

PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE TECIDOS MOLES UTILIZANDO MODELO COM VISCOELASTICIDADE E DANO

Otávio Teixeira Pinto, otaviotpinto@yahoo.com.br
Eduardo Alberto Fancello, eduardo.fancello@ufsc.br
Jakson Manfredini Vassoler, jakson@mecanica.ufrgs.br
Carlos Rodrigo de Mello Roesler, r.roesler@ufsc.br

Resumo. Um tendão do músculo flexor profundo suíno foi ensaiado ciclicamente com carregamento progressivo até a ruptura. O histórico de deformação foi obtido mediante uma técnica óptica (sem contato) denominada Correlação de Imagens Digitais – DIC. As curvas cíclicas de tensão/deformação real resultante apresentaram comportamentos devido a viscoelasticidade e dano (efeito Mullins) típicos deste tipo de tecido. Com o objetivo de simular numericamente o comportamento do tecido, foi testado um modelo constitutivo para verificar sua capacidade de reproduzir os fenômenos observados. Os parâmetros do modelo foram calculados através de uma rotina de minimização da diferença entre os dados da simulação e os obtidos por experimentação. O modelo calibrado alcançou uma excelente correlação e se mostrou capaz de representar os fenômenos observados no tendão.

Palavras chave: Tendão, viscoelasticidade, dano, identificação de parâmetros, correlação de imagens digitais.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que tecidos moles como os tendões exibem uma série de fenômenos que influenciam significativamente seu comportamento mecânico e não são contemplados por modelos puramente elásticos. Tecidos moles em geral tem seu comportamento dependente da deformação, da taxa de deformação (tempo) e do histórico de deformações (FUNG, 1993). Além disso, eles são capazes de suportar elevados valores de deformação (HOLZAPFEL, 2001) e quando submetidos a ciclos progressivos de carga apresentam um comportamento semelhante a borrachas denominado efeito Mullins (MULLINS, 1948) em que a capacidade do material de armazenar energia elástica é progressivamente reduzida.

Parte importante das propriedades mecânicas dos tecidos moles é dada pelo tecido conjuntivo. Essa parcela é constituída por um volume relativamente inferior de células e uma quantidade significativa de matriz extra celular e fibras de colágeno e/ou elastina. Quando têm-se uma grande quantidade de fibras e essas encontram-se aproximadamente orientadas em uma certa direção diz-se que esse é um tecido conjuntivo denso e modelado, um exemplo típico desse tipo de tecido são os tendões (JUNQUEIRA; CARNEIRO, 2004).

O estudo dos tendões é interessante pois eles são elementos diretamente ligados com a capacidade de movimentar-se do corpo humano. A ruptura total ou parcial de um tendão ou ligamento pode impossibilitar a execução de um movimento específico e comprometer a mobilidade do sujeito. Por outro lado, tendões são histologicamente mais simples que outras estruturas do corpo humano e entender o comportamento de tendões pode auxiliar o entendimento do comportamento mecânico de outras muitas estruturas constituídas por moléculas semelhantes.

O objetivo desse trabalho e a realização de um procedimento de identificação de parâmetros para um tendão suíno. O modelo utilizado possui uma formulação variacional onde a evolução das variáveis internas é feita através da solução de um conjunto de problemas de minimização de potenciais.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O tendão utilizado nesse trabalho é o tendão do músculo flexor profundo de um suíno da raça Agro. A massa do animal era de aproximadamente 175kg e ele foi abatido com aproximadamente 5 meses de vida para fins de alimentação. A ponta do membro do animal (cortada na união entre a parte mais distal da tíbia e os ossos do pé) foi fornecida pelo frigorífico Borussia-Osório/RS.

2.1 Preparação

A peça foi transportada em ambiente refrigerado e congelada a -20°C . Após o descongelamento o tendão foi dissecado da peça, limpo e congelado novamente a -20°C dentro de uma embalagem plástica para prevenir a desidratação. No dia do ensaio, o tendão foi retirado do congelador e ficou mergulhado em água por aproximadamente 10 segundos, após ser retirado do banho a secou-se a superfície do material com papel toalha e o restante do descongelamento ocorreu ao ambiente.

Para prevenir o escorregamento do material nas garras de fixação utilizou-se de faixas de tecido que foram suturadas às extremidades do tendão ensaiado, como pode ser visto na Fig. (1).

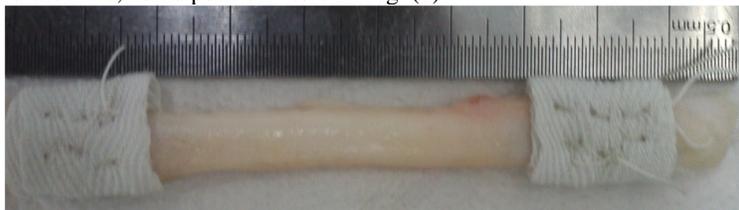


Figura 1. Detalhe da forma de fixação do tecido nas extremidades do tendão.

2.2 Equipamento e carregamento

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaio universal EMIC modelo DL-3000. Os dados de força foram obtidos com uma célula de carga de 5000N modelo CCE5KN (resolução de leitura de 1N) e o deslocamento da garra foi medido pelo transdutor de deslocamento (sensor óptico (encoder), com resolução de 0,01 mm) acoplado ao sistema da máquina para ser utilizado como um dado secundário no processo de interpretação dos resultados. De forma paralela o campo de deslocamento também foi medido pelo método óptico de correlação de imagens digitais (como será descrito adiante).

Após a realização de alguns ensaios monotônicos preliminares, observou-se que os tendões utilizados rompem com cargas tratativas da ordem de 2 kN, ou aproximadamente 60 MPa. Esse valor preliminar é coerente com os valores de tensão máxima descritos por (HOLZAPFEL, 2001). Sabendo disso estabeleceu-se um ensaio de pré-condicionamento que consiste em uma sequência de rampas de carga e descarga com velocidade constante e limitadas por patamares de força buscando aproximar a faixa de carregamentos fisiológicos (Fig. 2a).

Ao final do pré-condicionamento o operador da máquina manualmente iniciou o segundo, o intervalo de tempo entre o fim do pré-condicionamento e o início da etapa seguinte do ensaio foi de aproximadamente 10 segundos. Nessa etapa realiza-se uma sucessão de ciclos em que a carga máxima é progressivamente aumentada de maneira similar ao trabalho de (MUÑOZ et al., 2008) e (PEÑA; DOBLARÉ, 2009), com a diferença de que ao fim de cada rampa o deslocamento das garras é parado por 120 segundos (Fig. 2b).

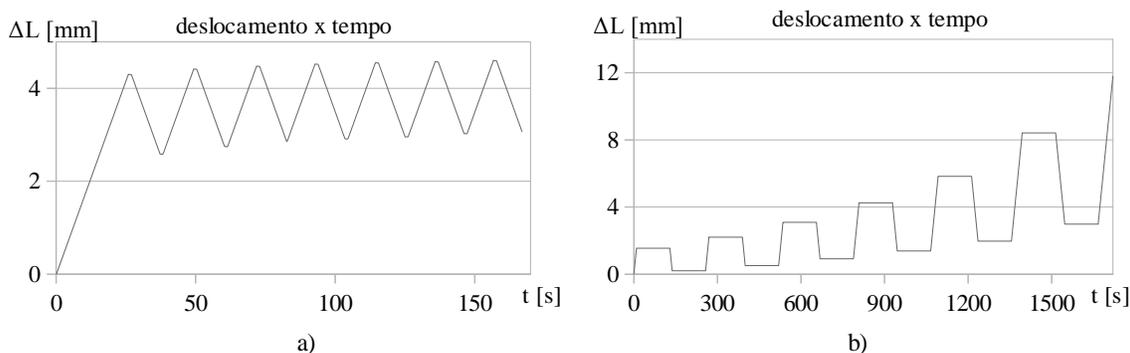


Figura 2. Curvas de carregamento durante o pré-condicionamento (a) e o ensaio propriamente dito (b)

A realização desse tipo de ensaio tem como finalidade capturar a sensibilidade do material ao tempo (viscosidade) e o efeito de perda de rigidez associada ao efeito Mullins simultaneamente. A carga máxima do primeiro ciclo foi de 250N e progrediu seguindo um fator de 1,5 (250N; 375N; 562,5N; 843,75N; 1262,6N; 1,898N; até a ruptura).

2.3 Técnica de medição de deformação sem contato

Para evitar que a técnica de medição utilizada interfira no comportamento do material optou-se por uma técnica de medição óptica denominada correlação de imagens digitais (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2009). A técnica consiste em filmar uma região enquanto ela se desloca e registrar as imagens em formato digital. Processa-se as imagens digitais de cada instante de tempo e se obtêm um conjunto de vetores deslocamentos que são utilizados para a obtenção de um campo vetorial de deslocamentos.

Obtidos os deslocamentos pode-se construir um campo de deslocamento contínuo utilizando para isso bases de funções parametrizadas usualmente adotadas na técnica de elementos finitos. No presente caso, dado que a grade define

regiões quadrilaterais, optou-se por uma base de funções bilineares de elementos de 4 nós. O campo de deformações foi obtido pela diferenciação do campo de deslocamentos parametrizados.

Para possibilitar a utilização da técnica realizou-se uma marcação na superfície do tendão utilizando-se de pó de impressora (toner), para a criação de um fundo preto, e de microesferas de poliamida, para a criação do contraste branco, o resultado pode ser visto na Fig. (3a). A área transversal do tendão foi aproximada por uma elipse onde os dois diâmetros da elipse foram medidas por duas câmeras posicionadas de maneira a capturar a variação no maior diâmetro (câmera das imagens da Fig. (3)) e do menor diâmetro (perfil do tendão).

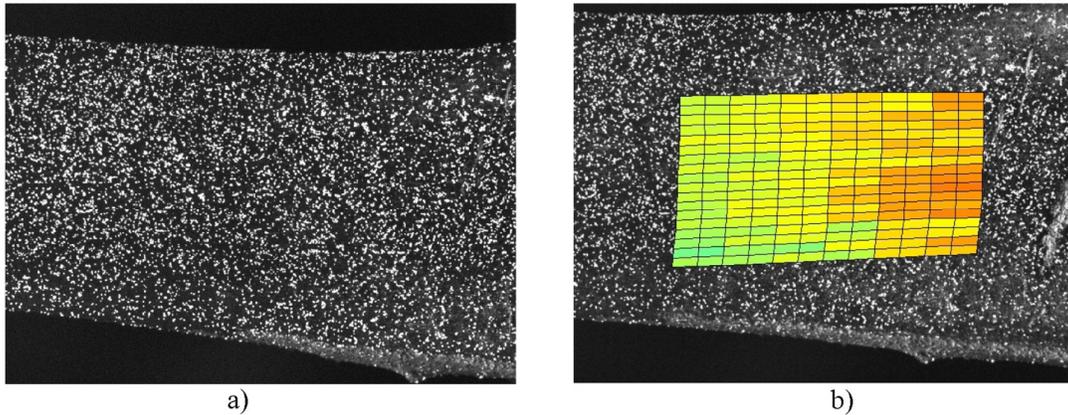


Figura 3. Técnica de correlação de imagens digitais: a) marcação no instante $t=0s$ e b) campo de deformações no instante $t=1092s$.

3 MODELO CONSTITUTIVO

Modelos de materiais hiperelásticos são aqueles definidos por uma função de energia livre W (escalar) dependente apenas de algum tensor de deformações, cujo a derivada em relação a um componente da deformação determina a componente de tensão correspondente (MALVERN, 1969). Assim, utilizando-se como medida de deformação o gradiente de deformações \mathbf{F} ou o tensor de Cauchy-Green \mathbf{C} , é possível obter o tensor de tensões de Piola-Kirchhoff \mathbf{P} através da derivação de W com relação a \mathbf{F} ou \mathbf{C} .

O material aqui estudado não pode ser descrito por um modelo hiperelástico dado que apresenta fenômenos dissipativos. O modelo constitutivo deverá depender não apenas da deformação total, mas também do histórico de deformações. Para possibilitar a descrição destes fenômenos através de parâmetros optou-se por um modelo de material anisotrópico, viscoelástico com dano que parte de uma abordagem variacional em que a relação entre as tensões e as deformações é dada por um pseudo potencial de energia livre Ψ (FANCELLO; VASSOLER, 2013). A relação entre as tensões e as deformações é obtida de maneira incremental através de

$$\mathbf{P}_{n+1} = \frac{\partial \Psi(\mathbf{F}_{n+1}; \xi_n)}{\partial \mathbf{F}_{n+1}} = 2\mathbf{F}_{n+1} \frac{\partial \Psi(\mathbf{C}_{n+1}; \xi_n)}{\partial \mathbf{C}_{n+1}}. \quad (1)$$

O conjunto $\xi = \{\mathbf{F}, \mathbf{F}^i, \mathbf{Q}\}$ inclui a variável externa \mathbf{F} e as variáveis internas \mathbf{F}^i (parcela inelástica de \mathbf{F}) e \mathbf{Q} {variáveis de dano}. Os subíndices n e $n+1$ representam os instantes de avaliação dessas variáveis no tempo.

Seguindo a proposição de (FANCELLO; VASSOLER, 2013), realiza-se uma série de decomposições em Ψ . A primeira delas visa diferenciar a parcela isotrópica (Ψ_{iso}) da parcela anisotrópica (Ψ_f) e a segunda visa dividir a parcela anisotrópica (reforço das fibras) em uma parcela elástica com dano (Ψ_f^{ED}) e outra viscoelástica com dano (Ψ_f^{VED}). Fica-se com:

$$\Psi = \Psi_{iso} + \Psi_f^{ED} + \Psi_f^{VED}. \quad (2)$$

Em cada uma dessas parcelas resolve-se um problema de minimização no qual o minimizador é o conjunto de variáveis internas associadas àquele pseudo potencial no instante $n+1$.

Em cada um dos pseudo potenciais na Eq. (2) propoe-se um conjunto de funções que dependem de alguns parâmetros a serem definidos pelo procedimento de identificação. Esses parâmetros são reunidos em um vetor \mathbf{k} que é incluído ao conjunto de variáveis que definem Ψ . Fica-se então com

$$\mathbf{P}_{n+1} = \frac{\partial \Psi(\mathbf{F}_{n+1}; \xi_n; \mathbf{k})}{\partial \mathbf{F}_{n+1}}. \quad (3)$$

Detalhes sobre a formulação de Ψ e as capacidades do modelo podem ser encontrados em (FANCELLO; VASSOLER, 2013) e em (PINTO, 2014).

4 IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

O método utilizado para encontrar os parâmetros que melhor ajustam o comportamento experimental consiste na definição de uma função erro entre a tensão de Cauchy calculada pelo modelo σ_m e a tensão de Cauchy experimental σ_e em cada ponto e busca-se as variáveis \mathbf{k} que minimizam o erro quadrático entre estas duas funções, ou seja

$$\min_{\mathbf{k}} \sum (\sigma_m(t_i, \mathbf{k}) - \sigma_e(t_i))^2. \quad (4)$$

Para a solução do problema de minimização acima utilizou-se a função *lsqcurvefit* do software MATLAB (MATLAB, 2010).

5 RESULTADO

O resultado da metodologia experimental e o cálculo das tensões realizados pelo modelo estão na Fig. (4), nela pode ser visto uma excelente correlação entre as duas curvas que resultou em um coeficiente de correlação R^2 de 0,9955. O conjunto de parâmetros obtidos podem ser encontrados no trabalho de (PINTO, 2014) e não foram colocados nesse texto pois eles não fariam sentido sem a exposição em detalhes da formulação de Ψ .

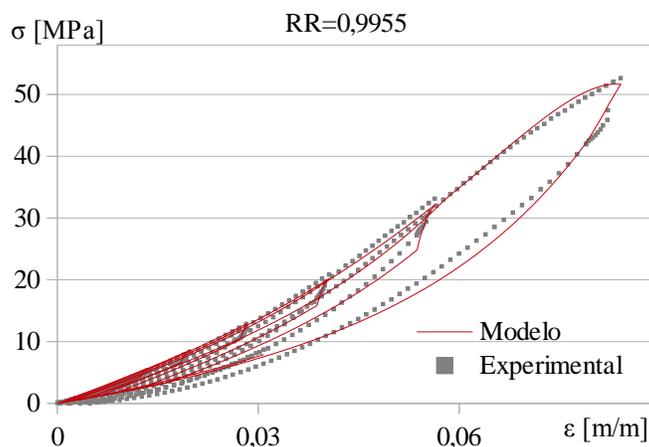


Figura 4. Comparação entre a tensão de Cauchy calculada pelo modelo e a tensão de Cauchy obtida experimentalmente.

6 CONCLUSÕES

Com a metodologia estudada e desenvolvida neste trabalho foi possível realizar uma caracterização numérico-experimental de um tendão. O modelo utilizado baseia-se em conceitos de mecânica do contínuo sem a necessidade de adotar a hipótese simplificadora de deslocamentos e deformações infinitesimais e leva em consideração as principais características mecânicas do material: não linearidade da resposta mecânica, anisotropia na direção da fibra, viscosidade e dano mecânico.

O modelo utilizado neste trabalho se mostrou capaz de reproduzir o comportamento de tendões sob carregamento axial e a inserção da variável dano se mostrou importante especialmente nas faixas elevadas de deformação. A proposta de existência de algum fenômeno relacionado com uma perda parcial de rigidez representado no modelo através do dano apresentou uma boa correlação com o dado experimental e indica ser esta a origem deste comportamento.

Os ensaios experimentais realizados forneceram dados úteis para o procedimento de identificação de parâmetros do modelo estudado.

A técnica de medição utilizada não envolveu contato com a superfície do material em nenhum momento, isso reduziu a interferência do equipamento de medição no valor da medida.

7. REFERÊNCIAS

- Fancello, E. A.; Vassoler, J. M., 2013, “A Constitutive Model for Anisotropic Soft Biological Tissues Subject to Mechanical Damage”. MecSol2013, pp. 1-10.
- Fung, Y. C., 1993, “Biomechanics: mechanical properties of living tissues”. Springer-Verlag, New York.
- Holzappel, G. A., 2001, “Handbook of Materials Behaviour Models, Seção 10.11 Biomechanics of soft Tissue”. [s.l:s.n.], pp. 1057-1071
- Junqueira, L. C.; Carneiro, J., 2004, “Histologia básica”. [s.l.] Guanabara Koogan.
- Malvern, L. E., 1969, “Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium”. [s.l: s.n.].
- MATLAB. Version 7.10.0 (R2010a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. 2010.
- Mullins, L., 1948, “Effect of Stretching on the Properties of Rubber. Rubber Chemistry and Technology ”, Vol. 21, n. 2, pp. 281-300.
- Muñoz, M. J. et al. , jan. 2008, “An Experimental Study of the Mouse Skin Behaviour: Damage and Inelastic Aspects.”, Journal of Biomechanics, Vol. 41, n.l, p. 93-99.
- Peña, E.; Doblaré, M., 2009, “An Anisotropic Pseudo-Elastic Approach for Modeling Mullins Effect in Fibrous Biological Material.”, Mechanics Research Communications, Vol. 36, n. 7, pp. 784-790.
- Pinto, O. T., 2014 “Estudo Numérico Experimental de Tecido Conjuntivo Mole Submetido a Deformações Finitas”.
- Sutton, M. A.; Orteu, J.-J.; Schreier, H. W., 2009, “Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements.”, Springer, New York, Vol. 10, p. 970-978.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

9. ABSTRACT

The ability to describe the mechanical properties of a material by a set of parameters makes room for a number of dialogs with respect to these properties and allows the simulation of the material behavior in a virtual environment. One porcine tendon was tested cyclically with progressive loading until its rupture, the strain data were obtained by an optical measurement technique (without contact) and the stress-strain curve was compared with a model that is able to simulate effects such as viscoelasticity, damage and anisotropy. The parameters of this model were obtained through an error minimization routine that achieved an excellent correlation.

10. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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