UNIP
UNIVERSIDADE PAULISTA
Interativa

Biomecânica

Autoras: Profa. Katia Brandina
Profa. Ana Paula da Silva Azevedo

Professor conteudista: Katia Brandina / Ana Paula da Silva Azevedo

Profa. Katia Brandina

É graduada em Educação Física pela Universidade São Judas Tadeu (1997). Possui mestrado (2004) e doutorado (2009) em Biodinâmica do Movimento Humano pela Escola de Educação Física e Esporte da Universidade de São Paulo (EEFE-USP). Atualmente, é professora titular (profissional IV) da Universidade Paulista (UNIP). Coordena e ministra aulas nos cursos de pós-graduação da Universidade Estácio de Sá (Reabilitação de Lesões e Doenças Musculoesqueléticas), da Universidade de São Caetano do Sul (Reabilitação e Exercício Físico nas Lesões e Doenças Musculoesqueléticas) e da FMU (Lesões e Doenças Musculoesqueléticas: Prevenção e Condicionamento Físico). Ministra aulas como professora convidada no curso de pós-graduação da Fefiso (Fisiologia do Exercício: Avaliação e Prescrição de Atividade Física). Os temas de estudo de maior interesse na área da Biomecânica são: locomoção humana, reabilitação de lesões musculoesqueléticas, calçado esportivo e eletromiografia.

Profa. Ana Paula da Silva Azevedo

É graduada com Bacharelado e Licenciatura em Educação Física pela Escola de Educação Física e Esporte da Universidade de São Paulo (EEFE-USP) (2004). Possui mestrado em Educação Física (2009) e doutorado em Ciências (2013) pela mesma escola e universidade. Além disso, é pós-doutora em Biomecânica do Movimento e atualmente é pesquisadora do Laboratório de Biomecânica da EEFE-USP. Tem experiência na área de Educação Física, com ênfase em Biomecânica, atuando principalmente nos seguintes temas: biomecânica do esporte, locomoção humana, calçado, sobrecarga mecânica, treinamento esportivo, eletromiografia e desempenho esportivo.

© Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou transmitida por qualquer forma e/ou quaisquer meios (eletrônico, incluindo fotocópia e gravação) ou arquivada em qualquer sistema ou banco de dados sem permissão escrita da Universidade Paulista.

Prof. Dr. João Carlos Di Genio
Reitor

Prof. Fábio Romeu de Carvalho
Vice-Reitor de Planejamento, Administração e Finanças

Profa. Melânia Dalla Torre
Vice-Reitora de Unidades Universitárias

Prof. Dr. Yugo Okida
Vice-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Profa. Dra. Marília Ancona-Lopez
Vice-Reitora de Graduação

Unip Interativa – EaD

Profa. Elisabete Brihy
Prof. Marcelo Souza
Prof. Dr. Luiz Felipe Scabar
Prof. Ivan Daliberto Frugoli

Material Didático – EaD

Comissão editorial:
Dra. Angélica L. Carlini (UNIP)
Dra. Divane Alves da Silva (UNIP)
Dr. Ivan Dias da Motta (CESUMAR)
Dra. Kátia Mosorov Alonso (UFMT)
Dra. Valéria de Carvalho (UNIP)

Apoio:
Profa. Cláudia Regina Baptista – EaD
Profa. Betisa Malaman – Comissão de Qualificação e Avaliação de Cursos

Projeto gráfico:
Prof. Alexandre Ponzetto

Revisão:
Lucas Ricardi

Sumário

Biomecânica

APRESENTAÇÃO 7
INTRODUÇÃO 8

Unidade I

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMECÂNICA 11
2 BIOMECÂNICA DO MOVIMENTO 15
2.1 Conceito de torque e braço de alavanca 22
3 BIOMECÂNICA DO TECIDO ÓSSEO 28
3.1 Caracterização estrutural e funcional do tecido ósseo 28
3.2 Caracterização biomecânica do tecido ósseo 30
3.3 Adaptação do osso ao exercício 34
3.4 Caracterização das lesões 34
3.5 Tecido ósseo de idosos e de crianças 35
4 BIOMECÂNICA DO TECIDO ARTICULAR 36
4.1 Resistência mecânica das articulações sinoviais 36
4.2 Biomecânica da coluna e do disco intervertebral 39
4.3 Biomecânica do ligamento e do tendão 41

Unidade II

5 FISIOLOGIA ARTICULAR: BIOMECÂNICA DAS ARTICULAÇÕES SINOVIAIS 50
5.1 Extremidade superior 50
5.1.1 Articulação do ombro 51
5.1.2 Articulação do cotovelo 58
5.1.3 Articulação do punho e segmento mão 62
5.2 Extremidade inferior 69
5.2.1 Articulação do quadril 69
5.2.2 Articulação do joelho 78
5.2.3 Articulação do tornozelo e segmento pé 89
5.3 Coluna vertebral 98
6 BIOMECÂNICA DO TECIDO MUSCULAR 117

Unidade III

7 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO EM BIOMECÂNICA.....128
7.1 Cinemetria.....128
7.2 Eletromiografia.....131
7.3 Dinamometria.....139
8 ANÁLISE BIOMECÂNICA DA MARCHA.....150

APRESENTAÇÃO

A Biomecânica é uma área de conhecimento multidisciplinar que tem como foco de estudo o movimento do corpo humano e sua interação com o meio ambiente. Essa interação é compreendida pelos princípios da Física, particularmente da Mecânica, haja vista que, constantemente, o corpo aplica e recebe forças do meio ambiente (HALL, 2013; AMADIO; SERRÃO, 2011; AMADIO; SERRÃO, 2004).

A troca de forças entre corpo e ambiente possibilita ao aparelho locomotor usar estratégias eficientes de propulsão para aumentar a velocidade em um deslocamento horizontal, como em uma corrida, bem como permite a aceleração do corpo para cima, garantindo maior deslocamento vertical em um salto.

Além da utilização do solo para os deslocamentos, é importante lembrar que o corpo humano está constantemente removendo e retomando o contato dos pés com o solo. Isso implica na recepção de forças externas (impacto), que podem ser adequadamente controladas pelas estruturas anatômicas ou não.

Sabendo disso, o controle das forças externas sobre o corpo torna-se de fundamental importância para evitar lesões, e a Biomecânica possui ferramentas muito eficientes, que serão exploradas nesta disciplina, para entender essa complexa relação entre corpo humano e meio ambiente.

Nossa disciplina tem os seguintes objetivos:

- Compreender a Biomecânica e o seu foco de estudo.
- Entender os efeitos que as diversas solicitações mecânicas têm sobre as diferentes estruturas do aparelho locomotor.
- Controlar as forças que os diferentes tipos de exercícios exercem sobre o aparelho locomotor.
- Entender as características mecânicas do movimento humano do ponto de vista da Biomecânica.
- Controlar as forças geradas no movimento para prevenir o surgimento de lesões e melhorar o rendimento.
- Entender os objetivos relacionados anteriormente permitirá aos professores de Educação Física planejar corretamente sessões de exercícios para indivíduos com diferentes caraterísticas físicas: sedentário/ativo, idoso/adulto, criança/adulto, normal/patológico.

O planejamento adequado do treino gerará grande controle mecânico no movimento para diferentes populações, com adaptação positiva das estruturas anatômicas e melhorias na técnica do gesto motor, tornando-o mais seguro e eficiente.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da área da Biomecânica foi iniciado por pesquisadores bastante conhecidos na ciência, tais como Aristóteles, Arquimedes, Galeno, Leonardo da Vinci, entre outros (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

Aristóteles, no período de 384 a 322 a.C., iniciou a análise das estruturas do corpo humano, estudando e escrevendo sobre a importância da função de ossos e músculos para o movimento humano. Discutiu que todo movimento depende de um elemento que o produz e começou a explicar a importância dos músculos para acelerar os segmentos corporais (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

Entre 287 e 212 a.C., Arquimedes descreveu a forma como os músculos atuavam para produzir os movimentos corporais e criou o conceito de torque, mostrando a importância da postura do corpo para facilitar a execução de um gesto motor (alavancas do movimento) (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

Galeno, entre 129 e 201 a.C., se interessou por estudar o processo de contração muscular e escrever sobre ele, a fim de entender como o músculo encurta para produzir as forças no movimento (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

Entre 1452 e 1519, Leonardo da Vinci relacionou as leis da Física ao movimento corporal. Estudou e descreveu a mecânica das estruturas anatômicas e a forma como elas são usadas para produzir movimentos, como o da marcha (caminhada) (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

Galileu Galilei (1564-1642), Borelli (1608-1679) e Isaac Newton (1642-1727) deram continuidade às descobertas feitas por Leonardo da Vinci, relacionando conceitos sobre o deslocamento dos segmentos corporais, alavancas e a Teoria da Gravitação para explicar como se dá o movimento humano.

Percebe-se, com isso, na História, a criação do alicerce da disciplina Biomecânica, caracterizada pelo uso da cinemática (deslocamento, velocidade e aceleração dos corpos) e da cinética (forças internas e externas) para estudar o movimento humano (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

Até esse momento, todo conhecimento se baseava em estudos teóricos ou relações de conceitos teóricos. Era, portanto, um corpo de conhecimento baseado em um discurso filosófico. Para a Biomecânica assumir o *status* de área de conhecimento científico, foi necessário desenvolver instrumentos capazes de mostrar que as discussões teóricas eram verdadeiramente comprovadas na prática.

Então, Muybridge (1830-1904), Marey (1830-1904), Braunne (1831-1892) e Fischer (1861-1917) elaboraram os primeiros instrumentos da área da Biomecânica para registrar os movimentos e estabeleceram protocolos experimentais que permitem até hoje reproduzir as análises laboratoriais

para registrar, analisar e discutir a técnica de movimentos feitos pelo ser humano, o que permitiu que a Biomecânica fosse reconhecida como uma importante área da ciência, que possui métodos de investigação próprios para produzir conhecimento científico (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001; AMADIO; DUARTE, 1998).

A discussão histórica feita anteriormente pode ser ilustrada nos questionamentos seguintes, que permitirão compreender a importância da disciplina *Biomecânica* para o professor de Educação Física.

Imagine um movimento rotineiro como o da caminhada: quando se coloca o pé no chão, tem-se o choque entre dois corpos. Esse choque é transferido do solo para as estruturas do aparelho locomotor, que devem ser resistentes o suficiente para dissiparem a força externa sem comprometimento anatômico. Você sabe a magnitude da força que cada estrutura anatômica suporta? E o tipo de força à qual ela é mais resistente?

Tão importante quanto saber a resistência mecânica das estruturas do aparelho locomotor é estudar e conhecer a forma como o movimento deve ser executado. Na caminhada, o choque entre o pé e o solo pode ser mais, ou menos, amortecido pelo corpo. Você sabe como é possível melhorar o amortecimento de choque mecânico no movimento? Quem é o principal responsável por essa função no aparelho locomotor?

O correto planejamento da sessão de exercício físico depende desse conhecimento para adequar a intensidade do treino ao controle de cargas mecânicas e evitar lesões nas estruturas do corpo humano.

A manipulação correta da técnica do movimento e das forças externas impostas ao corpo na prática de exercício físico faz com que as estruturas se adaptem de forma positiva às forças externas, aumentando sua resistência mecânica e garantindo melhor condicionamento físico.

Portanto, a aquisição do conhecimento da disciplina *Biomecânica* torna o professor de Educação Física apto a planejar e estruturar sessões de treino compatíveis com as características físicas e funcionais de indivíduos sedentários ou ativos, idosos ou crianças.

Unidade I

Inicialmente, os conceitos básicos da Biomecânica e da anatomia humana serão explorados para formar a base de conhecimento necessária para o estudo do movimento humano.

Dessa forma, a definição e as áreas de atuação da Biomecânica serão apresentadas e explicadas; na sequência, os conceitos básicos de posição anatômica, planos e eixos do movimento serão recordados; e posteriormente faremos a aplicação prática do conhecimento pelo conceito de torque.

Os ossos e a articulação sinovial serão o foco de estudo deste tópico.

O tecido ósseo é de grande importância mecânica para o corpo por suportar forças intensas e permitir a realização de movimentos por meio de alavancas. A discussão sobre o tipo de força que o osso prefere para evitar lesões e para se adaptar ao esforço físico será abordada nesta parte da disciplina. Em seguida, considerações acerca das diferenças estruturais e mecânicas dos ossos de idosos e crianças serão apresentadas. Posteriormente, a composição estrutural e funcional das articulações sinoviais será discutida com base na sua resistência mecânica, particularmente no que diz respeito à cartilagem articular, ligamentos, fibrocartilagens e disco intervertebral. Encerraremos o tema apontando as estratégias práticas a serem usadas pelos professores de Educação Física para preparar as estruturas articulares para o exercício sem provocar lesões.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMECÂNICA

A Biomecânica é a área do conhecimento que integra os conceitos da Física, Anatomia e Fisiologia para compreender como o corpo humano interage com o meio ambiente. Os conceitos da Anatomia dão conta de informar o nome, o formato, os componentes e o local das estruturas do nosso corpo submetidas às forças. Com a Fisiologia, é possível compreender como as estruturas do corpo funcionam e se adaptam à aplicação das forças. E, finalmente, a Física permite registrar a forma de execução do movimento humano, o que possibilita a análise de sua técnica e minimiza os riscos de lesão (MCGINNIS, 2015; AMADIO; SERRÃO, 2011; AMADIO; SERRÃO, 2004).

A interdisciplinaridade da Biomecânica, juntamente com os métodos de investigação específicos e próprios para registrar a resistência mecânica dos tecidos biológicos e o movimento humano, amplia o uso do seu conhecimento em diversas áreas de atuação, tais como biomecânica ortopédica, anatomia funcional, biomecânica da reabilitação, biomecânica do esporte, ergonomia e biomecânica clínica (MCGINNIS, 2015; AMADIO; SERRÃO, 2011; AMADIO; SERRÃO, 2004).

Na biomecânica ortopédica, os biomateriais são testados em máquinas para registro de sua resistência mecânica.

Observação

O termo biomateriais é usado na Biomecânica para nomear as estruturas anatômicas como ossos, músculos, ligamentos, cartilagens, entre outras.

A figura a seguir ilustra esse tipo de registro. Nela, um biomaterial – neste caso, um osso cadavérico – é prensado em uma máquina capaz de aplicar forças (estresse mecânico) em diversas direções sobre o tecido. Conforme o estresse mecânico é aplicado, o tecido sofre uma deformação.



Figura 1 – Epífise proximal do fêmur posicionada para receber uma força de flexão na região do colo anatômico (ilustração de um ensaio mecânico em osso)

Como o equipamento está conectado ao computador, verifica-se o registro da curva estresse-deformação na tela do computador após o procedimento experimental, conforme a figura a seguir:

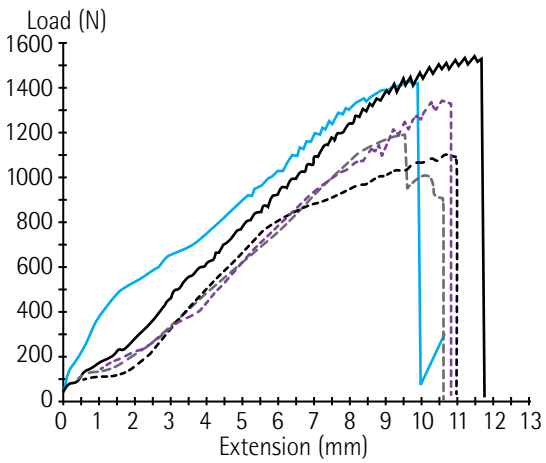


Figura 2 – Representações gráficas das curvas de estresse-deformação. Cada curva representa uma tentativa de registro do estudo

Em geral, quanto maior for o estresse sofrido pelo tecido e menor for sua deformação, mais resistente ele é, o que minimiza as chances de mantê-lo com uma deformação residual após a remoção da força. Portanto, o controle da intensidade da força aplicada ao tecido humano é importante para evitar deformações residuais, o que facilita a ruptura da estrutura.

A essa metodologia, usada na biomecânica ortopédica, dá-se o nome de ensaio mecânico ou ensaio *in vitro*.



Saiba mais

Para maior conhecimento sobre os testes mecânicos, leia o artigo:

FREITAS, A *et al*. Análise da resistência mecânica de fixação de fratura do colo femoral em osso sintético com DHS e parafuso antirrotatório. *Revista Brasileira de Ortopedia*, 2014, 49(6), p. 586-592.

A anatomia funcional é amplamente usada na área acadêmica para estudo da ativação dos músculos no movimento ou em posição quasi-estática (similar à posição anatômica). Por meio do eletromiógrafo é possível saber se um ou mais músculos participam de determinado movimento e por quanto tempo se dá tal participação. Esse tipo de análise possibilita entender não só a ação isolada de um músculo no gesto motor, mas principalmente a ação conjunta de vários músculos em uma ou mais fases do movimento. O aspecto coordenativo do gesto motor é a principal informação obtida dessa área de atuação da Biomecânica, que a torna importante para entender e aperfeiçoar a técnica do movimento humano (AMADIO; SERRÃO, 2011; AMADIO; SERRÃO, 2004; BAUMANN, 1995). Pelo fato do eletromiógrafo ter tanta relevância na análise do movimento humano, essa metodologia de pesquisa será mais detalhada no final deste livro-texto.



Observação

O eletromiógrafo é um instrumento de registro pertencente à Biomecânica, que capta os estímulos elétricos enviados pelo sistema nervoso aos músculos que participam do movimento.

Além da discussão coordenativa do movimento humano, os aspectos cinemáticos e cinéticos também são estudados. As áreas de investigação que permitem isso são a cinemetria e a dinamometria, discutidas com detalhes no final do nosso livro-texto. Neste instante, o que importa saber é que os dados obtidos da cinemetria e da dinamometria são usados pela área de atuação da biomecânica da reabilitação e da biomecânica do esporte para aperfeiçoar a técnica do movimento e deixá-lo mais econômico e eficiente (MCGINNIS, 2015; AMADIO; SERRÃO, 2011; BAUMANN, 1995).

No caso de quem está se reabilitando de uma patologia ou doença, o movimento é estudado e comparado com o de um sujeito sem nenhuma patologia ou doença para identificar as diferenças. As distinções são estudadas e discutidas e tratamentos terapêuticos são criados para melhorar a técnica do movimento do sujeito patológico, a fim de torná-lo mais econômico e eficiente. Como o estudo do movimento culmina no desenvolvimento de tratamentos para garantir maior qualidade de vida ao sujeito com patologia, essa área de atuação da Biomecânica é conhecida por biomecânica da reabilitação (SACCO; TANAKA, 2008; AMADIO; SERRÃO, 2004).

No caso do esporte, tem-se a mesma estratégia de comparação de movimentos, seja antes e depois de um treino, entre atletas de níveis diferentes ou uma análise sobre a técnica de movimento do próprio atleta para identificações de erros de execução. Entretanto, neste caso, o aperfeiçoamento técnico tem como objetivo melhorar o desempenho para competir e atingir os resultados mais expressivos da carreira do atleta em eventos esportivos de excelência. A eficiência do movimento deve ser perfeita para conquista de resultados em competições, esse é o objetivo da área de atuação conhecida como biomecânica do esporte (MCGINNIS, 2015; AMADIO; SERRÃO, 2011).

A ergonomia é uma área de conhecimento multidisciplinar que usa a biomecânica para avaliação do posto de trabalho em empresas. Novamente, o objetivo é estudar a postura e movimentação do trabalhador para determinar a técnica mais perfeita e eficiente no ambiente de trabalho. Muitas vezes, além de ensinar a postura do ofício ao trabalhador, deve-se avaliar e modificar o formato de uma ferramenta, mobiliário ou posto de trabalho. Portanto, a biomecânica na ergonomia é usada também para aperfeiçoar o formato e a função das ferramentas e utensílios pertencentes ao posto de trabalho, a fim de garantir a segurança e a saúde do trabalhador e reduzir o índice de afastamento do serviço por motivo de lesão (CHAFFIN; ANDERSSON; MARTIN, 2001).

Independentemente da área de atuação da Biomecânica, fica claro que os principais objetivos são:

- melhorar o rendimento do movimento humano, tornando-o mais eficaz, mais econômico e com uma técnica de execução perfeita; e

- diminuir os riscos de lesões por meio do controle da sobrecarga mecânica no aparelho locomotor (BAUMANN, 1995).

Esses objetivos são alcançados quando se tem em mente que o corpo está a todo instante interagindo com o meio ambiente. Então, todo estudo da Biomecânica depende da interação entre forças geradas ou sustentadas pelo corpo (biomecânica interna) e daquelas que incidem no corpo pelo meio ambiente (biomecânica externa). O resultado da interação entre forças internas e externas no aparelho locomotor é o movimento humano (MCGINNIS, 2015; AMADIO; SERRÃO, 2011).

2 BIOMECÂNICA DO MOVIMENTO

Os movimentos corporais são realizados pelas articulações do corpo em três planos distintos: sagital (ou antero-posterior), frontal (ou coronal) e transversal (ou horizontal). Esses planos estão representados na figura a seguir e dividem o corpo em partes iguais considerando lados distintos (HALL, 2013).

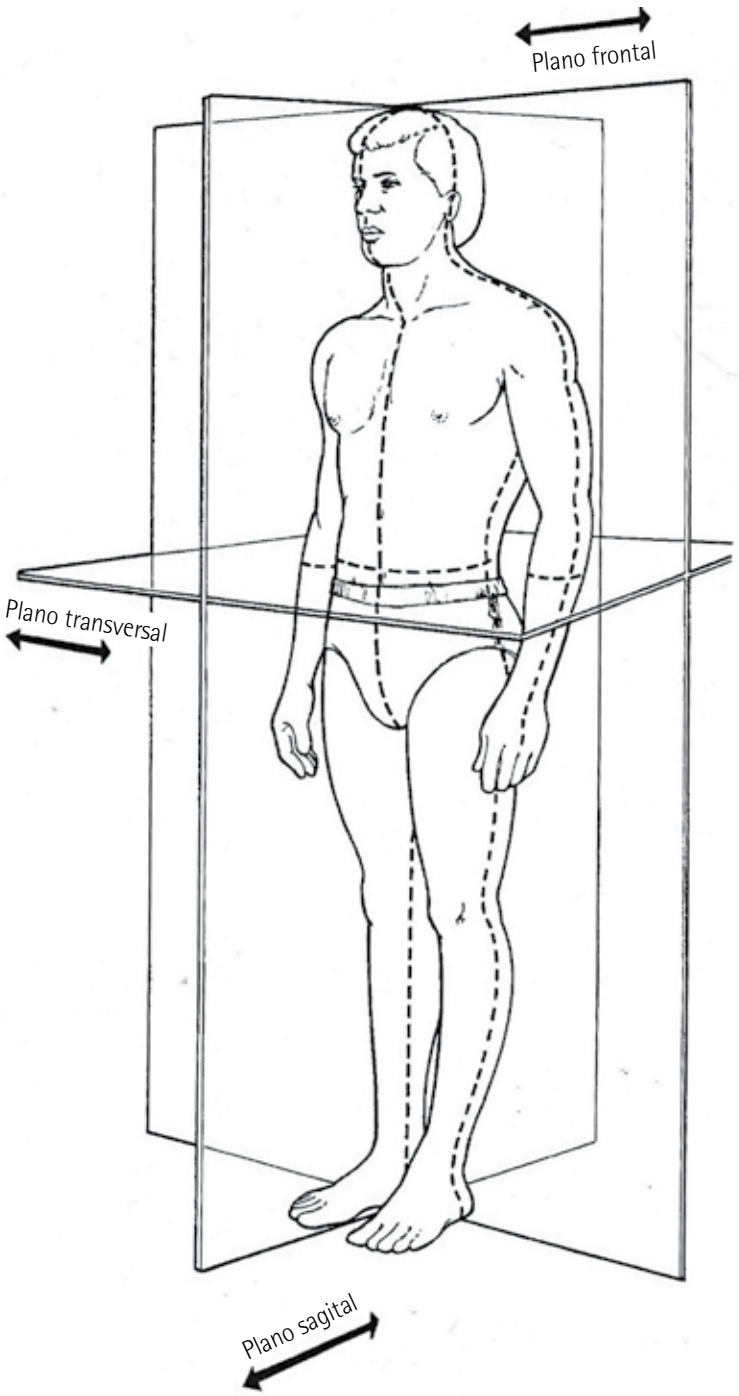


Figura 3 – Representação dos planos e eixos anatômicos quando o sujeito está parado com o corpo em posição anatômica

Ao visualizar uma pessoa de perfil pode-se dizer que ela está posicionada no plano sagital: o corpo encontra-se dividido em duas metades iguais considerando os lados direito e esquerdo. O plano frontal é definido ao visualizar uma pessoa de frente ou de costas: o corpo encontra-se dividido em duas metades iguais considerando as porções anterior e posterior. Finalmente, o plano transversal é caracterizado quando a pessoa é visualizada por cima ou por baixo: o corpo encontra-se dividido em duas metades iguais considerando as porções superior e inferior (HALL, 2013).

De acordo com Hall (2013), para localização dos planos, considera-se o posicionamento corporal em postura anatômica, conforme a figura anterior: pés paralelos e unidos, braços rentes ao corpo com palmas das mãos voltadas para frente, cabeça e coluna ereta e olhar direcionado para o horizonte. Para a biomecânica, o movimento só pode ser analisado com perfeição quando o executor é devidamente posicionado para seu registro; assim, conhecer o plano principal do movimento a ser analisado é de fundamental importância.

As articulações corporais são capazes de movimentar os segmentos do corpo no espaço em todos os planos anatômicos de forma combinada ou isolada, dependendo da complexidade do movimento (SACCO; TANAKA, 2008). O conhecimento sobre o nome dos movimentos feito por cada articulação, em cada plano anatômico, é de grande relevância para o profissional da área da saúde descrever e compreender qual articulação trabalha mais em determinado exercício físico.

O quadro a seguir define o movimento articular que ocorre em cada plano anatômico para as articulações do membro inferior:

Quadro 1 – Movimentos articulares dos membros inferiores

Articulação	Plano anatômico	Movimento articular	Definição
Tornozelo	Sagital	Flexão (dorsiflexão)	Aproximação entre a perna e o dorso do pé
		Extensão (flexão plantar)	Afastamento entre a perna e o dorso do pé
	Frontal	Inversão	Transferência do peso para borda lateral do pé
		Eversão	Transferência do peso para borda medial do pé
	Transversal	Adução	Aproximação do calcanhar em relação ao eixo longitudinal
		Abdução	Afastamento do calcanhar em relação ao eixo longitudinal
Joelho	Sagital	Flexão	Aproximação entre a perna e a coxa
		Extensão	Afastamento entre a perna e a coxa
	Frontal (muito restrito)	Abdução	Alinhamento da perna em *varum*
		Adução	Alinhamento da perna em *valgus*
	Transversal	Rotação lateral (ou externa)	A perna gira para fora em relação à coxa
		Rotação medial (ou interna)	A perna gira para dentro em relação à coxa

Quadril	Sagital	Flexão	Aproximação entre a porção anterior da coxa e do tronco com movimento da perna ou do tronco
		Extensão	Afastamento entre a porção anterior da coxa e do tronco com movimento da perna ou do tronco
	Frontal	Abdução	Afastamento lateral das pernas
		Adução	Aproximação medial das pernas
	Transversal	Rotação lateral (ou externa)	A coxa gira para fora em relação ao tronco
		Rotação medial (ou interna)	A coxa gira para dentro em relação ao tronco

Adaptado de: Brandina (2014b) e Sacco e Tanaka (2008).

Os conceitos apresentados no quadro são postos em prática quando analisamos o movimento de agachamento, por exemplo. Este ocorre no plano sagital, porque para visualizar a movimentação completa das principais articulações é necessário analisar a execução do agachamento de perfil. Uma vez definido o plano anatômico principal do agachamento é possível nomear o movimento das principais articulações (tornozelo, joelho, quadril) usadas em suas diferentes fases de execução: descendente, quando o corpo acelera para baixo e ascendente, quando o corpo acelera para cima.

Na fase descendente, o movimento do tornozelo mostra a aproximação entre os segmentos do dorso do pé e da perna, portanto, este é definido como movimento de flexão do tornozelo ou dorsiflexão. O joelho também faz a aproximação entre dois segmentos, da perna e da coxa, então, também flexiona. E, o quadril aproxima as porções anteriores do tronco e da coxa, caracterizando também o movimento de flexão de quadril.

A análise do agachamento só termina quando se considera um ciclo do movimento. Dessa forma, depois da fase descendente, o executor faz a fase ascendente. Para tanto, as articulações do tornozelo, joelho e quadril atuam com movimentos opostos aos descritos no parágrafo superior, apesar de o plano anatômico do movimento ainda ser o mesmo, o sagital.

Na fase ascendente do agachamento, o executor do movimento afasta o dorso do pé da perna, a perna da coxa e as porções anteriores da coxa e do tronco; portanto, tornozelo, joelho e quadril, respectivamente, fazem o movimento de extensão para finalizar o ciclo do movimento de agachamento.

Para os movimentos articulares dos membros inferiores ocorrerem na fase ascendente, é necessário que os músculos encurtem (contração concêntrica). Cada músculo ou grupo muscular será responsável por realizar um ou mais movimentos articulares. A descrição de seu nome, localização e ação consta no quadro a seguir:

Quadro 2 – Nome, localização e ação dos músculos que movimentam as articulações dos membros inferiores

	Músculo	Localização	Ação
	Tibial anterior	Anterior à perna/superficial	Flexão (dorsiflexão) e inversão do tornozelo
	Fibular longo	Lateral à perna/superficial	Extensão (flexão plantar) e eversão do tornozelo
	Fibular curto	Lateral à perna/profundo	Extensão (flexão plantar) e eversão do tornozelo
Complexo Tríceps sural	Gastrocnêmio lateral	Posterior à perna/superficial	Extensão (flexão plantar) do tornozelo e flexão do joelho
	Gastrocnêmico medial	Posterior à perna/superficial	Extensão (flexão plantar) do tornozelo e flexão do joelho
	Sóleo	Posterior à perna/profundo	Extensão (flexão plantar) do tornozelo
Complexo do Quadríceps	Vasto lateral	Anterior à coxa/superficial	Extensão do joelho.
	Vasto medial	Anterior à coxa/superficial	Extensão do joelho
	Vasto intermédio	Anterior à coxa/profundo	Extensão do joelho
	Reto femoral	Anterior à coxa/superficial	Extensão do joelho e flexão do quadril
Complexo isquiotibiais	Bíceps femoral	Posterior à coxa/superficial	Flexão do joelho e extensão do quadril
	Semitendíneo	Posterior à coxa/superficial	Flexão do joelho e extensão do quadril
	Semimembranáceo	Posterior à coxa/superficial	Flexão do joelho e extensão do quadril
Complexo Iliopsoas	Ilíaco	Anterior ao quadril/superficial	Flexão e rotação lateral do quadril
	Psoas maior	Anterior ao quadril/superficial	Flexão do quadril e da coluna lombar e rotação lateral do quadril
	Glúteo máximo	Posterior ao quadril/superficial	Extensão e rotação lateral do quadril
	Piriforme	Posterior ao quadril/profundo	Rotação lateral e pouca extensão de quadril
	Glúteo médio	Posterior ao quadril/profundo	Abdução e rotação lateral do quadril
	Glúteo mínimo	Posterior ao quadril/profundo	Abdução e rotação lateral do quadril
	Tensor da fáscia lata	Lateral ao quadril/superficial	Abdução do quadril
	Grácil	Medial à coxa/superficial	Adução do quadril
	Adutor longo	Medial à coxa/superficial	Adução, rotação lateral e flexão de quadril
	Adutor curto	Medial à coxa/profundo	Adução, rotação lateral e flexão de quadril
	Adutor magno	Medial à coxa/profundo	Adução, rotação lateral e flexão de quadril
	Pectíneo	Medial à coxa/superficial	Adução e flexão de quadril

Adaptado de: Brandina (2014b) e Sacco e Tanaka (2008).

Para completar a análise do exercício de agachamento e aplicar na prática os conceitos apresentados nesse quadro, os músculos que atuam nas articulações do tornozelo, joelho e quadril como executores do movimento serão pontuados.

O agachamento ocorre no plano sagital, e ao considerar a fase ascendente do movimento, os músculos do complexo tríceps sural, quadríceps, isquiotibiais e músculo glúteo máximo encurtam para estender as articulações do tornozelo, do joelho e do quadril, respectivamente.

Por ser um movimento multiarticular, que depende de várias articulações para ser produzido, cada articulação terá um músculo ou um grupo muscular encurtando para produzir o movimento, o que torna a análise do exercício mais desafiadora.

As articulações dos membros superiores também têm movimentos específicos em cada plano anatômico. Eles estão definidos no quadro a seguir:

Quadro 3 – Movimentos articulares dos membros superiores

Articulação	Plano anatômico	Movimento articular	Definição
Coluna vertebral	Sagital	Flexão	Aproximação entre as porções superior e inferior do tronco
		Extensão (flexão plantar)	Afastamento entre as porções superior e inferior do tronco
	Frontal	Flexão lateral	Inclinação do corpo para direita ou para esquerda
	Transversal	Rotação lateral (ou externa)	Giro do tronco para porção lateral do corpo
		Rotação medial (ou interna)	Giro do tronco para porção medial do corpo
Ombro	Sagital	Flexão	Movimento do braço da porção posterior para anterior do tronco
		Extensão	Movimento do braço da porção anterior para posterior do tronco
	Frontal	Abdução	Movimento do braço para porção lateral do tronco, se afastando dele
		Adução	Movimento do braço para porção medial do tronco, se aproximando dele
	Transversal	Rotação lateral (ou externa)	A perna gira para fora em relação à coxa
		Rotação medial (ou interna)	A perna gira para dentro em relação à coxa
		Abdução horizontal	Movimento do braço da porção frontal para lateral do tronco, seguindo a linha do horizonte
		Adução horizontal	Movimento do braço da porção lateral para frontal do tronco, seguindo a linha do horizonte
Cotovelo	Sagital	Flexão	Aproximação entre o braço e o antebraço
		Extensão	Afastamento entre o braço e o antebraço
	Frontal	Abdução	Alinhamento do braço em *varum*
		Adução	Alinhamento do braço em *valgus*
	Transversal	Pronação	Giro do rádio por cima da ulna, aproximando o polegar do tronco
		Supinação	Giro do rádio por cima da ulna, afastando o polegar do tronco
Punho (movimentos principais)		Flexão	Aproximação entre a palma da mão e o antebraço
		Extensão	Afastamento entre a palma da mão e o antebraço

Adaptado de: Brandina (2014b) e Sacco e Tanaka (2008).

Para exemplificar a aplicação prática dos conceitos desse quadro e mostrar como a análise de movimento pode ser mais complexa em alguns casos, acompanhe a descrição do movimento de supino horizontal.

A maior complexidade dessa análise se dá devido à determinação de dois planos anatômicos para descrever o movimento. Tanto a articulação do ombro como a do cotovelo fazem movimentos importantes no supino; se uma delas não apresentar o movimento, o supino não é executado.

Para abaixar a barra em direção ao tronco, na fase descendente do supino, o cotovelo movimenta, aproximando o braço e o antebraço. Ou seja, o cotovelo faz uma flexão, que é um movimento típico do plano sagital. Ao mesmo tempo que o cotovelo se movimenta, o ombro desloca o braço da porção frontal para a lateral do tronco, seguindo a linha do horizonte, então, atua no plano transversal em abdução horizontal.

Assim como para o agachamento, a descrição do movimento de supino só é concluída quando o executor abaixar e erguer a barra, fases descendente e ascendente. Na fase ascendente, a articulação do cotovelo executa o movimento de extensão no plano sagital, já que o braço e o antebraço se afastam; já a articulação do ombro faz a adução horizontal no plano transversal, movendo o braço da porção lateral para a frontal do tronco seguindo a linha do horizonte.

Para os movimentos articulares dos membros superiores ocorrerem na fase ascendente, é necessário que os músculos encurtem (contração concêntrica). Cada músculo ou grupo muscular será responsável por realizar um ou mais movimentos articulares, e a descrição de seu nome, localização e ação consta no quadro a seguir:

Quadro 4 – Nome, localização e ação dos músculos que movimentam as articulações dos membros superiores

	Músculo	Localização	Ação
Complexo do abdome	Oblíquo interno	Lateral ao tronco/profundo	Flexão lateral e rotação lateral da coluna vertebral
	Oblíquo externo	Lateral ao tronco/superficial	Flexão lateral e rotação lateral da coluna vertebral
	Transverso do abdome	Anterior ao tronco/profundo	Compressão do abdome
	Reto do abdome	Anterior ao tronco/superficial	Flexão da coluna
	Eretores da espinha	Posterior ao tronco/profundo	Extensão da coluna vertebral
	Multífidos	Posterior ao tronco/profundo	Estabilização da coluna
	Quadrado do lombo	Posterior ao tronco/profundo	Extensão e flexão lateral da coluna
	Peitoral maior	Anterior ao tronco/superficial	Flexão, adução e adução horizontal de ombro
	Latíssimo do dorso	Posterior ao tronco/superficial	Extensão, adução e rotação medial de ombro
	Deltoide	Lateral à cintura escapular/ superficial	Flexão, adução horizontal, abdução, abdução horizontal e extensão

Complexo do Manguito rotador	Subescapular	Antero-inferior à cintura escapular/profundo	Rotação medial e estabilização anterior e inferior do ombro
	Supraespinhal	Superior à cintura escapular/ profundo	Abdução e rotação lateral do ombro
	Infraespinhal	Postero-superior à escápula/ profundo	Abdução horizontal e rotação lateral do ombro
	Redondo menor	Postero-lateral à escápula/ profundo	Abdução horizontal e rotação lateral do ombro
	Bíceps braquial	Anterior ao braço/superficial	Ação no ombro: ajuda na flexão, adução, adução horizontal, rotação medial e abdução do ombro Ação no cotovelo: flexão e supinação de cotovelo
	Braquial	Anterior ao braço/profundo	Flexão do cotovelo
	Braquiorradial	Lateral ao braço/superficial	Flexão do cotovelo
	Tríceps braquial	Posterior ao braço/superficial	Ação no ombro: extensão do ombro Ação no cotovelo: extensão do cotovelo
	Trapézio	Posterior ao tronco/superficial	Levanta, abaixa e aduz a escápula

Adaptado de: Brandina (2014b) e Sacco e Tanaka (2008).

Da mesma forma como feito para o agachamento, a aplicação prática dos conceitos apresentados no quadro ocorrerá para o membro superior com a descrição dos músculos que participam do supino reto.

No supino reto, o movimento é feito nos planos transversal e sagital. No plano transversal, os principais músculos que realizam o movimento são o peitoral maior e o deltoide, ambos responsáveis pelo movimento de adução horizontal. Para estender o cotovelo, o músculo tríceps braquial deve encurtar, promovendo o levantamento da barra em ação conjunta com os músculos do ombro, peitoral maior e deltoide.

Além da caracterização dos movimentos articulares em cada plano anatômico, é importante considerar que o corpo como um todo também é capaz de executar movimentos de rotação.

Movimentos que dependem de giros do corpo inteiro para ocorrerem são descritos em acordo com seu eixo de execução (HALL, 2013). São eles: longitudinal (ou craniocaudal), transversal (ou latero-lateral) e sagital (ou anteroposterior), conforme vimos anteriormente.

Para discriminar e entender a diferença entre plano e eixo de movimento, imagine um isopor cortado em forma de um cilindro e um palito de churrasco de madeira. O palito representará o eixo do movimento.

Considere que o cilindro está em pé sobre a mesa e o palito é espetado no isopor da sua porção superior em direção à inferior (da cabeça aos pés); este eixo representa o longitudinal no movimento e permite que o isopor gire em torno de si mesmo na posição vertical; como uma bailarina faz ao executar uma pirueta ou um atleta de lançamento de peso faz para impulsionar o objeto antes do lançamento.

Ao manter o cilindro novamente de pé sobre a mesa e espetar o palito de um lado para o outro, tem-se a representação do eixo transversal, pelo qual o isopor pode ser rodado para frente ou para trás. Dois exemplos de movimentos que ocorrem tipicamente neste eixo são o rolamento e os mortais, para frente ou para trás, típicos da modalidade ginástica.

A última possibilidade de espetar o palito no cilindro em pé sobre a mesa é quando ele atravessa o isopor da porção anterior para a posterior, que representa o eixo sagital. Este é o eixo visualizado nos movimentos de rodante da ginástica, popularmente conhecidos como "estrela".

Assim como ocorre com os planos anatômicos, um dado movimento pode ter mais de um eixo de rotação principal. Quanto maior for a quantidade de eixos, mais complexa será a análise do movimento.

2.1 Conceito de torque e braço de alavanca

Os movimentos de rotação nos diferentes planos anatômicos feitos pelas articulações só são possíveis devido à sua capacidade de produzir torques. O torque é definido como uma força rotacional (MCGINNIS, 2015; HALL, 2013).



Observação

A fórmula do torque é definida da seguinte forma:

T = F x d (Nxm)

Onde:

T = É a força rotacional.

F = É a força produzida pelo músculo (interna ou potente) ou recebida do meio ambiente (externa ou resistente).

d = É a distância perpendicular à F ou braço de alavanca, que pode ser interno/potente ou externo/resistente.

A unidade de medida da força torque é Newton (N)/metro (m).

É importante considerar que as grandezas que definem a equação do torque estão posicionadas na mesma linha, portanto, apresentam variação proporcional em seus comportamentos. Assim, para o torque aumentar, a força e/ou a distância deve aumentar.

Conforme McGinnis (2015) e Hall (2013), o nosso corpo sempre trabalha com forças rotacionais, uma vez que os movimentos dos segmentos sempre são feitos em torno de articulações. Para os movimentos articulares ocorrerem, são necessárias as forças rotacionais que **produzem** o movimento

(**torque interno ou potente**) e as forças rotacionais que **impedem** a execução do movimento (**torque externo ou resistente**).

A força envolvida no torque potente é gerada pelo músculo responsável em movimentar a articulação por meio de seu encurtamento, portanto, é a força muscular.

Os músculos desempenham sua força puxando o osso do segmento que deve ser movimentado. Portanto, é no ponto de conexão músculo-osso (origem proximal e origem distal) que a força desempenhada pelo músculo executor do movimento incidirá.

O local de conexão músculo-osso não pode ser alterado e estará a uma determinada distância do eixo articular (articulação responsável pelo movimento). A essa distância entre o ponto de conexão músculo-osso e eixo articular dá-se o nome de braço de alavanca potente (MCGINNIS, 2015; HALL, 2013).

A força envolvida no torque resistente é gerada pelo peso dos segmentos do corpo e/ou pelo peso dos implementos (carga adicional – por exemplo: anilhas). Todas as forças pesos devem ser identificadas no exercício, de todos os segmentos que são movimentados e dos implementos.

Ao considerar a força peso, nela já está embutida a ação da força da gravidade.



Observação

A fórmula da força peso é definida da seguinte forma:

$P = mxg$ (N)

Onde:

P = força peso cuja unidade de medida é Newton (N).

m = Massa corporal do sujeito ou objeto.

g = Aceleração da força da gravidade na direção vertical para baixo.

Outro conceito de Física importante é a definição do centro de gravidade ou centro de massa dos segmentos ou objetos. Esse conceito define que existe um ponto de equilíbrio no objeto, no qual a distribuição de massa ao redor desse ponto se dá de forma homogênea. Portanto, se o objeto estiver suspenso por um fio exatamente nesse local, ele ficará em equilíbrio (parado). Por definição, sempre a força da gravidade atuará nesse ponto para tentar empurrar o objeto ou segmento para baixo (MCGINNIS, 2015; HALL, 2013).

Com base nos conceitos de força peso e de ponto de equilíbrio, o braço de alavanca resistente pode ser encontrado. Para tanto, deve-se traçar a distância entre o vetor de força peso (que incide no centro de massa dos segmentos e implementos) e o eixo articular.

Uma vez que a articulação recebe um torque potente gerado pelos músculos, que favorece sua movimentação, e um torque resistente imposto pelos pesos dos segmentos corporais e dos implementos, que impede sua movimentação, fica claro que existe uma relação de balança entre força potente-eixo articular e força resistente.

Se a força potente for maior do que a resistente, a articulação se movimentará de acordo com a ação do músculo principal do movimento. Mas, se a força potente for menor do que a resistente, a articulação moverá contra a ação do músculo da alavanca e a favor da força da gravidade, e o músculo perde para as forças ambientais.

A compreensão desse conceito pelos profissionais que trabalham na área da saúde é de fundamental importância para determinar a intensidade do exercício em uma sessão de treino.

O exemplo que apresentaremos na sequência mostra como os torques, potente e resistente, são representados no movimento e como podem ser manipulados em acordo com o peso do implemento e a postura corporal do executante do movimento.

A figura a seguir ilustra o movimento de extensão de quadril com o joelho permanentemente estendido. Nesse movimento, o sujeito elevará a coxa para cima e retornará na posição ilustrada na figura.

Por ser um movimento de extensão de quadril, o eixo articular é representado no quadril pelo símbolo ▲. O principal extensor de quadril é o músculo glúteo máximo, que produzirá a força potente (F) do movimento, acelerando a coxa para cima.

Para posicionar adequadamente o vetor F na figura, deve-se lembrar da origem distal do músculo glúteo máximo, ou seja, da região da proeminência anatômica conhecida por tuberosidade glútea do fêmur. Como o músculo glúteo máximo está fixado nessa área do osso fêmur, a coxa será elevada a partir desse ponto de conexão músculo-osso.

A representação do torque potente só estará completa ao desenhar a distância perpendicular entre a força potente e o quadril. A linha que conecta esses pontos é chamada de braço de alavanca potente (BAP), como mostra a figura.

Os torques resistentes do movimento de extensão de quadril dependem das forças pesos dos segmentos corporais que participam diretamente do movimento (Pc, Pp e Ppé), do peso do implemento (Pi) e das distâncias perpendiculares (braço de alavanca resistente – BAR) de cada uma das forças pesos em relação ao quadril (BARPc, BARPp, BARPpé, BARPi). Lembre-se que as forças Pc, Pp, Ppé e Pi sofrem a ação da gravidade e, portanto, são sempre desenhadas para baixo. Elas são posicionadas no centro dos segmentos e do implemento por atuarem em seus respectivos centros de massa.

Veja a seguir a representação dos torques potente e resistente no movimento de extensão de quadril com joelho estendido, onde: F é a força potente, BAP é o braço de alavanca potente, Pc é o peso da coxa, Pp é o peso da perna, Ppé é o peso do pé, Pi é o peso do implemento (caneleira) e BAR é o braço de alavanca resistente.

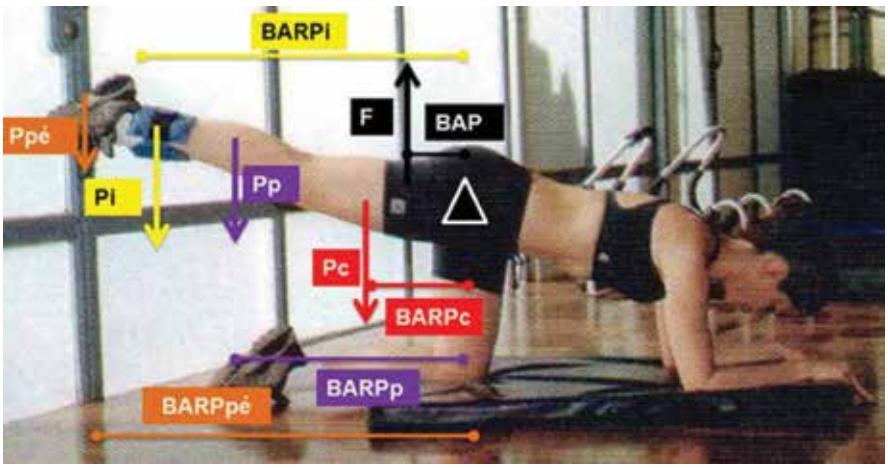


Figura 4 – Representação dos torques potente e resistente no movimento de extensão de quadril com joelho estendido

Para explicar a relação de equilíbrio entre os torques potente e resistente vamos criar uma fórmula que representa o movimento da figura que acabamos de mostrar:

TP = TR (a)

Onde

TP é o torque potente do movimento.

TR é o torque resistente do movimento.

Os torques dependem das forças e das distâncias indicadas na figura. Ao substituir na fórmula (a) o TP pela força potente e pelo BAP e o TR pelas forças pesos e pelos BARs, verifica-se a seguinte equação:

FxBAP = (PcxBARPc) + (PpxBARPb) + (PpéxBARPpé) + (PixBARPi) (b)

Sabendo que BAP é uma distância que nunca mudará, porque a conexão músculo-osso sempre será igual, o único modo de manipular com o torque potente será mudando o valor de F.

Como existe uma relação de balança entre TP e TR, se o valor de Pi for aumentado, para o sistema permanecer em equilíbrio como prevê a equação (=), o valor de F também deverá aumentar. Então, para aumentar a intensidade do movimento de extensão de quadril da figura, com base no conceito de torque, a única estratégia possível será aumentando o valor do Pi.

No entanto, se o valor de Pi diminuir, a produção de força muscular (F) também diminuiria, e mesmo assim o músculo glúteo máximo conseguiria manter o sistema em equilíbrio.

Mas e se o movimento de extensão de quadril fosse realizado como representado na figura a seguir, com o joelho flexionado? O que mudaria? Existiria outra estratégia de manipulação da intensidade do movimento?

Veja a seguir representação dos torques potente e resistente no movimento de extensão de quadril com joelho estendido, onde: F é a força potente, BAP é o braço de alavanca potente, Pc é o peso da coxa, Pp é o peso da perna, Ppé é o peso do pé, Pi é o peso do implemento (caneleira) e BAR é o braço de alavanca resistente:

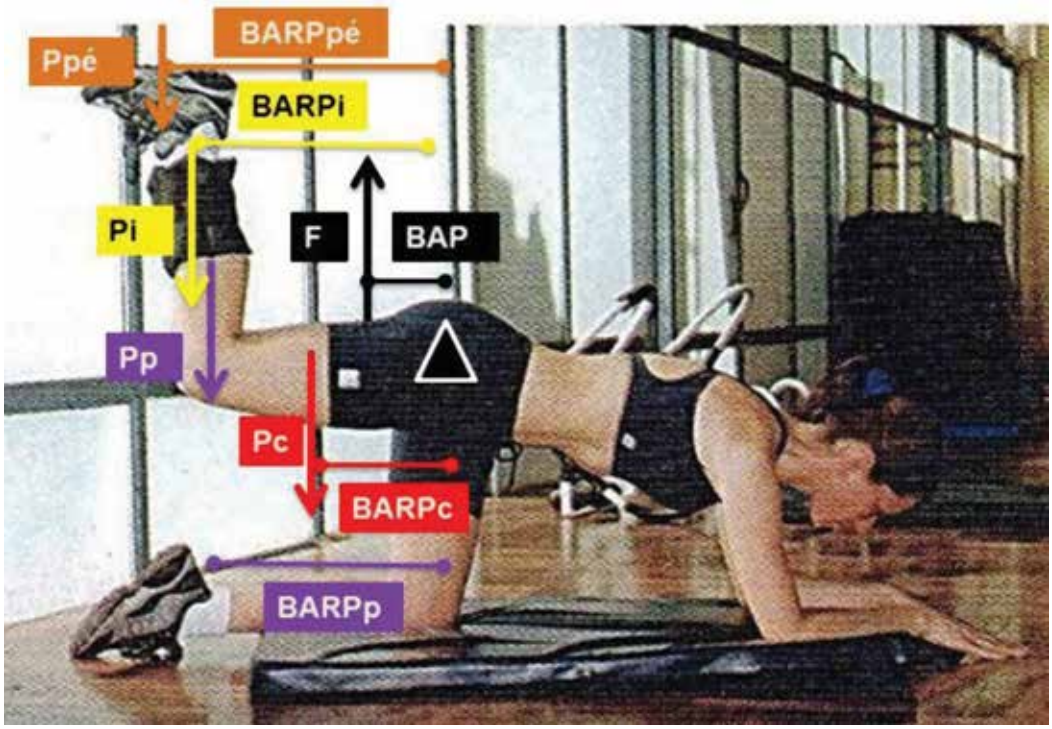


Figura 5 – Representação dos torques potente e resistente no movimento de extensão de quadril com joelho estendido

Perceba que comparando as duas figuras anteriores, o que mudou foram os tamanhos dos BARs de Pp, Ppé e Pi. As representações dos torques potentes e resistentes e das fórmulas (a) e (b) do movimento são iguais. No entanto, ao mudar o valor de BARPp, BARPpé e BARPi, altera-se a postura do movimento. Se os torques resistentes estão mais próximos do quadril, o movimento fica mais fácil de ser executado, então o músculo não precisa produzir tanta força para manter o sistema em equilíbrio.

Como o torque depende de duas grandezas físicas, a força e a distância da força em relação ao eixo articular (braço de alavanca), é possível manipular tanto com a carga como com a postura do sujeito no movimento para alterar a intensidade do exercício, para mais ou para menos.

Conforme a figura a seguir, é possível verificar três tipos de alavancas no corpo humano: interfixa ou de primeira classe, inter-resistente ou de segunda classe e interpotente ou de terceira classe. O que difere uma alavanca da outra é o posicionamento entre o eixo articular e os braços de alavanca potente e resistente. Alterando esses posicionamentos, o objetivo do uso das alavancas para o corpo muda, a fim de equilibrar as forças (interfixa ou primeira classe), tornar o exercício mais vantajoso para o corpo (inter-resistente ou segunda classe) ou tornar o exercício mais difícil de ser executado pelo corpo (interpotente ou terceira classe). Isso ocorre devido ao tamanho do braço de alavanca, que quanto maior, maior será a vantagem do torque ao qual esse braço de alavanca pertence (MCGINNIS, 2015; HALL, 2013).

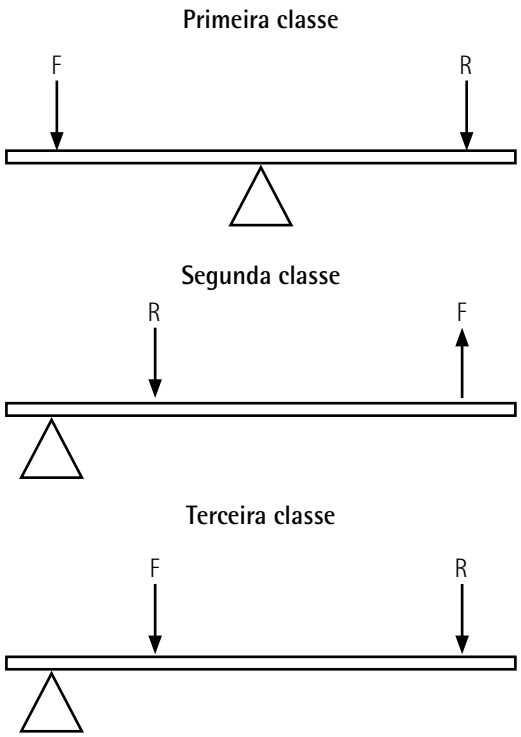


Figura 6 – Ilustração das alavancas do corpo humano, onde F é a força potente e R é a força resistente

Exemplo de aplicação

O movimento popularmente conhecido como "panturrilha", executado na prática da musculação, pode ser realizado nas posturas em pé e em sentado. Em ambas as situações, o eixo do movimento é a articulação metatarso-falangica e o músculo responsável é o complexo tríceps sural, com origem distal no osso do calcâneo.

Sabendo das informações anteriores: A) Represente os torques potentes e resistentes do movimento de "panturrilha" nas condições sentado e em pé; B) Descreva o tipo de alavanca de cada movimento; e C) Reflita sobre o tipo de movimento mais intenso para o complexo tríceps sural, em acordo com a relação de comprimento entre braço de alavanca potente e resistente.

3 BIOMECÂNICA DO TECIDO ÓSSEO

3.1 Caracterização estrutural e funcional do tecido ósseo

Os segmentos movimentados pelas articulações são constituídos por um tecido de grande resistência quanto ao aspecto mecânico. Esse tecido suporta forças intensas; protege regiões nobres do nosso corpo envolvendo órgãos vitais importantes, como o encéfalo, o pulmão e o coração; armazena minerais que participam de processos fisiológicos determinantes para o movimento, como o da contração muscular; e permite a conexão com os músculos para criar as alavancas que o movimentam. Essas são funções do tecido ósseo e sua caracterização estrutural e biomecânica serão discutidas a seguir.

Os ossos longos são constituídos por uma porção central denominada de diáfise ou corpo e por duas extremidades, a epífise proximal (mais próxima da cabeça) e a epífise distal (mais afastada da cabeça).

A diáfise é formada principalmente por osso compacto ou cortical. Nessa área há maior concentração de massa óssea – o aspecto dessa região é similar ao de um marfim branco. Já as epífises apresentam menor concentração de massa óssea, possuindo um aspecto que se assemelha ao do queijo suíço ou ao de uma esponja.

Independentemente da concentração de massa no osso longo, a composição histológica do tecido é a mesma, cerca de 25 a 30% de água e de 60 a 70% de matriz inorgânica e orgânica.

A matriz inorgânica é formada essencialmente por minerais que são obtidos do meio externo a partir dos alimentos e líquidos. Dessa forma, o corpo não é capaz de produzir os componentes da matriz inorgânica, eles são absorvidos pelo sistema digestório após ingestão de alimentos e são encaminhados para o osso por meio dos vasos sanguíneos. São vários os minerais que compõem o osso: bicarbonato, potássio, sódio, citrato, magnésio; entretanto, o mineral de maior importância mecânica e mais abundante do osso é o cálcio, que dá ao tecido grande resistência às forças que incidem no corpo.

Apesar de o cálcio ter grande importância mecânica, a eficiência de sua ação só ocorrerá com a presença dos componentes da matriz orgânica.

A matriz orgânica é composta principalmente por proteínas: glicoproteínas, proteoglicanos e colágeno. O colágeno é a proteína mais importante do osso, por dar ao tecido a flexibilidade necessária para amortecer as forças que incidem sobre sua estrutura. É pela união do cálcio (resistência) com o colágeno (flexibilidade) que ao receber uma força, o osso é capaz de se deformar, a fim de resistir a ela.

Observação

O proteoglicano é uma proteína fabricada pelas células do corpo que resiste às forças de compressão. Ele é encontrado em vários tecidos, como cartilagem articular e ossos.

O colágeno, bem como as demais proteínas, é fabricado pelo próprio organismo. No osso, as células responsáveis pela fabricação dessa proteína são os osteoblastos. O núcleo dessas células, em acordo com o código definido pelo DNA celular, envia mensageiros para os ribossomos dos osteoblastos fabricarem mais colágeno para aumentar a quantidade de massa no tecido ósseo.

Havendo maior quantidade de colágeno na célula, os cristais de hidroxiapatita (massa óssea) são formados, pela união do colágeno fabricado pelos osteoblastos com cálcio trazido pelos vasos sanguíneos até os ossos.

A fabricação de cristais de hidroxiapatita (ou massa óssea) é permanente nos ossos enquanto o organismo está vivo. No entanto, no processo de crescimento ósseo, após a prática de exercício físico e na remodelagem óssea para recuperação de lesões, esse evento comum se intensifica, fato que torna possível o aumento do tamanho longitudinal do osso, o aumento da massa óssea por área de secção transversa e a restauração do formato e função do osso fraturado, respectivamente.

Da mesma forma como há uma célula responsável pela formação do osso, há outra responsável por sua degradação. Os osteoclastos são células capazes de fabricar e jogar sobre o osso já formado um ácido que corrói o tecido. Após a corrosão, a proteína de colágeno e o cálcio são separados: o colágeno é seccionado em partes menores (aminoácidos) que ficam disponíveis para o corpo produzir novas proteínas; enquanto o cálcio é enviado para a corrente sanguínea para participar de outros processos fisiológicos importantes, como o da contração muscular.

Mas, porque existe uma célula que destrói osso, se a resistência mecânica e o funcionamento desse tecido dependem da sua quantidade de massa? Não é verdade que quanto maior a quantidade de massa óssea, maior será a resistência do tecido às forças?

Sim, a maior quantidade de massa óssea garante maior resistência ao tecido, por isso a prática de exercício físico é importante para o osso. Entretanto, vale lembrar que a matriz inorgânica não é produzida pelo organismo e que o osso tem grande concentração de cálcio em sua estrutura.

O cálcio está presente nos processos de emissão de estímulo elétrico pelo neurônio e na contração muscular. Quando não há cálcio suficiente disponível no corpo para suprir a demanda desses eventos fisiológicos, o corpo, para manter seu funcionamento ótimo, removerá o cálcio "armazenado" no osso. Nesse caso, para o corpo é mais importante pensar, acionar o coração e o pulmão e se movimentar do que manter o osso mais resistente.

Portanto, a ação dos osteoclastos no organismo predominará em relação à dos osteoblastos quando o consumo de minerais for insuficiente (baixa ingestão de cálcio) e/ou quando a absorção de cálcio pelo sistema digestório for menos eficiente (processo de envelhecimento).

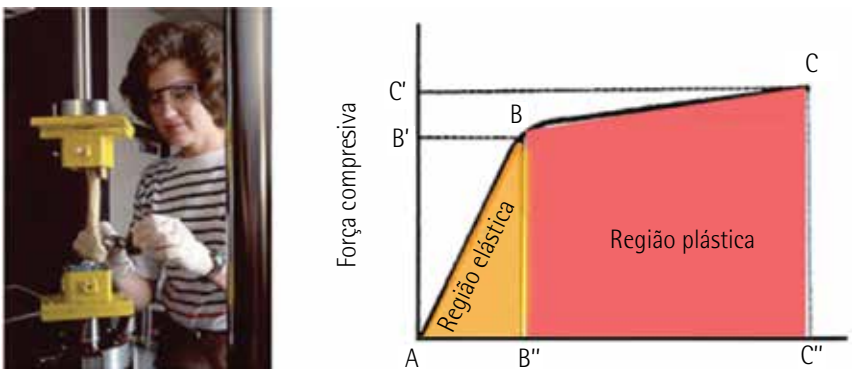
A última categoria de células presente no osso são os osteócitos, que atuam para controlar o metabolismo basal do tecido, indicando se em dado momento, por conta da condição do organismo, serão as células osteoblastos ou osteoclastos que terão sua ação intensificada no osso.

Sabendo da composição histológica do tecido, já é possível entender que os componentes (cálcio e colágeno) e a quantidade de massa óssea são aspectos importantes para entender a resistência mecânica do tecido. Mas como essa resistência pode ser mensurada? E que fatores podem favorecê-la ou comprometê-la? As respostas dessas questões encontram-se no tópico a seguir.

3.2 Caracterização biomecânica do tecido ósseo

Como verificado anteriormente, a biomecânica ortopédica é a área da biomecânica que usa o procedimento experimental denominado de ensaio mecânico *in vitro* para caracterização da resistência mecânica do tecido ósseo.

O experimento consiste em colocar um tecido ósseo cadavérico em uma máquina para aplicar força (estresse mecânico) até a ruptura total do osso. Ao aumentar gradativamente o estresse mecânico sobre o tecido, é possível verificar maior deformação óssea até sua ruptura total. Esse comportamento verificado na curva estresse-deformação, conforme a figura a seguir, representa a resistência mecânica do osso.



(a) (b)

Figura 7 – Ilustração do procedimento experimental do ensaio mecânico *in vitro* do osso (a). Representação gráfica da curva estresse-deformação resultante do ensaio mecânico com a aplicação de força compressiva (b)

Ao analisar a curva estresse-deformação, é possível identificar duas áreas do gráfico: a região elástica e a região plástica.

Lembrete

Os componentes da matriz óssea são de extrema importância para a estruturação de um osso rígido (característica fornecida pelo cálcio), mas com flexibilidade (característica fornecida pelo colágeno) suficiente para amortecer as forças externas aplicadas sobre ele.

Então, para qualquer quantidade de força aplicada ao osso haverá certa deformação, e é isso que garante sua função de suporte de forças externas. A relação entre intensidade de força aplicada e quantidade de deformação gerada no tecido é que define se a situação pode ser lesiva ou não para o osso.

A região elástica mostra melhor capacidade do osso em resistir ao estresse mecânico compressivo, intervalo de A a B. Essa interpretação é possível de ser feita ao comparar o valor de força suportada pelo osso nessa região com o valor de deformação gerado no tecido. Verifica-se que, proporcionalmente, a intensidade da força aplicada ao tecido foi maior do que sua deformação, então o tecido recebeu uma força intensa e deformou pouco, resistindo muito bem ao estresse mecânico nessa região. E ainda, a região é definida como elástica, porque ao remover o estresse mecânico no instante B do gráfico, o osso retorna ao seu formato original sem permanecer com nenhuma deformação residual.

A região plástica representa o comportamento nocivo para o osso, intervalo de B a C. Nela, a força aplicada ao osso foi maior do que na região elástica. Isso gerou uma deformidade ao tecido maior em termos de proporção do que a força aplicada nesse intervalo. Nessa condição, ao remover o estresse mecânico, o tecido não retorna ao seu formato original, ele fica com alguma deformidade residual, o que explica o nome dado a essa região.

No ponto C, verifica-se a ruptura total do osso e sua incapacidade de resistir ao estresse mecânico aplicado sobre ele.



Observação

O tecido com característica elástica é deformado ao receber uma carga de intensidade suportável e retorna ao seu estado original com a remoção da força, como um elástico de escritório. Normalmente é formado por proteína de colágeno.

É importante salientar que o osso está submetido a outros tipos de forças no nosso meio ambiente, além da força compressiva, como as forças de tração, flexão e cisalha (NORDIN; FRANKEL, 2014).



Observação

A força, solicitação mecânica ou carga é uma grandeza física representada por vetor (seta) com direção, sentido e intensidade distinta, o que causa deformação aos tecidos.

Força de compressão: diminui o tamanho e aumenta a largura do tecido.

Força de tração: aumenta o tamanho e diminui a largura do tecido.

Força de flexão: gera uma curvatura no tecido.

Força de cisalha: desloca, em sentidos opostos e na horizontal, as porções superior e inferior do tecido.

As forças de tração e compressão são classificadas como forças verticais, por atuarem na mesma direção do eixo longitudinal do osso, enquanto as forças de cisalha e de flexão são da categoria horizontal, por incidirem na lateral do osso em ângulos distintos (30, 60 ou 90 graus em relação ao eixo longitudinal).

O comportamento mecânico do osso quando recebe as forças verticais é o mesmo apresentado e discutido na figura anterior. Entretanto, ao receber as forças horizontais, o comportamento mecânico muda, indicando maior possibilidade de ocorrência de fraturas. A esse comportamento de mudar a resistência mecânica em acordo com a força que é aplicada ao tecido dá-se o nome de comportamento anisotrópico do osso (NORDIN; FRANKEL, 2014).

A figura a seguir ilustra a mudança do comportamento mecânico do osso quando recebe as forças verticais em comparação com as horizontais. O comportamento mecânico do osso para forças verticais está representado na curva 1 do gráfico. A partir da curva 2 até a 4, as forças aplicadas ao osso são horizontais. Nota-se que na região elástica, a intensidade da força suportada pelo osso na curva 1 é maior do que nas demais curvas 2, 3 e 4, sendo a curva 4 aquela que mostra grande fragilidade do osso para suportar força intensa, pois rapidamente o tecido passa para a região plástica, que é mais nociva e mais fácil de fraturar o osso.

Outra diferença importante entre as forças horizontais e verticais é o comportamento do tecido na região plástica. Novamente, a curva 1 (forças verticais) indica que o osso tem maior capacidade de deformar antes de se romper. As curvas 2, 3 e 4 (forças horizontais) mostram antecipação do ponto de fratura do osso, ou seja, o osso quebra mais rápido.

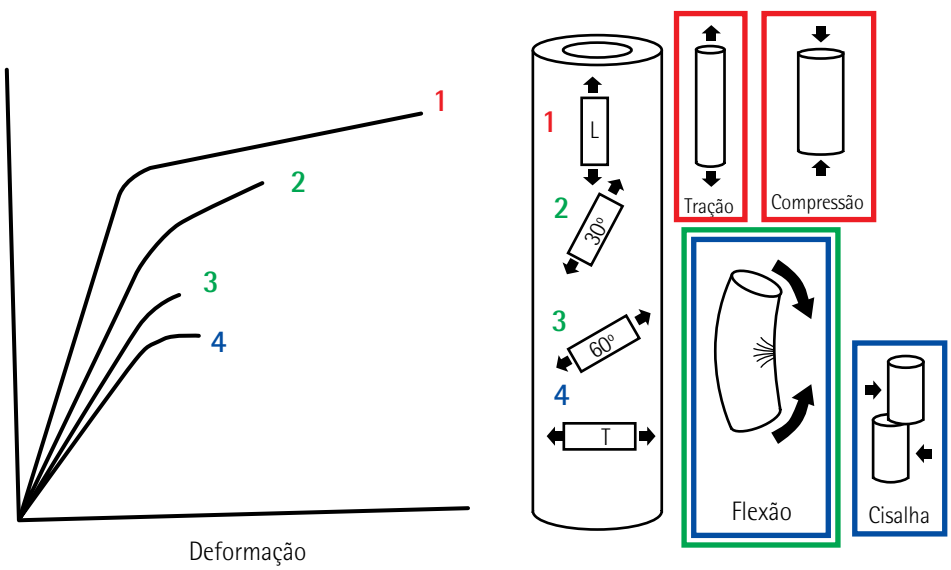


Figura 8 – Representação gráfica da curva estresse-deformação resultando do ensaio mecânico com a aplicação de força compressiva

Mas como proteger o osso das forças horizontais? Em quais situações o corpo está exposto às forças horizontais?

Os conceitos de Pauwels sanam essas dúvidas. O autor descreveu os princípios de construção do corpo, mostrando que os músculos atuam como cintas de tração que se opõem à força da gravidade e transformam as forças de flexão no osso em forças de compressão (NORDIN; FRANKEL, 2014).

A figura a seguir ilustra esse conceito: na condição (a), a distribuição de força no corpo do objeto que representa o osso é irregular, ou seja, um dos lados é mais sobrecarregado do que o outro. Essa situação ocorre no osso quando o músculo não funciona de forma adequada e a tendência no movimento é o objeto curvar, receber a força de flexão. Já na condição (b), verifica-se que a distribuição de forças ocorre por igual na área de secção transversa do objeto. Nesse caso, a força da gravidade tenta empurrar o objeto para baixo e o músculo se opõe a essa força puxando o objeto para cima.

Portanto, a força da gravidade aplicada ao osso de forma isolada gera sobre ele a força de flexão, mas com o auxílio da musculatura, essa força é convertida em força de compressão, a preferida pelo osso por ter maior resistência mecânica.

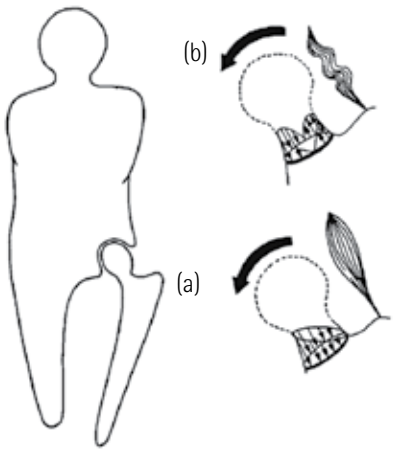


Figura 9 – Representação do modelo do princípio de construção do corpo de Pauwels. Simulação da aplicação da força de flexão no osso (a) e da aplicação da força de compressão no osso (b)

Desta forma, na prática profissional é de suma importância fortalecer a musculatura e controlar o volume e a intensidade do exercício físico para não fadigar o músculo. Somente com esse tecido forte e funcionando de forma adequada no exercício físico é que o osso estará protegido contra as forças de flexão que o fraturam mais facilmente.

Exemplo de aplicação

Consulte um atlas de Anatomia ou encontre uma figura na internet que contenha os ossos do quadril e do fêmur conectados. Perceba que o fêmur é um osso que fica inclinado em relação ao tronco. Essa inclinação cria uma força de flexão no colo anatômico do fêmur.

Sabendo que o osso tem resistências diferentes aos diferentes tipos de força que incidem sobre ele e que a musculatura dos idosos é mais fraca do que a de um adulto, reflita sobre a grande incidência de fraturas ósseas do fêmur no idoso.

3.3 Adaptação do osso ao exercício

Até o momento, sabe-se que o osso prefere a força de compressão. O que é importante destacar nesta parte é que o osso precisa dessa força para aumentar a quantidade de massa por área de secção transversa e tornar-se mais resistente e melhor adaptado ao meio terrestre (HALL, 2013).

Para tanto, forças compressivas de maior intensidade em relação àquela que determinado sujeito aplica no osso em seu dia a dia são essenciais para manutenção da saúde do tecido.

Essa informação define o tipo de atividade preferida pelo osso, que são as desenvolvidas em meio terrestre. Nesse meio, a força da gravidade gera maior estresse compressivo ao osso, principalmente em movimentos nos quais a aceleração do corpo é maior, como em uma caminhada ou corrida rápida, ou naqueles em que a altura de queda para aterrissar no solo aumenta. Esses movimentos dinâmicos e/ou cíclicos garantem maior estresse mecânico e maior frequência de aplicação de forças compressivas ao osso, duas condições que favorecem o ganho de massa óssea.

Os exercícios resistidos (musculação) também são muito interessantes para o desenvolvimento do osso, por ofertarem estímulos compressivos de maior magnitude e abrangerem todos os segmentos corporais (membros inferiores e superiores).

Já o meio líquido interfere na manutenção da integridade estrutural e mecânica do osso, visto que a força da gravidade que atua em um corpo submerso no meio líquido é reduzida pela força de empuxo, o que reduz a magnitude do estresse mecânico compressivo aplicado ao osso. Esse fato, somado ao processo de envelhecimento, facilita a degradação do tecido.

Portanto, ao considerar somente o ganho de massa e de resistência mecânica do osso, atividades em meio líquido não são adequadas por reduzirem a magnitude do estresse mecânico compressivo, tornando-o inferior à magnitude do estresse recebido no cotidiano.

3.4 Caracterização das lesões

Sabendo que os tecidos do corpo estão rotineiramente submetidos às forças do meio ambiente, o erro no planejamento do controle da intensidade e da frequência das forças pode gerar lesões (NORDIN; FRANKEL, 2014; HALL, 2013).

O controle da intensidade do movimento se dá pela quantidade de peso determinada para execução do exercício, pela velocidade do movimento e/ou pela altura de aterrissagem de queda. Em todas essas situações, quanto maior for a quantidade de peso, a velocidade do movimento e a altura de queda do movimento, maior será o estresse mecânico aplicado ao corpo.

O controle da frequência do exercício depende do número de vezes que o praticante sustenta ou recebe as forças. No caso dos movimentos de levantamento de peso, a frequência é dada pelo número de vezes que o executor ergue o peso: quanto maior, maior o estresse mecânico. No caso de movimentos de locomoção (marcha, corrida, salto), a frequência é dada pelo número de vezes que o executor do movimento toca o solo: quanto mais vezes, maior é o estresse mecânico.

As lesões mais comuns são as crônicas, também conhecidas com as nomenclaturas lesões por esforço repetitivo ou lesões por *overuse*. Estas ocorrerem no corpo por erro no planejamento da frequência da atividade e, geralmente, levam o músculo à fadiga. A intensidade da força é baixa ou moderada, mas a frequência é elevada, o que gradativamente comprometerá a estrutura e a função do tecido, levando-o a processos inflamatórios ou fissuras que impedem o uso da estrutura para o movimento (NORDIN; FRANKEL, 2014; HALL, 2013).

As lesões agudas são mais raras no exercício físico, sendo sua ocorrência maior em situações acidentais. Isso porque elas se caracterizam pela aplicação de uma única força muito intensa ao tecido, o que promove o rompimento imediato da estrutura (NORDIN; FRANKEL, 2014; HALL, 2013).

Fica claro que o controle da intensidade e da frequência de forças que atuam no corpo é de fundamental importância para evitar as lesões.

Exemplo de aplicação

No final de 2013, Andersson Silva, um famoso lutador de MMA, ao aplicar um golpe (chute) em seu oponente na luta, sofreu uma fratura óssea aguda. Reflita sobre essa situação relacionando-a ao conceito da resistência mecânica do tecido ósseo aos diferentes tipos de forças.

Você saberia dizer o tipo de força que incidiu no osso do lutador? Por que essa força gerou a fratura no osso do lutador?

3.5 Tecido ósseo de idosos e de crianças

As características estruturais dos ossos de idosos e crianças se distinguem da dos adultos, fato que altera a resistência mecânica desses tecidos.

Os idosos possuem menor quantidade de massa óssea por área de secção transversa quando comparado aos adultos, mesmo se forem idosos ativos. Fatores fisiológicos, como menor capacidade de absorção de cálcio pelo sistema digestório e alterações na concentração de hormônios, que também atuam na absorção de cálcio pelo organismo, facilitam a degradação do osso. Os osteoclastos ficam mais ativos do que os osteoblastos nesse período. Como consequência, o osso perde massa, fica mais frágil, o que facilita seu rompimento (NORDIN; FRANKEL, 2014).

Embora o tecido ósseo do idoso também seja favorecido por forças compressivas de maior magnitude em relação às do cotidiano, é importante lembrar que a quantidade de massa do osso do idoso é menor do que a do adulto e que a musculatura que protege o osso das forças de flexão, no idoso, também está mais fragilizada em comparação com a do adulto. Esses fatores devem ser considerados para adequar o planejamento dos exercícios físicos para esse público, a fim de evitar estresse mecânico excessivo ao osso.

As crianças possuem duas características estruturais importantes em seu tecido: maior quantidade de colágeno do que de cálcio e as cartilagens do crescimento localizadas entre as epífises e as diáfises dos ossos (AMADIO; SERRÃO, 2004).

Ter maior quantidade de colágeno do que de cálcio no osso deixa o tecido mais deformável. Assim, diferente do que ocorre no adulto e no idoso, o osso da criança demora mais para quebrar. No entanto, uma força de grande magnitude pode entortar o osso da criança e prejudicar de forma muito expressiva seu alinhamento postural.

As cartilagens do crescimento presentes nos ossos em desenvolvimento são outra particularidade importante que merece cuidado. Essas estruturas são de duas a cinco vezes mais frágeis do que o tecido ósseo que as circunda, e ao receberem uma força de grande magnitude, podem se romper (AMADIO; SERRÃO, 2004).



Lembrete

A cartilagem do crescimento ou disco epifisário está localizada entre o corpo e as epífises, proximal e distal, do osso. Os osteoblastos atuam nesse local para fabricar colágeno, que se liga com o cálcio e forma os cristais de hidroxiapatita. Esse processo garante o crescimento ósseo.

A cicatrização da cartilagem do crescimento rompida pode gerar a calcificação do tecido. Se isso ocorrer, a área do osso que teve a cartilagem afetada calcificará, comprometendo o crescimento ósseo na região afetada.

A coordenação dos movimentos para controlar o impacto no corpo e a força muscular usada para proteção dos ossos em crianças também se encontram em condições distintas às evidenciadas no adulto, o que torna a cautela para prescrição de exercícios físicos para crianças um fator indispensável para não prejudicar o organismo em desenvolvimento.

4 BIOMECÂNICA DO TECIDO ARTICULAR

4.1 Resistência mecânica das articulações sinoviais

Dependendo do tipo da articulação, há diferença na sua capacidade de movimentação. As articulações sinartroses são imóveis ou pouco móveis, evitando o deslocamento entre as peças ósseas conectadas por ela, como ocorre nas suturas cranianas. As articulações anfiartroses permitem um pouco mais de mobilidade entre as peças ósseas conectadas do que as sinartroses. A sínfise púbica localizada na porção anterior do quadril representa uma dessas articulações.

Sabendo que a biomecânica é a área de conhecimento que estuda o movimento humano, as articulações do corpo humano que realizam movimentos mais amplos e nos diferentes planos e eixos anatômicos são o foco de estudo da área. Essas articulações de grande mobilidade no corpo humano

são classificadas como diartroses. O tornozelo, o joelho, o quadril, a coluna vertebral, o ombro, o cotovelo e o punho são exemplos deste tipo de articulação.

Dada a importância das diartroses para o movimento humano, o estudo do nome, função e resistência mecânica de seus componentes torna-se de grande valia para o profissional da área da saúde. Seus componentes articulares são: membrana sinovial, líquido sinovial, cartilagem articular sinovial, fibrocartilagem (exemplos: menisco, labrum e disco vertebral) e ligamentos articulares (BRANDINA, 2014a; KAPANJI, 2009; SACCO; TANAKA, 2008). Veja a figura a seguir:

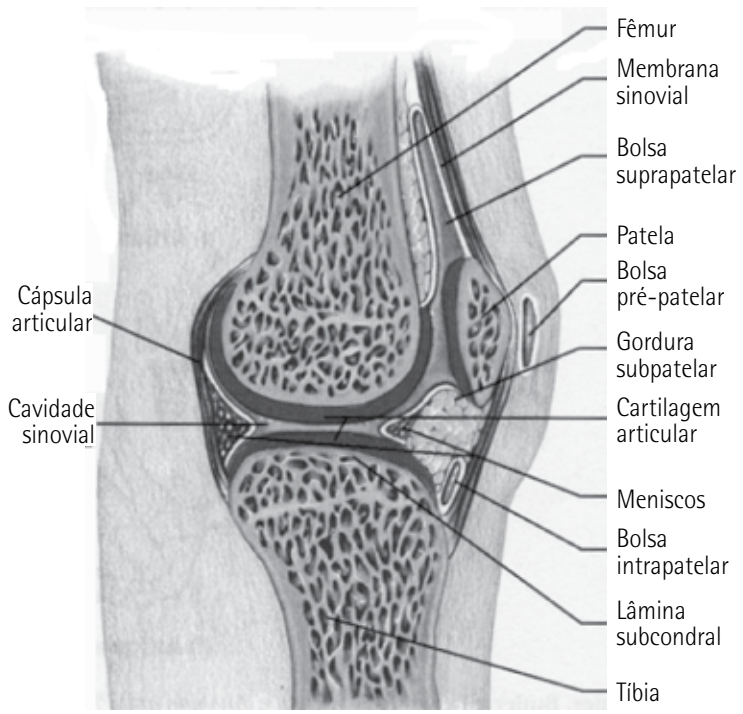


Figura 10 – Representação da localização dos componentes articulares do joelho

A membrana sinovial forma um tipo de bolsa entre as peças ósseas que se conectam em uma articulação. Essa bolsa fica repleta de líquido sinovial; assim, a função da membrana sinovial é delimitar o espaço no qual o líquido sinovial fica, bem como fabricar e renovar esse líquido para manutenção funcional da articulação.

A cavidade sinovial é o espaço interno delimitado pela membrana sinovial e preenchido por líquido sinovial.

O líquido sinovial é o lubrificante natural da articulação. Está localizado entre as cartilagens articulares sinoviais dos ossos, que se unem para formar uma articulação, e favorece o deslizamento entre as cartilagens no movimento, por reduzir as forças de atrito.

A cartilagem articular sinovial fica sobre a superfície da peça óssea, formando um tipo de almofada que se deformará ao ser comprimida contra a cartilagem articular sinovial do osso adjacente da mesma articulação.

Para a cartilagem articular sinovial se deformar, parte do líquido sinovial que está dentro da cartilagem se desloca para a cavidade articular com a aplicação da força compressiva. Essa situação ocorre toda vez que se aplica peso sobre a articulação – por exemplo, ocorre no joelho quando o sujeito sai da posição deitado e fica em pé por algum tempo.

Uma característica da cartilagem articular é que ela não possui inervações e nem vasos sanguíneos. Dessa forma, para as células articulares receberem os nutrientes, dependem do deslocamento do líquido sinovial da cavidade para cartilagem articular e da absorção do plasma sanguíneo pelo periósteo dos ossos. Assim, quando em repouso, parte do líquido sinovial da cavidade retorna para a cartilagem articular, nutrindo essa estrutura. Tal situação ocorre quando o peso aplicado sobre a articulação diminui – por exemplo, no joelho quando o sujeito está em pé e se deita por algum tempo.

A troca de líquido sinovial entre a cartilagem e a cavidade articular torna-se de grande importância para manutenção das células da cartilagem articular. Como o exercício físico promove mais trocas de líquido entre as partes das articulações, este otimiza o funcionamento da estrutura. Assim, além de lubrificar a articulação, o líquido sinovial é responsável por nutrir a cartilagem articular.

A função mecânica da cartilagem articular é de suma importância para articulação. Esta, por meio da troca do líquido sinovial, se deforma para aumentar a área de contato entre as peças ósseas e diminuir a força local (pressão).

Para garantir que a deformação máxima da cartilagem ocorra antes da aplicação de uma força compressiva intensa, é importante realizar um aquecimento específico antes da sessão de treino. Ele deve respeitar a aplicação de forças compressivas repetidas de baixa intensidade, cerca de 25 a 30 repetições, sobre a cartilagem que receberá posteriormente a força principal. O movimento de aquecimento deve ser similar ao movimento da sessão de treino para garantir o aquecimento adequado da estrutura.

Portanto, antes de partir para velocidade de treino de corrida, o sujeito deverá caminhar (por cerca de dois minutos), em seguida trotar (mais dois minutos), para posteriormente atingir a velocidade de treino. No caso de exercícios para membros superiores, o sujeito deverá realizar de 25 a 30 repetições ou dois minutos do mesmo movimento a ser realizado no treino com peso mínimo para aquecimento da cartilagem (BRANDINA, 2014a; KAPANJI, 2009; SACCO; TANAKA, 2008).

As fibrocartilagens são estruturas mais rígidas – portanto, menos deformáveis – do que as cartilagens. É possível comparar a deformação de uma fibrocartilagem à de uma borracha e a de uma cartilagem à de uma bolsa de silicone (BRANDINA, 2014a; KAPANJI, 2009; SACCO; TANAKA, 2008).

Sendo a fibrocartilagem mais rígida, sua função principal será de garantir a estabilidade articular, funcionando como um calço entre as convexidades ou concavidades dos ossos que se conectam. Além disso, como deformam um pouco, aumentam a área de contato entre as peças ósseas, auxiliando na distribuição de forças compressivas. Dois exemplos de fibrocartilagens são o labrum no quadril e os meniscos no joelho.

Vale lembrar que as fibrocartilagens se localizam entre as cartilagens articulares nas diartroses; portanto, caso a fibrocartilagem tenha sua estrutura comprometida, seu processo de cicatrização a tornará mais rígida e sua capacidade de deformação ficará mais restrita. Por sua proximidade com a cartilagem articular, as forças que deveriam ser contidas pela fibrocartilagem incidirão na cartilagem articular, o que propiciará o processo de degeneração nessa estrutura.

4.2 Biomecânica da coluna e do disco intervertebral

O disco intervertebral localizado entre as vértebras da coluna vertebral é uma fibrocartilagem, ou seja, um tecido que se deforma pouco para distribuir as forças compressivas e que garante a estabilidade articular (BRANDINA, 2014a; KAPANJI, 2009; SACCO; TANAKA, 2008).

A deformação do disco para diminuir a pressão entre as vértebras é possível devido às duas estruturas que o compõem: o anel fibroso e o núcleo pulposo, conforme a figura a seguir:

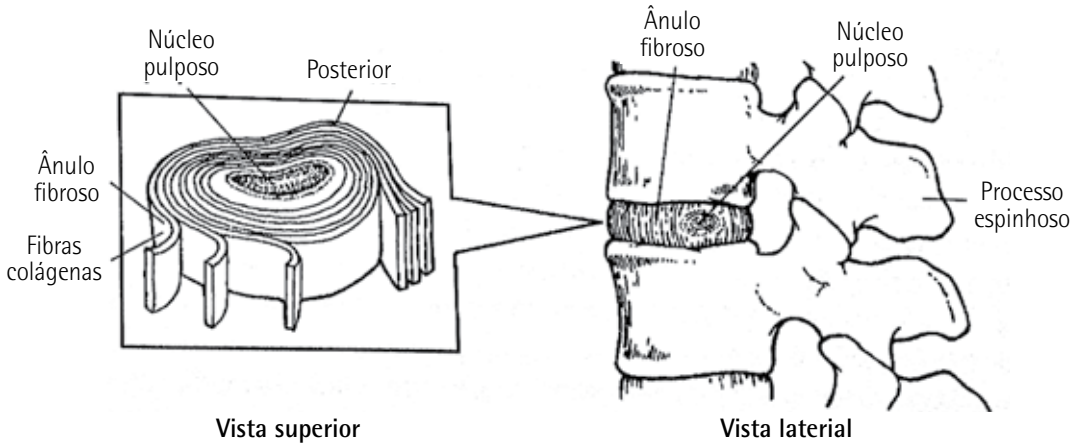


Figura 11 – Ilustração do anel fibroso, do núcleo pulposo (vértebra da coluna lombar, vista superior) e da coluna lombar (vista lateral)

O anel fibroso é um conjunto de cintas formado por fibras de colágeno que ficam ao redor do núcleo pulposo. Tem a importante função de resistir às forças de tração e impedir que o núcleo pulposo saia da área central do disco.

O núcleo pulposo é composto por líquido e proteoglicanos. Os proteoglicanos são proteínas com a importante função de resistir às forças compressivas. Assim, quando as vértebras são comprimidas uma contra a outra, os proteoglicanos contidos no núcleo pulposo controlam sua deformação e impedem seu achatamento total. Tal componente do núcleo pulposo dá a essa estrutura a função de aumentar a área de contato entre as vértebras, distribuir as forças de compressão adequadamente e estabilizar a coluna vertebral (BRANDINA, 2014a; KAPANJI, 2009; SACCO; TANAKA, 2008).

Dependendo da postura adotada pelo sujeito, o disco intervertebral pode sofrer maior ou menor estresse mecânico de compressão. A postura bípede (em pé) é a melhor condição de controle de carga para a coluna vertebral no meio terrestre, perdendo somente para a condição em que o sujeito se encontra.

A curvatura natural da coluna mantém o posicionamento e a distribuição de forças compressivas entre as vértebras na melhor condição de controle de carga possível.

Quando em postura sentado, o torque resistente aumenta, porque o peso corporal é projetado um pouco mais a frente, em função da retificação da coluna, do que na condição da postura em pé (aumenta o braço de alavanca resistente). Com isso, a ação muscular aumenta para impedir que o torque resistente projete o tronco mais à frente do que deve. Com o aumento do braço de alavanca resistente e da força muscular (torque potente), o disco intervertebral, que é o eixo articular que está no meio dessa balança, é mais comprimido, o que aumenta o estresse mecânico na articulação da coluna (NORDIN; FRANKEL, 2014; WILKE *et al*., 1999).

Caso o sujeito fique em postura bípede com a coluna curvada para frente ou carregue um peso na frente do corpo, algo similar à descrição anterior ocorrerá. Haverá o aumento do torque resistente pelo aumento do braço de alavanca resistente, além do aumento do torque potente pelo aumento da ação muscular para controle da flexão do tronco. Conclui-se, então, que o disco intervertebral suportará mais carga compressiva em acordo com a postura adotada pelo sujeito (NORDIN; FRANKEL, 2014; WILKE *et al*., 1999).

As variações de pressão no disco intervertebral em função da postura adotada foram registradas por Wilke *et al*. (1999). O gráfico com os valores obtidos é apresentado na figura a seguir:

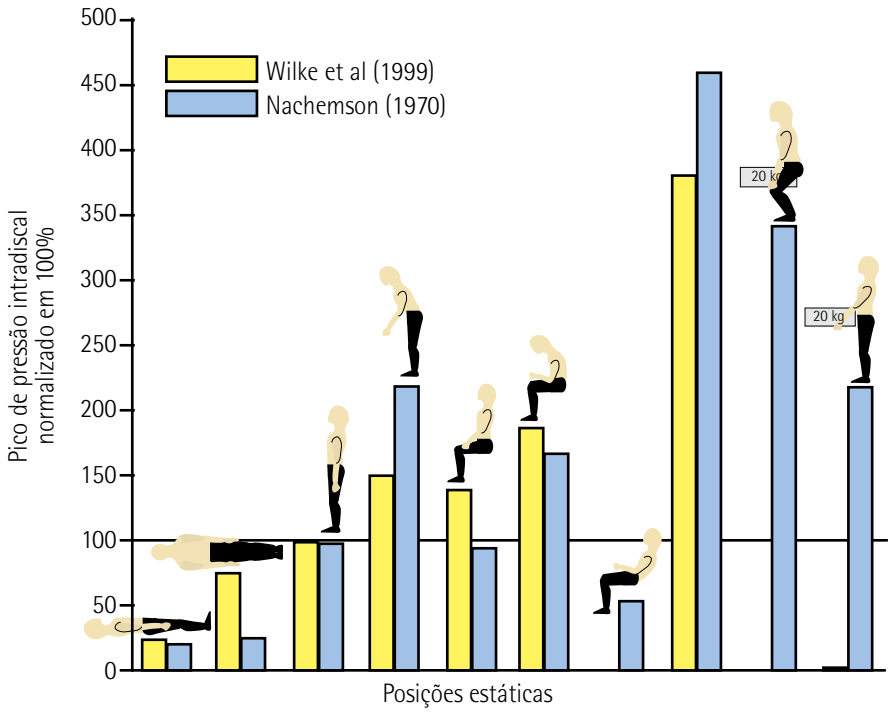


Figura 12 – Gráfico dos valores de pressão no disco intervertebral em diferentes posturas corporais

O conhecimento das posições mais agressivas da coluna vertebral é de grande relevância na seleção de um exercício menos nocivo para sujeitos que possuem algum comprometimento estrutural nessa área.

Com a adequação do posicionamento, o exercício físico pode ser de grande importância no que diz respeito à adaptação estrutural da coluna vertebral: estimula o aumento das proteínas que controlam a compressão (colágeno e proteoglicanos) e o aumento do líquido no disco intervertebral; garante o ganho de massa óssea no corpo vertebral; e fortalece a musculatura que exerce o controle postural e estabiliza a coluna vertebral (NORDIN; FRANKEL, 2014; WILKE *et al.*, 1999).



Saiba mais

Melhore seu conhecimento sobre aplicação de forças na coluna, avaliação postural e condicionamento físico com a leitura do livro:

VANICOLA, M. C.; GUIDA, S. *Postura e condicionamento físico*. São Paulo: Phorte, 2014.

4.3 Biomecânica do ligamento e do tendão

Outra estrutura articular muito importante são os ligamentos. Eles são formados essencialmente por fibras de colágeno em paralelo, com poucas fibras transversais, e têm a importante função de resistir às forças de tração. Estas são aplicadas em função do movimento articular, que ao ser realizado, precisa da estabilidade gerada pelos ligamentos para não exceder sua amplitude e mudar o plano e eixo de ação articular (BRANDINA, 2014a; NORDIN; FRANKEL, 2014; KAPANJI, 2009).

O nome, localização e controle de movimento dos ligamentos articulares principais são apresentados no quadro a seguir:

Quadro 5 – Nome, localização e função dos principais ligamentos articulares do corpo humano

Nome	Localização	Função
Ligamento coracoumeral	Articulação do ombro	Resistir ao deslocamento inferior do ombro
Ligamento glenoumeral	Articulação do ombro	Resistir aos deslocamentos inferiores e anteriores do ombro
Ligamento colateral radial	Articulação do cotovelo	Evita movimentos *varum* excessivos do cotovelo
Ligamento colateral ulnar	Articulação do cotovelo	Evita movimentos *valgus* excessivos do cotovelo
Ligamento colateral anular	Articulação do cotovelo	Evita separação entre os ossos radial e ulnar
Ligamento longitudinal anterior	Articulação da coluna vertebral	Evita movimentos de extensão, flexão lateral e rotação excessivos da coluna
Ligamento longitudinal posterior	Articulação da coluna vertebral	Evita movimentos de flexão, flexão lateral e rotação excessivos da coluna
Ligamento infraespinhoso	Articulação da coluna vertebral	Evita movimentos de flexão e rotação excessivos da coluna
Ligamento supraespinhoso	Articulação da coluna vertebral	Evita movimentos de flexão e rotação excessivos da coluna
Ligamento *flavum* ou amarelo	Articulação da coluna vertebral	Favorece os movimentos de flexão da coluna

Ligamento iliofemoral	Articulação do quadril	Evitar extensão, rotação externa e adução excessiva do quadril
Ligamento pubofemoral	Articulação do quadril	Evitar extensão, abdução e rotação externa excessiva do quadril
Ligamento isquiofemoral	Articulação do quadril	Evitar flexão, adução e rotação interna excessiva do quadril
Ligamento colateral fibular	Articulação do joelho	Evitar abdução e rotação excessiva do joelho
Ligamento colateral tibial	Articulação do joelho	Evitar adução e rotação excessiva do joelho
Ligamento cruzado anterior	Articulação do joelho	Evitar a anteriorização da tíbia
Ligamento cruzado posterior	Articulação do joelho	Evitar a posteriorização da tíbia
Ligamentos tibiofibular anterior e posterior	Articulação do tornozelo	Evitar a inversão do tornozelo
Ligamentos talofibular anterior e posterior	Articulação do tornozelo	Evitar a inversão do tornozelo
Ligamento calcâneofibular	Articulação do tornozelo	Evitar a inversão do tornozelo
Ligamentos tibiotalar anterior e posterior	Articulação do tornozelo	Evitar a eversão do tornozelo
Ligamento tibionavicular	Articulação do tornozelo	Evitar a eversão do tornozelo
Ligamento tibiocalcaneo	Articulação do tornozelo	Evitar a eversão do tornozelo

O tendão, apesar de pertencer ao músculo e não à articulação, tem composição e comportamento muito similar ao do ligamento. Por conta dessa similaridade ele será incluído neste tópico da disciplina.

Localizado nas extremidades dos músculos, o tendão tem a função de conectar o músculo ao osso e transferir a força gerada por esse músculo para aceleração do segmento corporal a ser movimentado. É uma estrutura que resiste às forças de tração e tem em sua estrutura um importante mecanorreceptor para controle do estiramento, o órgão tendinoso de Golgi.

Por serem estruturas que resistem às forças de tração, ligamento e tendão, apresentam um comportamento mecânico muito parecido. O registro desse comportamento é feito pelo método conhecido por ensaio mecânico *in vitro*, no qual ou o tendão ou o ligamento é posicionado em uma máquina que exerce uma força de tração mensurável sobre a estrutura, causando uma deformação por estiramento que leva o tecido ao rompimento total. O resultado desse experimento está representado na curva da figura a seguir.

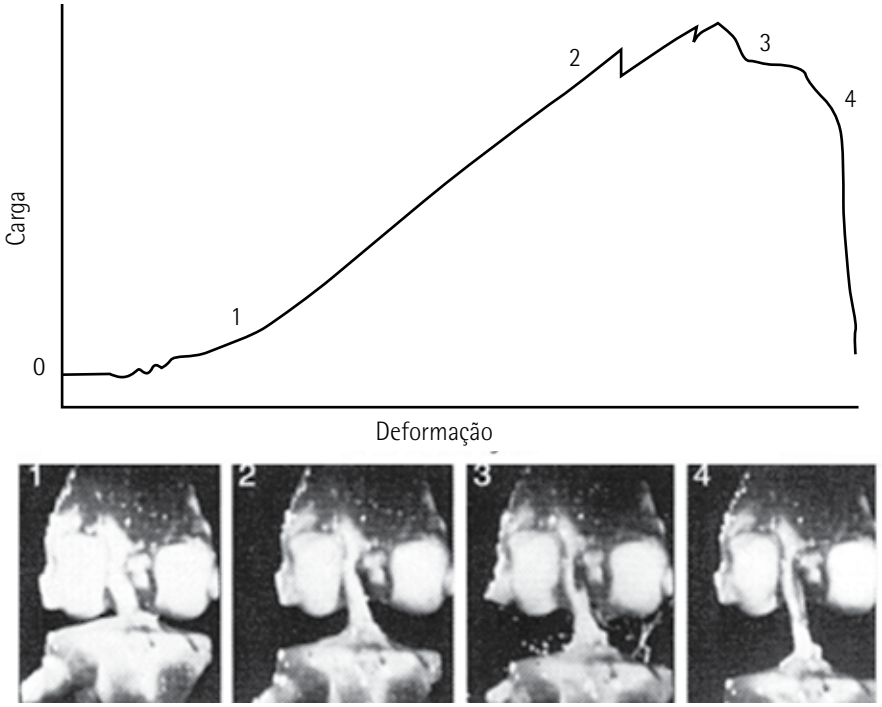


Figura 13 – Ensaio mecânico do ligamento cruzado anterior. Os intervalos 0-1, 1-2, 2-3 e 3-4 do gráfico representam a força de tração e a deformação gerada por essa força no ligamento cruzado anterior nos instantes 1, 2, 3 e 4, respectivamente, ilustrados nas figuras

No intervalo de 0 a 1, é possível verificar que o valor de deformação causado no ligamento foi maior do que a força aplica. Nesse intervalo, as fibras do ligamento que estavam relaxadas cederam à força de tração e se alinharam. Esse comportamento não gera consequências danosas para o tecido, é uma forma de preparação dele para suportar forças de tração mais intensas *a posteriori*.

No intervalo de 1 a 2, percebe-se um comportamento linear entre a força de tração imposta e a deformação causada no ligamento. Nesse intervalo, o ligamento resiste adequadamente à força recebida, e após removê-la, a estrutura não sofrerá nenhum dano residual.

A ruptura parcial das fibras do ligamento é verificada no intervalo de 2 a 3. Nele, a deformação sofrida supera a força de tração aplicada ao ligamento e parte das fibras é rompida, fato que compromete parcialmente a função estrutural, desencadeando processo inflamatório do tecido.

O rompimento total do ligamento é verificado no intervalo de 3 a 4. A força aplicada supera a capacidade de deformação do tecido e este se rompe por completo. Nessa condição, muitas vezes, é necessário um procedimento cirúrgico para reestabelecer a estrutura e função ligamentar.

As lesões agudas nos tendões ou ligamentos são geralmente acidentais ou traumáticas, quando uma única força de tração muito intensa é aplicada na estrutura e causa seu rompimento. Nas aterrissagens de saltos, o tendão do calcâneo pode ser submetido a esse tipo de força; assim como nos movimentos de drible no futebol, o ligamento cruzado anterior pode romper por ser tracionado com muita intensidade.

As lesões crônicas nos tendões ou ligamentos são geradas por muitas cargas de baixa ou moderada intensidade aplicadas ao tecido. O elevado volume de forças de tração sem tempo de recuperação adequado provoca a lesão.

Como toda estrutura do corpo, a ausência de forças de tração sobre o tecido gera o desuso e diminui a resistência mecânica do tecido, deixando-o propício para lesão. Já o exercício físico promove o fortalecimento de ligamento e tendões, saudáveis ou em recuperação de lesões, conforme Nordin e Frankel (2014).

De acordo com Nicole *et al*. (2014), no caso do tendão, para prevenir lesão e garantir maior flexibilidade, um protocolo de exercício que explora a contração excêntrica do músculo com o tendão a ser trabalhado, com seis séries de 15 repetições dinâmicas, garante melhora da estrutura e da função tendínea.

No caso do ligamento, deve-se fazer seis séries de 15 repetições, explorando as forças de tração moderadas e dinâmicas sobre o ligamento.



Resumo

A Biomecânica é uma disciplina que relaciona os conceitos da Física (mecânica), Anatomia Humana (estrutura) e Fisiologia Humana (funcionamento) para estudar a interação do aparelho locomotor com as solicitações mecânicas do meio terrestre.

As áreas de atuação da disciplina são:

- biomecânica ortopédica, que registra a resistência mecânica dos biomateriais;
- anatomia funcional, que estuda a coordenação muscular no movimento;
- biomecânica da reabilitação, que compara movimentos normais e patológicos para melhorar a eficiência do movimento no dia a dia;
- biomecânica do esporte, que estuda gestos esportivos para melhorar a técnica e conquistar resultados de excelência no esporte;
- ergonomia, que estuda o ambiente de trabalho para instruir os sujeitos sobre as posturas corporais adequadas e para desenvolver ferramentas e utensílios em ambiente de trabalho.

O plano anatômico é usado para analisar e descrever os movimentos práticos e entender qual articulação – ou articulações – trabalha mais no gesto motor. Os movimentos de flexão e extensão articular são visualizados no plano sagital do movimento. Os movimentos de adução e abdução das articulações são visualizados no plano frontal do movimento, e os movimentos de rotação das articulações são visualizados no plano transversal do movimento.

Vários músculos participam dos gestos motores para acelerar os segmentos e promover os movimentos articulares de interesse. Essa aceleração é feita pelo encurtamento muscular. Por exemplo, nos membros inferiores, os principais músculos que encurtam para estender as articulações do tornozelo, joelho e quadril são o complexo tríceps sural, o complexo do quadríceps e o glúteo máximo, respectivamente.

Os eixos anatômicos permitem que o corpo gire em torno de si de diferentes formas. O giro em torno do próprio corpo e na vertical é feito no eixo longitudinal, como nas piruetas da dança. O giro executado para frente ou para trás é feito no eixo transversal, como nos mortais na ginástica. O giro executado para os lados é feito no eixo sagital, como nos rodantes na ginástica.

O torque é um conceito usado para manipular a intensidade do gesto motor no treinamento. Para todos os movimentos, existem os torques potentes e os resistentes. O movimento fica mais intenso quando se aumentam as forças pesos e/ou o comprimento dos braços de alavanca resistentes, exigindo mais produção de força pelo músculo, que precisa aumentar o torque potente. O movimento fica menos intenso quando se diminuem as forças pesos e/ou o comprimento dos braços de alavanca resistentes, exigindo menos produção de força pelo músculo, que pode diminuir o torque potente.

O osso é formado por dois elementos importantes para resistir às forças mecânicas: o cálcio, que garante dureza ao tecido, e o colágeno, que o torna flexível e aumenta sua capacidade de suportar forças de alta magnitude por deformar.

O tipo de força que incide sobre osso pode deixá-lo mais suscetível às fraturas. A força vertical é a preferida pelo osso, pelo fato de sua estrutura estar adaptada à força da gravidade que atua no corpo em meio terrestre. A força horizontal é perigosa para o osso, que não a suporta com tanta eficiência quanto à força vertical. No exercício físico, quem converte a força horizontal em força vertical é o músculo, portanto, este não pode ser usado no movimento se não estiver atuando com máxima funcionalidade. Em situações de fadiga muscular, o osso pode romper por receber a força horizontal.

Garantindo a aplicação de força vertical sobre o osso no exercício físico, ele se adaptará aumentando sua espessura. Para tanto, a magnitude da força vertical e sua frequência no movimento devem ser altas, ou seja, um pouco maior do que aquelas que o sujeito está acostumado em seu dia a dia.

As características estruturais e mecânicas dos ossos de idosos e crianças são distintas da dos adultos. Por isso, o planejamento do treino físico deve considerar essas diferenças (o idoso possui osso mais poroso e músculo mais fraco e a criança apresenta osso mais flexível e presença da cartilagem do crescimento) para não superar a resistência mecânica do tecido e ocasionar fraturas no osso.

As articulações do tipo sinoviais são as mais complexas do corpo humano por terem vários componentes para garantir sua estabilidade estrutural. Dentre esses componentes, destacam-se: membranas sinoviais, que fabricam e renovam o líquido sinovial; líquido sinovial, que controla o atrito e nutre a cartilagem articular; ligamentos, que estabilizam a articulação por possuírem fibras de colágeno que resistem às forças de tração e evitam a separação dos ossos no movimento; cartilagem articular, resistente às forças de compressão e que se deforma para aumentar a área de contato entre os ossos; fibrocartilagens, que são estruturas mais rígidas do que as cartilagens e funcionam como importantes calços para os ossos, evitando movimentos instáveis nas articulações.

Para a cartilagem articular funcionar adequadamente no exercício, esta deve ser preparada com forças de compressão de baixa magnitude e cíclicas (de 25 a 30 ciclos) para distribuição correta das forças. A melhor estratégia para garantir a preparação correta é realizando um movimento similar ao movimento da sessão de treino com baixa intensidade e grande frequência.

O ligamento e o tendão muscular são estruturas que resistem às forças de tração por possuírem as proteínas de colágeno. Entretanto, quando se rompem parcial ou totalmente, demora cerca de um ano para que se recuperem, mesmo com estimulação mecânica adequada. Essa manipulação mecânica segue as orientações determinadas por Nicole *et al.* (1994): oferecer somente forças de tração de baixa intensidade e grande frequência (seis séries de 15 repetições).

A hérnia de disco é uma doença do disco intervertebral ocasionada por degeneração estrutural. Ela causa o rompimento das fibras de colágeno do anel fibroso, o que permite o extravasamento do núcleo pulposo. A saída do núcleo pulposo do interior do disco causa dor, formigamento e/ou fraqueza muscular por pinçar as raízes nervosas da medula espinhal.

Exercícios

Questão 1. (ENADE 2010) Considere que um profissional de Educação Física tenha de descrever para os seus alunos os movimentos corporais realizados nos diferentes esportes. Para que melhor compreendam o tema, ele emprega um dos métodos universalmente utilizados, embasado em três dimensões e conhecimento como Sistema de Planos e Eixos, conforme figura abaixo. O movimento em um plano sempre ocorre sobre um eixo que fica perpendicular a esse plano.

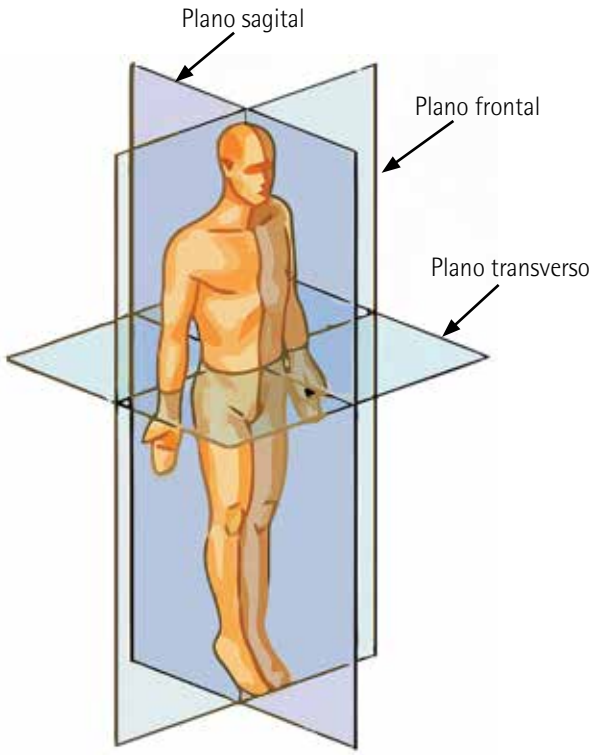


Figura 14

Considerando a situação descrita, avalie as afirmativas a seguir.

I – O movimento de flexão horizontal do braço no arremesso do handebol ocorre no plano sagital.

II – Os movimentos de adução e abdução de braços no nado de peito ocorrem no plano sagital.

III – Os movimentos de adução e abdução de braços no nado borboleta ocorrem no plano frontal.

IV – Os movimentos de flexão e extensão de pernas no ciclismo ocorrem no plano sagital.

V – Os movimentos de rotação na pirueta da ginástica rítmica ocorrem no plano transverso.

Estão corretas apenas as afirmativas:

A) I, II e IV.

B) I, II e V.

C) I, III e V.

D) II, III e IV.

E) III, IV e V.

Resposta correta: alternativa E.

Análise das afirmativas

I – Afirmativa incorreta.

Justificativa: traz os movimentos de flexão horizontal do braço no arremesso do handebol como movimentos que ocorrem no plano sagital. Ao contrário do que inicialmente podemos pensar, a flexão horizontal ocorre no plano transverso, estando o membro superior paralelo a esse plano durante o movimento.

II – Afirmativa incorreta.

Justificativa: apresenta os movimentos de adução e abdução dos braços no nado peito como movimentos que ocorrem no plano sagital. Como já foi dito anteriormente, os movimentos de adução e abdução são realizados no plano frontal, não sendo possível, durante a braçada do nado peito, eles ocorrerem no plano sagital.

III – Afirmativa correta.

Justificativa: descreve movimentos de abdução e adução no nado borboleta como movimentos que ocorrem no plano frontal, e por isso está correta, pois sendo o plano frontal aquele que divide o corpo em duas partes iguais, anterior e posterior, e tendo que os segmentos corporais se movimentam paralelos a ele, não caberia outro plano para esse fundamento da natação.

IV – Afirmativa correta.

Justificativa: coloca que os movimentos de flexão e extensão de pernas no ciclismo ocorrem no plano sagital. Se seguirmos a mesma lógica dos movimentos paralelos aos planos e pensarmos que o plano sagital é aquele que divide o corpo de forma imaginária em metades direita e esquerda, perceberemos que os movimentos de flexão e extensão dos membros inferiores no ciclismo obrigatoriamente terão que ser executados nesse plano.

V – Afirmativa correta.

Justificativa: mostra os movimentos de rotação na pirueta da ginástica rítmica no plano transverso. Se pensarmos que para cada plano existe um eixo correspondente que passa perpendicular a ele e ainda que a articulação deva girar em torno desse eixo, a afirmativa estará correta, uma vez que os movimentos de rotação são executados no plano transverso e no eixo longitudinal.

Questão 2. (ENADE 2010) O profissional de Educação Física, visando aprimorar os saltos de seus atletas para melhorar-lhes o desempenho, faz uso dos estudos da biomecânica. Nessa perspectiva, analise a figura a seguir:

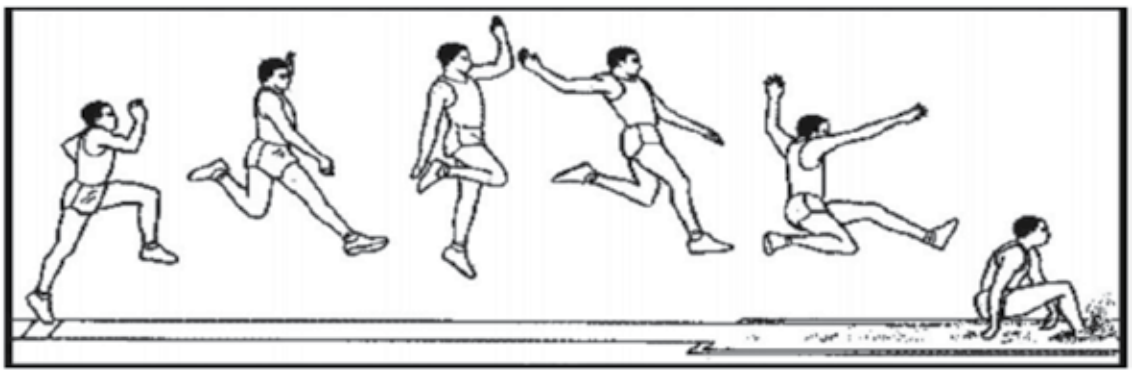


Figura 15

Considerando que o objetivo do salto em distância é o deslocamento máximo do centro de gravidade (CG) em uma dada direção (horizontal), após a análise da figura, conclui-se que o que caracteriza a *performance* (máxima distância) atingida no salto é a distância:

A) Que o CG viaja enquanto o atleta está no ar.

B) Entre a borda frontal da tábua de impulsão e a máxima altura atingida pelo saltador durante o salto.

C) Entre o CG na máxima altura alcançada e o instante de aterrissagem no solo.

D) Entre a borda frontal da tábua de impulsão e o CG do atleta no momento da saída da tábua.

E) Entre o CG do atleta na máxima altura atingida e o tempo de voo.

Resolução desta questão na plataforma.