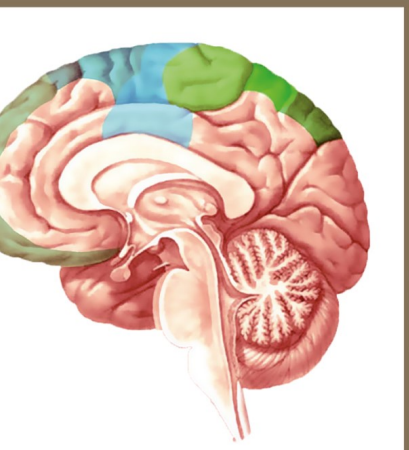








Fisioterapia Neurofuncional

Teoria, Prática e Serviços de Saúde

Márcia Radanovic
Sheila de Melo Borges

Atheneu

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Fisioterapia Neurofuncional

Teoria, Prática e Serviços de Saúde

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS


SAL
SERVIÇO DE ATENDIMENTO AO LEITOR
Tel.: 08000267753
www.atheneu.com.br
(21) 99165-6798 Facebook.com/editoraatheneu Twitter.com/editoraatheneu Youtube.com/atheneueditora

Fisioterapia Neurofuncional

Teoria, Prática e Serviços de Saúde

Editoras

Márcia Radanovic
Sheila de Melo Borges

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Atheneu
Rio de Janeiro • São Paulo
2025

EDITORA ATHENEU

São Paulo	—	Rua Maria Paula, 123 – 13° andar Conjuntos 133 e 134 Tel.: (11) 2858-8750 E-mail: atheneu@atheneu.com.br
Rio de Janeiro	—	Rua Bambina, 74 Tel.: (21) 3094-1295 E-mail: atheneu@atheneu.com.br

CAPA: Márcio Alexandre Paranhos de Oliveira
PRODUÇÃO EDITORIAL: MWS Design

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

F565

Fisioterapia neurofuncional : teoria, prática e serviços de saúde / editoras Márcia Radanovic, Sheila de Melo Borges. - 1. ed. - Rio de Janeiro : Atheneu, 2025.
24 cm.

Inclui bibliografia e índice
ISBN 978-65-5586-845-6

1. Sistema nervoso - Doenças - Fisioterapia. 2. Sistema nervoso - Doenças - Pacientes - Reabilitação. I. Radanovic, Márcia. II. Borges, Sheila de Melo.

CDD: 616.80462
24-93706 CDU: 616.8:615.8

Meri Gleice Rodrigues de Souza - Bibliotecária - CRB-7/6439

29/08/2024 03/09/2024

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Radanovic M, Borges SM.
Fisioterapia Neurofuncional: Teoria, Prática e Serviços de Saúde

©Direitos reservados à EDITORA ATHENEU – Rio de Janeiro, São Paulo, 2025.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

SEÇÃO 1

Bases Conceituais em Fisioterapia Neurológica

Capítulo 1

Sistema Motor: Anatomia, Fisiologia e Controle do Movimento Voluntário

Márcia Radanovic
Eliane Mayumi Kato-Narita

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Introdução

Os elementos diferenciais entre o ser humano e os demais animais não são apenas as funções cognitivas superiores, como a capacidade de raciocínio, de julgamento e de linguagem. O ser humano é capaz de interagir com o meio em que vive através de ações mais complexas, tanto positivas quanto negativas. Todas as ações motoras permitem que o ser humano se movimente, aja e reaja de acordo com o meio. Para tanto, conta com um complexo sistema, em que vários centros interpretam as percepções do ambiente, comparam-nas com experiências prévias e elaboram uma ou mais respostas motoras. Durante todos os movimentos que realizamos, as informações sensoriomotoras atuam continuamente, realizando modificações e adaptações do sistema musculoesquelético através de uma alça de retroalimentação. Para a realização do ato motor, dependemos da integridade do sistema efetor, que neste caso são as partes do corpo que se movimentam, do SNC sem lesões e de uma eficiente rede de conexões entre estes sistemas, como será exposto neste capítulo.

Anatomia dos componentes motores

Nosso organismo possui dois tipos de músculos: *estriados* e *lisos*. Os músculos estriados, cujo nome provém do fato de possuírem estriações em suas fibras, são divididos em *esqueléticos* e *cardíaco (miocárdio)*. O miocárdio e os músculos lisos das paredes das vísceras (estômago, intestino, bexiga, útero etc.) e vasos sanguíneos são controlados primariamente pelo Sistema

Nervoso Autônomo (SNA). Os músculos esqueléticos são os efetores da nossa movimentação voluntária.

Todo movimento depende de que um músculo produza força suficiente para movimentar uma articulação e, assim, mover uma parte do corpo. Os músculos são compostos por fibras musculares (miócitos), que têm características elásticas, sendo capazes de se contrair e se tensionar. Essas fibras estão dispostas paralelamente e se estendem por todo o comprimento do músculo. Cada fibra muscular é composta por várias miofibrilas, também dispostas paralelamente, por sua vez formadas por milhares de pequenos miofilamentos moleculares de proteína (troponina, tropomiosina, actina e miosina), que se alternam e se sobrepõem ao longo da miofibrila (Figura 1.1). A troponina, juntamente com a tropomiosina e a actina, são as proteínas componentes dos *filamentos finos*; a miosina é o componente principal dos *filamentos grossos* da miofibrila. A distância entre os pontos médios de filamentos de actina adjacentes é chamada de *sarcômero*, e é considerada a unidade contrátil básica do miócito. Cada sarcômero é limitado pelas linhas Z, onde os filamentos finos se ancoram. Os sarcômeros estão dispostos em série e diminuem de comprimento quando há contração muscular.

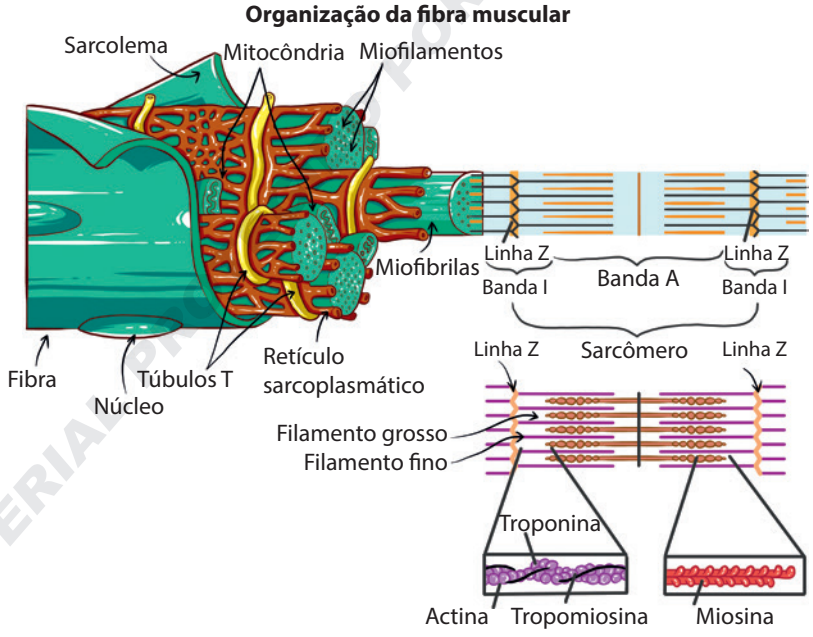


Figura 1.1. Fibra muscular e subcomponentes: proteínas presentes em uma miofibrila são divididas em filamentos finos (actina, troponina e tropomiosina entrelaçadas) e filamentos grossos (miosina). Os filamentos de miosina formam bandas mais escuras (banda A), e os de actina, bandas mais claras (banda I). No centro de cada banda I, aparece uma linha mais escura, denominada linha Z. O intervalo entre duas linhas Z consecutivas constitui um sarcômero. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

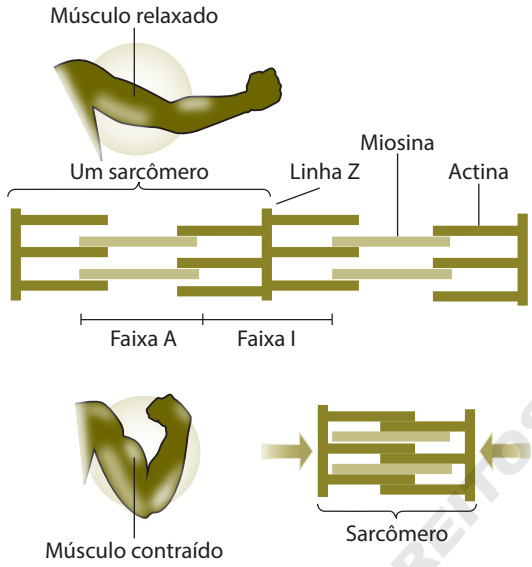


Figura 1.2. Alterações do sarcômero durante o relaxamento e contração muscular. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

Cada miócito é recoberto por uma membrana plasmática, o *sarcolema*, que emite projeções para dentro do músculo. Essas projeções formam os túbulos transversos (ou *túbulos T*), por onde se propaga a despolarização da membrana e ocorre o transporte de íons. Ao lado destes túbulos T encontram-se os *retículos sarcoplasmáticos*, que contêm íons Ca^{2+}. Com a chegada de um potencial de ação provindo de uma terminação nervosa, ocorre a despolarização dos túbulos T e a consequente liberação de íons Ca^{2+} de dentro dos retículos sarcoplasmáticos, que se ligam à troponina. Essa ligação dos íons Ca^{2+} com a troponina leva a uma alteração de sua conformação e, devido ao entrelaçamento das proteínas, há um movimento da tropomiosina e a exposição de uma parte da actina que, no repouso, não se encontra exposta. A actina ativada atrai miosina, que se liga a ela. A parte da miosina que se liga à actina é chamada de *ponte cruzada*. Essa ligação é forte o suficiente para provocar o deslizamento da actina sobre a miosina, um processo dependente de energia fornecida pelo ATP*. O ATP para esse processo é gerado pelas mitocôndrias presentes entre as miofibrilas (Figura 1.2).

As fibras musculares convergem nas suas extremidades e se inserem no osso através dos *tendões*, estruturas resistentes, porém flexíveis, formadas

*ATP (Adenosina TriFosfato): forma de armazenamento de energia utilizada em vários processos biológicos. A energia fica armazenada nas ligações entre os átomos que compõem a molécula de ATP e é liberada sob a ação de enzimas, juntamente com íons fosfato.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

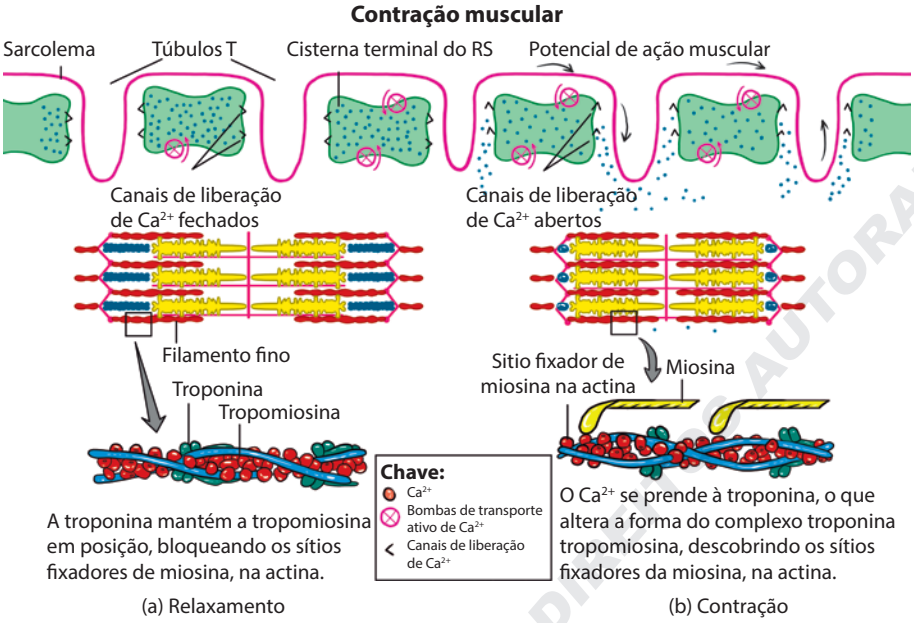


Figura 1.3. Mecanismo da contração muscular. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

por sarcolema (na transição músculo-tendão), colágeno, fibroblastos e fibrócitos. Durante a contração muscular, as duas extremidades do músculo se aproximam e geram o movimento da articulação (Figura 1.3).

Geralmente os músculos se organizam em pares antagônicos e provocam movimentos opostos, como os músculos bíceps e tríceps do braço. Quando o primeiro se contrai e o segundo está relaxado, ocorre o movimento de flexão do cotovelo. Quando o oposto ocorre, tem-se a extensão do cotovelo.

Características da contração muscular

A contração muscular pode ser classificada em *isométrica* ou *isotônica* (Figura 1.4). A contração isométrica se refere à contração de um músculo sem que haja a redução de seu comprimento (p. ex., sustentar uma caixa pesada com os braços sem que ela se mova, em que os flexores do cotovelo realizam contração isométrica). É o tipo de contração dos músculos *posturais** durante a manutenção da postura em pé, com o indivíduo parado. Eles se contraem a fim de evitar a flexão das articulações, mas não diminuem de comprimento.

*Músculos posturais: que agem contra a gravidade, como os extensores de joelhos, de quadril e de tronco.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

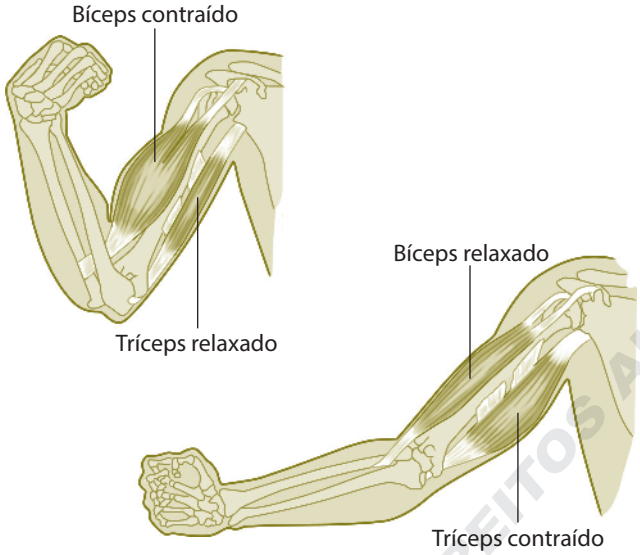


Figura 1.4. Representação esquemática dos principais músculos que realizam a flexão (bíceps) e extensão (tríceps) do cotovelo. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

A contração isotônica é a que leva à mudança do comprimento das fibras musculares, podendo ser classificada em *concêntrica* e *excêntrica*. Usando o exemplo anterior, caso a pessoa realize uma contração contra a gravidade para erguer o objeto, a contração é chamada de *concêntrica*, pois ocorre no mesmo sentido do encurtamento muscular. Caso a pessoa se canse e queira abaixar um pouco a altura em que está sustentando o objeto, ela estará realizando uma contração de desaceleração, em que há aumento do comprimento muscular (extensão dos músculos flexores do cotovelo, mas não total, para que o objeto não caia). Esta é a contração *excêntrica*, em que há mudança de comprimento muscular durante a contração, porém com a força sendo exercida no sentido oposto ao da ação principal do músculo (Figura 1.5).

Os movimentos são decorrentes de uma conjugação de contrações musculares; raramente utilizamos apenas um músculo para realizar qualquer atividade do nosso cotidiano. Geralmente, os movimentos são decorrentes de associações de grupos musculares atuando em sinergia, não apenas em um eixo, mas principalmente nos planos rotacionais (Figura 1.6).

A *força* é a resultante da soma das contrações das fibras musculares de um mesmo músculo. Quando necessitamos de pouca força muscular, principalmente durante a realização de movimentos mais finos, como escrever, recrutamos poucas fibras musculares, em geral as mais rapidamente excitáveis

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

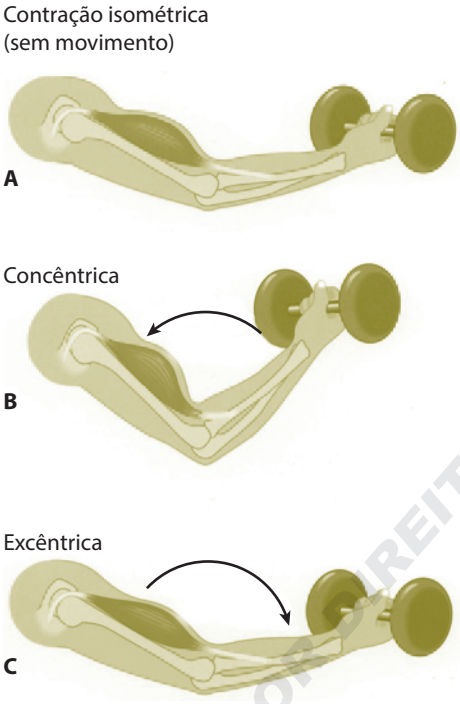


Figura 1.5. Tipos de contração muscular. Em (**A**) não há variação de comprimento do músculo durante a sustentação do peso; em (**B**) há diminuição; e em (**C**) há aumento do comprimento muscular. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

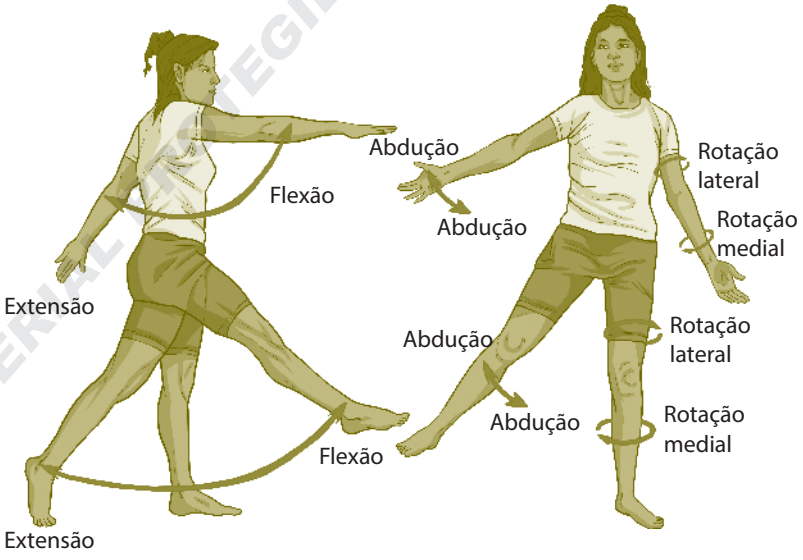


Figura 1.6. Planos rotacionais musculares de acordo com os eixos sagital (flexão e extensão), coronal (adução e abdução) e transversal (rotação interna e externa). Fonte: Desenvolvida pela autoria.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

e mais resistentes à fadiga (menores unidades motoras). Ao ser necessária maior força, mais unidades motoras passam a ser recrutadas. A força de contração muscular depende do comprimento inicial do músculo. Podemos associar um músculo a um elástico, já que apresenta as mesmas propriedades de distensão. Caso ele esteja encurtado ou muito distendido, não conseguirá exercer o máximo de força que poderia desenvolver.

Além do comprimento inicial, a força de contração depende das inserções e do tamanho de cada músculo. Ambas as características determinarão a amplitude máxima de contração, que é proporcional à força resultante, e a alavanca para o movimento. Quanto mais distante estiver a inserção do eixo de movimento (fulcro), mais força a respectiva articulação conseguirá exercer, ou menor esforço terá que exercer para vencer uma resistência.

Controle neural do movimento

A contração muscular pode ocorrer de forma *voluntária* ou *reflexa*. A contração voluntária ocorre quando o sinal neural se origina em vias hierarquicamente superiores do Sistema Nervoso Central (SNC), sendo conscientemente elaborada: quando temos intenção, motivação e objetivo definidos ao realizar uma ação. A contração reflexa independe do controle voluntário e é extremamente rápida, pois seu sinal neural se origina na medula espinal, através de um arco reflexo composto pela via aferente, que traz a informação sensorial e pela via efetora (motora), como quando retiramos a mão de uma superfície quente antes mesmo de perceber a sensação de calor e dor.

Noventa e oito por cento das fibras musculares recebem apenas uma terminação nervosa. No entanto, uma mesma terminação pode inervar várias fibras musculares, e um potencial de ação transmitido por este neurônio motor levará à contração de todas as fibras inervadas por ele. A este conjunto formado por um neurônio motor e as fibras musculares por ele inervadas, Sherrington deu o nome de *unidade motora*, que é a menor unidade funcional dos sistemas motores (Figura 1.7).

A junção do neurônio motor com a fibra muscular recebe o nome de *placa motora* (Figura 1.8). Quando o impulso nervoso chega a esta junção, o potencial de ação faz com que ocorra a ruptura de pequenas vesículas do terminal axonal, as quais contêm acetilcolina, que é então liberada sobre a membrana das fibras musculares. Este neurotransmissor atua aumentando a permeabilidade aos íons sódio (Na^+) e permitindo a entrada deste íon na célula muscular, o que leva à despolarização da membrana e formação de um potencial de ação.

Este potencial de ação se propaga ao longo da fibra muscular, desencadeando a resposta de contração do músculo quando atinge as miofibrilas.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

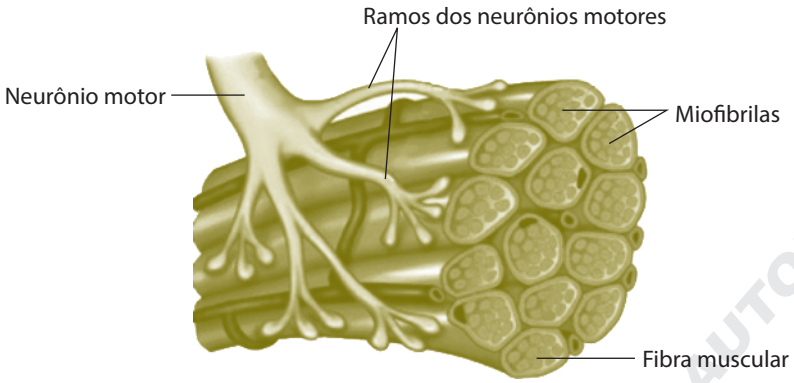


Figura 1.7. Representação de uma unidade motora, com o neurônio motor e suas terminações inervando diversas fibras musculares, mas cada uma destas sendo inervada por apenas uma terminação. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

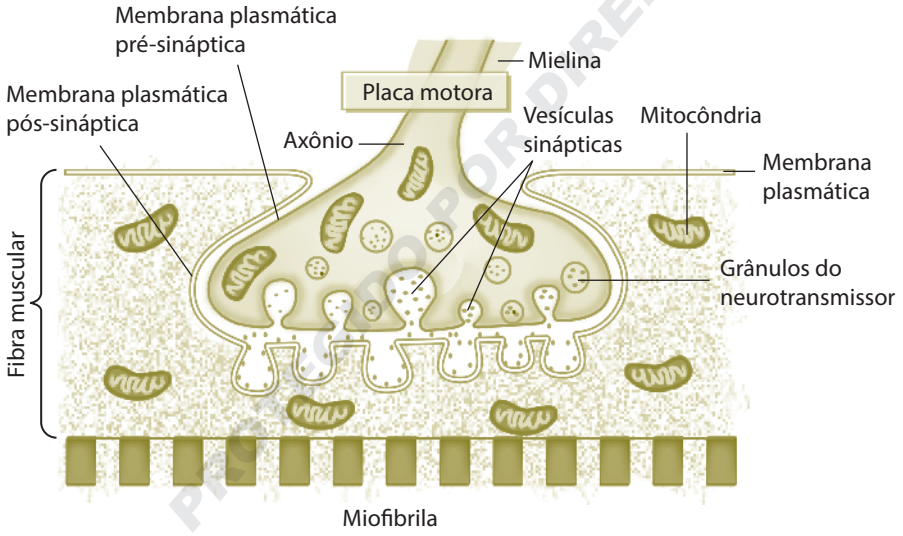


Figura 1.8. Placa motora: junção entre o neurônio motor e a fibra muscular. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

A contração muscular persiste enquanto há cálcio nas miofibrilas. Na ausência de despolarização, os íons Ca^{2+} são bombeados de volta aos retículos sarcoplasmáticos. Este mecanismo garante que haja cálcio disponível apenas na presença do estímulo. Caso novos potenciais de ação cheguem ao músculo, o cálcio passará a ser liberado novamente pelo retículo sarcoplasmático.

Os neurônios que inervam a musculatura esquelética são os *motoneurônios do tipo alfa*. Seu corpo neuronal encontra-se na substância cinzenta da medula

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

espinal. Na substância branca da medula encontram-se os feixes ascendentes e descendentes, que levam e trazem informações *para* e *do* encéfalo. Quando este neurônio se conecta apenas a um neurônio sensorial de uma fibra aferente, produz uma resposta rápida e automática, constituindo a *resposta motora reflexa*. Isso ocorre porque o corpo neuronal não recebe aferências de outros interneurônios originados de feixes descendentes provenientes de outras áreas do SNC. Podemos citar como exemplo o estiramento rápido de um músculo, como quando percutimos o tendão patelar ou fazemos cócegas em uma pessoa. Ambos os estímulos desencadeiam como resposta a contração muscular rápida e inconsciente do músculo estimulado (Figura 1.9).

Neste circuito reflexo, as aferências podem ter origens musculares ou sensoriais provenientes de qualquer região do corpo e chegam à medula espinal através do seu corno dorsal. Na medula, o neurônio sensorial faz conexão com o motoneurônio alfa, cuja fibra parte pela raiz ventral da medula e termina nas fibras musculares, desencadeando uma contração muscular rápida e inconsciente. O reflexo muscular é um sinal importante que serve para verificar a integridade das conexões nervosas, tanto as sensoriais como motoras, que existem entre o músculo e a medula espinal.

O reflexo medular pode, no entanto, ser inibido ou quase suprimido por mecanismos supraespinais relacionados à atenção, com o objetivo de evitar uma resposta reflexa inadequada.

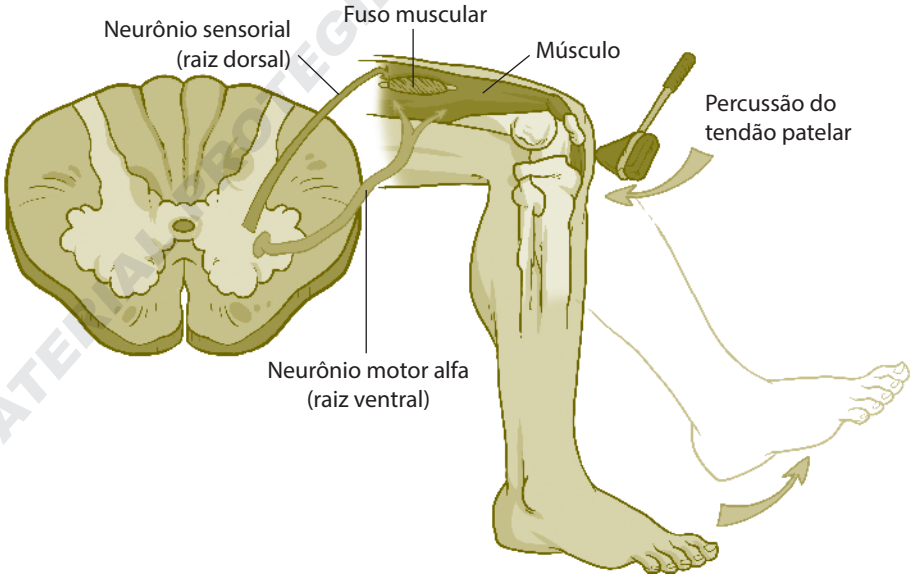


Figura 1.9. Arco reflexo patelar. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Organização das áreas motoras

Os centros motores que determinam o planejamento, a correção e a execução dos movimentos estão localizados em várias regiões do encéfalo, incluindo o córtex pré-frontal, córtex motor primário, córtex pré-motor, área motora suplementar, córtex parietal, córtex cingulado, cerebelo, núcleos da base, núcleos talâmicos, núcleos do tronco encefálico e também da medula espinal. Esses sistemas motores são muito bem organizados para produzir movimentos precisos, bem controlados, e que não despendem energia desnecessariamente. O planejamento e a execução dos movimentos dependem de redes neurais distribuídas nessas estruturas, que atuam de maneira hierárquica e organizada, influenciadas pela experiências individual, integridade das redes neurais, e dependente do tipo e complexidade do movimento a ser executado.

O primeiro princípio clássico dessa organização é que cada estrutura motora contém uma representação somatotópica do corpo, ou seja, partes do corpo são representadas em cada uma delas de acordo com a importância dos músculos efetores para o movimento e o nível de controle necessário para manipular o efetor. Além disso, os sistemas motores têm acesso contínuo a informações sensoriais sobre o meio ambiente, a posição e orientação de todas as partes do corpo, e o grau de contração dos músculos. Essas informações são essenciais para a seleção de uma resposta adequada e para ajustes durante o movimento.

O segundo princípio clássico dessa organização é a existência de uma hierarquia entre as estruturas, distribuídas em três níveis: a medula espinal, o tronco encefálico e as áreas motoras do córtex cerebral. no entanto, essa hierarquia não é estática, pois as diversas vias se conectam paralelamente e de forma bidirecional entre essas regiões. Além disso, há aferências sensoriais em todos os níveis, que fornecem informações através de alças de retroalimentação.

Medula espinal

O nível hierárquico mais inferior é o da medula espinal, responsável por uma grande variedade de padrões motores reflexos, mesmo na ausência de influência dos centros superiores. A medula participa também de padrões motores rítmicos, que combinam atos motores reflexos e voluntários, como a marcha. O início e o fim da atividade são controlados voluntariamente, porém o movimento repetitivo e relativamente estereotipado é mediado automaticamente por este sistema. Na medula espinal, os corpos dos motoneurônios localizam-se na região ventral da substância cinzenta, nos cornos anteriores (Figura 1.10). Os neurônios que inervam músculos individuais ficam agrupados em núcleos motores, dispostos longitudinalmente ao longo de um a quatro níveis medulares. Estes se agrupam de acordo com duas regras anatômicas e funcionais: a regra proximal-distal e a regra flexor-extensor. Segundo a primeira

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

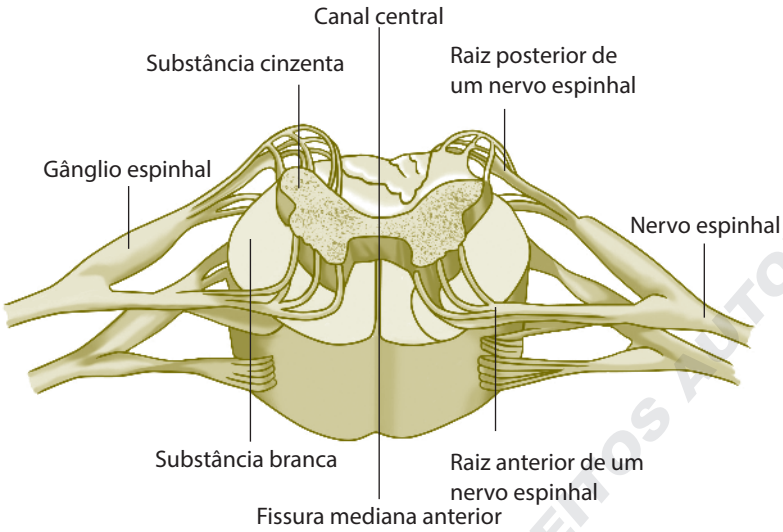


Figura 1.10. Corte transversal da medula. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

regra, os neurônios dos músculos mais proximais, isto é, os axiais, ficam localizados mais medialmente na medula, enquanto os que inervam os músculos mais distais localizam-se mais lateralmente. De acordo com a segunda regra, os neurônios que se localizam mais ventralmente são os que inervam os músculos extensores, e os mais dorsalmente inervam os músculos flexores. Esta distinção reflete a função destes grupos musculares, já que os músculos axiais e alguns extensores estão relacionados à manutenção da postura e do equilíbrio, enquanto os músculos dos membros se relacionam à interação com o meio através de atividades manipulatórias finas, sendo geralmente flexores.

A medula espinal possui os neurônios *Geradores Centrais de Padrão* (GCP), capazes de produzir atividade locomotora rítmica coordenada na ausência de qualquer ritmo externo ou estímulos sensoriais. No entanto, esses neurônios não conseguem gerar todos os movimentos responsáveis pela marcha, mas estão relacionados aos ajustes posturais que evitam o desequilíbrio durante o deslocamento.

Tronco encefálico

O segundo nível da hierarquia motora é representado pelo tronco encefálico, composto pelo mesencéfalo, pela ponte e pelo bulbo (Figura 1.11). Esta estrutura conecta-se à medula espinal por meio de vias mediais e laterais.

As primeiras estão relacionadas ao controle da postura e são compostas por três componentes: trato vestibuloespinal, reticuloespinal e tectoespinal. Essas vias seguem o trajeto pela medula através das colunas ventrais ipsilaterais, terminando nos neurônios motores mediais e interneurônios da zona intermédia

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

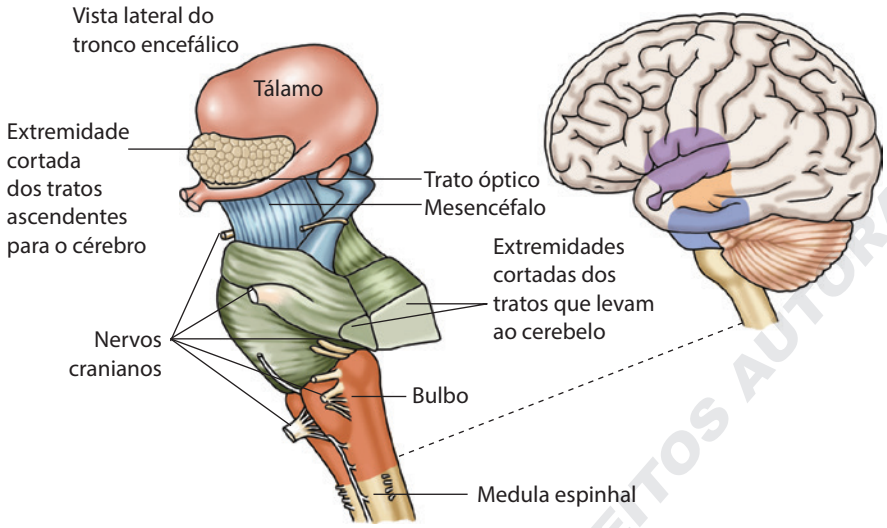


Figura 1.11. Tronco encefálico, composto pelo mesencéfalo, pela ponte e pelo bulbo. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

que inervam os músculos axiais e proximais. Desta forma, são responsáveis pela manutenção da postura e do equilíbrio. A via lateral origina-se no mesencéfalo e forma o trato rubroespinal. Estas fibras descem pelo bulbo até a parte dorsal da coluna lateral da medula espinal e terminam no grupo dorsolateral de neurônios que inervam os músculos distais dos membros, regulando os movimentos mais finos e precisos dos dedos (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Tratos originados no tronco encefálico e suas funções

Trato	Origem	Função
Vestibuloespinal lateral	Núcleos vestibulares da ponte	Conduz informação dos labirintos para o controle da postura e do equilíbrio de forma reflexa; exerce influência excitatória sobre os motorneurônios dos músculos extensores
Vestibuloespinal medial	Núcleos vestibulares do bulbo e da ponte	Conduz informação dos labirintos para o controle da postura e do equilíbrio de forma reflexa; exerce influência excitatória e inibitória sobre os motorneurônios cervicais dos músculos extensores e flexores do pescoço
Reticuloespinal	Núcleos na formação reticular da ponte e do bulbo	Mantém a postura e integra informações de várias regiões, incluindo os núcleos vestibulares e o córtex
Tectoespinal	Colículo superior do mesencéfalo	Coordena os movimentos da cabeça e dos olhos, sendo controlado pelo córtex cerebral
Rubroespinal	Porção magnocelular do núcleo rubro	Movimentação mais fina e precisa dos membros, possibilitando a manipulação de objetos

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Córtex cerebral

O terceiro nível da organização hierárquica é representado pelo córtex cerebral. O controle sobre os neurônios motores ocorre através de diversas vias, sendo o trato corticoespinal o responsável por atuar diretamente sobre os motoneurônios e interneurônios espinais. Outras vias que se originam no córtex estabelecem conexões indiretas com outras áreas encefálicas, núcleos do tronco encefálico, núcleos da base, cerebelo e núcleos dos nervos cranianos.

As vias que se originam no córtex cerebral ou cerebelar influenciam o movimento contralateralmente, uma vez que a maioria de suas fibras (cerca de 80%) cruzam a linha média na decussação das pirâmides do bulbo. As fibras que cruzam nas pirâmides descem pela parte dorsal das colunas laterais da medula espinal, formando os tratos corticoespinais laterais (anteriormente denominados *tratos piramidais)*. Os restantes 20% descem diretamente pelas colunas ventrais da parte dorsal da medula espinal, formando os tratos corticoespinais ventrais ou anteriores (Figura 1.12).

A maior parte das fibras do trato corticoespinal origina-se no córtex motor primário (área 4 de Brodmann). Outras fibras têm origem no córtex somatossensorial e na área 6 de Brodmann, que inclui o córtex pré-motor e a área motora suplementar (Tabela 1.2).

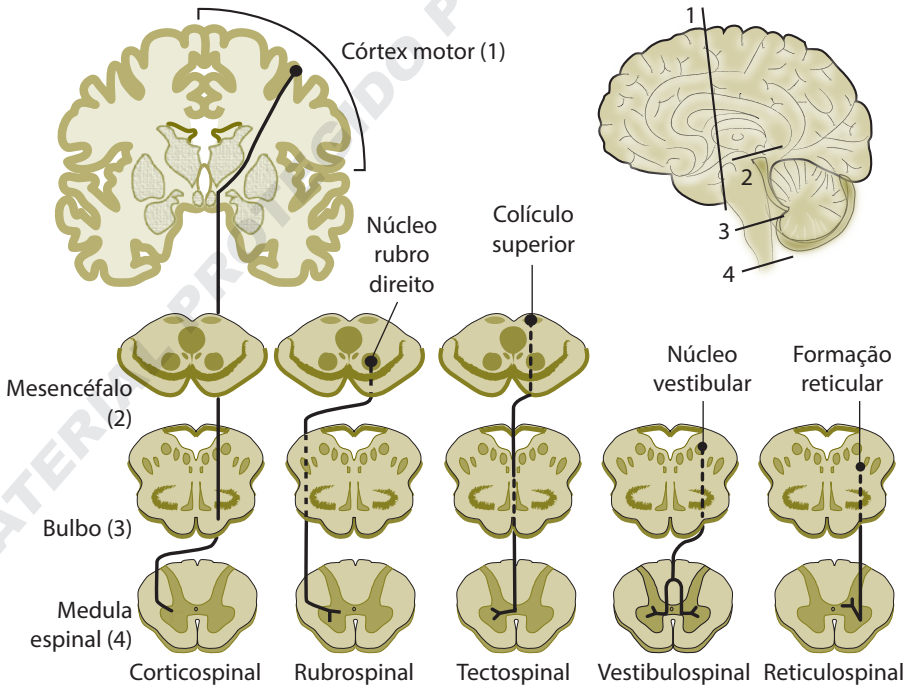


Figura 1.12. Tratos originados no encéfalo e que se dirigem à medula. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Tabela 1.2. Vias descendentes originadas no córtex cerebral, trajeto e função

Sistema	Trato	Trajeto	Função
Descendente lateral	Corticoespinal	Tálamo Mesencéfalo Decussação (pirâmide bulbar) Medula espinal	Controlar movimentos distais do membro
	Corticorubroespinal	Mesencéfalo Decussação (acima da pirâmidade bulbar) Núcleo rubro Medula espinal	
Descendente medial	Corticoreticuloespinal	Formação reticular Medula espinal (ispilateral)	Controle da musculatura axial do corpo
	Vestibuloespinal	Núcleo vestibular Medula espinal (bilateral)	
	Tectoespinal	Colículo superior Medula espinal (contralateral)	

Áreas motoras do córtex

Para que um movimento ocorra, é necessário que ele seja planejado, executado e corrigido de forma integrada. Isso requer que todas as áreas relacionadas ao movimento estejam coordenadas e atuando em sincronia, para evitar discrepâncias na informação ou na execução. O planejamento geral do movimento é principalmente coordenado pelo córtex pré-frontal, enquanto a organização e o planejamento específico são atribuições do córtex pré-motor. A execução direta do movimento se inicia no córtex motor primário.

Córtex motor primário

Também conhecido como M1, o córtex motor primário corresponde à área 4 de Brodmann e localiza-se anteriormente ao sulco central, apresentando uma representação somatotópica dos movimentos de diversas regiões corporais (Figura 1.13). Estudos eletrofisiológicos demonstram a ativação de neurônios nesta região antes mesmo da ocorrência do movimento, indicando sua participação no início e no desencadeamento do movimento. O M1 é recrutado durante o planejamento motor através de estímulos provenientes das áreas pré-motoras, parietais e pré-frontais.

O conhecimento atual indica que os neurônios do córtex motor primário são responsáveis por codificar os parâmetros críticos dos movimentos, como força, direção, amplitude e velocidade. A frequência de disparo desses neurônios no trato corticoespinal determina a intensidade da força muscular

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

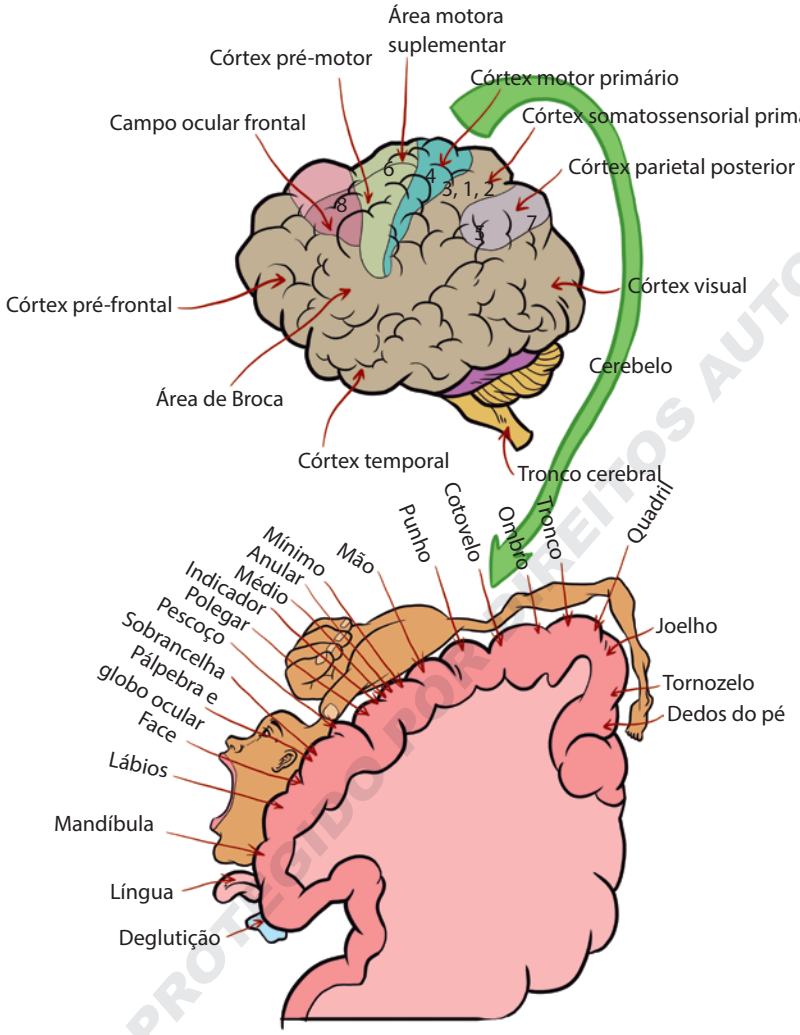


Figura 1.13. Córtex motor e suas subdivisões (observar a continuidade funcional com o córtex sensorial). A numeração corresponde às áreas de Brodmann. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

durante o movimento: quanto maior a frequência de ativação neuronal, maior será a força exercida pelo músculo.

Cada neurônio individual apresenta uma taxa de disparo específica, e a combinação das atividades de todos esses neurônios resulta na força final aplicada no movimento. Similarmente, a direção do movimento é determinada pela soma das atividades dos neurônios que representam a região corporal envolvida. Quando neurônios específicos de uma região são ativados, a frequência de disparo aumenta, contribuindo para a direção do movimento. No entanto, é importante destacar que todos os neurônios na representação

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

cortical da mesma região corporal são ativados durante o movimento, e a direção é determinada pelo *vetor populacional,* ou seja, pela soma vetorial de todas as atividades neuronais.

Os neurônios não operam isoladamente; eles se sobrepõem em termos de ativação, formando um modelo dinâmico. Um mesmo neurônio pode participar de diferentes movimentos do mesmo músculo, alternando sua ativação entre eles. Além disso, a representação cortical não possui limites bem definidos, havendo uma sobreposição espacial para movimentos de regiões corporais adjacentes, como mão, punho, cotovelo e ombro.

Quando um movimento é repetido várias vezes, não necessariamente os mesmos neurônios serão ativados em todas as repetições. Além disso, um neurônio que participou de um movimento de flexão em uma articulação pode participar de um movimento antagonista ou de estabilização em outra ocasião.

Córtex pré-motor e área motora suplementar

O córtex pré-motor (CPM) e a área motora suplementar (AMS), localizados conjuntamente na área 6 de Brodmann, têm o CPM situado lateralmente e a AMS medialmente, ambos anteriormente ao córtex motor primário no lobo frontal (Figura 1.13). A área 6 de Brodmann também inclui a área motora do cíngulo e envia projeções para o córtex motor primário, estruturas subcorticais e medula espinal. Essa região desempenha um papel importante no planejamento e na elaboração de estratégias para a execução de movimentos específicos. Na Tabela 1.3, são apresentadas as principais ações do CPM e da AMS quando estimulados.

Tabela 1.3. Funções do córtex pré-motor e da área motora suplementar

Córtex pré-motor	Área motora suplementar
Movimentos que envolvem várias articulações, como os movimentos naturais de preensão, alcance ou esquiva	Movimentos bilaterais, sugerindo participação na coordenação de movimentos quando os dois lados do corpo estão envolvidos
Relacionado a integração de planos motores aprendidos e movimentos dependentes de informações sensoriais (visual, somestésica ou auditiva)	Relacionada com sequências memorizadas (já aprendidas) de segmentos de movimentos, iniciadas voluntariamente
Componente de uma alça externa de processamento sensoriomotor, juntamente com o córtex parietal posterior e o cerebelo	Componente de uma alça interna de processamento motor, juntamente com os núcleos da base
Papel importante no processo de preparação do movimento	Papel importante na programação de sequências complexas do movimento, inclusive no planejamento mental

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Córtex parietal posterior

O córtex parietal posterior (CPP) é subdividido em duas partes: superior (correspondente às áreas 5 e 7 de Brodmann) e inferior (áreas 39 e 40 de Brodmann). É responsável pela integração de todas as informações sensoriais (visual, auditiva, somatosensorial e vestibular) e representações motoras, tornando a informação única, mas considerada "transmodal", já que resulta de mais de uma modalidade sensorial.

Uma atuação importante dessa região é calcular a posição de objetos em relação a sistemas de referência, como coordenadas que localizam o objeto no ambiente, lado (direito ou esquerdo), distância (próximo ou distante), altura, apoio etc. Outra propriedade do CPP é calcular a localização de objetos ou de partes do corpo em relação ao movimento pretendido.

O CPP apresenta neurônios que se ativam não apenas durante o movimento, mas também antecipadamente, em função da retroalimentação proveniente do córtex pré-motor e do cerebelo. Quanto mais o movimento envolver demandas sensoriais, motoras e cognitivas, mais esta região será ativada. Um exemplo significativo da ativação dessa área ocorre durante a atividade de dirigir veículos, na qual várias modalidades sensoriais devem ser integradas para fornecer informações sobre a posição do próprio carro e de outros na rua, a cor das luzes no semáforo, o limite de velocidade, entre outras, permitindo que o indivíduo dirija de forma segura.

Córtex pré-frontal e córtex cingulado

O córtex pré-frontal (CPF) localiza-se na porção anterior do lobo frontal e pode ser anatomicamente dividido em três regiões: dorsolateral, orbitofrontal e ventromedial. Mantém conexões com o córtex motor primário, CPM (dorsal e ventral), AMS, além dos córtices parietal, temporal e occipital. Também se conecta com o tálamo, núcleos da base, cerebelo, amígdala, hipocampo e núcleos do tronco encefálico.

O CPF desempenha um papel essencial na seleção de sequências de respostas motoras adequadas perante uma atividade nova ou mais complexa. Essa região permite a escolha de estratégias de movimento essenciais para a sobrevivência ou para que o indivíduo consiga se adaptar a mudanças ou situações inusitadas, sem gastar energia desnecessária. O córtex cingulado (CC), que corresponde à área 24 de Brodmann, também está integrado a essa função (Figura 1.14).

Este sistema está intimamente relacionado à memória operacional, possibilitando que informações não relevantes ou distratoras sejam ignoradas, que haja a inibição de respostas inadequadas e o armazenamento, mesmo

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

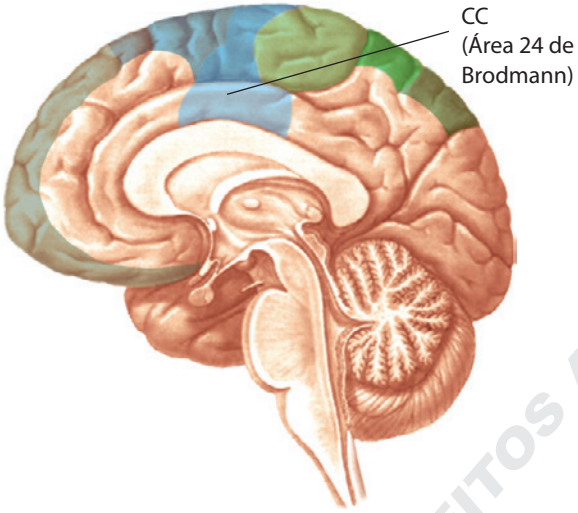


Figura 1.14. Vista medial do cérebro mostrando o córtex cingulado (CC). Fonte: Desenvolvida pela autoria.

que por curto período, de informações realmente relevantes. Na presença de lesão no CPF, a ausência de controle inibitório das funções deste córtex pode levar o indivíduo a se comportar inadequadamente e apresentar respostas motoras impróprias, como desinibição, incapacidade de seguir regras ou de se adaptar a mudanças, perseverando continuamente na mesma resposta comportamental. Alterações do CPF, como as observadas na Degeneração Lobar Frontotemporal, fazem com que o indivíduo tenha alterações de comportamento, dificuldade para inibir certos comportamentos motores, inadequação das respostas motoras e déficit de atenção.

Núcleos da base

Os núcleos da base são estruturas subcorticais que recebem aferências de diversas partes do córtex (sensorial, motor e de associação) e fazem conexões eferentes diretas apenas com o CPF, CPM e córtex motor, através de vias talâmicas. Eles não enviam eferências diretamente à medula espinal. Os núcleos da base são formados por cinco núcleos: núcleo caudado, putâmen, globo pálido, substância negra e núcleo subtalâmico, que são expressivamente interconectados.

O núcleo caudado e o putâmen têm origem filogenética semelhante, sendo constituídos pelo mesmo tipo celular e fundidos na sua porção anterior. Ambos atuam como a "porta de entrada" dos núcleos da base e, juntos, são denominados *corpo estriado*. Recebem fibras originadas em todo o córtex cerebral, incluindo as regiões sensoriais, motoras e associativas.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

O globo pálido é dividido em duas partes: interna e externa. Da mesma forma, a substância negra é composta por duas partes: a parte reticulada (que é a zona pálida) e a parte compacta (que é pigmentada), esta última formada por neurônios dopaminérgicos cujos corpos celulares produzem neuromelanina. A substância negra situa-se no mesencéfalo, próximo ao núcleo subtalâmico, que se localiza logo abaixo do tálamo, na junção com o mesencéfalo. O globo pálido e a parte reticulada da substância negra são considerados a "porta de saída" dos núcleos da base. Os axônios da parte reticulada da SN terminam no colículo superior, influenciando os movimentos oculares. Já os axônios do globo pálido terminam nos núcleos talâmicos, se projetam de volta para várias áreas corticais: o CPF, CPM, AMS e o córtex motor primário. Através dessas conexões, os núcleos de base conseguem interferir em outros sistemas descendentes, influenciando os movimentos do tronco, membros e olhos. A Figura 1.15 mostra de forma resumida as conexões entre os núcleos da base.

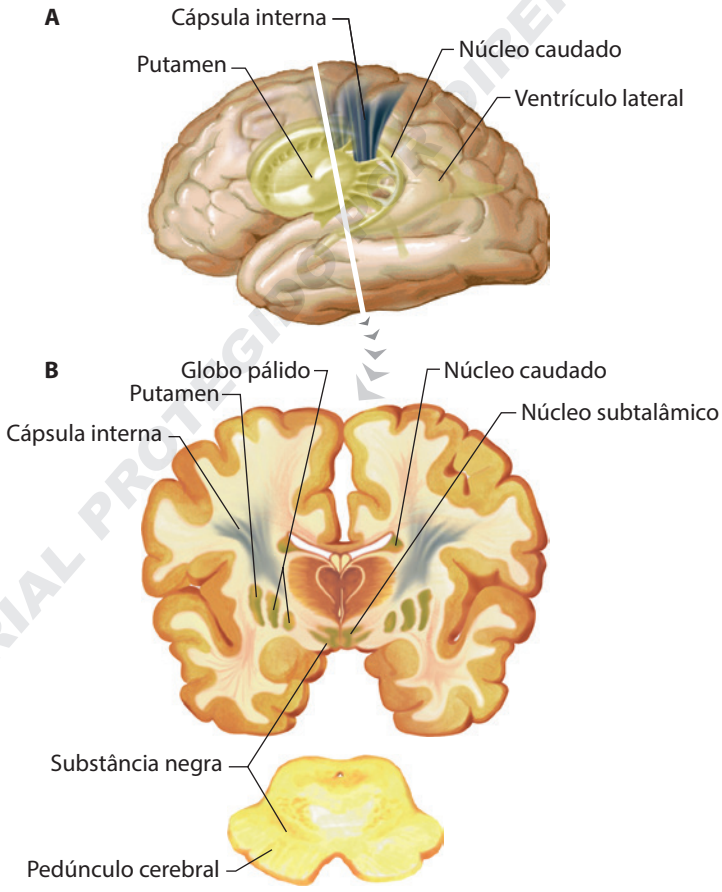


Figura 1.15. Núcleos da base. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Todos esses núcleos encontram-se interligados, interferindo no movimento através de duas vias: a direta, considerada excitatória, e a indireta, inibitória, ambas sob influência do córtex e tálamo. A via direta envolve a parte interna do globo pálido, cujos neurônios estão ativados em condições de "repouso", inibindo intensamente os núcleos talâmicos. Quando o córtex cerebral é ativado, ele estimula o putâmen, que então inibe os neurônios do globo pálido. Como resultado, o globo pálido deixa de inibir os núcleos talâmicos, permitindo que a AMS seja excitada, desencadeando o movimento (Figura 1.16A).

A via indireta é formada pelo circuito originado na parte externa do globo pálido e no núcleo subtalâmico, que recebem fibras do córtex motor via putâmen. Nesta via, a inibição do globo pálido externo pelo putâmen inibe o subtálamo, o que diminui sua estimulação sobre o globo pálido interno, que fica mais "liberado" para inibir o tálamo. Desta forma, o tálamo, estando mais inibido, estimula menos o córtex motor, levando à inibição do movimento (Figura 1.16B).

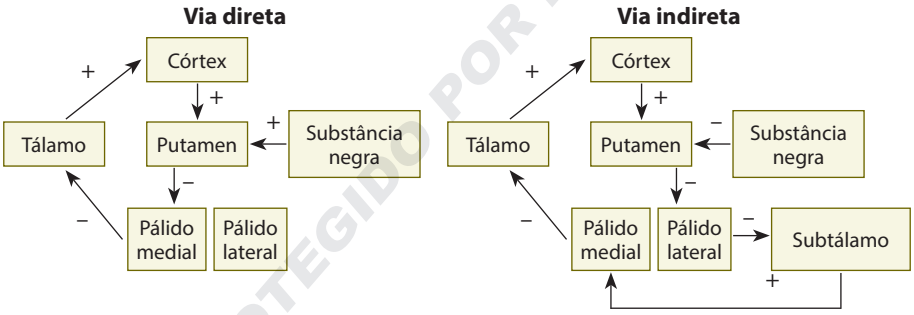


Figura 1.16. (**A**) Via direta dos núcleos da base. (**B**) Via indireta dos núcleos da base.

Outra influência nos núcleos da base é originada dentro dos próprios núcleos, a partir da projeção da parte compacta da substância negra para o corpo estriado. Essa via tem efeito oposto nas vias direta e indireta, resultando em excitação da via direta e inibição da via indireta, ambas atuando sobre receptores dopaminérgicos.

Resumidamente, as vias direta e indireta têm funções opostas. Frente à ativação do estriado pelo córtex, a via direta inibe os núcleos de saída, consequentemente excitando o tálamo e as regiões corticais motoras. Já a via indireta excita os núcleos de saída, inibindo o tálamo e as regiões motoras corticais. A modulação e integração dessas duas vias promovem a movimentação corporal.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Funcionalmente, os núcleos da base auxiliam na manutenção da postura e no planejamento e iniciação dos movimentos. No entanto, sua função difere da função do cerebelo, pois envolve aspectos mais "cognitivos" do movimento, em oposição à regulação direta da execução do movimento (Tabela 1.4).

Tabela 1.4. Diferenças funcionais entre os núcleos da base e o cerebelo

	Núcleos da base	Cerebelo
Função	Planejamento e execução de estratégias motoras complexas	Regulação direta do movimento
Aferências	Recebem de todo o córtex cerebral	Recebe apenas do córtex somatosensorial e uma pequena quantidade provinda de receptores periféricos
Eferências	Em direção ao CPM, córtex motor e CPF	Em direção ao CPM e córtex motor
Outras conexões	Poucas conexões com o tronco encefálico, e nenhuma com a medula espinal	Muitas conexões com o tronco encefálico e com a medula espinal

Cerebelo

O cerebelo auxilia na regulação do movimento, corrigindo-o através das informações recebidas por alças de retroalimentação internas e externas quando este não é realizado de acordo com o planejamento motor inicial. Em outras palavras, o cerebelo compara o movimento efetivamente realizado com o planejado, em termos de amplitude, direção, força etc., e corrige-o quando necessário. Lesões nesta estrutura ilustram bem essa função, já que deixam o indivíduo com problemas na coordenação dos movimentos dos olhos e dos membros, além de alterações no equilíbrio e no tônus muscular.

Acredita-se que o cerebelo também seja importante para o processamento motor antecipatório de uma ação, como, por exemplo, adaptar a força adequada para erguer um objeto com as mãos. A informação visual também atua nesse processo (fornecendo a imagem do objeto), assim como os núcleos da base, que comparam movimentos previamente realizados em situações semelhantes, para então executar uma resposta motora de ajuste postural antecipatório, muitas vezes de forma inconsciente. A regulação do movimento e da postura é feita de forma indireta, através do ajuste das saídas dos principais sistemas motores descendentes do encéfalo.

Funcionalmente, o cerebelo é dividido em três regiões (Figura 1.17). O *vestíbulo-cerebelo* recebe aferências e envia eferências de/para os núcleos vestibulares do tronco encefálico, sendo importante na coordenação dos

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

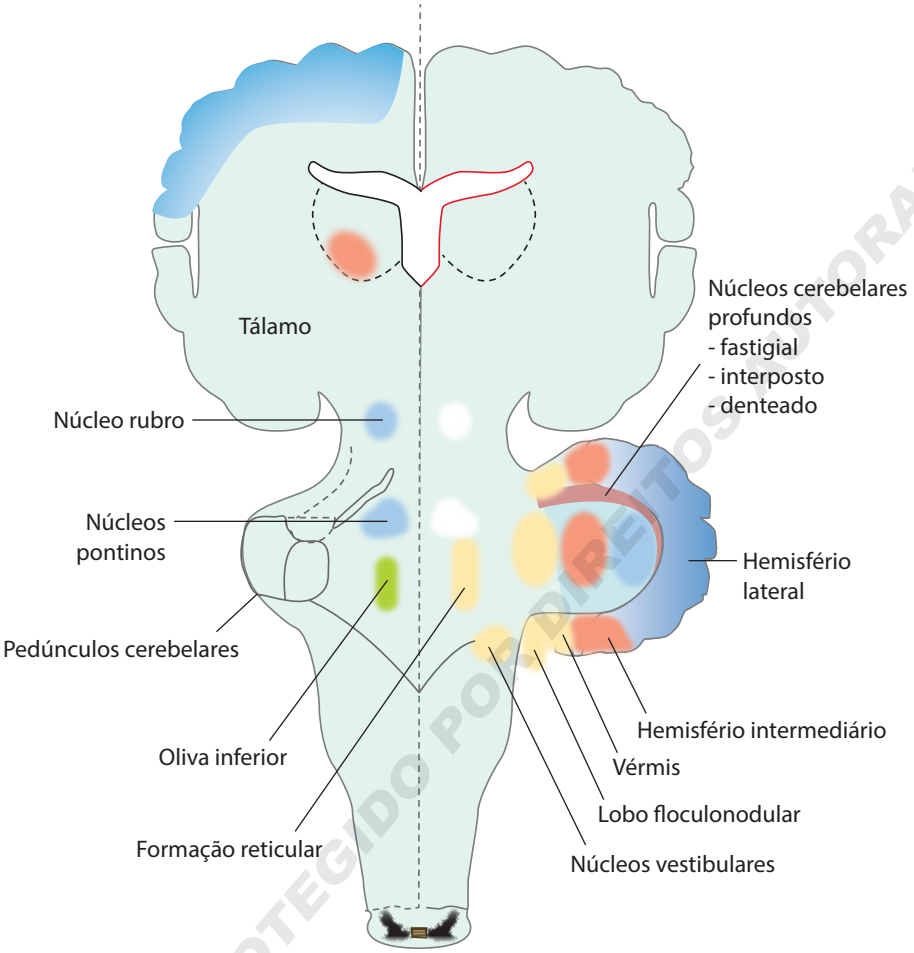


Figura 1.17. Estrutura do cerebelo, seus núcleos e conexões. Em amarelo: vestíbulo-cerebelo; em vermelho: espinocerebelo; em azul: cérebro-cerebelo. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

movimentos dos olhos com os movimentos da cabeça e no controle do equilíbrio. O *espinocerebelo* recebe aferências periféricas através da medula espinal, compostas por informações sensoriais dos sistemas auditivo, visual e proprioceptivo dos membros e tronco, integrando todas essas informações. A partir dos núcleos cerebelares mediais, saem fibras eferentes em direção à medula espinal, passando antes pelos núcleos do tronco encefálico, da formação reticular e pelos núcleos vestibulares laterais.

A ação desses núcleos também ocorre sobre o controle do equilíbrio, e lesões nesta região causam incoordenação dos músculos axiais, déficit de equilíbrio e movimentos dos membros superiores com oscilações, erros de cálculo de distância (hipo e hipermetria) e movimentos realizados de forma "desajeitada".

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

O *neocerebelo* (ou cérebro-cerebelo) recebe aferências do córtex cerebral, principalmente dos lobos parietal e frontal, e quase nenhuma aferência da medula espinal. As respostas desta região originam-se no núcleo denteado, dirigem-se aos núcleos da base e tálamo, e a partir deste, ao córtex motor primário, CPM lateral e CPF. Percebe-se, então, que o neocerebelo está relacionado ao controle voluntário dos movimentos, e que lesões nesta região afetam também os movimentos, tornando-os incoordenados e inacurados.

Diferencia-se a função do neocerebelo da função do espinocerebelo porque o primeiro apenas contribui com o planejamento do movimento, enquanto o espinocerebelo está envolvido na regulação do desempenho do movimento em si.

Controle das áreas motoras e aprendizado motor

Como pode ser observado na Figura 1.18, as áreas corticais relacionadas às diversas estruturas corporais e musculares não são proporcionais ao tamanho destas, mas sim à importância dos músculos de uma região corporal para o movimento e ao quão refinado deve ser o seu controle. Isso significa que áreas que realizam movimentos mais essenciais e finos, como os dedos das mãos, têm uma representação somatotópica muito maior que a área dos joelhos, que realizam basicamente movimentos simples de flexão e extensão.

Hoje sabemos que não existem representações corticais únicas dos movimentos que uma parte do corpo pode realizar. Ou seja, um mesmo músculo pode ser recrutado por diversas regiões do córtex motor primário, dependendo do tipo de movimento que ele terá de realizar e de acordo com a função que será exercida. Por exemplo, durante a ativação do flexor de punho em duas atividades distintas, como tocar piano ou carregar uma sacola, há ativação de regiões distintas do córtex motor primário, apesar do músculo exigido ser o mesmo. Isso ocorre porque cada ação requer um recrutamento de unidades motoras específicas para o movimento, compondo ações sinérgicas que resultarão nesse movimento. Outro achado é que a representação de diferentes partes do corpo, mas adjacentes, pode se sobrepor na área motora. Isso foi verificado através de estudos em sujeitos normais submetidos a Ressonância Magnética Funcional, que tiveram os mesmos neurônios ativados durante a movimentação de partes corporais distintas, mas adjacentes.

Uma conclusão desses achados, muito positiva ao se pensar em termos de reserva funcional, é que não existe apenas uma representação cortical para um mesmo músculo. Cada uma das representações existentes pode ser ativada em função do movimento que se quer realizar. E é em decorrência desses achados que lesões em áreas do córtex motor primário não afetam

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

todos os movimentos de determinada região corporal. Clinicamente, para os profissionais da reabilitação, esse achado traz como consequência a possibilidade de recuperação de movimentos de determinada parte do corpo através do recrutamento de outros neurônios que não tenham sido afetados pela lesão, com a finalidade de obter movimentos semelhantes e compensatórios ao movimento perdido.

Além dessa organização em áreas representativas, o controle motor segue outra forma de organização, segundo uma hierarquia entre as estruturas do sistema motor (medula espinal, tronco encefálico, córtex motor, cerebelo e núcleos da base) (Figura 1.18).

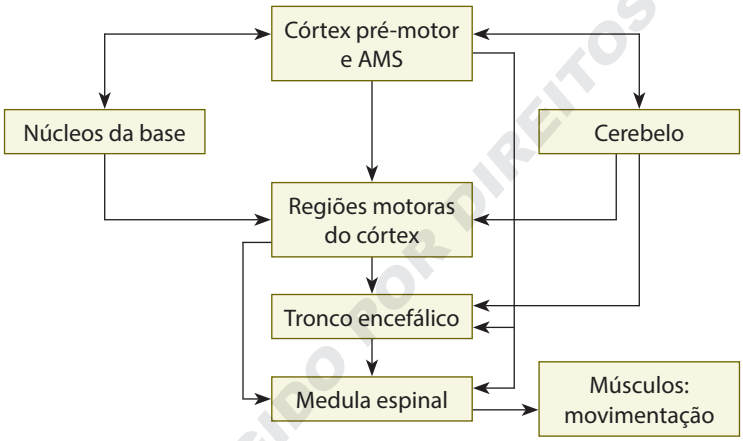


Figura 1.18. Hierarquia entre as estruturas responsáveis pela motricidade.

Como citado acima, Brown concluiu que os neurônios da medula eram capazes de gerar movimentos sem nenhum mecanismo de retroalimentação proveniente do exterior e que, funcionalmente, poderiam ser comparados a um programa de computador que contém todos os comandos possíveis. Os neurônios medulares equivaleriam a uma facilidade do SNC, com vários movimentos pré-programados que podem ser ativados e prontamente disparam sinais aos músculos. Sabemos que estes neurônios GCP apresentam um limite, pois nem todos os movimentos estão neles representados, mas contribuem para os ajustes posturais nos demais movimentos sem grandes representações, como quando atuam evitando que o corpo se desequilibre, trazendo o centro de gravidade para dentro da base de estabilidade.

Outra evidência de que o movimento reflexo ocorre independentemente da retroalimentação sensorial pode ser observada em pacientes com neuropatias sensitivas, que conseguem realizar movimentos mesmo na privação

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

de informações sensoriais. No entanto, a retroalimentação sensorial não pode ser totalmente dispensada: todo movimento necessita de correções contínuas para que possa ser aprimorado, principalmente quando envolve movimentos mais complexos e o aprendizado de novas habilidades motoras. Isso pode ser amplamente observado nos processos de reabilitação, onde os primeiros movimentos pós-lesão neurológica são sempre mais bruscos, incoordenados e simples, e, posteriormente, tornam-se mais harmônicos e complexos, em função de correções permanentes provenientes principalmente de estímulos sensoriais, como a visão.

O mesmo ocorre em pacientes com amputações de membros: mesmo após vários anos, o cérebro é capaz de se reorganizar topograficamente quando o paciente é submetido a um transplante, demonstrando a grande capacidade da plasticidade neuronal. O novo membro é reconhecido pelo cérebro e passa a fazer parte do corpo, executando os movimentos e eliminando qualquer erro de interpretação sensorial. Este fenômeno demonstra claramente o controle exercido pelas áreas corticais no movimento: devido ao aprendizado e ao armazenamento cortical dos padrões motores, conseguimos reproduzir com muita precisão movimentos anteriormente executados, mesmo na ausência de informação visual (de olhos fechados ou no escuro).

Aspectos essenciais para o aprendizado motor são a repetição dos movimentos, os mecanismos de retroalimentação sensorial, as experiências anteriores e a motivação. Um exemplo clássico ocorre quando solicitamos que um indivíduo erga uma caixa que se encontra à sua frente, sobre uma mesa, com conteúdo indeterminado. Mentalmente, antes de erguer a caixa, o indivíduo deve estimar seu peso, para que possa programar o quanto de força terá que exercer. Este planejamento, que ocorre anteriormente ao movimento e modula a relação causa-efeito, é denominado *modelo antecipatório ou proativo*, e é responsável por preparar o corpo para o movimento que irá ocorrer, a fim de evitar erros. O aprendizado, neste caso, depende basicamente das informações somatosensoriais, já que não se conhece o conteúdo da caixa. Os sistemas sensoriais das articulações e dos músculos enviam informações às áreas motoras corticais sobre os erros de planejamento, isto é, se muita ou pouca força foi exercida e se houve uma ativação adequada dos músculos posturais. Esta alça de retroalimentação será essencial para as correções do planejamento e aprimoramento da atividade motora. Os movimentos corretos são reforçados e os incorretos são corrigidos, sendo o aprendizado do movimento muito dependente da repetição e da importância daquela ação para o indivíduo.

Além da alça de retroalimentação antecipatória, existe a *alça compensatória*, responsável pelas respostas posturais desencadeadas por perturbações inesperadas do eixo corporal. No exemplo acima, caso o indivíduo exerça

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

muita força e a caixa esteja muito leve, para evitar que haja uma queda posterior, este sistema elabora uma resposta corporal, mais complexa que a resposta medular, na forma de contrações musculares de grupos antagônicos e estabilizadores, principalmente axiais. Para tanto, participam deste controle não apenas áreas corticais, mas também o cerebelo e os núcleos da base.

Equilíbrio

Além da capacidade física e cognitiva, para que o ser humano consiga realizar suas atividades cotidianas de forma segura e eficaz, é preciso que ele consiga se manter estável frente a todas as forças de instabilidade, como a gravitacional e as decorrentes do próprio movimento corporal, uma vez que, de acordo com as leis da física, para toda ação há uma força de reação. A manutenção da estabilidade corporal é um mecanismo complexo, que só é valorizado na sua ausência, pois quando adquirida, passa a ser inconsciente.

Uma definição amplamente utilizada de equilíbrio é *a habilidade de manter o centro de gravidade dentro da base de sustentação, mesmo em situações de mudança de base*, como durante a marcha. Resulta de vários ajustes posturais capazes de manter a cabeça e o corpo estáveis frente às forças extrínsecas e gravitacionais, de manter um alinhamento do centro de massa corporal dentro da base de sustentação e de estabilizar todas as partes do corpo durante a realização de um movimento. A manutenção da estabilidade corporal depende do correto recebimento das informações sensoriais, do seu processamento e da resposta gerada, a fim de se prevenir ou reagir contra qualquer forma de alteração do equilíbrio (Figura 1.19).

Sistemas sensoriais

Os sistemas sensoriais responsáveis pela captação ininterrupta das informações externas e internas são o vestibular, visual e somatossensorial. O sistema visual fornece informações sobre o meio ambiente, como profundidade, luminosidade, movimento dos objetos, a atividade que está sendo executada pelo indivíduo e a posição do corpo em relação ao ambiente. O sistema somatossensorial oferece dados sobre a inclinação (subida ou descida), tipo de solo (estável, liso, escorregadio etc.), a posição de cada parte do corpo em relação às demais, e do corpo em relação ao ambiente. Percebemos nossa posição através da propriocepção e sensações somáticas. O sistema vestibular detecta movimentos da cabeça em todas as direções e sentidos, mesmo na ausência de informações visuais.

Essas três fontes de informações são essenciais para uma percepção correta do movimento e manutenção do equilíbrio corporal. Elas devem ser

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

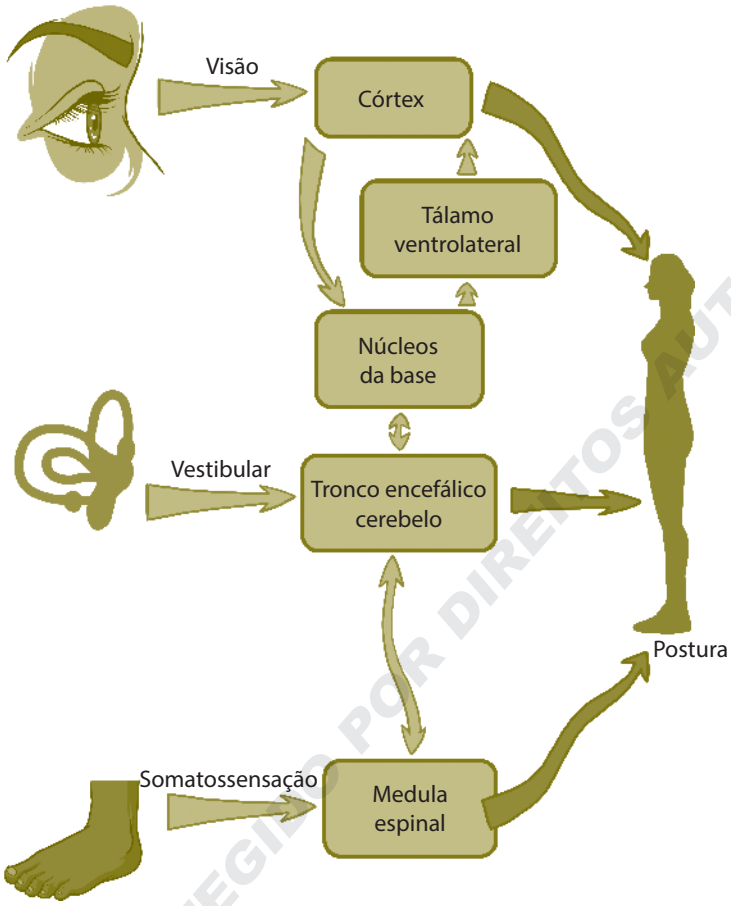


Figura 1.19. Sistemas sensoriais e sua atuação no controle postural. Fonte: Desenvolvida pela autoria.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

congruentes, pois qualquer conflito resulta em sensação de tontura e até náuseas. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando estamos em um carro em movimento lendo um livro. Nosso sistema visual nos informa que estamos parados, já que seu ponto de referência é o livro. Alguns receptores do sistema somatossensorial nos dizem que não estamos em movimento, pois não há mudança da superfície de apoio (o assento e o encosto do carro). No entanto, os receptores de pressão, articulares, musculares e vestibulares são ativados ao reagirem aos movimentos do carro, mostrando claramente haver um conflito de informações. Assim, pessoas desacostumadas a ler em carros em movimento sentem náuseas.

Esses sistemas são responsáveis pela contínua retroalimentação sensorial durante a execução de um movimento, necessária para os ajustes posturais, evitando quedas. Uma vez enviadas ao SNC, as informações são integradas e

comparadas aos eventos anteriores. A comparação evita respostas reativas a toda informação de desequilíbrio e permite modular o tipo e a intensidade da resposta motora. Mesmo em situações aparentemente estáticas, como ficar em pé sem nenhum movimento, os receptores articulares e musculares estão constantemente em ativação, já que as forças gravitacionais e intrínsecas continuam a atuar. Forças intrínsecas são pequenos movimentos, como o da caixa torácica durante a respiração, o movimento dos olhos e a motilidade gastrointestinal, que provocam micromovimentos perceptíveis pelos receptores citados, suficientes para provocar reações de manutenção da estabilidade postural, como contrações musculares de pequena intensidade. Além das forças intrínsecas, atuam também as extrínsecas, como o salto do sapato, o peso da roupa, o vento, e os movimentos, intencionais ou não, provocados pelo meio de transporte e pelas pessoas ao redor. Todos estes fatores são analisados e, em milissegundos, uma resposta é gerada para evitar a perda da estabilidade.

Sistemas motores (eferentes)

Classificamos as respostas motoras em *antecipatórias* ou *compensatórias*, de acordo com o momento em que o ajuste postural é realizado: anterior ou posteriormente à atividade. Um ajuste antecipatório é aquele que prepara o indivíduo para uma atividade, baseando-se em um conhecimento prévio de que haverá mudança de estabilidade, e tem como objetivo evitar que o indivíduo perca o equilíbrio durante a execução da atividade. Um exemplo clássico é o ajuste de nossa postura antes da aceleração quando estamos em pé em um trem do metrô. Antecipadamente, jogamos nosso centro de gravidade no sentido oposto ao da aceleração.

A resposta compensatória, por outro lado, é a que dá continuidade ao equilíbrio. Como o movimento desestabilizante continua e ainda está em aceleração, os ajustes posturais aparecem para compensar esse distúrbio externo. Todo ajuste postural tem como objetivo manter o centro de gravidade dentro da base de sustentação, seja qual for ela. Isso significa que, mesmo nas mudanças de base (aumento ou redução), e até mesmo na sua "ausência" (como em uma corrida, em que há momentos em que ambos os pés se encontram fora do apoio), os segmentos corporais devem se realinhar para manter-se dentro dos limites de estabilidade. Esses limites são definidos como a amplitude máxima que o centro de gravidade pode oscilar dentro de uma base de sustentação, sem que haja necessidade de mudar essa base, ao dar um passo, por exemplo. Esses ajustes são feitos para todas as direções, não apenas para a posição ortostática, mas também em sedestação e na horizontal.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Um dos exemplos mais representativos é a manutenção da posição ortostática. Posicionados em pé, com uma base de sustentação normal (os pés um pouco afastados entre si), ao oscilarmos nosso centro de massa para todas as direções, a musculatura oposta ao movimento entra em ativação, da mais distal para a proximal, em uma tentativa de trazer o corpo de volta ao alinhamento. Essa contração gera um movimento inicialmente no tornozelo (em flexão plantar ou dorsiflexão) e, ao aumentar a oscilação do centro de gravidade, mais estruturas corporais entram em ativação, ocorrendo reajustes no quadril, no sentido de flexão, extensão ou abdução, sempre no sentido oposto ao do desequilíbrio. Há reajustes que ocorrem também nos demais segmentos superiores, como no tronco, membros superiores e cabeça.

Um exemplo ilustrativo é o de uma pessoa em pé na beira de uma piscina, que é empurrada contra sua vontade para cair na água: ela inicialmente realizará a flexão plantar do tornozelo, seguida da extensão do quadril e, por fim, uma extensão de tronco com posteriorização dos membros superiores e extensão de cabeça, na tentativa de não perder o equilíbrio. Caso a pessoa não estivesse na beira da piscina, a solução final seria dar um passo à frente a fim de mudar a base de sustentação e garantir que o centro de gravidade continuasse sendo projetado dentro do limite de estabilidade.

De forma resumida, temos três estratégias reacionais compensatórias a um desequilíbrio na posição vertical: a de tornozelo, eficaz apenas frente a forças instabilizantes leves; a de quadril, mais eficaz que a de tornozelo; e, por fim, a do passo.

Considerações finais

Um bom conhecimento dos princípios neurofisiológicos do movimento normal é de grande auxílio na compreensão das disfunções decorrentes das lesões neurológicas. Através do conhecimento da fisiologia, é possível identificar os mecanismos que se encontram alterados em lesões do sistema nervoso, formular estratégias para reabilitação motora, além de orientar os esforços no sentido de desenvolver novas estratégias de promoção de neuroplasticidade e novos aprendizados motores, seja por meio de intervenções farmacológicas, não farmacológicas, ou uma combinação das duas.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS

Bibliografia

- Gazzaniga MS, Ivry RB, Mangun GR. Cognitive neuroscience: the biology of mind. 5th ed. New York: W. W. Norton & Company; 2018.
- Guyton AC, Hall JE, Hall M. Tratado de fisiologia médica. 14a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2021.

- Kandel ER, Schwartz JH, Jessel TM, Siegelbaum SA, Hudspeth AJ. Principles of Neural Science. 5th ed. New-York: McGraw-Hill; 2014.
- Kauffman TL, Scott RW, Barr JO. A comprehensive guide to geriatric rehabilitation. 3rd ed. London, UK: Churchill Livingstone; 2014.
- Lent R. Neurociência da mente e do comportamento. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan; 2008.
- Lundy-Ekman L. Neuroscience: Fundamentals for Rehabilitation. 6th ed. Philadelphia: Saunders; 2022.
- Machado A. Neuroanatomia funcional. 2. ed. São Paulo: Atheneu; 2005.
- Perracini MR, Gazzola JM. Equilíbrio em idosos. In: Perracini MR, Fló CM. Fisioterapia: teoria e prática. Funcionalidade e envelhecimento. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2009.

MATERIAL PROTEGIDO POR DIREITOS AUTORAIS