



## **CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS PARA CONFEÇÃO DE ÓRTESES**

**Rodrigues, A V N**

Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Terapia Ocupacional, Av. Antônio Carlos, 6627 – Prédio da Reitoria – 6º andar – CEP. 31270-901 Belo Horizonte – MG, [avaladao@ufmg.br](mailto:avaladao@ufmg.br)

**Ávila, A F**

Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Compósitos – Av. Antonio Carlos, 6627 – CEP. 31270-901 Belo Horizonte – MG, [aavila@dedalus.lcc.ufmg.br](mailto:aavila@dedalus.lcc.ufmg.br)

**Faria, J F S**

Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Compósitos – Av. Antonio Carlos, 6627 – CEP. 31270-901, Belo Horizonte – MG [nico@campus.cce.ufmg.br](mailto:nico@campus.cce.ufmg.br)

**Resumo:** *Existem no mercado vários materiais poliméricos para aplicação na confecção de órteses. No entanto, as informações sobre o seu comportamento mecânico são muito escassas. A caracterização mecânica destes materiais tem como objetivo formar um banco de dados que permita ao terapeuta otimizar a utilização destes materiais e assim reduzir os custos sem que o paciente tenha algum tipo de prejuízo em sua recuperação. O trabalho em questão analisou o material EZEFORM® quanto a sua rigidez, tensão de escoamento e tensão de ruptura em função da temperatura e tempo de aquecimento para moldagem. Os resultados obtidos mostraram que existe uma temperatura de trabalho ótima em torno de 70° C e que, ao contrário do que se pensava, a condição ótima é obtida para um tempo de aquecimento de 45 segundos e não a 60 segundos. Observou-se também que o EZEFORM® sofre um “envelhecimento” à medida que vem sendo trabalhado/modelado. A função de envelhecimento foi então levantada baseada nos resultados e poderá ser bastante útil no projeto de utilização de órteses e no tratamento prolongado de pacientes.*

**Palavras-chave:** *compósitos de matriz polimérica, órteses, EZEFORM, caracterização dos materiais*

### **1. INTRODUÇÃO**

Para a indicação e confecção adequadas de órteses é fundamental que o terapeuta tenha conhecimento não só da anatomia, cinesiologia e biomecânica do corpo humano, como também das propriedades dos vários materiais disponíveis para uso (Breger-Lee, 1991).

O tipo de material utilizado para a confecção destes equipamentos tem evoluído significativamente no decorrer dos anos. Em 1940, os materiais utilizados eram a madeira, aço, alumínio e alguns termoplásticos de alta temperatura. O primeiro termoplástico de baixa temperatura, para confecção de órteses, Prenyl/Ortho Industries, foi disponibilizado em 1964. O Orthoplast da Johnson & Johnson foi posteriormente introduzido, seguido do Polyform, produzido pela Smith & Nephew Rolyan, e Aquaplast da WFR/Aquaplast Corporation. Atualmente, estes materiais (moldáveis quando aquecidos) são rotineiramente utilizados pelos terapeutas para a confecção de órteses e, diante da variedade de materiais existentes, deve-se levar em consideração as características de moldabilidade, durabilidade e

espessura para confeccionar o equipamento mais adequado à necessidade particular do cliente. No entanto, ainda pouco se conhece sobre suas propriedades (Breger-Lee, 1992; Lau, 1998).

O desempenho dos materiais termoplásticos de baixa temperatura é diretamente dependente de sua matriz de composição. Existem duas categorias básicas de termoplásticos de baixa temperatura: o grupo plástico, que tem como base o policaprolactono (PCL) e o grupo borracha, que tem como matriz o polyisoprene. Fazem parte do grupo plástico o Aquaplast, WFR/Aquaplast Corp., Orfit, North Coast Medical, Polyform, Smith & Nephew, Multiform, AliMed Inc., NCM Clinic, North Coast Medical, que apresentam uma variação na quantidade de PCL misturado com estabilizadores e modificadores (resinas, elastômeros) que têm um efeito na memória, rigidez moldabilidade e durabilidade. Já o Orthoplast da Johnson & Johnson e EZEFORM® fazem parte do grupo borracha (Breger-Lee, 1995).

A grande variedade de termoplásticos, alguns com propriedades básicas similares, outros com propriedades básicas diferentes, tem gerado um desafio para os terapeutas no momento de definirem o material mais adequado à tarefa proposta. A seleção adequada do material requer conhecimento das propriedades de elasticidade, memória, alongamento, encurtamento, moldabilidade, conformabilidade e tempo de execução, que até então, pouco se conhece.

O objetivo deste trabalho é fazer a caracterização mecânica do EZEFORM®, um dos materiais termoplásticos de baixa temperatura mais utilizados pelos terapeutas, de forma a possibilitar uma melhor adequação do material à necessidade específica do cliente. É importante observar que este material será tratado como um compósito de matriz polimérica como definido por Jones (1999).

## **2. METODOLOGIA**

O material escolhido para análise foi o EZEFORM®, pois seu uso é largamente difundido entre os terapeutas, pois, é de fácil manipulação, apresenta alto grau de resistência ao alongamento e excelente rigidez. Deve ser aquecido a uma temperatura de 170° F, isto é, aproximadamente 75° C e oferece de 4 a 6 minutos para trabalho antes que necessite ser re-aquecido.

Neste estudo, o EZEFORM® foi avaliado, utilizando o ensaio de tração segundo a ASTM D 3039/3039M, quanto ao seu módulo de Young (módulo de elasticidade), tensão de escoamento e tensão de ruptura em função do tempo e temperatura de aquecimento. Usualmente a norma ASTM D 638 é aquela utilizada para materiais poliméricos, mas como o objetivo da pesquisa é a utilização de placas planas poliméricas optou-se pela utilização da norma ASTM D 3039/D 3039/M – 95A (ASTM, 1995). Os corpos de provas propostos pela norma ASTM D 638 são cilíndricos e tal fato poderia interferir nos resultados. Os corpos de prova foram então confeccionados de acordo com a norma ASTM D 3039/3039 M – 95A (ASTM, 1995), isto é, largura de 25,0 mm, espessura de 3,3mm, comprimento de 250,0mm. Os detalhes dos corpos de prova são mostrados na Figura 1. O ensaio de tração foi realizado a uma velocidade de 20,00mm/min e utilizado um extensômetro e até 50% da carga de ruptura para a obtenção da deformação material. O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaios INSTRON 4238.

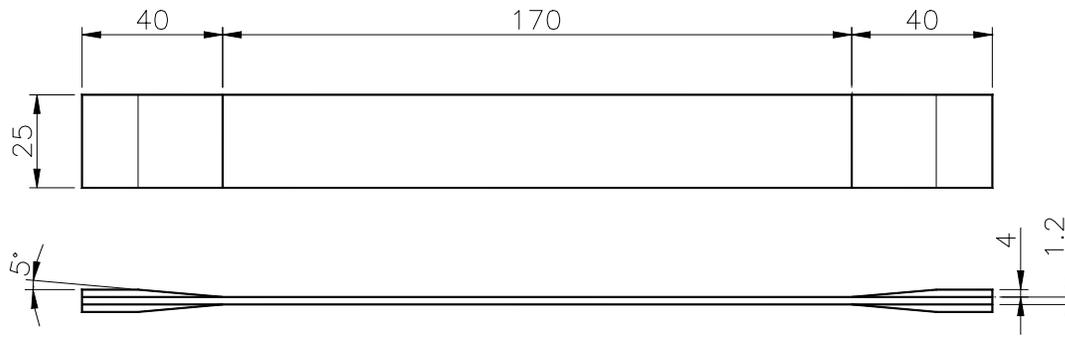


Figura 1: Corpos de prova segundo ASTM 3039/3039 M com as dimensões em mm.

As temperaturas e tempos aos quais os corpos de provas foram submetidos foram definidos com base nas observações realizadas durante o processo de confecção de órteses pelo terapeuta e informações especificadas no manual do fabricante do EZEFORM<sup>®</sup>. Estabeleceram-se as seguintes condições de tempo e temperatura:

1. Para um intervalo de tempo constante de 60 segundos, cada grupo de corpos de prova foi submetido a temperaturas de imersão de 60°C, 71,11°C e 82,22°C.
2. Para uma temperatura de imersão constante de 71,11°C, cada grupo dos corpos de prova foi submetido a um intervalo de tempo de 30, 45, 60, 75 e 90 segundos.

Para cada condição de tempo e temperatura foram confeccionados 5 (cinco) corpos de prova. Um grupo de 5 corpos de prova não foi submetido a qualquer tipo de tratamento térmico e utilizado como controle, totalizando um número de 40 corpos de prova.

Para o aquecimento dos corpos de prova foi utilizada uma panela elétrica (tipo “banho Maria”), procurando repetir as condições em que o terapeuta realiza a confecção das órteses. Utilizou-se o equipamento Termopar Salvterm 700K – Salcas com sensor tipo K, digital com erro de mais ou menos 0,1 (°C ou F) para controle das temperaturas e um cronômetro para controle do tempo de imersão.

A análise preliminar dos resultados foi realizada através da comparação das médias obtidas em cada parâmetro de análise (tensão de escoamento, tensão de ruptura, módulo de elasticidade) entre os corpos de prova submetidos a um tratamento térmico e aqueles mantidos à temperatura ambiente.

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Quando a temperatura de aquecimento do EZEFORM<sup>®</sup> se mantém constante (71,1°C), observa-se que com o aumento do tempo de imersão ocorre uma redução da tensão de ruptura, da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade. Tal fato é consequência do aumento da energia absorvida com o tempo, que faz com que a energia cinética entre as cadeias poliméricas cresça. Este aumento faz com que a mobilidade entre as moléculas aumente e com isto permitindo um rearranjo entre as ligações o que faz com que as propriedades mecânicas se reduzam em função de menor resistência encontrada pela fração cristalina destes polímeros.

A tensão de ruptura diminui a aproximadamente 40% da tensão obtida nos corpos de prova sem aquecimento, exceto quando o aquecimento ocorre durante 45 segundos, quando a tensão de ruptura apresenta-se em torno de 6,85 MPa (aproximadamente 70% da tensão do grupo controle). Observe que este fato é uma consequência do chamado efeito de máximo no qual a energia absorvida chega a um máximo e qualquer quantidade adicional faz com que ligações moleculares se rompam e não se refaçam. Isto faz com que haja uma degradação das propriedades mecânicas

Com relação à tensão de escoamento, observa-se que apesar de sua redução em função do tempo de aquecimento, quando o corpo de prova é aquecido por 45 e 75 segundos, esta tensão permanece próxima da tensão de escoamento obtida com o grupo controle. Há uma redução máxima da tensão de escoamento de aproximadamente 21% quando o EZEFORM<sup>®</sup> é aquecido por um período de 30 segundos, veja Figura (2)

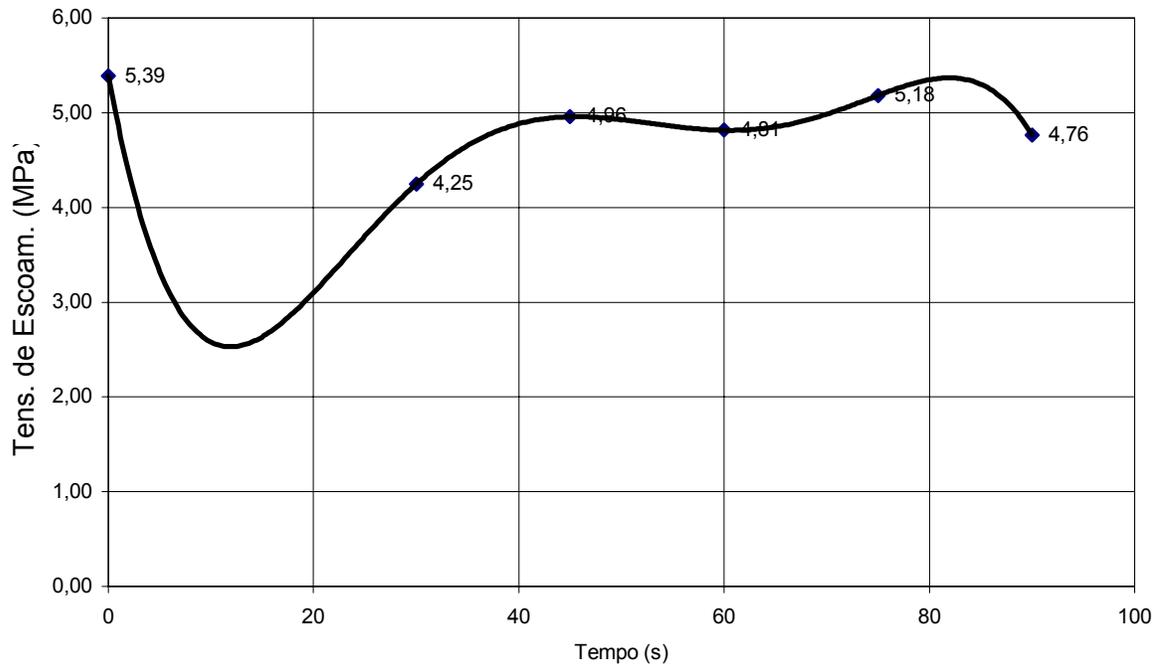


Figura 2: Tensão de escoamento versus temperatura

Quanto ao módulo de elasticidade, ponto de máximo, após o aquecimento, foi obtido quando o material foi aquecido por um período de 60 segundos. A partir do tempo de aquecimento de 75 segundos, o módulo de elasticidade reduz aproximadamente 21% com relação ao módulo obtido com o material sem aquecimento. A Tabela (1) mostra a variação da rigidez em função do tempo.

Tabela 1 – Variação do módulo de elasticidade em função do tempo de imersão.

Tempo (s)	30	45	60	75	90
Módulo de elasticidade (MPa)	647,19	673,33	710,23	564,55	551,33

Quando o tempo de imersão do EZEFORM<sup>®</sup> se mantém constante (60 segundos), observa-se que com o aumento da temperatura de aquecimento também ocorre uma redução da tensão de ruptura, da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade. Como já foi dito anteriormente, este fato é diretamente relacionado com a quantidade de energia absorvida pelo EZEFORM<sup>®</sup>.

Na temperatura de 71,11°C, considerada como temperatura ideal de trabalho pelo fabricante, ocorre a maior redução da tensão de ruptura, aproximadamente 35% menor que a tensão obtida com o material não aquecido. A temperatura ideal de trabalho parece ser 60°C, onde se observa a menor redução da tensão de ruptura (aproximadamente 18%). Tem-se a nítida impressão que neste caso o fabricante não levou em consideração o chamado efeito de máximo, que aqui será denominado como efeito de saturação. O material não mais consegue absorver mais energia, mas como a energia continua

crecendo ocorre uma sucessiva quebra das cadeias poliméricas sem que haja a formação de novas uniões entre as cadeias partidas. Isto faz com que as propriedades mecânicas sejam prejudicadas.

A tensão de escoamento obtida com os corpos de prova aquecidos nas temperaturas de 60° e 71,11°C, pouco diferem entre si, no entanto, se comparadas com o resultado obtido após os ensaios com os corpos de prova não aquecidos, está reduzida em aproximadamente 12%.

Com relação ao módulo de Young, à temperatura de 71,11°C, este parâmetro passa a ser superior ao encontrado nos corpos de prova sem aquecimento, o que reforça, mais uma vez, a indicação desta temperatura como ideal para trabalho. A Tabela (2) mostra a variação da rigidez como uma função da temperatura para um tempo fixado de 60 segundos.

Tabela 2 - Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura de imersão.

Temperatura (°C)	25	60	71.1	82.2
Módulo de Young (MPa)	709,35	670,87	710,23	692,87

O valor do módulo de elasticidade obtido na temperatura de 25° C, isto é sem aquecimento, é utilizado como parâmetro de controle. Pode-se observar que quando a temperatura aumenta a energia absorvida aumenta, o que sugere uma alta probabilidade de que ocorram novas reações químicas entre as cadeias poliméricas (rearranjo na cadeia molecular), tanto quanto mudanças na microestrutura (acomodação). Após o ponto ótimo de 71,1° C, apesar da energia continuar aumentando, há uma diminuição da rigidez. O aumento na quebra das cadeias moleculares e seu rearranjo em pequenas cadeias podem explicar este fenômeno.

Para que se possa formar uma opinião sobre o desempenho do EZEFORM® a resistência à fratura também deve ser avaliada. As Figuras (3) e (4) mostram a resistência à fratura em função da temperatura e do tempo. Analisando a Fig.(2) em conjunto com as Tabelas (1) e (2) é possível inferir que o tempo ótimo para trabalho não é 60 segundos como o fabricante sugere, mas 45 segundos.

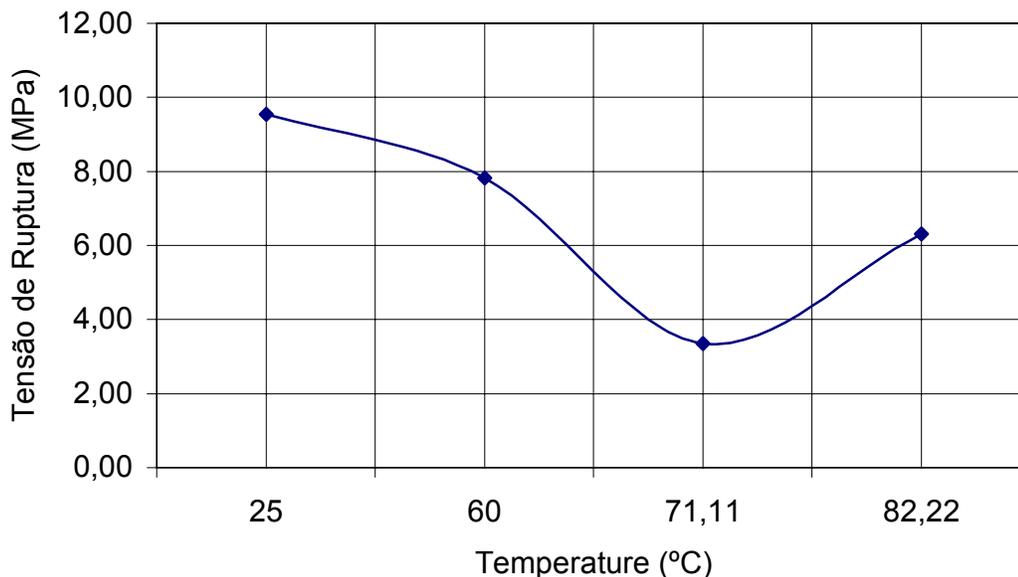


Figura 3: Tensão de ruptura versus temperatura

Outro fato interessante nesta análise foi a observação da forma das fraturas dos corpos de prova. A uma velocidade de ensaio baixa, em torno de 2 mm/min o EZEFORM® apresentou um comportamento considerado como superplástico (Herakovich, 1998), pois a deformação final foi extremamente alta. Já

com a velocidade de ensaio de 20 mm/min a fratura nos corpos de prova foi típica de um compósito termoplástico (Miraverte & Reddy, 1995). Donde pode ser concluir que este material apresenta grande dependência da taxa de deformação. No entanto, para aplicações em terapia ocupacional este comportamento não afeta significativamente as propriedades desejáveis deste material.

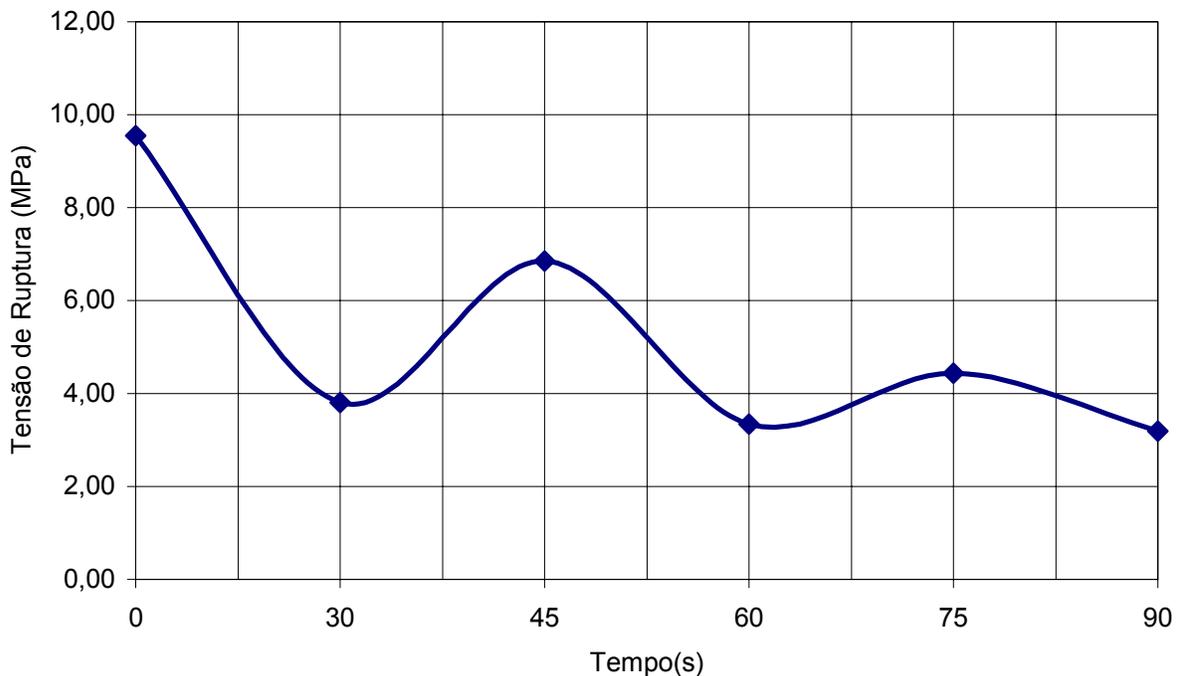


Figura 4: Tensão de ruptura versus tempo de aquecimento

Além disso, a Fig. (5) mostra a resistência à fratura (linha sólida) e a função de envelhecimento (linha pontilhada). A função de envelhecimento auxilia na indicação de como a temperatura e o tempo de exposição ao calor afetam a microestrutura do EZEFORM®, isto é, como ele se torna menos resistente num período de tempo. A resistência à fratura como função do tempo é matematicamente representada pela seguinte equação:

$$X = 9.2088t^{-0.5004} \quad (1)$$

note que, X representa a tensão de ruptura em MPa, enquanto que o tempo de aquecimento é medido em segundos.

A perda de propriedades mecânicas, redução da rigidez e resistências, pode ser traduzida como um “envelhecimento” do EZEFORM®. A importância do levantamento desta função de envelhecimento foi demonstrada pelos autores em um trabalho (Ávila et al., 2001). Para se ter uma idéia dos custos envolvidos, o EZEFORM® custa aproximadamente R\$ 20,00/grama e se levarmos em consideração a população atendida pelo Serviço Único de Saúde, o SUS, anualmente o custo deste material pode se aproximar de milhões de reais. A programação de reutilização deste material, via função de envelhecimento, poderia trazer grandes benefícios a toda a população de pacientes que necessitam de orteses.

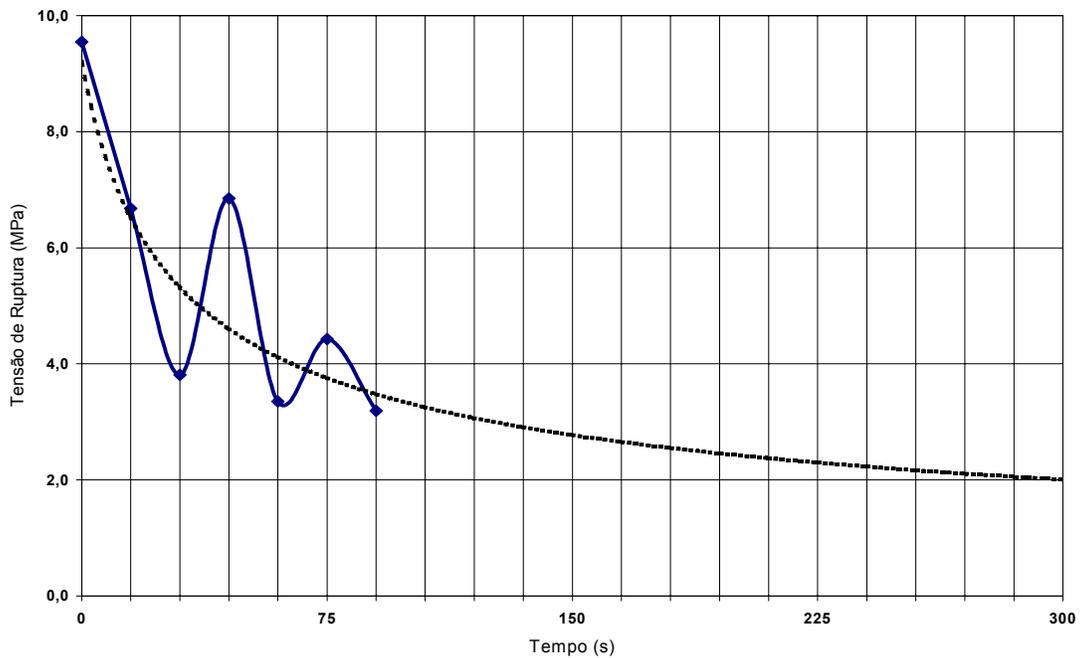


Figura 5: Resistência à fratura versus função de envelhecimento

#### 4. COMENTÁRIOS FINAIS

A caracterização mecânica do EZEFORM® leva em conta a rigidez e a tensão. Observou-se que há uma redução das características mecânicas do EZEFORM®, tanto quando ele é aquecido a uma temperatura constante e tempo de imersão variável, quanto quando é aquecido por um tempo de imersão constante e temperatura variável. Considerando essa redução na tensão de ruptura, tensão de escoamento e módulo de elasticidade, a função de envelhecimento para este material é proposta com sucesso e deve-se considerar a temperatura de aquecimento e tempo de imersão ótima de trabalho como 71,1° C e 45 segundos respectivamente.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ASTM D 3039/3039 M, 1995, *ASTM Yearbook*, Vol. 14-A, pp. 117-127.
- Avila, A F; Rodrigues, A V N; Faria, J F S., 2001, *Orthosis's Material Portrayal: The Aging Function*, Anais do II Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, CDROM.
- Breger-Lee, D., 1995, Objective and subjective observations of low-temperature thermoplastic materials. *J Hand Therapy*. Apr-Jun, pp.138-43.
- Breger-Lee, D; Buford, 1992, W. Properties of thermoplastic splinting materials. *J. Hand Therapy*. Oct-Dec, p.202-211.
- Breger-Lee, D; Buford, W. 1991, Update in splinting materials and methods. *Hand Clinics*. v. 7(3), pp. 569-585.
- Herakovich, C. T., 1998, *Mechanics of Fibrous Composites*, McGraw-Hill, New York.
- Jones, R. M. , 1999, *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, New York.
- Lau, C. Comparison study of Quickcast versus a traditional thermoplastic in the fabrication of resting hand splint. *J. Hand Therapy*. Jan-Mar, p. 45-48, 1998.
- Miraverte, A.; Reddy, J. N. 1995, *Practical Analysis of Composite Materials*, CRC Press, Boca Raton.

## **Direitos autorais**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

Title: Polymeric Matrix Composites Characterization for Orthosis' Manufacturing

First Author's Name: Adriana Valadão N. Rodrigues

Second Author's Name: Antonio Ferreira Ávila

Third Author's Name: Jose Flausino S. Faria

*Abstract: There are many commercial polymeric matrix composite materials for orthosis manufacture. However, little or none information about its mechanical behavior is available. The mechanical characterization of such materials has as its ultimate goal a database formation that can help on orthosis optimization. This paper analyzes the material called EZEFORM<sup>®</sup> considering its stiffness, yield stress, and fracture stress as a function of energy absorbed during the orthosis formation, which is a hot forming process. To be able to evaluate such mechanical properties a set of ASTM D 3039/3039M tensile specimen are prepared. During the hot forming process parameters such as temperature and time are controlled. After the heat treatment the ASTM D 3039/3039M specimen are tested. The data obtained from the tensile tests shows that there is an optimal temperature around 70 C, and the optimal time is not 60 seconds as the EZEFORM<sup>®</sup> manufacturer's states but 45 seconds. Another interesting phenomenon observed is the EZEFORM<sup>®</sup> aging, i.e. there is a significant stiffness and fracture stress reduction due to the amount of energy absorbed during the orthosis manufacturing and re-manufacturing. Such function can be helpful on orthosis design, in special for long-term treatments.*

*Keywords: Polymeric matrix composites, orthosis, biomechanics, materials testing*