

Predição do Comportamento Mecânico de Segmentos de Cólon Descendente de Ratos por meio do Modelo Sigmoidal de Boltzmann

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN¹, HUEI DIANA LEE², MAKSOEL AGUSTIN KRAUSPENHAR NIZ¹, MÁRIO CÉSAR CRISPIM DA SILVA¹, CLÁUDIO SADY RODRIGUES COY³, JUVENAL RICARDO NAVARRO GÓES⁴, FENG CHUNG WU⁵, JOÃO JOSÉ FAGUNDES³.

¹Estagiário do Laboratório de Bioinformática (LABI), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Parque Tecnológico Itaipu (PTI), Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

²Professora Doutora da UNIOESTE e Coordenadora geral do LABI – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

³Professor Doutor do Departamento de Cirurgia (D.M.A.D.), Serviço de Coloproctologia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil.

⁴Professor Titular e Chefe do Departamento de Cirurgia da Faculdade de Ciências Médicas da UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

⁵Pesquisador do Serviço de Coloproctologia da Faculdade de Ciências Médicas da UNICAMP, Campinas, SP, Brasil. Professor Doutor da UNIOESTE e Coordenador da área médica do LABI – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

Instituições:

Laboratório de Bioinformática (LABI), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Parque Tecnológico Itaipu (PTI).
Serviço de Coloproctologia da Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Conflito de Interesses: nenhum

Fonte de auxílio à pesquisa: Programa de Desenvolvimento Tecnológico Avançado – Fundação Parque Tecnológico Itaipu (PDTA/FPTI/BR).

Endereço para correspondência:

Eduardo Lucas Konrad Burin
Laboratório de Bioinformática (LABI)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)
Parque Tecnológico Itaipu (PTI)
Av. Tancredo Neves, 6731
Caixa Postal: 39 CEP: 85.856-970
Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil
Fax: (45) 3522 3462
E-mail: burin85@gmail.com

RESUMO: Objetivo: avaliar o modelo sigmoidal de Boltzmann quanto à capacidade de predição do comportamento mecânico de cólon descendente de ratos. **Materiais e Métodos:** dez segmentos de cólon descendente íntegro de ratos foram submetidos ao teste Energia Total de Ruptura (ETR). Posteriormente, como base para o ajuste do modelo de Boltzmann, considerou-se 30% dos pontos correspondentes à porção inicial de cada curva Força x Elongação gerada pelo ensaio. Visando avaliar a capacidade desse modelo em prever o restante dos pontos, foram analisadas as áreas das curvas e os coeficientes de determinação (R^2). Esses mesmos procedimentos foram aplicados para 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% dos pontos. **Resultados:** não foi encontrada diferença estatisticamente significativa entre as áreas das curvas delineadas pelo ensaio ETR e as áreas das curvas previstas pelo modelo para todas as avaliações realizadas ($p>0,05$). Em relação ao R^2 , não foi encontrada diferença significativa para ajustes realizados considerando-se a partir de 50% dos pontos ($p>0,05$). **Conclusão:** cinquenta por cento dos pontos representou o limite inferior para o qual o modelo sigmoidal de Boltzmann foi capaz de prever o comportamento mecânico dos segmentos de cólon de ratos, demonstrando sua capacidade de predição de materiais com comportamento viscoelástico não linear.

Descritores: Colo, Biomecânica, Cirurgia Experimental, Ajustes de Curva, Modelos Matemáticos.

ABSTRACT: Purpose: to evaluate the sigmoidal's model of Boltzmann related to its capability to predict the mechanical behavior of rat's descending colon. **Materials and Methods:** ten descending colon segments without anastomoses were submitted to the Total Energy of Rupture test (ETR). Afterwards, 30% of the points, corresponding to the initial portion of the Force x Elongation curve generated during the essay, were considered for the model of Boltzmann's fitting. In order to evaluate the capability of this model to predict the remaining points, the areas under the curves together with the determination coefficient (R^2) were evaluated. The same procedures were applied to 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90% of the points. **Results:** it was not found a statistically significant difference among the areas under the curves delineated by the ETR essay and the areas under the curves predicted by the model, considering all the evaluated percentage of points ($p>0.05$). As for the R^2 , it was not found a statistically significant difference among the fittings from 50% to 90% ($p>0.05$). **Conclusion:** fifty percent of the points was considered the lower bound for which the sigmoidal's model of Boltzmann was capable of predicting the mechanical behavior of the rat's colon segments.

Key Words: Colon, Biomechanics, Experimental Surgery, Curve Fitting, Mathematical Models

Introdução

A ruptura de alças cólicas promove o extravasamento de material fecal contido em seu interior para a cavidade peritoneal, gerando elevados índices de morbidade e mortalidade⁽¹⁾. Decorrente a esse fato, a compreensão do comportamento mecânico dessas estruturas é de fundamental importância, pois contribui para a diminuição desses reveses. Todavia, o estudo das propriedades físico-mecânicas de materiais biológicos é complexo. Estas estruturas apresentam cito-arquitetura heterogênea, anisotropia estrutural e propriedade viscoelástica não linear^(2,3). Com o intuito de quantificar a resistência mecânica de segmentos intestinais, diversos testes uniaxiais e biaxiais foram desenvolvidos. No entanto, todos os testes são passíveis de críticas, pois as variáveis que interferem na resistência intrínseca da parede intestinal não são consideradas integralmente em seus cálculos. Com a finalidade de analisar de modo mais completo o comportamento desses materiais, foi desenvolvido o ensaio biomecânico Energia Total de Ruptura (ETR), o qual está fundamentado no Princípio Universal da Conservação de Energia⁽⁴⁾. Nesse contexto, um dos focos de pesquisa consiste na busca de uma equação constitutiva capaz de representar o padrão de deformação da parede intestinal por meio do ajuste de um modelo matemático às curvas Força x Elongação obtidas pelo ensaio biomecânico^(5,6). Por meio da equação constitutiva, ensaios destrutivos em animais poderão transformar-se em não destrutivos e, além disso, ocorre a possibilidade de realização de simulações computacionais do ensaio biomecânico, auxiliando assim no desenvolvimento de novos materiais e métodos cirúrgicos. Desse modo, neste trabalho, foram realizados ajustes e previsões de curvas representativas do tecido

viscoelástico não linear caracterizado pelo cólon descendente de ratos, com o intuito de demonstrar que o modelo matemático de Boltzmann é capaz de equacionar o padrão de deformação desse material biológico.

Materiais e Métodos

Os procedimentos realizados neste trabalho foram aprovados pela Comissão de Ética na Experimentação Animal, segundo os princípios éticos adotados pelo Colégio Brasileiro de Experimentação Animal (COBEA) (Protocolo número 598-1). Foram utilizados 10 ratos machos, linhagem Wistar (*Rattus norvegicus albinus*), criados sob condições semelhantes, com massa corporal variando de 300 a 350 gramas e idade aproximada de 120 dias. De cada rato foi extraído um corpo de prova, sendo esse representado por quatro centímetros do cólon descendente a partir da reflexão peritoneal. Esses espécimes, após serem submergidos durante 30 minutos em uma solução contendo soro fisiológico e cloridrato de papaverina, foram submetidos ao ensaio biomecânico Energia Total de Ruptura (ETR)⁽⁴⁾, teste esse constituído pelos seguintes componentes (Figura 1):

- Corpo de prova (segmento de cólon descendente) (Figura 1-a);
- Sistema de tração (Figura 1-b);
- Célula de carga da balança Mettler-Toledo SB8000 (Figura 1-c);
- Polígrafo Siemens-Elma – Modelo 804 Mingograf (Figura 1-d);
- Computador com interface serial RS232 (Figura 1-e);
- Sistema de Aquisição e Análise de Dados Biomecânicos (SABI 2.0) (Figura 1–e).

Antes de iniciarem os experimentos, o corpo de prova era posicionado no sistema e a célula de carga da balança tarada para que todos os testes começassem com valor de zero grama-força. Em seguida, o movimento de tração era acionado a uma velocidade constante de um centímetro por minuto. A força atuante no corpo de teste era capturada pela célula de carga da balança de precisão (três dados por segundo), e estes valores enviados ao microcomputador, no qual encontrava-se instalado o sistema SABI 2.0⁽⁷⁾. Esse aplicativo está inserido no ensaio biomecânico ETR e possibilita o cálculo da energia necessária para ocasionar o rompimento do segmento intestinal, sendo esse atributo quantificado por meio da integração numérica de uma curva Força x Elongação. Com isso, ao final dos experimentos, o comportamento mecânico de cada espécime foi representado por um gráfico e a sua respectiva área calculada (Figura 2). Após esses procedimentos, foram considerados 30% do total de pontos correspondentes à porção inicial de cada curva Força x Elongação obtida pelo ETR (Figura 3). Nesses pontos, foi realizado um ajuste de curva utilizando-se o modelo matemático de ajuste denominado modelo sigmoidal de Boltzmann (Equação 1):

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

onde:

Y' : força;

X : alongação;

A_1 : assíntota inferior;

A_2 : assíntota superior;

x_0 : ponto de inflexão da curva;

dx : nível de espalhamento.

Os parâmetros da equação foram determinados utilizando-se o método dos mínimos quadrados paramétrico, implementado em Matlab[®] 6.0. Após a realização do ajuste, a função obtida foi delineada e sobreposta à curva Força x Elongação na sua versão integral, e o coeficiente de determinação (R^2) calculado com a finalidade de avaliar a capacidade do modelo matemático em prever a distribuição dos pontos não considerados para o ajuste (Equação 2)⁽⁸⁾:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y - Y')}{\sum (Y - Y^*)} \quad (2)$$

onde:

Y : pontos da curva a ser ajustada;

Y' : valores de Y estimados pelo modelo matemático;

Y^* : valor médio de Y .

Os mesmos procedimentos efetuados para 30% dos pontos de cada curva foram também realizados para 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% dos pontos para verificar o comportamento dos ajustes em relação à eficiência de predição.

Os valores de R^2 referentes aos ajustes considerando-se 30% (R_{30}^2), 40% (R_{40}^2), 50% (R_{50}^2), 60% (R_{60}^2), 70% (R_{70}^2), 80% (R_{80}^2) e 90% (R_{90}^2) dos pontos, foram comparados ao grupo $R_{Controle}^2$ com o intuito de determinar o limite inferior a partir do qual o modelo de Boltzmann era capaz de prever o comportamento mecânico das alças cólicas. O $R_{Controle}^2$ foi representado por valores de R^2 correspondentes a ajustes realizados considerando-se a

totalidade dos pontos de cada curva Força x Elongação delineada pelo teste ETR. Além desses procedimentos, foram calculados as médias, os desvios padrão e os erros padrão das áreas das curvas Força x Elongação delineadas pelo mesmo ensaio ($Área_{Controle}$), assim como das áreas das curvas previstas pelo modelo matemático (AP) considerando-se 30% (AP_{30}), 40% (AP_{40}), 50% (AP_{50}), 60% (AP_{60}), 70% (AP_{70}), 80% (AP_{80}) e 90% (AP_{90}) dos pontos. A análise estatística foi realizada por meio do aplicativo GraphPad InStat®, aplicando-se o teste de múltiplas comparações de Dunnett para um nível de significância de 95% ($p=0,05$).

Resultados

A Figura 4 representa exemplos de predição de uma curva Força x Elongação por meio do modelo sigmoidal de Boltzmann, ressaltando-se os pontos considerados para a realização dos ajustes.

A distribuição dos valores médios de R^2 obtidos na comparação entre as curvas provenientes do ensaio ETR e as curvas previstas pelo modelo sigmoidal de Boltzmann é apresentada na Figura 5. Na Tabela 1 são apresentados os p-valores obtidos após a realização da análise estatística (Teste de Dunnett).

Os valores da média, do desvio padrão e do erro padrão das áreas das curvas Força x Elongação, assim como das áreas das curvas previstas pelo modelo sigmoidal de Boltzmann considerando-se cada porcentagem de pontos avaliada, estão representados na Tabela 2. Os p-valores obtidos na comparação estatística estão representados na Tabela 3 (Teste de Dunnett).

Discussões

Diversos materiais utilizados na engenharia apresentam comportamento mecânico modelado pelas leis que regem os sólidos hookeanos, os fluídos newtonianos ou os fluídos não viscosos⁽³⁾. No entanto, a caracterização mecânica de tecidos biológicos é complexa, pois apresentam anisotropia estrutural, cito arquitetura heterogênea e propriedade viscoelástica não linear⁽²⁾. Com o intuito de equacionar o comportamento desses materiais, foram idealizados modelos viscoelásticos analógicos, como o de *Maxwell*, *Kelvin* e *Voigt*, os quais são representados através da associação de molas e de amortecedores⁽³⁾. No entanto, modelos dessa natureza dificilmente poderiam ser utilizados para descrever integralmente o comportamento das alças intestinais, pois consideram apenas as respostas que variam linearmente com relação ao carregamento.

Diante da complexidade apresentada no equacionamento do comportamento mecânico dos segmentos de alça intestinal, acredita-se que o ajuste das curvas Força x Elongação obtidas por meio do teste ETR a modelos matemáticos não lineares possa contribuir nos estudos que buscam uma equação constitutiva capaz de representar o padrão de deformação desses tecidos. Assim sendo, por meio dessa descrição matemática, modelagens e simulações poderiam ser realizadas e, com isso, promover contribuição fundamental para o estudo do comportamento biomecânico de alças intestinais e auxiliar no desenvolvimento de novos materiais cirúrgicos e técnicas operatórias.

Modelagens por meio de ajuste de curvas são amplamente utilizadas para o equacionamento dos mais distintos fenômenos, como a cinética da

infecção chagásica em populações⁽⁹⁾, a distribuição granulométrica de partículas sólidas⁽¹⁰⁾ e em estudos hematológicos⁽¹¹⁾. Independentemente do fenômeno avaliado, o modelo a ser utilizado para o equacionamento deve apresentar comportamento semelhante ao da distribuição dos dados obtidos experimentalmente, além de possuir parâmetros que expressem significado físico⁽¹²⁾. Desse modo, neste trabalho, o modelo sigmoidal de Boltzmann (Equação 1) foi avaliado com relação a sua capacidade de equacionamento e predição do comportamento mecânico de segmentos de alça cólica íntegra. Nesse modelo matemático, o Y corresponde à Força aplicada no espécime durante o experimento e o X à Elongação. A assíntota superior dessa curva sigmóide é representada pelo parâmetro A_2 , o qual pode ser interpretado fisicamente como a estimativa da força máxima suportada pelo segmento intestinal. O parâmetro dx corresponde ao fator de espalhamento da curva e indica o grau de aumento da força no decorrer do processo de deformação viscoelástico não linear. Outro parâmetro, o x_0 , representa, aproximadamente, o ponto no qual a rigidez do segmento intestinal apresenta maior valor. A partir desse momento, a força passa a aumentar com menor gradiente devido ao início do rompimento das redes de colágeno que dão sustentação à parede intestinal. Por último, o parâmetro A_1 corresponde ao valor da assíntota inferior do modelo.

De acordo com os resultados, analisando-se os valores médios dos grupos R_{30}^2 , R_{40}^2 , R_{50}^2 , R_{60}^2 , R_{70}^2 , R_{80}^2 e R_{90}^2 , observou-se que, de modo crescente, estes valores tendiam, sucessivamente, à unidade (Figura 5). Após a aplicação do teste estatístico de múltiplas comparações de Dunnett com nível de significância de 95%, notou-se que os valores dos coeficientes de

determinação pertencentes aos grupos R_{50}^2 , R_{60}^2 , R_{70}^2 , R_{80}^2 e R_{90}^2 não apresentaram diferença estatisticamente significativa quando comparados ao grupo $R_{Controle}^2$.

Além das características acima descritas, deve ser observado que as áreas das curvas previstas pelo modelo matemático devem reproduzir as áreas das curvas obtidas no ensaio ETR de modo preciso, pois essa grandeza física, a energia acumulada, é de fundamental importância na quantificação da resistência intrínseca das alças intestinais. Após análise estatística, constatou-se que os valores de AP_{30} , AP_{40} , AP_{50} , AP_{60} , AP_{70} , AP_{80} e AP_{90} não apresentaram diferença significativa na comparação com o grupo $\acute{A}rea_{Controle}$ (Tabela 3). Desse modo, mesmo sendo um parâmetro de grande importância no estudo da resistência intestinal, esse atributo não pode ser considerado como qualificador na aceitação dos ajustes, pois curvas com diferentes morfologias podem apresentar áreas semelhantes, ocasionando interpretações equivocadas.

Sendo assim, devido ao fato do R^2 estar relacionado com o grau de associação entre os pontos pertencentes à curva obtida pelo teste ETR e a curva ajustada, neste trabalho, esse atributo foi considerado determinante para a verificação da aceitação dos ajustes, de modo que a partir de 50% dos pontos das curvas obtidas pelo teste ETR, o modelo sigmoidal de Boltzmann foi capaz de prever integralmente o comportamento das alças intestinais até o momento da ruptura. Deve-se ressaltar que esse modelo matemático vem sendo utilizado para o equacionamento de diversos fenômenos cujo comportamento é descrito por curvas com morfologia sigmoidal, como exemplo, a interferência de ervas daninhas em culturas florestais⁽¹³⁾ e o

comportamento térmico de produtos alimentícios⁽¹⁴⁾. Desse modo, mesmo apresentando estrutura complexa inerente aos materiais biológicos, as alças intestinais avaliadas também tiveram seu comportamento equacionado pelo modelo sigmoidal de Boltzmann de modo preciso, demonstrando sua capacidade e poder de predição do comportamento mecânico das alças intestinais quando submetidas a um esforço axial de tração.

Conclusão

De acordo com os critérios avaliados neste trabalho, o modelo sigmoidal de Boltzmann mostrou-se adequado para o equacionamento e a predição do padrão de deformação de segmentos íntegros do cólon descendente de ratos, quando considerados a partir de 50% dos pontos das curvas Força x Elongação obtidas pelo teste ETR. Com relação ao critério de avaliação da qualidade dos ajustes, pôde ser observado que o coeficiente de determinação (R^2) é mais indicado para esse fim quando comparado ao atributo Área.

Agradecimentos

Ao Programa de Desenvolvimento Tecnológico Avançado (PDTA/FPTI-BR) pelo apoio financeiro.

Referências

1. Wu FC, Lee HD, Rocha AA, Ayrizono MLS, Coy CSR, Góes JRN, et al. Estudo da Ação de Aderências sobre Anastomoses Cólicas por meio de ensaios Biomecânicos Uniaxiais e Biaxiais: Trabalho Experimental em Ratos. 54º Congresso Brasileiro de Coloproctologia: Anais do 54º Congresso Brasileiro de Coloproctologia; 2005; Goiânia; 2005.

2. Maciel A, Boulic R, Thalmann D. Deformable tissue parameterized by properties of real biological tissue. Proceedings of the International Symposium on Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling; 2003 Jun 12-13; Juan-Les-Pins, FR. New York: Springer; 2003.
3. Fung YC. Biomechanics – Mechanical properties of living tissues. 2^a ed. New York: Springer-Verlag Inc; 1993.
4. Wu FC, Lee HD, Machado RB, Dalmás S, Coy CSR, Góes JRN, Fagundes JJ. Apresentação do teste energia total de ruptura para avaliação de material biológico com propriedade viscoelástico não-linear. Acta Cir Bras [serial on-line] 2004 Nov - Dez; 19(6).
5. Burin ELK, Niz MAK, Lee HD, Nogueira FMA, Fagundes JJ, Góes JRN, Wu FC. Aplicação do Modelo Sigmoidal de Boltzmann para o Ajuste das Curvas Força x Elongação de Cólon Descendente de Ratos obtidas por meio do Aplicativo SABI 2.0. WIM 2006: Anais do VI Workshop de Informática Médica; 2006; Vila Velha, 2006.
6. Niz MAK, Burin ELK, Wu FC, Lee HD, Nogueira FMA, Fagundes JJ, Góes JRN. Utilização dos modelos matemáticos de Boltzmann, de Chapman e Logístico para o estudo do comportamento mecânico de segmentos de cólon descendente de ratos. CBIS 2006: Anais do X Congresso Brasileiro de Informática em Saúde; 2006; Florianópolis; 2006.
7. Voltolini RF, Metz J, Machado RB, Lee HD, Wu FC, Fagundes JJ, Góes JRN. SABI 2.0: Um sistema para a realização de teste biomecânicos em material viscoelástico não linear. Laptec 2003: Proceedings of The 4th Congress of Logic Applied to Technology; 2003; Marília; 2003.

8. Motulsky H, Christopoulos A. Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression: A Practical Guide to Curve fitting. New York: Oxford University Press; 2004.
9. Silva, GR da. Sobre o modelo catalítico reversível aplicado ao estudo da cinética epidemiológica da infecção chagásica. Rev. Saúde públ. 1969; 3(1): 23-9.
10. Silva EM, Lima JEFW, Rodrigues LN, Azevedo JA. Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas. Pesq. agropec. bras. 2004; 39 (4): 363-70.
11. Tyson JW, Meade JH, Dalrymple GV, Marvin HN. Some Biomedical Applications of a Non-Linear Curve Fit Method. J Nucl Med. 1967; 8: 558-69.
12. Guimarães PS. Ajuste de curvas experimentais. 1ª ed. Santa Maria: Editora UFSM; 2001.
13. Toledo REB, Filho RV, Bezutte AJ, Pitelli RA, Alves PLCA, Valle CF, et al. Períodos de controle de *Brachiaria* sp e seus reflexos na produtividade de *Eucalyptus grandis*. Scientia Forestalis. 2003; 63: 221-32.
14. Frisina VA. Modelagem das radiações global, difusa e fotossinteticamente ativa em ambiente protegido e suas relações com o crescimento e produtividade da cultura de pimentão (*Capsicum annum* L.) [Tese - Doutorado]. Botucatu: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”; 2002.

Figura 1:

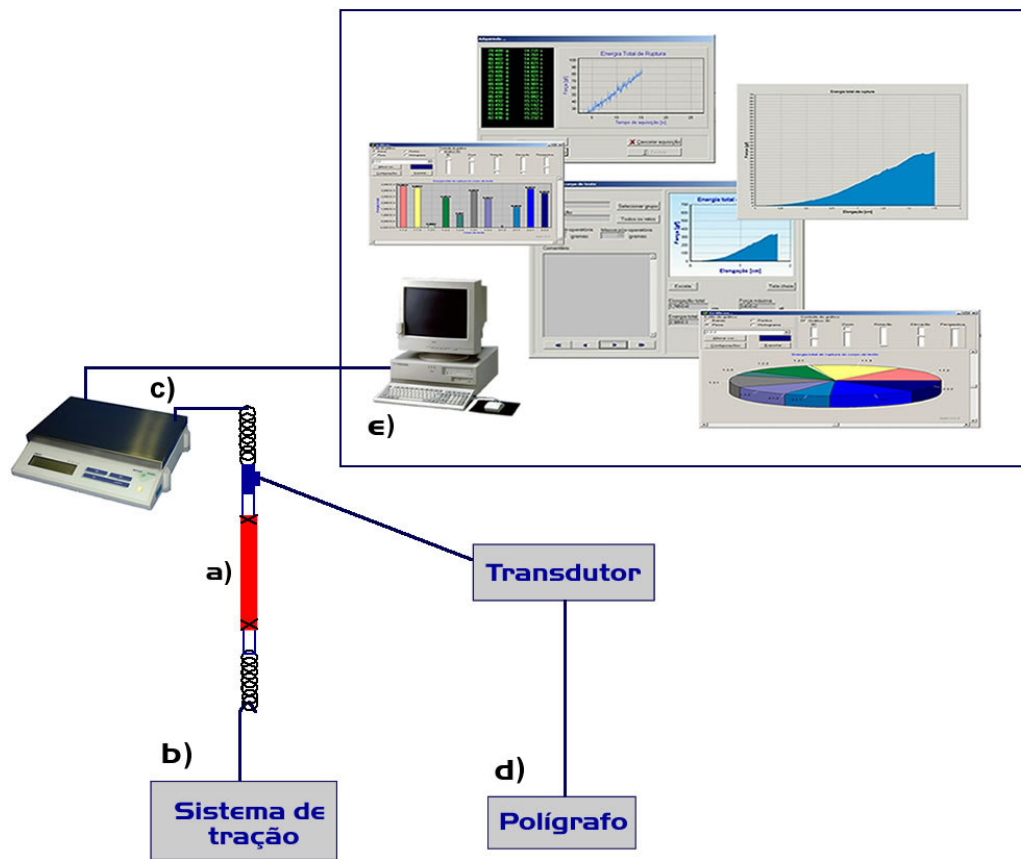


Figura 2:

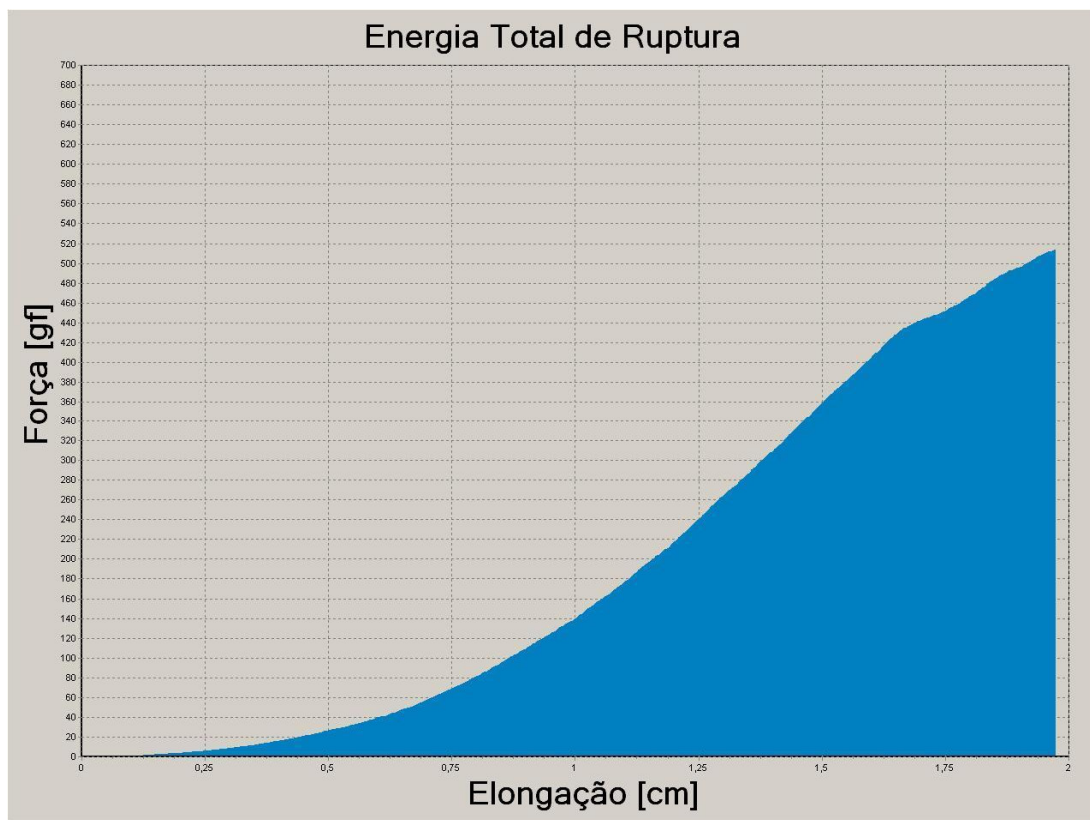


Figura 3:

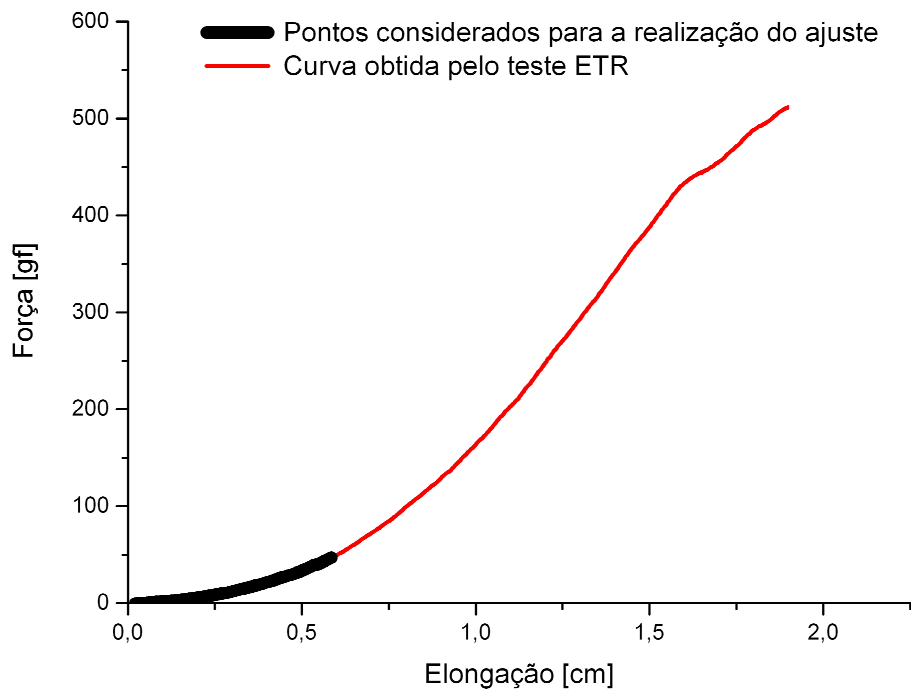


Figura 4:

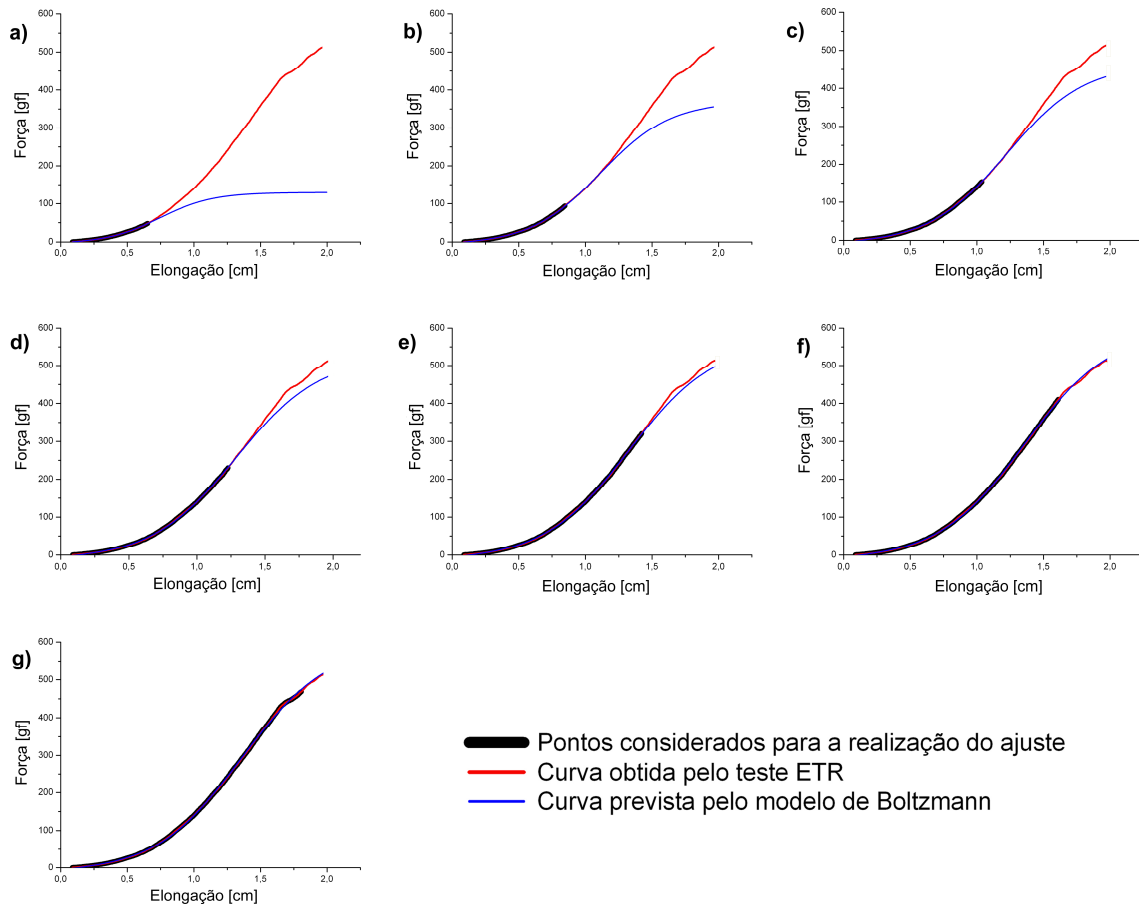


Figura 5:

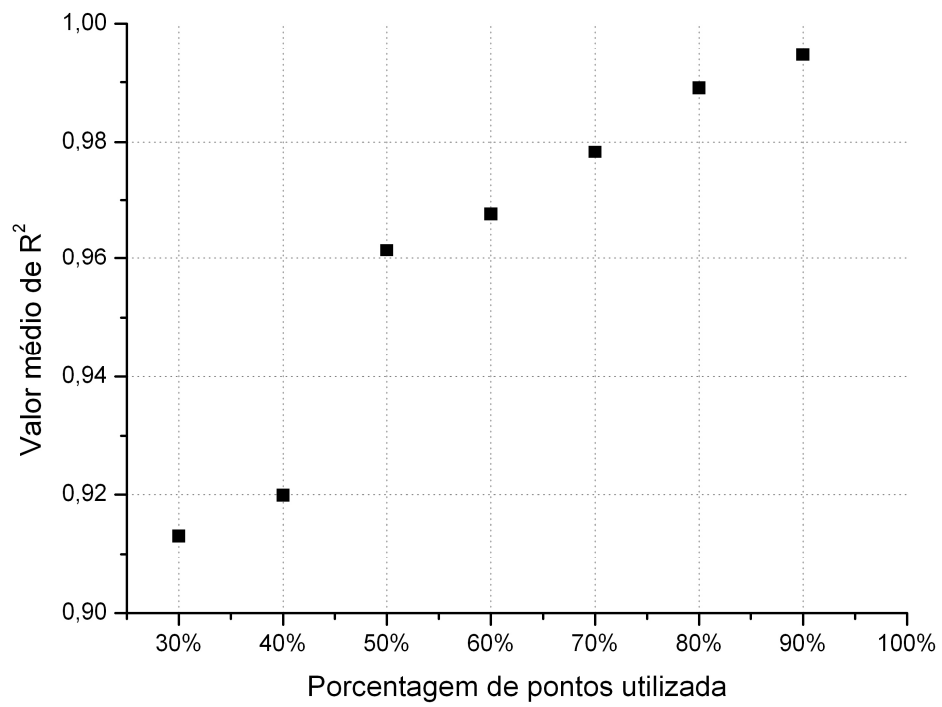


Tabela 1 – Comparação entre os grupos de R^2 para cada porcentagem de pontos avaliada (teste de Dunnett)

Comparação	p-valor
$R^2_{Controle}$ x R^2_{30}	p<0,01
$R^2_{Controle}$ x R^2_{40}	p<0,01
$R^2_{Controle}$ x R^2_{50}	p>0,05
$R^2_{Controle}$ x R^2_{60}	p>0,05
$R^2_{Controle}$ x R^2_{70}	p>0,05
$R^2_{Controle}$ x R^2_{80}	p>0,05
$R^2_{Controle}$ x R^2_{90}	p>0,05

Tabela 2 – Valores da média, do desvio padrão e do erro padrão dos grupos de área

Grupo	Média [gf.cm]	Desvio Padrão	Erro Padrão
<i>Área_{Controle}</i>	278,53	76,41	24,16
<i>AP₃₀</i>	307,64	287,76	91,00
<i>AP₄₀</i>	236,04	54,16	17,13
<i>AP₅₀</i>	269,42	88,17	27,88
<i>AP₆₀</i>	271,29	81,24	25,69
<i>AP₇₀</i>	274,53	78,25	24,74
<i>AP₈₀</i>	272,10	76,74	24,27
<i>AP₉₀</i>	277,95	78,43	24,80

Tabela 3 – Comparação entre os grupos de área para cada porcentagem de pontos avaliada (teste de Dunnett)

Comparação	p-valor
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{30}$	p>0,05
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{40}$	p>0,05
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{50}$	p>0,05
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{60}$	p>0,05
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{70}$	p>0,05
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{80}$	p>0,05
$\acute{A}rea_{Controle} \times AP_{90}$	p>0,05

Figura 1 – Representação esquemática do teste ETR: a) segmento de cólon, b) sistema de tração, c) célula de carga, d) polígrafo e e) computador com interface serial e SABI 2.0⁽⁴⁾

Figura 2 – Curva Força x Elongação e sua área calculada pelo aplicativo SABI 2.0⁽⁴⁾

Figura 3 – Representação de curva Força x Elongação experimental, ressaltando-se a parcela de 30% dos pontos considerada para a realização do ajuste de curva

Figura 4 – Exemplos de predição de curva Força x Elongação por meio do modelo de Boltzmann considerando-se: a) 30%, b) 40%, c) 50%, d) 60%, e) 70%, f) 80% e g) 90% da totalidade dos pontos

Figura 5 – Distribuição dos valores médios de R^2 em relação à porcentagem de pontos considerada para a realização dos ajustes