



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

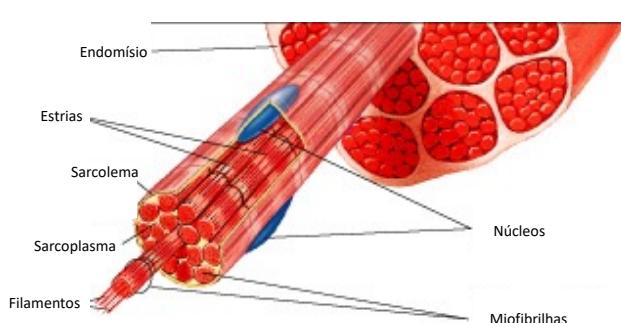
- há três tipos de músculo, identificáveis com base nas sua estrutura e função:
 - o músculo esquelético está directamente ligado aos ossos do esqueleto, tem como função a manutenção da postura e o movimento dos membros mediante a sua contracção.
 - o músculo cardíaco é o músculo do coração
 - o músculo 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.



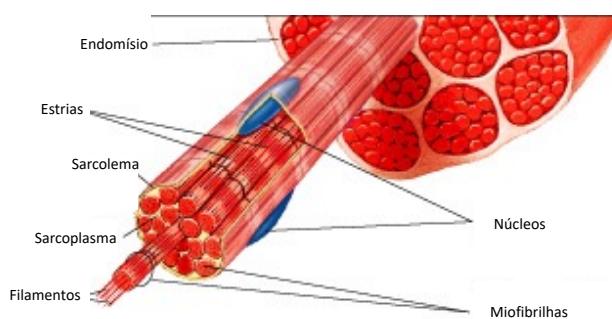
4

2

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 **sarcómeros**, cujo alinhamento entre miofibrilhas adjacentes produz as estrias características do músculo esquelético.



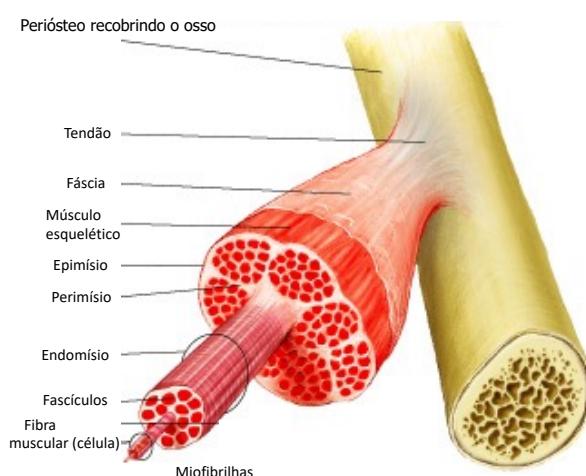
5

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, **endomísmo**.

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

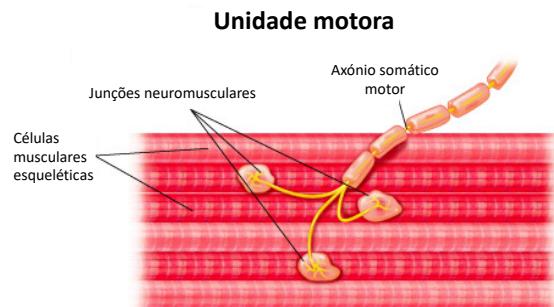
tecido conjuntivo que se estende no sentido do corpo do músculo, **fáscia**.



6

Conceito de Unidade Motora

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



7

Funcionamento da unidade motora

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

■ Razão de inervação:

- 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.

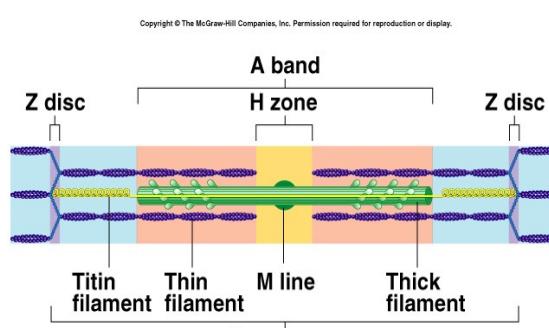
9

Mecanismo de contração

o **sarcómero** é a unidade contrátil fundamental dos músculos esquelético e cardíaco

cada sarcómero tem apenas 2 μm de comprimento, sendo cada miofibrilha composta por múltiplos sarcómeros

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



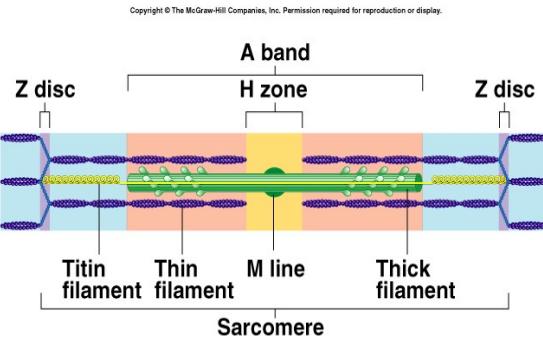
10

Mecanismo de contração

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

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

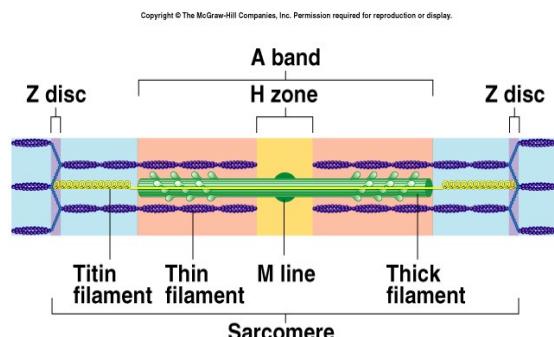
cada banda I é dividida por uma linha, a linha Z, sendo o sarcómero a unidade presente entre duas linhas Z



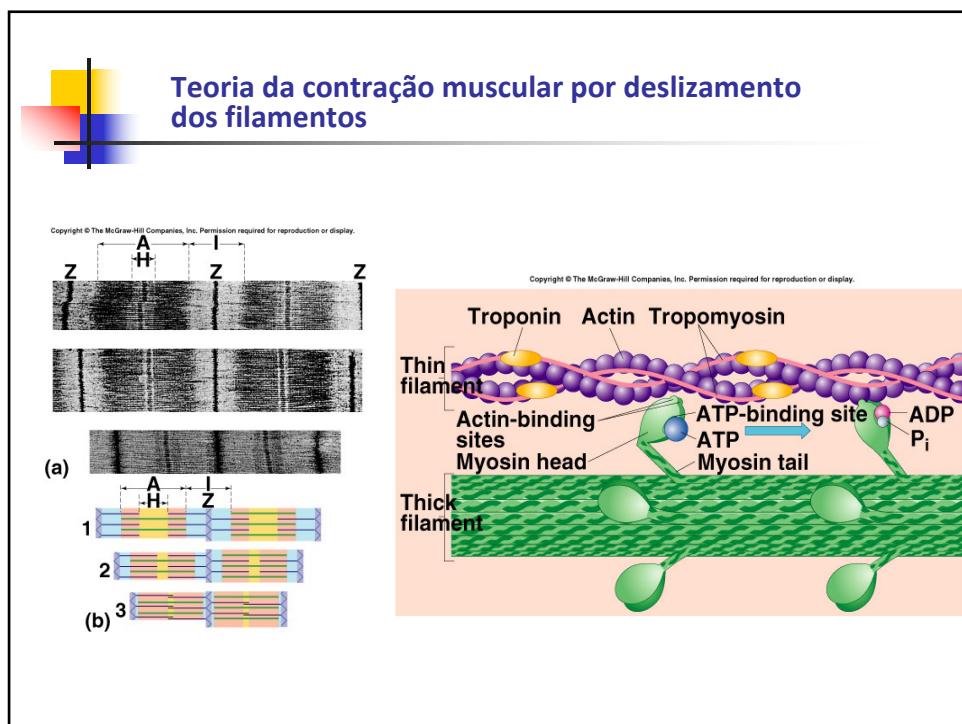
11

Mecanismo da contração

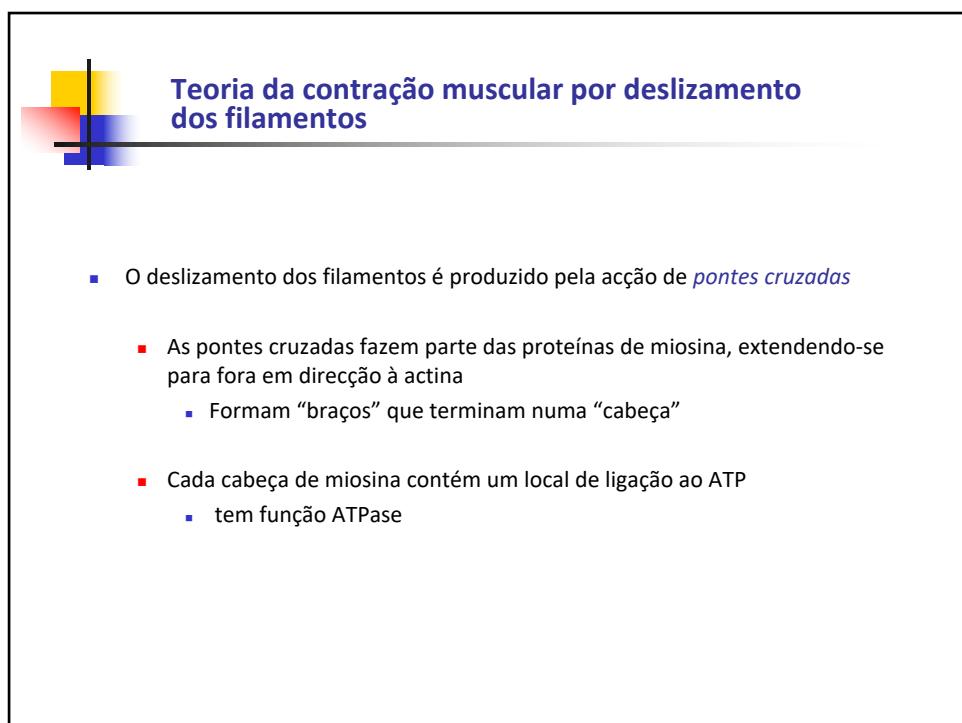
- Sarcómero:
 - Linha Z a linha Z
 - Linhas M:
 - Filamentos protéicos no centro do sarcómero
 - Suportam a miosina durante a contração
- Titina:
 - Proteína elástica que corre através dos filamentos de miosina desde a linha M até à linha Z
 - Contribuem para a elasticidade do músculo.



12



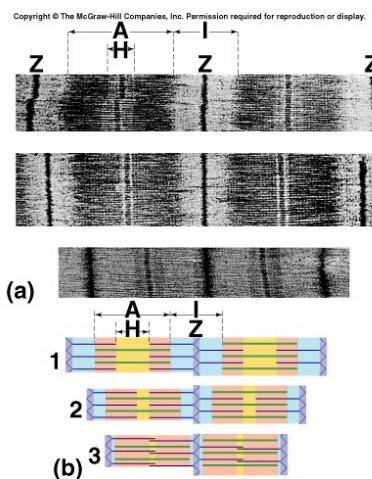
13



14

Teoria da contração muscular por deslizamento dos filamentos

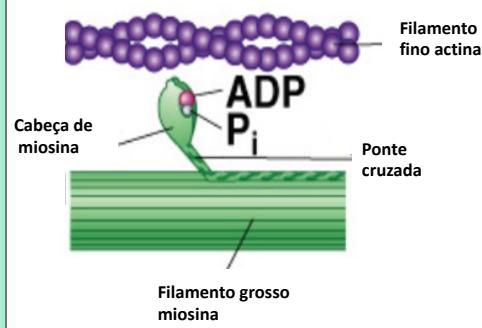
- **Contração muscular:**
 - Ocorre devido ao deslizamento dos filamentos finos entre e sobre os filamentos grossos em direcção ao centro
 - Encurtando a distância entre 2 discos Z consecutivos
- **Bandas A:**
 - Contém miosina
 - Aproximam-seumas das outras
 - Não encurtam
- **Bandas I:**
 - Distância entre as bandas A de 2 sarcómeros 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

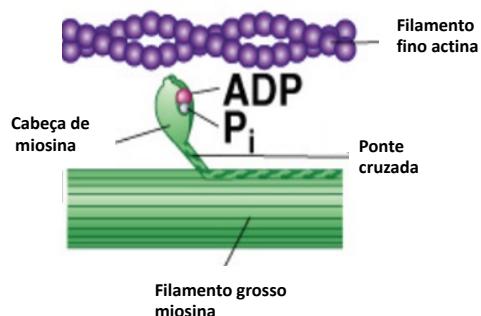
Contração

libertação do ADP provoca a quebra da ponte cruzada

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

Acção 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

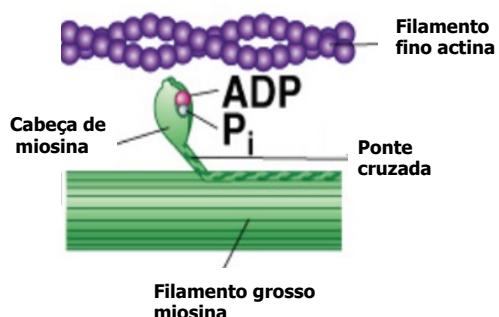


17

Ciclo de Contração

1. Fibra em repouso, ponte cruzada desligada da actina

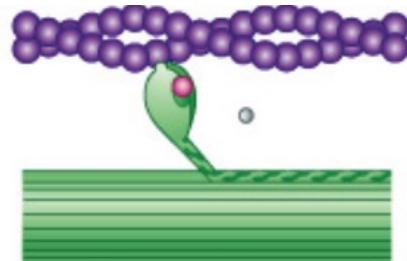
- Os locais de ligação da miosina decompõem o ATP em ADP e Pi.
- O ADP e o Pi permanecem ligados à miosina até as cabeças de miosina se ligarem à actina



18

Ciclo de Contração

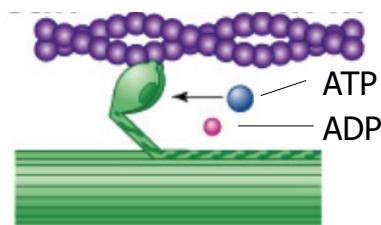
2. Ponte cruzada liga-se à actina sendo libertado o Pi



19

Ciclo de Contração

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

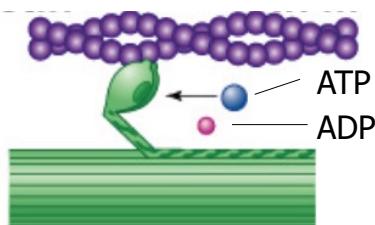


20

Ciclo de Contração

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

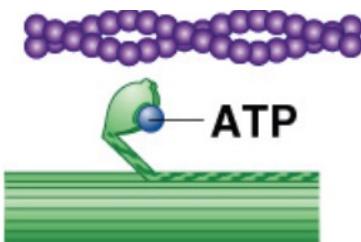
O golpe de potência puxa a actina no sentido do centro da banda A, sendo responsável pelo deslizamento dos miofilamentos



21

Ciclo de Contração

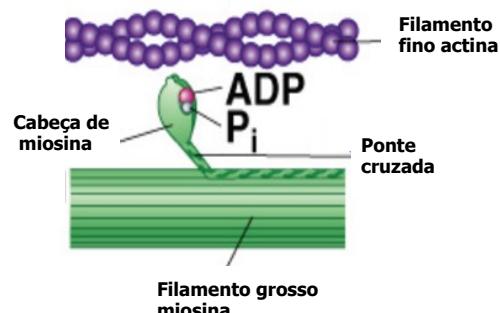
5. Ligação de nova molécula de ATP permite à ponte de miosina desligar-se da actina



22

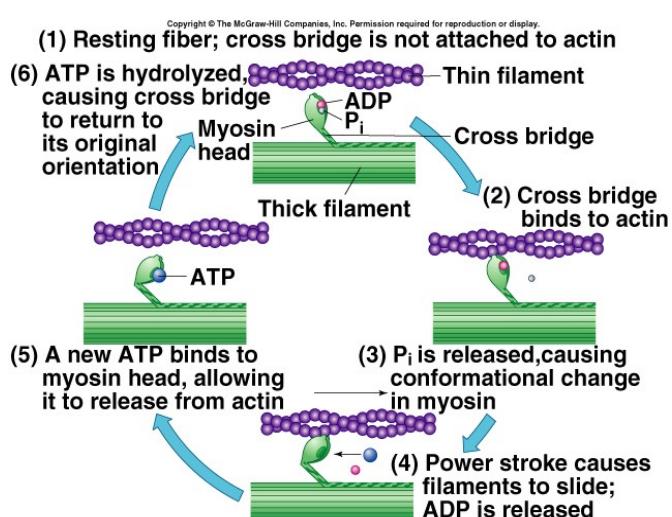
Ciclo de Contração

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 contração e relaxamento do músculo
 - No músculo descontraído:
 - Tropomiosina bloqueia os locais de ligação das cabeças de miosina na actina.

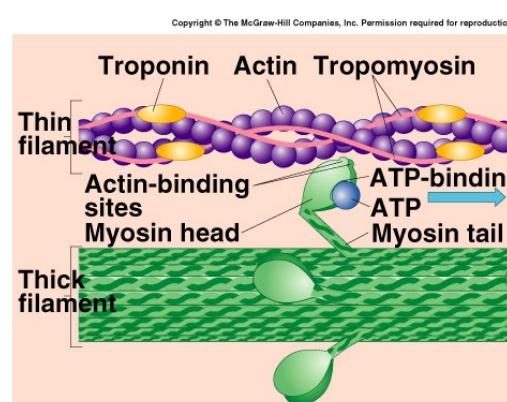
25

Regulação da Contração

Servem de interruptor da contração e relaxamento do músculo

No músculo descontraído:

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

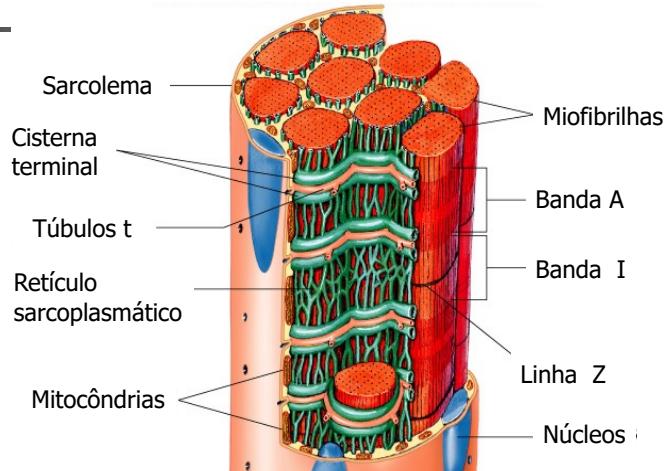


26

Papel do Ca²⁺ na Contração Muscular

- Relaxamento muscular:
 - Quando a [Ca²⁺] no sarcoplasma é baixa a tropomiosina bloqueia a ligação
 - Impede a contração muscular
 - Ca²⁺ é continuamente bombeado para o retículo sarcoplasmático ao nível das cisternas terminais
 - Músculo descontrai na ausência de Ca²⁺

27



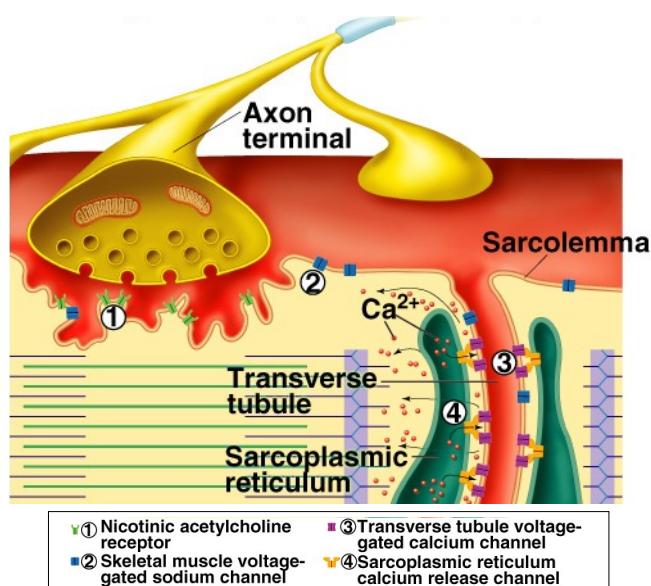
28

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

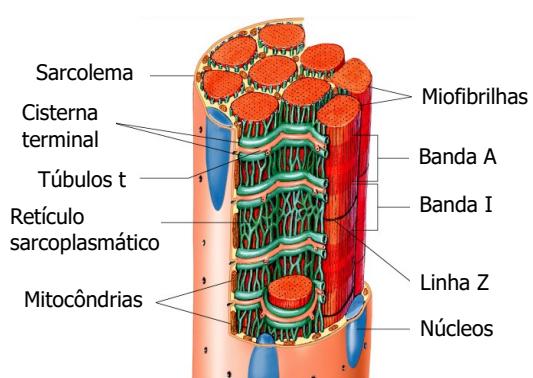
O cálcio difunde-se no sarcoplasma, liga-se à troponina e desenvolve-se a contração



29

Acoplamento excitação-contração (continuação)

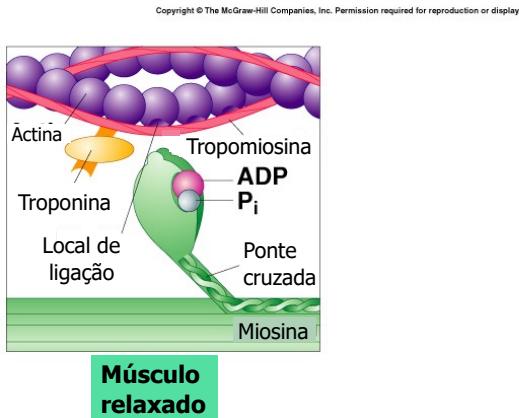
- Os potenciais de ação deslocam-se ao longo do sarcolema e dos túbulos T.
- As cisternas terminais do retículo sarcoplasmático libertam Ca^{2+} através de canais específicos:
 - Mecanismo de libertação electromecânico
- Ca^{2+} libertado induz a libertação de mais Ca^{2+}



30

Acoplamento excitação-contração (continuação)

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



31

Relaxamento muscular

- Os potenciais de acção têm que cessar para o músculo relaxar.
- A acetilcolinesterase degrada a ACh.
- Encerram-se os canais de liberação 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 contração 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

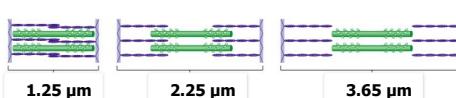
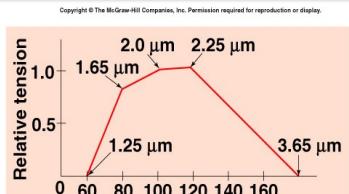
Relação comprimento-tensão

(continuação)

força desenvolvida à mediada que aumenta o comprimento em repouso:

quando os filamentos finos e grossos se sobrepõem totalmente e a banda A se encontra comprimida contra a linha z ($1.25\text{ }\mu\text{m}$), 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 ($1.65\text{ }\mu\text{m}$);



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

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

34