

UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS NÃO-LINEARES SUBMETIDOS A GRANDES DEFORMAÇÕES

Francisco Luiz Bresolin, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, francisco.bresolin@ufrgs.br

Jakson Manfredini Vassoler, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, yassoler@mecanica.ufrgs.br

Resumo. Este artigo apresenta uma metodologia para caracterização de materiais não lineares submetidos a grandes deformações, utilizando dados experimentais obtidos de ensaios mecânicos em conjunto com métodos numéricos. No trabalho são ensaiados corpos de prova de um termoplástico através de testes uniaxiais que fornecem as típicas curvas de força e deslocamento, em conjunto com método de correlação de imagens (DIC) que fornecem as mudanças geométricas de uma região de interesse. Os parâmetros mecânicos do modelo utilizado são determinados através de um procedimento de minimização de uma função objetivo que utiliza os dados obtidos experimentalmente e os resultados de um modelo numérico de elementos finitos.

Palavras chave: caracterização de material, materiais não-lineares

1. INTRODUÇÃO

O uso de implantes bioabsorvíveis têm ganhado importância graças às vantagens que este material possui em relação aos materiais tradicionais em cerâmica ou metal. As próteses de materiais tradicionais podem causar perda de massa óssea elevada na região onde a prótese foi aplicada, conforme Roesler *et al.* (2014), exigindo cirurgias posteriores caso seja necessária a retirada das mesmas. A demanda por implantes de materiais termoplásticos bioabsorvíveis, como o poli L-co-D,L ácido láctico (PLDLA), em todo o mundo têm aumentado em conjunto com as pesquisas para utilização de implantes destes materiais.

Os materiais bioabsorvíveis têm essa denominação pois degradam gradualmente. Enquanto o material bioabsorvível destitui, os esforços mecânicos vão progressivamente sendo suportados pela estrutura óssea em formação pelo corpo. Dessa forma não são necessárias cirurgias posteriores para retirada da prótese ou substituição, conforme Athanissou *et al.* (1998).

No período em que a prótese degrada, suas propriedades mecânicas são afetadas podendo diminuir consideravelmente, o fenômeno da degradação nestes materiais é uma característica importante e deve ser controlada para que a estrutura óssea em conjunto com o material bioabsorvível restante sejam capazes de suportar os carregamentos atuantes, até que a estrutura óssea formada seja capaz de suportar os esforços completamente.

Entretanto no dimensionamento da prótese biomecânica devem ser tomados cuidados no compromisso entre resistência mecânica e o tempo de dissociação da prótese. Caso a prótese seja mal dimensionada ela pode demorar muito mais tempo para se dissociar do que o necessário para a região lesionada se recuperar. Assim no dimensionamento destas próteses deve-se atentar para que o tempo de dissociação seja compatível com o período de recuperação do paciente. Tais análises podem ser feitas convenientemente de forma numérica através de simulação computacional.

A determinação das propriedades mecânicas do polímero bioabsorvível cumpre um papel fundamental no dimensionamento da prótese. Sem propriedades mecânicas bem definidas não é possível realizar um dimensionamento adequado. Assim, a determinação dos parâmetros de um modelo constitutivo capaz de representar o comportamento mecânico do material é primordial para o sucesso de uma análise mecânica. Os polímeros bioabsorvíveis apresentam comportamento mecânico não-linear que exigem técnicas avançadas tanto de determinação dos parâmetros de material quanto de dimensionamento.

Na manufatura de próteses de materiais poliméricos bioabsorvíveis, as mesmas propriedades mecânicas não podem ser garantidas, pois o comportamento mecânico final do componente depende de fatores ambientais e dos parâmetros usados na produção do componente polimérico (parâmetros de injeção). Portanto, deve-se ter um cuidado adicional no uso destes materiais, exigindo avaliação rigorosa do comportamento mecânico das próteses mesmo após testes iniciais terem aprovado algum modelo de prótese com um material específico.

Fazendo uso de dimensionamento e caracterização mecânica do material, adequados, as propriedades mecânicas e a degradação em tempo hábil da prótese são alcançadas com mais eficiência. Estas precauções além de garantirem confiabilidade da prótese podem reduzir custos e propiciar melhores condições no uso das mesmas em cirurgias, tornando-as atrativas popularizando esta técnica.

Assim, este trabalho tem como principal objetivo estudar uma metodologia de caracterização numérico-experimental de polímeros baseada no uso de dados experimentais, provenientes de ensaios de tração tradicionais e de técnicas ópticas, e de resultados obtidos de modelos numéricos, a fim de identificar os parâmetros de um modelo de material previamente definido.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho são empregadas diferentes metodologias para determinação das propriedades mecânicas de polímeros baseados em teorias clássicas de materiais não-lineares em conjunto com modernas técnicas computacionais de simulação numérica. Esta metodologia segue a proposta apresentada em Vassoler *et al.* (2011). Assim, neste trabalho são apresentados os aspectos básicos da metodologia estudada. Nesta etapa preliminar de estudo, a metodologia descrita aqui será aplicada em um termoplástico de características similares a um termoplástico bioabsorvível, uma vez que este possui um altíssimo custo e características mecânicas similares.

2.1. ENSAIO EXPERIMENTAL

O ensaio experimental busca determinar a resposta do material ao esforço mecânico. Para isso, neste trabalho são testados corpos de prova em ensaio uniaxial, onde são medidos os dados de deslocamento e força, respectivamente, por um *clip-gauge* e uma célula de carga. Além disto, como informação complementar, são capturadas as imagens da região de estrição do corpo de prova a fim de obter o comportamento localizado de grandes deformações. As imagens capturadas são processadas utilizando uma técnica óptica para determinar deslocamento/deformação na superfície da amostra. Para o processamento das imagens é utilizada a metodologia DIC (Digital Image Correlation).

2.1.1. MÉTODO DIC

O método DIC consiste em correlacionar imagens com o objetivo de determinar deslocamentos de pontos específicos de uma imagem para outra, onde estes pontos são escolhidos de forma conveniente. Durante o ensaio, o corpo de prova é filmado produzindo uma sequência de imagens digitais que podem ser adquiridas por uma ou mais câmeras. Na Fig. (1) é apresentada a bancada óptica e a máquina de ensaio para ensaio de tração uniaxial. Para a realização deste trabalho usam-se duas câmeras (método DIC 3D).



Figura 1. Bancada experimental para ensaio

Através desta técnica é possível obter o campo de deslocamento tridimensional sobre a superfície do corpo de prova durante o ensaio mecânico, onde esta informação é usada posteriormente em um processo de identificação de parâmetros.

Para isto são usados coeficientes de correlação entre diferentes imagens, que quantificam quão semelhantes regiões (*subsets*) entorno aos pontos de interesse (*markers*). Este processo de busca do deslocamento de cada ponto é feito para cada imagem capturada. Na versão tridimensional, além do processo de correlação de imagens para a sequência de imagens de cada câmera, é utilizada a triangularização de cada ponto de interesse. Os coeficientes de correlação e os algoritmos comumente utilizados podem ser encontradas em Sutton *et al.* (2009) e Pan *et al.* (2009).

2.2. MODELAGEM NUMÉRICA

Um modelo numérico do corpo de prova ensaiado é implementado em software comercial de elementos finitos. Este modelo tem como objetivo avaliar a resposta mecânica segundo um conjunto de parâmetros de material conhecidos.

Para simular o comportamento mecânico do material é utilizado um modelo constitutivo multilinear. Esta metodologia é utilizada pela sua simplicidade e capacidade de reproduzir comportamentos não-lineares. O modelo possui dois parâmetros elásticos: E (coeficiente de elasticidade longitudinal) e ν (coeficiente de Poisson) e seis parâmetros plásticos: σ_y (tensão de escoamento), Δ (incremento de tensão), ε_p (início do endurecimento orientado) e três módulos tangentes (ϕ , H e I).

A influência de cada um dos parâmetros listados está representando no gráfico abaixo, que apresenta os oito coeficientes do modelo multilinear.

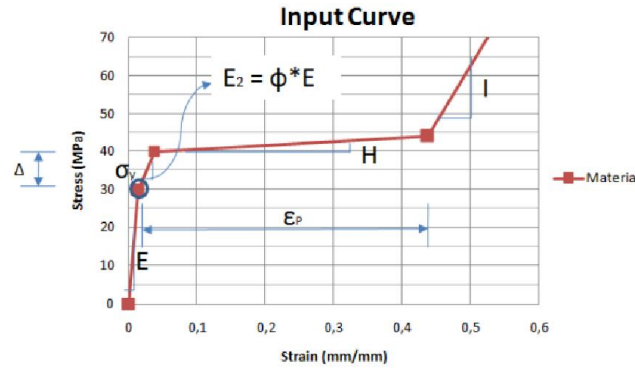


Figura 2. Modelo constitutivo multilinear [Vassoler *et al.* (2011)]

O corpo de prova e as condições de contorno do modelo experimental estão inseridos no modelo numérico. Reiterando que o objetivo do modelo numérico é testar diversos parâmetros materiais buscando compatibilizar a resposta numérica com os resultados experimentais. O algoritmo a ser implementado permite atribuir parâmetros constitutivos arbitrários, assim testando estes parâmetros e verificando a compatibilidade dos mesmos com o material estudado.

2.3. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

O processo de identificação de parâmetros é baseado em um procedimento de otimização que busca determinar o conjunto de parâmetros materiais $\mathbf{p}$ (8 parâmetros do modelo constitutivo multilinear). Nesta tratativa, é utilizado um procedimento de otimização multiobjetivo. Essa metodologia é utilizada, pois devem ser otimizadas duas funções objetivo, uma para as forças e outra para os deslocamentos da região de estrição, avaliadas no modelo numérico e experimental. As funções objetivo são montadas como funções custo baseada no método dos mínimos quadrados.

$$\Omega_1 = \sum_{i=1}^{nf} (F_i^{\text{num}}(\mathbf{p}) - F_i^{\text{exp}})^2 \quad (1)$$

$$\Omega_2 = \sum_{i=1}^{nu} (u_i^{\text{num}}(\mathbf{p}) - u_i^{\text{exp}})^2 \quad (2)$$

$$\mathbf{p} = (E, \nu, \sigma_y, \Delta, \varepsilon_p, \phi, H, I) \quad (3)$$

onde F_i^{num} são as forças obtidas do modelo numérico, F_i^{exp} são as forças medidas no modelo experimental, u_i^{num} são os deslocamentos de pontos da região de estrição obtidos do modelo numérico e u_i^{exp} são os deslocamentos de pontos da região de estrição obtidos através do DIC no ensaio experimental. Os coeficientes nf e nu dos somatórios indicam o número de avaliações usadas, respectivamente, de forças e deslocamentos.

Como existem duas funções objetivo Ω_1 e Ω_2 o problema pode não possuir resposta única. Conforme definição de Pareto, o conjunto de soluções para o problema consiste em todos os conjuntos de solução que não podem melhorar o valor de qualquer objetivo, sem a degradação de pelo menos algum dos outros [Haftka, (1992)].

O algoritmo de minimização é apresentado na Fig. (3).

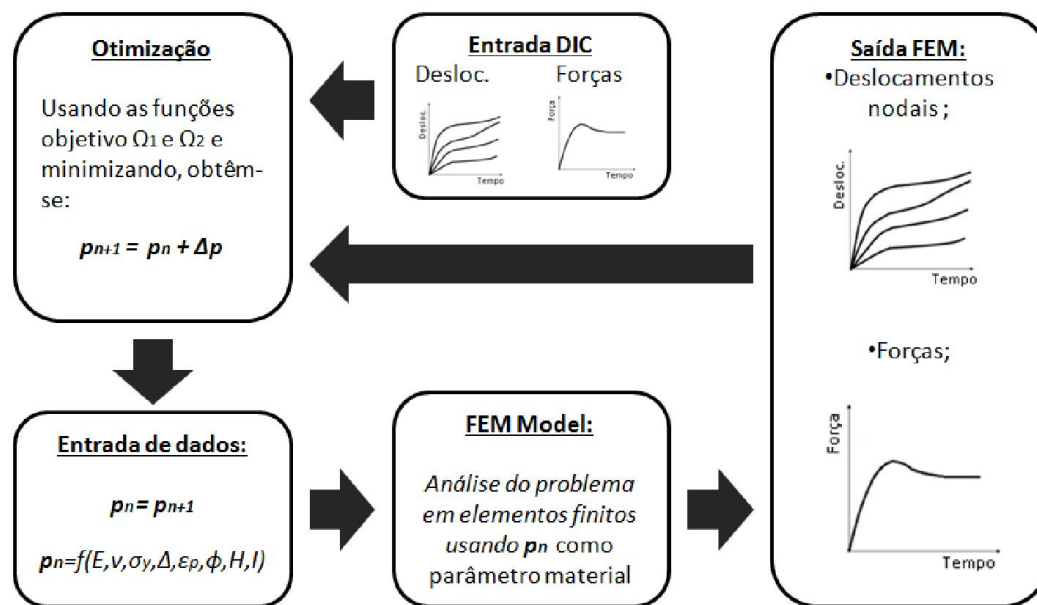


Figura 3. Rotina de otimização de p

3. CONCLUSÃO

A obtenção de parâmetros de materiais não lineares submetidos a grandes deformações não é trivial e necessita de tratamento adequado. Neste trabalho é estudada uma metodologia capaz de determinar parâmetros materiais constitutivos através da associação do uso de técnicas numéricas e experimentais. Para esse fim se utilizará a metodologia óptica DIC e métodos computacionais de elementos finitos e de otimização multiobjetivo.

4. REFERÊNCIAS

- Athanasiou, K., Agrawal, C., Barber, F., e Burkhart, S., 1998, "Orthopaedic applications for PLA-PGA biodegradable polymers", *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 14(7), 726–737.
- Haftka, R. T. e Gürdal, Z., 1992, "Elements of structural optimization". Springer.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., e Asundi, A., 2009, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review", *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001.
- Roesler, C. R. M., Salmoria, G. V., Moré, a. D. O., Vassoler, J. M. e Fancello, E. A., 2014, "Torsion test method for mechanical characterization of PLDLA 70/30 ACL interference screws", *Polymer Testing*, 34, 34–41.
- Sutton, M. A., Orteu, J. e Schreier, H. W., 2009, "Image correlation for shape, motion and deformation measurements", Springer, New York, doi, v. 10, p. 978-0.
- Vassoler, J. M., e Fancello, E. A., 2011, "Identification of elastoplastic parameters under finite strain using a digital image correlation method", *COBEM 2011*.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da CAPES, CNPq e FAPERGS a este trabalho.

5. ABSTRACT

This article presents a characterization methodology for nonlinear materials undergoing large strains using numerical methods and experimental data obtained from mechanical testing. Uniaxial tensile tests of thermoplastic specimens are performed in order to obtain the typical force and displacement curves, in conjunction with the Digital Image Correlation (DIC) optical method, which provides information about geometric changes in a selected region. The parameters of the material model are determined by minimizing procedure of a suitable objective functions using experimental data and finite element results.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.