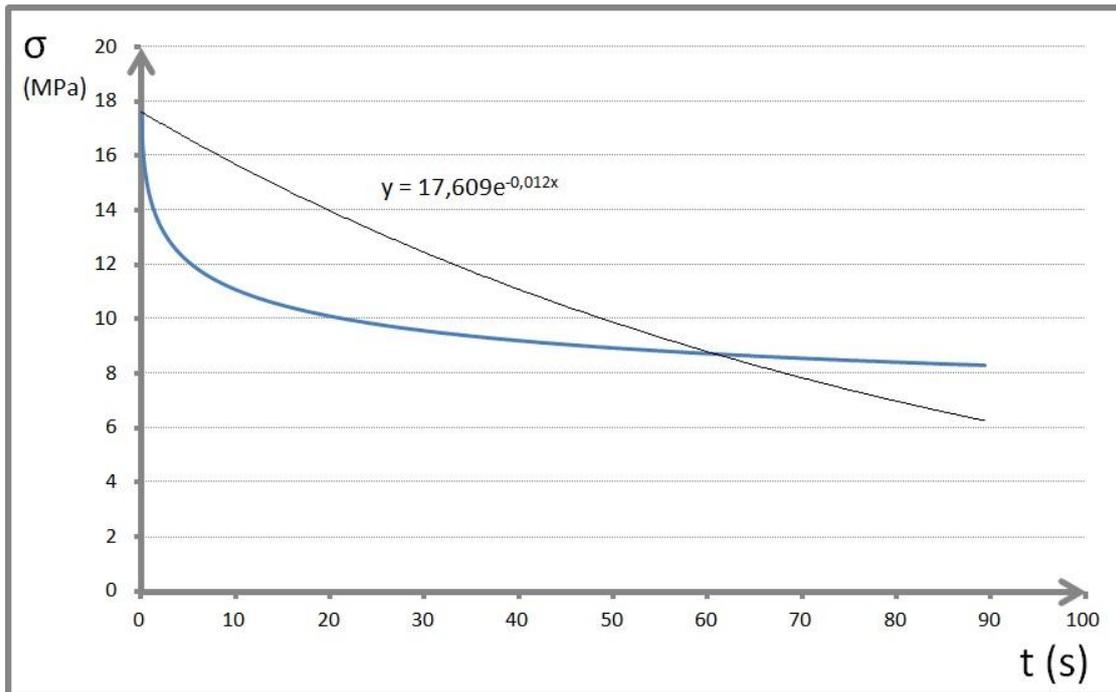


Figura 2.4.3 – Curva tensão vs tempo;

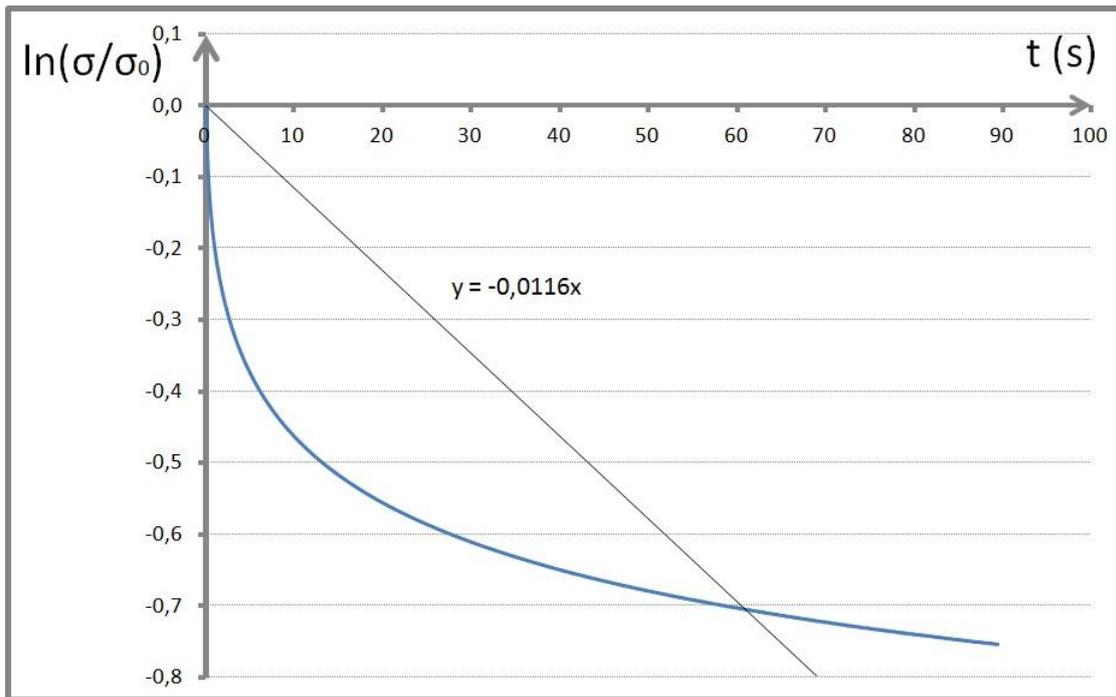


Figura 2.4.2 – Curva logarítmica da tensão vs tempo;

O tempo característico de relaxamento ( $\tau$ ), do polietileno para o ensaio realizado é:

- No primeiro caso:

$$-0,012 = -\frac{1}{\tau} \Leftrightarrow \tau = \frac{1}{0,012} \Leftrightarrow \tau = 83,33 \text{ (s)}$$

- No segundo caso:

$$-0,016 = -\frac{1}{\tau} \Leftrightarrow \tau = \frac{1}{0,016} \Leftrightarrow \tau = 62,5 \text{ (s)}$$

### P2.4.3 – Conclusões

Considerando uma função inversa da exponencial, quanto menor for o valor do tempo característico de relaxamento ( $\tau$ ) maior será o tempo de relaxação.

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \Leftrightarrow \sigma(t) = \frac{\sigma_0}{e^{\left(\frac{t}{\tau}\right)}}$$

## P2.5 – Resolução do Exercício de Dimensionamento

Com este trabalho pretende-se efectuar o dimensionamento de um clipe de uma caneta, que esta sujeita a tensões e deformações quando se coloca a mesma por exemplo num bolso. Assim, a ponta do clipe sofre um deslocamento de 2mm. A restrição de dimensionamento refere-se à máxima deformação de 0,5% que o clipe pode sofrer. Para efectuar a resolução deste problema consideramos que este clipe pode ser tratado como uma viga encastrada numa das extremidades. A figura 2.5.1 apresenta um esquema do problema, a flecha a ele associado e o diagrama de momentos flectores que ao longo da secção.

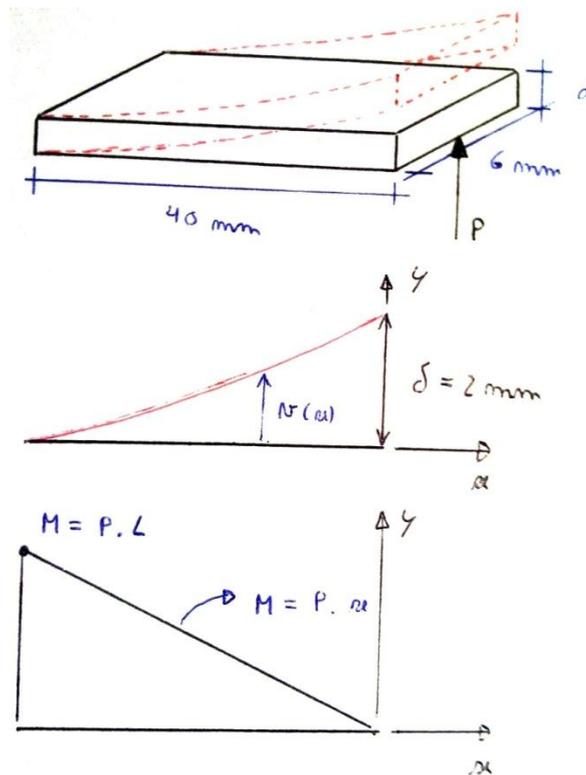


Figura 2.5.1 – Apresentação do problema;

- 1- A flecha ao longo de uma viga é dada pela seguinte equação:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI_{\blacksquare}} \Leftrightarrow \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{P \cdot x}{EI_{\blacksquare}} \Rightarrow v(x) = \frac{P \cdot x^3}{3 \cdot E \cdot I_{\blacksquare}}$$

Como se pode constatar pela figura 2.5.1 no diagrama de momentos flectores, o valor máximo ocorre para  $x = L$ , logo:

$$v(L) = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_{\blacksquare}} = \delta = 2 \Leftrightarrow P = \frac{6 \cdot E \cdot I_{\blacksquare}}{L^3} \Leftrightarrow P = \frac{3 \cdot E \cdot d^3}{L^3}$$

- O momento de inércia de uma viga de perfil rectangular é:

$$I_{\blacksquare} = \frac{l \cdot h^3}{12} \Leftrightarrow I_{\blacksquare} = \frac{6 \cdot d^3}{12} \Leftrightarrow I_{\blacksquare} = \frac{d^3}{2}$$

- Com o auxílio da figura 2.5.2, onde está representado um gráfico tensão vs deformação, podemos calcular o módulo de elasticidade. Traçando uma recta paralela à primeira curva, o seu declive fornece-nos o respectivo módulo. Assim, considerando dois pontos pertencentes a essa recta, no caso A (0;0) e B (0,4;4), obtemos um declive:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \Leftrightarrow E = \frac{4 - 0}{0,004 - 0} \Leftrightarrow E = 1000 \text{ (MPa)}$$

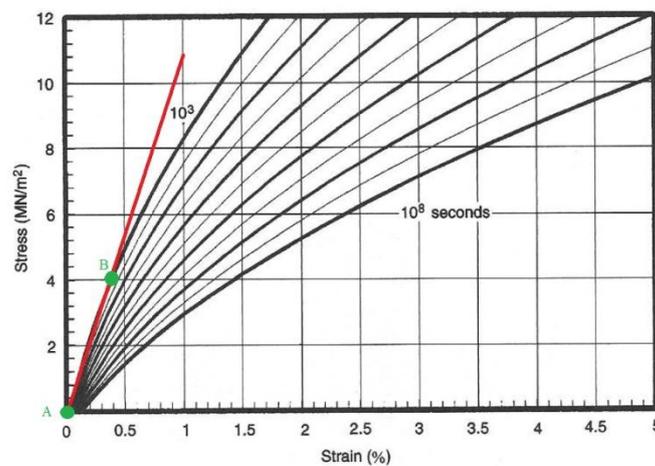


Figura 2.5.2 – Curva tensão/deformação do polipropileno;

A distribuição das tensões ao longo da secção não é uniforme. A zona acima do eixo neutro encontra-se em compressão e a abaixo deste encontra-se em tracção. Assim, como se pode verificar pela figura 2.7.3, a tensão mais elevada verifica-se na zona mais afastada do eixo neutro, ou seja, para  $y = d/2$ . A equação para a distribuição de tensões numa secção é:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_{\blacksquare}}$$

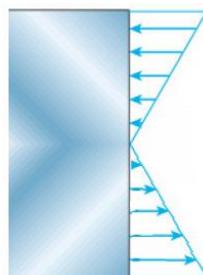


Figura 2.5.3 – Distribuição das tensões ao longo de uma secção;

Como se verifica na figura 2.5.1, a tensão máxima ocorre para a secção  $x = L$ . Assim:

$$\sigma = \frac{M.y}{I_{\blacksquare}} \Leftrightarrow \sigma = \frac{P.x.y}{I_{\blacksquare}} \Leftrightarrow \sigma = \frac{P.L.d.2}{2.d^3} \Leftrightarrow \sigma = \frac{P.L}{d^2}$$

Para esta secção, a máxima deformação que é admitida é de 0,5%. Assim, pela lei de Hooke temos:

$$\sigma = E.\varepsilon \Leftrightarrow E.0,005 = \frac{P.L}{d^2} \Leftrightarrow P = \frac{0,005.E.d^2}{L}$$

Assim, através das duas equações disponíveis, consegue-se determinar a espessura necessária do clipe como a força que está sujeito na ponta.

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} P = \frac{3.E.d^3}{L^3} \\ P = \frac{0,005.E.d^2}{L} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{3.E.d^3}{L^3} = \frac{0,005.E.d^2}{L} \\ P = \frac{0,005.E.d^2}{L} \end{array} \right. \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = \frac{0,005.L^2}{3} \\ P = \frac{0,005.E.d^2}{L} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = \frac{L^2}{600} \\ P = \frac{0,005.E.d^2}{L} \end{array} \right. \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = \frac{L^2}{600} \\ P = \frac{0,005.E.\left(\frac{L^2}{600}\right)^2}{L} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = \frac{L^2}{600} \\ P = \frac{0,005.E.L^3}{600^2} \end{array} \right. \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = \frac{L^2}{600} \\ P = 1,389 \times 10^{-8}.E.L^3 \end{array} \right. \end{aligned}$$

Uma vez que o clipe tem um comprimento igual a 40 (mm) e um módulo de elasticidade igual a 1000 (MPa) obtém-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} d = \frac{40^2}{600} \\ P = 1,389 \times 10^{-8}.1000.40^3 \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = 2,67 \text{ (mm)} \\ P = 0,89 \text{ (N)} \end{array} \right.$$

2- A tensão máxima a que o clipe está sujeito é igual a:

$$\sigma = \frac{P \cdot L}{d^2} \Leftrightarrow \sigma = \frac{0,89 \times 40}{2,67^2} \Leftrightarrow \sigma = 5 \text{ (MPa)}$$

Pode-se confirmar estes valores através da equação de Hooke, tendo como referencia a deformação máxima permitida de 0,5% e o módulo de elasticidade obtido anteriormente, que tem por base o gráfico tensão vs deformação do polipropileno da figura 2.7.2. Assim:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Leftrightarrow \sigma = 1000 \times 0,005 \Leftrightarrow \sigma = 5 \text{ (MPa)}$$

3- Para determinar a tensão máxima ao fim de uma semana, podemos utilizar a figura 2.5.4 que representa a tensão ao longo do tempo. Como temos uma tensão de 5 (MPa), vamos utilizar a curva correspondente a 0,5% de deformação e uma tensão de 8 (MPa) como referência. Sendo uma semana correspondente a  $604800 \approx 1 \times 10^6$  (s) podemos determinar essa tensão como se verifica na figura 2.5.4. O valor obtido é de aproximadamente 3,5 (MPa).

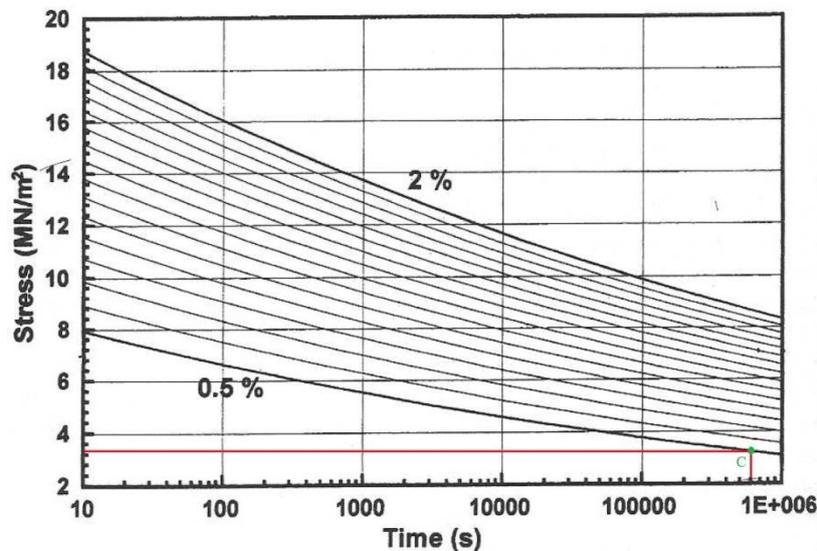


Figura 2.5.4 – Curvas de tensão/tempo do polipropileno;

4- Após o desenvolvimento das equações verifica-se que a espessura é apenas função do comprimento. Assim, conclui-se que a utilização de materiais diferentes não influencia esta dimensão. Verifica-se também que a carga a que o clipe está sujeito varia consoante o material utilizado, uma vez que entra na equação o módulo de elasticidade.

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{3 \cdot E \cdot d^3}{L^3} \\ P = \frac{0,005 \cdot E \cdot d^2}{L} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} d = \frac{L^2}{600} \\ P = \frac{0,005 \cdot E \cdot L^3}{600^2} \end{array} \right.$$