

AJUSTE DE MODELOS REOLÓGICOS MECÂNICOS NO CREEP DE POLIPROPILENO, POLIESTIRENO E POLICARBONATO: COMPARAÇÃO COM O MEF

Herbert M. Gomes* e Tiago Marchese

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Sarmento Leite, 425, sala 202, 2º Andar, 90070-150. Porto Alegre, Brazil. Correo electrónico: herbert@mecanica.ufrgs.br

Recibido: Noviembre 2012; Aceptado: Enero 2013

RESUMO

O comportamento mecânico de polímeros tem recebido bastante destaque devido à importância que estes materiais vêm merecendo ultimamente, sendo utilizado em condições e em funções onde materiais metálicos historicamente eram utilizados. Em função disto, estes materiais poliméricos em certas circunstâncias apresentam problemas decorrentes na maior parte das vezes pela falta de conhecimento prévio do seu comportamento ou pelo seu incorreto emprego ou especificação. Dentre os comportamentos de interesse destes materiais, o de longa duração é o que é aqui focado. Este trabalho traz um estudo sobre o ajuste de modelos reológicos para representar a fluência aplicada a hélices injetadas em poliestireno (PS), policarbonato (PC) e polipropileno (PP). O objetivo é avaliar esta fluência através de ensaios experimentais seguindo-se recomendações e procedimentos de Normas ASTM D-2990, os quais servem de parâmetros para alimentar e calibrar um modelo constitutivo de *Kelvin-Voigt* de 3 parâmetros (também chamado de modelo *Zener*). Este modelo fornece uma maneira de tratar e simular comportamentos de fluência e relaxação. Os ensaios experimentais em relaxação são utilizados para calibrar o modelo reológico, já os ensaios de fluência são utilizados para posteriormente comparar os resultados numéricos com valores obidos experimentalmente. Com os resultados obtidos do modelo reológico calibrado obtém-se valores para módulos de *Young* ao longo do tempo e assim poder avaliar com estes materiais, outras condições de carregamento e vinculação ao longo do tempo, com auxílio do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Palavras chave: Fluência, Creep, Relaxação, Hélices, Polímeros.

ABSTRACT

The mechanical behaviour of polymeric materials have received an special attention due to the importance of such materials which are used on conditions and functions where metallic ones were historically used. Thus, these polymeric materials, on certain occasions, may present fail, sometimes due to the lack in knowledge on its mechanical behaviour and properties or due to wrong use and specification. Among several behaviours, in this paper, the long term behaviour, generically called Creep, is focused. This work brings a study on rheological model fit in injected indoor propellers fans with polystyrene (PS), polycarbonate (PC) and polypropylene (PP). The goal is to evaluate creep through experimental tests following recommendations and procedures indicated by Standards (ASTM D-2990). The experimental results are used to feed and calibrate a *Kelvin-Voigt* 3 parameter model. This model provides the mechanical behaviour for creep and relaxation evaluation. The experimental results for relaxation tests are used to calibrate the simple rheological model, as the creep tests are used to further examine whether the result would be closer to numerical ones. Together with the obtained experimental results and the aid of the calibrated rheological model, the long term behaviour of the *Young Modulus* may be used with a Finite Element Method (FEM) framework to predict long term behaviour in other boundary conditions and loads.

Keywords: Creep, Long Term Deformation, Relaxation, Propeller, Polymers.

1. INTRODUÇÃO

Tem sido relatado que materiais poliméricos usados como peças mecânicas podem apresentar após um longo período de utilização, dentre outros problemas relacionados à degradação dos mesmos, problemas relacionados à deformação permanente. Isto, por exemplo, tem sido observado

sistematicamente em das pás de hélices de ventiladores que causam, por consequência, a perda de rendimento ou, neste caso geram o contato das pás com as grades de proteção, inutilizando o equipamento. Este problema tem sido detectado em hélices feitas em polímeros com projetos geométricos baseados em hélices de aço.

Em certo projeto industrial, hélices que apresentam este problema geralmente são sempre as injetadas em polipropileno (PP), no entanto, as injetadas em policarbonato (PC) que é um material mais rígido e com maior tensão de escoamento não apresentam o problema. Acredita-se que este fenômeno trata-se de fluência em virtude de ambos saírem de fábrica em perfeito funcionamento vindo a apresentar o problemas sempre após um longo período de uso constante.

Em virtude do PP ser um material não recomendável neste tipo de projeto, devido às suas características mecânicas, terse-ia que utilizar o PC que é um material de desempenho mecânico superior, entretanto comercialmente mais caro. Neste caso, a indústria buscou um terceiro material intermediário, cujo custo fosse próximo ao do PP e com rigidez próxima ao do PC para se análises de fluência. Com base nisto optou-se por utilizar como terceiro material o poliestireno (PS).

Outro objetivo deste trabalho também é o de encontrar uma maneira de dimensionar esta deformação no material *a priori* para que seja considerado na injeção destas hélices num ensaio prático de fluência. Neste trabalho, fez-se o ajuste do modelo de *Kelvin-Voigt* de três parâmetros para os ensaios de Relaxação experimentais e utilizou-se o mesmo modelo, calibrado, para fazerem-se estimativas de comportamento em ensaios de *Creep* das hélices de ventiladores. Portanto, a utilização de um módulo de elasticidade reduzido é aplicável neste caso sem problemas teóricos de utilização com esta abordagem.

1.1. Breve revisão bibliográfica. Os materiais poliméricos exibem um comportamento dependente do tempo. As tensões e deformações induzidas quando a carga é aplicada são funções do tempo. De uma forma genérica, este comportamento pode ser explicado como uma superfície tridimensional. As relações de tensões-deformações-tempo, ou seja, as leis constitutivas, podem ser determinadas através de ensaios de longa duração em corpos de prova sob (a) tensão constante (medindo-se as deformações lentas – Creep) ou (b) sob deformação constante (medindo-se a perda de tensões ao longo do tempo – Relaxação). Pode-se também construir curvas isócronas (intervalos de tempo constantes) através do corte desta superfície tridimensional a intervalos de tempos constantes como mostrados na Figura 1.

Quando um material plástico/polimérico é sujeito a uma carga constante, ele deforma-se continuamente (Figura 2). As deformações iniciais podem ser aproximadamente pelo módulo de Elasticidade do material. O material continuará a deformar-se vagarosamente com o tempo até que haja ruptura brusca ou que o escoamento do material cause a falha. O estágio primário é

caracterizado pela região do gráfico onde a taxa de deformação lenta decai rapidamente com o tempo. Então ela atinge um regime estacionário no qual é chamado de estágio secundário que é seguido por um rápido aumento (estágio terciário) e em seguida a ruptura do corpo de prova.

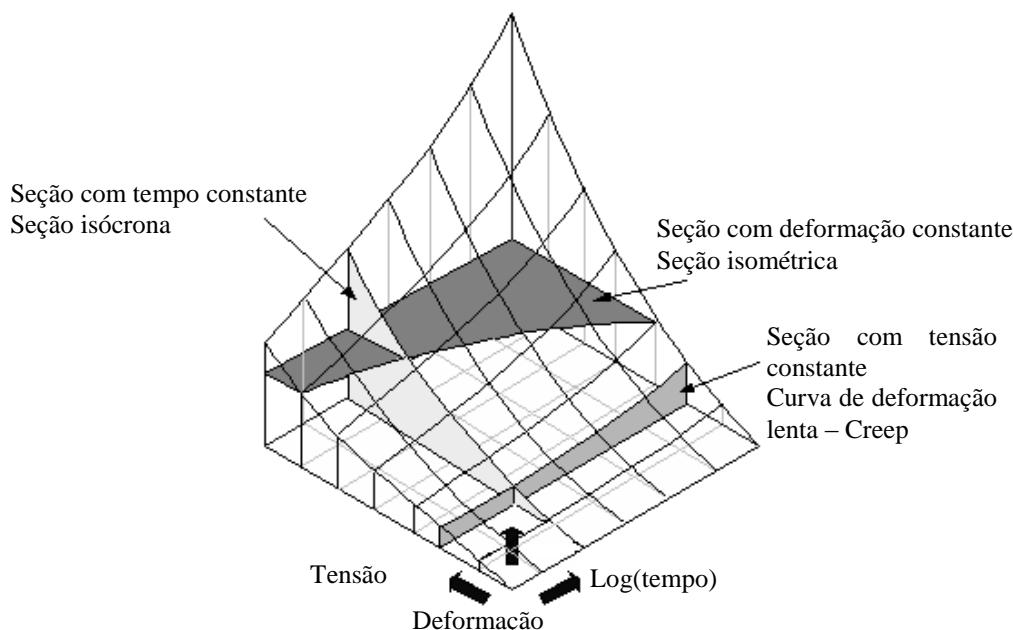


Figura 1. Gráfico de Tensão x deformação x tempo constantes.

Este fenômeno de deformação sob carga com o tempo é chamado de deformação lenta. Obviamente, esta é uma curva idealizada. Alguns materiais não apresentam o estágio secundário, enquanto o estágio terciário apenas ocorre a altas tensões e para materiais dúcteis. Toda a deformação lenta em plásticos ocorre até certo limite. O nível de deformação lenta depende de diversos fatores, tais como o tipo de plástico, magnitude da carga, temperatura e tempo. O método de teste padrão para a caracterização de deformações lentas é o ASTM D 2990-95. Neste procedimento de teste, as mudanças dimensionais que ocorrem durante o tempo sob carga estática constante são medidas.

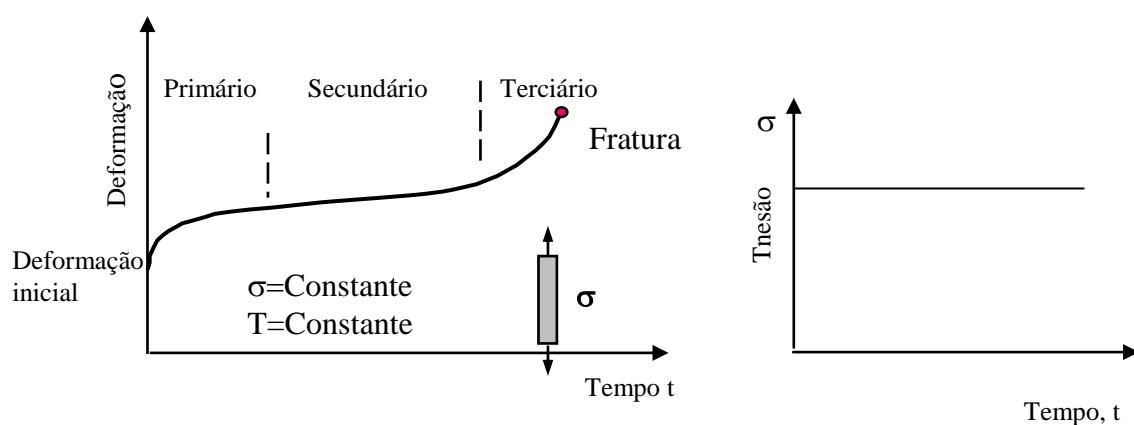


Figura 2. Curva de Deformação Lenta para plásticos sob carga constante aplicada.

Se a carga aplicada é liberada antes que a ruptura por deformação lenta ocorra, uma imediata recuperarão elástica igual a deformação elástica, seguido por um período de lenta recuperação é observado (Figura 3). O material na maioria dos casos não recupera a sua forma original e deformações permanentes restam. A magnitude das deformações permanentes depende da extensão do tempo, magnitude da tensão aplicada e da temperatura.

A ruptura por deformação lenta é basicamente similar a um teste de deformação lenta com a exceção de que o teste é continuado até que o material falhe. Uma vez que cargas mais altas são usadas, as taxas de deformação lenta são maiores e o material falha num tempo menor (usualmente terminado em 1.000 h).

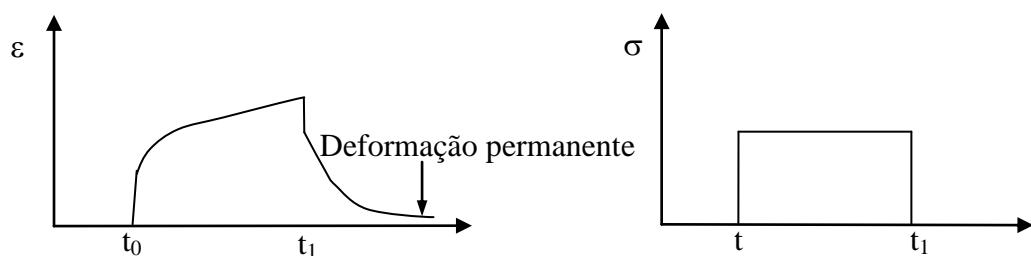


Figura 3. Curva de Deformação Lenta com recuperação. Uma tensão constante é aplicada em t_0 e removida em t_1 .

Este teste é útil em estabelecer limites seguros dentro dos quais, o teste de deformação lenta pode ser conduzido. A informação básica obtida de um teste de ruptura por deformação lenta é o tempo requerido para a falha sob aquela tensão. Baseado neste dado, uma tensão segura pode ser determinada abaixo da qual é seguro operar, dado o tempo requerido até o final da aplicação. A construção das curvas de envelope de ruptura por deformação lenta são mostradas na Figura 4. O teste é conduzido sob tensão constante e os pontos que definem o início do estágio terciário são conectados para formar os envelopes da curva de ruptura por deformação lenta.

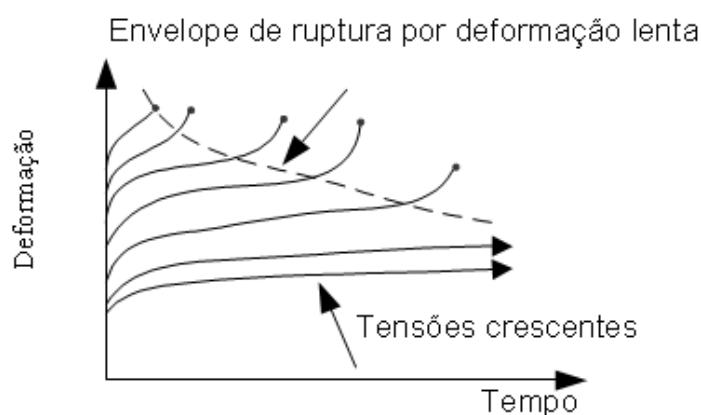


Figura 4. Envelope de ruptura por deformação lenta.

A relaxação das tensões é definida como uma gradual diminuição nas tensões com o tempo

sob deformação constante. Este comportamento de polímeros é estudado aplicando uma deformação constante e medindo as tensões necessárias para manter aquela deformação como uma função do tempo. Este comportamento pode ser melhor visualizado na Figura 5.

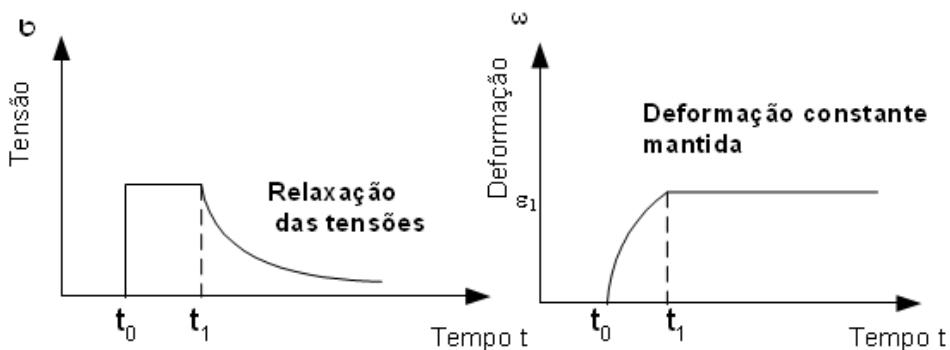


Figura 5. Relaxação de tensões em polímeros.

1.2. O projeto com polímeros. O projeto com plástico pode ser dividido em duas categorias, o projeto para resistência e o projeto para rigidez. A resistência de um componente é limitada por uma tensão de escoamento e uma tensão de ruptura do material dos quais o material é feito. Como mostrado na Figura 6, uma curva envelope de ruptura por deformação lenta pode ser obtido de um teste de ruptura por deformação lenta. Para um tempo de vida esperado, a máxima tensão permitida (σ_4) pode ser adotada de uma curva de envelope de ruptura por deformação lenta. O projeto para rigidez com as curvas de deformação lenta segue estabelecendo a máxima deformação aceitável ε_{\max} , portanto estabelecendo uma linha horizontal no diagrama de deformação lenta correspondente. O tempo de vida esperado t_L da parte é também determinada na máxima tensão permitida e é encontrada na curva de deformação lenta na intersecção destas duas curvas.

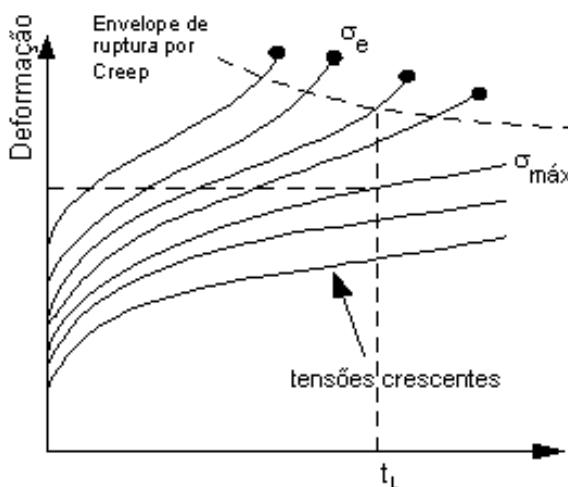


Figura 6. Critério de projeto pelas curvas de deformação lenta (Adaptado de Gravelle [4]).

Como mostrado na Figura 6, muitas combinações de σ e tempo levarão a esta máxima deformação. Para um tempo de vida desejado de t_L , entretanto, há um nível máximo σ_L o qual satisfaz a máxima deformação. A seleção do tipo de projeto depende da aplicação em específico. Usualmente, deformações ou dimensões requeridas são mais críticas e o projeto pela rigidez é favorecida neste caso. Se a precisão em dimensão do componente sob discussão não é tão importante comparada à resistência, o projeto para resistência é então usado. Para estruturas complicadas, ambos os casos podem ser utilizados como critério de projeto para assegurar o comportamento de material adequado durante a vida de serviço do mesmo.

1.3. Princípio da superposição. Há dois princípios de superposição, os quais são importantes em predizer o comportamento de creep de materiais plásticos sob várias condições de teste. O primeiro destes é o *Princípio da Superposição de Boltzmann*, o qual descreve a resposta do material a diferentes histórias de carregamento. O segundo deles é o *Princípio da Superposição do Tempo-Temperatura* ou a equação de WLF, a qual descreve as equivalências de tempo e temperatura. O princípio da superposição de Boltzmann afirma que a resposta do material a um dado carregamento é independente da resposta do material à qualquer outra carga que já esteja atuando no material. A deformação de um corpo de prova é diretamente proporcional às tensões aplicadas, quando todas as deformações são comparadas a tempos equivalentes. Isto é somente válido na região viscoelástica linear. Para o caso de creep, a deformação total pode ser expressa como:

$$\varepsilon(t) = D(t - \tau_1)\sigma_1 + D(t - \tau_2)(\sigma_2 - \sigma_1) + \dots + D(t - \tau_i)(\sigma_i - \sigma_{i-1}) \quad (1)$$

ou

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t D(t - \tau)d\sigma(\tau) \quad (2)$$

onde $D(t)=1/E(t)$ é a função de compliância, a qual é uma característica do polímero a uma dada temperatura e tensão inicial. A Figura 7 mostra a curva de creep para o Princípio de Superposição de Boltzmann.

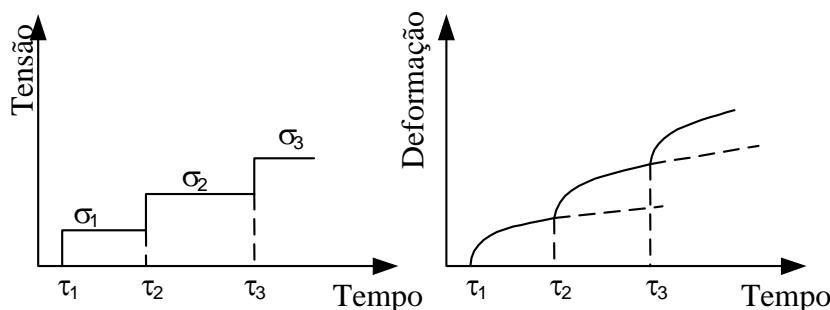


Figura 7. Princípio da Superposição de Boltzmann.

No tempo τ_1 , a tensão σ_1 é aplicada e a deformação induzida pode ser dada por:

$$\varepsilon_1(t) = \sigma_1 D(t) \quad (3)$$

De acordo com a viscoelasticidade linear, a compliância $D(t)$ é independente da tensão, isto é, $D(t)$ é o mesmo para todas as tensões para um tempo em particular. Se um incremento de tensões $\sigma_2 - \sigma_1$ é aplicado no tempo τ_2 então o incremento de deformação devido ao incremento de tensão $\sigma_2 - \sigma_1$ é:

$$\varepsilon_2(t) = D(t - \tau_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \quad (4)$$

Da mesma forma, o incremento de deformação devido à $\sigma_3 - \sigma_2$ pode ser dado por:

$$\varepsilon_3(t) = D(t - \tau_3)(\sigma_3 - \sigma_2) \quad (5)$$

Deformações adicionais induzidas por incrementos de tensões, os quais podem ser positivos ou negativos, são adicionados para resultarem na equação (4) ou (5). O princípio da Superposição do tempo-Temperatura WLF descreve a equivalência de tempo e temperatura. Esta superposição é usada para descrever o comportamento dependente da temperatura na relaxação da tensão.

1.4. Modelos reológicos. De acordo com Lubline r [6] e Creus [1] nos modelos reológicos, molas e amortecedores são usados para simular as componentes elásticas e viscoelásticas para a resposta a tensões e deformações. As molas obedecem a uma relação de tensão deformação do tipo linear tanto para tensões quanto para tensões normais quanto para tensões de corte, conforme podemos ver na Equação (6), onde σ é a tensão; E é o módulo de elasticidade; ε é a deformação; τ é a tensão de cisalhamento; G é o módulo de elasticidade à torção e γ é a distorção gular.

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{e} \quad \tau = G\gamma \quad (6)$$

Os amortecedores (componentes responsáveis pela resposta visco elástica) obedecem a uma relação para tensões normais e de corte que estão apresentadas nas Equação (7), onde η e μ são os coeficientes de amortecimento longitudinal e angular.

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \quad \text{e} \quad \tau = \mu \dot{\gamma} \quad (7)$$

Modelos simples utilizando uma combinação de mola e de amortecedores não correspondem diretamente a estruturas cristalinas ou moleculares de materiais, mas eles ajudam a entender como os materiais irão responder diretamente a variações de tensão e deformação. Em geral quanto mais complexos os modelos, maior o número de constantes experimentais a serem determinadas é necessário, entretanto melhores são as aproximações do ajuste para o experimento. Abaixo está

descrito o modelo utilizado nas análises, que é o de *Kelvin–Voigt* de 3 parâmetros. O modelo de *Kelvin–Voigt* de 3 parâmetros é composto por uma mola em paralelo com um modelo de *Maxwell*, como ilustrado na Figura 8.

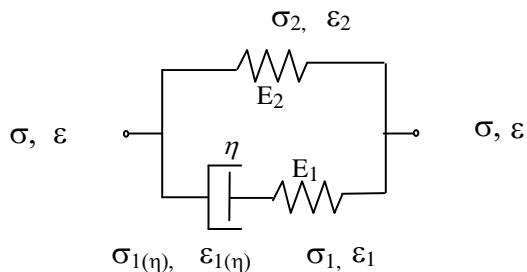


Figura 8. Modelo de *Kelvin–Voigt* de 3 Parâmetros.

Ele pode simular bem o comportamento de polímeros tanto em relaxação quanto em deformação lenta (*Creep*). Avaliando as equações de compatibilidade e de equilíbrio chega-se à equação diferencial para o modelo de *Kelvin–Voigt* de 3 parâmetros como indicado na equação (8).

$$E_1\sigma + \eta \frac{d\sigma}{dt} = E_1 E_2 \varepsilon + (E_1 + E_2)\eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

Para a aplicação de uma deformação constante de ε_0 aplicada repentinamente, resolvendo a equação do modelo para o tempo, o histórico de deformações para este caso será o descrito na Equação (9):

$$\sigma(t) = (E_2 + E_1 e^{-\frac{E_1 t}{\eta}}) \varepsilon_0 \quad (9)$$

Um modelo mais genérico pode ser feito utilizando–se de uma série de elementos *Maxwell*, que é uma mola e um amortecedor em série, com uma única mola em paralelo a todo o sistema, sendo este sistema robusto o suficiente para capturar comportamentos bastante complexos. Sendo E_0 o módulo da mola em paralelo e E_1, E_2, \dots, E_n os módulos das n molas dos elementos *Maxwell* em série e $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ as viscosidades destes elementos, tem–se de uma forma genérica descrita na Equação (10):

$$\sigma(t) = (E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}}) \varepsilon_0 \quad (10)$$

1.5. Módulo de elasticidade reduzido. Uma solução para problemas de viscoelasticidade pode ser obtida através de uma análise elástica com um Módulo de elasticidade reduzido ou efetivo.

Este módulo, em geral, é uma função do tempo e idade do carregamento, com um valor relativamente menor que o módulo de elasticidade real instantâneo de modo a poder permitir um aumento na deformação que leva em conta os efeitos de *Creep*. Para o caso de um ensaio de *Creep*, ou seja, à tensão constante, o Módulo de Elasticidade reduzido será exatamente o valor da relação entre a tensão aplicada (constante) dividido pela deformação no tempo dada pelo modelo reológico utilizado. Este resultado é exato por se tratar de uma tensão constante ao longo do tempo. Entretanto o inverso não é verdadeiro.

No caso de um ensaio de Relaxação, aplicação de deformação constante, os valores iniciais dos Módulos de Elasticidade em $t = 0$ e em $t = \infty$ coincidirão com os valores correspondentes às tensões dadas pelo modelo reológico dividido pela deformação imposta (Módulo de Elasticidade Instantâneo e Módulo de Elasticidade Assintótico respectivamente). Para tempos intermediários, isto não será verdadeiro, uma vez que o módulo reduzido será dado por uma inversão de uma equação integral (*Creus*, 1986). Felizmente este erro não é tão grande e a aproximação pode ser útil para cálculos preliminares [*sic*].

1.6. Dados retirados de relatos do fabricante. A deformação plástica é muito pequena, praticamente desprezível, pois com o passar do tempo a hélice volta a posição inicial e as tensões de trabalho são bem inferiores as do escoamento dos materiais. Por isso concluímos que há um retorno praticamente viscoelástico, comprovado posteriormente nos testes. Analisando as hélices que apresentaram reclamações do usuário, se chega à conclusão que todos eram ventiladores que ficavam muitas horas ligado sem interrupções. As hélices foram injetadas em diferentes materiais (PP, PC e PS), mas com a mesma matriz de injeção, por isso elas devem apresentar as geometrias minimamente diferentes em virtude da diferença de contração dos materiais na cura.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.2. Dimensões dos corpos de prova utilizados. Para os ensaios realizados as dimensões dos corpos de prova utilizados são as indicadas abaixo, para corpo de prova de seção retangular seguindo-se recomendações da NBR 6152 [2]. Foram os seguinte os valores destas dimensões: $e = 1,2\text{ mm}$, $b = 12,5\text{ mm}$, $S_0 = 14,4\text{ mm}^2$, $L_0 = 22\text{ mm}$, $L_c = 60\text{ mm}$, $R = 20\text{ mm}$, $L_n = 20\text{ mm}$, $L_t = L_c + 2R + 2$, $L_n = 100\text{ mm}$. Com três hélices, cada uma injetada em um material diferente, foram realizados os testes. Os dados mecânicos dos materiais que foram utilizados foram obtidos com o fabricante dos mesmos através de seus sites na internet. O fabricante do poliestireno 870/E é a empresa *Innova* [5], já o PC *Durolon* é de fabricação da empresa *Policarbonatos do Brasil* [8] e o polipropileno H-105 é produzido pela *Braskem* [3].

As hélices foram fixadas em uma bancada e na ponta da pá fora colocado uma carga de 7, 6;

5; 3N. Todos os ensaios foram realizados com a carga sempre aplicada no mesmo ponto e da mesma forma, na extremidade de uma das hélices. As hélices foram furadas na ponta de cada pá e neste furo era preso um gancho com a carga de teste que iria fazer com que as pás fluíssem (Figura 18). As hélices foram prensadas no seu centro com um uma chapa de forma que foi mantida fixa na mesa com o uso de sargentos, pelo seu anel central como engastada. Na mesa se criaram pontos de referência para as medidas durante o período de dias de testes.

2. RESULTADOS

3.1. Ensaio de fluênci(a) (ensaios sob tensão mecânica constante). Nas Figuras 9, 10 e 11 temos graficados os dados do ensaio de fluênci(a) (ensaios sob tensão mecânica constante). Neste ensaio, as hélices foram submetidas a um carregamento de 5 N, a uma temperatura de 24,5°C durante 6 dias. As medidas do deslocamento das três hélices durante este primeiro ensaio estão representadas na Figura 9 na qual pode-se notar que o PP flui muito mais que o PS e o PC.

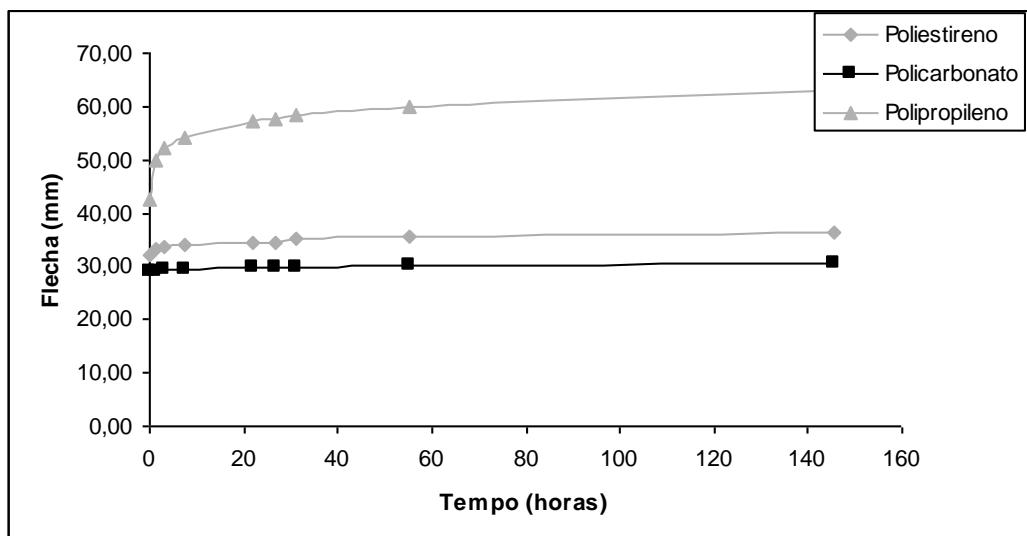


Figura 9. Deslocamentos durante o ensaio de 5N.

No segundo ensaio, agora com uma temperatura de 22°C e uma carga de 3N obtivemos resultados parecidos como indicado pela Figura 10.

E um terceiro ensaio, com carga de 7,6 N e com temperatura de 20°C obteve-se os deslocamentos da Figura 11 na qual notamos o comportamento semelhante ao dos outros ensaios anteriores.

Com base nos ensaios acima pode-se notar que o comportamento quanto a fluênci(a) do PS é muito parecido com o do PC e isso pode sugerir inicialmente substituir o PP por este material. Em um ensaio experimental realizado por um fabricante durante os testes aqui apresentados pode-se confirmar o fato acima comentado.

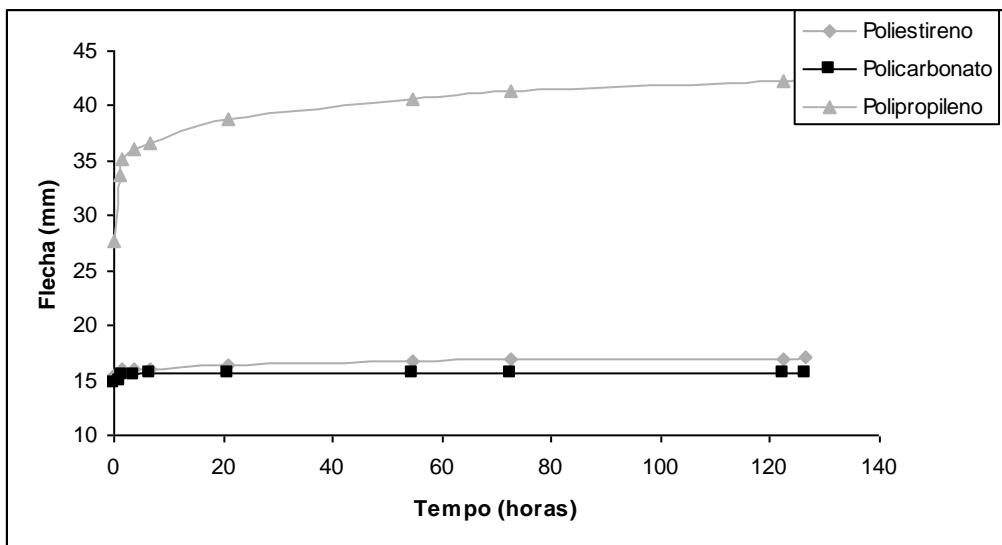


Figura 10. Deslocamentos durante o ensaio de 3N.

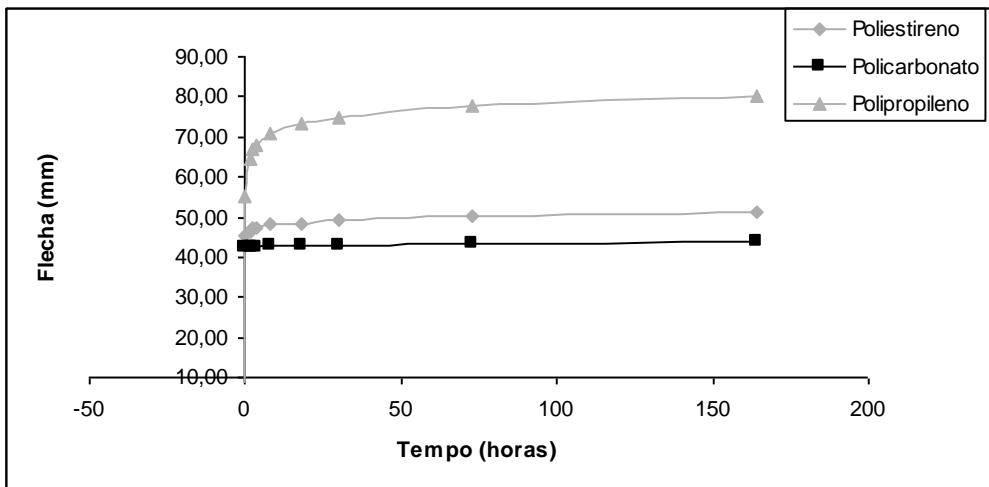


Figura 11. Deslocamentos durante o ensaio de 7,6 N.

3.1. Ensaio de relaxação (ensaio sob deformação mecânica constante). Para calibrar o modelo de *Kelvin–Voigt* foram feitos ensaios de relaxação (ensaios sob deformação constante). Para realizar este ensaio foram utilizados corpos de prova conforme descrito no item anterior. Estes corpos foram colocados em uma máquina de tração com cargas de 1.300 N para o PC, 410 N para o PS e 600 N para o PP, a fim de levar os três materiais a terem uma deformação incial igual e constante ao longo do tempo e depois relaxarem (diminuirem a tensão mecânica ao longo do tempo). Pode-se visualizar melhor o aparador do ensaio na Figura 12.

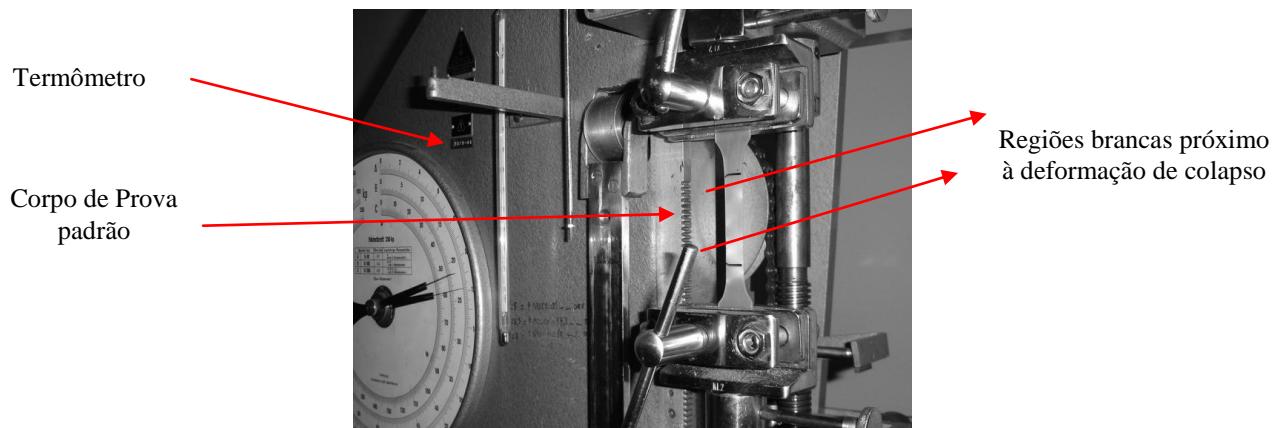


Figura 12. Descrição do ensaio de relaxação.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina do tipo ZMGI 250 da TIW *Hauenstein*, o termômetro utilizado foi um ARBA com resolução de 0,5°C e limites de -10 a 100°C. Nas Tabelas 1 a 2, temos os dados do corpo de prova utilizado no PC e o decaimento da tensão ao longo do tempo.

Tabela 1. Dados do corpo de prova do policarbonato (PC).

<i>Policarbonato (PC)</i>		
T	24,5	°C
L ₀	95,1	mm
L	98,4	mm
D _L	3,3	mm
E	0,03	mm/mm
Área	25,00	mm ²
B	12,5	mm
t	2	mm

Tabela 2. Decaimento da tensão ao longo do tempo para policarbonato (PC).

<i>Intervalo/hora</i>	<i>Medida/N</i>	<i>Tensão/MPa</i>
0,00	13,00	50,96
0,02	12,50	49,00
0,05	12,30	48,22
1,00	11,60	45,47
3,00	11,35	44,49
7,33	11,10	43,51
31,00	10,70	41,94
46,67	10,65	41,75
56,00	10,50	41,16

Nas Tabelas 3 e 4 temos os dados do corpo de prova para o ensaio do PP assim como decaimento das tensões ao longo do tempo.

Tabela 3. Dados do corpo de prova de polipropileno (PP).

Polipropileno (PP)		
T	24,5	°C
L0	101,55	mm
L	108	mm
DL	6,45	mm
E	0,0635	mm/mm
Área	25,42	mm ²
B	12,4	mm
T	2,05	mm

Tabela 4. Decréscimo de tensões do polipropileno (PP).

Intervalo (hora)	Medida (N)	Tensão (MPa)
0,00	6,00	23,13
0,80	5,00	19,28
2,17	4,80	18,51
3,00	4,75	18,31
7,58	4,45	17,16
24,25	4,20	16,19
32,25	4,00	15,69
96,78	3,85	14,84
104,25	3,80	14,65

Nas Tabelas 5 e 6 temos os dados do corpo de prova do PS assim como o decaimento das tensões mecânicas ao longo do tempo:

Tabela 5. Dados do corpo de prova de poliestireno (PS).

Poliestireno		
T	22,50	°C
L0	100,4	mm
L	107,95	mm
DL	7,55	mm
e	0,075	mm/mm
Área	25,00	mm ²
b	12,50	mm
t	2,00	mm

Tabela 6. Histórico tensões experimentais das medições no poliestireno (PS).

Intervalo/hora	Medida/N	Tensão/MPa
0,00	4,00	16,07
1,00	3,20	12,94
2,58	2,90	12,15
4,08	2,30	11,76
7,75	2,20	11,56
26,42	2,15	10,98
33,42	2,00	10,78
101,25	1,95	10,39
105,42	1,90	10,29

Com estes dados acima é possível ajustar o modelo de *Kelvin–Voigt* para simular o deslocamento ao longo do tempo em fluência.

3.2. Modelo Kelvin–Voigt de 3 parâmetros. O tempo t em horas das medições e o histórico de tensões (σ_e) experimentais para poliestireno (PS) nos respectivos tempos, por exemplo, podem ser vistos na Tabela 6. A Deformação Constante inicial fica definida como $\varepsilon_0 = 0,00751992$. O tempo inicial fica definido como $t(i) = t_i$. A tensão ao longo do tempo experimental fica definida por $\sigma_e(i) = \sigma_{ei}$. A solução geral das tensões para deformação inicial constante aplicada em ε_0 está definida na Equação (11) onde E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade das molas:

$$\sigma(t, E_1, E_2, \eta, \varepsilon_0) = [E_2 + E_1 \cdot e^{-(E_1/\eta) \cdot t}] \quad (11)$$

A definição da Função de Erro para ajuste dos parâmetros do Modelo está definida na Equação (12):

$$erro(E_1, E_2, \eta) = \sum_{i=1}^8 (\sigma(t(i), E_1, E_2, \eta, \varepsilon_0) - \sigma_e(i))^2 \quad (12)$$

Para minimização do erro para ajuste dos parâmetros do modelo proposto utilizou-se o método dos mínimos quadrados, o qual nos forneceu como resultado os parâmetros do modelo simples de *Kelvin Voigt* que melhor se ajusta aos resultados experimentais: $E_1 = 660,44 \text{ N/m}^2$, $E_2 = 1,442 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ e $\eta = 1,1131 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 \cdot \text{s}$. Com isso o erro quadrático final (somatório das diferenças ao quadrado das tensões em cada ponto medido experimental e o respectivo valor numérico) do modelo ajustado com os parâmetros encontrados anteriormente ficou em $1,747 \text{ N/m}^2$. A Figura 13 mostra as comparações entre as curvas experimentais e as preditas pelo modelo ajustado:

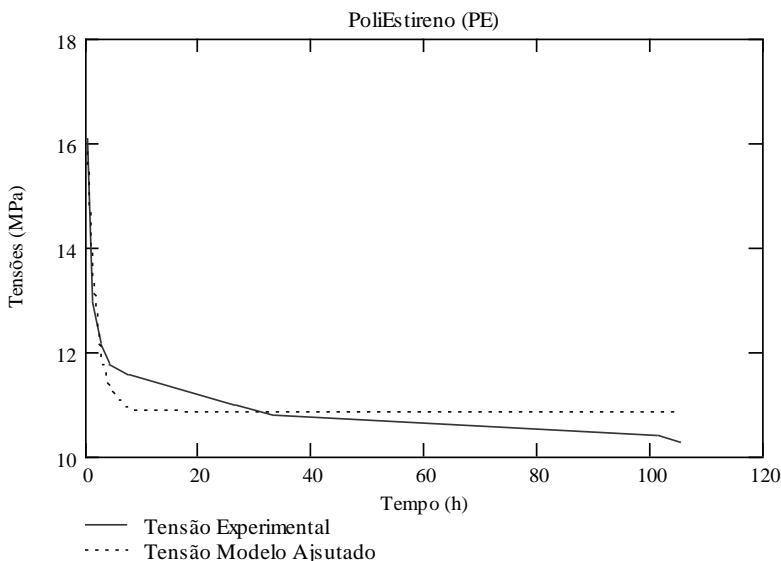


Figura 13. Comparações entre as curvas experimentais e as preditas pelo modelo ajustado (PE).

Com os dados acima podemos avaliar qual o módulo de Elasticidade Equivalente no tempo inicial $t = 0$ h, resultando em $E_{eq}(t = 0) = E_1 + E_2 = 1,102 \cdot 10^3$ N/m² valor este bem próximo daquele encontrado na literatura para este tipo de polímero e à esta temperatura [7].

Com a Equação (13) pode-se calcular a deformação no tempo:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(1/E_2 - E_1/(E_2 \cdot (E_1 + E_2)) \cdot e^{-E_1 \cdot E_2 / (\eta \cdot (E_2 + E_1))} \right)^t \quad (13)$$

Na Figura 14 indica o gráfico da variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo.

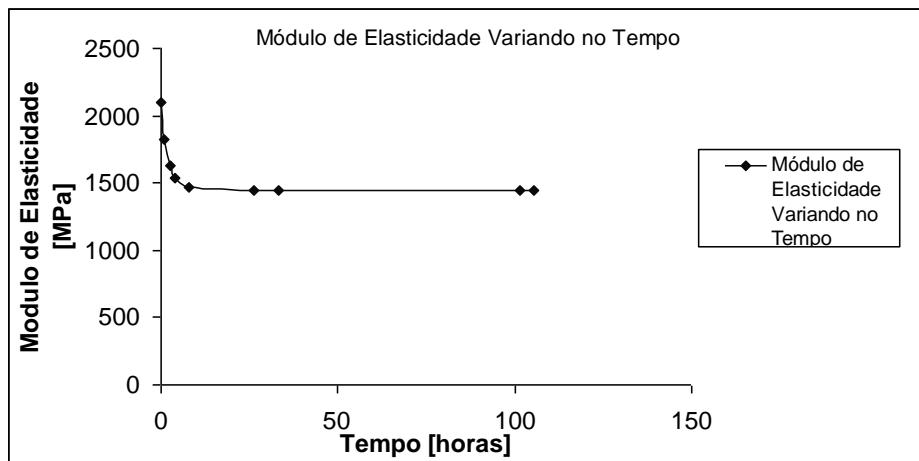


Figura 14. Variação do Módulo de Elasticidade no Tempo (PE).

3.3. Comparativo dos deslocamentos experimentais e teórico no ensaio de relaxação (Creep). Uma vez obtidos os parâmetros do modelo de *Kelvin–Voigt*, por ajuste das curvas do modelo reológico com os dados experimentais das curvas de Relaxação, passou-se para a validação

dos mesmos através da comparação com os ensaios anteriormente feitos de Fluência (sob tensão constante). Para isto, usa-se um modelo de elementos finitos das peças das hélices juntamente com um módulo de elasticidade variável no tempo dado pelo modelo de *Kelvin–Voigt*. Para isto, utilizou-se o software *Cosmos* [9] e a geometria 3D da hélice em questão. Os deslocamentos na ponta da hélice, nos mesmo ponto onde forma medidos experimentalmente e agora gerados por esta análise estão na Tabela 7.

Tabela 7. Deslocamento ao longo do tempo.

Tempo [h]	7,6 N	5 N	3 N
Deslocamentos [mm]			
0,00	37,28	24,39	14,60
1,00	42,92	28,01	16,81
2,58	48,29	31,52	18,91
4,08	51,06	33,33	20,00
7,75	53,6	34,99	20,99
26,41	54,39	35,42	21,25
33,41	54,39	35,42	21,25
105,41	54,39	35,42	21,25

Os resultados das análises experimentais seguem abaixo, na Tabela 8:

Tabela 8. Resultado das análises experimentais.

Carga	7,6 N	Carga	5 N	Carga	3 N
Tempo/ h	Deslocamento/mm	Tempo/h	Deslocamento/mm	Tempo/h	Deslocamento/mm
0,00	45	0,00	31,98	0,00	15,38
1,41	46	1,25	33,34	1,08	15,68
2,5	47,32	3,25	33,64	1,63	15,94
3,5	47,38	7,25	33,84	3,58	16,02
8	48,12	22,11	34,48	6,58	16,04
18,25	48,34	26,83	34,54	20,83	16,36
30,1	49,3	31,31	35,16	54,58	16,76
73,08	50,18	55,33	35,46	72,41	16,94
164,11	51,02	145,33	36,26	122,41	16,96
	—	—	—	126,58	17,03

Nos gráficos das Figuras 15, 16 e 17 pode-se ver a comparação da curva de ensaio numérico com a curva real obtida no ensaio experimental de Deformação Lenta.

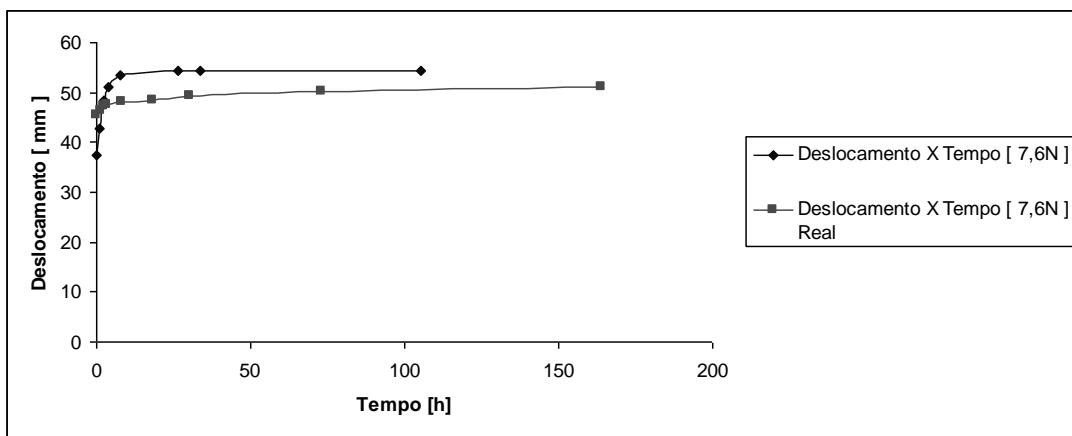


Figura 15. Comparação dos resultados do ensaio experimental e numérico para 7,6 N.

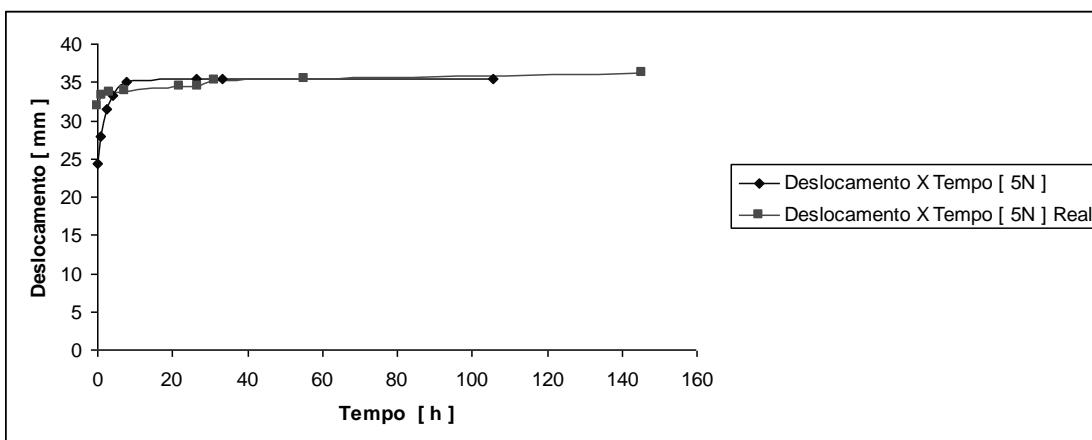


Figura 16. Comparação dos resultados do ensaio experimental e numérico para 5 N.

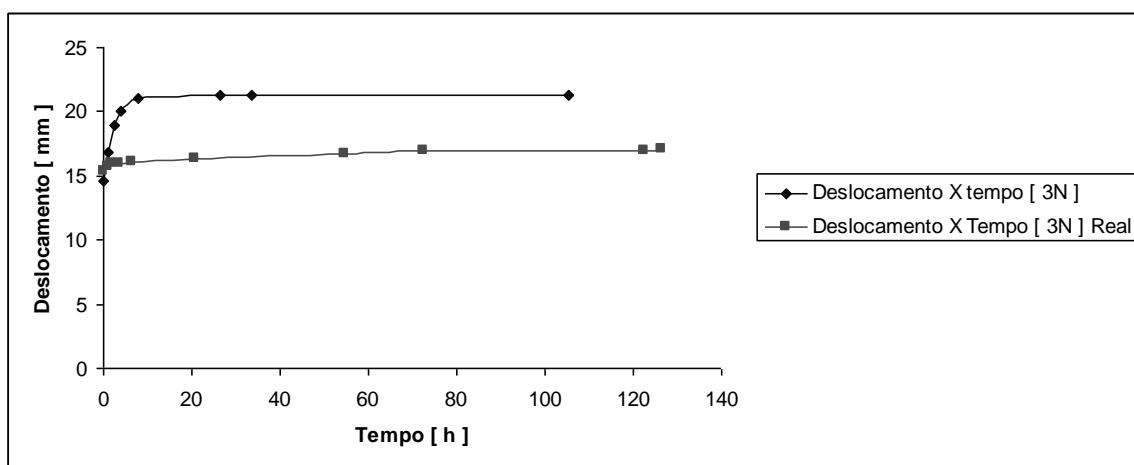


Figura 17. Comparação dos resultados do ensaio experimental e numérico para 3N.

Aplicando o módulo de elasticidade estabilizado para o PS de 1441 MPa na hélice e fazendo a análise com elementos finitos encontramos um deslocamento de aproximadamente 10mm, conforme Figura 18, sabendo que é necessário aproximadamente 18 mm para que haja colisão com a grade traseira, o modelo com PS ficou bem distante de atingir a grade de proteção do ventilador.

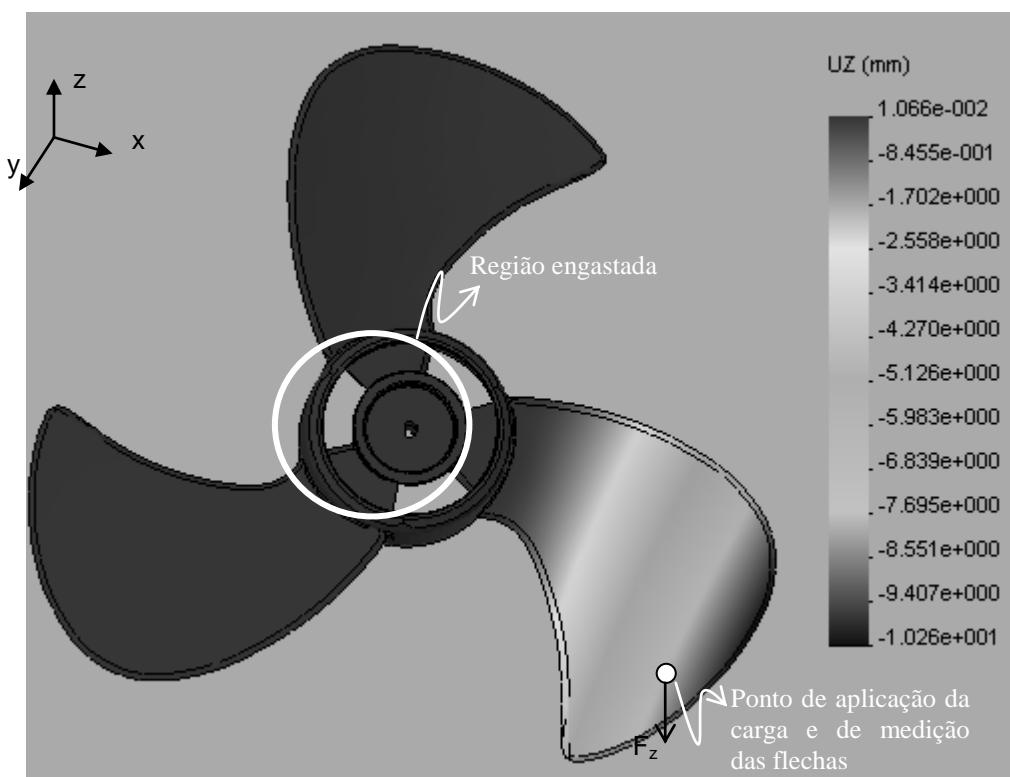


Figura 18. Deslocamentos com PS com $E = 1441$ Mpa.

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados acima obtidos, pode-se concluir que o material PS apresenta um comportamento satisfatório para esta utilização, visto que o material já apresentou um comportamento parecido com o PC nos ensaios experimentais e como o PC já era considerado apto para a aplicação nas hélices já era um bom indicativo de que o PS também seria. Nos ensaios numéricos também chega-se à conclusão de que o material atende aos requisitos de funcionamento, já que o deslocamento do mesmo com o módulo de elasticidade variando no tempo praticamente estabilizado em 105 horas, mais de quatro dias, ficou em aproximadamente 10 mm que é o necessário para alcançar uma condição sem problemas em enconstar na grade de proteção das hélices (que é de cerca de 18 mm). Isso mostra que é necessário um deslocamento ainda 1,8 vezes maior para que atinja o deslocamento crítico de funcionamento.

Vale ressaltar que o modelo empregado para fazerem-se estas aproximações foi o de visco elasticidade linear de forma que se alguma deformação plástica está ocorrendo nas hélices (deformação não recuperável mesmo após cessado o carregamento pelo mesmo período a que foi submetido), esta não estará sendo levada em conta. Talvez um modelo com dano (fadiga para levar em conta os ciclos de carga e descarga) ou mesmo um modelo com envelhecimento poderia justificar qualquer deformação residual observada na prática.

Agradecimentos. Os autores desejam agradecer ao *Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS* e ao CNPq e CAPES pelos auxílios presentes nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Creus GJ “Lectures Notes in Engineering: Viscoelasticity – Basic Theory and Applications to Concrete Structures”, Ed. Springer Verlag, 1987.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS, ABNT, “NBR – 6152 – Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente”, 2002.
- [3] BRASKEM “Empresa Brasileira de Químicos”, <<http://www.braskem.com.br>> (acessado em 20/10/2012).
- [4] Gravelle SR “Creep Analysis of a Thermoplastic Using Stress Relaxation Data”, TMS, *The Minerals, Metals & Materials Society Journal*, p. 151–159 , 1994.
- [5] INNOVA S.A. N2380.pdf, Ficha Técnica_Estireno.pdf, N1921.pdf, <<http://www.innova.ind.br/portal/site/PB-eInnova>>, (acessado em 17/08/2012).
- [6] Lubliner J “Plasticity Theory”, Ed. Maxwell Macmillan International Editions, 1996.
- [7] MATWEB, Searchable Database of Materials Properties, Searched Keywords: Polycarbonate, Molded; Polypropylene, Molded; Polystyrene, <<http://www.matweb.com/>>, (acessado em 10/09/2012).
- [8] POLICARBONATOS DO BRASIL S.A, <<http://www.policarbonatos.com.br>> (acessado em 04/09/2012).
- [9] SOLIWORKS/COSMOSWORKS “SolidWorks Corporation, Solidworks Office Premium”, Concord, Massachusetts, USA, *Reference Manual*, 2006.