

# Avaliação da dispersão de curvas Força x Elongação de segmentos de íleo terminal de ratos por meio do modelo sigmoidal de Boltzmann

Eduardo Lucas Konrad Burin, LABI – Laboratório de Bioinformática, UNIOESTE,  
e-mail: [burin85@gmail.com](mailto:burin85@gmail.com), home-page: <http://www.foz.unioeste.br/labi>

Maksoel Agustin Krauspenhar Niz, LABI – Laboratório de Bioinformática, UNIOESTE,  
e-mail: [maks.niz@gmail.com](mailto:maks.niz@gmail.com)

Sidney Bruce Shiki, LABI – Laboratório de Bioinformática, UNIOESTE,  
e-mail: [sbshiki@gmail.com](mailto:sbshiki@gmail.com)

Huei Diana Lee, LABI – Laboratório de Bioinformática, UNIOESTE,  
e-mail: [hueidianalee@gmail.com](mailto:hueidianalee@gmail.com)

João José Fagundes, Serviço de Coloproctologia, Faculdade de Ciências Médicas, UNICAMP,  
e-mail: [jjfagundes@mpcnet.com.br](mailto:jjfagundes@mpcnet.com.br)

Feng Chung Wu, LABI – Laboratório de Bioinformática, UNIOESTE e Serviço de Coloproctologia,  
Faculdade de Ciências Médicas, UNICAMP. e-mail: [wufc@pti.org.br](mailto:wufc@pti.org.br)

## Introdução

Em cirurgias do aparelho digestório, segmentos do íleo terminal são frequentemente utilizados para reconstruir o trânsito intestinal. Em decorrência desse fato, é de fundamental importância o estudo e o desenvolvimento de metodologias que permitam avaliar de modo mais completo as propriedades mecânicas desses materiais biológicos [Fagundes 1990, Wu et al. 2004]. Nesse contexto, um dos focos de pesquisa consiste no ajuste de modelos matemáticos às curvas Força x Elongação obtidas por meio do ensaio biomecânico Energia Total de Ruptura (ETR), tendo como objetivo auxiliar na determinação de uma equação constitutiva capaz de representar o padrão de deformação desses segmentos intestinais [Niz et al. 2006]. Desse modo, neste trabalho, por meio da utilização do modelo sigmoidal de Boltzmann, foi realizado o equacionamento de um conjunto de curvas Força x Elongação representativas do comportamento mecânico de espécimes íntegros de íleo terminal de ratos. Assim, teve-se como objetivo avaliar a possibilidade de incorporar nesta análise matemática a variabilidade biológica inerente aos tecidos que constituem este material com propriedade viscoelástica não linear.

## Materiais e métodos

Doze segmentos de íleo terminal de ratos machos Wistar foram submetidos ao teste ETR [Wu et al. 2004]. Posteriormente, por meio da utilização da técnica de regressão não linear do gradiente, cada uma das curvas Força x Elongação geradas pelo ensaio ETR foi ajustada ao modelo sigmoidal de Boltzmann, o qual é representado pela eq. (1):

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

onde  $y$  representa a força,  $x$  a elongação,  $A_1$  a assíntota inferior,  $A_2$  a assíntota superior,  $x_0$  o ponto de inflexão da curva e  $dx$  o seu nível de espalhamento.

Após a realização desses procedimentos, para cada parâmetro do modelo de Boltzmann, foram determinados os valores médios ( $\bar{A}_1$ ,  $\bar{A}_2$ ,  $\bar{x}_0$  e  $\bar{d}_x$ ), os desvios padrão ( $s(A_1)$ ,  $s(A_2)$ ,  $s(x_0)$  e  $s(dx)$ ), e as

correlações existentes ( $r(A_1, A_2)$ ,  $r(A_1, x_0)$ ,  $r(A_1, dx)$ ,  $r(A_2, x_0)$ ,  $r(A_2, dx)$  e  $r(x_0, dx)$ ). Os desvios padrão destes parâmetros foram então combinados entre si, determinando-se a dispersão resultante da variável força para todo o processo de deformação do espécime ( $s(\text{Força}(A_1, A_2, x_0, dx; \text{Elongação}))$ ).

Esta combinação foi realizada por meio de uma análise que considera as correlações existentes entre as grandezas, a qual está baseada na lei de propagação das incertezas proposta pelo Guia para Expressão da Incerteza de Medição, (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – ISO GUM 2006*).

Para se determinar um intervalo dentro do qual estarão contidos 95% dos valores de força, a dispersão  $s(\text{Força}(A_1, A_2, x_0, dx; \text{Elongação}))$  foi multiplicada por um fator de abrangência ( $K=1,96$ ) considerando-se infinitos graus de liberdade (distribuição normal).

## Resultados

Os valores da média e do desvio padrão dos parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $x_0$  e  $d_x$  estão representados na Tabela 1.

**Tabela 1: Valores da média e do desvio padrão dos parâmetros do modelo de Boltzmann.**

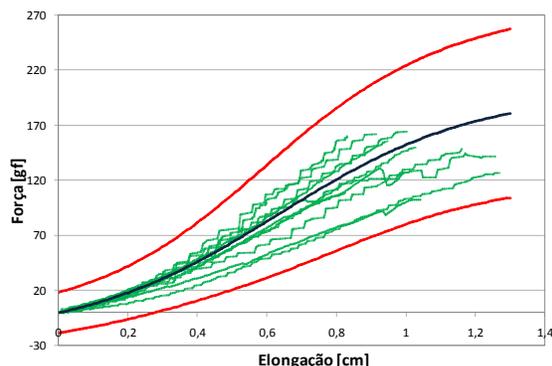
Parâmetro	Média	Desvio padrão
$A_1$	-22,02 gf	8,40 gf
$A_2$	200,41 gf	51,05 gf
$x_0$	0,63 cm	0,12 cm
$d_x$	-0,29 cm	0,05 cm

Na Tabela 2, por sua vez, são apresentados os valores dos coeficientes de correlação  $r(A_1, A_2)$ ,  $r(A_1, x_0)$ ,  $r(A_1, dx)$ ,  $r(A_2, x_0)$ ,  $r(A_2, dx)$  e  $r(x_0, dx)$ .

**Tabela 2: Correlações existentes entre os parâmetros do modelo de Boltzmann.**

Comparação	Valor da correlação
$r(A_1, A_2)$	-0,592
$r(A_1, x_0)$	0,410
$r(A_1, dx)$	0,074
$r(A_2, x_0)$	0,002
$r(A_2, dx)$	0,051
$r(x_0, dx)$	-0,755

Por último, na Figura 1, são apresentadas as curvas Força x Elongação provenientes da aplicação do teste ETR aos espécimes avaliados (cor verde), a curva delineada pelo modelo de Boltzmann considerando-se os valores médios dos parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $x_0$  e  $d_x$  (cor azul), e os limites superior e inferior, dentro dos quais estarão contidas as curvas Força x Elongação representativas do comportamento mecânico de segmentos de íleo terminal de ratos, para um intervalo de confiança de 95% (cor vermelha).



**Figura 1: Curvas Força x Elongação delineadas por meio do teste ETR (cor verde), curva delineada considerando-se as médias dos valores dos parâmetros do modelo de Boltzmann (cor azul) e limites superior e inferior calculados por meio da lei de propagação das incertezas (cor vermelha).**

### Discussões e conclusão

Diante da complexidade relacionada ao 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 a determinação de uma equação constitutiva capaz de representar o padrão de deformação desses tecidos. Assim, 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.

Em trabalhos anteriores, curvas Força x Elongação representativas do comportamento mecânico de segmentos de tubo digestório, foram ajustadas eficientemente ao modelo sigmoidal de Boltzmann [Niz et al. 2006, Burin et al. 2007]. Desse modo, neste trabalho, por meio da utilização deste modelo matemático, teve-se como objetivo avaliar a variabilidade biológica inerente às curvas Força x Elongação representativas do comportamento mecânico de segmentos íntegros de íleo terminal de ratos. Este fato pode ser observado na Figura 1 (curvas na cor verde).

Para a realização desta análise, foram delineados os ajustes das curvas Força x Elongação geradas pelo teste ETR e, posteriormente, determinados os valores das médias e dos desvios padrão dos parâmetros que compõem o modelo de Boltzmann. Assim, a dispersão das curvas representativas dos espécimes avaliados neste trabalho pôde ser representada de modo

sintetizado por meio destes atributos estatísticos, os quais são apresentados na Tabela 1.

Na Tabela 2, por sua vez, são apresentados os valores das correlações existentes entre os parâmetros do modelo de Boltzmann. O cálculo destes atributos se fez necessário, uma vez que a variação de cada parâmetro pode ser influenciada pela variação dos demais. Nesse contexto, estas correlações foram consideradas para a determinação da variabilidade resultante da força para cada etapa do processo de deformação.

Por fim, por meio dos procedimentos adotados pela lei da propagação das incertezas, foi determinada uma curva média representativa do conjunto de dados gerados experimentalmente por meio do teste ETR (Figura 1 – cor azul) e uma faixa dentro da qual deverão estar contidas as curvas Força x Elongação representativas do comportamento mecânico dos segmentos íntegros de íleo terminal de ratos para um intervalo de confiança de 95% (Figura 1 – cor vermelha). Esta metodologia possivelmente poderá ser utilizada na avaliação de variáveis que interfiram no comportamento mecânico intestinal, como a utilização de novos materiais de fio de sutura, técnicas cirúrgicas empregadas e diferentes tratamentos pós-operatórios. Acredita-se que para cada situação considerada, limites de controle poderão ser estabelecidos, tornando-se assim, as análises comparativas mais simplificadas. Com relação aos trabalhos futuros, uma análise mais completa deverá ser realizada considerando-se um maior número de corpos de prova, além da avaliação de distintas regiões do trato intestinal.

### Agradecimentos

Ao Programa de Desenvolvimento Tecnológico Avançado (PDTA/FPTI-BR) pelo auxílio por meio da linha de financiamento de bolsas.

### Referências bibliográficas

- Fagundes, J. J. (1990). Estudo comparativo da cicatrização de anastomoses cólicas realizadas com auxílio do bisturi laser de dióxido de carbono: trabalho experimental em cães. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Niz, M. A. K., Burin, E. L. K., Wu, F. C., Lee, H. D., Nogueira, F. M. A., Fagundes, J. J., e Góes, J. R. N. (2006). Utilização dos modelos matemáticos de Boltzmann, de Chapman e Logístico para o estudo do comportamento mecânico de segmentos de cólon descendente de ratos. Em X Congresso Brasileiro de Informática em Saúde, Florianópolis, SC.
- Wu, F. C., Lee, H. D., Machado, R. B., Dalmás, S., Coy, C. S. R., Góes, J. R. N., e Fagundes, J. J. (2004). Apresentação do teste Energia Total de Ruptura para avaliação de material biológico com propriedade viscoelástico não-linear. Acta Cir Bras [serial online] Nov - Dez; 19(6).
- Burin, E. L. K., Lee, H. D., Niz, M. A. K., Silva, M. C. C., Góes, J. R. N., Wu, F. C., e Fagundes, J. J. (2007). Estudo Matemático do Comportamento Mecânico de Segmentos de Cólon Descendente com Anastomose: Trabalho Experimental em Ratos. Rev bras Coloproct, v. 27, p. 46.