

MFT 0833 – Biomecânica do Movimento Humano

Biomecânica do Sistema Ósseo

Profa. Dra. Isabel de C. N. Sacco



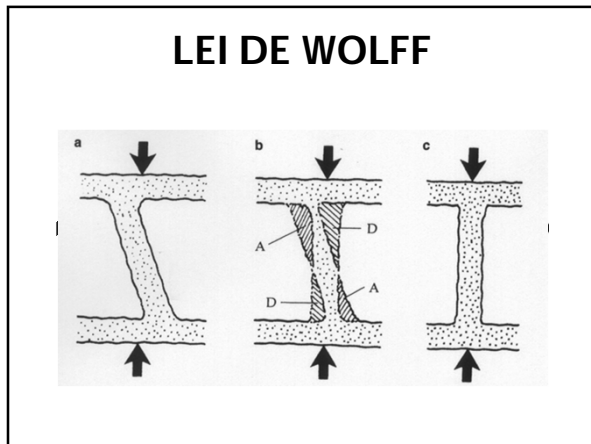
icnsacco@usp.br

<http://www.fm.usp.br/fofito/fisio/pessoal/isabel>



OSSO: tecido vivo

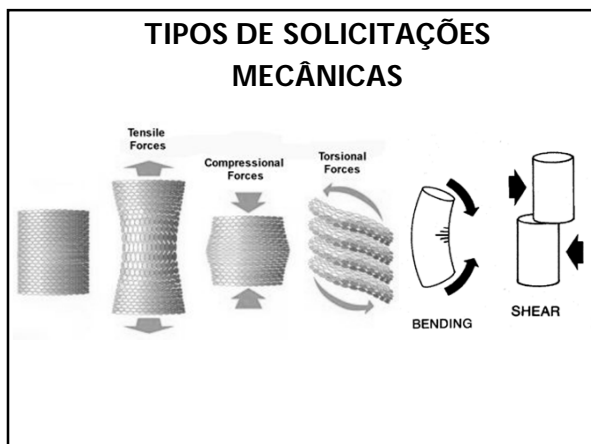
- O osso é um tecido dinâmico que crescem até a idade adulta.
- Após a idade adulta, está sob constante remodelamento
- Sofrem modelamento dado um estímulo apropriado

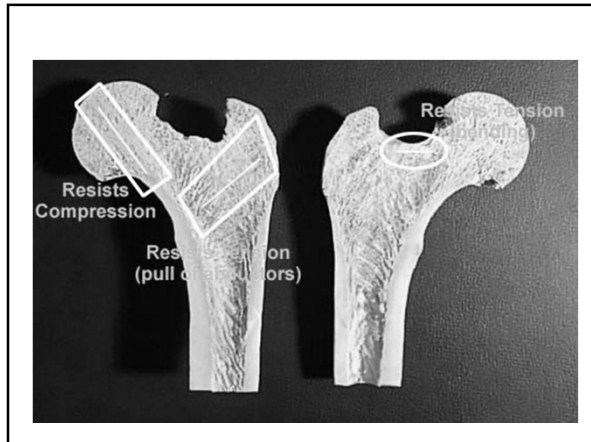


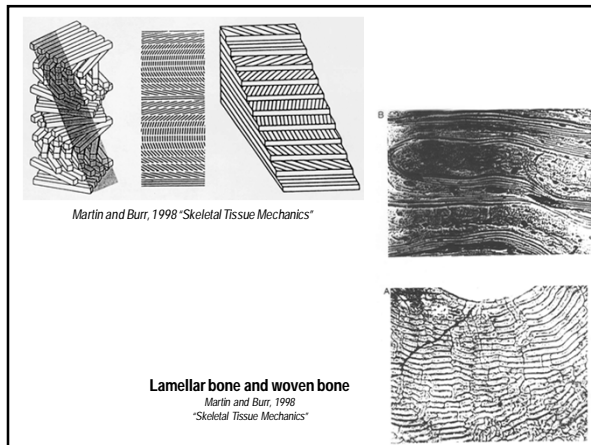
Team Based Learning

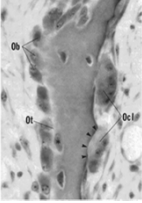
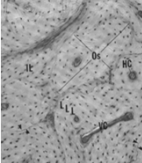
TBL – Susan Hall Cap. 4

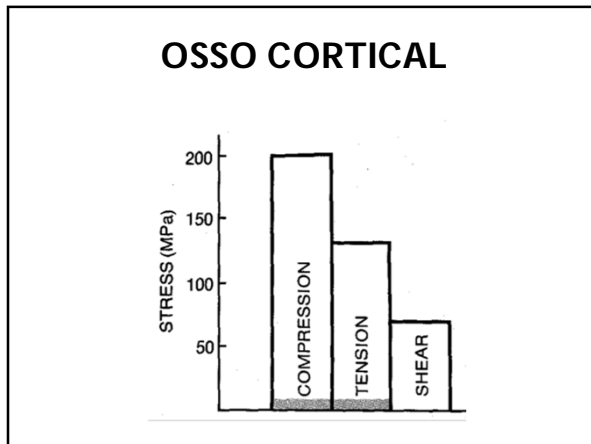
1. Atividade individual – releitura capítulo
2. Provinha individual
3. Provinha em dupla
4. Discussão em grupo
5. Prova geral em dupla

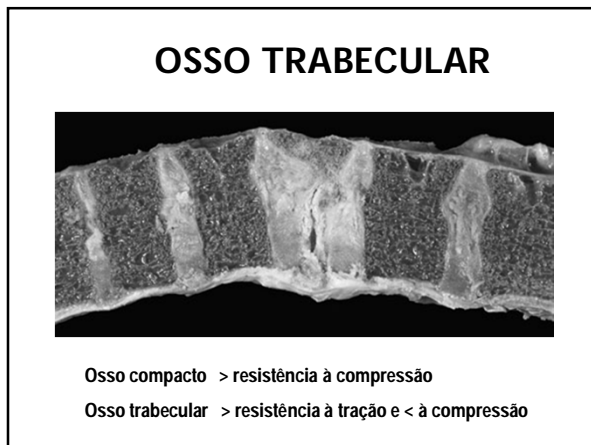






	<p>Osso Trabecular</p> <p>-20% da massa total do esqueleto</p> <p>-Área de superfície total $7.0 \times 10^6 \text{mm}^2$</p>
	<p>Osso Cortical</p> <p>-80% da massa total do esqueleto</p> <p>-Área de superfície total $3.5 \times 10^6 \text{mm}^2$</p>





Princípios da construção do esqueleto Humano

- ☒ **CULMANN:** Mínimo material, máxima produção de força, máxima resistência com economia (ARQUITETURA IDEAL)
- ☒ **PAWELLS:** sob o ponto de vista da engenharia ...
 - esqueleto humano representa uma construção ideal leve
 - a densidade e estrutura dos ossos tem a função de ↓ tensão e flexão (mais prejudiciais)
 - a geometria muscular otimiza o ↓ "stress" sobre o osso
 - ações musculares antagonistas ↓ "stress" articular
 - > área de inserção muscular no osso para ↓ "stress" de pico e melhor distribuir as Forças

ADAPTAÇÕES DO TECIDO ÓSSEO

- **Crescimento:** em comprimento (~20 anos) e em diâmetro em função de fatores genéticos, biomecânicos, fisiológicos e ambientais. *Equilíbrio* entre produção e reabsorção até 40 anos (mulher), até 60 anos (homem)

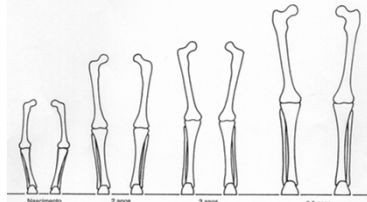
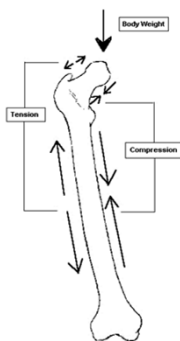


Figura 11.8. Alterações no alinhamento entre o fêmur e a tíbia durante o período do nascimento até seis anos e meio.

ADAPTAÇÕES DO TECIDO ÓSSEO

- **Modelamento e Remodelamento:** aumento e diminuição da massa óssea e do diâmetro (ocorre na idade adulta).
- **Reparo ósseo:** processo pelo qual o osso é reparado após uma lesão.

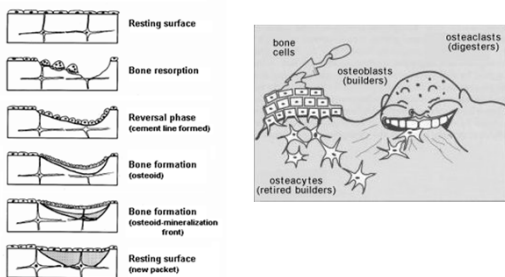


O apoio de carga ou peso + contração muscular: desempenham papel importante na modelagem do osso (Cornwall, 1984)

CÉLULAS ÓSSEAS

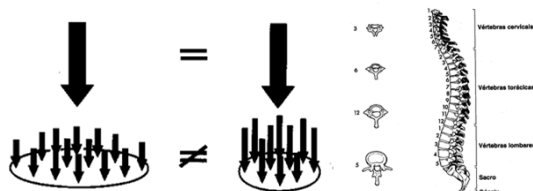
- **Osteoblasto** - célula óssea responsável pela síntese de tecido ósseo, produzem as fibras colágenas e a substância fundamental amorfa, encontradas nas zonas de proliferação óssea.
- **Osteoclasto** - célula óssea responsável pela reabsorção de tecido ósseo, células gigantes que possuem diversos núcleos
- **Osteócito** - osteoblastos envolvidos pela própria matriz que produziram.

CÉLULAS ÓSSEAS



Osso responde ao stress aplicado

Stress: força aplicada dividida pela área do corpo

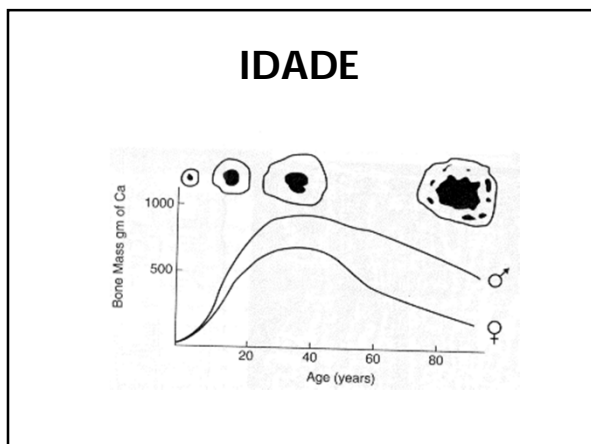


Forças iguais em Áreas diferentes provocam Stress diferente



ADAPTAÇÕES DO TECIDO ÓSSEO

- Aumento massa óssea - aumenta a resistência do osso - processo lento e depende de condições ótimas de sobrecarga mecânica aguda
- Aumento de diâmetro - diminui stress gerado cronicamente

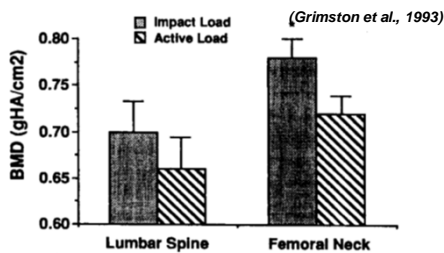


FORMAÇÃO ÓSSEA

- Fukada & Yasuda, 1957 (*J. Phys Soc Japan*, 1957;12:1158-62) estudos com ossos humanos.
- BRIGHTON (1981) estimulação elétrica e magnética estimulam a consolidação de fraturas.
- MARINO (1984) correntes elétricas estimulam a formação de calo ósseo

- Atividade física moderada como suporte do peso, como corrida e saltos, têm impacto mais positivo sobre a deposição óssea do que atividades que não necessitam do suporte do peso, como a natação (*Taaffe et al., J Bone Miner Res 1995; 10:586-93*)
- **Dança X Caminhada:** Dança preservou melhor a integridade óssea de mulheres (pós-menopausa) do que a caminhada. Ambas as atividades condicionaram adaptações biopositivas (*Zetterberg et al., 1990*)
- **Soldados:** Observa-se grande aumento (5 - 10 %) da massa óssea de recrutas, após 16 semanas de treinamento. Grupo apresenta alto índice de lesões ósseas.

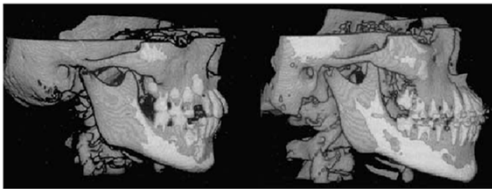
Densidade óssea em crianças (12-13 a) em função da atividade física



Carga ativa: Contração muscular (natação)
 "Impacto": 3 X PC (corredores, ginastas, dançarinos)

- **Tempo para adaptação:** Após 3 meses de atividade, corredores não apresentaram ganho significativo da massa óssea.

- Estímulo efetivo mínimo que aciona formação óssea. Se este estímulo for $<$ \Rightarrow não altera; se for $>$ e raramente aplicados \Rightarrow danos.



Alteração da densidade óssea devido a magnitude da força de mastigação (crescimento)

(Usui et al, 2003)

- **Diferentes modalidades \Rightarrow diferente densidade óssea:**
 - **Fêmur** - levantador de peso $>$ arremessador $>$ corredor $>$ futebol $>$ nadadores (\cong sedentários)
- **Astronautas** apresentam grande excreção de cálcio através da urina. Após 1 ano de permanência no espaço (Marte) podem ocorrer **perdas** de massa óssea da ordem de **25 %**.
- Indivíduos acamados sofrem severa perda do tecido ósseo (1% / sem)
- Steady State de perda óssea é atingido após perda da ordem de 30 a 40%

PIEZOELETRICIDADE NO OSO

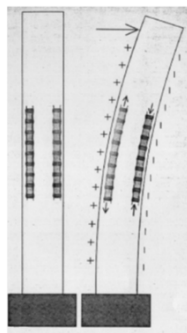
Alguns cristais orgânicos que compõem o tecido ósseo (**Cristais de hidroxiapatita** $Ca_{10} [PO_4]_6 [OH]_2$) podem gerar um potencial elétrico quando deformados (BASSETT, 1967).



Piezo (grega- *piezin*) = pressão

PIEZOELETRICIDADE NO OSO

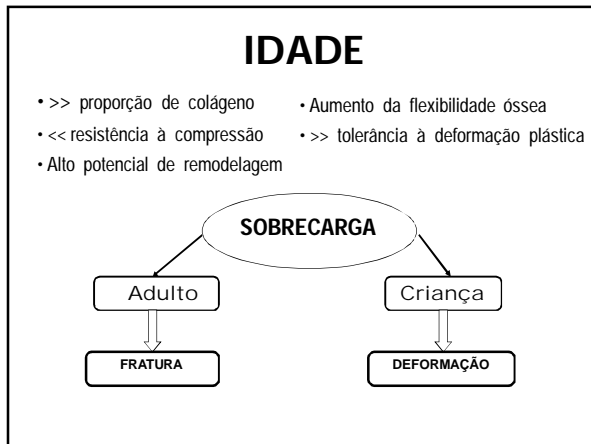
aplicação de cargas \Rightarrow produção de potenciais elétricos \Rightarrow estimula a formação óssea



- **Compressão** \Rightarrow carga negativa \Rightarrow construção
- **Tração** \Rightarrow carga positiva \Rightarrow reabsorção

IDADE E SEXO

- O **envelhecimento** é um fator significante que interfere diretamente na resistência à fratura pelo osso, no módulo elástico e na porcentagem de colágeno.
- O **SEXO** apresenta interferência nas propriedades ósseas: na resistência à fratura pelo osso, sendo maior no homem e na sua porosidade, sendo maior na mulher de mesma idade. (Wang et al, 2000)

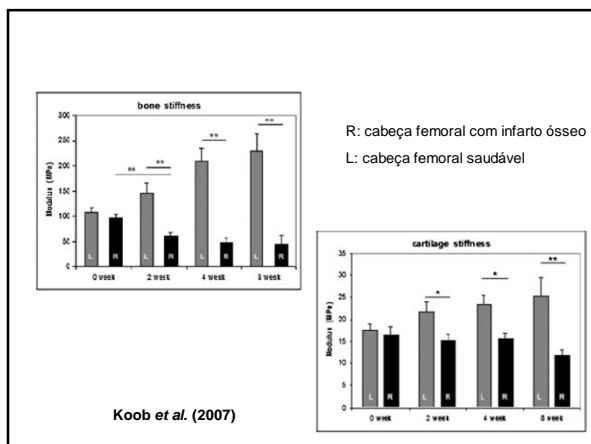


SITUAÇÕES PATOLÓGICAS

- **Normal:** Atividades de Impacto → ↑Produção de massa óssea
- **Patológico:** Carga Mecânica pode acarretar deformação óssea
- Koob *et al.* (2007): em ossos animais induzidos a necrose isquêmica há deterioração das propriedades mecânicas da epífise óssea e da cartilagem epifisária (↓ resistência à compressão), mais expressiva no osso devido a redução progressiva do conteúdo mineral ósseo.

Week	Mineral (L)	Mineral (R)	Collagen (L)	Collagen (R)
0	22	22	11	11
2	22	22	11	11
4	22	22	11	11
6	22	22	11	11
8	22	22	11	11
10	22	22	11	11

R: cabeça femoral com infarto ósseo
L: cabeça femoral saudável



EFEITOS DO ÁLCOOL

- A presença de **osteoporose** em homens de meia idade esta freqüentemente associada ao **alcoolismo**.
- Abuso de álcool deve ser considerado um **fator de risco** para **osteoporose**: freqüentes diminuição de formação óssea, perda de massa óssea, e aumento da incidência de fraturas em alcoólatras.
- Álcool também tem mostrado reduzir a formação óssea em humanos e animais saudáveis e diminuir a proliferação de osteoblastos.

EFEITOS DO ÁLCOOL

- Nem todos estudos detectaram diferenças significativas entre a massa óssea de homens alcoólatras e não-alcoólatras (Odvina et al, 1995; Pumarino et al, 1996).
- Alguns estudos ainda apresentam **nenhuma diferença**, ou ainda, **maior densidade mineral** relacionada ao consumo de álcool, sendo este efeito mais notável em mulheres (Feskanich et al, 1999; Hoidrup et al, 1999)

EFEITOS DO ÁLCOOL

- De forma geral, as evidências suportam os efeitos deletérios do uso crônico do álcool nos ossos de uma sub população de homens e um efeito neutro mas geralmente benéfico causado pelo consumo moderado de álcool por mulheres (Turner, 2000).

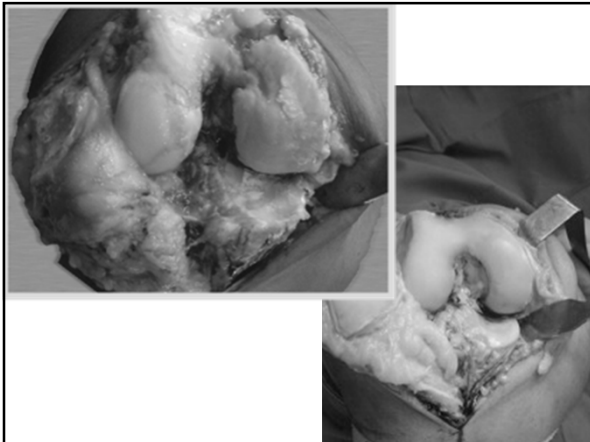
Fito - Estrogênios

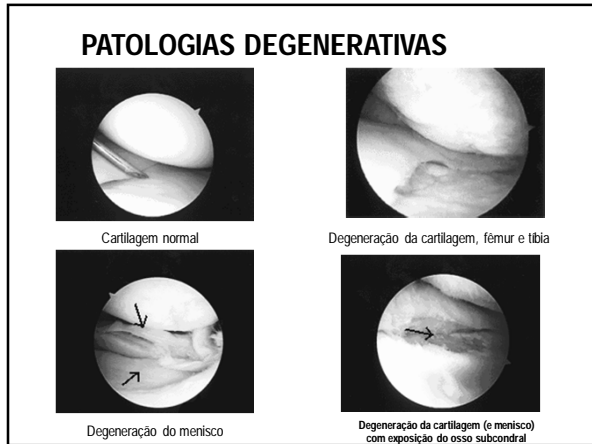
- Ótimas dosagens estrogênicos tem apresentado efeitos modestos e positivos no tecido osseo (Coxam, 2003)

Algumas questões ainda não foram respondidas:

- Qual é a dosagem ideal?
- Homens e mulheres respondem da mesma maneira?
- Qual é a amplitude desse potencial de proteção do tecido ósseo?
- Quais são os efeitos metabólicos e suas possíveis conseqüências indesejáveis?

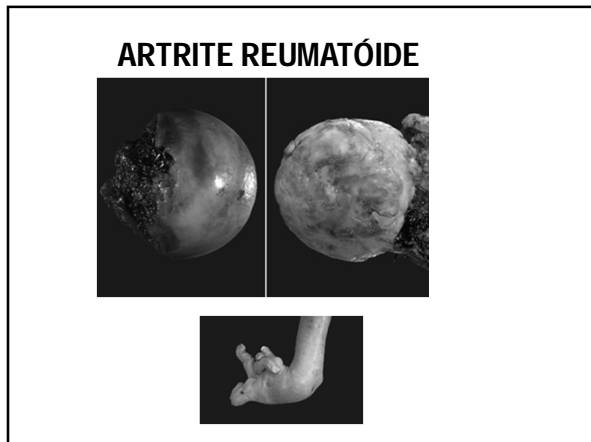
Biomecânica dos Tecidos Articulares













Aspectos Biomecânicos do Sistema Articular

Componentes:

- **Cartilagem articular:** 1- 5 mm de espessura (diminui com a idade); deformável; avascular e de baixa taxa metabólica; não regenera. Funções de transferir forças entre as peças ósseas; distribuir as forças nas articulações; reduzir atrito.
- **Disco fibrocartilaginoso:** otimiza a função da cartilagem; estabiliza a articulação; absorção e distribuição de cargas; melhora o ajuste articular.

Aspectos Biomecânicos do Sistema Articular

Componentes:

- **Tendões:** transmitir forças entre músculo e osso e armazenar energia elástica; sua inserção é de forma a minimizar o stress; adapta-se ao exercício: ↑ resistência e tamanho.

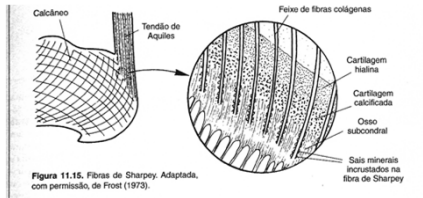


Figura 11.15. Fibras de Sharpey. Adaptada, com permissão, de Frost (1973).

Aspectos Biomecânicos do Sistema Articular

Componentes:

- **Tendões:** Qto mais curto e espesso, < distensibilidade e dissipação de energia. MI - longos e complacentes - > economia de energia locomoção)
- **Ligamentos:** limite elástico e plástico = deformação das propriedades; com ↑ stress = hipertrofia

Propriedades Biomecânicas do Tecido Conjuntivo

- ❖ Materiais viscoelásticos tem propriedades carga-dependentes:
 - Sobrecarga prolongada = creep (deformação lenta)
 - quando os são sobrecarregados rapidamente: maior resistência a deformação do que a resistência exibida quando estão sobrecarregados mais lentamente.
 - Qto maior a duração da aplicação da carga e magnitude: maior a deformação.

Propriedades Biomecânicas do Tecido Conjuntivo

- **ELÁSTICOS:** deformação diretamente proporcional à carga ou stress (lei de Hooke $p/$ uma mola) e
- **VISCOSOS:** deformação dependente do tempo que a carga atua, a taxa de deformação é diretamente proporcional à carga (modelo de Newton $p/$ um amortecedor).

Propriedades Viscoelásticas do Tecido Conjuntivo

- **RELAXAMENTO POR STRESS:** se um tecido viscoelástico é alongado e mantido $c/$ um comprimento constante, o stress neste comprimento irá gradualmente diminuir com o tempo.
- **CREEP:** se um tecido viscoelástico é mantido sobre um mesmo stress, ele irá gradualmente alongando (deformando).

Propriedades Biomecânicas do Tecido Conjuntivo

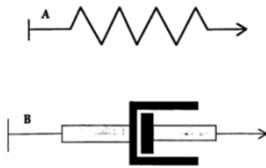


Figure 1. The two fundamental elements of a viscoelastic model. A, the Hookean body: This perfect spring provides a model for elastic behavior. Deformation is proportional only to force. B, the Newtonian body: Here, a hydraulic piston, or dashpot, containing viscous fluid provides a model for viscous behavior. The velocity of dashpot displacement is directly proportional to force.

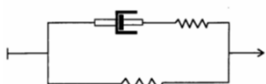


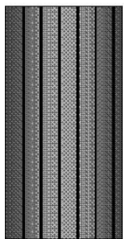
Figure 2. Representative viscoelastic model. The spring and dashpot can be combined in a series or parallel to demonstrate viscoelastic behavior.

Tipos de Colágeno e distribuição nas estruturas articulares

Tabela 12.1 Características dos 4 tipos principais do colágeno

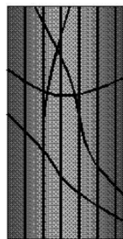
Tipo	Distribuição	Células produtoras	Grau de polimerização	Função
I	Derma, tendão, osso, pigmentos (fibras de colágeno)	Fibroblastos	Máxima — fibras e feixe de fibras	Resistir à tensão
II	Cartilagens	Condrócitos	Pequena — só forma fibrilas	Resistir à pressão
III	Músculo liso, órgão hemopoiético, nervos (fibras reticulares)	Músculo liso, células reticulares	Média — só forma fibras finas	Resistir à tensão com a elasticidade
IV	Lâminas basais	Células epiteliais, endoteliais, musculares	Nenhuma — as moléculas se associam formando uma malha submicroscópica	Suporte, filtração, barreira

TENDON



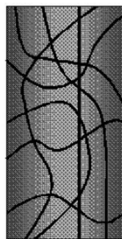
parallel

LIGAMENT



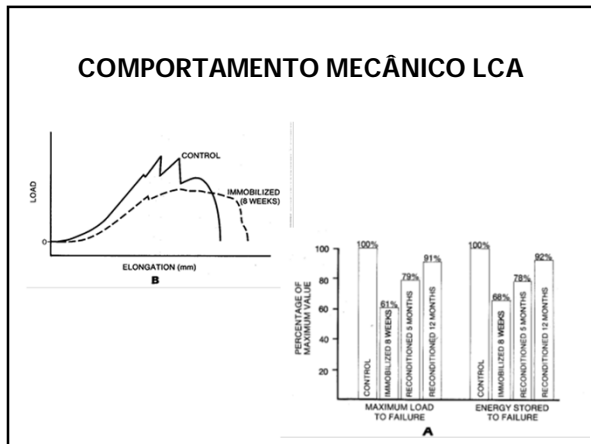
less parallel

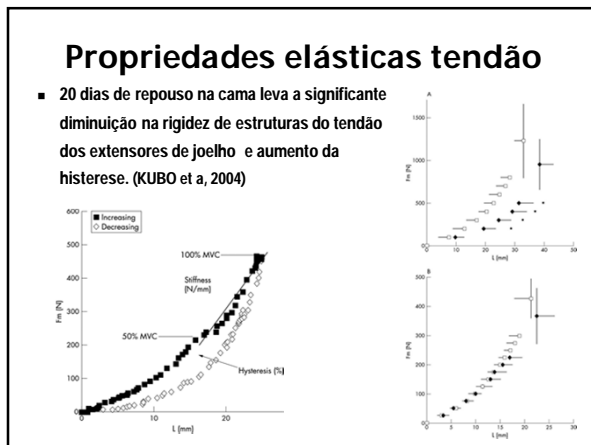
SKIN



random







TENDÃO: EFEITO DO DESUSO

- ✓ Ratas fêmeas em crescimento
- ✓ Toxina Botulínica no músculo tríceps sural
- ✓ Desuso não afeta: peso, comprimento, crescimento (10 sem de vida), rigidez, força até falência (ensaio mecânico) quantidade de glicosaminoglicanas
- ✓ Desuso afeta viscoelasticidade
- ✓ Efeito <<< comparado ao efeito no osso e músculos (vascularização)

Eliasson et al. (2007)

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MÚSCULO E TENDÃO

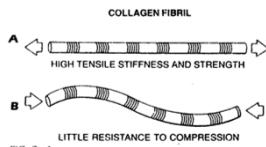
- O frio e o calor têm mostrado afetar as propriedades contráteis dos músculos e distensibilidade de tendões. Razões não claras...
- ... com o uso do calor de forma aguda prévia a uma sessão de alongamento ou exercícios, espera-se mudar as propriedades viscoelásticas do tecido muscular e colágeno e portanto ganhar mais alongamento. O frio, ao contrário, permitiria um maior "retraimento" destes tecidos dificultando o alongamento.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MÚSCULO E TENDÃO

- Kubo et al (2005) verificaram que as propriedades mecânicas do fascículo muscular, tendão e aponeurose do gastrocnêmico medial durante o alongamento passivo não mudaram após imersão no frio ou no calor (42º por 30 min).
- Do ponto de vista prático as aplicações de pacotes de gelo ou calor não mudam a elasticidade do músculo e tendão.

Cartilagem Articular

- **Colágeno** (10 a 30%) - alta resistência a tração, ineficiente quando comprimido.



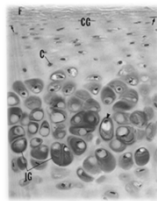
- ✓ Sobrecarga prolongada = creep (deformação lenta)

Cartilagem Articular

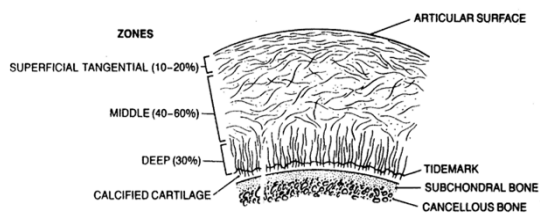
- **Proteoglicanas** (3 a 10%) - Glicoproteínas formada de sub-unidades de dissacarídeos unidos por um núcleo protéico. Alta resistência à compressão. Estão extremamente comprimidos pela teia de colágeno.

Cartilagem

- **Água** (60 a 87%)
- **Células** (5%)
 - **Condrócitos**: Variam de tamanho, formato e densidade em função da localização. Responsáveis pela síntese e degradação da matriz (Proteoglicanas e Colágeno).



Disposição das fibras de colágeno na cartilagem articular



Mecanismo pelo qual a cartilagem articular suporta estresse em compressão

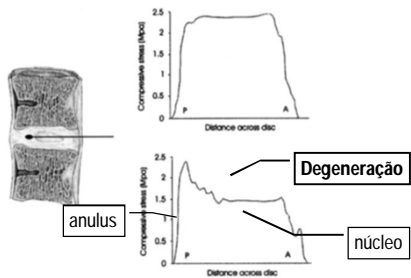
- Proteoglicanas + Colágeno + Fluido ⇔ Gel que funciona como uma “esponja” de baixa permeabilidade. Capacidade de deformação.
- Absorção-retenção do fluido leva alguns minutos, fato que permite que a cartilagem mantenha suas características biomecânicas.

DISCO INTERVERTEBRAL

- Com o envelhecimento, ocorre alteração da quantidade de água e proteoglicanas: seu número diminui e é menor entre L5- S1 e essa degeneração é maior anterior.
- Não ocorrem mudanças substanciais no conteúdo de colágeno.
- Mudança da distribuição da carga do núcleo para o anulus que aumenta em até 160% o seu pico de stress.
- O anulus aumenta em 80% sua largura funcional para compensar a degeneração e diminuição da capacidade do núcleo de absorver cargas (50%)

Ferguson & Steffen(2003)

DISCO INTERVERTEBRAL



Ferguson & Steffen(2003)

Efeitos da imobilização no sistema articular

Quadro 2-4. ALTERAÇÕES NA ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DAS ARTICULAÇÕES, EM SEGUIDA A UMA IMOBILIZAÇÃO PROLONGADA

<i>Estrutura</i>	<i>Alterações Devidas à Imobilização Prolongada</i>
Sinovial	Proliferação de tecido conjuntivo fibroadiposo no espaço articular e formação de aderências
Cartilagem	Aderência de tecido conjuntivo fibroadiposo à superfície da cartilagem. Atrofia da cartilagem e diminuição no conteúdo de água e proteoglicanos
Ossos	Osteoporose regional
Ligamento	Desorganização do arranjo em paralelo das fibras e diminuição no conteúdo de água e proteoglicanos
Inserção de ligamento	Destruição das fibras do ligamento, devido à atividade osteoclástica

Adaptado de Akeson et al.²⁸

Questões Casa:

1. Qual a importância do aquecimento prévio a atividades físicas para o sistema articular.
2. Após lesão, qual a importância da reabilitação cinesioterapêutica para as características biomecânicas dos tendões, ligamentos, cartilagens e disco fibrocartilaginoso?
3. Discuta as alterações do tecido ósseo em função do ganho de massa corporal crônico.
4. Quais os efeitos da marcha militar e de uma missão espacial de 1 ano (astronauta) sobre o tecido ósseo?
5. Discuta as **INDICAÇÕES** da natação e da ginástica olímpica para as crianças.
