



Anatomia e Fisiologia Animal II

Fisiologia muscular: Mecanismos de contração e controlo nervoso

1



Sistema muscular

- a capacidade de realizar movimentos coordenados para explorar o meio envolvente distingue os animais dos restantes seres vivos
- nos grandes animais multicelulares o movimento é o resultado da utilização dos músculos, compostos por células - os **miócitos** - capazes de alterar o seu comprimento através de um processo contráctil especial

2



Sistema muscular

- há três tipos de músculo, identificáveis com base na sua estrutura e função:
 - o músculo esquelético está directamente ligado aos ossos do esqueleto, tem como função a manutenção da postura e o movimento dos membros mediante a sua contracção.
 - o músculo cardíaco é o músculo do coração
 - o músculo liso é o músculo que envolve os vasos sanguíneos e os órgãos viscerais ôcos.
- o conjunto destes três tipos de músculos representa aproximadamente 50 % do peso corporal, sendo a maior parte constituída por músculo esquelético (cerca de 40 % do peso corporal).

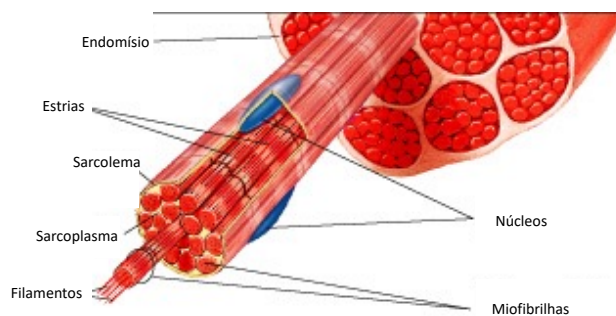
3



Célula muscular esquelética

as fibras do músculo esquelético são **células** cilíndricas longas e finas e contém muitos núcleos; chegam a atingir 30 cm de comprimento e o seu diâmetro varia entre 10 e 100 μm

as células individuais não se costumam estender ao longo de todo o comprimento da fibra muscular.

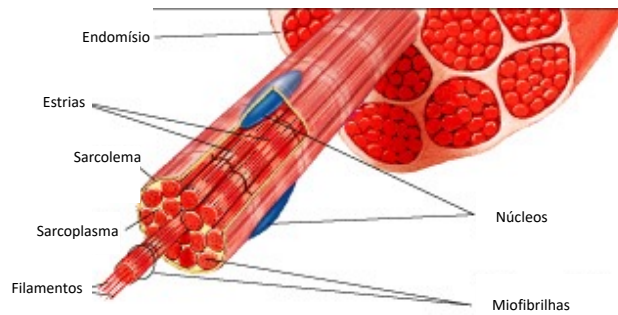


4

Célula muscular esquelética

as fibras musculares individuais são compostas por feixes filamentosos que se dispõem ao longo do comprimento da fibra - as **miofibrilhas**, as quais têm um diâmetro de 1-2 μm .

cada miofibrilha é formada por unidades que se repetem - os **sarcômeros**, cujo alinhamento entre miofibrilhas adjacentes produz as estrias características do músculo esquelético.



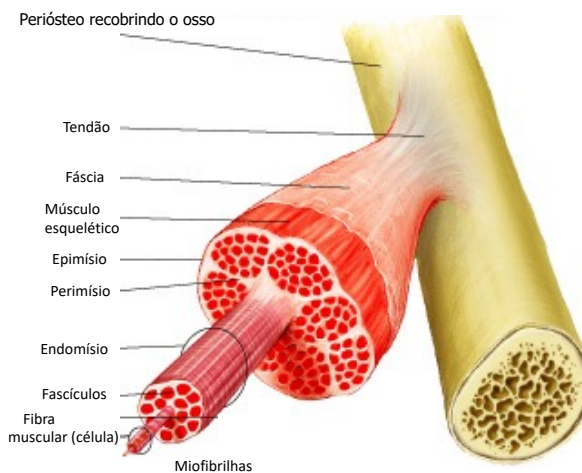
5

Tecido muscular esquelético

cada músculo esquelético é composto por uma série de **fibras musculares individuais**, as quais se agrupam em **fascículos** e se mantêm unidas por uma camada de tecido conjuntivo, **endomísio**.

tecido conjuntivo com origem no tendão que se estende de forma a formar uma bainha fibrosa à volta do músculo, **epimísio**.

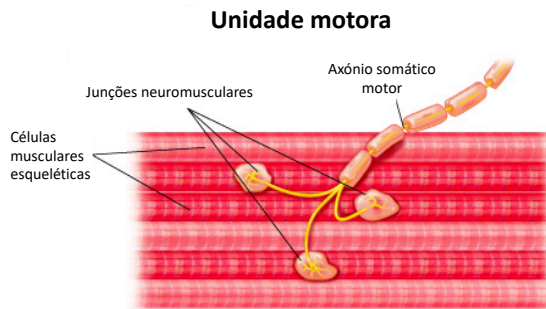
tecido conjuntivo que se estende no sentido do corpo do músculo, **fáscia**.



6

Conceito de Unidade Motora

- Conjunto formado por um neurónio motor somático e totalidade das fibras musculares por ele innervadas
- Cada célula/fibra muscular recebe um único terminal axonal de um neurónio somático
- Cada axónio pode ter ramos colaterais de forma a innervar múltiplas fibras



7

Funcionamento da unidade motora

Quando um neurónio somático é activado, contraem-se todas as fibras por ele innervadas : resposta tudo-ou-nada.

- Razão de innervação:
 - número de fibras musculares por neurónio motor
 - controlo nervoso preciso em detrimento da força ocorre quando se encontram envolvidas muitas unidades motoras pequenas.
- Recrutamento:
 - Para se produzir maior força são activadas unidades motoras em número progressivamente maior.

8



Mecanismo de contração

- Cada miofibrilha contém miofilamentos.
 - **Filamentos grossos:**
 - As bandas A contêm filamentos grossos (primariamente compostos por **miosina**)
 - **Filamentos finos:**
 - As bandas I contêm filamentos finos (primariamente compostos por **actina**)
 - No centro de cada banda I encontra-se um disco Z.

9

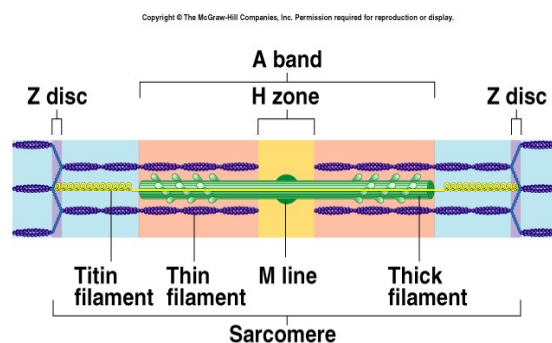


Mecanismo de contração

o **sarcômero** é a unidade contráctil fundamental dos músculos esquelético e cardíaco

cada sarcômero tem apenas 2 μm de comprimento, sendo cada miofibrilha composta por múltiplos sarcômeros

quando é utilizada uma luz polarizada para observar uma fibra muscular, os sarcômeros são vistos como zonas claras escuras alternadas



10

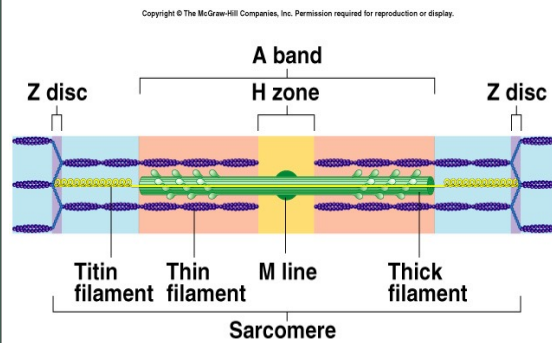


Mecanismo de contração

a aparência das zonas escuras deve-se à refração da luz polarizada, característica denominada por anisotropia, sendo a banda correspondente designada por **banda A**

as regiões claras não fazem refração da luz polarizada, são isotrópicas; estas regiões são designadas por **bandas I**

cada banda I é dividida por uma linha, a linha Z, sendo o sarcómero a unidade presente entre duas linhas Z

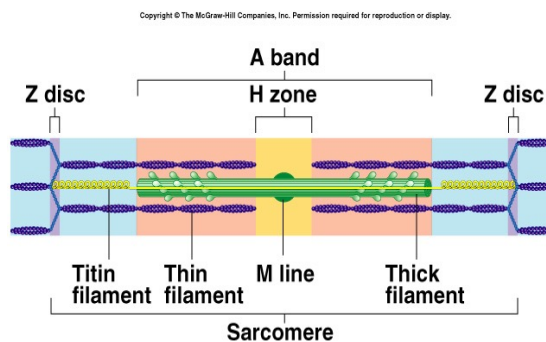


11



Mecanismo da contração

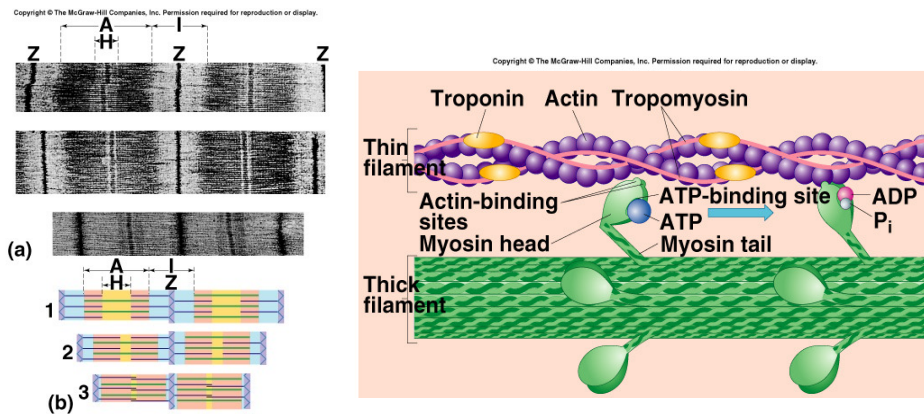
- **Sarcómero:**
 - Linha Z a linha Z
 - Linhas M:
 - Filamentos protéicos no centro do sarcómero
 - Suportam a miosina durante a contração
- **Titina:**
 - Proteína elástica que corre através dos filamentos de miosina desde a linha M até à linha Z
 - Contribuem para a elasticidade do músculo.



12



Teoria da contração muscular por deslizamento dos filamentos



13



Teoria da contração muscular por deslizamento dos filamentos

- O deslizamento dos filamentos é produzido pela acção de *pontes cruzadas*
 - As pontes cruzadas fazem parte das proteínas de miosina, estendendo-se para fora em direcção à actina
 - Formam “braços” que terminam numa “cabeça”
 - Cada cabeça de miosina contém um local de ligação ao ATP
 - tem função ATPase

14

Teoria da contração muscular por deslizamento dos filamentos

■ Contração muscular:

- Ocorre devido ao deslizamento dos filamentos finos entre e sobre os filamentos grossos em direcção ao centro
 - Encurtando a distância entre 2 discos Z consecutivos

■ Bandas A:

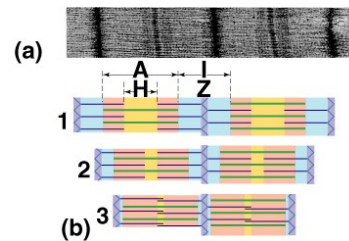
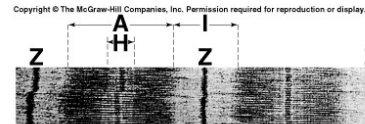
- Contêm miosina
 - Aproximam-se umas das outras
- Não encurtam

■ Bandas I:

- Distância entre as bandas A de 2 sarcômeros consecutivos.
- Encurtam

■ Bandas H encurtam.

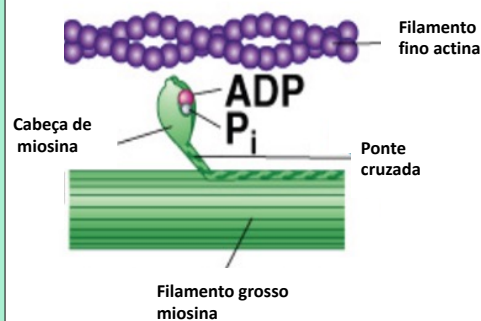
- Contêm apenas miosina
- Encurtam durante a contração



15

Contração

- Os locais de ligação da cabeça de miosina decompõem o ATP em ADP e P_i .
- O ADP e o P_i permanecem ligados à miosina até as cabeças de miosina se ligarem à actina
- O P_i é libertado, causando o "golpe de potência"
- O golpe de potência puxa a actina no sentido do centro da banda A
- Quando a miosina se liga a uma nova molécula de ATP no fim do golpe de potência, esta é hidrolisada repondo a conformação inicial da ponte cruzada



16

Contração

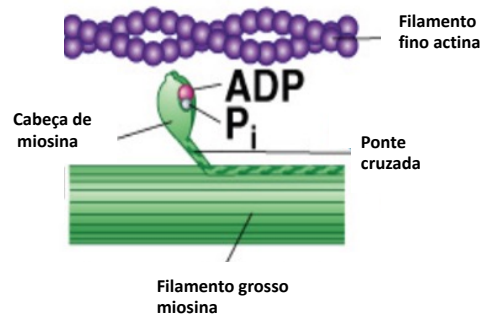
libertação do ADP provoca a quebra da ponte cruzada

As pontes cruzadas desligam-se e ficam prontas a ligarem-se novamente

Ação síncrona:

só 50% das pontes cruzadas se encontram ligadas a cada momento

Quando a miosina se liga a uma nova molécula de ATP no fim do golpe de potência, esta é hidrolisada repondo a conformação inicial da ponte cruzada

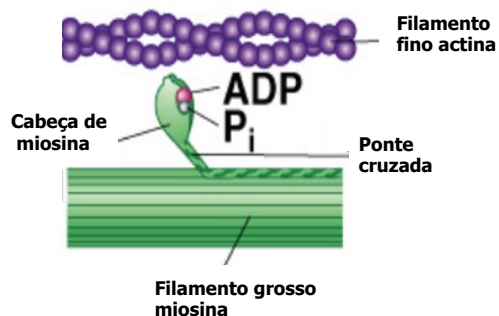


17

Ciclo de Contração

1. Fibra em repouso, ponte cruzada desligada da actina

- Os locais de ligação da miosina decompõem o ATP em ADP e P_i .
- O ADP e o P_i permanecem ligados à miosina até as cabeças de miosina se ligarem à actina

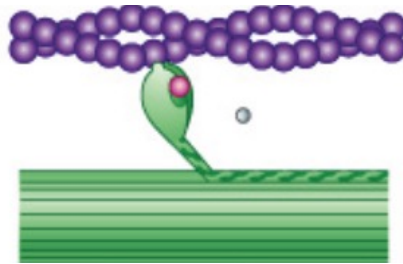


18



Ciclo de Contração

2. Ponte cruzada liga-se à actina sendo libertado o Pi

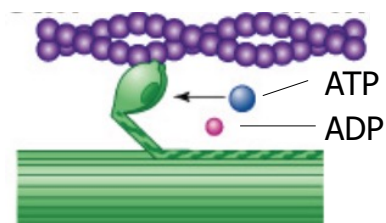


19



Ciclo de Contração

3. Libertação do Pi provoca alteração da conformação da ponte de miosina – golpe de potência



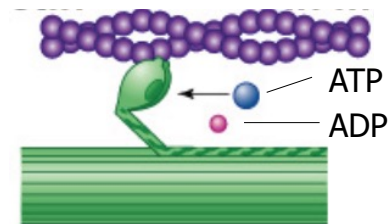
20



Ciclo de Contração

4. Golpe de potência causa o deslizamento dos filamentos e a liberação do ADP

O golpe de potência puxa a actina no sentido do centro da banda A, sendo responsável pelo deslizamento dos miofilamentos

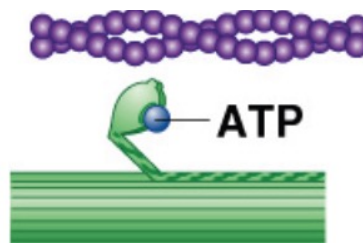


21



Ciclo de Contração

5. Ligação de nova molécula de ATP permite à ponte de miosina desligar-se da actina

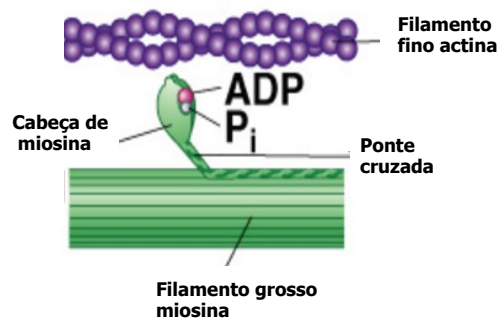


22



Ciclo de Contração

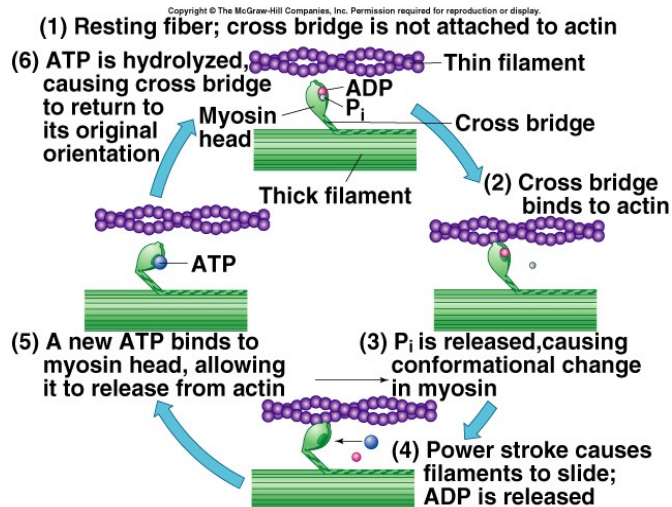
6. Hidrólise do ATP faz com que a ponte de miosina volte à sua conformação inicial



23



Contração (continuação)



24



Regulação da Contração

- A regulação da ligação das pontes cruzadas à actina é exercida pelas proteínas
 - **Tropomiosina:**
 - Localizada entre filamentos de actina
 - **Troponina:**
 - Encontra-se ligada à tropomiosina
- Servem de interruptor da contracção e relaxamento do músculo
 - No músculo descontraído:
 - Tropomiosina bloqueia os locais de ligação das cabeças de miosina na actina.

25

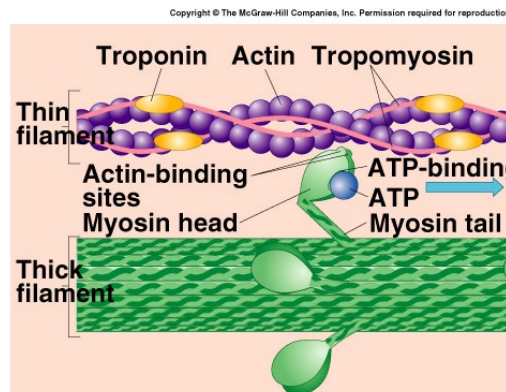


Regulação da Contração

Servem de interruptor da contracção e relaxamento do músculo

No músculo descontraído:

Tropomiosina bloqueia os locais de ligação das cabeças de miosina à actina.

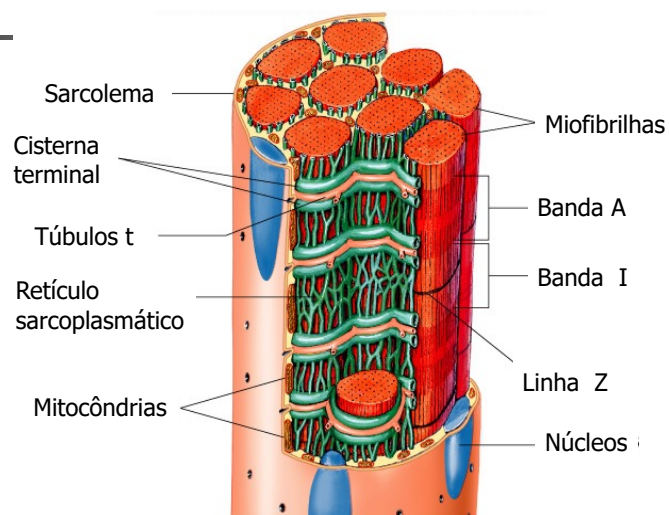


26

Papel do Ca^{2+} na Contração Muscular

- Relaxamento muscular:
 - Quando a $[\text{Ca}^{2+}]$ no sarcoplasma é baixa a tropomiosina bloqueia a ligação
 - Impede a contração muscular
 - Ca^{2+} é continuamente bombeado para o retículo sarcoplasmático ao nível das cisternas terminais
 - Músculo descontrai na ausência de Ca^{2+}

27



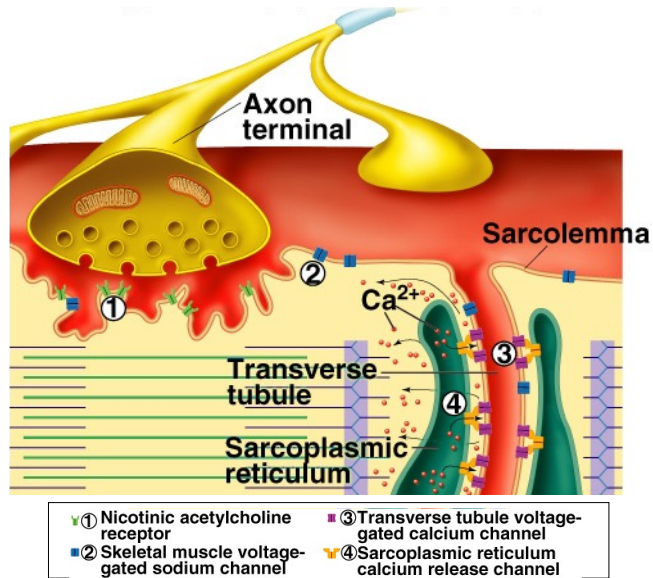
28

Acoplamento excitação-contração

A acetilcolina libertada pelo axónio liga-se ao receptor nicotínico na placa terminal motora, provocando a despolarização que faz abrir os canais de Na activados pela voltagem, desencadeando potenciais de acção ao longo do sarcolema

O alastramento dos potenciais de acção nos tubos transversais estimula a abertura de canais de cálcio controlados pela voltagem no retículo sarcoplasmático

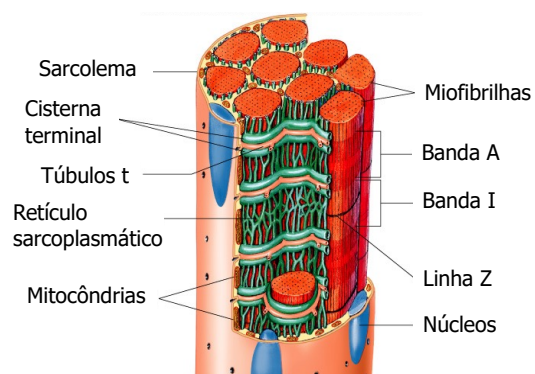
O cálcio difunde-se no sarcoplasma, liga-se à troponina e desenvolve-se a contração



29

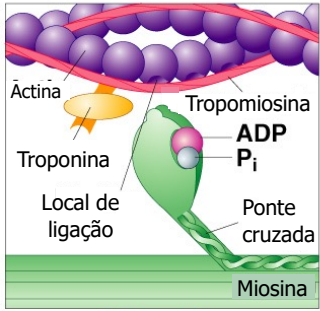
Acoplamento excitação-contração (continuação)

- Os potenciais de acção deslocam-se ao longo do sarcolema e dos túbulos T.
- As cisternas terminais do retículo sarcoplasmático libertam Ca^{2+} através de canais específicos:
 - Mecanismo de libertação electromecânico
- Ca^{2+} libertado induz a libertação de mais Ca^{2+}



30

- Ca^{2+} liga-se à troponina
- Altera-se a configuração do complexo tropomiosina-troponina
- Pontes cruzadas voltam a poder ligar-se à actina



Músculo relaxado

31

- Os potenciais de acção têm que cessar para o músculo relaxar.
- A acetilcolinesterase degrada a ACh.
- Encerram-se os canais de libertação de Ca^{2+}
- O Ca^{2+} é bombeado de volta ao retículo sarcoplasmático através de bombas Ca^{2+} -ATPase.
- A colina é reciclada para a produção de mais ACh

32



Relação comprimento-tensão

- A força de contracção de um músculo é influenciada por:
 - Frequência da estimulação.
 - Espessura da fibra muscular.
 - Comprimento inicial da fibra muscular:
 - Comprimento em repouso ideal:
 - Comprimento que pode gerar a máxima força.
 - Sobreposição insuficiente:
 - Ligam-se poucas pontes cruzadas.
 - Sem sobreposição:
 - As pontes cruzadas não se podem ligar à actina.

33



Relação comprimento-tensão

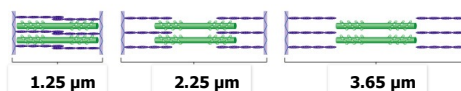
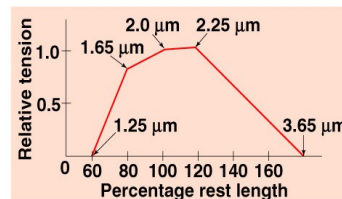
(continuação)

força desenvolvida à mediada que aumenta o comprimento em repouso:

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

quando os filamentos finos e grossos se sobrepõem totalmente e a banda A se encontra comprimida contra a linha z ($1.25\mu\text{m}$), o músculo é incapaz de desenvolver tensão;

à medida que o músculo é estirado de forma que os filamentos finos e grossos se sobrepõem sem comprimirem a a banda A, é possível gerar tensão activa quando o músculo é estimulado ($1.65\mu\text{m}$);



um maior estiramento torna óptimo o grau de sobreposição entre os filamentos, induzindo uma tensão máxima quando o músculo é estimulado ($2.25\mu\text{m}$);

se o músculo for esticado até um ponto onde não se sobrepõem os filamentos finos e grossos, não se verifica desenvolvimento de tensão ($3.65\mu\text{m}$)

34