



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102017025874-2 A2



(22) Data do Depósito: 30/11/2017

(43) Data da Publicação Nacional: 25/06/2019

(54) **Título:** MÉTODO DE ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS NÃO LINEARES

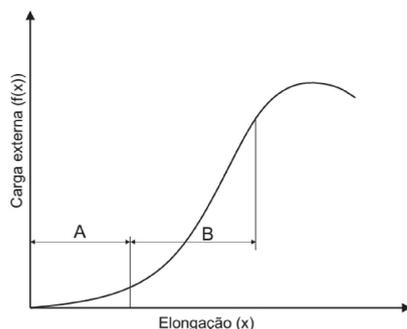
(51) **Int. Cl.:** A61B 5/103; G01N 27/447.

(52) **CPC:** A61B 5/103; G01N 27/44773.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP; UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE.

(72) **Inventor(es):** WU FENG CHUNG; CLÁUDIO SADDY RODRIGUES COY; HUEI DIANA LEE; NARCO AFONSO RAVAZZOLI MACIEJEWSKI; JOÃO JOSÉ FAGUNDES; MARIA DE LOURDES SETSUKO AYRIZONO; MOACIR FONTEQUE JÚNIOR; WEBER SHOITY RESENDE TAKAKI.

(57) **Resumo:** A presente invenção se insere no campo técnico dos tecidos biológicos e compreende, mais especificamente, um método constituído pelo processo de análise das curvas representativas de comportamento da pele, tubo digestório, vasos sanguíneos e órgãos parenquimatosos, tecidos biológicos esses com propriedade viscoelástica não linear, sob carga externa de tração e velocidade constante. A etapa indispensável para esse método inovador é a análise da linearidade das curvas resposta, ao ensaio mecânico, de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear.



**MÉTODO DE ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
MATERIAIS VISCOELÁSTICOS NÃO LINEARES**

Campo da invenção:

[1] A presente invenção se insere no campo técnico dos tecidos biológicos e compreende, mais especificamente, um método constituído pelo processo de análise das curvas representativas de comportamento da pele, tubo digestório, vasos sanguíneos e órgãos parenquimatosos, tecidos biológicos esses com propriedade viscoelástica não linear, sob carga externa de tração e velocidade constante. A invenção tem por objetivo facilitar a análise e simplificar a interpretação das propriedades físicas de materiais biológicos quando em comparação com as técnicas atualmente conhecidas para essa mesma finalidade.

Fundamentos da invenção e estado da técnica:

[2] Conforme é de conhecimento da técnica, atualmente, ao se trabalhar com materiais metálicos, polímeros e compósitos para aplicações estruturais utilizam-se as propriedades mecânicas destes materiais para o dimensionamento. Tais propriedades são o módulo de elasticidade, de cisalhamento, de rigidez, o coeficiente de Poisson entre outras propriedades. Para se determinar essas propriedades, os materiais citados são submetidos à ensaios de tração, de compressão, de cisalhamento, de torção e entre outros, a fim de se observar padrões nas curvas resposta do material ensaiado. Os ensaios são realizados diversas vezes para corpos de prova de um mesmo material, e a curva resultante é uma curva padrão que atende às especificações de estatística descritiva e analítica, para descrever o material como um todo. Assim, com a elucidação de padrões na

curva resultante de um determinado material - como uma região linear, um ponto de máxima tração, ou compressão, o ponto de estricção, e uma constante de proporcionalidade - é possível dimensionar estruturas e ter uma previsão da durabilidade da mesma.

[3] Os ensaios mecânicos, geralmente são realizados e interpretados a fundo para os materiais mais utilizados na indústria, por motivos econômicos e técnicos. Por exemplo, no ensaio de tração de um metal, as regiões elásticas e plásticas são bem definidas e não necessitam de uma análise complexa matemática para identificar, como exemplo, a constante de elasticidade. Desta forma, é explicado o estudo, geralmente, apenas de materiais considerados homogêneos, pois possuem características lineares bem definidas. No entanto, na área biológica a maioria dos tecidos possui comportamento viscoelástico não linear sendo ocasionado, principalmente, pela presença de várias estruturas diferentes no material, como o colágeno, os vasos e a água. Assim, os profissionais da área médica e cirúrgica precisam ter conhecimento das propriedades mecânicas dos tecidos biológicos, na forma íntegra para, por exemplo, realizarem avaliações com diferentes medicamentos para a cicatrização intestinal. Ainda, com o conhecimento de uma curva padrão, ou resultante de ensaios mecânicos de tecidos biológicos, é possível realizar cirurgias da melhor maneira possível, atuando diretamente na camada do tecido com maior resistência, ou utilizar instrumentos - como fios de sutura mais ou menos resistentes - de acordo com a rigidez tecidual.

[4] Desta forma, há alguns pesquisadores que realizaram ensaios de tração em tecidos biológicos de animais

e compararam com os resultados de alguns tratamentos. Entretanto, as análises não mostram a discretização completa das curvas resultantes, sendo excluídas algumas propriedades dos materiais biológicos que ainda são desconhecidas. De outro modo, a construção de curvas padrão para os tecidos biológicos permitirá a extinção de experimentos e testes de resistência com animais sadios. E como se tratam de seres vivos, é necessário aproveitar ao máximo os dados extraídos dos experimentos.

[5] O documento US2013179093 descreve um método de caracterizar as propriedades viscoelásticas de amostras - que, por exemplo, podem ser de tecidos biológicos - por meio de ensaios mecânicos com excitação oscilatória, sendo extraídas as seguintes propriedades: tensão máxima sob excitação; morfologia da amostra sob excitação; fase de resposta do material; e amplitude de resposta do material. No entanto tal método não prevê um deslumbramento das propriedades de interesse passíveis de análises da invenção proposta, sendo estas representadas pela resistência mecânica por meio da delimitação das regiões do comportamento mecânico e das suas características peculiares, e não as propriedades viscoelásticas provenientes da oscilação imposta. Também os documentos US2015374275 e US2015038879 descrevem métodos do atual estado da técnica para a medição não invasiva de propriedades viscoelásticas e biomecânicas de tecidos biológicos destinados à medição de propriedades de tecidos moles à aplicação de uma força compressiva não invasiva, com o deslocamento, no sentido perpendicular ao local de medição com comportamento oscilatório. Assim, são extraídas as seguintes propriedades: estado de tensão

oscilatória; resistência à oscilação; elasticidade à oscilação; viscosidade à oscilação, e relaxamento mecânico. No entanto nenhum dos documentos citados permite avaliar as propriedades mecânicas de materiais biológicos sob ensaio de tração com velocidade constante, quais sejam: elasticidade tecidual; rigidez tecidual; limite de escoamento; limite de resistência; limite de elasticidade e carga de ruptura. Ademais compreendem métodos para medição das propriedades dos materiais apenas para processos não invasivos, e não para todos os ensaios de resistência de tecidos biológicos como é necessário. Além disso, os resultados obtidos com tais métodos representam propriedades generalizadas, e não características de cada região comportamental do tecido.

[6] Já o documento WO08151581 revela um método e um equipamento para medição de propriedades mecânicas em tecidos biológicos baseados em modelos físicos e sob experimentos de torção, compressão, oscilação e dobramento com uma massa inercial como carga, de modo que as propriedades medidas ou modeladas são: carga de ruptura; tempo ou deformação para ruptura; módulo de elasticidade sob oscilação; módulo de torção sob oscilação; viscosidade ao carregamento e frequência de oscilação resposta. Portanto, tal documento apresenta exclusivamente uma medição das propriedades por meio de equipamento específico, e não uma análise do comportamento do material. Além disso o documento mostra um equacionamento para se determinar as propriedades a partir de valores de tensores coletados, sendo que esse processo pode acarretar incertezas, pois o material biológico possui comportamento não linear. Ainda, o equacionamento do dito método precisa de um parâmetro à ser

estimado - o que pode influenciar nos valores de propriedades e não apresentar o seu real valor.

[7] Nota-se, portanto, que o atual estado da técnica carece de meios que permitam determinar as propriedades, as grandezas físicas e o comportamento mecânico dos tecidos biológicos em cada região de interesse, e para qualquer experimento de tração com velocidade constante. Busca-se, também, uma forma de análise de tecidos biológicos com validação por meio de estatística analítica, que permita descrever as reais propriedades dos materiais viscoelásticos não lineares, sem para tanto demandar a realização de testes *in vivo*.

Objetivos e vantagens da invenção:

[8] Em função do exposto acima, a presente invenção visa, basicamente, solucionar o problema técnico da atual dificuldade de se determinar propriedades mecânicas de tecidos que possuem comportamento viscoelástico não linear, os quais caracterizam-se pela presença de diferentes materiais como colágeno, vasos e água.

[9] Em função disso, é um dos objetivos da presente invenção revelar um método de análise e identificação de propriedades de materiais viscoelásticos não lineares que permitam obter a determinação (discretização) completa das curvas reológicas do comportamento viscoelástico não linear de tecidos biológicos sem que, para tanto, seja necessária a realização de experimentos e testes de resistência com animais vivos e sadios.

[10] É outro dentre os objetivos da presente invenção revelar um método passível de ser utilizado em procedimentos cirúrgicos, auxiliando o profissional a determinar as

melhores ferramentas para o processo.

[11] É também um dos principais objetivos da invenção prover um método que possa ser utilizado na área da cirurgia experimental, avaliando a eficiência e eficácia de diferentes tratamentos cirúrgicos e de medicamentos em comparação com análises de tecidos íntegros.

[12] Outros objetivos da invenção envolvem os seguintes aspectos: otimizar os processos de cultivo e preparação de tecidos vivos para enxertos; permitir a comparação das propriedades dos enxertos com o tecido real; na área de cirurgia ortopédica: na preparação de materiais sintéticos ou não para substituição de osso e cartilagem; na área alimentícia: na avaliação da resistência de diferentes partes de alimentos visando melhorar o desempenho de algumas variáveis adicionando tratamentos diferentes; na área dermatológica para avaliação de cosméticos, substituindo testes em animais; na odontologia: na preparação de materiais para usinagem de dentes ou estruturas semelhante, e também na confecção de próteses, por exemplo.

Sumário da invenção:

[13] Os objetivos acima mencionados são alcançados através do método de análise e identificação de propriedades de materiais viscoelásticos não lineares CARACTERIZADO pelo fato de compreender as seguintes etapas: (i) realização de ensaio de tração de material biológico, com aplicação de carga externa de tração, no sentido longitudinal do corpo de prova, sob velocidade constante; (ii) coleta automática de dados do ensaio de tração do tecido biológico por meio de

aplicativo computacional; (iii) ajuste matemático dos dados do ensaio de tração dos tecidos biológicos mediante a aplicação do modelo sigmoidal de Boltzmann, seguindo a

$$Y = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} \quad (1)$$

Equação 1, sendo Y a carga aplicada, x a elongação, os parâmetros A1 e A2 correspondendo, respectivamente, às assíntotas inferior e superior, x0 representa o ponto de inflexão médio da curva e dx o nível de espalhamento da curva; (iv) correlação dos coeficientes de determinação (R2) entre as curvas pré e pós modelagem por meio de análise estatística; (v) aplicação da derivação numérica de primeira ordem regressiva, progressiva ou centrada para cada ponto da

$$D^1(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (2)$$

curva modelada, segundo a Equação 2, como exemplo da apresentação da derivação regressiva, sendo D1(x) a derivada numérica de primeira ordem aplicada no ponto x do eixo das abscissas da curva ajustada, h o intervalo do eixo das abscissas associado aos pontos f(x+h) e f(x) do eixo das ordenadas, os quais correspondem à carga de tração nos pontos (x+h) e x, respectivamente; (vi) determinação de regiões das curvas representantes do comportamento viscoelástico não linear de tecidos biológicos onde as derivadas numéricas de primeira ordem são constantes, por meio de parâmetros estatísticos; (vii) aplicação da derivação numérica de segunda ordem para cada ponto da curva ajustada, segundo a Equação 3, como exemplo da apresentação da derivação regressiva, sendo D2(x) a derivada numérica de segunda ordem,

na forma regressiva, progressiva ou centrada, aplicada no ponto x do eixo das abscissas da curva ajustada, h o intervalo do eixo das abscissas entre os pontos $f(x+h)$ e $f(x)$ do eixo das ordenadas correspondente a carga de tração nos pontos $(x+h)$ e x , respectivamente, e entre os pontos $f(x+2h)$ e $f(x+h)$ do eixo das ordenadas correspondente a carga de tração nos pontos $(x+2h)$ e $(x+h)$, respectivamente;

(viii) determinação de regiões da curva em que a derivada numérica de segunda ordem troca de sinal algébrico e constatação dos pontos em que a derivada numérica de primeira ordem é máxima e mínima, ou seja, os pontos onde a derivada numérica de segunda ordem é nula;

(ix) certificação entre o primeiro ponto da curva em que a derivada numérica de segunda ordem é nula (derivada numérica de primeira ordem máxima) e o segundo ponto da curva em que a derivada numérica de segunda ordem é nula (derivada numérica de primeira ordem mínima);

(x) com a constatação dos pontos de derivada numérica de segunda ordem nula, no ponto onde a derivada numérica de primeira ordem é máxima ocorre a troca de concavidade da curva de negativo para positivo, sendo este o ponto de inflexão 1 (P1); e no ponto onde a derivada numérica de primeira ordem é mínima existe a mudança de concavidade de positivo para negativo, sendo este o ponto de inflexão 2 (P2);

(xi) discretização da curva referente ao ensaio mecânico de tração de tecido biológico ajustada para um modelo matemático sigmoideal de Boltzmann em três regiões, sendo que a primeira região situa-se entre a origem (Pi) e

$$D^2(x) = \frac{f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x)}{h^2} \quad (3)$$

o ponto de derivada numérica de primeira ordem máxima (ponto

de inflexão 1 - P1); a segunda região apresenta-se entre os pontos de inflexão 1 e 2 (P1 e P2), o ponto de derivada numérica de primeira ordem máxima e o ponto de derivada numérica de primeira ordem mínima (ponto de inflexão 2 - P2), e a terceira região situa-se entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf); (xii) após o processo de discretização das curvas provenientes do ensaio mecânico, três regiões podem ser definidas e analisadas separadamente: região entre a origem (Pi) e o ponto de inflexão 1 (P1); região entre o ponto de inflexão 1 (P1) e o ponto de inflexão 2 (P2); e região entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf); (xiii) representação esquemática contendo todas as propriedades caracterizadas e identificadas referentes aos materiais biológicos com comportamento viscoelástico não linear sob ensaio mecânico de tração longitudinal.

[14] Preferencialmente a definição e análise da região entre a origem (Pi) e o ponto de inflexão 1 (P1) compreende as seguintes etapas:

- aplicação da derivada numérica de primeira ordem, ponto a ponto, sequencial, pertencentes à região entre os pontos Pi e P1;
- determinação da constância dos valores para a derivada numérica de primeira ordem para cada ponto da região entre os pontos Pi e P1 por meio de parâmetros de estatística analítica;
- constatação da linearidade presente na região entre os pontos Pi e P1, mostrando a existência de um parâmetro de proporcionalidade para esta região;
- caracterização da constante de proporção, existente

para a região entre os pontos P_i e P_1 , como sendo a derivada numérica de primeira ordem para esses pontos, sendo que o valor da derivada numérica de primeira ordem é constante;

- verificação que a constante de proporção para a região entre os pontos P_i e P_1 é uma constante de elasticidade para o material biológico nesta região;

- nomeação da constante de proporção ou da constante de elasticidade para a região entre os pontos P_i e P_1 para o ensaio mecânico de tração longitudinal de material biológico com comportamento viscoelástico não linear como elasticidade tecidual (KT);

- identificação do ponto P_1 como sendo o ponto de limite de elasticidade do material (LEL);

- nomeação da região entre os pontos P_i e P_1 como região elástica de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear.

[15] Também segundo uma concretização preferencial da invenção, a definição e análise da região entre o ponto de inflexão 1 (P_1) e o ponto de inflexão 2 (P_2) compreende as seguintes etapas:

- aplicação da derivada numérica de primeira ordem a cada ponto da região entre os pontos P_1 e P_2 da curva referente ao ensaio mecânico de tração de material biológico;

- constatação da constância dos valores para a derivada numérica de primeira ordem de cada ponto da região entre os pontos P_1 e P_2 por meio de parâmetros de estatística analítica;

- determinação da linearidade presente na região entre

os pontos P1 e P2, mostrando a existência de um parâmetro de proporcionalidade para esta região;

- caracterização da constante de proporção existente para a região entre os pontos P1 e P2 como sendo a derivada numérica de primeira ordem para esses pontos, sendo que o valor da derivada numérica de primeira ordem é constante;

- nomeação da constante de proporção para a região entre os pontos P1 e P2 para o ensaio mecânico de tração longitudinal de material biológico com comportamento viscoelástico não linear como rigidez tecidual (KR);

- nomeação da região entre os pontos P1 e P2 como região elastoplástica de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear;

- constatação de que a rigidez tecidual (KR) sempre possuirá módulo maior que a elasticidade tecidual (KT).

[16] Também preferencialmente a definição e análise da região entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf) compreende as seguintes etapas:

- aplicação de testes de comparações por meios de estatística analítica para as derivadas numéricas de primeira e segunda ordem nesta região;

- observação da não existência de padrões ou semelhança em termos de derivada numérica de primeira ordem e de segunda ordem;

- nomeação da região entre os pontos P2 e Pf como região de escoamento puro;

- identificação do ponto de máxima carga aplicada ao material biológico nesta região, sendo o ponto de derivada numérica de primeira ordem com valor nulo, ou

- seja, o único ponto sem inclinação da curva;
- nomeação do ponto onde a derivada numérica de primeira ordem possui valor nulo como limite de resistência do material (LR);
 - nomeação do ponto P2 em que a região de escoamento puro é iniciada como sendo o limite de escoamento do material (LES);
 - identificação do ponto final do experimento (Pf) como sendo o ponto da carga de ruptura (CR).

Breve descrição das figuras:

[17] Para obter total e completa visualização do objeto desta invenção, são apresentadas figuras às quais se faz referência, conforme se segue.

[18] A Figura 1 mostra um gráfico representativo da carga externa em função da elongação do material, nas regiões em que as derivadas numéricas de primeira ordem são constantes;

[19] A Figura 2 mostra um gráfico análogo ao da Figura 1 contendo, porém, a indicação em uma curva de ensaio mecânico do comportamento da derivada numérica de segunda ordem;

[20] A Figura 3 mostra um gráfico de carga externa em função da elongação do material com pontos de derivada numérica de primeira ordem máxima e mínima;

[21] A Figura 4 mostra um gráfico com a localização dos pontos de inflexão de uma curva de ensaio mecânico de tração para tecidos biológicos de acordo com uma concretização preferencial da presente invenção;

[22] A Figura 5 mostra um gráfico de carga externa em função da elongação do material com pontos delimitadores das

três regiões existentes em curva de ensaio mecânico de tração para tecidos biológicos;

[23] A Figura 6 mostram um gráfico contendo a representação de elasticidade tecidual na região elástica de material biológico sob tração longitudinal;

[24] A Figura 7 mostra um gráfico com a representação da rigidez tecidual na região elastoplástica de tecido biológico sob ensaio de tração longitudinal; e

[25] A Figura 8 mostra um gráfico representativo da curva de ensaio de tração longitudinal de tecido biológico com comportamento viscoelástico não linear contendo todas as propriedades e padrões identificados.

Descrição detalhada da invenção:

[26] O objeto da presente invenção passará a ser mais detalhadamente descrito e explicado com base nos desenhos apensos, que possuem caráter meramente exemplificativo e não limitativo, posto que adaptações e modificações podem ser feitas sem que, com isso, se fuja do escopo da proteção reivindicada.

[27] O método de análise e identificação de propriedades de materiais viscoelásticos não lineares proposto na presente invenção é constituído pelo processo de análise das curvas representativas de comportamento da pele, tubo digestório, vasos sanguíneos e órgãos parenquimatosos, tecidos biológicos esses com propriedade viscoelástica não linear, sob carga externa de tração e velocidade constante. A originalidade desse método baseia-se no processo de definição dos períodos característicos para materiais biológicos com propriedades viscoelásticas não lineares, com o intuito de facilitar a análise e simplificar a

interpretação das propriedades físicas de materiais biológicos.

[28] A descrição sequencial do método para discretização das curvas e a identificação de cada região da função é apresentada por meio das etapas indicadas a seguir:

[29] 1. Realização de ensaio de tração de material biológico, com aplicação de carga externa de tração, no sentido longitudinal do corpo de prova, sob velocidade constante;

[30] 2. Coleta automática de dados do ensaio de tração do tecido biológico por meio de aplicativo computacional;

[31] 3. Ajuste matemático dos dados do ensaio de tração dos tecidos biológicos mediante a aplicação do modelo

$$Y = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} \quad (1)$$

sigmoidal de Boltzmann, seguindo a Equação 1, sendo Y a carga aplicada, x a elongação, os parâmetros A_1 e A_2 correspondem, respectivamente, às assíntotas inferior e superior, x_0 representa o ponto de inflexão médio da curva e dx o nível de espalhamento;

[32] 4. Correlação dos coeficientes de determinação (R^2) entre as curvas pré e pós modelagem por meio de análise estatística;

[33] 5. Aplicação da derivação numérica de primeira ordem, regressiva, progressiva ou centrada, para cada ponto da curva modelada, segundo a Equação 2, como exemplo da apresentação da derivação regressiva, sendo $D^1(x)$ a derivada numérica de primeira ordem aplicada no ponto x do eixo das

$$D^1(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (2)$$

abscissas da curva ajustada, h o intervalo do eixo das abscissas associado aos pontos $f(x+h)$ e $f(x)$ do eixo das ordenadas, os quais correspondem à carga de tração nos pontos $(x+h)$ e x , respectivamente;

[34] 6. Determinação de regiões das curvas representantes do comportamento viscoelástico não linear de tecidos biológicos onde as derivadas numéricas de primeira ordem são constantes, por meio de parâmetros estatísticos. A Figura 1 mostra uma curva genérica representativa de ensaio de tração longitudinal de materiais biológicos com indicação das regiões em que as derivadas numéricas de primeira ordem são constantes, regiões A e B;

[35] 7. Aplicação da derivação numérica de segunda ordem, na forma regressiva, progressiva ou centrada, para cada ponto da curva ajustada, segundo a Equação 3, como exemplo da apresentação da derivação regressiva, sendo $D^2(x)$

$$D^2(x) = \frac{f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x)}{h^2} \quad (3)$$

a derivada numérica de segunda ordem aplicada no ponto x do eixo das abscissas da curva ajustada, h o intervalo do eixo das abscissas entre os pontos $f(x+h)$ e $f(x)$ do eixo das ordenadas correspondente a carga de tração nos pontos $(x+h)$ e x , respectivamente, e entre os pontos $f(x+2h)$ e $f(x+h)$ do eixo das ordenadas correspondente a carga de tração nos pontos $(x+2h)$ e $(x+h)$, respectivamente;

[36] 8. Determinação de regiões da curva em que a derivada numérica de segunda ordem troca de sinal algébrico e constatação dos pontos em que a derivada numérica de primeira ordem é máxima e mínima, ou seja, os pontos onde a derivada numérica de segunda ordem é nula. A Figura 2 mostra

uma curva genérica de comportamento de material biológico sob ensaio de tração longitudinal com indicações do comportamento da derivada numérica de segunda ordem (D^2) para cada região e nos pontos em que o seu valor é nulo;

[37] 9. Certificação entre o primeiro ponto da curva em que a derivada numérica de segunda ordem é nula (derivada numérica de primeira ordem máxima) e o segundo ponto da curva em que a derivada numérica de segunda ordem é nula (derivada numérica de primeira ordem mínima). A Figura 3 mostra o ponto em que a derivada numérica de primeira ordem é máxima (Max D^1) e onde esta é mínima (Min D^1);

[38] 10. Com a constatação dos pontos de derivada numérica de segunda ordem nula (Figura 2), os pontos de inflexão da curva são definidos na Figura 4. Observa-se que no ponto onde a derivada numérica de primeira ordem é máxima ocorre a troca de concavidade da curva de negativo para positivo (Figura 3), sendo este o ponto de inflexão 1 (P1). No ponto onde a derivada numérica de primeira ordem é mínima existe a mudança de concavidade de positivo para negativo (Figura 3), sendo este o ponto de inflexão 2 (P2). Esse passo é explicado também pela análise do sinal algébrico da derivada numérica de segunda ordem antes e depois dos pontos de máxima e de mínima derivada numérica de primeira ordem;

[39] 11. Discretização da curva referente ao ensaio mecânico de tração de tecido biológico ajustada para um modelo matemático sigmoideal de Boltzmann em três regiões. A primeira região situa-se entre a origem (P_i) e o ponto de derivada numérica de primeira ordem máxima (ponto de inflexão 1 - P1), enquanto que a segunda apresenta-se entre os pontos de inflexão 1 e 2 (P1 e P2), o ponto de derivada numérica de

primeira ordem máxima e o ponto de derivada numérica de primeira ordem mínima (ponto de inflexão 2 - P2), e, por final, a terceira região situa-se entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf). Essas informações são mostradas na Figura 5;

[40] 12. Após o processo de discretização das curvas provenientes do ensaio mecânico, três regiões podem ser definidas e analisadas separadamente:

[41] 13. Região entre a origem (Pi) e o ponto de inflexão 1 (P1):

- a. Aplicação da derivada numérica de primeira ordem, ponto a ponto, sequencial, pertencentes à região entre os pontos Pi e P1;
- b. Determinação da constância dos valores para a derivada numérica de primeira ordem para cada ponto da região entre os pontos Pi e P1 por meio de parâmetros de estatística analítica;
- c. Constatação da linearidade presente na região entre os pontos Pi e P1, mostrando a existência de um parâmetro de proporcionalidade para esta região;
- d. Caracterização da constante de proporção, existente para a região entre os pontos Pi e P1, como sendo a derivada numérica de primeira ordem para esses pontos, sendo que o valor da derivada numérica de primeira ordem é constante;
- e. Verificação que a constante de proporção para a região entre os pontos Pi e P1 é uma constante de elasticidade para o material biológico nesta região;
- f. Nomeação da constante de proporção ou da constante de elasticidade para a região entre os pontos Pi e P1 para

o ensaio mecânico de tração longitudinal de material biológico com comportamento viscoelástico não linear como elasticidade tecidual (K_T). A Figura 6 mostra a representação da elasticidade tecidual (K_T) para a curva aproximada nesta região, como sendo a inclinação da curva nesta região, que foi comprovada como sendo uma curva linear (reta);

- g. Identificação do ponto P1 como sendo o ponto de limite de elasticidade do material (L_{EL});
- h. Nomeação da região entre os pontos P1 e P2 como região elástica de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear.

[42] 14. Região entre o ponto de inflexão 1 (P1) e o ponto de inflexão 2 (P2):

- a. Aplicação da derivada numérica de primeira ordem a cada ponto da região entre os pontos P1 e P2 da curva referente ao ensaio mecânico de tração de material biológico;
- b. Constatação da constância dos valores para a derivada numérica de primeira ordem de cada ponto da região entre os pontos P1 e P2 por meio de parâmetros de estatística analítica;
- c. Determinação da linearidade presente na região entre os pontos P1 e P2, mostrando a existência de um parâmetro de proporcionalidade para esta região;
- d. Caracterização da constante de proporção existente para a região entre os pontos P1 e P2 como sendo a derivada numérica de primeira ordem para esses pontos, sendo que o valor da derivada numérica de primeira ordem é constante;

- e. Nomeação da constante de proporção para a região entre os pontos P1 e P2 para o ensaio mecânico de tração longitudinal de material biológico com comportamento viscoelástico não linear como rigidez tecidual (K_R). A Figura 7 mostra a representação da rigidez tecidual (K_R) como sendo a inclinação da curva nesta região, que foi comprovada como sendo uma curva linear (reta);
 - f. Nomeação da região entre os pontos P1 e P2 como região elastoplástica de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear;
 - g. Constatação de que a rigidez tecidual (K_R) sempre possuirá módulo maior que a elasticidade tecidual (K_T).
- [43] 15. Região entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf):
- a. Aplicação de testes de comparações por meios de estatística analítica para as derivadas numéricas de primeira e segunda ordem nesta região;
 - b. Observação da não existência de padrões ou semelhança em termos de derivada numérica de primeira ordem e de segunda ordem;
 - c. Nomeação da região entre os pontos P2 e Pf como região de escoamento puro;
 - d. Identificação do ponto de máxima carga aplicada ao material biológico nesta região, sendo o ponto de derivada numérica de primeira ordem com valor nulo, ou seja, o único ponto sem inclinação da curva;
 - e. Nomeação do ponto onde a derivada numérica de primeira ordem possui valor nulo como limite de resistência do material (L_R);
 - f. Nomeação do ponto P2 em que a região de escoamento puro

é iniciada como sendo o limite de escoamento do material (L_{ES});

g. Identificação do ponto final do experimento (Pf) como sendo o ponto da carga de ruptura (CR).

[44] 16. Figura 8 - Representação esquemática contendo todas as propriedades caracterizadas e identificadas referentes aos materiais biológicos com comportamento viscoelástico não linear sob ensaio mecânico de tração longitudinal.

[45] A etapa indispensável para esse método inovador é a análise da linearidade das curvas resposta, ao ensaio mecânico, de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear. Primeiramente, avaliar as derivadas ou tangentes de cada ponto do experimento, sendo constatado que há duas regiões de linearidade, comprovadas utilizando testes estatísticos adequados. A primeira região, entre a origem e o ponto de inflexão positivo da curva - ou ponto de máxima derivada - caracteriza-se como uma região predominantemente elástica. Essa região, como sendo linear, permite extrair um valor de proporcionalidade entre a variável dependente (força, pressão, tenção, tração) e a variável independente (alongação, tempo, velocidade). O valor desta constante de proporcionalidade possui significado semelhante ao módulo de Young para os materiais com comportamentos lineares, sendo para os materiais biológicos determinado como a elasticidade tecidual. A segunda região de importância para o método, é a região entre os dois pontos de inflexão de uma curva de resposta de material biológico sob tração. Ao se aplicar a derivada ou a tangente de cada ponto, nota-se que não há diferença

estatisticamente significativa para esses valores, utilizando os testes estatísticos adequados. De mesma forma que para a primeira região, há uma constante de proporcionalidade, que nessa região chama-se rigidez tecidual.

[46] Assim, com esses valores de constantes de proporcionalidade, é possível prever o comportamento de materiais biológicos. Ainda, o método diferencia-se de todas as invenções semelhantes por meio da quantificação, caracterização e identificação de padrões no comportamento mecânico de materiais biológicos, permitindo uma análise comparativa robusta para com outros tecidos ou materiais. Ainda, o método identifica propriedades mecânicas dos tecidos biológicos nunca estudadas, o que pode auxiliar várias áreas, como na confecção de novos medicamentos e novas técnicas cirúrgicas.

[47] Cabe enfatizar que as principais aplicações da presente invenção se inserem: (i) na área médica, em procedimentos cirúrgicos, auxiliando o profissional a determinar as melhores ferramentas para o processo; (ii) na área de cirurgia experimental, evitando a eutanásia desnecessária de animais, cuja avaliação e mapeamento já foi realizada anteriormente; (iii) na área de cirurgia experimental, avaliando a eficiência e eficácia de diferentes tratamentos cirúrgicos e de medicamentos em comparação com análises de tecidos íntegros; (iv) na área de cirurgia plástica, com o cultivo e preparação de tecidos vivos para enxertos. Sendo possível a comparação das propriedades dos enxertos com o tecido real; (v) na área de cirurgia ortopédica, na preparação de materiais sintéticos

ou não para substituição de osso e cartilagem; (vi) na área alimentícia, na avaliação da resistência de diferentes partes de alimentos visando melhorar o desempenho de algumas variáveis adicionando tratamentos diferentes, sendo que esse método pode servir como um método de comparação entre a atuação de diferentes produtos no quesito resistência de alimentos; (vii) na área dermatológica para avaliação de cosméticos, substituindo testes em animais; e (viii) na odontologia na preparação de materiais para usinagem de dentes ou estruturas semelhantes, e também na confecção de próteses.

REIVINDICAÇÕES

1. Método de análise e identificação de propriedades de materiais viscoelásticos não lineares, **CARACTERIZADO** pelo fato de compreender as seguintes etapas:

- realização de ensaio de tração de material biológico, com aplicação de carga externa de tração, no sentido longitudinal do corpo de prova, sob velocidade constante;
- coleta automática de dados do ensaio de tração do tecido biológico por meio de aplicativo computacional;
- ajuste matemático dos dados do ensaio de tração dos tecidos biológicos mediante a aplicação do modelo sigmoidal de Boltzmann, seguindo a Equação 1,

$$Y = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} \quad (1)$$

sendo Y a carga aplicada, x a elongação, os parâmetros A_1 e A_2 correspondendo, respectivamente, às assíntotas inferior e superior, x_0 representa o ponto de inflexão médio da curva e dx o nível de espalhamento;

- correlação dos coeficientes de determinação (R^2) entre as curvas pré e pós modelagem por meio de análise estatística;
- aplicação da derivação numérica de primeira ordem, na forma regressiva, progressiva ou centrada, para cada ponto

$$D^1(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (2)$$

da curva modelada, segundo a Equação 2, como exemplo da apresentação da derivação regressiva:

sendo $D^1(x)$ a derivada numérica de primeira ordem aplicada no ponto x do eixo das abscissas da curva ajustada,

h o intervalo do eixo das abscissas associado aos pontos $f(x+h)$ e $f(x)$ do eixo das ordenadas, os quais correspondem à carga de tração nos pontos $(x+h)$ e x , respectivamente;

- determinação de regiões das curvas representantes do comportamento viscoelástico não linear de tecidos biológicos onde as derivadas numéricas de primeira ordem são constantes, por meio de parâmetros estatísticos;

- aplicação da derivação numérica de segunda ordem, na forma regressiva, progressiva ou centrada, para cada ponto

$$D^2(x) = \frac{f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x)}{h^2} \quad (3)$$

da curva ajustada, segundo a Equação 3, como exemplo da apresentação da derivação regressiva:

sendo $D^2(x)$ a derivada numérica de segunda ordem aplicada no ponto x do eixo das abscissas da curva ajustada, h o intervalo do eixo das abscissas entre os pontos $f(x+h)$ e $f(x)$ do eixo das ordenadas correspondente a carga de tração nos pontos $(x+h)$ e x , respectivamente, e entre os pontos $f(x+2h)$ e $f(x+h)$ do eixo das ordenadas correspondente a carga de tração nos pontos $(x+2h)$ e $(x+h)$, respectivamente;

- determinação de regiões da curva em que a derivada numérica de segunda ordem troca de sinal algébrico e constatação dos pontos em que a derivada numérica de primeira ordem é máxima e mínima, ou seja, os pontos onde a derivada numérica de segunda ordem é nula;

- certificação entre o primeiro ponto da curva em que a derivada numérica de segunda ordem é nula (derivada numérica de primeira ordem máxima) e o segundo ponto da curva em que a derivada numérica de segunda ordem é nula (derivada numérica de primeira ordem mínima);

- com a constatação dos pontos de derivada numérica de segunda ordem nula, no ponto onde a derivada numérica de primeira ordem é máxima ocorre a troca de concavidade da curva de negativo para positivo, sendo este o ponto de inflexão 1 (P1); e no ponto onde a derivada numérica de primeira ordem é mínima existe a mudança de concavidade de positivo para negativo, sendo este o ponto de inflexão 2 (P2);

- discretização da curva referente ao ensaio mecânico de tração de tecido biológico ajustada para um modelo matemático sigmoideal de Boltzmann em três regiões, sendo que a primeira região situa-se entre a origem (Pi) e o ponto de derivada numérica de primeira ordem máxima (ponto de inflexão 1 - P1); a segunda região apresenta-se entre os pontos de inflexão 1 e 2 (P1 e P2), o ponto de derivada numérica de primeira ordem máxima e o ponto de derivada numérica de primeira ordem mínima (ponto de inflexão 2 - P2), e a terceira região situa-se entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf);

- após o processo de discretização das curvas provenientes do ensaio mecânico, três regiões podem ser definidas e analisadas separadamente: região entre a origem (Pi) e o ponto de inflexão 1 (P1); região entre o ponto de inflexão 1 (P1) e o ponto de inflexão 2 (P2); e região entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf);

- representação esquemática contendo todas as propriedades caracterizadas e identificadas referentes aos materiais biológicos com comportamento viscoelástico não linear sob ensaio mecânico de tração longitudinal.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO**

pelo fato de que definição e análise da região entre a origem (P_i) e o ponto de inflexão 1 (P_1) compreende as seguintes etapas:

- aplicação da derivada numérica de primeira ordem, ponto a ponto, sequencial, pertencentes à região entre os pontos P_i e P_1 ;
- determinação da constância dos valores para a derivada numérica de primeira ordem para cada ponto da região entre os pontos P_i e P_1 por meio de parâmetros de estatística analítica;
- constatação da linearidade presente na região entre os pontos P_i e P_1 , mostrando a existência de um parâmetro de proporcionalidade para esta região;
- caracterização da constante de proporção, existente para a região entre os pontos P_i e P_1 , como sendo a derivada numérica de primeira ordem para esses pontos, sendo que o valor da derivada numérica de primeira ordem é constante;
- verificação que a constante de proporção para a região entre os pontos P_i e P_1 é uma constante de elasticidade para o material biológico nesta região;
- nomeação da constante de proporção ou da constante de elasticidade para a região entre os pontos P_i e P_1 para o ensaio mecânico de tração longitudinal de material biológico com comportamento viscoelástico não linear como elasticidade tecidual (KT);
- identificação do ponto P_1 como sendo o ponto de limite de elasticidade do material (L_{EL});
- nomeação da região entre os pontos P_i e P_1 como região elástica de tecidos biológicos com comportamento

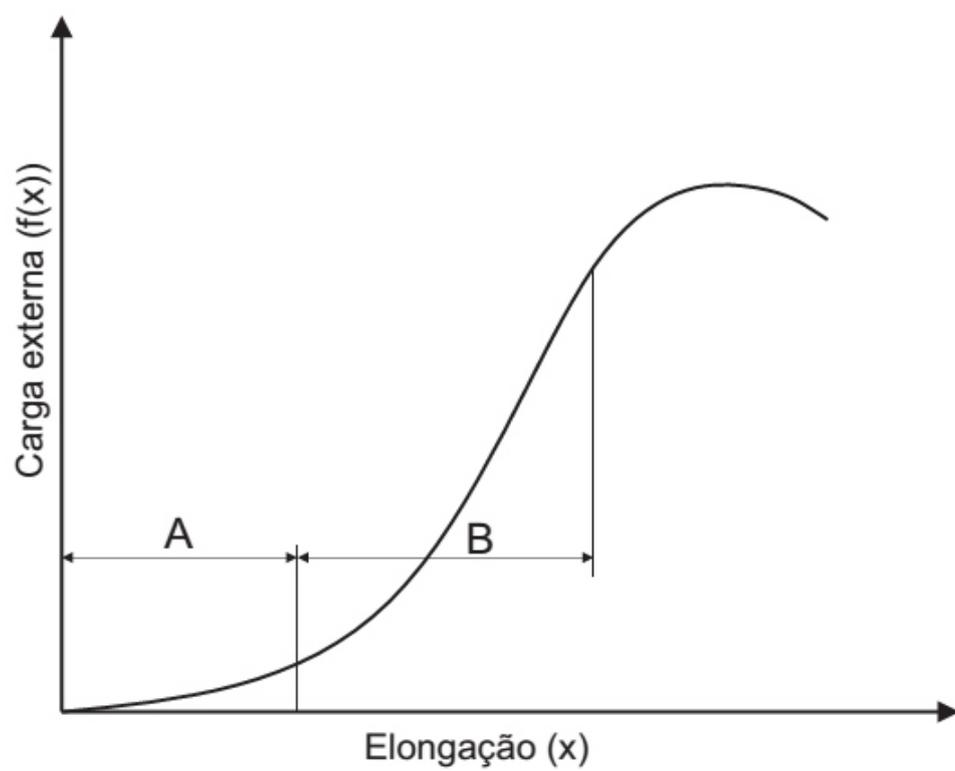
viscoelástico não linear.

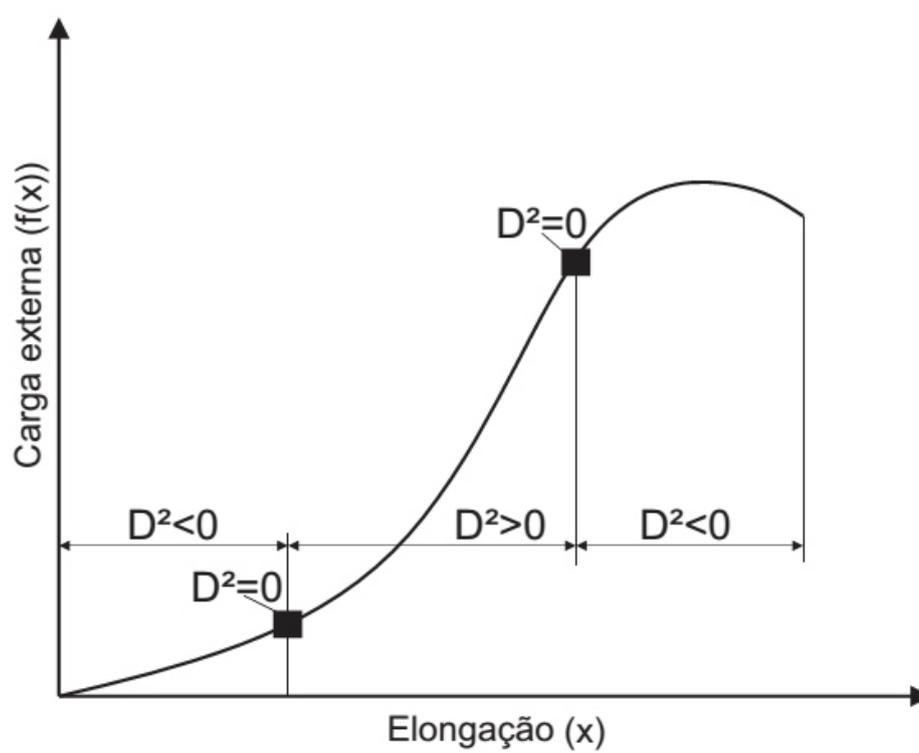
3. Método de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que definição e análise da região entre o ponto de inflexão 1 (P1) e o ponto de inflexão 2 (P2) compreende as seguintes etapas:

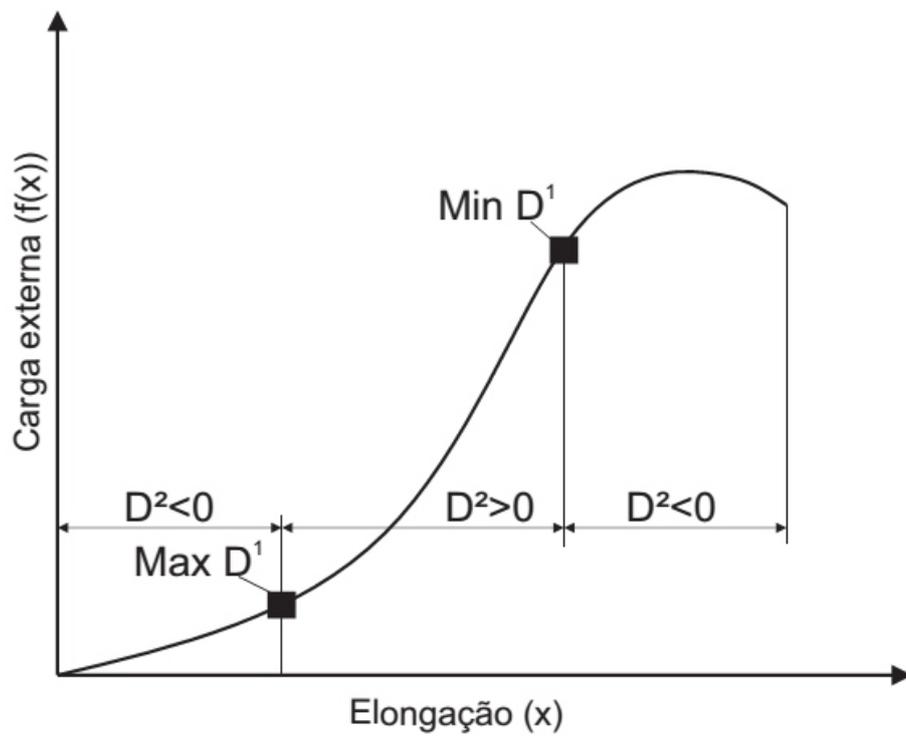
- aplicação da derivada numérica de primeira ordem a cada ponto da região entre os pontos P1 e P2 da curva referente ao ensaio mecânico de tração de material biológico;
- constatação da constância dos valores para a derivada numérica de primeira ordem de cada ponto da região entre os pontos P1 e P2 por meio de parâmetros de estatística analítica;
- determinação da linearidade presente na região entre os pontos P1 e P2, mostrando a existência de um parâmetro de proporcionalidade para esta região;
- caracterização da constante de proporção existente para a região entre os pontos P1 e P2 como sendo a derivada numérica de primeira ordem para esses pontos, sendo que o valor da derivada numérica de primeira ordem é constante;
- nomeação da constante de proporção para a região entre os pontos P1 e P2 para o ensaio mecânico de tração longitudinal de material biológico com comportamento viscoelástico não linear como rigidez tecidual (K_R);
- nomeação da região entre os pontos P1 e P2 como região elastoplástica de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear;
- constatação de que a rigidez tecidual (K_R) sempre possuirá módulo maior que a elasticidade tecidual (K_T).

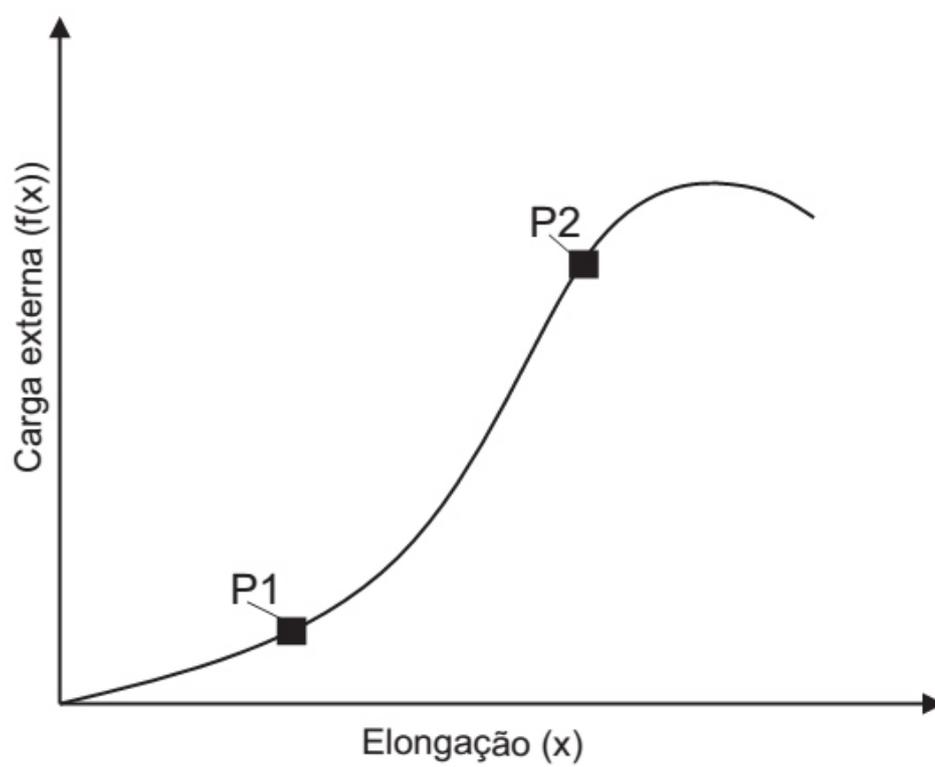
4. Método de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que definição e análise da região entre o ponto de inflexão 2 (P2) e o ponto final do ensaio (Pf) compreende as seguintes etapas:

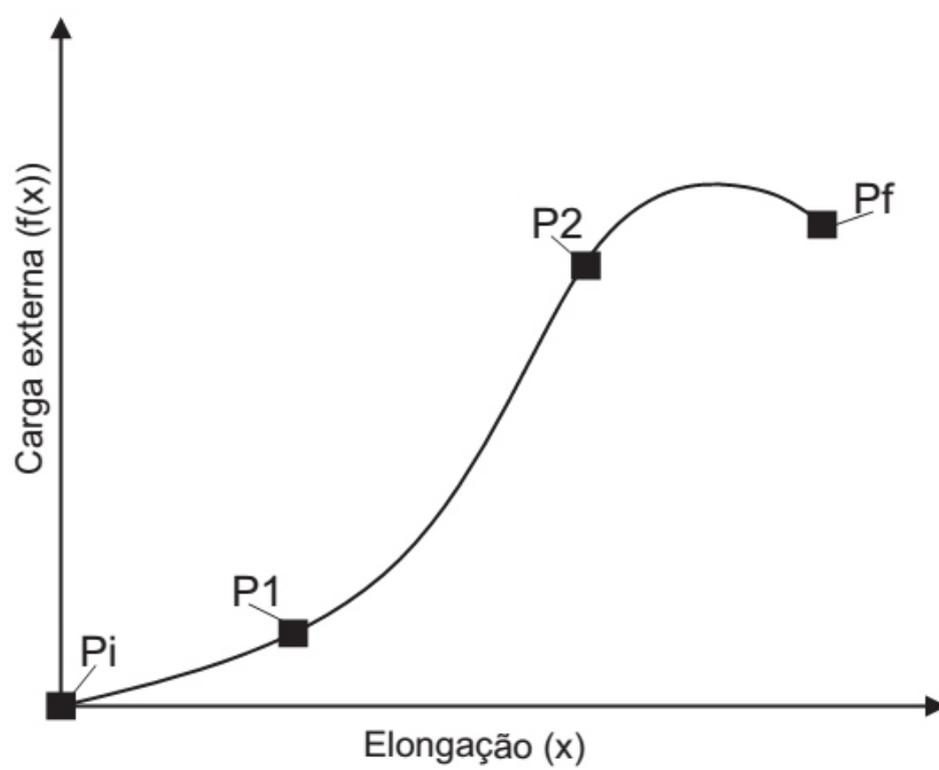
- aplicação de testes de comparações por meios de estatística analítica para as derivadas numéricas de primeira e segunda ordem nesta região;
- observação da não existência de padrões ou semelhança em termos de derivada numérica de primeira ordem e de segunda ordem;
- nomeação da região entre os pontos P2 e Pf como região de escoamento puro;
- identificação do ponto de máxima carga aplicada ao material biológico nesta região, sendo o ponto de derivada numérica de primeira ordem com valor nulo, ou seja, o único ponto sem inclinação da curva;
- nomeação do ponto onde a derivada numérica de primeira ordem possui valor nulo como limite de resistência do material (L_R);
- nomeação do ponto P2 em que a região de escoamento puro é iniciada como sendo o limite de escoamento do material (L_{ES});
- identificação do ponto final do experimento (Pf) como sendo o ponto da carga de ruptura (C_R).

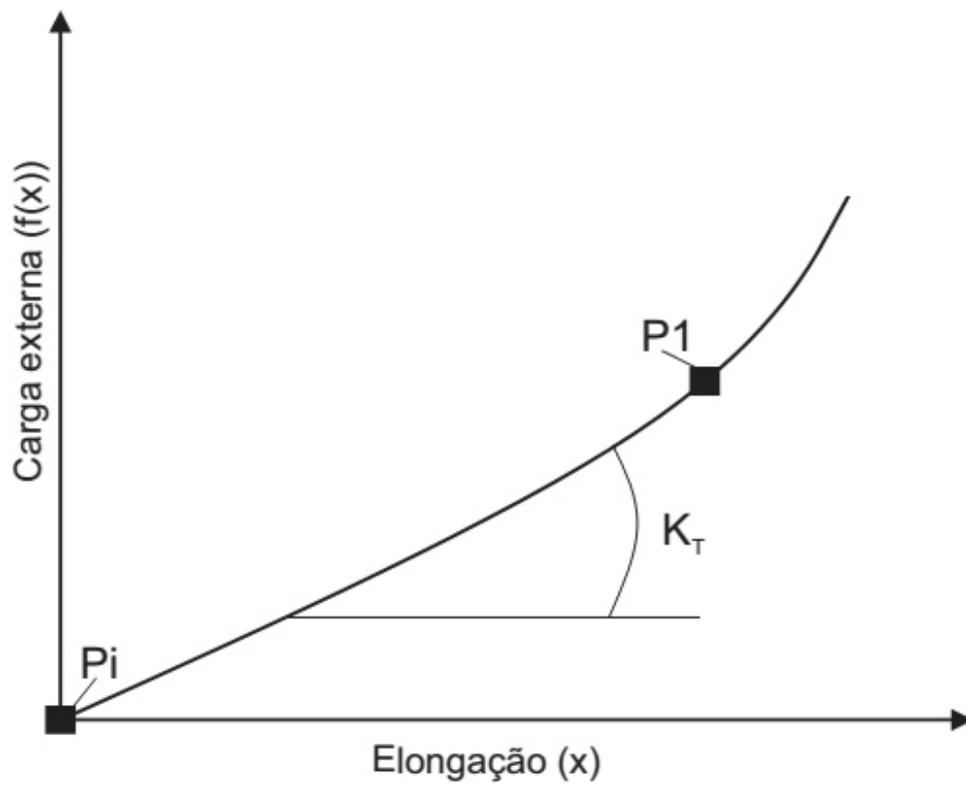
**Fig. 1**

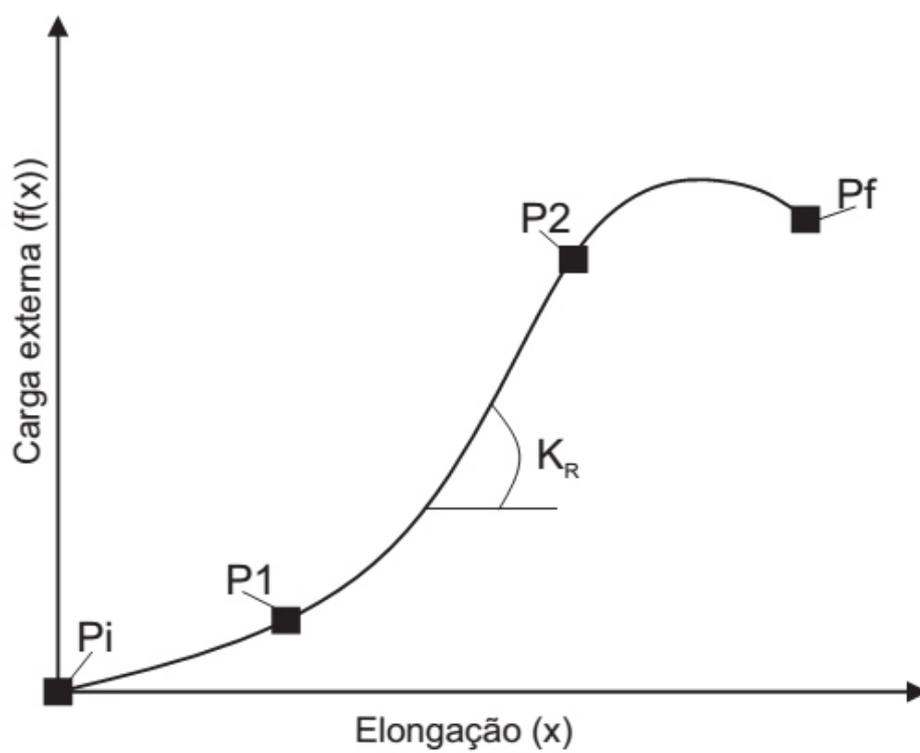
**Fig. 2**

**Fig. 3**

**Fig. 4**

**Fig. 5**

**Fig. 6**

**Fig. 7**

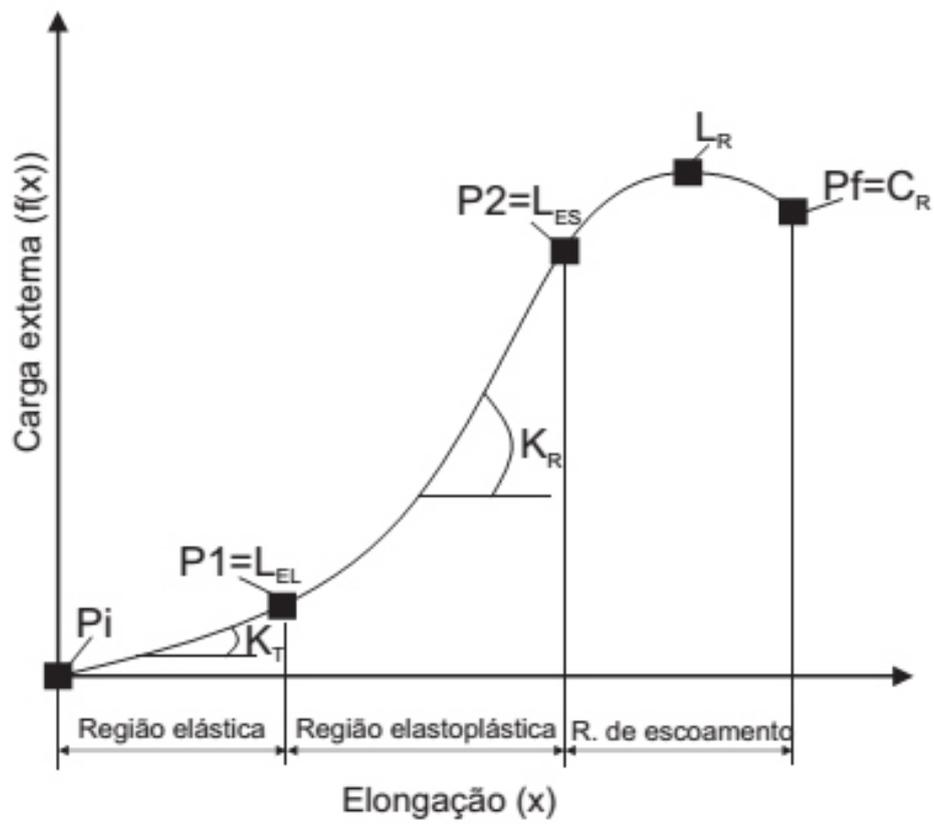


Fig. 8

RESUMO**MÉTODO DE ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
MATERIAIS VISCOELÁSTICOS NÃO LINEARES**

A presente invenção se insere no campo técnico dos tecidos biológicos e compreende, mais especificamente, um método constituído pelo processo de análise das curvas representativas de comportamento da pele, tubo digestório, vasos sanguíneos e órgãos parenquimatosos, tecidos biológicos esses com propriedade viscoelástica não linear, sob carga externa de tração e velocidade constante. A etapa indispensável para esse método inovador é a análise da linearidade das curvas resposta, ao ensaio mecânico, de tecidos biológicos com comportamento viscoelástico não linear.