

## COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS MATEMÁTICOS DE MÚSCULOS ESQUELÉTICOS SUJEITOS A COMBINAÇÕES DE CONTRAÇÕES

Frederico Lagemann, PROMEC-UFRGS, [lagemann@ufrgs.br](mailto:lagemann@ufrgs.br)

Jakson M. Vassoler, PROMEC-UFRGS, [vassoler@mecanica.br](mailto:vassoler@mecanica.br)

**Resumo.** O sistema muscular é responsável pela geração de forças mecânicas nos seres humanos. Feixes de sarcômeros compõem o tecido muscular. Sob o estímulo elétrico ocorre a contração dos sarcômeros. O tecido muscular apresenta comportamentos dependentes de sua elasticidade intrínseca (passivo) e comportamentos dependentes do estímulo elétrico (ativo). A produção de força mecânica é objeto de estudo de muitos autores, especialmente para caracterizar matematicamente as diferentes contrações (isométrica, concêntrica e excêntrica), que podem servir na simulação numérica de uma estrutura muscular. Para contrações isométricas boas correlações são obtidas com a relação força-comprimento de Huxley. Para contrações concêntricas e excêntricas a relação força-velocidade de Hill é muito empregada. Entretanto, atualmente a maior dificuldade está na combinação destes fenômenos, através de uma formulação capaz de representar não apenas as diferentes contrações de forma isolada, mas também representar a combinação dos diferentes tipos de contrações. Com o objetivo de avaliar as tendências de resposta de diferentes modelos apresentados na literatura alguns foram selecionados e comparados em contrações isométricas-concêntricas-isométricas e isométricas-excêntricas-isométricas. Os resultados mostram que cada modelo é capaz de representar apenas algum tipo de contração, sendo que nenhum pode representar adequadamente a combinação proposta das contrações.

**Palavras chave:** contração muscular, contração isométrica, contração excêntrica, contração concêntrica

### 1. INTRODUÇÃO

Locomoção, equilíbrio e geração de força são capacidades do corpo humano necessárias à manutenção da vida. Para isso o sistema muscular é responsável por gerar forças, enquanto o sistema esquelético as transmite e o sistema nervoso controla a velocidade da contração e a potência.

Observando em detalhe, o sistema muscular gera forças devido à existência de células especializadas, as fibras musculares. Cada fibra é composta por centenas de miofilamentos, e cada miofilamento é formado por sarcômeros alinhados em série. Estas estruturas são as principais responsáveis pela contração muscular. A contração inicia através de um potencial de ação, enviado pelo nervo. Este potencial percorre o sarcômero liberando cálcio. Na presença deste, ocorre um deslizamento entre dois filamentos que constituem o sarcômero: a actina e miosina. Deste deslizamento das estruturas internas do sarcômero é originada a força muscular.

Três contrações musculares são caracterizadas: a contração isométrica ocorre quando o músculo mantém seu comprimento constante; a contração excêntrica ocorre quando o músculo aumenta seu comprimento; e a contração concêntrica ocorre quando o músculo diminui seu comprimento. Os diferentes tipos de contrações musculares geram diferentes níveis de força produzida. Ainda, quando contrações isométricas são precedidas por contrações concêntricas ou excêntricas, existe um período de desenvolvimento da força, caracterizando aumento ou perda de força em relação a uma contração isométrica pura no mesmo comprimento.

Desta maneira, surge a necessidade de avaliar a produção de força em cada um dos tipos de contrações e na combinação dos mesmos. A combinação de contrações excêntricas/concêntricas com contrações isométricas é um dos desafios deste campo do conhecimento. Na literatura são encontrados modelos matemáticos que representam contrações isométricas, ou contrações concêntricas/excêntricas consecutivas. Assim, o principal objetivo deste trabalho é realizar uma comparação entre modelos matemáticos encontrados em literatura. Para isto, diferentes modelos da resposta mecânica de músculos foram submetidos a contrações isométrica-excêntrica-isométrica e isométrica-concêntrica-isométrica. Estes resultados foram comparados com dados experimentais, na busca por tendências do comportamento entre os modelos e dos modelos com os dados experimentais.

### 2. MODELOS ESTUDADOS

Muitos modelos na literatura são baseados nos modelos de força-comprimento de Huxley (1957) e no modelo de Hill (1938). O primeiro trabalho relaciona a produção de força com o nível de sobreposição entre os filamentos de actina e miosina. Com a maior sobreposição, mais pontes cruzadas são feitas, aumentando a força gerada. Desta maneira, através do comprimento do músculo é possível determinar a força isométrica. Já a relação de força-velocidade de Hill relaciona a produção de força com a velocidade de encurtamento ou alongamento do músculo.

Para este trabalho foram selecionadas cinco propostas de modelos. Todas estas propostas são baseadas na hiperelasticidade. Desta maneira, a tensão é escrita a partir de um potencial de energia livre (Holzapfel, 2000). Assim o estado de tensão é obtido por:

$$\mathbf{S} = 2 \frac{\partial \psi(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}} \quad (1)$$

Onde  $\mathbf{S}$  é o tensor tensão segundo de Piola-Kirchhoff,  $\mathbf{C}$  é o tensor deformação Cauchy-Green a direita e  $\psi$  é o potencial de energia livre.

Com o equacionamento proposto dos modelos, os mesmos foram implementados de forma incremental, através de intervalos de tempo conhecidos. O primeiro modelo selecionado foi proposto por Bol (Ehret et al., 2011). Este modelo possui a característica de não usar decomposição aditiva de sua energia. As contribuições das componentes passivas e ativas não são simplesmente somadas. Este modelo originalmente foi proposto para avaliar forças isométricas, e é baseado tanto no modelo de Huxley quanto no modelo de Hill.

Outro modelo estudado é o modelo proposto por Hernández (Hernández-Gascón et al., 2013). Neste modelo as contribuições ativas e passivas na energia são aditivas. O modelo se baseia apenas na relação de Huxley. A principal característica deste modelo é que ele prevê que a contração muscular pode acontecer de forma independente nas diferentes regiões do músculo. Desta maneira, para o cálculo das tensões é necessário avaliar tanto o gradiente de deformações devido a componente ativa, bem como um gradiente de deformações passivas, intrínsecas ao músculo.

O modelo proposto por Tang-Zhang (Tang et al., 2009) representa o músculo como fibras imersas em uma matriz. As fibras se comportam de acordo com o modelo de Hill, e possuem a dependência do comprimento do modelo de Huxley. Este modelo foi proposto para representar contrações concêntricas, excêntricas e isométricas.

O modelo proposto por Lu (Lu et al., 2010) é semelhante ao modelo de Lu. Entretanto, na resposta das fibras adiciona um componente viscoso, para representar um enrijecimento do material conforme a velocidade de contração. Este também foi desenvolvido para contrações isométricas, excêntricas e concêntricas.

O último modelo usado neste estudo foi proposto por Van Looke (Van Looke et al. 2008). Este modelo se baseia apenas na resposta passiva do músculo. Originalmente foi desenvolvido para contrações concêntricas. Rehorn et al. (2014) apresentou uma formulação semelhante, também para o comportamento passivo em contrações excêntricas.

## 2. COMPARAÇÃO DOS MODELOS

Na proposta deste trabalho os modelos são comparados segundo contrações isométricas-concêntricas-isométricas e isométricas-excêntricas-isométricas em diferentes músculos. Estas comparações têm por objetivo verificar se os modelos apresentados são capazes de representarem o ganho ou perda de força, característica da combinação de contrações aqui avaliadas. Assim, neste estudo foram utilizados os parâmetros materiais de cada um dos trabalhos originais, sem ser realizado um ajuste de parâmetros para o comportamento de um músculo específico. Como as respostas características que se visam avaliar neste trabalho são comuns a todos os músculos, a análise comparativa realizada aqui representa a tendência da resposta mecânica dos modelos, quando sujeitos a combinação de contrações. Os modelos apresentados foram simulados através de uma implementação numérica incremental no software científico MATLAB. Nestas avaliações foram impostos diferentes históricos de alongamentos e os músculos foram ativados no tempo de 0 segundos e desativados no tempo de 5 segundos.

### 2.1. Contração Isométrica-Concêntrica-Isométrica

Este tipo de contração é caracterizada pela comparação da força da sequência de contrações com a força gerada pela contração isométrica apenas, sendo que os comprimentos finais do músculo nos dois casos sejam o mesmo. O comportamento esperado é que durante o encurtamento do músculo a força diminua proporcionalmente a relação força velocidade de Hill, e durante a segunda fase isométrica a força desenvolva até um patamar inferior ao da contração isométrica de referência. Este comportamento pode ser visto na Fig.(1).

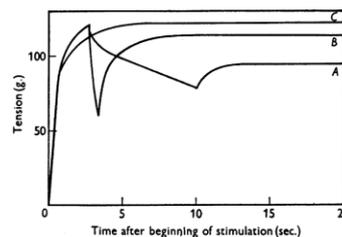


Figura 1- Curvas de tensão no tempo para contrações concêntricas em diferentes velocidades. (Abbot & Aubert, 1952). Curva C é a contração isométrica de referência e as curvas A e B são combinações de contrações isométricas-concêntrica-isométrica com velocidades de encurtamento diferentes.

Para avaliar qualitativamente o comportamento dos modelos, três velocidades de encurtamento foram aplicadas. O movimento iniciou com o alongamento de 1.2 mm/mm e terminou em 1 mm/mm. O histórico de alongamentos pode ser visto na Fig.(2). As respostas de tensão dos modelos podem ser vistos nas Fig.(3) até Fig.(5).

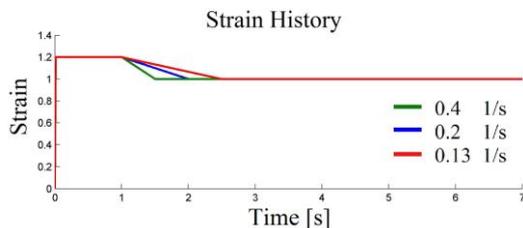


Figura 2 – Histórico de alongamentos

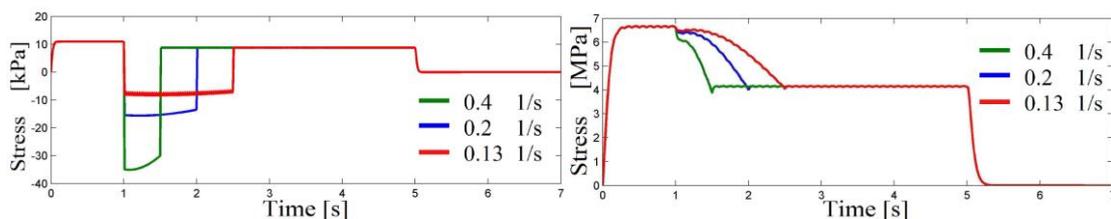


Figura 3 – Contração concêntrica. Bol (esquerda) e Hernandez (direita)

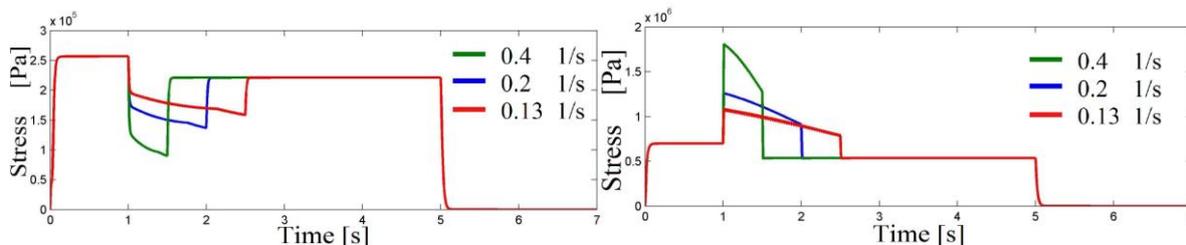


Figura 4 – Contração concêntrica. Tang-Zhang (esquerda) e Lu (direita)

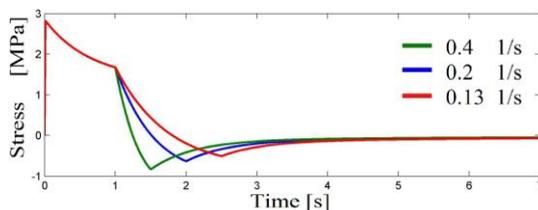


Figura 5 – Contração concêntrica. Van Loocke

Os modelos propostos por Tang-Zhang, Bol, Lu e Hernandez apresentaram variações na força durante o movimento. Entretanto, uma vez cessado o movimento as forças tenderam ao patamar da isometria, resultado não adequado a dados experimentais. O modelo de Van Loocke apresentou uma tendência muito mais adequada ao observado experimentalmente. Entretanto, não foi capaz de representar o início do desenvolvimento isométrico da força. Mesmo assim, o modelo proposto por Van Loocke apresentou a maior similaridade com dados experimentais.

### 2.1. Contração Isométrica-Excêntrica-Isométrica

Este tipo de contração é caracterizada pela comparação da força da sequência de contrações com a força gerada pela contração isométrica apenas, sendo que os comprimentos finais do músculo nos dois casos sejam o mesmo. O comportamento esperado é que durante o alongamento do músculo a força aumente proporcionalmente com a relação força velocidade de Hill, e durante a segunda fase isométrica a força desenvolva até um patamar superior ao da contração isométrica de referência. Este comportamento pode ser visto na Fig.(6).

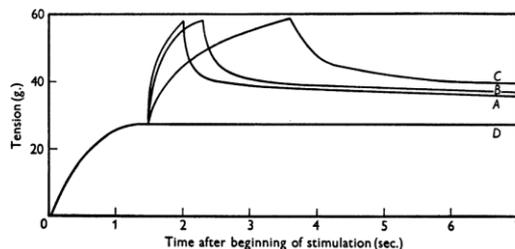


Figura 6 - Curvas de tensão no tempo para contrações excêntricas em diferentes velocidades (Abbot & Aubert, 1952). A curva D é a contração isométrica de referência e as curvas A, B e C são combinações de contrações isométrica-excêntrica-isométrica com velocidades de alongamento diferentes.

Para avaliar qualitativamente o comportamento dos modelos, três velocidades de alongamento foram aplicadas. O movimento iniciou com o alongamento de 0.8 mm/mm e terminou em 1 mm/mm. O histórico de alongamentos pode ser visto na Fig.(7). As respostas de tensão dos modelos podem ser vistos nas Fig.(8) até Fig.(10).

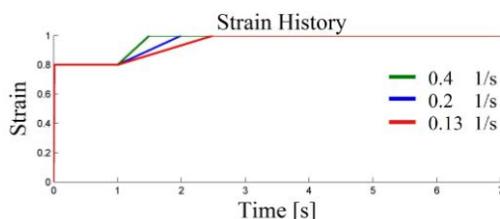


Figura 7 – Histórico de Alongamentos

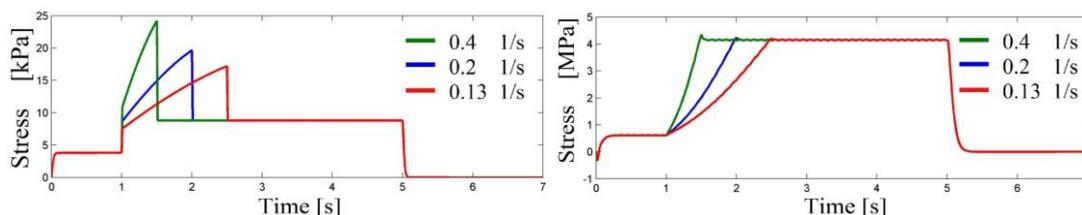


Figura 8 - Contração excêntrica. Bol (esquerda) e Hernandez (direita)

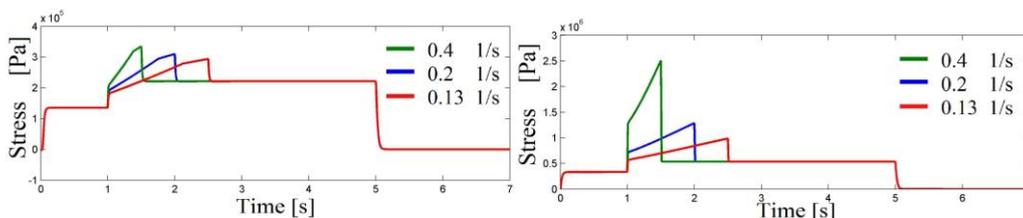


Figura 9 – Contração excêntrica. Tang-Zhang (esquerda) e Lu (direita)

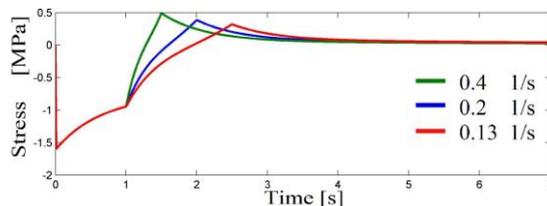


Figura 10 – Contração excêntrica. Van Looke.

Novamente os modelos de Tang-Zhang, Lu, Hernandez e Bol não apresentaram bons resultados. Uma vez iniciado o movimento houve variação nas forças. Entretanto, com o movimento cessado as forças caíram para a força isométrica, não havendo o aumento de força esperado. Já o modelo proposto por Van Looke pode representar o aumento de força.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudadas as respostas de modelos propostos por Bol, Hernandez, Van Looke, Lu e Tang-Zhang, com objetivo de representar qualitativamente comportamento mecânico dos músculos. Para isto, os modelos

foram comparados sob as mesmas condições de carregamentos, para verificar seu desempenho em representar alguns comportamentos esperados em uma sequência de contrações isométrica-concêntrica-isométrica e isométrica-excêntrica-isométrica.

Frente aos parâmetros utilizados, nenhum dos modelos se mostrou capaz de representar adequadamente, mesmo que qualitativamente, todos os tipos de contrações. Os modelos de Hernandez, Bol, Tang-Zhang e Lu se mostraram eficientes para calcular a isometria. Nos modelos que consideram a relação força-velocidade de Hill alguma semelhança com resultados experimentais esperados foi encontrada. Entretanto uma vez parado o movimento não foi verificado o desenvolvimento da força, a mesma tendeu a um patamar isométrico. Já o modelo de Van Loocke não possui a capacidade de representar bem a isometria. Entretanto, uma vez iniciado o movimento até o fim da análise foi o modelo que obteve maiores semelhanças com o resultado experimental esperado.

Estes resultados mostram que existe uma necessidade do desenvolvimento de modelos que possam representar contrações musculares combinadas, resultados até este momento este autor não encontrou em literatura.

Ainda deve-se observar que a escolha de utilizar os parâmetros materiais proveniente do artigo original de cada modelo pode ter levado a patamares de força não adequados para uma análise quantitativa, já que estes foram determinados outros históricos de contrações. Entretanto como a análise foi qualitativa (tendência), estes erros não invalidam as conclusões aqui obtidas.

### 3. REFERÊNCIAS

- Abbott, B. C., & Aubert, X. M., 1952. "The force exerted by active striated muscle during and after change of length", *The Journal of Physiology*, 117(1), 77-86.
- Ehret, A. E., Böhl, M., & Itskov, M., 2011. "A continuum constitutive model for the active behaviour of skeletal muscle", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(3), 625-636.
- Hernández-Gascón, B., Grasa, J., Calvo, B., & Rodríguez, J. F., 2013. "A 3D electro-mechanical continuum model for simulating skeletal muscle contraction", *Journal of theoretical biology*, 335, 108-118.
- Hill, A., 1938. "The heat of shortening and the dynamic constants of muscle", *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 126(843), pp. 136-195.
- Holzappel, G. A., 2000. "Nonlinear solid mechanics", (Vol. 24). Chichester: Wiley.
- Huxley, A., 1957. "Muscle structure and theory of contraction", *Prog Biophys Chem*
- Lu, Y. T., Zhu, H. X., Richmond, S., & Middleton, J., 2010. "A visco-hyperelastic model for skeletal muscle tissue under high strain rates" *Journal of biomechanics*, 43(13), 2629-2632.
- Rehorn, M. R., Schroer, A. K., & Blemker, S. S., 2014. "The passive properties of muscle fibers are velocity dependent", *Journal of biomechanics*, 47(3), 687-693.
- Tang, C. Y., Zhang, G., & Tsui, C. P., 2009. "A 3d skeletal muscle model coupled with active contraction of muscle fibres and hyperelastic behaviour" *Journal of biomechanics*, 42(7), 865-872.
- Van Loocke, M., Lyons, C. G., & Simms, C. K., 2008. "Viscoelastic properties of passive skeletal muscle in compression: stress-relaxation behaviour and constitutive modelling" *Journal of biomechanics*, 41(7), 1555-1566.

### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq e FAPERGS pelo apoio financeiro.

### 5. ABSTRACT

The muscular system is responsible for mechanical force generation in humans. Sarcomer bundles compose the muscular tissue. Under the electric stimuli sarcomers contract. Muscular tissue behaves passively with its intrinsic elasticity and actively depending on electric stimuli. Force generation is studied by many authors, specially to characterize different contractions ( isometric, concentric and eccentric), which may help to characterize mathematical models. For isometric contractions good relations are obtained using Huxley's force-length relation. For eccentric and concentric contractions the Hill's force-velocity is widely used. However, the greatest difficulty resides in the combination of these contractions, using a formulation that can represent the contractions isolated and also combined. Aiming to evaluate the tendencies of different models presented in literature, some were selected and compared under isometric-concentric-isometric and isometric-eccentric-isometric contractions. The results shows that each of the models is capable of representing only one kind of contraction, while none can represent de proposed contraction combination.

### 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.