

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE DESPORTOS  
DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO FÍSICA  
CURSO DE LICENCIATURA EM EDUCAÇÃO FÍSICA

Heron Baptista de Oliveira Medeiros

**Como o músculo contrai? avaliação de um macromodelo de sarcômero como  
instrumento de aprendizagem no ensino médio**

Florianópolis

2022

Heron Baptista de Oliveira Medeiros

**Como o músculo contrai? avaliação de um macromodelo de sarcômero como instrumento de aprendizagem no ensino médio**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Educação Física – Licenciatura do Centro de Desportos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Licenciado em Educação Física.

Orientadora: Profa. Heiliane de Brito Fontana, Dra.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Medeiros, Heron Baptista de Oliveira

Como o músculo contrai? : avaliação de um macromodelo de sarcômero como instrumento de aprendizagem no ensino médio / Heron Baptista de Oliveira Medeiros ; orientadora, Heiliane de Brito Fontana, 2022.

45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de  
Desportos, Graduação em Educação Física, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Educação Física. I. de Brito Fontana, Heiliane. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Educação Física. III. Título.

Heron Baptista de Oliveira Medeiros

**Como o músculo contrai? avaliação de um macromodelo de sarcômero como instrumento de aprendizagem no ensino médio**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Licenciado” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Educação Física – Licenciatura.

Florianópolis, 14 de julho de 2022.

---

Prof. Carlos Luiz Cardoso, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof.(a) Heiliane de Brito Fontana, Dr.(a)  
Orientador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Silas Nery de Oliveira, Me.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Gabriela Fischer, Dr.(a)  
Avaliador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, pública, justa, inclusiva e democrática, pelo apreço com a singularidade da pesquisa, ensino, extensão e intercâmbio.

A meus pais, Cleon e Dahyl, pela profundidade do amor paterno e materno, pelo apoio incondicional e ininterrupto, pelo lar e vida.

A meus irmãos, Igor, Hugo e Nathalia, pela aprendizagem e o amor, na justa medida. Por serem, sempre.

A minhas tias, Cleosa e Lais, pelo carinho e generosidade dedicados a mim durante a minha trajetória acadêmica e de vida.

A minha prima Paola, pela união e estima pelas ideias que nos unem.

A meus amigos de graduação, Camila, Guilherme e Raissa, pela intensidade e felicidade da juventude. Pelo mais importante, que é a alegria.

A minha amiga Camila, pelo amplo significado da palavra amizade. Pela companhia, alegria, justeza nas palavras e atenção ao detalhe.

As minhas famílias anfitriãs, Brian, Raphaela, Miranda e Julian, pela estadia no Canadá e pelo melhor da experiência. A Darryl, Tricia, Brendan, Brittney, Kailey e Emma, por me acolherem.

A meu namorado Brendan, por ser amor, companheiro e amigo, pela presença na ausência e pela proximidade em toda e qualquer distância.

A meus orientadores, Heiliane e Walter, pela aprendizagem e paixão a nossa área de pesquisa. Pelo exemplo solidificado.

Aos colaboradores do Laboratório BIOMECH e do Laboratório de Performance Humana, particularmente a Géssica e Shuyue, pela colaboração nas atividades de pesquisa.

Às instituições Sociedade Brasileira de Biomecânica e Sociedade Internacional de Biomecânica, pelo apoio financeiro aos congressos e ao intercâmbio.

Ao professor Ivan pela oportunidade de realizar este trabalho em seu grupo de estudos de Biologia.

A todas as pessoas que fazem e fizeram parte da constituição do homem que sou hoje, seja em âmbito pessoal ou profissional, ou ainda em seus cruzamentos. Não se vai como se veio, o deslocamento é ainda uma de nossas potências.

*“Como a Biomecânica é uma disciplina científica jovem, os destaques históricos não são bem definidos, abrindo muitos caminhos para discussão e especulação”*

*(NIGG; HERZOG, 2006)*

## RESUMO

Ensinar a contração muscular é um constante desafio para professores considerando a complexidade dos mecanismos envolvidos e a atual conjuntura de mudança de paradigma acerca de como o músculo contrai e produz força. A menor unidade funcional do músculo se chama sarcômero e é nele que ocorrem os mecanismos para a produção de força na contração muscular. O uso de modelos físicos que o representem pode proporcionar experiências positivas para ensinar a contração muscular. O objetivo deste estudo foi desenvolver um macromodelo de sarcômero e descrever sua utilização em campo para a aprendizagem de alunos do Ensino Médio acerca dos mecanismos de produção de força muscular propostos pela teoria dos três filamentos. O macromodelo de sarcômero contendo as linhas Z e os filamentos contráteis de actina e miosina foi construído com papel sola de 3 mm. Os mecanismos relacionados à modulação da força da titina foram demonstrados através de clips (cálcio) e de ganchos dispostos nos filamentos de actina. A partir da interação com a maquete é possível perceber o aumento da resistência ao alongamento do sarcômero frente a modulação da rigidez (interação com clips) e do comprimento da titina (interação com ganchos). Em relação ao estudo de campo, participaram 24 alunos do 1º ano do Ensino Médio matriculados no Colégio de Aplicação (CA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os alunos assistiram a um vídeo sobre a contração muscular e manusearam o macromodelo. A percepção dos alunos acerca da eficácia do macromodelo como demonstrativo do efeito da titina na capacidade de produção de força no músculo, foi avaliada através de um questionário em uma escala de concordância do tipo Likert de 5 pontos. O protótipo mostrou-se ser uma ferramenta útil na aprendizagem dos conceitos da contração muscular pela teoria dos três filamentos. Espera-se que os resultados desta pesquisa possam incentivar o uso de modelos físicos educacionais da contração muscular por professores.

**Palavras-chave:** ensino; contração muscular; modelos físicos.

## ABSTRACT

Teaching the mechanisms of muscle contraction can be considered challenging considering the complexity of the events involved and the current paradigm shift regarding how the muscle is thought to contract and produce force. The smallest functional unit of the muscle is called the sarcomere and it is where mechanisms for force production take place in the muscle. The use of physical models that represent sarcomeres can assist the understanding of muscle contraction events. The objective of this study was to develop a sarcomere prototype and describe its use among high school students when learning the mechanisms of muscle force production proposed by the three-filament theory. The sarcomere prototype containing the Z lines and the contractile filaments of actin and myosin was constructed with 3 mm paper sole. The mechanisms related to the modulation of titin strength were demonstrated using clips (calcium) and hooks arranged on actin filaments. From the interaction with the model, it is possible to perceive the increase in the resistance to elongation of the sarcomere through the modulation of titin stiffness (interaction with clips) and length (interaction with actin through hooks). Twenty-four 1<sup>st</sup>-year high-school students enrolled at the Colégio de Aplicação (CA) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC) participated in the field study. The students watched a video about muscle contraction and handled the prototype. The students' perception on the effectiveness of the prototype as a demonstrative tool of the effect of titin in the muscle was evaluated through a questionnaire with a 5-point Likert scale. The final score obtained in the questionnaire was evaluated using descriptive statistics. The prototype proved to be a useful tool for learning muscle contraction concepts. The results of this research may encourage the use of educational physical models of muscle contraction in teaching.

**Keywords:** school; muscle contraction; physical models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fibra muscular durante um ciclo encurtamento-alongamento.....	14
Figura 2 – Desenho esquemático de um sarcômero.....	16
Figura 3 – Relação força-comprimento do sarcômero.....	18
Figura 4 – Ilustração esquemática do novo mecanismo proposto da contração muscular.....	19
Figura 5 – Modelo tridimensional de sarcômero montado no estado relaxado.....	21
Figura 6 – Macromodelo tridimensional de sarcômero em contração.....	22
Figura 7 – Macromodelo de sarcômero dos três filamentos.....	26
Figura 8 – Cálcio ligado à titina no manuseio do macromodelo.....	27
Figura 9 – Cálcio e actina ligados à titina no manuseio do macromodelo.....	28
Figura 10 – Resultados da percepção de eficácia do macromodelo.....	33

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Roteiro sugestivo para ensinar a contração muscular em sala de aula.....	29
Quadro 2 – Mediana e intervalo interquartil (IIQ) para cada questão do questionário.....	30
Quadro 3 – Percentuais das respostas às questões da percepção do macromodelo.....	32

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	12
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1	O MÚSCULO, O SARCÔMERO E A TITINA .....	15
2.2	A CONTRAÇÃO MUSCULAR.....	16
2.2.1	<b>A teoria dos três filamentos</b> .....	18
2.3	O ENSINO DA CONTRAÇÃO MUSCULAR NO ENSINO MÉDIO .....	19
2.3.1	<b>O uso de macromodelos no ensino da Biomecânica musculoesquelética</b> .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>23</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO .....	23
3.2	PARTICIPANTES DO ESTUDO.....	23
3.3	INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS .....	24
3.3.1	<b>Vídeo instrucional</b> .....	24
3.3.2	<b>Macromodelo de sarcômero</b> .....	24
3.3.3	<b>Questionário</b> .....	24
3.4	PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS .....	25
3.5	ANÁLISE DE DADOS.....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>25</b>
4.1	COMO FOI CONSTRUIR O MACROMODELO? .....	25
4.2	EXPERIÊNCIA DE ENSINO NA ESCOLA .....	28
4.2.1	<b>Percepção de eficácia do macromodelo de sarcômero</b> .....	30
4.2.2	<b>Limitações do macromodelo</b> .....	33
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>
	<b>Apêndice A – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)</b> .....	<b>38</b>
	<b>Apêndice B – Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (TALE)</b> .....	<b>43</b>
	<b>Apêndice C – Questionário de percepção do protótipo</b> .....	<b>45</b>
	<b>Apêndice D – Resumos publicados em congressos da área</b> .....	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Imagine-se novamente como aluno no Ensino Médio. Vemos o docente explicar como ocorre o transporte de íons de sódio e potássio na membrana plasmática para despolarização e posterior contração da célula muscular. Essa contração é responsável por gerar todo e qualquer movimento humano. Paramos e refletimos quão importante são esses conhecimentos que por vezes passam despercebidos em nossa formação. Parte disso pode ser atribuída aos métodos tradicionais de ensino que fomos e que somos tipicamente expostos, com aulas expositivas que utilizam ilustrações simples 2-D para explicar conceitos estruturais e mecânicos complexos (JITTIVADHANA; RUENWONGSA; PANIJAN, 2009). Quando consideramos a aprendizagem do processo de contração muscular, compreender a natureza microscópica do sarcômero – menor unidade funcional do músculo – passa a ser um desafio para a maioria dos alunos.

Dessa forma, o uso de macromodelos como ferramenta didática para ensinar conceitos complexos da contração muscular pode auxiliar alunos a assimilarem mais facilmente esse conhecimento (JITTIVADHANA; RUENWONGSA; PANIJAN, 2009; RIOS; BONFIM, 2013; RODENBAUGH; LUJAN; DICARLO, 2012). Para aprender como os músculos contraem, é necessário conhecer as proteínas contidas no sarcômero e como elas interagem para a produção de força. Historicamente, o processo de produção de força durante a contração muscular é explicado a partir da actina e miosina e se fundamenta na teoria dos filamentos deslizantes (HUXLEY; NIEDERGERKE, 1954; HUXLEY; HANSON, 1954) e na subsequente teoria das pontes cruzadas (HUXLEY, 1957). Embora essas teorias tenham sido formuladas pela primeira vez há mais de meio século, elas constituem o paradigma atual para explicar o mecanismo pelo qual o músculo produz força na contração muscular. Esse mecanismo envolve a presença de interações entre miofilamentos formados pelas proteínas actina e miosina.

Uma terceira proteína estrutural denominada titina foi descoberta nos sarcômeros na década de 1970 (MARUYAMA, 1976; WANG; MCCLURE; TU, 1979). Esse fato instigou pesquisadores a estudarem o papel funcional dela. Seus achados, contribuíram para o aumento da importância dada a titina na área da mecânica muscular. Hoje, acredita-se que a titina contribua não somente para questões estruturais, como também há evidências que sugerem sua participação na produção de força ativa no músculo esquelético (HERZOG *et al.*, 2016).

Embora os mecanismos moleculares detalhados de como a titina contribui para a contração muscular permaneçam desconhecidos, é reconhecido hoje o seu potencial em gerar força no músculo passivo e no músculo em contração (HERZOG, 2018). A partir desse

conhecimento, surge a teoria dos três filamentos, em que a titina é inserida junto ao mecanismo das pontes cruzadas. Isso, certamente é um conhecimento inovador na área da Biomecânica e do movimento humano, que condiciona uma reformulação do paradigma hoje utilizado para explicar a contração muscular. Essa reformulação de paradigma requer a construção de novas formas de pensar e ensinar a nova teoria dos três filamentos, principalmente junto ao Ensino Médio, na qual essa aprendizagem ocorre a partir de uma base de conhecimento ainda pouco desenvolvida na área.

À vista disso, explicar conceitos dinâmicos e complexos da contração muscular, que na maior parte são desconhecidos por professores da área, é um problema, principalmente quando não se possuem materiais didáticos atualizados. O manuseio de macromodelos no Ensino Médio provou ser uma ótima ferramenta para tal lacuna (JITTIVADHANA; RUENWONGSA; PANIJAN, 2009). Especificamente, esses autores avaliaram a aprendizagem dos alunos referente ao conceito de expansão transversal do sarcômero no momento da contração e do deslizamento dos filamentos, e verificaram que o protótipo foi capaz de alterar a percepção dos alunos de que o sarcômero seria como uma lâmina fina e plana, deixando claro seu aspecto tridimensional. Ainda, a titina foi demonstrada nesse protótipo, porém com sua função limitada ao papel estrutural de manter o sarcômero organizado.

Para o meu conhecimento, não há estudos que demonstrem o uso de macromodelos de sarcômero para explicar a teoria dos três filamentos com alunos do Ensino Médio. Sendo assim, considerando que o entendimento acerca da interação entre os filamentos no sarcômero é essencial para a compreensão da contração muscular, e que esse processo fisiológico é um conhecimento a ser atualizado nos livros de Biologia do Ensino Médio, esta pesquisa visou desenvolver um macromodelo de sarcômero e avaliar seu potencial como ferramenta didática para professores utilizarem nas salas de aula no ensino da contração muscular. Especificamente, buscou-se responder: como um macromodelo representando os três filamentos (titina, actina e miosina) no processo de contração muscular pode facilitar a compreensão desse conhecimento por alunos do Ensino Médio?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito do uso de um macromodelo de sarcômero na aprendizagem de alunos do Ensino Médio acerca dos mecanismos de produção de força muscular propostos pela teoria dos três filamentos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Construir um macromodelo de sarcômero que ilustra os mecanismos propostos pela teoria dos três filamentos na produção de força no músculo;
- b) Verificar a percepção de alunos do Ensino Médio em relação à eficácia do manuseio do protótipo para demonstrar e sentir os mecanismos da titina na teoria dos três filamentos.

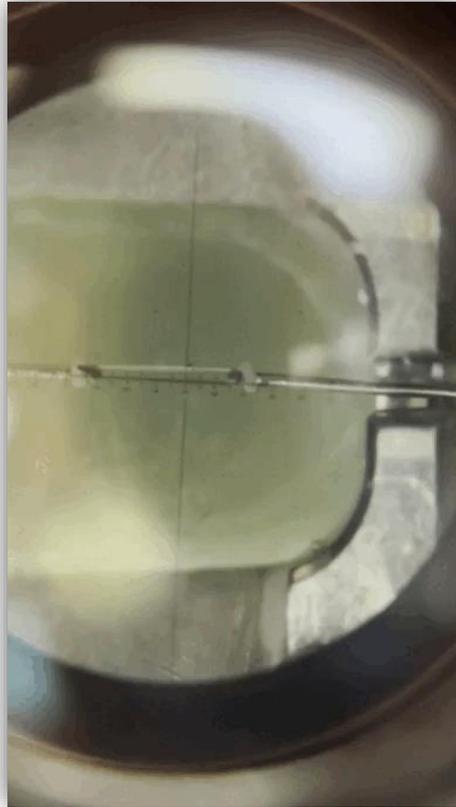
## 1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho surgiu do convite da professora Heiliane de Brito Fontana e do professor Walter Herzog, estudiosos dedicados à área da Biomecânica musculoesquelética, para elucidar com um macromodelo simples e didático a contribuição da titina na produção de força no músculo. Esses dois professores são, sem dúvidas, inspirações para mim, tendo em vista minha trajetória acadêmica na área da Biomecânica com eles. Em especial, pude ser orientado pela professora Heiliane desde o início do curso, iniciando-se pela monitoria da disciplina de Anatomia, que possui relação próxima a temática deste trabalho. Logo em sequência, adentrei ao Laboratório de Biomecânica como bolsista voluntário em Iniciação Científica da professora Heiliane, apaixonando-me pela área da Biomecânica e da pesquisa científica. Tive a oportunidade imensurável de ser orientado pelo professor Walter como bolsista CNPq em meu segundo ano de pesquisa.

Especificamente, nos últimos anos, o professor Walter e seu grupo de pesquisa dedicaram seus estudos com foco na titina e sugeriram mecanismos plausíveis para a explicação da contração muscular a partir dessa proteína estrutural presente nos sarcômeros (HERZOG, 2018, 2019; HERZOG *et al.*, 2016). Durante meu intercâmbio para o Canadá, aprendi a conduzir experimentos com a célula (fibra) muscular. A fibra muscular é semelhante a um fio de cabelo e não são todos os tipos de microscópios que conseguem observar os sarcômeros na célula. Pude trabalhar com as fibras do músculo psoas de coelhos, aprendendo a isolar essas fibras para colocá-las em uma câmara experimental para testes mecânicos (Figura 1). Nunca havia trabalhado com células musculares antes, então essa pesquisa ampliou os meus

conhecimentos sobre o tema da contração muscular para ensiná-lo neste trabalho. Pude verificar quão complexo e diverso é o tema da contração muscular.

Figura 1 – Fibra muscular durante um ciclo encurtamento-alongamento.



Fonte: Vídeo elaborado pelo autor deste trabalho (2022).

Por isso, faz-se necessário pensar em novas ferramentas de ensino para complementar o conhecimento dessa temática, visto que o papel regulador da força da titina já é bem reconhecido no campo da Biomecânica, mas muitas vezes não é facilmente compreendido por alunos. Com isso, o trabalho possuiu dois aspectos importantes. Primeiro, a exposição de alunos do Ensino Médio ao pensamento clássico acerca da contração muscular, isto é, às teorias dos filamentos deslizantes e das pontes cruzadas. E segundo, o macromodelo construído é relevante para explicar a função da titina na regulação de força em um ambiente educacional.

Além disso, diferentes formas de avaliar o processo de ensino e aprendizagem na disciplina de Biomecânica para os cursos de Educação Física e Fisioterapia, da Universidade Federal do Pampa, foram desenvolvidas pelo pesquisador e professor Felipe Pivetta Carpes. A contribuição de sua inovação didático-pedagógica com o projeto “Olimpiadas de Biomecânica” como parte do conteúdo da disciplina, em que diversas tarefas são solicitadas a fim de facilitar

e melhorar o processo pedagógico, despertou a minha criatividade para melhor desenvolver um macromodelo com esses objetivos, especificamente, na tarefa “Biomecânica é Arte”, cuja finalidade principal é pensar em diferentes formas de transmitir um conhecimento (CARPES *et al.*, 2017).

Por fim, este trabalho poderá dialogar com outras áreas de conhecimento no ambiente escolar, principalmente com trabalhos multidisciplinares entre as áreas de Linguagem (Artes e Educação Física – criação do sarcômero com materiais recicláveis), Matemática (cálculo da força elástica) e Ciências da Natureza (Biologia e Física – compreensão das proteínas contráteis do sarcômero que garantem a produção de força), em que o conteúdo a ser ensinado tenha relação com a contração muscular. Desta forma, o trabalho justificou-se considerando a relevância de investigar a percepção de alunos do Ensino Médio sobre as experiências possibilitadas por intermédio de um macromodelo de inovação didático-pedagógica na temática da contração muscular.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O MÚSCULO, O SARCÔMERO E A TITINA

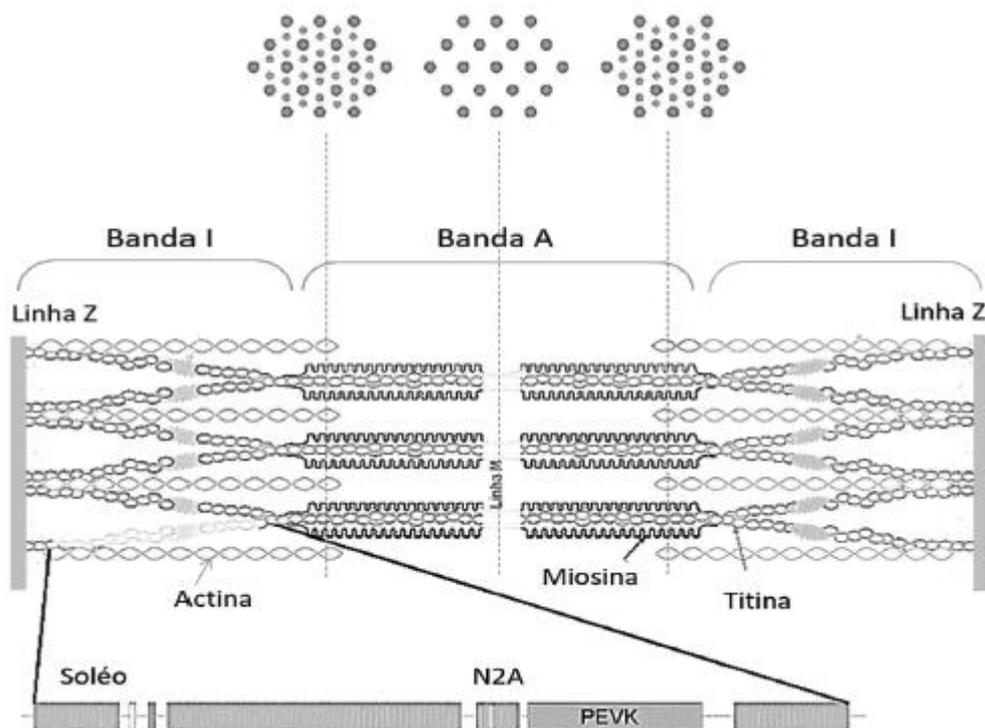
O músculo é o órgão contrátil responsável por todo e qualquer movimento humano. O músculo esquelético, por sua vez, é o único músculo controlado voluntariamente e que será descrito aqui devido ao enfoque deste trabalho monográfico. A célula do músculo, também chamada de fibra muscular, é um longo tubo cilíndrico composto longitudinalmente de miofibrilas – organelas compostas principalmente pelas proteínas titina, actina e miosina. A actina e a miosina são as proteínas contráteis no músculo também designadas de filamentos finos e filamentos grossos, respectivamente. Esses filamentos se repetem ao longo do comprimento da miofibrila em seções estruturais distintas chamadas de sarcômeros (Figura 2) (NIGG; HERZOG, 2006).

A titina é uma proteína estrutural presente nos sarcômeros que se estende da linha Z até o centro do sarcômero (linha M) por meio do filamento de miosina. Microscopicamente, o sarcômero é identificado a partir de zonas escuras e claras conhecidas como bandas A (anisotrópicas) e bandas I (isotrópicas), respectivamente. A banda A é definida pelo comprimento do filamento de miosina e se acredita que a titina esteja rigidamente ligada a esse filamento nessa região. Ainda, no centro da banda A se encontra uma região denominada zona H – formada apenas por filamentos de miosina, mas sem a existência de pontes cruzadas. Em

contrapartida, a banda I é definida pela região da linha Z e do filamento de actina que não é sobreposto ao filamento de miosina. Na banda I, a titina pode correr livremente agindo de maneira semelhante a uma mola (BORGIA *et al.*, 2011; DUVALL *et al.*, 2013; HERZOG *et al.*, 2012a; KELLERMAYER *et al.*, 1997; RIEF *et al.*, 1997). Além disso, a titina é composta em sua extensão por domínios de imunoglobulina, um característico segmento N2A e uma região denominada PEVK – rica em prolina, glutamato, valina e lisina.

Dentre os papéis funcionais associados à titina no músculo esquelético são: estabilizar os filamentos de miosina no centro dos sarcômeros (HOROWITS; MARUYAMA; PODOLSKY, 1989; HORROWITS; PODOLSKY, 1987); fornecer estabilidade aos sarcômeros na curva descendente da relação força-comprimento (HERZOG *et al.*, 2012b; LEONARD; HERZOG, 2010); e produzir a propriedade do aumento de força passiva (HERZOG; LEONARD, 2002; JOUMAA *et al.*, 2008; LEONARD; DUVALL; HERZOG, 2010).

Figura 2 – Desenho esquemático de um sarcômero. Observa-se os filamentos de actina, miosina e a titina. As regiões do sarcômero estão delimitadas no esquema. Em cima, observa-se a ilustração da organização dos filamentos de actina e miosina em corte transversal e que, na área de sobreposição, cada filamento de miosina é cercado por seis filamentos de actina. Adaptado de Herzog (2018).



Fonte: Campos e Fontana (2019).

## 2.2 A CONTRAÇÃO MUSCULAR

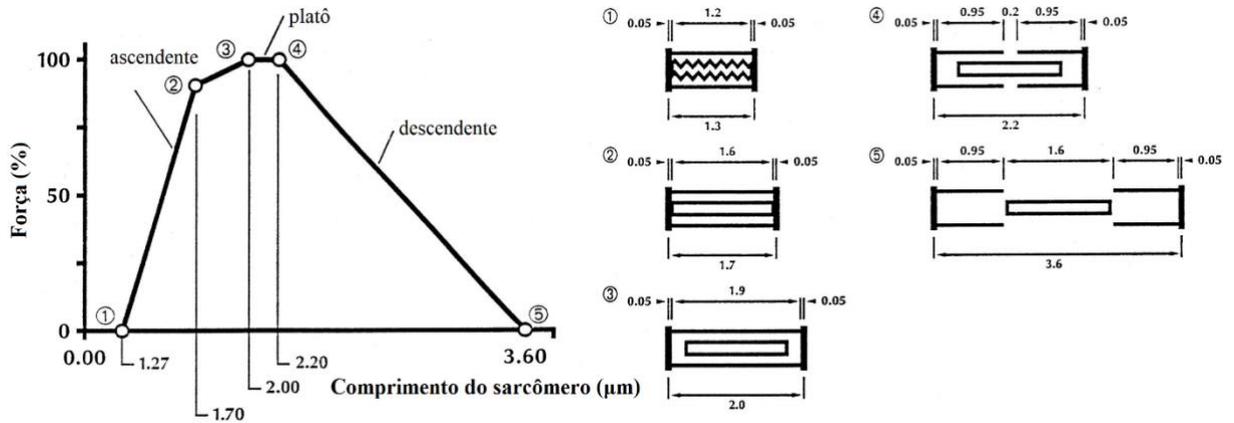
Os mecanismos responsáveis pela produção de força durante a contração muscular se baseiam na teoria dos filamentos deslizantes (HUXLEY; NIEDERGERKE, 1954; HUXLEY; HANSON, 1954) e na subsequente teoria das pontes cruzadas (HUXLEY, 1957). As primeiras evidências em suporte a essas teorias surgiram na década de 1950 e indicaram que o encurtamento do sarcômero, e conseqüentemente da fibra muscular, ocorria através dos deslizamentos entre os filamentos finos (actina) sobre os filamentos grossos (miosina) (HUXLEY; NIEDERGERKE, 1954; HUXLEY; HANSON, 1954). Especificamente, esses autores observaram que os filamentos de miosina não encurtavam quando o músculo contraía – conforme se pensava na época – mas que apenas os filamentos de actina encurtavam.

Seguidamente, Huxley (1957) propôs que o deslizamento dos filamentos seria explicado através de interações cíclicas de pontes cruzadas existentes entre esses filamentos. Em síntese, os filamentos de miosina, onde as pontes cruzadas estariam localizadas, puxariam os filamentos de actina para o centro dos sarcômeros, contraindo os músculos. Dessa forma, observou-se a necessidade de rigidez dos filamentos de miosina, para que esses sustentassem a tração dos filamentos de actina durante o encurtamento da fibra muscular. O encurtamento no músculo seria resultante da soma dos encurtamentos de cada sarcômero da miofibrila. Esse mecanismo ficou conhecido como a teoria das pontes cruzadas.

Gordon, Huxley e Julian (1966) realizaram um experimento com fibras isoladas para determinar a capacidade de produção de força isométrica máxima no músculo em diversos comprimentos. Esses autores observaram uma íntima associação com a teoria das pontes cruzadas, visto que o comprimento do sarcômero se relaciona com o grau de sobreposição dos miofilamentos. Em outras palavras, esse estudo mostrou que o músculo possui um comprimento ótimo de produção de força (platô de força) e que sarcômeros muito encurtados ou muito estendidos diminuem a capacidade de produção de força. Essa propriedade mecânica muscular ficou conhecida como a relação força-comprimento (Figura 3).

A partir desses achados, Huxley (1969) sugeriu que as pontes cruzadas teriam uma fase de potência representada pela rotação da cabeça de miosina que tracionaria os filamentos de actina. Huxley e Simmons (1971) também indicaram que o número de pontes cruzadas formadas e a sobreposição dos filamentos de actina e miosina – em função do comprimento do sarcômero – seriam considerados fatores determinantes da produção de força no músculo.

Figura 3 – Relação força-comprimento do sarcômero. Observa-se as regiões ascendente, platô e descendente. Ao lado, observa-se as representações esquemáticas de sarcômeros e a sobreposição entre os filamentos de actina e miosina para determinado comprimento. Adaptado de Gordon, Huxley e Julian (1966).



Fonte: Rassier, MacIntosh e Herzog (1999).

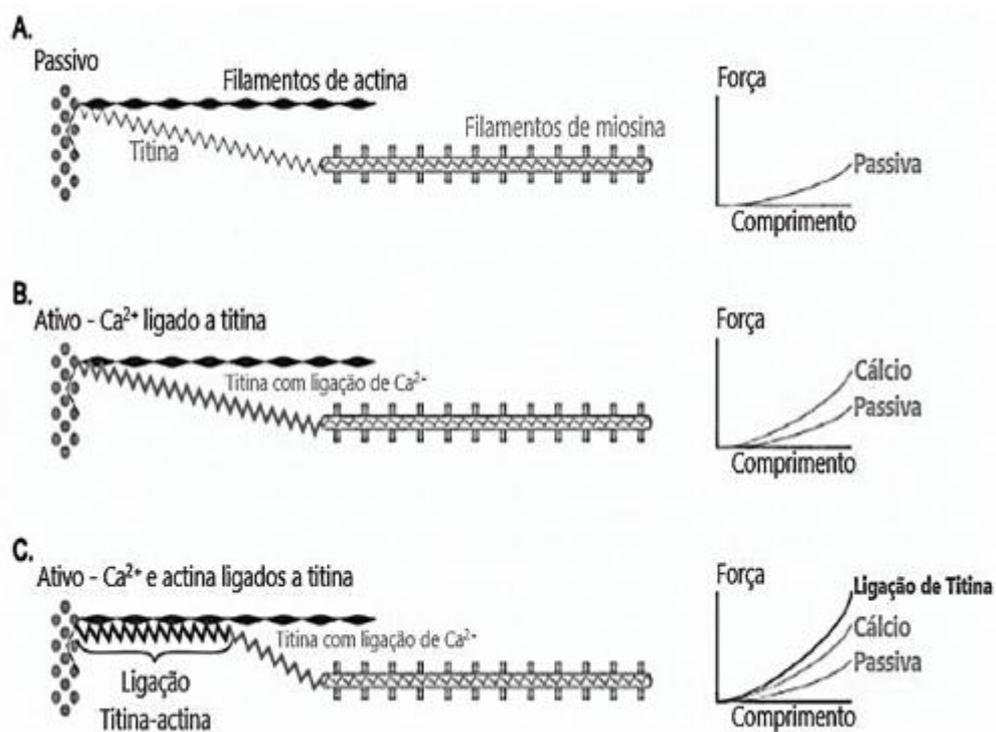
Embora a teoria das pontes cruzadas seja aceita e ensinada como a base do entendimento de como o músculo contrai, ela possui algumas limitações no que se refere a produção de força no músculo quando alongando (contração excêntrica) e também é incapaz de explicar as propriedades histórico dependentes do músculo. Por isso, as funções de uma terceira proteína (titina) que pudessem influenciar a contração muscular despertaram interesse em cientistas. Essa proteína estrutural que abrange os sarcômeros dos vertebrados, parece se ligar à actina, mas sua função não é bem compreendida ainda. Portanto, um conhecimento inovador que consiga explicar este novo mecanismo através da titina deve ser comum nos próximos anos e as principais especulações serão descritas a seguir.

### 2.2.1 A teoria dos três filamentos

A teoria dos três filamentos é um conhecimento inovador que necessita simples reformulações no pensamento clássico da contração muscular incorporando a titina na produção de força no músculo. Experimentos em miofibrilas alongadas ativamente (maior concentração de cálcio) e passivamente (menor concentração de cálcio) demonstraram aumentos de força passiva em situações de inibição das pontes cruzadas entre actina e miosina (JOURMAA *et al.*, 2007, 2008). Especula-se, então, que a presença de um elemento estrutural passivo do músculo – a titina – atue como uma mola que aumenta a sua rigidez através da interação com o cálcio e, conseqüentemente, produz força (HERZOG, 2018, 2019; HERZOG *et al.*, 2016).

A primeira possibilidade apontada para o aumento da rigidez da titina é aumentando a rigidez inerente da mola. Exemplificando, o cálcio se interage em regiões específicas da titina, tornando-a mais rígida e produzindo mais força passiva no estado ativo comparado ao passivo (Figura 4B e 4A, respectivamente) (JOUAAA *et al.*, 2007, 2008; LABELIT *et al.*, 2003). Por outro lado, a segunda possibilidade promissora no aumento de força passiva é diminuindo o comprimento da mola. Esse mecanismo é explicado pela redução no comprimento de mola livre da titina, na qual a região proximal da titina se conecta aos filamentos de actina, diminuindo o comprimento de mola livre na região distal da titina (Figura 4C) (DUVALL *et al.*, 2017; JOUAAA *et al.*, 2007, 2008). Logo, os dois mecanismos ocorreriam devido à mudança na rigidez da mola proporcionada pelo cálcio e/ou pela ligação da titina com a actina.

Figura 4 – Ilustração esquemática do novo mecanismo proposto da contração muscular. Adaptado de Herzog (2018).



Fonte: Campos e Fontana (2019).

### 2.3 O ENSINO DA CONTRAÇÃO MUSCULAR NO ENSINO MÉDIO

Para ensinar os mecanismos da contração muscular e suas teorias no Ensino Médio, faz-se necessário, primeiramente, o ensino da célula como unidade da vida e a interação entre os sistemas locomotor e nervoso. Esse conhecimento é exposto aos alunos nas aulas de Ciências

do 6º ano do Ensino Fundamental, conforme as habilidades específicas selecionadas da Base Nacional Comum Curricular (BNCC): “explicar a organização básica das células e seu papel como unidade estrutural e funcional dos seres vivos; deduzir que a estrutura, a sustentação e a movimentação dos animais resultam da interação entre os sistemas muscular, ósseo e nervoso” (BRASIL, 2018, p. 345).

A continuidade desses conhecimentos é essencial no Ensino Médio para ampliar e sistematizar essas aprendizagens, principalmente, no que tange o aprofundamento dos conhecimentos conceituais da área. No Ensino Médio, espera-se que os alunos possam comparar distintas explicações científicas propostas em diferentes épocas e reconhecer os limites explicativos das ciências (BRASIL, 2018). Esse argumento reforça a ideia deste trabalho em ensinar as diferentes teorias e a mudança de paradigma da contração muscular que, paralelamente, proporciona a compreensão de como é construído o conhecimento científico.

Segundo a BNCC (BRASIL, 2018), as competências específicas listadas para o Ensino Médio na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias são abrangentes, ou seja, não especificam como de fato a contração muscular deve ser ensinada. No entanto, é possível suspeitar que o ensino da contração muscular esteja limitado à etapa inicial da contração muscular, que compreende o potencial de ação (estímulo neural) e os processos químicos – que resultam na entrada de cálcio no interior da célula e a saída de potássio – necessários para a despolarização da membrana e contração da fibra muscular.

Entretanto, o ensino da contração muscular a partir da despolarização da membrana, excluindo o desfecho da produção de força no músculo, é bastante desconectado e pouco contribui para que um aluno aprenda de fato como o músculo contrai. Logo, modelos físicos podem ajudar na compreensão de como o músculo produz força, competência específica listada também na BNCC, que recomenda fortemente a construção de representações ou macromodelos: “[...] representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica” (BRASIL, 2018, p. 559). A seguir serão descritas iniciativas com a utilização de macromodelos no ensino da contração muscular.

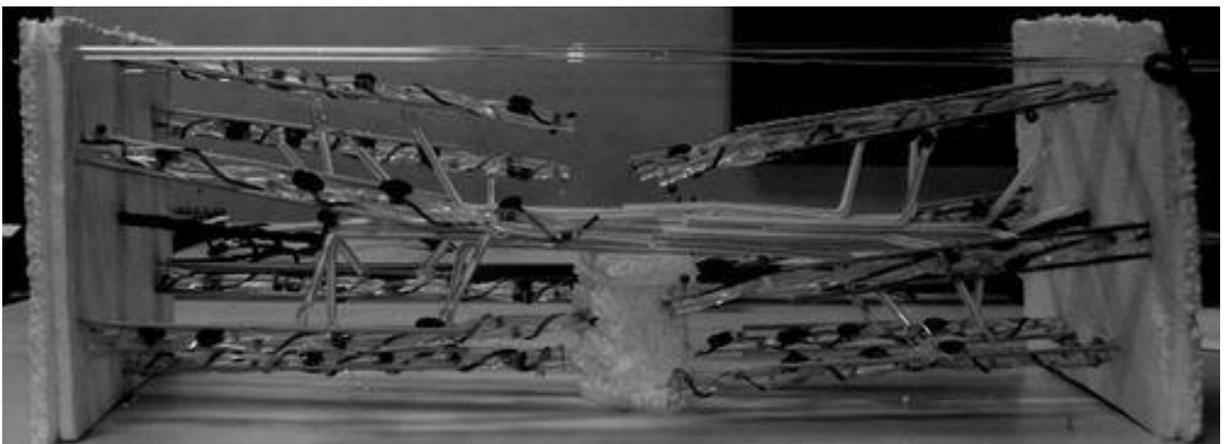
### **2.3.1 O uso de macromodelos no ensino da Biomecânica musculoesquelética**

A utilização de macromodelos é uma ferramenta didática de ensino para facilitar a compreensão de alunos quando apresentados a determinado conhecimento. Especificamente, no ensino da contração muscular é necessário incorporar estruturas microscópicas presentes no

músculo, que torna o conteúdo ainda mais complexo e desafiador para se aprender, principalmente quando expostos na forma de desenhos, esquemas ou animações (RIOS; BONFIM, 2013). Dessa forma, os modelos físicos têm como objetivo superar as limitações gráficas impostas por representações 2-D em livros, eliminando os equívocos dos alunos proporcionados por essas exposições anteriores (JITTIVADHNA; RUENWONGSA; PANIJPAN, 2009).

O uso de macromodelos para o ensino da contração muscular já foi testado por alguns autores, seja através da construção do modelo pelos alunos ou pelo manuseio do mesmo já construído. Rios e Bonfim (2013) tiveram como objetivo incentivar que alunos construíssem um macromodelo de sarcômero simples e funcional para explicar a teoria dos filamentos deslizantes (Figura 5). Para avaliar a construção e a funcionalidade do macromodelo em sala de aula, 7 alunos de graduação em Biologia foram submetidos a uma palestra sobre o sarcômero logo antes da atividade. Destaca-se a presença da titina na construção dos macromodelos, ressaltando a sua importância em organizar e estabilizar o sarcômero, pois seria através do material utilizado para representar a titina, o responsável por suportar o peso do filamento grosso. Os alunos que participaram da pesquisa manifestaram entusiasmo na construção do modelo e o avaliaram positivamente no que se refere a melhor compreensão e visualização das estruturas e funções do sarcômero.

Figura 5 – Modelo tridimensional de sarcômero montado no estado relaxado.



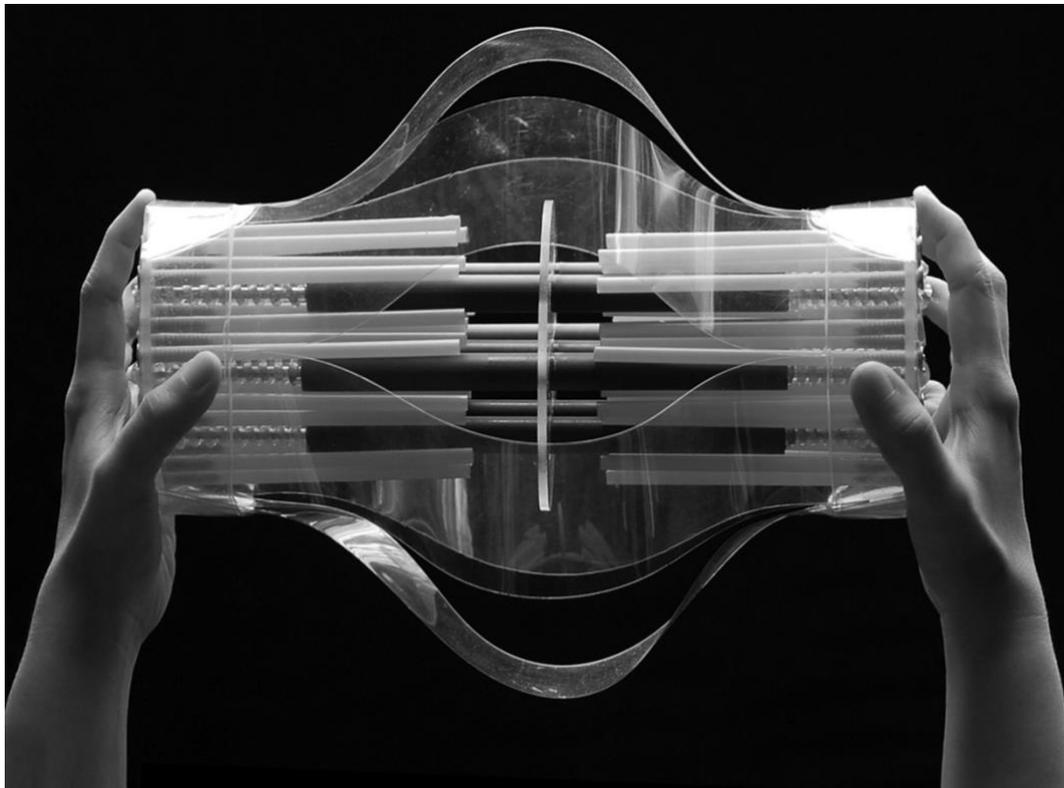
Fonte: Rios e Bonfim (2013).

Além disso, Rodenbaugh, Lujan e DiCarlo (2012) também utilizaram uma metodologia ativa de aprendizagem com o objetivo de construir um macromodelo de sarcômero durante o horário de aula programado. Participaram 70 alunos de graduação em Enfermagem

nesse estudo. Esse modelo, entretanto, não incorporou a titina na construção do sarcômero. Os autores ressaltaram a ausência de componentes fundamentais para a contração muscular no modelo, como o retículo sarcoplasmático, a ação do cálcio e o papel dos túbulos T. No entanto, nenhuma menção foi feita a titina. Por fim, a pesquisa concluiu que a construção de modelos físicos durante as aulas é uma valiosa experiência educacional.

Jittivadhna, Ruenwongsa e Panijpan (2009) desenvolveram um macromodelo de sarcômero 3-D (Figura 6) para facilitar o mecanismo dos filamentos deslizantes e da expansão transversal do sarcômero, avaliando a eficácia dessa ferramenta através de um questionário de aprendizagem em 343 alunos (278 alunos de Ensino Médio e 65 alunos de graduação). Os resultados da pesquisa mostraram que o modelo auxiliou na aprendizagem dos alunos em relação ao arranjo longitudinal dos filamentos, como também contribuiu quando manipulado na visualização do deslizamento dos filamentos e da manutenção do volume do sarcômero. Os alunos obtiveram mais acertos no pós-teste, ou seja, após a manipulação do macromodelo, provando sua eficácia em dissipar algumas concepções errôneas mantidas por alunos previamente submetidos às ilustrações 2-D.

Figura 6 – Macromodelo tridimensional de sarcômero em contração.



Fonte: Jittivadhna, Ruenwongsa e Panijpan (2009).

Ainda, os mesmos autores também utilizaram em seu macromodelo a titina, que atuaria como uma mola responsável pela elasticidade do modelo, estendendo-se desde a extremidade do filamento grosso até a banda Z. Seu papel funcional associado a força passiva no músculo foi uma das perguntas do questionário: “qual proteína do sarcômero funciona como uma mola molecular responsável por grande parte da elasticidade passiva do músculo?”. No pré-teste, apenas 21 alunos marcaram a titina como a resposta correta, e após a exposição do macromodelo, no pós-teste, 331 alunos compreenderam essa função e a marcaram. Similarmente, os autores destacam a importância da titina na “sustentação” do sarcômero, utilizando uma figura de linguagem similar à “coluna vertebral” do sarcômero, ou seja, indispensável a sua presença para construir o macromodelo.

Nesses macromodelos, portanto, ou a titina foi ignorada ou a demonstração da sua função foi limitada ao contexto estrutural. Não foram encontrados estudos que buscaram incorporar os mecanismos previstos pela teoria dos três filamentos para a produção de força no músculo. Isso, reforça as lacunas presentes na área da contração muscular no que se refere o conhecimento inovador da presença da titina na produção de força muscular. Embora, esses estudos descrevam experiências positivas no uso de macromodelos para o ensino da contração, o uso de um macromodelo que represente os três filamentos (titina, actina e miosina) no processo de contração muscular ainda não foi observado.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO**

Este estudo apresentou duas fases, uma de desenvolvimento e uma de teste. A fase de teste se caracteriza como uma pesquisa descritiva de campo – uma vez que busca se caracterizar por uma investigação realizada através da coleta de dados junto ao público alvo (THOMAS; NELSON; SILVERMAN, 2012). Uma intervenção com o uso do macromodelo de sarcômero foi testada em ambiente educacional para avaliar seu efeito sobre a percepção de aprendizagem de alunos do Ensino Médio.

#### **3.2 PARTICIPANTES DO ESTUDO**

Participaram deste trabalho 24 alunos do 1º ano do Ensino Médio matriculados no Colégio de Aplicação (CA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Todos os

participantes desta pesquisa assinaram um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (APÊNDICE A) ou um Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (APÊNDICE B).

### 3.3 INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

#### 3.3.1 Vídeo instrucional

A função do vídeo instrucional foi trazer aos alunos a explicação da contração muscular a partir do pensamento clássico. O vídeo atendeu três macro conceitos da contração muscular:

- a) O deslizamento dos miofilamentos.
- b) As pontes cruzadas presentes no sarcômero.
- c) A capacidade de produção de força e o nível de sobreposição dos miofilamentos.

#### 3.3.2 Macromodelo de sarcômero

A montagem do macromodelo de sarcômero teve como norteadores os seguintes fatores:

- a) Baixo custo: buscou-se utilizar materiais acessíveis que pudessem ser construídos em ambiente escolar.
- b) Dinamismo: o macromodelo deveria ser dinâmico, de modo que o indivíduo pudesse manipulá-lo e perceber os mecanismos propostos.
- c) Atual: o macromodelo deveria ilustrar o mecanismo da contração a partir da teoria dos três filamentos.

#### 3.3.3 Questionário

Para avaliar a percepção acerca do macromodelo foi desenvolvido um questionário composto por 10 afirmações em uma escala de concordância do tipo Likert de 5 pontos (APÊNDICE C). Os participantes tiveram que concordar ou discordar das afirmações referentes ao macromodelo, e puderam não ter uma opinião formada. As respostas de 1 a 5 representam uma ordem de eficácia para aquilo que se pretende medir através do macromodelo, sendo 5 a melhor resposta em termos de eficácia.

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados aconteceu no grupo de estudos de Biologia no contraturno das aulas do Colégio de Aplicação da Universidade Federal de Santa Catarina. Os alunos assistiram ao vídeo “A Contração Muscular” disponibilizado no YouTube e em algumas pausas do vídeo foi contextualizado o macromodelo. As seguintes ideias foram expostas durante a explanação:

- a) A instabilidade do macromodelo sem a presença da titina, contextualizando seu papel responsável por grande parte da força passiva do músculo.
- b) A necessidade da presença do cálcio e da sobreposição dos miofilamentos para a formação de pontes cruzadas.
- c) As hipóteses atualmente aceitas no contexto da teoria dos três filamentos (ou seja, i) o cálcio pode se interagir com a titina, aumentando sua rigidez e ii) a titina pode se ligar à actina, diminuindo seu comprimento extensível).

Os alunos experimentaram o manuseio do macromodelo em pequenos grupos e foram incentivados a simular junto ao macromodelo os mecanismos de interação da titina durante a contração muscular. Prontamente após o manuseio, os alunos responderam ao questionário de percepção do macromodelo.

### 3.5 ANÁLISE DE DADOS

Os resultados do desenvolvimento do projeto foram documentados a partir de fotos e ilustrações. Os resultados do estudo de campo são apresentados em formato de relato desenvolvido por mim. A pontuação final obtida no questionário foi avaliada através da estatística descritiva com a mediana e o intervalo interquartil (IIQ) para cada questão. A análise estatística foi realizada utilizando o pacote estatístico (JASP 0.16.1).

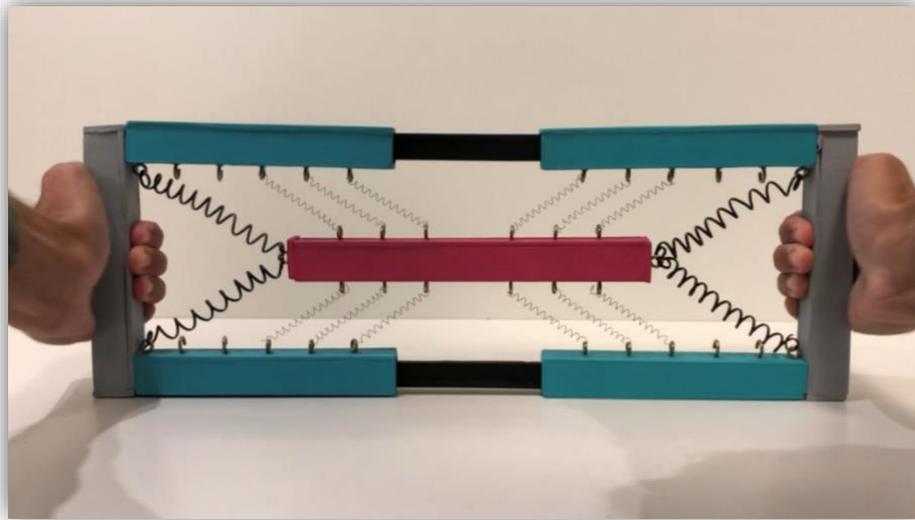
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 COMO FOI CONSTRUIR O MACROMODELO?

O macromodelo apresentado neste trabalho está na sua segunda versão. Ele envolve os mecanismos de produção de força no músculo e não inclui os eventos prévios da contração

muscular. O macromodelo de sarcômero contém duas estruturas representando a linha Z (2 cm x 15 cm x 2 cm), quatro filamentos de actina (15 cm x 2 cm x 2 cm) e um filamento de miosina (20 cm x 2 cm x 2 cm). Essas peças foram construídas com papel sola de 3 mm para ilustrar um modelo físico 2-D com algumas representações em 3-D (peças em paralelepípedo) (Figura 7).

Figura 7 – Macromodelo de sarcômero dos três filamentos. Observa-se as linhas Z (cinza), filamentos de actina (azul), filamento de miosina (rosa), titina (mola preta) e pontes cruzadas (pequenas molas cinza).



Fonte: Elaborada pelo autor deste trabalho (2022).

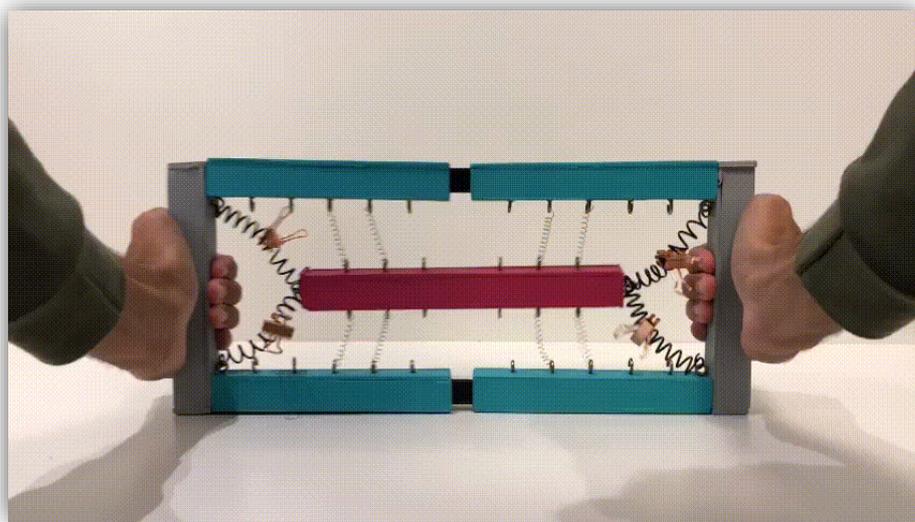
Para propiciar a aprendizagem acerca dos mecanismos envolvidos na produção de força durante a contração muscular, o modelo envolveu os três filamentos (titina, actina e miosina). A titina foi representada por molas longas de espirais de caderno, permitindo o alongamento do sarcômero enquanto são tensionadas. As pontes cruzadas foram representadas por molas pequenas e mais rígidas de canetas. Elas foram fixadas em três ganchos espaçados por 2,5 cm dispostos na actina e na miosina. A titina, por sua vez, foi fixada em um gancho na linha Z e na face lateral do paralelepípedo que representa o filamento de miosina. Além disso, uma peça de apoio (30 cm x 1,2 cm x 1,2 cm) foi inserida no interior dos filamentos de actina, permitindo a estabilidade rotacional e plana do modelo de sarcômero.

Em síntese, o macromodelo consegue demonstrar a teoria dos filamentos deslizantes, das pontes cruzadas e dos três filamentos. Dois mecanismos relacionados a modulação da força exercida pela titina podem ser explorados:

- a) O aumento da rigidez da titina frente à presença do cálcio: nesse experimento foram utilizados clips para imitar a ação do cálcio a partir da criação de ligações rígidas entre elos consecutivos da mola (Figura 8).
- b) O aumento da rigidez da titina frente à diminuição do segmento alongável: nesse experimento a titina foi fixada em ganchos dispostos na actina, permitindo a ligação da titina à actina, reduzindo o comprimento de mola livre alongável (Figura 9). O macromodelo possui dois ganchos para essa finalidade, espaçados também por 2,5 cm, ao lado dos três ganchos posicionados na actina para as pontes cruzadas. Os alunos podem experimentar a ligação da titina a esses dois ganchos e possivelmente sentir no manuseio a diferença de força necessária para alongar o macromodelo.

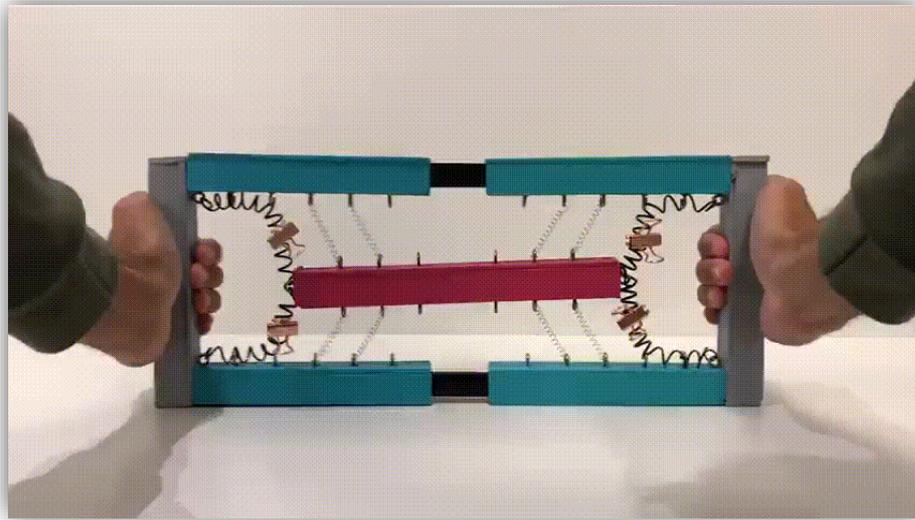
Esses mecanismos modulavam a rigidez da titina quando alongada, logo a partir da interação com a maquete seria possível perceber o aumento da resistência ao alongamento do sarcômero frente a modulação da rigidez (interação com clips) e do comprimento alongável da titina (interação com ganchos). Os alunos experimentaram esses mecanismos da titina na contração muscular através de rodadas explicativas manipulando a rigidez da mola.

Figura 8 – Cálcio ligado à titina no manuseio do macromodelo. A interação com clips (cálcio) possibilitou comprimir a mola, aumentando a rigidez da titina durante um alongamento.



Fonte: Vídeo elaborado pelo autor deste trabalho (2022).

Figura 9 – Cálcio e actina ligados à titina no manuseio do macromodelo. A interação com ganchos possibilitou reduzir o comprimento de mola livre, aumentando a rigidez da titina durante um alongamento.



Fonte: Vídeo elaborado pelo autor deste trabalho (2022).

#### 4.2 EXPERIÊNCIA DE ENSINO NA ESCOLA

A atividade foi realizada no Laboratório de Biologia do Colégio de Aplicação. Os alunos estavam organizados em pequenos grupos e sentados em volta de cinco mesas redondas. A sala possuía conexão de internet e o vídeo foi acessado por um computador conectado ao projetor da sala. A atividade foi explanativa dialogada de modo que os estudantes puderam interromper a apresentação sempre que julgassem necessário. Houve uma grande participação e engajamento dos alunos durante a explicação da contração muscular. A atividade durou cerca de 45 minutos.

Inicialmente, foi explicado através do macromodelo as proteínas presentes no sarcômero assistidas no vídeo. Foi perguntado se os alunos já as conheciam e todos disseram que era um conhecimento novo para eles. O macromodelo foi bastante útil nessa fase da intervenção para que os alunos designassem as estruturas do sarcômero. Na sequência da explicação, contextualizou-se o papel da titina em estabilizar o filamento de miosina no centro do sarcômero e de produzir força passiva no músculo (sem pontes cruzadas). Para isso, montamos o macromodelo, que estava com as peças das estruturas/proteínas separadas, incorporando as molas da titina com a finalidade de “suspender” o filamento de miosina no macromodelo.

Seguidamente, introduziu-se a teoria dos filamentos deslizantes e das pontes cruzadas, incorporando as molas de canetas entre os ganchos dispostos na estrutura da actina e miosina. Aqui, foi explicado através do vídeo o processo químico para esse mecanismo ocorrer com ênfase na presença do cálcio em toda formação de uma ponte cruzada. Os alunos manusearam o macromodelo em estado ativo (com pontes cruzadas).

Por último, falamos brevemente sobre a teoria dos três filamentos que surgiu e ganhou força, mostrando as hipóteses atualmente aceitas: o cálcio pode se interagir com a titina (interação com clips); a titina pode se ligar à actina (interação com ganchos). Essas interações foram explicadas e os alunos puderam experimentar em pequenos grupos o manuseio delas. Aqui, tiramos as pontes cruzadas para facilitar na percepção do macromodelo durante um alongamento, já que com as molas pequenas e mais rígidas das pontes cruzadas tornava-o difícil de alongar. No quadro abaixo será descrito uma ideia de roteiro para futuras explanações com o macromodelo (Quadro 1).

Quadro 1 – Roteiro sugestivo para ensinar a contração muscular em sala de aula

<b>Momento 1</b>	Conectar as metades do modelo físico de sarcômero 2-D com a peça de apoio no interior do filamento de actina. [mostrar as proteínas presentes no macromodelo: actina e miosina]; [mostrar a instabilidade do macromodelo sem a presença da titina];
<b>Momento 2</b>	Colocar a titina (mola de caderno) nos ganchos laterais da miosina e da linha Z. [alongar o macromodelo passivamente]; [explicar o papel da titina em gerar força passiva no músculo];
<b>Momento 3</b>	Explicar a relação força-comprimento do músculo. [colocar o cálcio (clips) e as pontes cruzadas (molas de caneta)]; [mostrar que o grau de sobreposição dos filamentos determina a capacidade do músculo de gerar força ativa];
<b>Momento 4</b>	Explicar que a teoria das pontes cruzadas para a produção de força no músculo (actina e miosina) foi formulada em 1957 e é aceita até os dias de hoje. No entanto, ela apresenta algumas limitações. [como: i) não explica o aumento residual de força e ii) não explica a maior eficiência da contração excêntrica em produzir força];
<b>Momento 5</b>	Contextualizar que no início dos anos 2000... uma nova teoria sobre a contração muscular (teoria é um modelo de conhecimento ou um paradigma científico em constante questionamento) surgiu e ganhou força. [mostrar as hipóteses atualmente aceitas no contexto da teoria dos três filamentos: o cálcio pode se interagir com a titina; a titina pode se ligar à actina]; [teorias são formuladas a partir de hipóteses testadas e aceitas; eles explicam os fenômenos (reais) que motivaram o surgimento de novas hipóteses e novas teorias].
<b>Momento 6</b>	Finalizar explicando que o paradigma/teoria anterior (pontes cruzadas) embora robusto e bem aceito, apresenta limitações [ou seja, não consegue explicar determinados fenômenos que são observados experimentalmente]; [manusear as hipóteses aceitas da titina].

Fonte: Quadro elaborado pelo autor deste trabalho (2022).

#### 4.2.1 Percepção de eficácia do macromodelo de sarcômero

O macromodelo de sarcômero mostrou-se ser uma ferramenta útil para associar a complexidade dos conceitos da contração muscular. No Quadro 2 é mostrado a pontuação para cada item do questionário por meio da mediana e do IIQ dos dados da amostra.

Quadro 2 – Mediana e IIQ para cada questão do questionário

Questão	Mediana	IIQ
1. Compreendi o que é um sarcômero;	4	0
2. Captei quais são as proteínas estruturais presentes no sarcômero;	4	2
3. Entendi que o sarcômero se alonga e se encurta durante a contração muscular;	5	1
4. Entendi que em comprimentos longos do sarcômero existe pouca sobreposição dos filamentos e pontes cruzadas;	3	1
5. Consegui entender quais são os mecanismos prováveis da titina na produção de força;	4	1
6. Quando alonguei o protótipo, senti que precisei fazer mais força quando tinha o cálcio na titina;	4	2
7. Quando alonguei o protótipo, senti que precisei fazer mais força quando a titina se ligou na actina;	4	2
8. Quando alonguei o protótipo, precisei fazer mais força com o cálcio conectado na titina do que a titina conectada na actina;	3	2
9. Quando alonguei o protótipo, precisei fazer mais força com a titina conectada na actina do que o cálcio conectado na titina;	3	1
10. Entendi como o aumento de força durante alongamentos pode ser explicado pela nova teoria dos três filamentos proteicos: titina, actina e miosina.	4	0

Fonte: Dados elaborados pelo autor deste trabalho (2022).

De acordo com o Quadro 3 e Figura 10, o nível de concordância, ou seja, o somatório dos graus 4 e 5 do questionário, indicou que 80% da amostra concordou que compreenderam o que é um sarcômero (questão 1), 67% da amostra concordou que captaram quais são as proteínas estruturais presentes no sarcômero (questão 2) e 100% da amostra concordou que entenderam que o sarcômero se alonga e se encurta durante a contração muscular (questão 3).

Essa última questão apresentou o maior grau de concordância dentre os itens avaliados. Esses resultados corroboram com os estudos de Rios e Bonfim (2013) e Jittivadhna, Ruenwongsa e Panijpan (2009) que também concluíram que os macromodelos construídos forneceram respostas positivas no que tange a melhor compreensão e visualização das estruturas e funcionalidades do sarcômero.

Por sua vez, 39% da amostra não teve uma opinião formada sobre o entendimento de que em comprimentos longos do sarcômero existe pouca sobreposição dos filamentos e pontes cruzadas (questão 4). Tal fato pode ser explicado pela centralização da explicação nas interações cíclicas de pontes cruzadas e não na sobreposição das pontes cruzadas. Esse é um conceito importante e talvez tenha que ser reforçado em futuras explicações, já que o macromodelo sinalizou que, com essa amostra, torna-se mais difícil de entender esse conceito.

Sobre os mecanismos prováveis da titina na produção de força (questões 5, 6, 7), 67% da amostra concordou que entenderam quais eram eles e, também, aproximadamente 53% da amostra concordou que sentiu que precisou fazer mais força ao alongar o macromodelo quando tinha o cálcio na titina (interação com clips) e/ou quando a titina se ligou na actina (interação com ganchos). Entretanto, 36% dessa amostra não sentiu que precisou fazer mais força nas questões 6 e 7, as quais deveriam, teoricamente, exigir mais força ao puxar o macromodelo. O percentual de alunos relatando baixo grau de concordância nessas questões pode ser advindo do manuseio prévio do macromodelo com as pontes cruzadas, que eram mais rígidas e podem ter influenciado a percepção dos alunos ao compararem as condições. Por outro lado, a proposta aqui não era em comparar a força proveniente das pontes cruzadas com a da titina, mas sim em sentir o aumento de força provocado pela titina durante um alongamento ativo do músculo (com pontes cruzadas). Contudo, isso não ocorreu pelo fato de termos retirado as pontes cruzadas para sentir mais facilmente a rigidez da titina durante o alongamento do macromodelo.

As questões 8 e 9 refletiam a mesmo questionamento, mas foram invertidas propositalmente na construção da escala de concordância com o intuito de verificar qual condição os alunos perceberam como a de maior demanda de produção de força: a condição na qual a titina era ligada ao cálcio ou a condição na qual a titina era ligada à actina. Cerca de 40% da amostra não teve opinião formada nessas questões. Acredita-se que não houve uma clareza nas afirmações do questionário, uma vez que ambas as questões possuíam a interação com clips (cálcio) no manuseio, enquanto que a questão 9 possuía o efeito adicionado da titina conectada à actina. No entanto, 78% da amostra concordou que entenderam como o aumento de força durante alongamentos pode ser explicado pela nova teoria dos três filamentos.

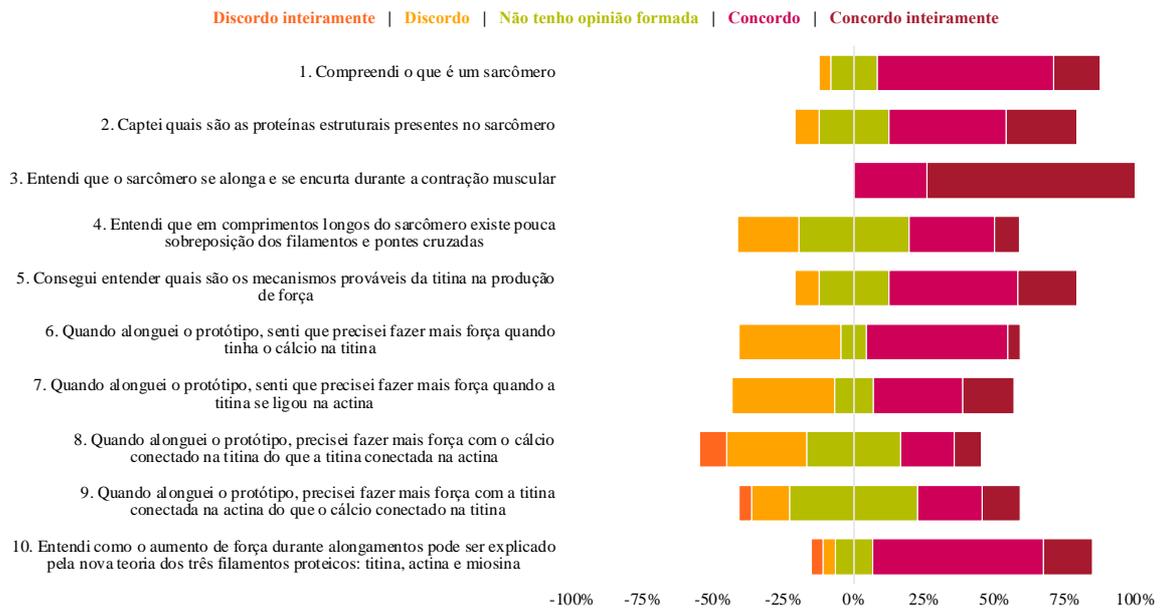
Quadro 3 – Percentuais das respostas às questões da percepção do macromodelo

Questão	Discordo inteiramente	Discordo	Não tenho opinião formada	Concordo	Concordo inteiramente
1. Compreendi o que é um sarcômero;	0%	4%	17%	<b>63%</b>	17%
2. Captei quais são as proteínas estruturais presentes no sarcômero;	0%	8%	25%	<b>42%</b>	25%
3. Entendi que o sarcômero se alonga e se encurta durante a contração muscular;	0%	0%	0%	26%	<b>74%</b>
4. Entendi que em comprimentos longos do sarcômero existe pouca sobreposição dos filamentos e pontes cruzadas;	0%	22%	<b>39%</b>	30%	9%
5. Consegui entender quais são os mecanismos prováveis da titina na produção de força;	0%	8%	25%	<b>46%</b>	21%
6. Quando alonguei o protótipo, senti que precisei fazer mais força quando tinha o cálcio na titina;	0%	36%	9%	<b>50%</b>	5%
7. Quando alonguei o protótipo, senti que precisei fazer mais força quando a titina se ligou na actina;	0%	<b>36%</b>	14%	32%	18%
8. Quando alonguei o protótipo, precisei fazer mais força com o cálcio conectado na titina do que a titina conectada na actina;	10%	29%	<b>33%</b>	19%	10%
9. Quando alonguei o protótipo, precisei fazer mais força com a titina conectada na actina do que o cálcio conectado na titina;	5%	14%	<b>45%</b>	23%	14%
10. Entendi como o aumento de força durante alongamentos pode ser explicado pela nova teoria dos três filamentos proteicos: titina, actina e miosina.	4%	4%	13%	<b>61%</b>	17%

Fonte: Dados elaborados pelo autor deste trabalho (2022).

Nota: A questão 8 foi invertida propositalmente pelo autor com o objetivo de verificar a consistência das respostas em relação à questão 9.

Figura 10 – Resultados da percepção de eficácia do macromodelo.



Fonte: Elaborada pelo autor deste trabalho (2022).

#### 4.2.2 Limitações do macromodelo

O macromodelo apresenta algumas limitações. Dentre as quais podemos destacar a impossibilidade de demonstrar através do macromodelo a produção de força na curva ascendente da relação força-comprimento e a falta de uma estrutura tridimensional que auxilie na compreensão espacial do sarcômero em um corte transversal. Além disso, a partir dos resultados do estudo de campo pôde-se constatar que não foi possível perceber a diferença de força necessária para puxar o macromodelo através da interação com clips comparado à interação com ganchos. Isso pode ser explicado pelo desgaste das molas de espirais de caderno que representavam a titina.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manuseio do macromodelo no grupo de estudos proporcionou um novo conhecimento aos alunos, que disseram não saber muito sobre o conteúdo assistido quando perguntados. Penso que a experiência de ensino foi positiva tendo em vista o interesse e *feedback* dos alunos após a intervenção. Por mais que, em algumas questões do questionário, os alunos não souberam opinar, foi possível explicar grande parte das questões através do macromodelo, reafirmando o seu principal objetivo de auxiliar os alunos a assimilarem mais

facilmente determinado conhecimento. Conclui-se, então, que o macromodelo de sarcômero é uma ferramenta útil para fins didáticos ao tentar explicar, de forma conceitual, a função da titina na regulação da força em um ambiente educacional. Como limitação deste estudo, destaco o manuseio prévio do macromodelo com as pontes cruzadas anteriormente aos mecanismos da titina, que foram experimentados sem as pontes cruzadas. Isso poderia ter sido evitado na coleta caso as pontes cruzadas não fossem retiradas. Além disso, tínhamos apenas um macromodelo para um grupo de 24 alunos. Esse fato desgastou a mola que representava a titina para o manuseio dos grupos finais. Para futuras explicações, sugere-se preparar outras molas reservas a fim de trocá-las depois de alguns manuseios. Por fim, outra limitação deste estudo é que o questionário de percepção não passou por uma validação de conteúdo. Pontos futuros para explorar a partir deste trabalho é a avaliação da motivação dos alunos na construção de modelos físicos durante as aulas.

## REFERÊNCIAS

- BORGIA, M. B. *et al.* Single-molecule fluorescence reveals sequence-specific misfolding in multidomain proteins. **Nature**, [S. l.], v. 474, n. 7353, p. 662-665, 29 maio 2011.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.
- CAMPOS, D.; FONTANA, H. Aumento residual de força no músculo esquelético. *In*: BEZERRA, E.; DELLAGRANA, R.; ROSSATO, M. (org.). **Biomecânica: interfaces com o esporte, saúde e exercício físico**. Manaus: E. S. Bezerra, 2019. p. 151-179.
- CARPES, F. P. *et al.* Using the Olympic spirit to improve teaching and learning process: the biomechanics olympic games. **Advances In Physiology Education**, [S. l.], v. 41, n. 3, p. 436-440, 1 set. 2017.
- DUVALL, M. M. *et al.* Altered mechanical properties of titin immunoglobulin domain 27 in the presence of calcium. **European Biophysics Journal**, [S. l.], v. 42, n. 4, p. 301-307, abr. 2013.
- DUVALL, M. M. *et al.* Differences in titin segmental elongation between passive and active stretch in skeletal muscle. **The Journal Of Experimental Biology**, [S. l.], v. 220, n. 23, p. 4418-4425, 2 out. 2017.
- GORDON, A. M.; HUXLEY, A. F.; JULIAN, F. J. The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. **The Journal Of Physiology**, [S. l.], v. 184, n. 1, p. 170-192, 1 maio 1966.
- HERZOG, J. A. *et al.* Are titin properties reflected in single myofibrils? **Journal Of Biomechanics**, [S. l.], v. 45, n. 11, p. 1893-1899, jul. 2012a.
- HERZOG, W. *et al.* The three filament model of skeletal muscle stability and force production. **Molecular And Cellular Biomechanics**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 175-191, set. 2012b.
- HERZOG, W. *et al.* Residual Force Enhancement Following Eccentric Contractions: a new mechanism involving titin. **Physiology**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 300-312, jul. 2016.
- HERZOG, W. The multiple roles of titin in muscle contraction and force production. **Biophysical Reviews**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 1187-1199, 20 jan. 2018.
- HERZOG, W. Passive force enhancement in striated muscle. **Journal Of Applied Physiology**, [S. l.], v. 126, n. 6, p. 1782-1789, 1 jun. 2019.
- HERZOG, W.; LEONARD, T. R. Force enhancement following stretching of skeletal muscle: a new mechanism. **Journal Of Experimental Biology**, [S. l.], v. 205, n. 9, p. 1275-1283, 1 maio 2002.
- HOROWITS, R.; MARUYAMA, K.; PODOLSKY, R. J. Elastic behavior of connectin filaments during thick filament movement in activated skeletal muscle. **Journal Of Cell Biology**, [S. l.], v. 109, n. 5, p. 2169-2176, 1 nov. 1989.

HOROWITS, R.; PODOLSKY, R. J. The positional stability of thick filaments in activated skeletal muscle depends on sarcomere length: evidence for the role of titin filaments. **Journal Of Cell Biology**, [S. l.], v. 105, n. 5, p. 2217-2223, 1 nov. 1987.

HUXLEY, A. F. Muscle structure and theories of contraction. **Progress In Biophysics And Biophysical Chemistry**, [S. l.], v. 7, p. 255-318, 1 jan. 1957.

HUXLEY, A. F.; NIEDERGERKE, R. Structural Changes in Muscle During Contraction: interference microscopy of living muscle fibres. **Nature**, [S. l.], v. 173, n. 4412, p. 971-973, maio 1954.

HUXLEY, A. F.; SIMMONS, R. M. Proposed Mechanism of Force Generation in Striated Muscle. **Nature**, [S. l.], v. 233, n. 5321, p. 533-538, out. 1971.

HUXLEY, H. E. The Mechanism of Muscular Contraction. **Science**, [S. l.], v. 164, n. 3886, p. 1356-1366, 20 jun. 1969.

HUXLEY, H.; HANSON, J. Changes in the Cross-Striations of Muscle during Contraction and Stretch and their Structural Interpretation. **Nature**, [S. l.], v. 173, n. 4412, p. 973-976, maio 1954.

JITTIVADHANA, K.; RUENWONGSA, P.; PANIJPAN, B. Hand-held model of a sarcomere to illustrate the sliding filament mechanism in muscle contraction. **Advances In Physiology Education**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 297-301, dez. 2009.

JOUMAA, V. *et al.* Passive force enhancement in single myofibrils. **Pflügers Archiv - European Journal Of Physiology**, [S. l.], v. 455, n. 2, p. 367-371, 6 jun. 2007.

JOUMAA, V. *et al.* The origin of passive force enhancement in skeletal muscle. **American Journal Of Physiology-Cell Physiology**, [S. l.], v. 294, n. 1, p. 74-78, jan. 2008.

KELLERMAYER, M. S. *et al.* Folding-Unfolding Transitions in Single Titin Molecules Characterized with Laser Tweezers. **Science**, [S. l.], v. 276, n. 5315, p. 1112-1116, 16 maio 1997.

LABEIT, D. *et al.* Calcium-dependent molecular spring elements in the giant protein titin. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S. l.], v. 100, n. 23, p. 13716-13721, 30 out. 2003.

LEONARD, T. R.; DUVALL, M.; HERZOG, W. Force enhancement following stretch in a single sarcomere. **American Journal Of Physiology-Cell Physiology**, [S. l.], v. 299, n. 6, p. 1398-1401, dez. 2010.

LEONARD, T. R.; HERZOG, W. Regulation of muscle force in the absence of actin-myosin-based cross-bridge interaction. **American Journal Of Physiology-Cell Physiology**, [S. l.], v. 299, n. 1, p. 14-20, jul. 2010.

MARUYAMA, K. Connectin, an Elastic Protein from Myofibrils. **The Journal Of Biochemistry**, [S. l.], v. 80, n. 2, p. 405-407, ago. 1976.

NIGG, B. M.; HERZOG, W. **Biomechanics of the Musculo-skeletal System**. 3. ed. Inglaterra: Wiley, 2006.

RASSIER, D. E.; MACINTOSH, B. R.; HERZOG, W. Length dependence of active force production in skeletal muscle. **Journal Of Applied Physiology**, [S. l.], v. 86, n. 5, p. 1445-1457, 1 maio 1999.

RIEF, M. *et al.* Reversible Unfolding of Individual Titin Immunoglobulin Domains by AFM. **Science**, [S. l.], v. 276, n. 5315, p. 1109-1112, 16 maio 1997.

RIOS, V. P.; BONFIM, V. M. G. An inexpensive 2-D and 3-D model of the sarcomere as a teaching aid. **Advances In Physiology Education**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 343-346, dez. 2013.

RODENBAUGH, D. W.; LUJAN, H. L.; DICARLO, S. E. Learning by doing: construction and manipulation of a skeletal muscle model during lecture. **Advances In Physiology Education**, [S. l.], v. 36, n. 4, p. 302-306, dez. 2012.

THOMAS, J. R.; NELSON, J. K.; SILVERMAN, S. J. **Métodos de pesquisa em atividade física**. Tradução de Ricardo Demétrio de Souza Petersen. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012.

WANG, K.; MCCLURE, J.; TU, A. Titin: major myofibrillar components of striated muscle. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S. l.], v. 76, n. 8, p. 3698-3702, 1 ago. 1979.

## **Apêndice A – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)**

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

#### **Prezado/a responsável,**

Seu/sua filho/a está sendo convidado/a a participar da pesquisa intitulada “COMO O MÚSCULO CONTRAI? AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO COMO INSTRUMENTO DE APRENDIZAGEM NO ENSINO MÉDIO”. Esta pesquisa está associada ao projeto monográfico do acadêmico Heron Baptista de Oliveira Medeiros, do curso de Licenciatura em Educação Física da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob orientação da Professora Dra. Heiliane de Brito Fontana. O presente estudo tem o objetivo de avaliar o efeito do uso de um modelo físico de sarcômero (unidade contrátil do músculo) em tamanho aumentado para o ensino da contração muscular.

Durante a pesquisa, que será realizada nas aulas de ciências/biologia, seu/sua filho/a será convidado/a a responder, antes e após a atividade prevista, a um questionário composto por 10 perguntas de múltipla escolha sobre o tema da contração muscular. A atividade prevista consiste em um vídeo sobre a contração muscular que será acompanhado ou não do manuseio do modelo físico. O manuseio do modelo físico será definido por sorteio. Caso seu/sua filho/a seja sorteado/a para o grupo de manuseio do protótipo, solicitaremos que responda também a um segundo questionário de 10 questões de concordância sobre a percepção dele/a acerca do modelo físico de sarcômero apresentado. Esses procedimentos devem durar no máximo 45 minutos.

Os possíveis riscos em participar da pesquisa são: 1) cansaço ou aborrecimento ao responder questionários ou, ainda, 2) frustração de não participar no manuseio do protótipo. No entanto, o manuseio do protótipo será disponibilizado a todos os alunos interessados após a atividade e os pesquisadores estarão à disposição para prestar assistência e solucionar possíveis dúvidas. Seu/sua filho/a também poderá interromper a qualquer momento o preenchimento dos questionários.

A participação do/a seu/sua filho/a nesta pesquisa contribuirá para que novas ferramentas educacionais acerca do ensino da contração muscular possam ser idealizadas por professores. Seu/sua filho/a poderá deixar de participar da pesquisa a qualquer momento, sem ter que apresentar qualquer justificativa, devendo apenas comunicar o professor, cuja autonomia será respeitada durante todo o desenvolvimento da pesquisa. Caso seu/sua filho/a

decida não responder aos questionários, ele/ela não terá qualquer prejuízo no restante das atividades previstas.

Seu/sua filho/a não precisará colocar o seu nome nos questionários, mas precisará fornecer o seu número da lista de chamada para que consigamos identificá-lo/a para posterior análise dos dados. Os pesquisadores serão os únicos a ter acesso a esses dados e tomarão todas as providências usuais para a manutenção do sigilo. Entretanto, sempre existe a remota possibilidade da quebra do sigilo, mesmo que involuntário e não intencional. Os resultados deste trabalho poderão ser apresentados em eventos e/ou revistas científicas e não revelarão o nome dele/dela.

Seu/sua filho/a tem o direito de indenização por danos comprovadamente decorrentes da pesquisa. Não será feito qualquer pagamento pela participação dele/dela no estudo e todos os procedimentos realizados serão inteiramente gratuitos. Todavia, caso alguma despesa extraordinária associada à pesquisa venha a ocorrer, seu/sua filho/a será ressarcido/a. Todas as atividades desta pesquisa serão realizadas nas dependências do Colégio de Aplicação da UFSC.

A pesquisadora responsável da pesquisa é a Professora Dra. Heiliane de Brito Fontana, que também assina este documento, comprometendo-se a conduzir a pesquisa de acordo com o que preconiza a Resolução 466/12, que trata dos preceitos éticos e da proteção aos participantes da pesquisa. Seu/sua filho/a poderá contatá-la pelo telefone (48) 3721-4909 ou ainda pelo e-mail [heiliane.fontana@ufsc.br](mailto:heiliane.fontana@ufsc.br).

Você e ou seu/sua filho/a também poderão contatar o Comitê de Ética em Pesquisas com Seres Humanos (CEPSH-UFSC) pelo telefone (48) 3721-6094 ou e-mail [cep.propesq@contato.ufsc.br](mailto:cep.propesq@contato.ufsc.br). O CEPSH é um órgão colegiado interdisciplinar, deliberativo, consultivo e educativo, vinculado à Universidade Federal de Santa Catarina, mas independente na tomada de decisões, criado para defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos.

Duas vias deste documento estão sendo rubricadas e assinadas por você e pela pesquisadora responsável. Guarde cuidadosamente a sua via, pois é um documento que traz importantes informações de contato e garante os seus direitos como participante da pesquisa.

Li este documento e obtive dos pesquisadores todas as informações que julguei necessárias para me sentir esclarecido/a. Entendo que minha participação é totalmente voluntária e que posso desistir a qualquer momento, sem qualquer prejuízo.

Florianópolis, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Assinatura do/a responsável: \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
 Professora Dra. Heiliane de Brito Fontana

Coordenadora da Pesquisa

#### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

##### **Prezado professor,**

Você e seus/suas alunos/as estão sendo convidados/as a participar da pesquisa intitulada “COMO O MÚSCULO CONTRAI? AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO COMO INSTRUMENTO DE APRENDIZAGEM NO ENSINO MÉDIO”. Esta pesquisa está associada ao projeto monográfico do acadêmico Heron Baptista de Oliveira Medeiros, do curso de Licenciatura em Educação Física da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob orientação da professora Dra. Heiliane de Brito Fontana. O presente estudo tem o objetivo de avaliar o efeito do uso de um protótipo da contração muscular na aprendizagem de alunos do Ensino Médio.

Durante a pesquisa, que será realizada nas aulas de ciências/biologia, seus/suas alunos/as responderão a questionários (dois) antes e após a exposição ao vídeo e modelo de sarcômero para ensino da contração muscular. Os alunos serão alocados/as por sorteio em um destes grupos: grupo controle, que somente assistirá ao vídeo, ou grupo intervenção, que assistirá ao vídeo e fará a manipulação do modelo físico de sarcômero. Um dos questionários consiste em 10 perguntas de múltipla escolha sobre o tema da contração muscular. O outro é um questionário de 10 questões de concordância sobre a percepção acerca do protótipo e será

respondido apenas pelo grupo intervenção. Esses procedimentos devem durar no máximo 45 minutos.

Os possíveis riscos em participar da pesquisa são: 1) cansaço ou aborrecimento ao responder questionários ou, ainda, 2) frustração de não participar no manuseio do protótipo. No entanto, os pesquisadores oportunizarão a posteriori o manuseio do protótipo aos alunos interessados e estarão a disposição para prestar assistência e solucionar possíveis dúvidas.

A sua participação e dos/as seus/suas alunos/as nesta pesquisa é voluntária e contribuirá para que novas ferramentas educacionais da contração muscular sejam pensadas por professores. Você poderá optar por não participar da pesquisa a qualquer momento, sem ter que apresentar qualquer justificativa aos pesquisadores.

Seus/suas alunos/as não precisarão colocar os seus nomes nos questionários, mas precisarão fornecer os seus números da lista de chamada para que consigamos identificá-los/as para posterior análise dos dados. Os pesquisadores serão os únicos a ter acesso a esses dados e tomarão todas as providências necessárias para manter o sigilo. Entretanto, sempre existe a remota possibilidade da quebra do sigilo, mesmo que involuntário e não intencional. Os resultados deste trabalho poderão ser apresentados em eventos e/ou revistas científicas e não revelarão os nomes dos/as seus/suas alunos/as.

Você tem o direito de indenização por danos comprovadamente decorrentes da pesquisa. Não será feito qualquer pagamento pela sua participação no estudo e todos os procedimentos realizados serão inteiramente gratuitos. Todavia, caso alguma despesa extraordinária associada à pesquisa venha a ocorrer você será ressarcido. Todas as atividades desta pesquisa serão realizadas nas dependências do Colégio de Aplicação da UFSC.

A pesquisadora responsável da pesquisa é professora Dra. Heiliane de Brito Fontana, que também assina este documento, compromete-se a conduzir a pesquisa de acordo com o que preconiza a Resolução 466/12, que trata dos preceitos éticos e da proteção aos participantes da pesquisa. Seus/suas alunos/as poderão contatá-la pelo telefone (48) 3721-4909 ou ainda pelo e-mail [heiliane.fontana@ufsc.br](mailto:heiliane.fontana@ufsc.br).

Você e ou seus/suas alunos/as também poderão contatar o Comitê de Ética em Pesquisas com Seres Humanos (CEPSH-UFSC) pelo telefone (48) 3721-6094 ou e-mail [cep.propesq@contato.ufsc.br](mailto:cep.propesq@contato.ufsc.br). O CEPSH é um órgão colegiado interdisciplinar, deliberativo, consultivo e educativo, vinculado à Universidade Federal de Santa Catarina, mas independente na tomada de decisões, criado para defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos.

Duas vias deste documento estão sendo rubricadas e assinadas por você e pela pesquisadora responsável. Guarde cuidadosamente a sua via, pois é um documento que traz importantes informações de contato e garante os seus direitos como participante da pesquisa.

Li este documento e obtive dos pesquisadores todas as informações que julguei necessárias para me sentir esclarecido/a. Entendo que minha participação é totalmente voluntária e que posso desistir a qualquer momento, sem qualquer prejuízo.

Florianópolis, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

Assinatura: \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Professora Dra. Heiliane de Brito Fontana

Coordenadora da Pesquisa

## Apêndice B – Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (TALE)

### TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

#### Caro/a aluno/a,

Gostaríamos de convidá-lo/a a participar do projeto que apresenta as seguintes características:

1. *Título do projeto:* Como o músculo contrai? Avaliação de um protótipo como instrumento de aprendizagem no Ensino Médio.
2. *Objetivo principal:* Avaliar o efeito do uso de um protótipo da contração muscular na aprendizagem de alunos do Ensino Médio.
3. *Justificativa:* Considera-se a relevância de investigar a percepção de alunos do Ensino Médio sobre as experiências possibilitadas por intermédio de um protótipo de inovação didático-pedagógica na temática da contração muscular.
4. *Procedimentos:* A pesquisa será realizada nas aulas de ciências/biologia. Você será convidado/a a responder, antes e após a atividade prevista, a um questionário composto por 10 perguntas de múltipla escolha sobre o tema da contração muscular. A atividade prevista consiste em um vídeo sobre a contração muscular que será acompanhado ou não do manuseio de modelo físico em tamanho aumentado do sarcômero (a unidade contrátil da célula muscular). O manuseio do modelo físico será definido por sorteio. Caso você seja sorteado/a para o grupo de manuseio do protótipo, solicitaremos que responda também a um segundo questionário de 10 questões de concordância sobre sua percepção acerca do modelo físico de sarcômero apresentado. Esses procedimentos devem durar no máximo 45 minutos.
5. *Desconfortos e riscos:* Possível cansaço ou aborrecimento ao responder os questionários e/ou frustração de não participar no manuseio do protótipo.
6. *Assistência:* Se for de seu interesse, você será oportunizado/a a manusear o protótipo logo após a coleta de dados. Você também poderá interromper a qualquer momento o preenchimento dos questionários.
7. *Benefícios:* A sua participação é voluntária e não trará qualquer benefício direto a você, mas proporcionará que novas ferramentas educacionais da contração muscular sejam pensadas por professores.

8. Direitos do participante: Você poderá se retirar deste estudo a qualquer momento, sem sofrer nenhum prejuízo e terá direito de acesso, em qualquer etapa do estudo, sobre qualquer esclarecimento de eventuais dúvidas. Para tanto, basta entrar em contato com a pesquisadora responsável ou com outro pesquisador da equipe de pesquisa.
9. Ressarcimento: Você será ressarcido caso ocorram despesas previstas ou imprevistas comprovadamente decorrentes da pesquisa.
10. Garantia de indenização: Diante de eventuais danos decorrentes da pesquisa você será indenizado no valor de seu prejuízo.
11. Confidencialidade: Os resultados deste estudo poderão ser publicados em revistas científicas ou apresentados em congressos da área, sem que a sua identidade seja revelada.
12. Em caso de dúvidas, você poderá entrar em contato com a pesquisadora responsável da pesquisa (Profa. Dra. Heiliane de Brito Fontana) pelo telefone (48) 3721-4909 ou e-mail ([heiliane.fontana@ufsc.br](mailto:heiliane.fontana@ufsc.br)).
13. Ainda, você poderá entrar em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (CEPSH-UFSC) pelo telefone (48) 3721-6094 ou e-mail ([cep.propesq@contato.ufsc.br](mailto:cep.propesq@contato.ufsc.br)).
14. Você receberá uma via (e não cópia) deste documento, assinada por você e pela pesquisadora responsável, e rubricada em todas as páginas por ambos.  
Eu, \_\_\_\_\_, compreendo meus direitos como um/uma participante de pesquisa e voluntariamente consinto em participar deste estudo. Compreendo sobre o que, como e porque este estudo está sendo feito.

Local e data: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

---

Assinatura do participante

---

Assinatura da pesquisadora

### Apêndice C – Questionário de percepção do protótipo

No questionário a seguir você deverá responder as afirmações **de acordo com a explicação e o manuseio do protótipo** através de uma escala de concordância e discordância de 5 pontos:

1	2	3	4	5
Discordo inteiramente	Discordo	Não tenho opinião formada	Concordo	Concordo inteiramente

1. Compreendi o que é um sarcômero;	1	2	3	4	5
2. Captei quais são as proteínas estruturais presentes no sarcômero;	1	2	3	4	5
3. Entendi que o sarcômero se alonga e se encurta durante a contração muscular;	1	2	3	4	5
4. Entendi que em comprimentos longos do sarcômero existe pouca sobreposição dos filamentos e pontes cruzadas;	1	2	3	4	5
5. Consegui entender quais são os mecanismos prováveis da titina na produção de força;	1	2	3	4	5
6. Quando alonguei o protótipo, senti que precisei fazer mais força quando tinha o cálcio na titina;	1	2	3	4	5
7. Quando alonguei o protótipo, senti que precisei fazer mais força quando a titina se ligou na actina;	1	2	3	4	5
8. Quando alonguei o protótipo, precisei fazer mais força com o cálcio conectado na titina do que a titina conectada na actina;	1	2	3	4	5
9. Quando alonguei o protótipo, precisei fazer mais força com a titina conectada na actina do que o cálcio conectado na titina;	1	2	3	4	5
10. Entendi como o aumento de força durante alongamentos pode ser explicado pela nova teoria dos três filamentos proteicos: titina, actina e miosina.	1	2	3	4	5

## Apêndice D – Resumos publicados em congressos da área



### Using a physical sarcomere model to demonstrate titin's contributions to residual force enhancement

Heron B. O. Medeiros<sup>1</sup>, Heiliane B. Fontana<sup>1,2</sup>, Walter Herzog<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Biomechanics Laboratory, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

<sup>2</sup>Morphological Sciences Department, Biological Sciences Center, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

<sup>3</sup>Human Performance Laboratory, Faculty of Kinesiology, University of Calgary, Calgary, Canada

Email: [heronbomed@gmail.com](mailto:heronbomed@gmail.com)

#### Summary

We built a physical sarcomere model aimed at helping students and trainees in understanding the role of titin in the production of active force in skeletal muscle. Using a simple sarcomere prototype we are able to demonstrate actin-myosin cross-bridges interactions and illustrate the different ways of force production by titin in the active and passive muscle. Specifically, the model illustrates the role of titin in residual force enhancement through calcium binding to titin and titin binding to actin. The model is simple, and demonstration to students resulted in positive feedback about the clarity and improved understanding of a complex molecular mechanism.

#### Introduction

Titin is a structural protein in striated muscle sarcomeres. Recently, titin has been associated with active force regulation in muscles, specifically during eccentric (lengthening) contractions, resulting in increased force and reduced metabolic cost for eccentric compared to isometric or concentric contractions [1]. However, the molecular mechanisms causing titin's force regulation remain unknown, although it is generally accepted that it has to do with an activation or a force-dependent change in **titin's stiffness** [1].

In order to illustrate the complex manner in which titin is thought to contribute to active force regulation, we built a physical sarcomere prototype that allows for illustration of titin's proposed function specifically as it relates to the residual force enhancement (RFE) property of skeletal muscle [2]. Thus, the aim of this educational outreach research was to build a physical model of a sarcomere that illustrates the proposed action of titin in RFE.

#### Methods

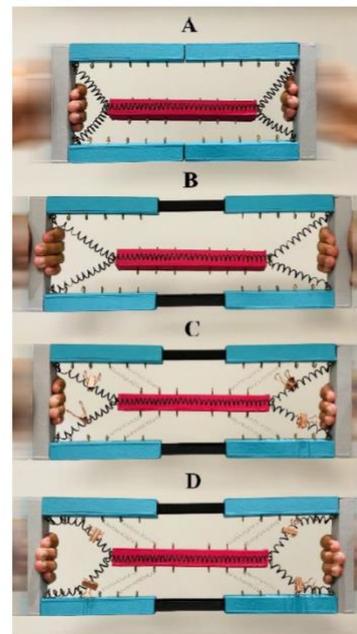
The physical sarcomere prototype contains a Z-band structure (2 cm x 15 cm x 2 cm), actin filaments (15 cm x 2 cm x 2 cm), myosin filament (20 cm x 2 cm x 2 cm), cross-bridges interactions represented by small, stiff springs, and titin, represented by long, soft springs. We used a sole paper of 3 mm to build the sarcomere structure (Figure 1) to arrive at a mostly 2D model with some 3D representation.

The small, stiff springs representing cross-bridge connections between actin and myosin can be attached to three hooks on actin spaced by 2.5 cm and three corresponding hooks per half-myosin, also spaced by 2.5 cm (attached only two cross-bridges in the figure). To allow for rotational and planar stability of the sarcomere model, opposing actin filaments were connected using 30 cm x 1.2 cm x 1.2 cm insert piece (in black).

#### Results and Discussion

The primary mechanisms of titin's contribution to the RFE property are related to *changes in titin's inherent stiffness* through binding of calcium to selected immunoglobulin and glutamate regions and by *binding of titin to actin*, thereby

reducing its free spring length, upon muscle activation [1]. The increased titin stiffness with calcium binding is represented by clips in the model that prevent small segments of the titin spring from elongating (Figure 1C). The increased titin stiffness caused by titin binding to actin is represented by hooking the proximal segment of titin to actin (Figure 1D).



**Figure 1:** Three-filament sarcomere model bordered by the Z-bands (gray), myosin filament (pink), actin filaments (blue), titin (black spring), and cross-bridges (small gray springs). (A) passive sarcomere, short length; (B) passive sarcomere, long length (titin elongates unrestricted); (C) active stretch with cross-bridges attached and calcium bound to titin; (D) active stretch with cross-bridges bound, calcium bound to titin, and titin bound to actin.

#### Conclusions

The prototype sarcomere model with a titin whose stiffness can be changed through calcium-titin binding and titin-actin binding allows for a visual, macro-structural representation of titin's force regulation mechanisms in muscle – a complicated process. Class demonstrations have proved successful and resulted in positive feedback.

#### Acknowledgments

Funded by CNPq of Brazil, and NSERC of Canada.

#### References

- [1] Herzog W. (2018). *Biophys Rev*, **10**: 1187-1199.
- [2] Edman et al. (1982). *J Gen Physiol*, **80**: 769-84.



**Heron Baptista de Oliveira  
Medeiros**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(BIO MEC/UFSC)  
Bolsista de Iniciação Científica no  
Laboratório de Biomecânica

**Heiliane de Brito Fontana**

Universidade Federal de Santa Catarina  
(MOR/UFSC).  
Professora do Departamento de Ciências  
Morfológicas

**Walter Herzog**

Faculdade de Kinesiology da  
Universidade de Calgary.  
Professor

## Compreendendo o papel da proteína titina na produção de força ativa no músculo esquelético

Vol 15 – Supplement ■■ Nov. 2021 ■■ Brazilian Journal of Motor Behavior ■■ ISSN 2446-4902

**Contextualização:** A titina é uma proteína estrutural presente nos sarcômeros dos músculos estriados. Estudos recentes a associaram à regulação da força ativa muscular, especificamente durante contrações excêntricas (alongamento). Embora ainda não elucidados, os mecanismos moleculares pelos quais a titina contribui com a produção de força ativa parecem estar relacionados à modulação da sua rigidez. **Objetivo:** Os objetivos desse estudo foram construir uma maquete interativa de um sarcômero para ilustrar a possível ação reguladora da força da titina na contração excêntrica e validar o conceito físico que fundamenta a criação da maquete a partir da comparação de condições ativas e passivas simuladas da relação força-comprimento do sarcômero com dados reais de miofibrilas alongadas experimentalmente. **Material e Métodos:** A maquete de sarcômero contendo as linhas Z e os filamentos contráteis de actina e miosina foi construída com papel sola de 3 mm. A interatividade da maquete foi desenvolvida a partir de molas pequenas e mais rígidas (oriundas de canetas), representando as pontes cruzadas, e por molas longas e menos rígidas (espirais de caderno), representando a titina. Os mecanismos relacionados à modulação da força da titina foram demonstrados através de clips (cálcio) e de ganchos dispostos nos filamentos de actina. Para a simulação, foi considerado uma rigidez da titina de 0,02 a 0,08 pN/nm e das pontes cruzadas de 1 pN/nm. A excursão da titina foi estimada a partir do comprimento do sarcômero menos o comprimento do filamento de miosina. A excursão assumida das pontes cruzadas foi de 10 nm. O número de pontes cruzadas foi estimado com base no espaçamento de 43 nm e em uma taxa de trabalho de 25%. **Resultados:** A partir da interação com a maquete é possível perceber o aumento da resistência ao alongamento do sarcômero frente a modulação da rigidez (interação com clips) e do comprimento da titina (interação com ganchos). Vinte e oito pontes cruzadas para cada metade de miosina podem ser formadas no comprimento ótimo (2400 nm) de acordo com as estimativas, que representam 280 pN. Para 3600 nm, somente 70 pN seriam produzidos pelas pontes cruzadas, enquanto as seis titinas produziram 48 e 192 pN de força passiva e ativa, respectivamente. Dessa forma, estima-se que a titina possa contribuir com mais força que as pontes cruzadas no comprimento próximo a 3300 nm. Além disso, a força passiva em 6000 nm foi de 32 pN por titina (96 nN/um<sup>2</sup>), enquanto que a força ativa foi de 128 pN por titina (384 nN/um<sup>2</sup>). Os valores encontrados na literatura indicam cerca de 200 e 700 nN/um<sup>2</sup> para os estados passivo e ativo, respectivamente. **Conclusão:** Conclui-se que, embora esses valores não coincidam com os dados já publicados em miofibrilas alongadas, eles são representativos para entender o comportamento da titina na contração muscular, visto que se dobrássemos a sua rigidez, estaríamos prevendo os valores da literatura perfeitamente. A maquete de sarcômero e o modelo físico que a fundamenta são ferramentas úteis para fins didáticos ao tentar explicar, de forma conceitual, a função da titina na regulação da força em um ambiente educacional e/ou científico.

**Palavras-chave:** Biomecânica. Ensino. Contração muscular. Modelos físicos. Protótipos. Cálculos.