

# **Aula 2 – Revisão de neurofisiologia do movimento**

**Prof. Daniel Boari Coelho**

**E-mail: [daniel.boari@ufabc.edu.br](mailto:daniel.boari@ufabc.edu.br)**

**Universidade Federal do ABC  
Princípios de Reabilitação e Tecnologias Assistivas**

**3º Quadrimestre de 2018**



Universidade Federal do ABC

- ✓ Movimento
  - ✓ Definições
  - ✓ Organização Hierárquica
  
- ✓ Sistema muscular
  
- ✓ Movimentos reflexos
  
- ✓ Movimentos voluntários
  
- ✓ Centros superiores

GUYTON. Tratado de Fisiologia Médica.  
MACHADO. Neuroanatomia funcional.  
NORDIN. Biomecânica básica do sistema musculoesquelético.

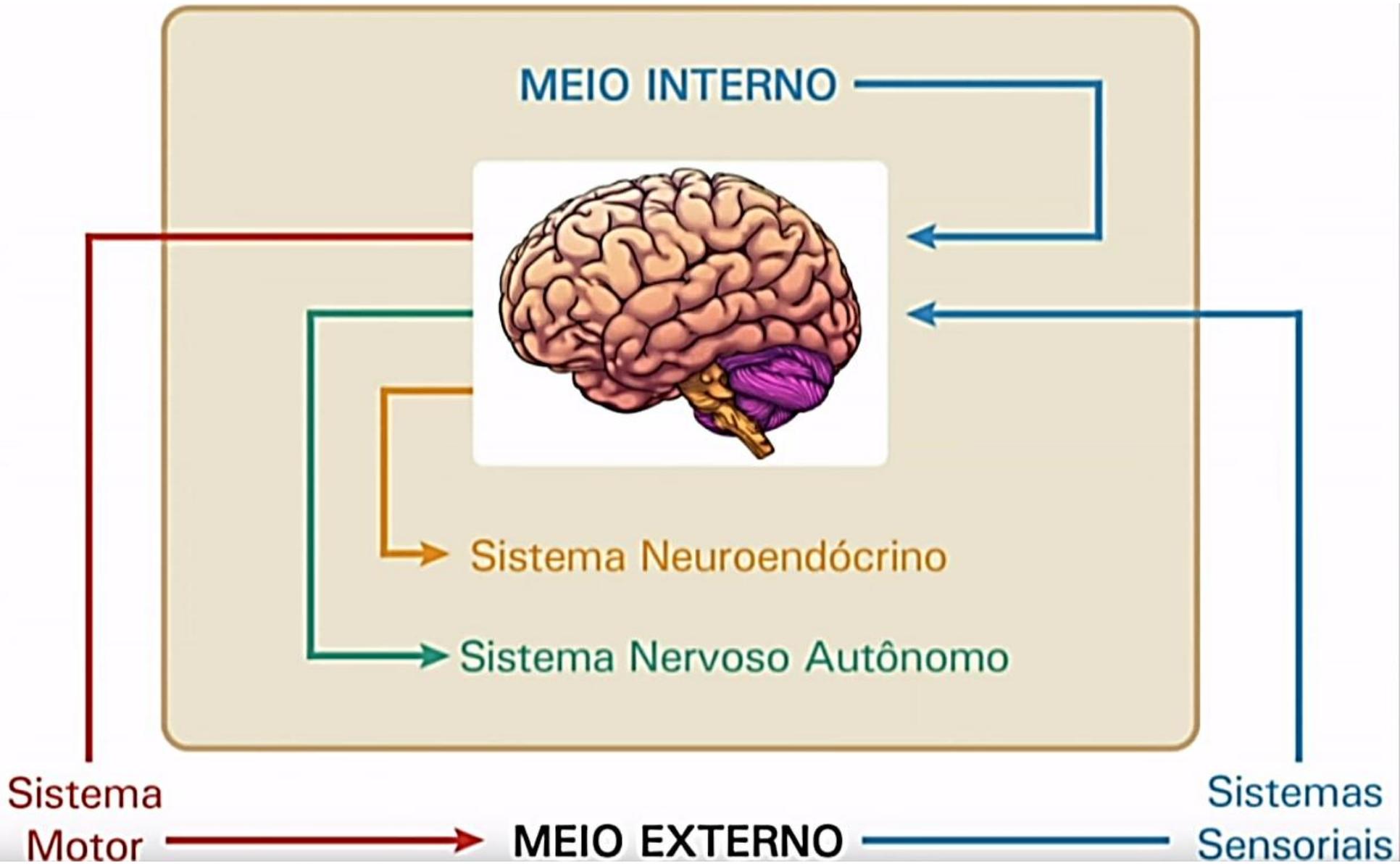
## Para estudar ...

### UNIVESP - Corpo Humano: Órgãos e Sistemas

- ✓ Aula 02 – Aspectos anatomofuncionais do sistema nervoso  
(<https://youtu.be/FEx9XOigC3w>)
- ✓ Aula 05 – Sistemas sensoriais  
(<https://youtu.be/nLSrWt1jkDU>)
- ✓ Aula 06 – Sistemas motores  
(<https://youtu.be/cuGHARqxGUw>)
- ✓ Aula 08 – Funções neurais superiores  
(<https://youtu.be/Wr7zTsmcbW0>)

### Khan Academy: Saúde e Medicina -> Anatomia Humana e Fisiologia

- ✓ Estrutura do sistema nervoso
- ✓ Funções do sistema nervoso
- ✓ Unidade motora
- ✓ Somatossensação periférica
- ✓ Reflexo Muscular
- ✓ Neurônios motores superiores
- ✓ Córtex cerebral



## Movimento

Qualquer movimento é produzido por padrões espaciais e temporais de contrações musculares desencadeados pelo encéfalo e pela medula espinhal.

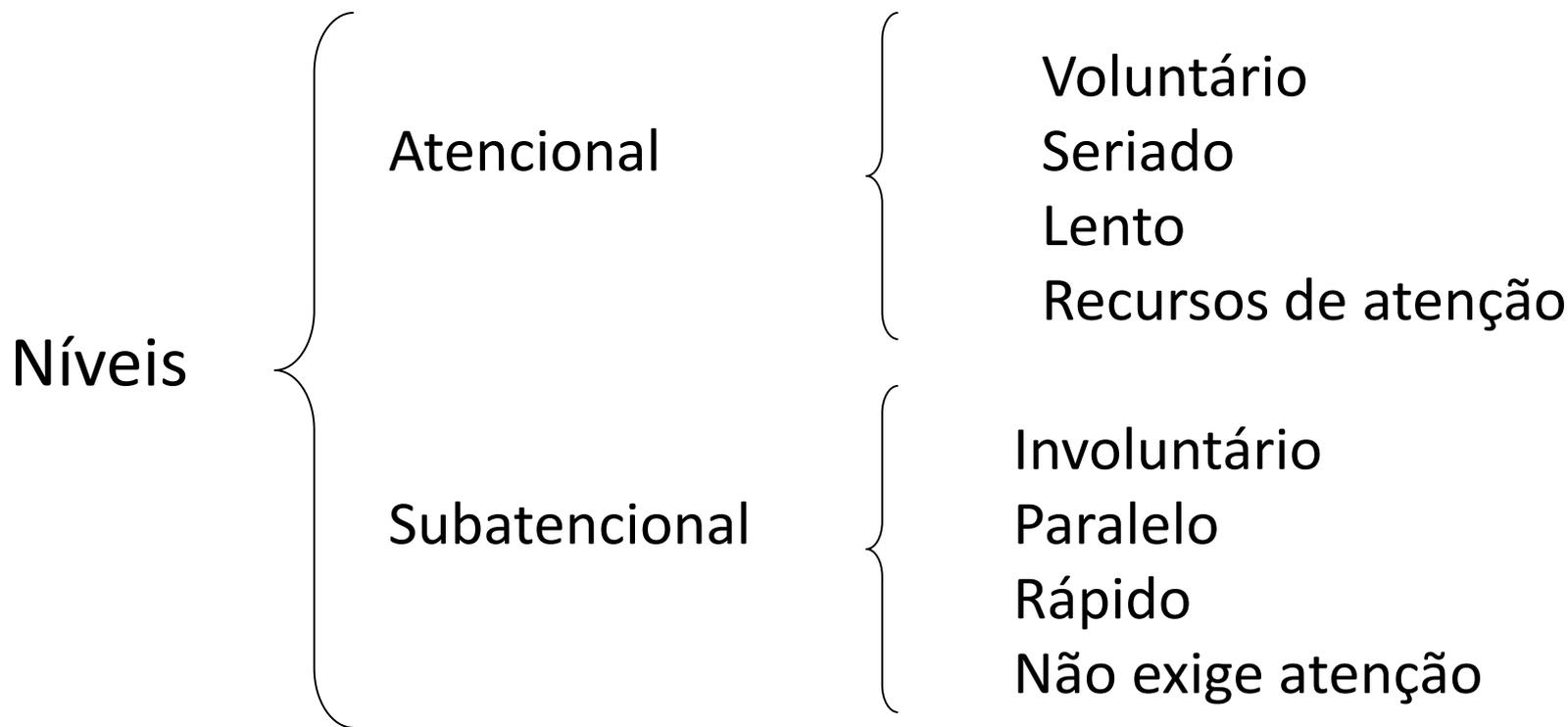
- ✓ Movimentos reflexos:
  - ✓ São padrões coordenados involuntários de contração e relaxamento eliciados por estímulos periféricos.
  - ✓ Por exemplo: reflexo de estiramento, reflexo de retirada
  
- ✓ Movimentos rítmicos:
  - ✓ Padrões repetitivos de movimentos espontâneos ou desencadeados por estímulos periféricos.
  - ✓ Por exemplo: mastigação, ato de engolir, coçar e locomoção
  
- ✓ Postura e Equilíbrio:
  - ✓ Movimentos organizados no tronco cerebral
  
- ✓ Movimentos voluntários ou elaborados:
  - ✓ Movimentos complexos

## Programa Motor

- ✓ Certos movimentos (e suas características principais) são planejados de forma hierárquica antecipadamente (antes da realização do movimento). O conjunto de instruções que descrevem (de alguma forma) as ações motoras chama-se programa motor;
- ✓ O papel do feedback sensorial seria fornecer informações para modular (adequar, corrigir, atualizar) as ações motoras planejadas antecipadamente descritas no programa motor;
- ✓ O corpo humano tem uma abundância de sistemas independentes que devem ser controlados para realização de um movimento;
- ✓ Como um programa motor pode ser especificado para controlar tantos graus de liberdade?

## Estratégias Motoras

- ✓ Uma maneira de solucionar o problema de graus de liberdade é que o sistema nervoso controla grupos musculares que agem num determinado padrão (estratégia motora);
- ✓ A informação sensorial é utilizada para modular essas estratégias motoras conforme o objetivo da ação motora.



## Movimento: Organização hierárquica

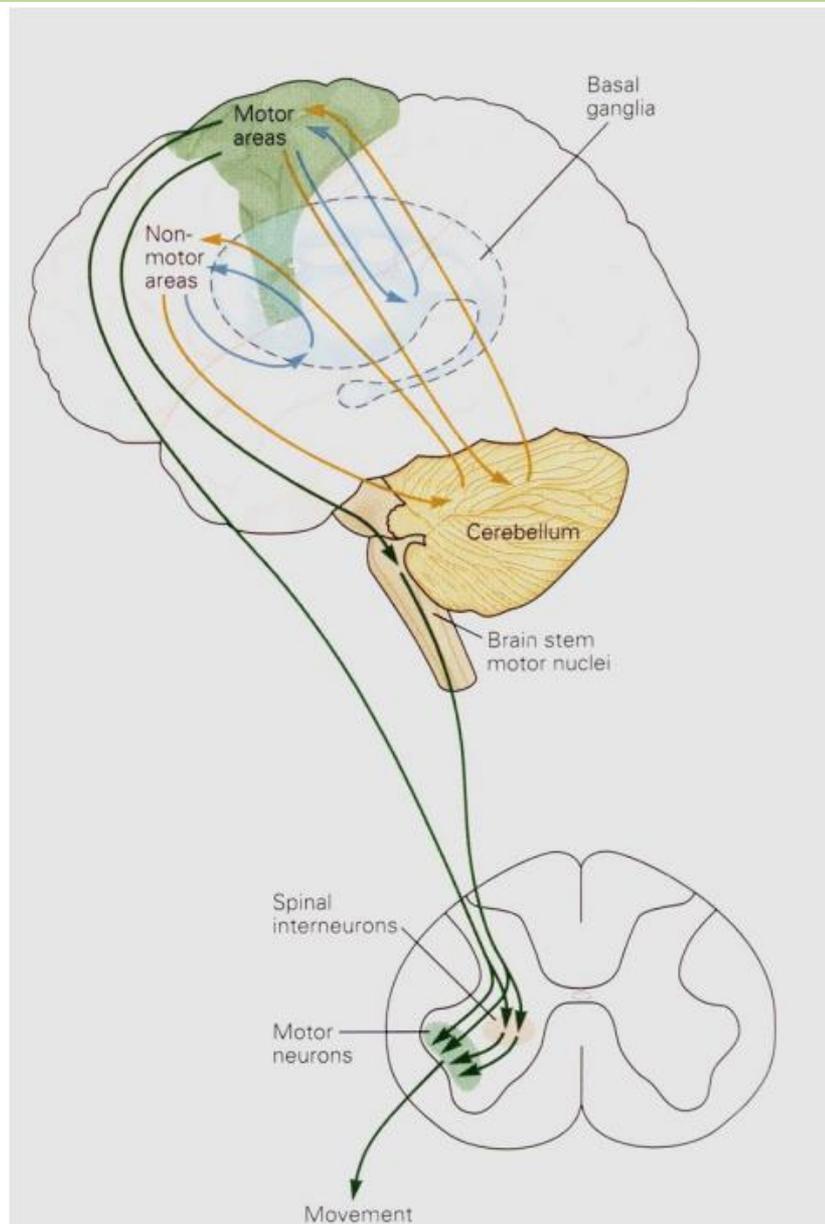
Cada nível contém circuitos que organiza e regula respostas motoras complexas.

Córtex: propósito e comando do movimento.

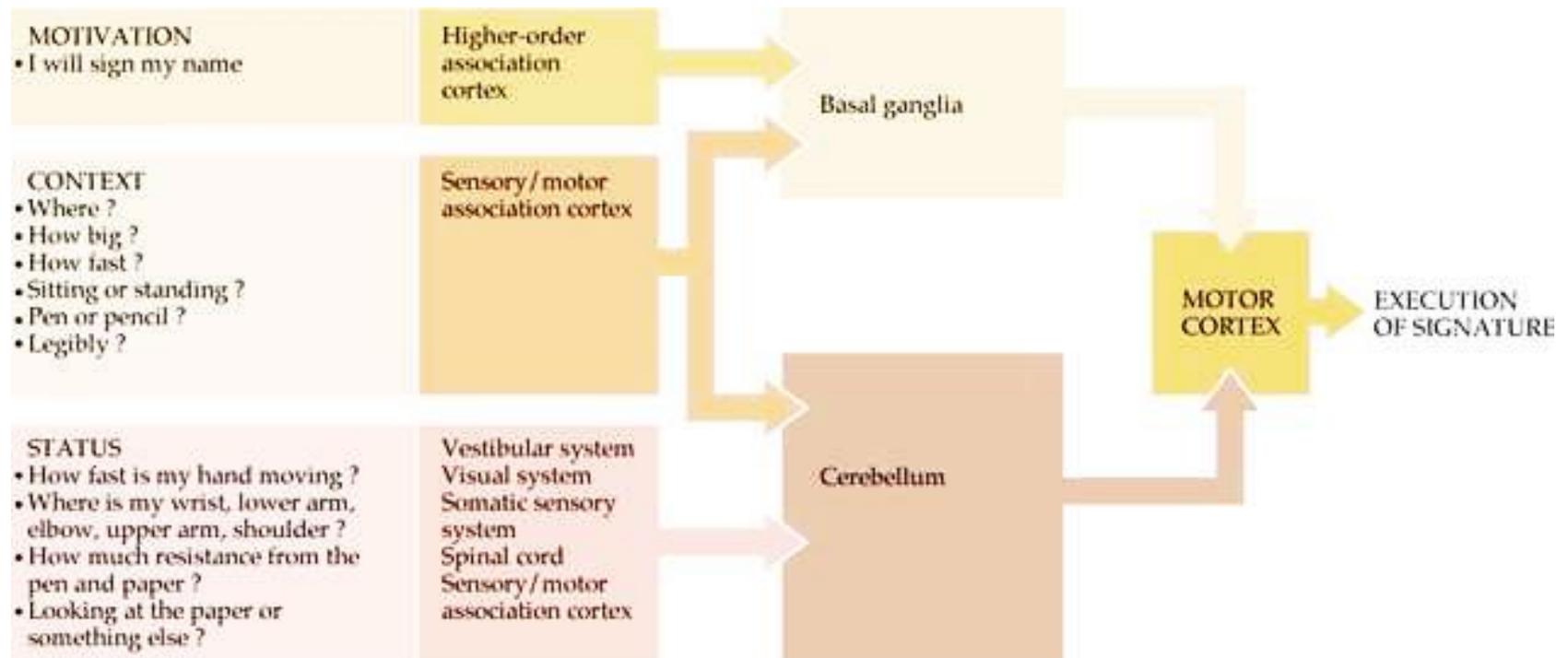
Núcleos da Base e Cerebelo: formação do plano motor e ajustes motores.

Tronco Cerebral: controle da postura e equilíbrio.

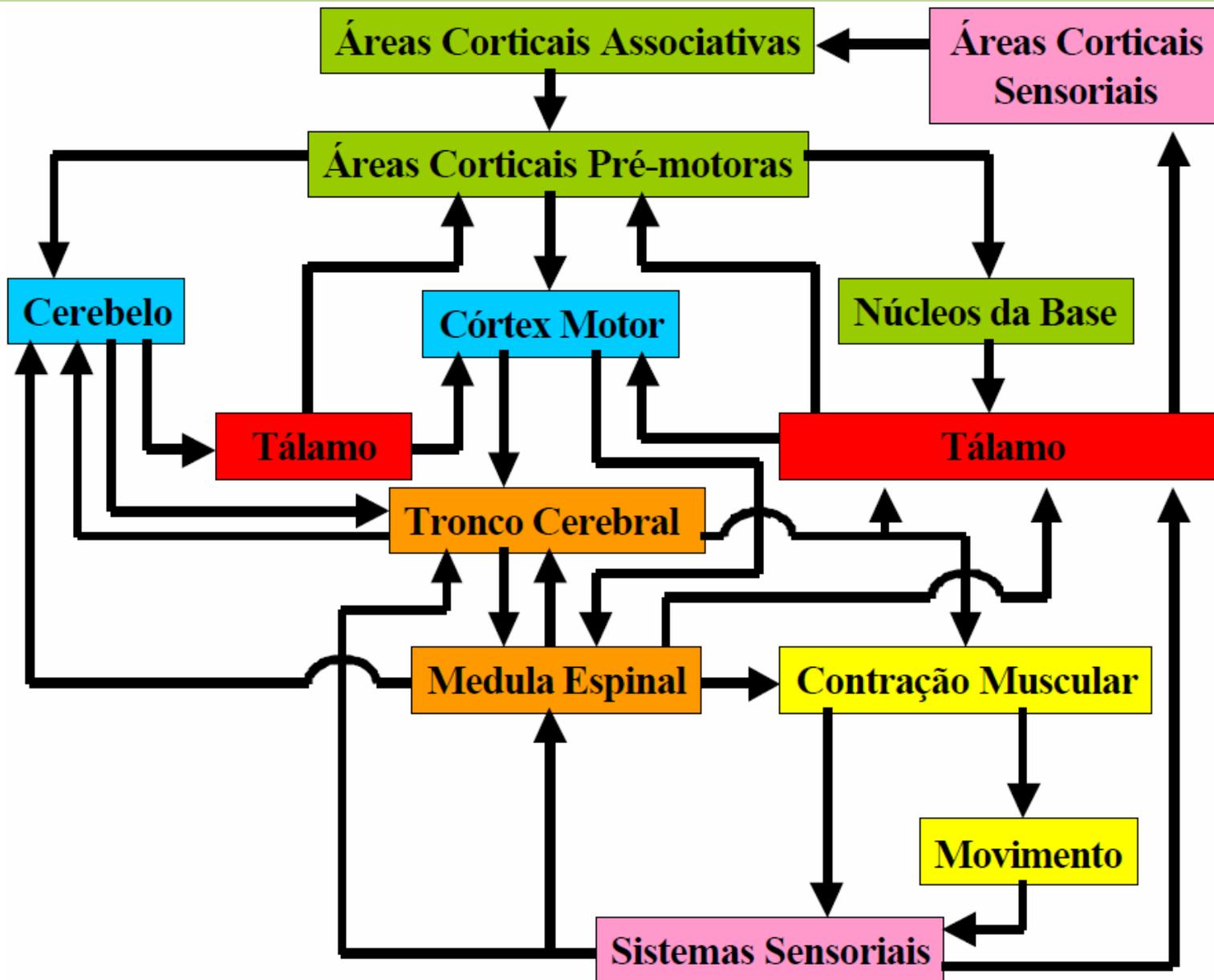
Medula Espinhal: nível mais baixo da organização hierárquica; circuitos neurais que mediam reflexos e automatismos rítmicos (tronco e medula espinhal)

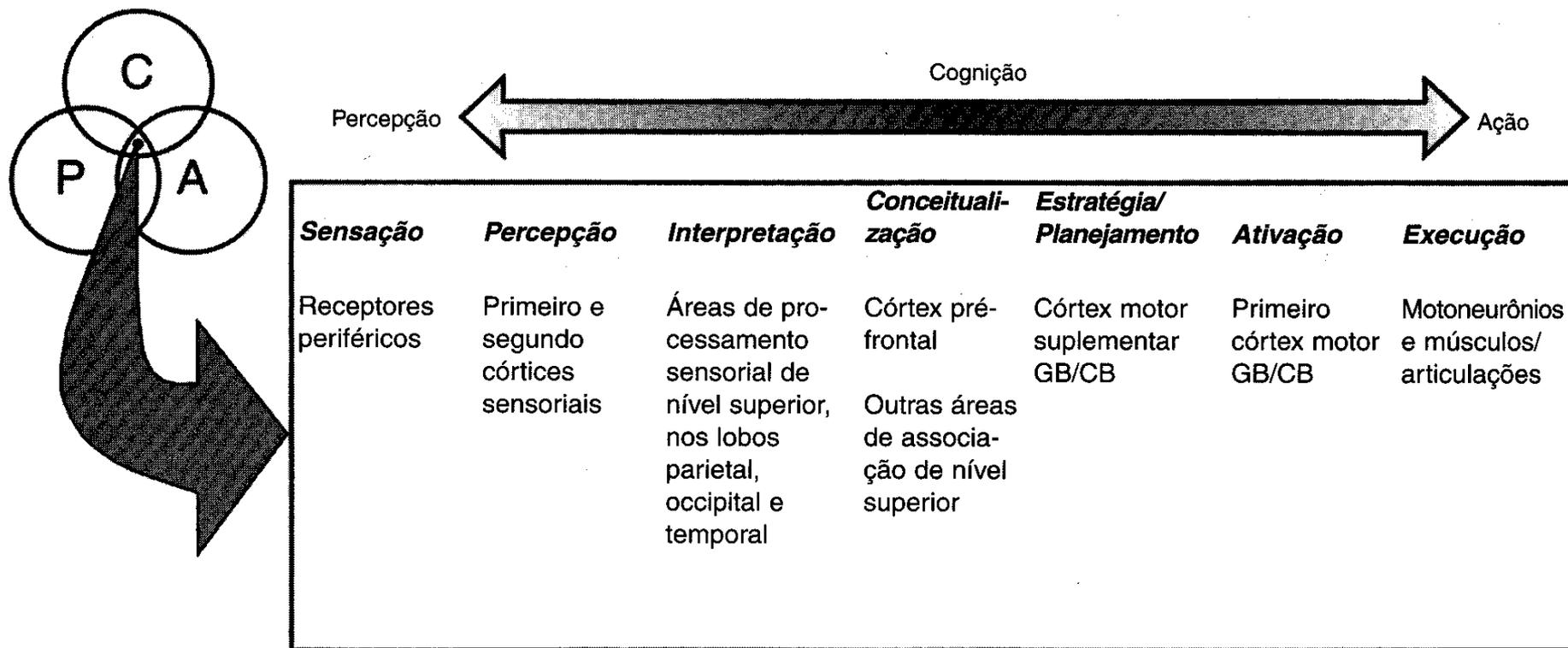


# Movimento: Organização hierárquica



# Movimento: Organização hierárquica



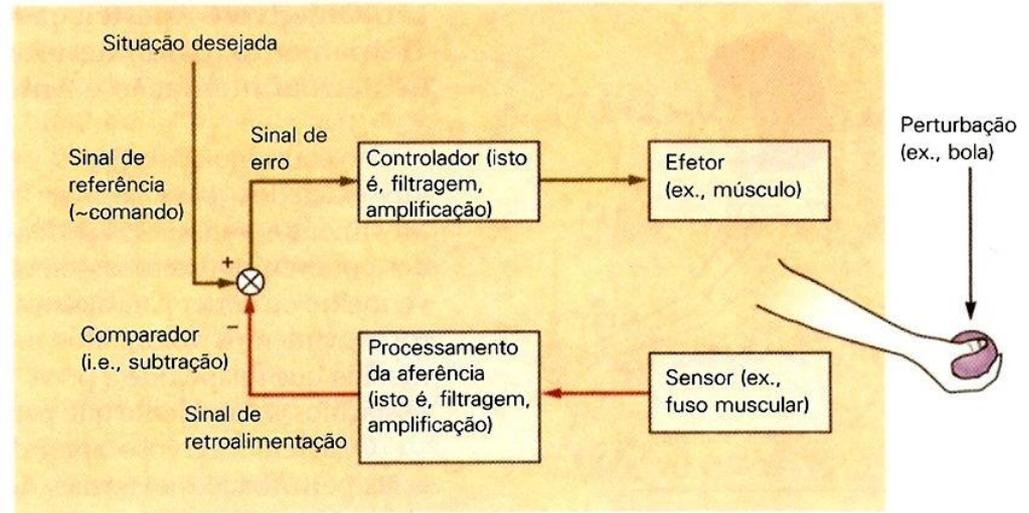


**FIGURA 3-1.** Modelo da interação entre os processos perceptivo, cognitivo e de ação envolvidos no controle motor. GB: gânglios basais; CB: cerebelo.

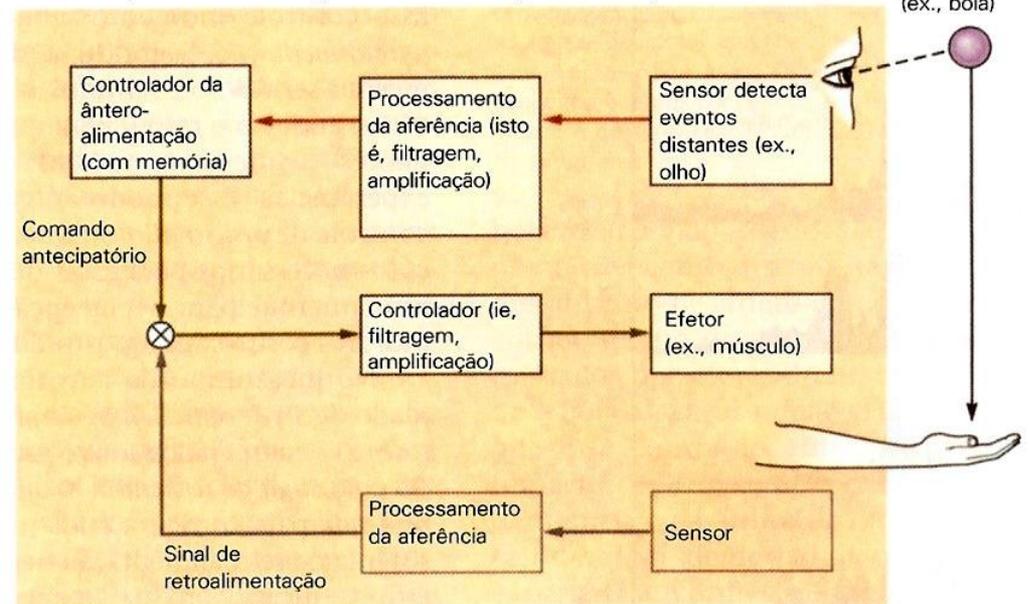
# Movimento: Organização hierárquica

## Mecanismos de controle por Retroalimentação (feedback) e Controle antecipatório (feedforward)

**A** Controle por retroalimentação: um comando especifica uma situação desejada



**B** Controle por ântero-alimentação: um comando especifica a resposta

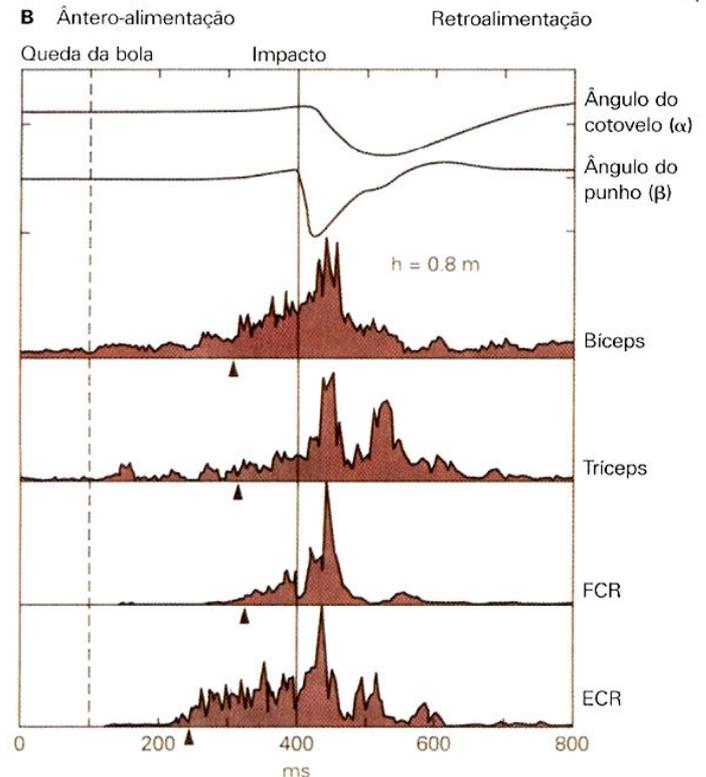
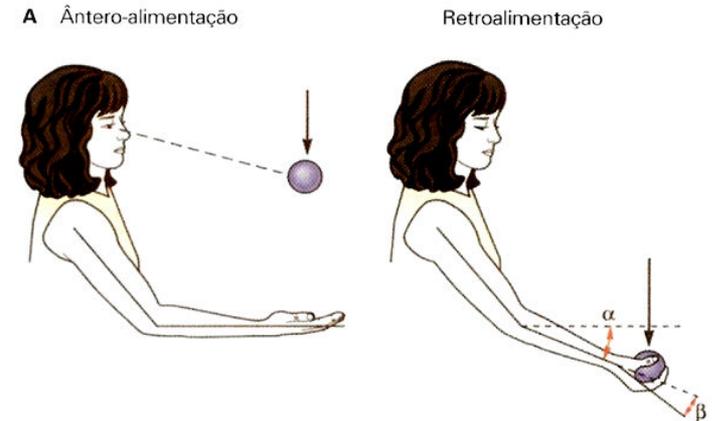


## Controle por feedback

- ✓ Requer mais tempo, mais informações sensoriais e é mais preciso.

## Controle por feedforward

- ✓ Essencial para movimentos rápidos, depende da capacidade de previsão do SN e pode modificar respostas reflexas.



Quanto ao fluxo de informação (transmissão do potencial de ação), os neurônios podem ser classificados em:

- ✓ Aferente: recebem informação sensorial da vizinhança; e
- ✓ Eferente: transmitem o sinal de saída do SN para o órgão efetor (músculo) e estes neurônios são chamados de motoneurônios; e
- ✓ Interneurônio (99%): transmitem a informação de um neurônio ao outro (eliciam respostas excitatórias ou inibitórias em outros neurônios)

Tipo	Função	Diâmetro (μm)	Velocidade de condução (m/s)
<b>Eferente</b>			
A $\alpha$	Músculo esquelético	15	100
A $\beta$	Músculo esquelético + Fuso muscular	8	50
A $\gamma$	Fuso muscular	5	20
<b>Aferente</b>			
Ia	Fuso muscular	13-20	80-120
Ib	Órgão tendinoso	13-20	80-120
II	Fuso muscular	6-12	35-75
III	Sensores de pressão profunda no músculo	1-5	5-30
IV	Dor, temperatura	0,2-1,5	0,5-2

## Músculos

Os músculos são máquinas moleculares que convertem energia química (derivada do alimento) em força.

### Classificação quanto à Histologia do Tecido Muscular

- ✓ Liso (involuntário)
  - ✓ Encontrado nas vísceras e paredes dos vasos sanguíneos.
- ✓ Cardíaco (involuntário)
  - ✓ Constitui a maior parte da parede cardíaca.
- ✓ Esquelético (voluntário)
  - ✓ Ligam-se ao esqueleto para realizar movimento.

### Classificação quanto à Arquitetura das Fibras Musculares

- ✓ Fusiformes: Alinhadas ao tendão.
- ✓ Penadas: Arranjadas em ângulo.

## **Extensibilidade**

- ✓ Capacidade de ser estirado ou aumentar de comprimento

## **Elasticidade**

- ✓ Capacidade de voltar ao comprimento normal após um estiramento

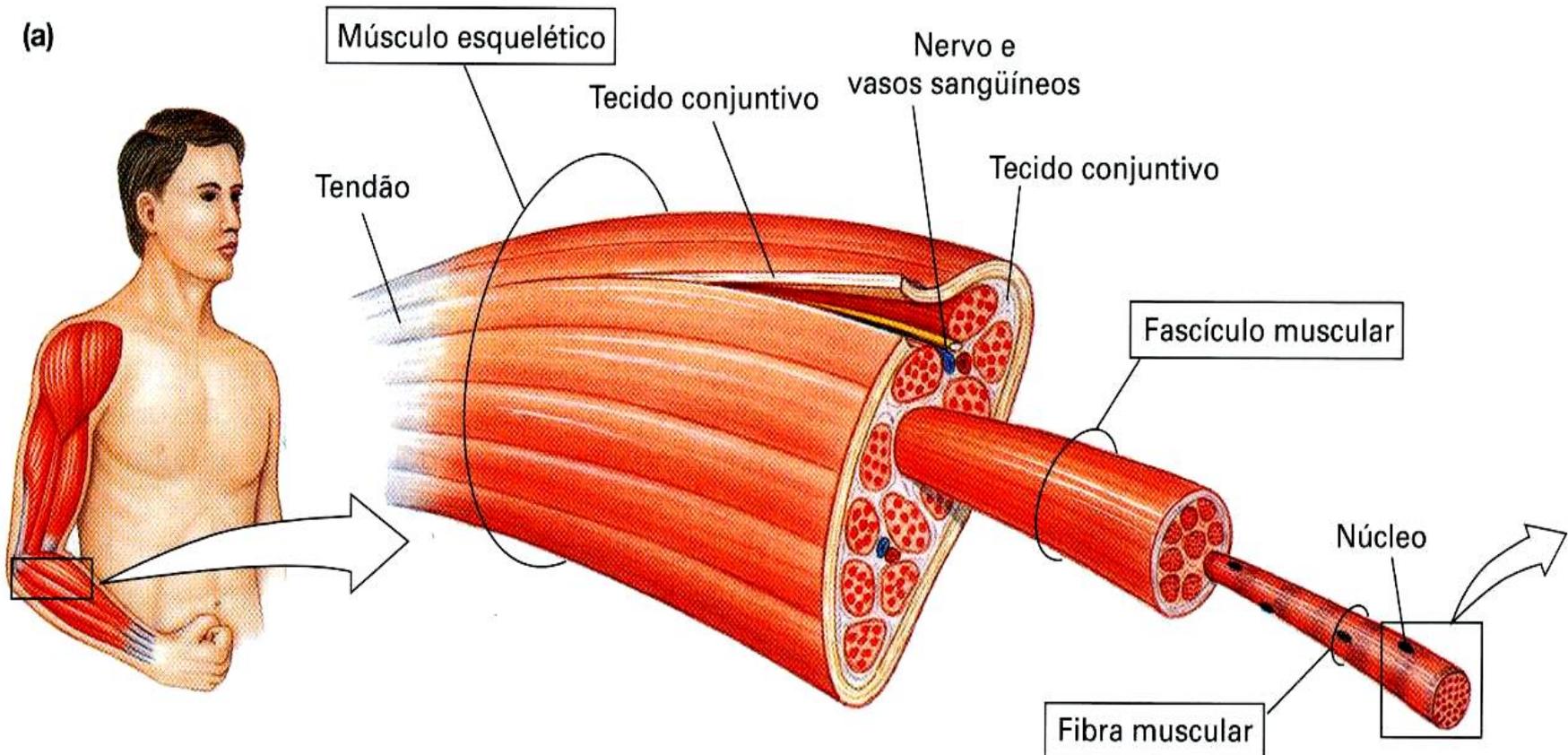
## **Irritabilidade**

- ✓ Capacidade de responder à um estímulo

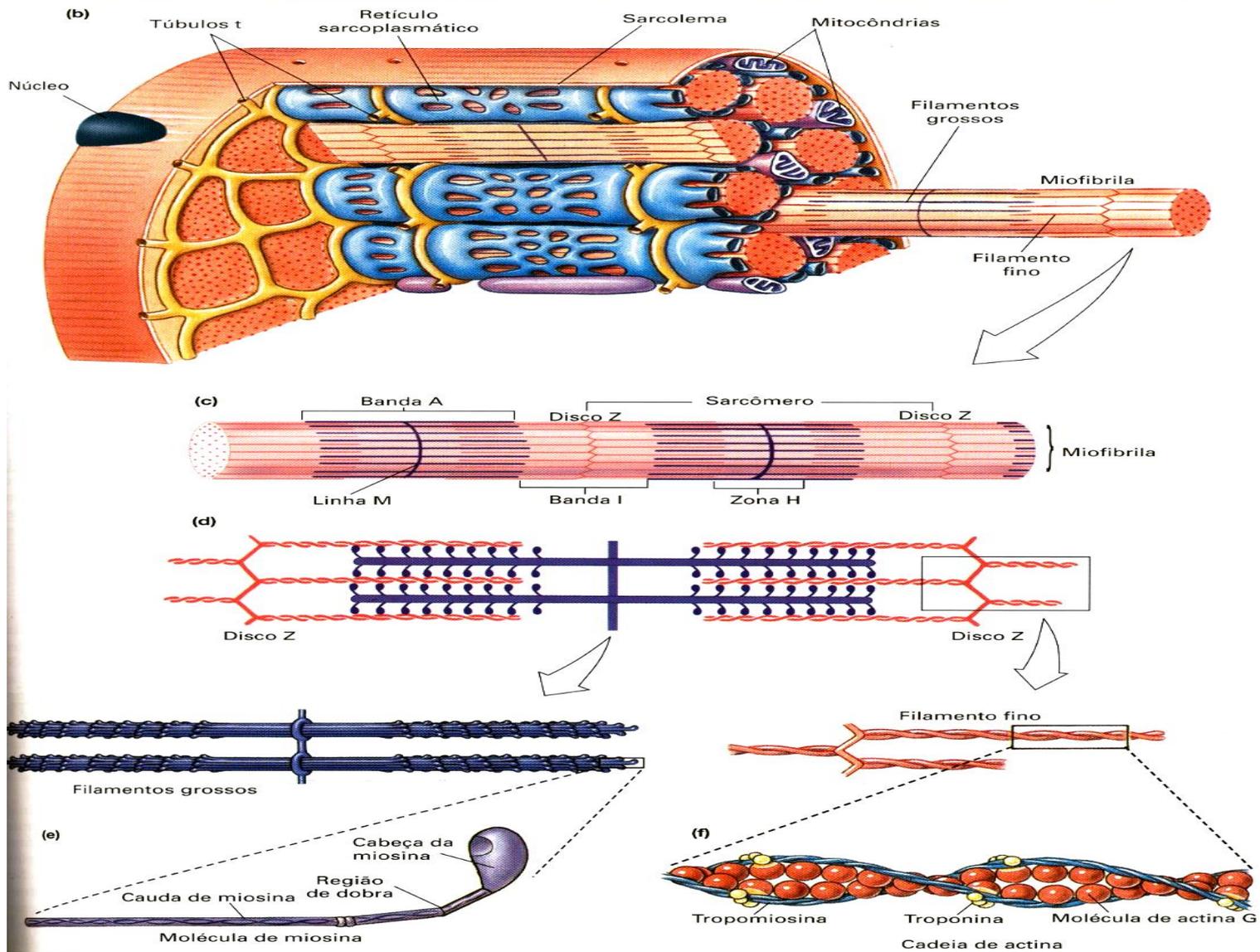
## **Condutividade**

- ✓ Habilidade de propagar uma onda de excitação

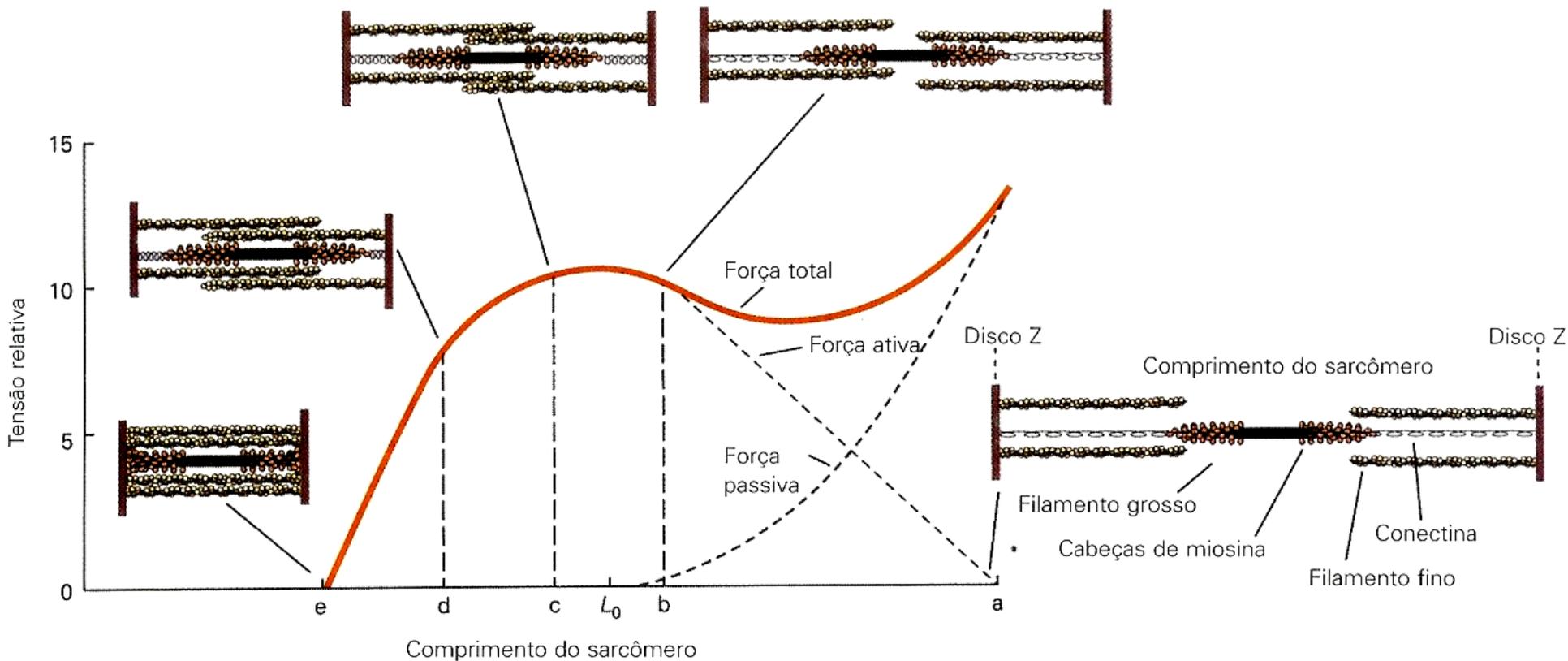
## **Capacidade de desenvolver tensão**



# Sistema Muscular: estrutura



## A força contrátil depende do comprimento do músculo

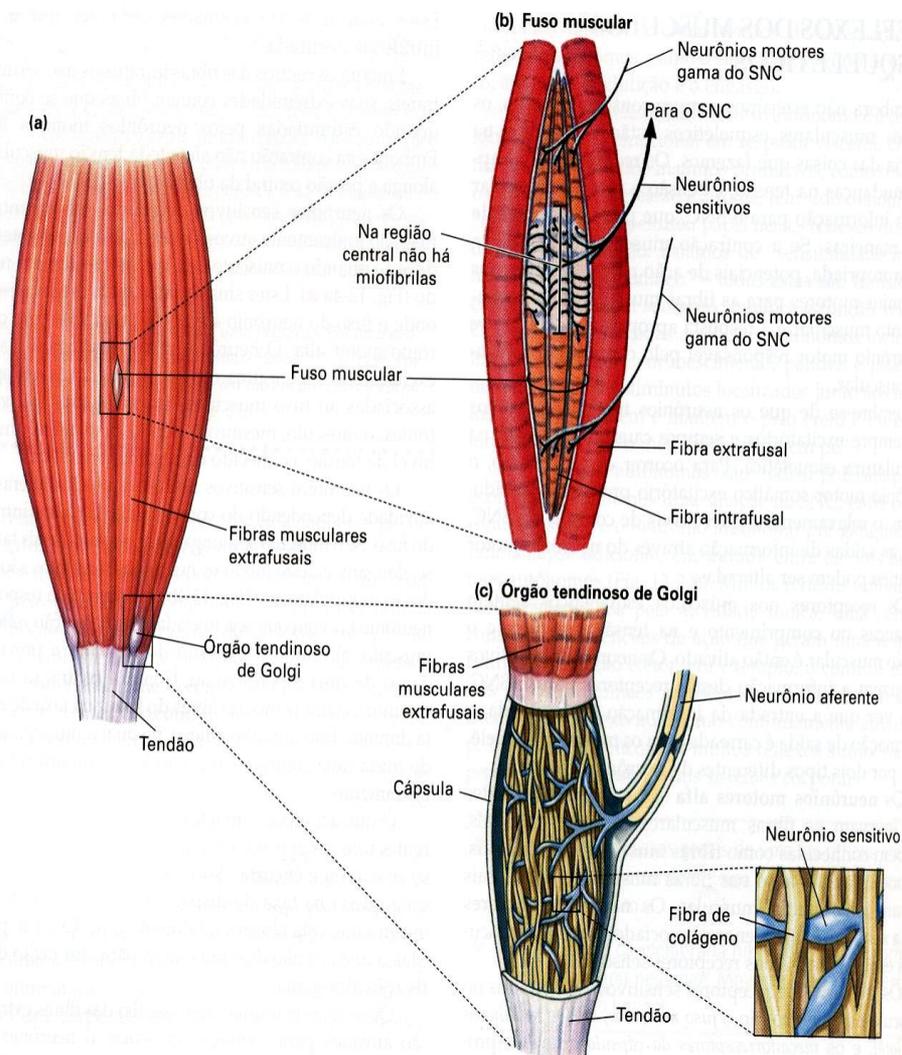


<i>Exercício</i>	<i>Ação Muscular</i>	<i>Comprimento</i>	<i>Relação <math>F_i</math>-<math>F_E</math></i>
<b>ESTÁTICO</b>	ISOMÉTRICA	CONSTANTE	$F_i = F_E$
<b>DINÂMICO</b>	CONCÊNTRICA	ENCURTA	$F_i > F_E$
<b>DINÂMICO</b>	EXCÊNTRICA	ALONGA	$F_i < F_E$
<b>DINÂMICO ISOCINÉTICO</b>	CONCÊNTRICA ou EXCÊNTRICA	ENCURTA ou ALONGA	$F_i = F_E$

$F_i$  = força interna desenvolvida pelo músculo.

$F_E$  = força externa sobre o músculo.

# Sistema Muscular: receptores sensoriais



## Fuso Muscular

- ✓ Sensível ao estiramento passivo do músculo;
- ✓ Sinaliza a variação do comprimento do músculo, fibras do tipo Ia e II altamente especializadas com limiar baixo
- ✓ Informação detalhada e contínua da posição das partes do corpo.

## Órgão Tendinoso de Golgi

- ✓ Sensíveis à contração ativa (força sobre o tendão);
- ✓ Localizado na junção entre o músculo no tendão;
- ✓ Importante para a atividade reflexa da unidade muscular terminais sensoriais encapsulados, fibras do tipo Ib, altamente especializados com limiar baixo

## Unidade Motora: Motoneurônio + Fibras Musculares

- ✓ Definida como o corpo celular e os dendritos de um motoneurônio, os múltiplos ramos de seu axônio e as fibras musculares que ele inerva;
- ✓ Quando uma unidade motora é ativada, impulsos (potenciais de ação) viajam pelo axônio e são distribuídos ao mesmo tempo por todas as fibras na unidade motora;
- ✓ A excitação do nervo é transferida pela sinapse para a membrana da fibra muscular;
- ✓ A união do nervo motor com a fibra muscular é chamada de junção neuromuscular ou placa motora.

## Componente Neural (motoneurônio)

### Quanto à morfologia (princípio do tamanho)

- ✓ Tamanho do motoneurônio
  - ✓ Diâmetro e área do corpo celular, número de dendritos, diâmetro do axônio
- ✓ Princípio do Tamanho (Henneman, 1957)
  - ✓ “Há uma forte correlação entre o tamanho do motoneurônio e sua excitabilidade”.
  - ✓ As fibras musculares são recrutadas numa ordem crescente de tamanho, por que fibras maiores apresentam maior limiar de excitação.

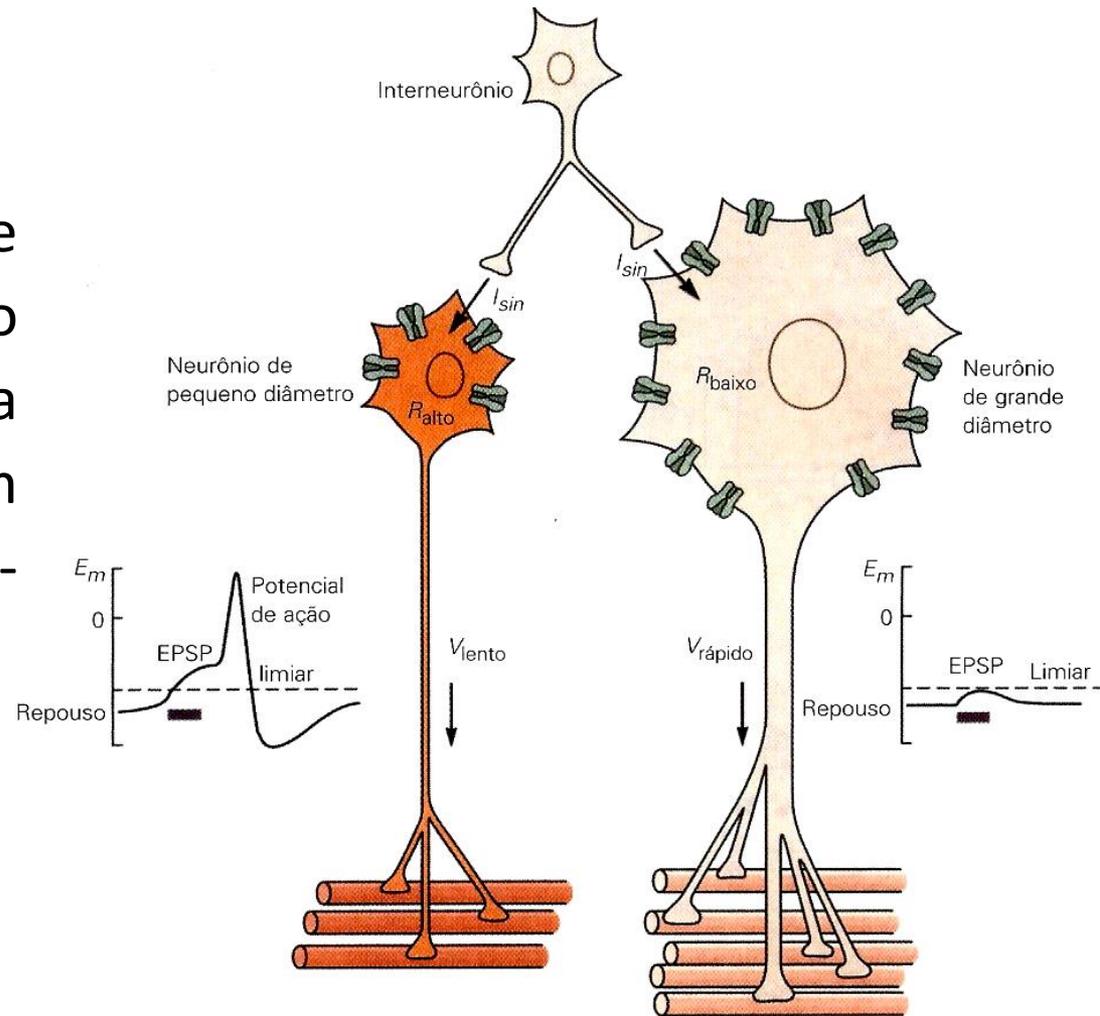
### Quanto à velocidade de condução axonal

- ✓ A velocidade na qual o potencial de ação é propagado é influenciada pelo tamanho (diâmetro) do axônio e quantidade de bainha de mielina

## Componente Neural (motoneurônio)

Pela lei de Ohm ( $U=RI$ ):

Para a mesma corrente sináptica excitatória ( $I$ ) o neurônio com menor soma (maior resistência,  $R$ ) terá um maior potencial excitatório pós-sináptico (EPSP).



## Componente Muscular

### Proporção de inervação

- ✓ Número de fibras musculares inervadas por motoneurônio.

MÚSCULO	Nº FIBRAS	UNIDADES MOTORAS	PROPORÇÃO
GASTROCNÊMIO MEDIAL	1.120.000	580	1:1.931
MÚSCULO INTERÓSSEO DORSAL	41.000	120	1:342

### Controle fino ou grosseiro

- ✓ Relação: Proporção de inervação x Tarefa

### Compartimento muscular

- ✓ Volume muscular suprido por um ramo primário do nervo muscular. Um compartimento possui uma única população de unidades motoras.

## CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS

<b>SISTEMA 1</b>	<b>contração lenta</b>	<b>contração rápida a</b>	<b>contração rápida b</b>
<b>SISTEMA 2</b>	<b>Tipo I</b>	<b>Tipo IIa</b>	<b>Tipo IIb</b>
<b>SISTEMA 3</b>	<b>SO</b>	<b>FOG</b>	<b>FG</b>
<b>velocidade de contração</b>	<b>lenta</b>	<b>rápida</b>	<b>rápida</b>
<b>resistência à fadiga</b>	<b>alta</b>	<b>moderada</b>	<b>baixa</b>
<b>força da unidade motora</b>	<b>baixa</b>	<b>alta</b>	<b>alta</b>
<b>capacidade oxidativa</b>	<b>alta</b>	<b>média</b>	<b>baixa</b>
<b>capacidade glicolítica</b>	<b>baixa</b>	<b>alta</b>	<b>maia alta</b>

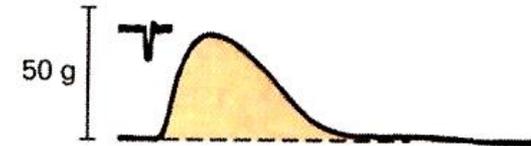
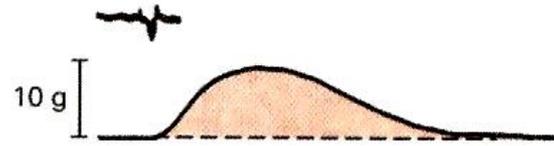
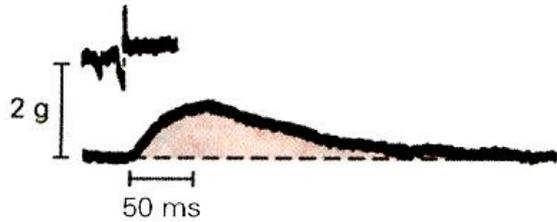
# Sistema Muscular: tipos de fibras musculares

Lenta

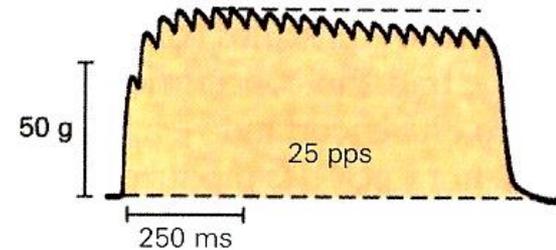
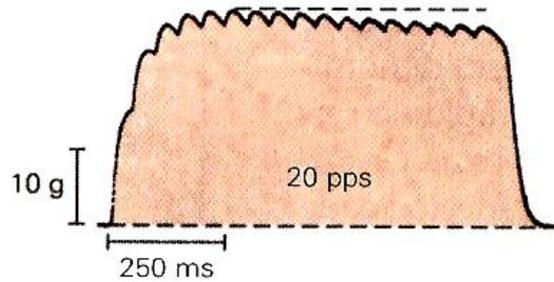
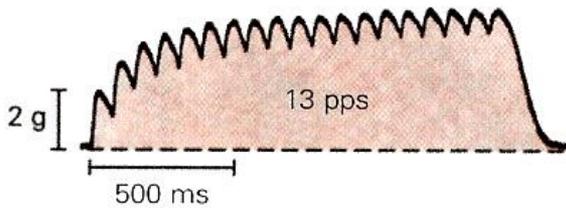
Rápida e resistente à fadiga

Rápida e sem resistência à fadiga

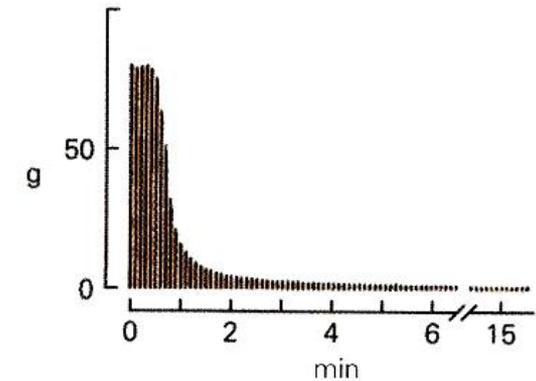
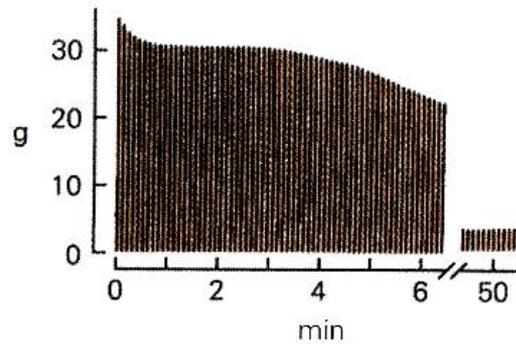
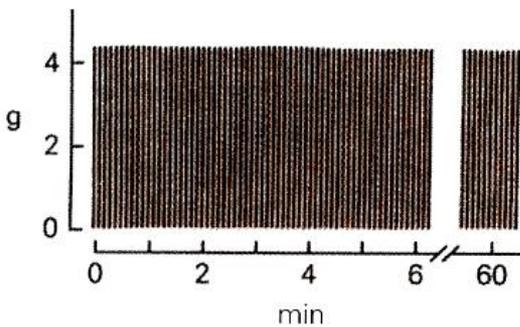
**A** Contração



**B** Força de tétano imperfeito



**C** Sensibilidade à fadiga



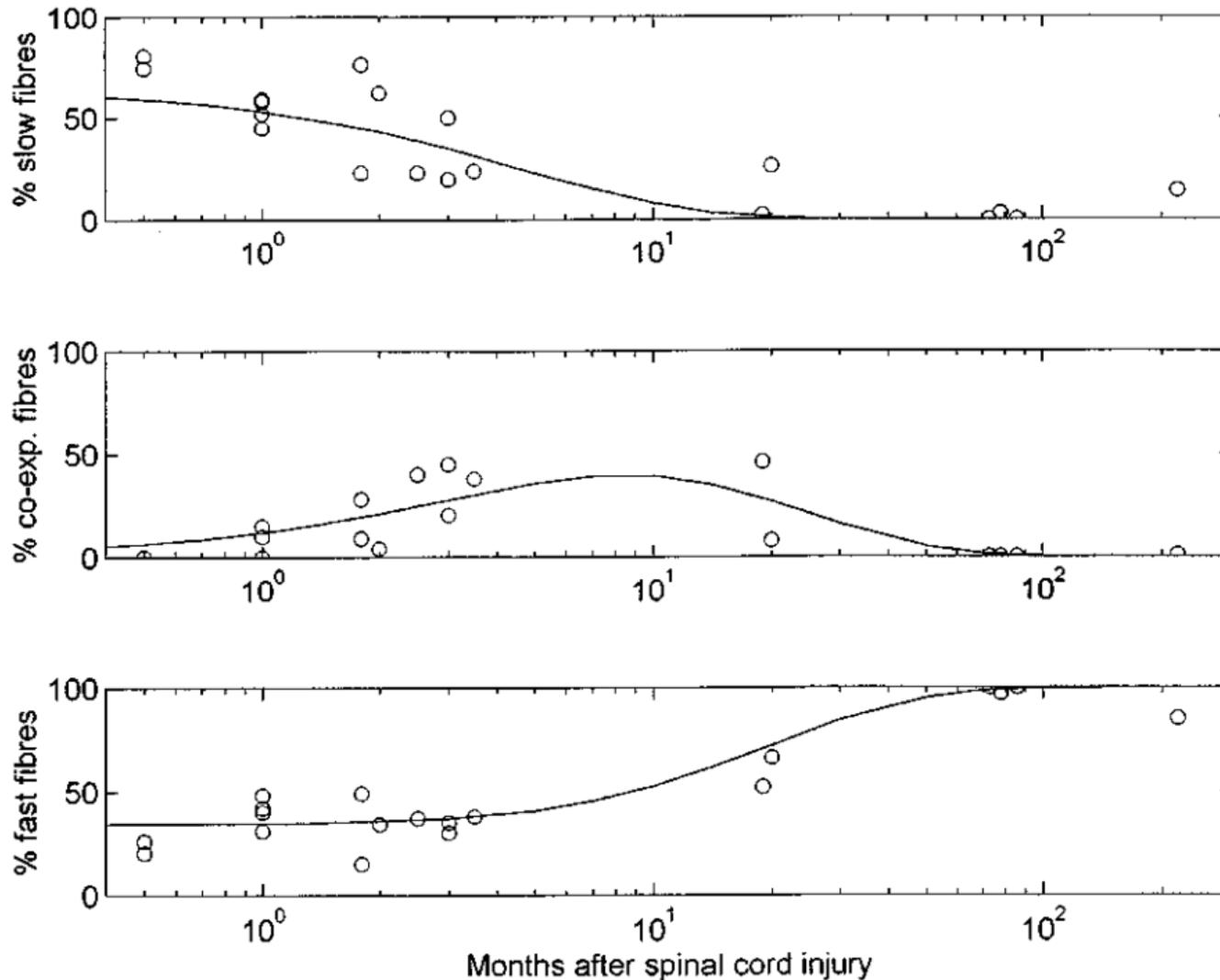
Muscle	% Type I
Deltoid	57.1
Erector Spinae	56.4
Trapezius	53.7
Gluteus Maximus	52.4
Rectus Abdominus	46.1
Biceps Femoris	66.9
Tibialis Anterior	73.0
Vastus Medialis Oblique	52.1
Vastus Lateralis	42.3
Rectus Femoris	35.4
Soleus	87.7
Gastrocnemius (lateral head)	50.5
Gastrocnemius (medial head)	43.5

# Sistema Muscular: tipos de fibras musculares



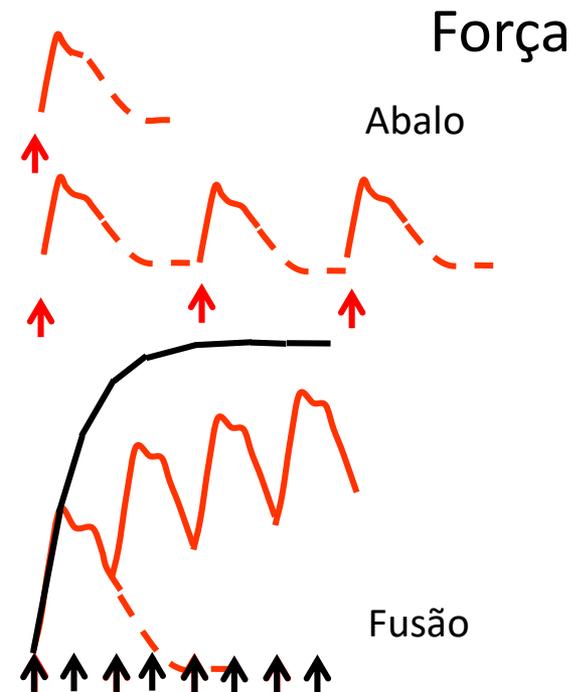
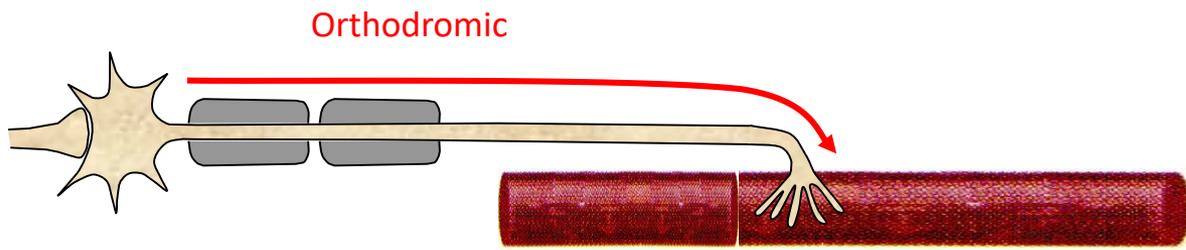
## Skeletal muscle fibre type transformation following spinal cord injury

R Burnham<sup>1,2</sup>, T Martin<sup>3</sup>, R Stein<sup>4</sup>, G Bell<sup>3</sup>, I MacLean<sup>3</sup> and R Steadward<sup>2</sup>

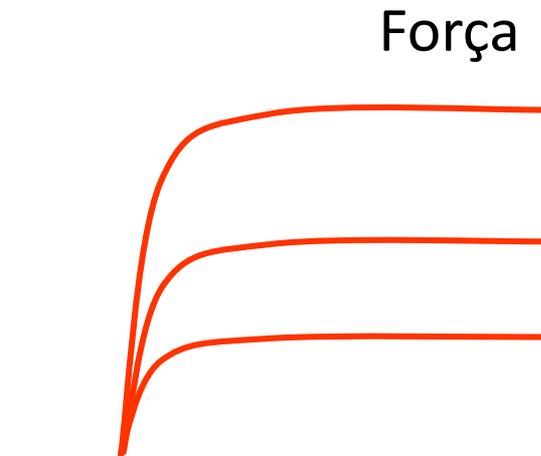
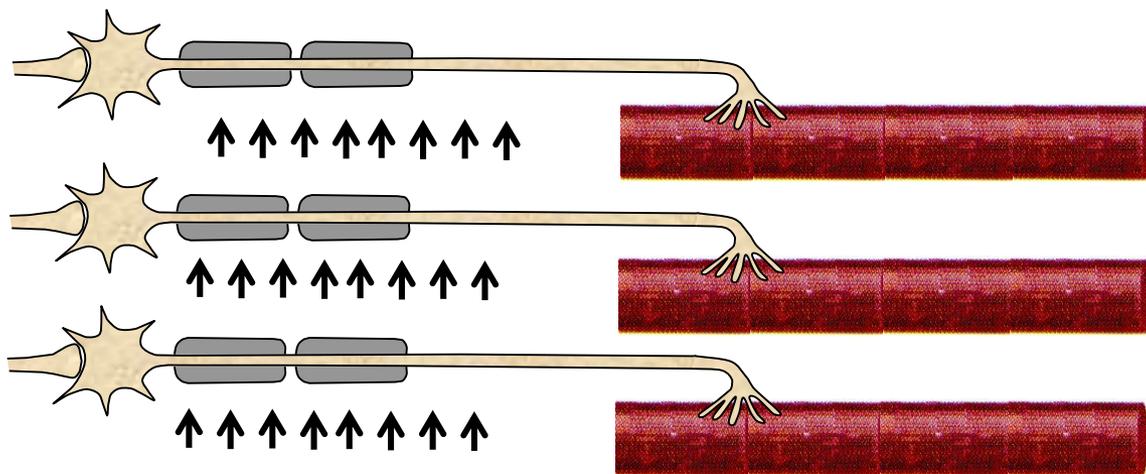


# Sistema Muscular: regulação da força muscular

## 1. Somação Temporal - Frequência de disparo



## 2. Somação Espacial – Recrutamento de Unidades Motoras





## Como ocorre a contração muscular com eletroestimulação?

- ✓ Medula Espinhal: através dos motoneurônios;
- ✓ Nervos periféricos motores;
- ✓ Nervos periféricos sensitivos: mediante a ativação reflexa;
- ✓ Músculos: pela ação direta na junção mioneural.

## Estruturas nervosas e musculares são estimuladas simultaneamente?

Células nervosas:

- ✓ despolarizam-se a partir de uma menor intensidade de corrente;
- ✓ maior velocidade de transmissão neural (>18x)

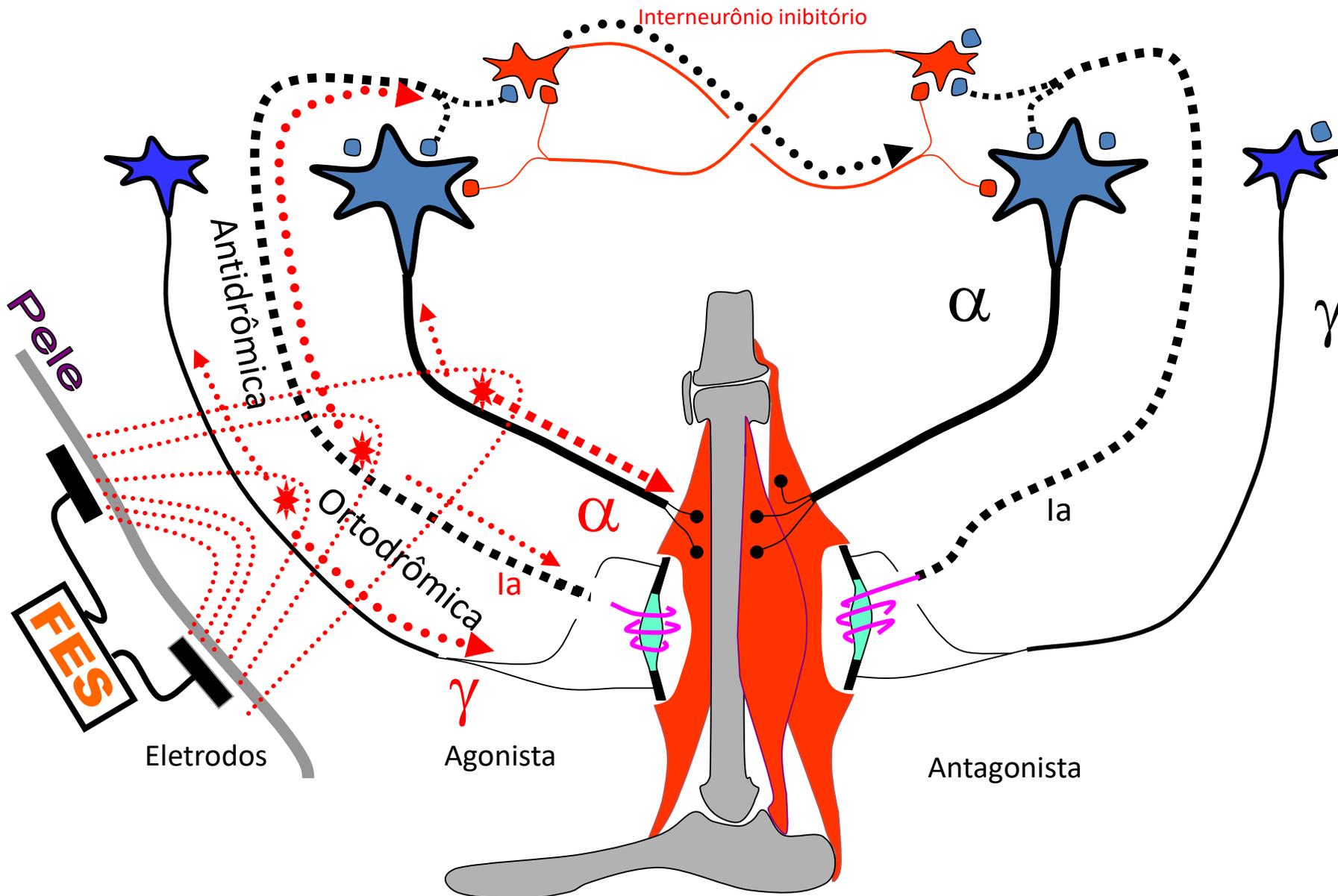
Células nervosas



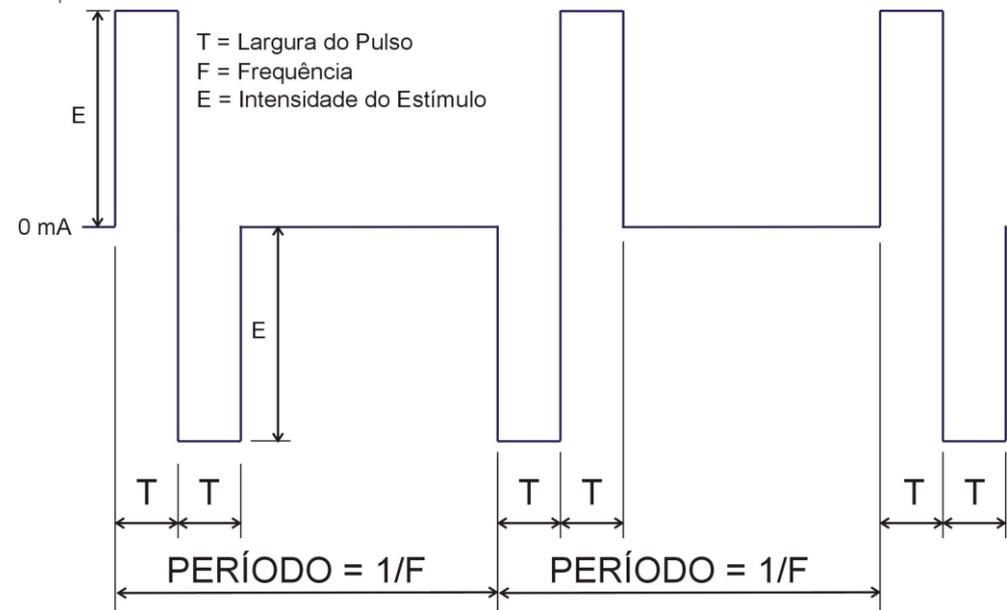
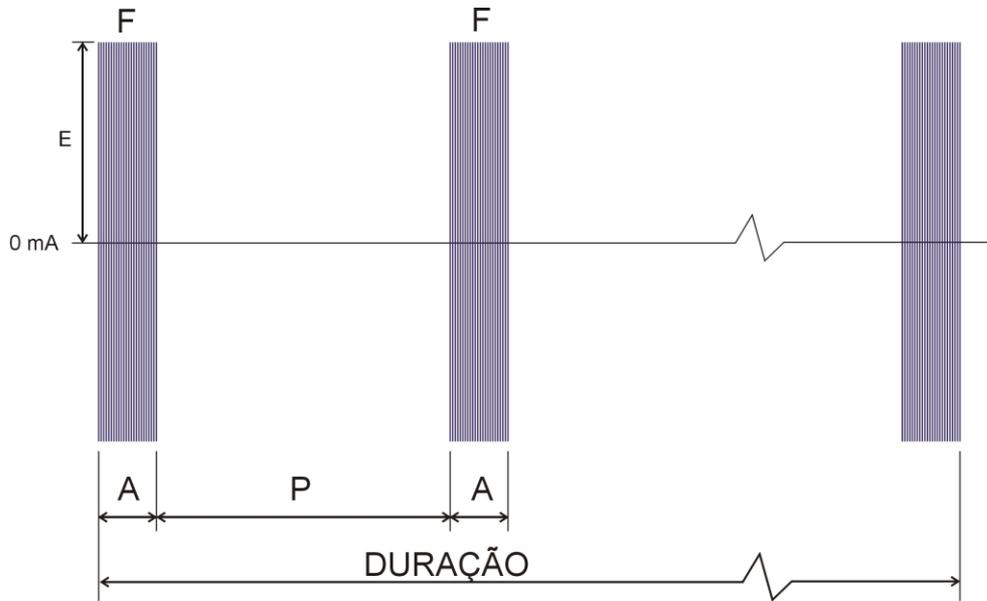
Ação muscular

**Integridade da Unidade Motora!!!**

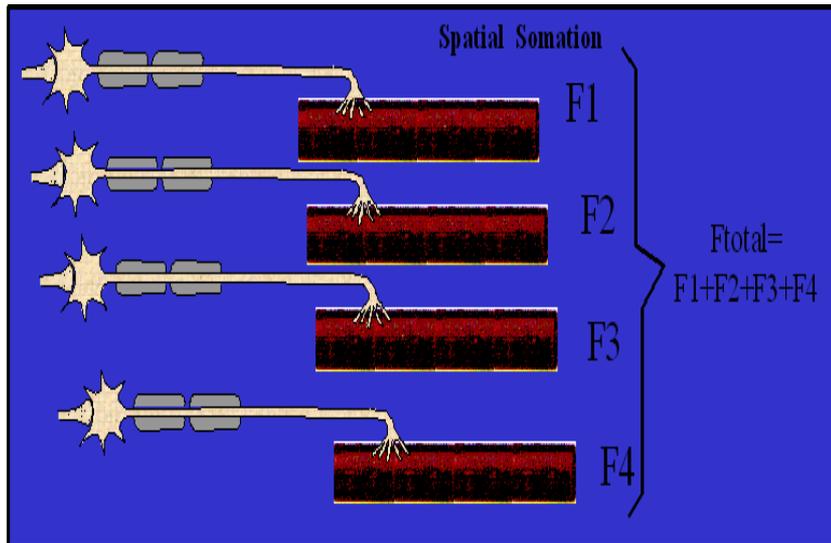
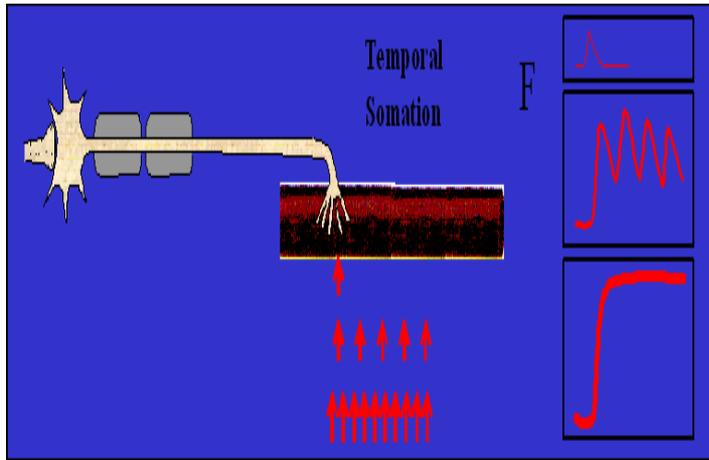
# Eletroestimulação funcional



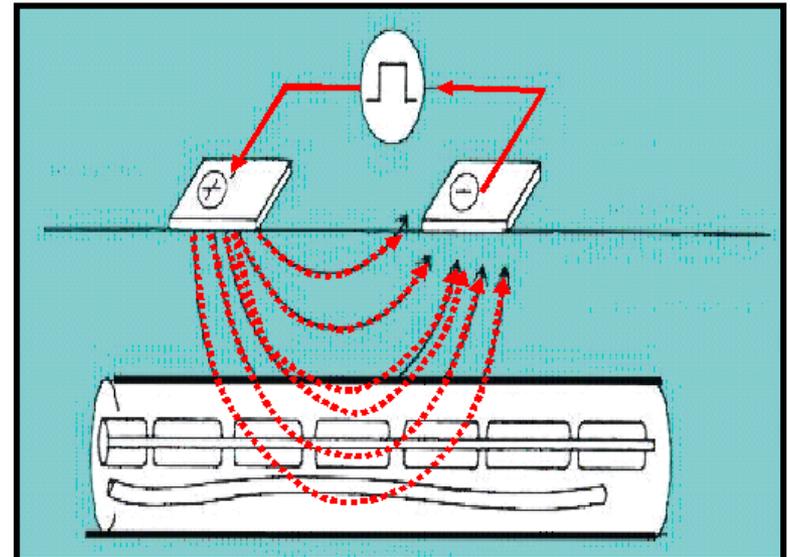
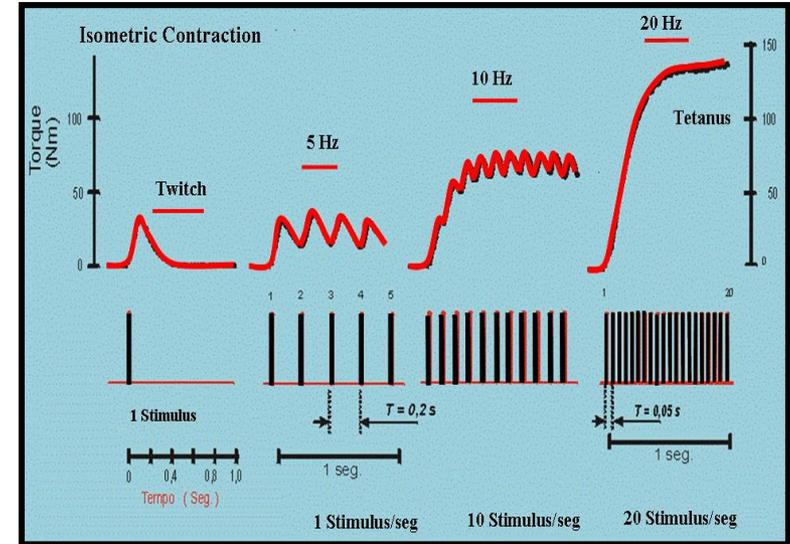
# Eletroestimulação funcional



## Contração Voluntária



## Estimulação Elétrica

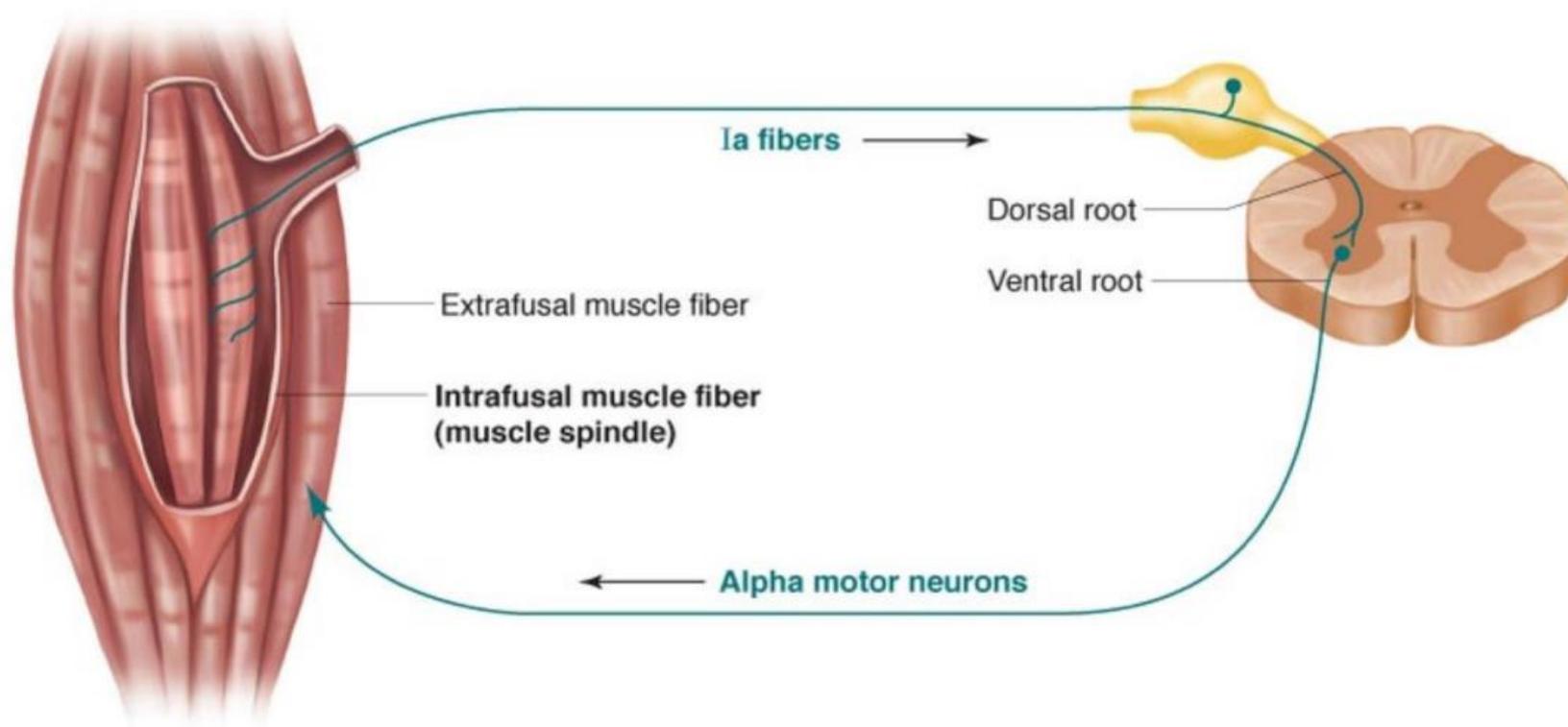


Padrões coordenados involuntários de contração e relaxamento eliciados por estímulos periféricos.

Os estímulos sensoriais para o movimento reflexo espinhal são provenientes dos receptores musculares, articulações e pele.

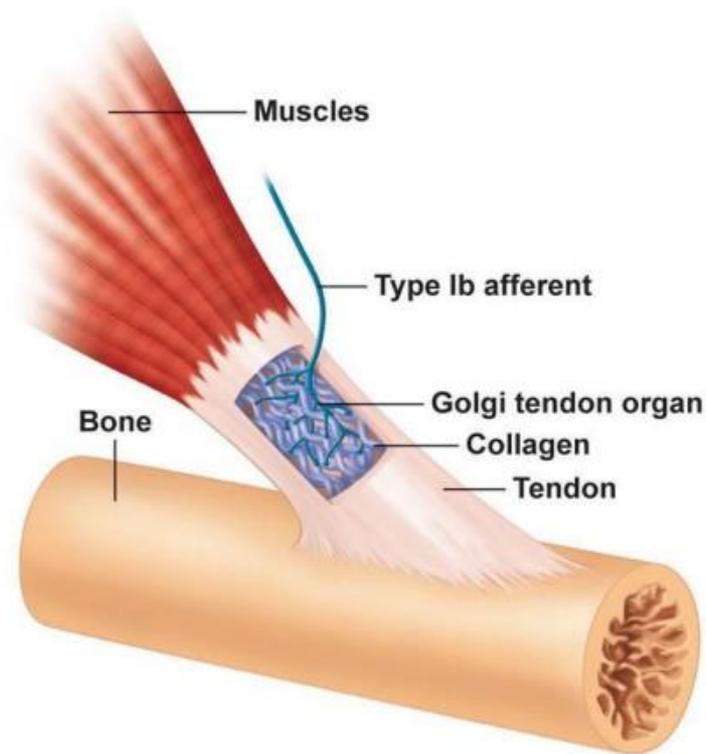
Os movimentos reflexos medulares são organizados na medula, independentemente dos níveis mais elevados no sistema nervoso, porém **podem ser modulados por vias descendentes**.

## Movimentos Reflexos Motores: Arco reflexo

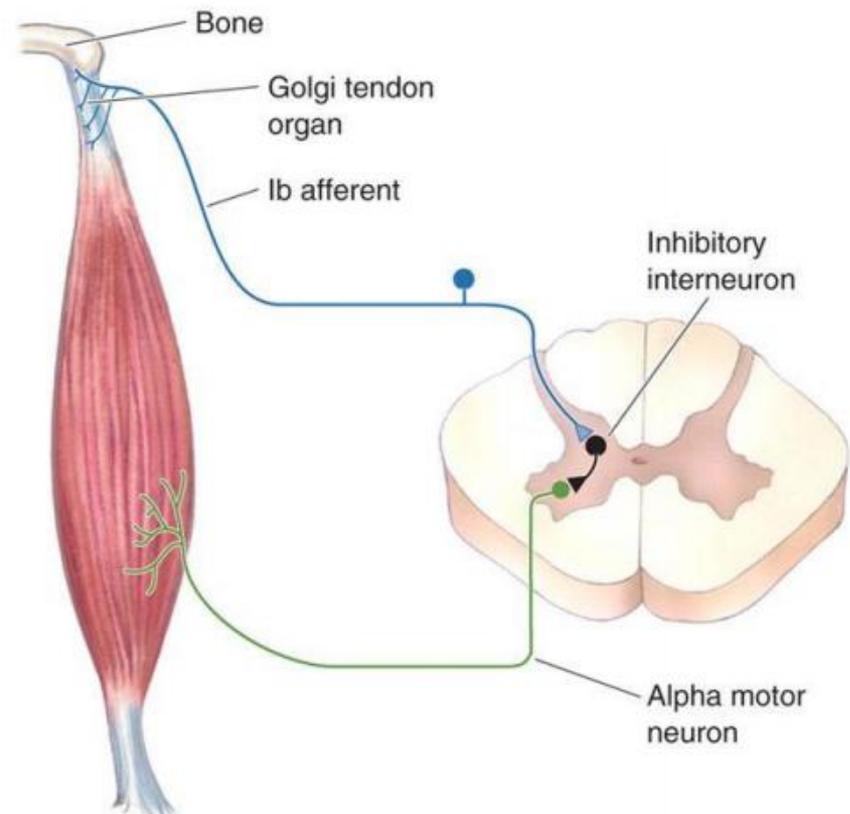


- ✓ Fuso muscular
- ✓ Retroalimentação excitatória direta nos motoneurônios que inervam o músculo que foi estirado.
- ✓ Manter o comprimento do muscular em um valor desejado.
- ✓ Reflexo responsável pelo tônus muscular (nível constante de tensão no músculo).

## Movimentos Reflexos Motores: Arco reflexo

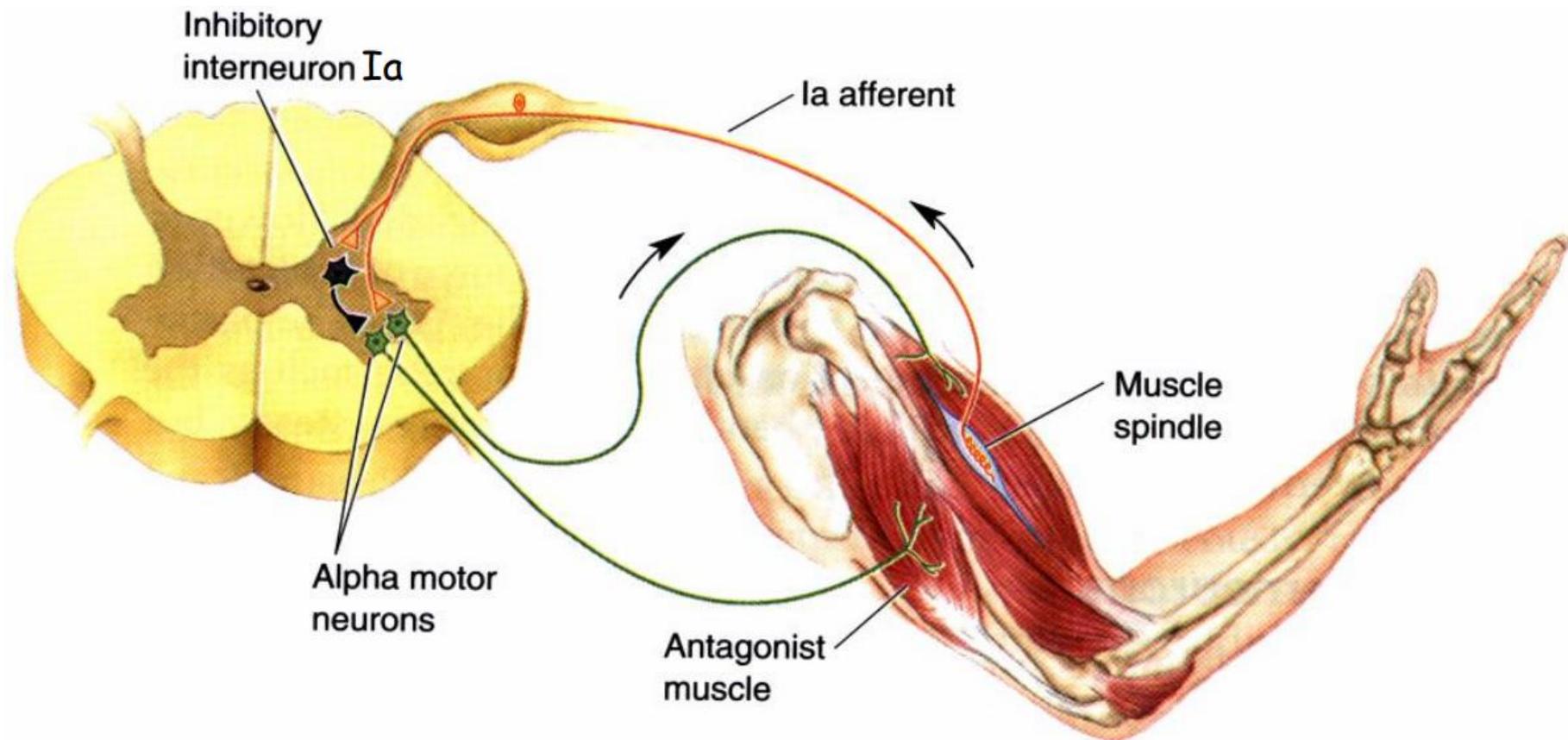


© 2011 Pearson Education, Inc.



- ✓ Órgão Tendinoso de Golgi
- ✓ Sistema de retroalimentação negativa que regula a tensão muscular (monitora e mantém a força muscular);
- ✓ O arco reflexo do órgão tendinoso de golgi diminui a ativação do músculo quando forças excepcionalmente grandes são geradas.

## Movimentos Reflexos Motores: inervação recíproca

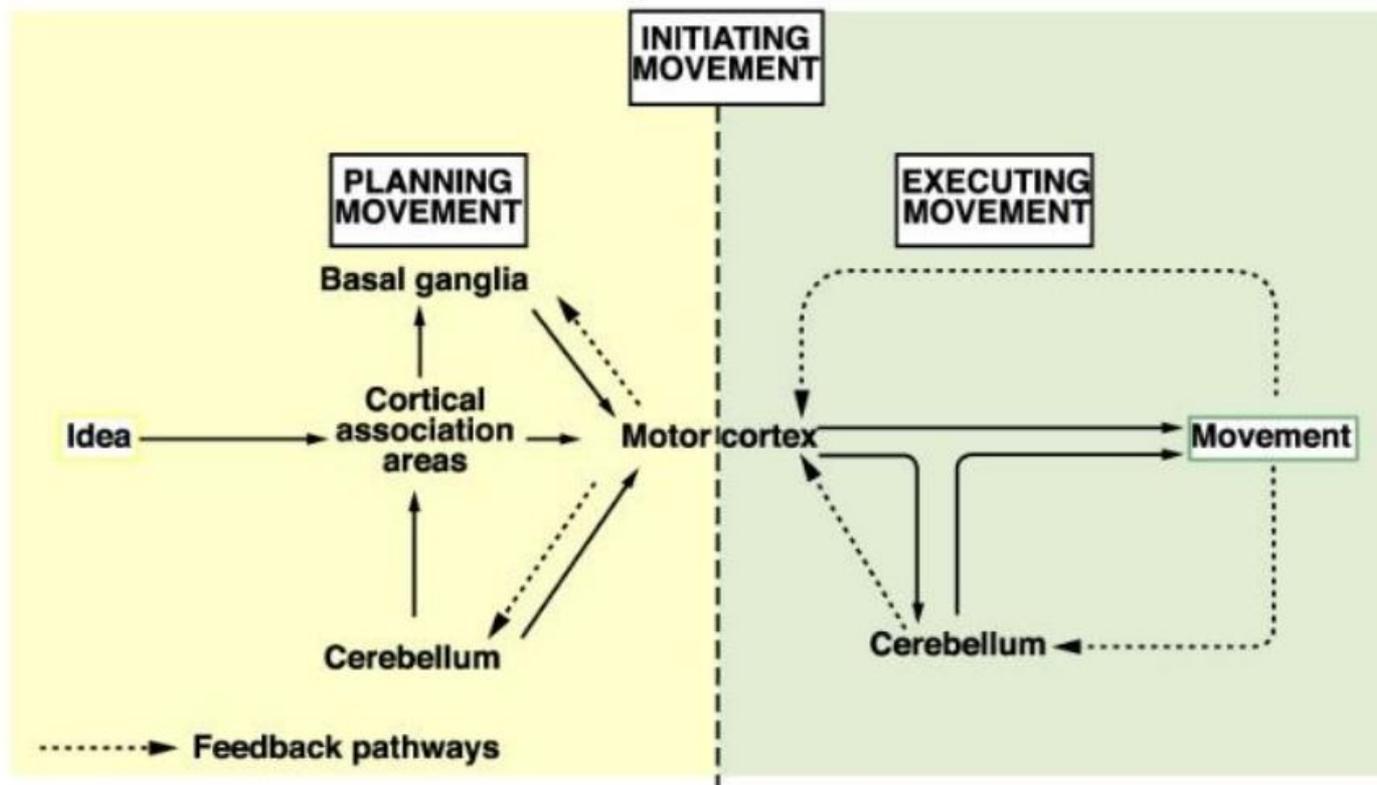


Ia interneurônio inibitório: inibição recíproca do músculo antagonista (no reflexo monossináptico).

Reflexo de estiramento: Envolve conexões monossinápticas com o motoneurônio alfa e interneurônios de circuitos locais que inibem o motoneurônio que inerva o músculo antagonista

## Movimentos voluntários

- a) intenção
- b) motivação (regiões frontais do córtex )
- c) programação (gânglios da base)
- d) comando motor (córtex motor)
- e) ajustes posturais (cerebelo e sistema vestibular)

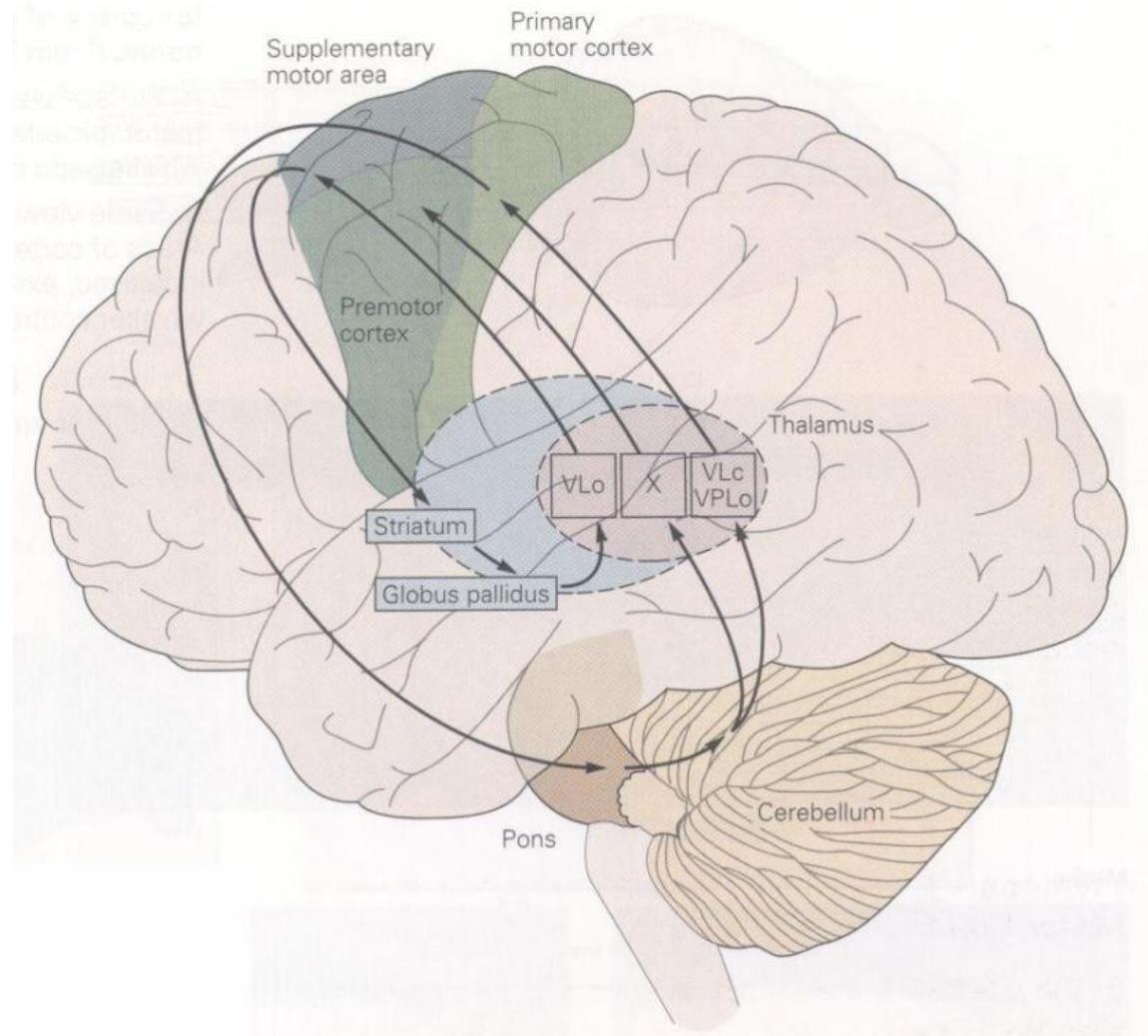


Movimentos voluntários tendem a seguir certas “leis”, três delas são:

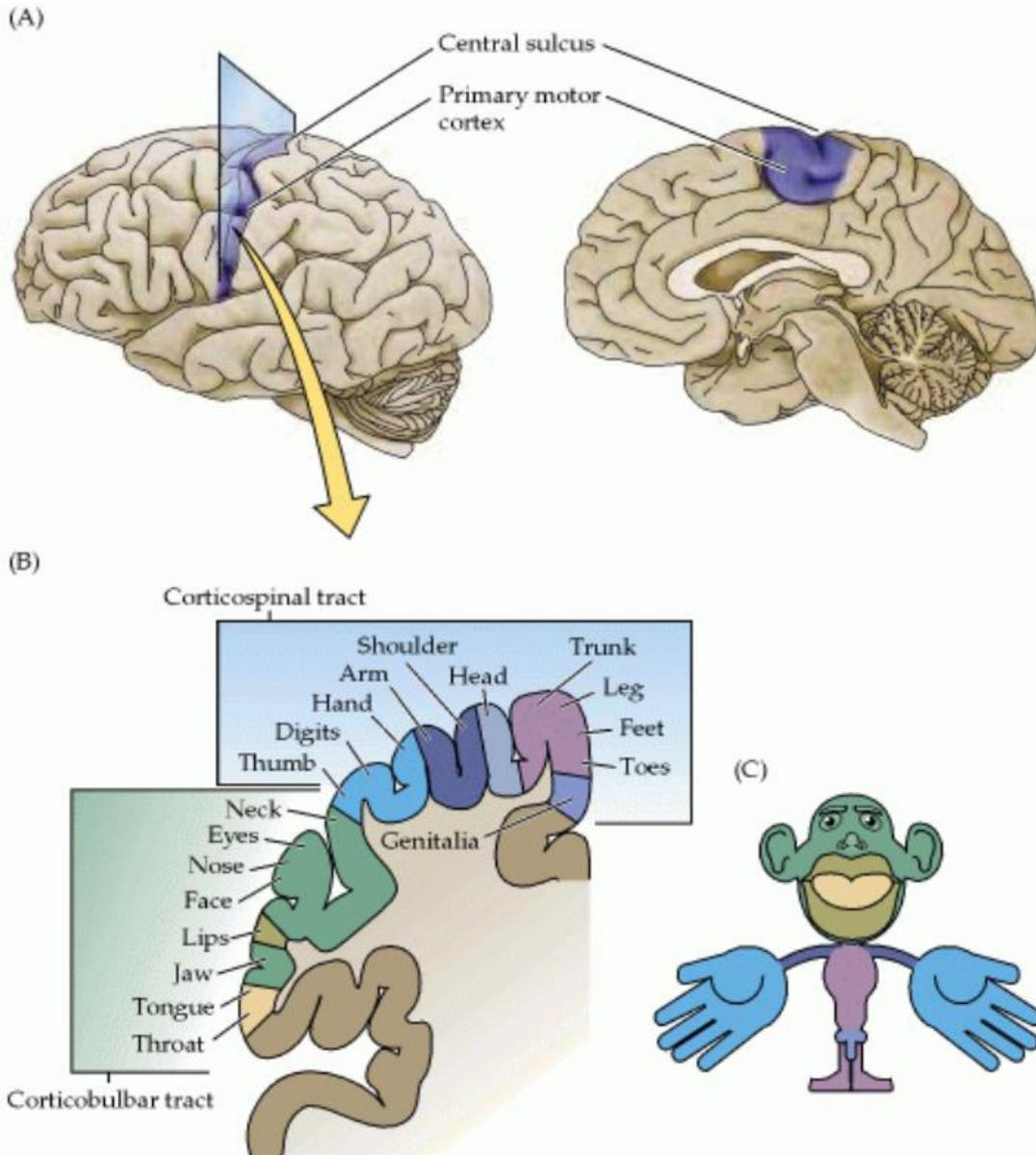
1. O encéfalo faz a representação dos atos motores.
2. O tempo gasto para responder a um estímulo depende da quantidade de informação que precisa ser processada para executar a tarefa.
3. Há uma relação de troca entre velocidade do movimento e sua precisão.

## Função

- ✓ Modula a ação dos neurônios motores do tronco e da medula espinhal;
- ✓ Movimentos complexos e precisos.



# Centros superiores: córtex cerebral



## Mapa topográfico da musculatura corporal do córtex motor primário

Musculatura usada em tarefas que requerem controle motor fino, ocupa uma área de representatividade maior no mapa.

## Planejamento Motor

A informação sensitiva influencia o planejamento e a execução do movimento.

O córtex parieto-têmporo-occipital recebe projeções de áreas somáticas superiores visuais e auditivas, processando a informação sensitiva envolvida com a percepção e a linguagem.

O córtex límbico recebe projeções de áreas sensitivas superiores e projeta para outras regiões corticais, dentre elas o córtex pré-frontal. A informação emocional afeta o planejamento e a execução do movimento.

## Movimentos oculares

- ✓ Reflexo vestibulo-ocular: compensa movimentos da cabeça;
- ✓ Movimentos optocinéticos: resposta ao deslocamento de imagens;
- ✓ Movimentos sacádicos: rápidos ( $900^\circ/s$ ) e precisos.

## Regulação do tônus e postura

- ✓ Reações tônicas: manter o corpo na vertical;
- ✓ Reação saltatória: resposta a uma perturbação lateral;
- ✓ Reações de posicionamento: resposta a um tropeço.

São um conjunto de núcleos celulares com diferentes estruturas e atividades que atuam como uma unidade funcional.

- ✓ Situados profundamente no telencéfalo;
- ✓ Ação sobre o córtex por meio do tálamo;
- ✓ Não recebem aferências da medula espinhal.

A maior parte da atividade neuronal dos Núcleos da Base ocorre antes do início de qualquer movimento.

### **Função**

- ✓ Muito importantes no papel da coordenação dos movimentos.
- ✓ Desempenham um papel importante no início dos movimentos gerados internamente.
- ✓ Podem contribuir para a cognição.

Lesões nos Núcleos da Base causam distúrbios de início ou término do ato motor.

### Parkinson

- ✓ Distúrbio hipocinético
- ✓ Acinesia: dificuldade em iniciar o movimento
- ✓ Redução da amplitude
- ✓ Bradicinesia: lentificação do movimento
- ✓ Tremor de repouso
- ✓ Face inexpressiva

### Huntington

- ✓ Distúrbio hiperkinético
- ✓ Discinesia: atividade motora excessiva e involuntária
- ✓ Hipotonia: redução do tônus

### Função

- ✓ Coordenação da atividade motora;
- ✓ Regulação do tônus muscular;
- ✓ Movimentos automáticos e balanço;
- ✓ Mecanismos que influenciam e mantêm o equilíbrio por longos períodos de tempo.
- ✓ A função do cerebelo é modificada pela experiência: papel importante no aprendizado de tarefas motoras.

## Centros superiores: Cerebelo

Lesões cerebelares desorganizam a coordenação motora dos membros, dos movimentos oculares e do balanço do corpo.

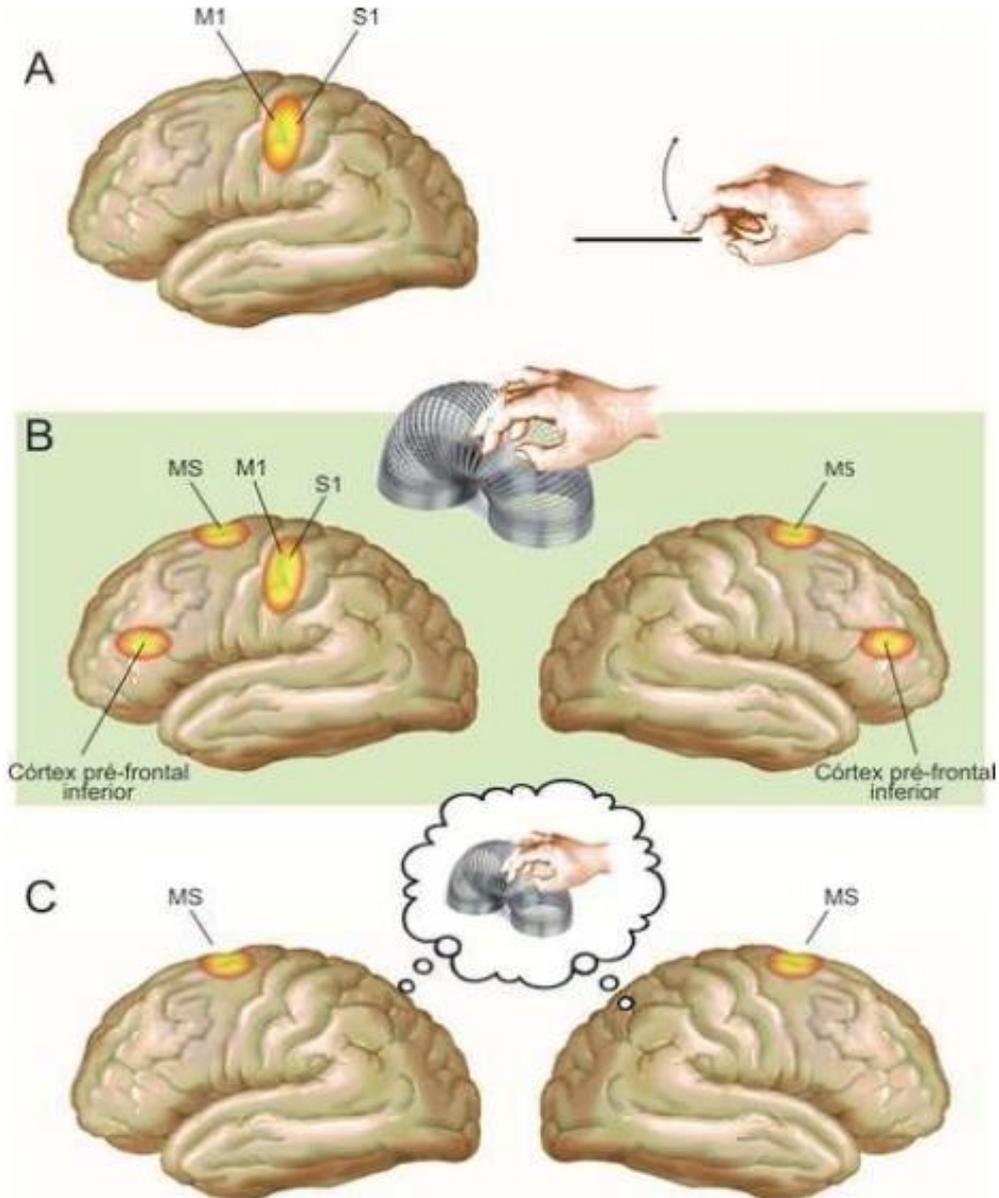
- ✓ Os distúrbios cerebelares são ipsilaterais à lesão.
- ✓ Nas lesões cerebelares ocorre tremor de ação.

## Ativação cortical em função do tipo de ação

A. Movimentos simples

B. Sequenciais

C. Imaginação



## Ativação cortical no planejamento da ação

A. Em processo de aprendizagem

B. Aprendido

