

Revisão

Estabilidade articular da coluna vertebral: teorias contemporâneas e novos paradigmas

Back stability: contemporary theories and new paradigms

Vinicius Cunha Oliveira, M.Sc.*, Leandro Inácio Bicalho*, Thiago Barbabela Soares*, Rafael Silva Dornellas**

.....

*Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte,

**Departamento de Fisioterapia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG

Resumo

Introdução: O conhecimento dos mecanismos de instabilidade, bem como dos de controle e interação dos subsistemas passivo, ativo e neural para o alcance da estabilidade articular da coluna ainda é controverso. Explicações distintas e muitas vezes conflitantes montam um cenário atual de conflito ideológico. **Objetivo:** Apresentar e discutir os paradigmas e as controvérsias de algumas das principais teorias contemporâneas para explicar os mecanismos de estabilidade articular da coluna vertebral. **Material e método:** Trata-se de uma revisão bibliográfica das teorias modernas de controle da estabilidade encontradas em livros e trabalhos científicos de autores relevantes na área. Foram selecionadas três teorias de autores conceituados para explicar estabilidade articular da coluna: controle interdependente, controle da rigidez e tensigridade. **Resultados:** Enquanto uma teoria afirma que a estabilidade é um fenômeno que contempla níveis interdependentes de controle, outra teoria assume a estabilidade como dependente da tarefa e funcionando através da regulação das rigidezes componentes do sistema. A tensigridade surge como uma alternativa para a explicação e entendimento do tema. **Conclusão:** Controvérsias encontradas nas três teorias levantadas demonstram incerteza quanto a qual dessas melhor explica estabilidade articular da coluna.

Palavras-chave: instabilidade articular, dorso, tensigridade.

Abstract

Introduction: The instability mechanisms and passive, active and neural subsystems interaction to spinal stability are unclear yet, although different and controversial theories have tried to explain these. **Aims:** The aim of this study was to explain and to discuss controversial modern theories which explain spine stability. **Methods:** This study was a literature review of three stability theories found: interdependent control, stiffness control and tensegrity to explain instability control, using relevant books and studies of experts in this subject. **Results:** While a theory considers interdependent levels of control, another considers stability task dependent. Tensegrity is an alternative way to explain spine control. **Conclusion:** Controversial explanations in these three theories show that the mechanisms which control spine stability are unknown yet.

Key-words: joint instability, back, tensegrity.

Recebido em 16 de fevereiro de 2009; aceito em 7 de julho de 2009.

Endereço para correspondência: Vinicius Cunha Oliveira, Rua Dias Adorno, 52/4, Santo Agostinho, 30190-100 Belo Horizonte MG, Tel: (31) 9111-7054, E-mail: viniciuscunhaooliveira@yahoo.com.br

Introdução

A manutenção equilibrada da postura estática e um controle dinâmico adequado são condições fundamentais para nosso corpo responder de maneira eficiente às demandas impostas [1-5]. Para tanto, é essencial que as articulações se comportem de forma estável em todas as situações a que são submetidas [1-5]. Assim, devido a sua clara importância e aplicabilidade nos sistemas biológicos, a estabilidade articular vem sendo destacado foco de atenção e debate na comunidade científica [1-6]. Conceitualmente, estabilidade pode ser definida como a habilidade da articulação retornar ao seu estado original após sofrer uma perturbação [7]. Proposição inovadora do que seria o sistema de estabilização articular a partir do desenvolvimento de um modelo para a coluna vertebral permite compreender o fenômeno da instabilidade e aplicar clinicamente tais conceitos para avaliação e intervenção [4,5].

O modelo incorpora três subsistemas: passivo, ativo e neural [4,5]. O subsistema passivo, composto pelas estruturas ósseas, articulares e ligamentares, contribui para o controle próximo ao final da amplitude articular onde desenvolve forças reativas que resistem ao movimento [4,5]. Entretanto, em torno da posição neutra da articulação ele não oferece nenhum suporte estabilizador significativo [4,5]. O subsistema ativo contempla as estruturas musculares quando desempenhando suas funções contráteis [4,5]. Este, diferentemente do primeiro, atua na obtenção mecânica da estabilidade mesmo a partir da posição neutra, pois é capaz de modular sua resistência ao longo de toda amplitude de movimento [4,5]. O terceiro subsistema, o neural, é aquele que monitora e regula de forma contínua as forças ao redor da articulação [4,5].

Outra importante contribuição dada pelo modelo foi a apresentação do conceito de “zona neutra” [5]. Devido ao comportamento não linear das estruturas ligamentares, em torno da posição articular neutra encontra-se uma região de elevada frouxidão, ou baixa rigidez [5]. Essa região, a zona neutra, permite que os deslocamentos ocorram com o mínimo de resistência interna das estruturas passivas [5]. Ela tem se mostrado um importante parâmetro clínico, uma vez que parece ser a variável mais sensível na caracterização das instabilidades [5,8,9]. Lesão nos subsistemas passivo e/ou ativo levam a aumentos não fisiológicos na amplitude da zona neutra [5,9]. Por outro lado, a atividade muscular é capaz de minimizá-las e mesmo restaurar os limites fisiológicos após lesão ou degeneração das estruturas passivas, o que representa papel fundamental na busca da estabilidade [9].

A compreensão dos mecanismos cinesioanatômicos que envolvem o desenvolvimento das disfunções musculoesqueléticas é fundamental para a definição de estratégias para sua prevenção e tratamento [1,2,6,9]. Por esse motivo, busca-se o entendimento das instabilidades articulares, apontada como risco para potenciais lesões teciduais, e componente básico de inúmeros processos degenerativos e algicos [9]. Grandes

avanços se encontram no estudo dos mecanismos vertebrais de estabilidade [1,10,11]. Entretanto, o conhecimento dos mecanismos de instabilidade, bem como dos de controle e interação dos subsistemas para o alcance da estabilidade articular ainda é controverso [1,2,3,6]. Explicações distintas e muitas vezes conflitantes montam um cenário atual de conflito ideológico [1,3,6].

Dessa forma, o objetivo do estudo foi apresentar e discutir os paradigmas e as controvérsias das teorias de controle por níveis interdependentes [1], de controle da rigidez [3] e da tensigridade [6] para explicar os mecanismos de estabilidade articular.

Material e métodos

Este estudo é uma revisão bibliográfica de artigos encontrados nas bases de dados Pubmed, Lilacs, Scielo e Cinahl que abordam às teorias de controle da estabilidade articular da coluna. Inicialmente, foram aceitos artigos entre 1989 e 2009 que discutem o tema estabilidade articular. Após essa etapa, tendo em vista que a bibliografia levantada discute as teorias de controle por níveis interdependentes, controle da rigidez e tensigridade, as referências não relacionadas às mesmas foram excluídas e livros relevantes sobre essas três teorias publicados no mesmo período foram adicionados.

Revisão da literatura

Foram consideradas três teorias para explicar estabilidade articular da coluna vertebral citadas na literatura: teoria de controle por níveis interdependentes [1], teoria de controle da rigidez [3], teoria da tensigridade [6].

Controle hierarquizado da estabilidade e processamento de informação

No contexto da mecânica Euleriana, a coluna vertebral é tida como instável [1-3]. Seu arcabouço osteoligamentar requer uma combinação de rigidez muscular ativa e passiva para torná-la uma estrutura segura e estável *in vivo* [1-3]. Tais assertivas fundamentam as teorias da maioria das vertentes ideológicas a cerca do controle da estabilidade vertebral [1-3]. Entretanto, o grande ponto de divergência se dá na explicação de como o subsistema ativo irá exercer seu papel [1,3].

Primeiramente, a estabilidade da coluna pode ser explicada a partir de níveis interdependentes de análise: controle intervertebral, controle da orientação da coluna e controle do equilíbrio de todo o corpo [1].

Segundo essa teoria, uma vez que a massa do tronco corresponde a grande parte da massa do corpo, seu movimento é importante na obtenção do equilíbrio postural - seja em sua manutenção ou em seu restabelecimento, pois é determinante para o posicionamento do centro de massa corporal [1]. Entretanto, é ressaltada a importância de considerar que essa

função pode ser conflitante com as necessidades de movimentos intervertebrais e controle da orientação vertebral [1]. Este controle que constitui o próximo nível em sua proposta deve ser pensado não apenas em termos de sua orientação e forma, mas principalmente como o impedimento de seu colapso estrutural [1]. Para tal, as perturbações, como o simples movimento de um membro, devem ser superadas e prevenidas pela atividade muscular [1]. Por fim, no nível mais básico, considera que deva ser controlada a coordenação entre as rotações e translações intervertebrais durante os movimentos [1,10,11]. Essa é apontada como componente essencial para a estabilidade vertebral e tem sido mostrada como o elemento disfuncional da população com dor lombar [1,10,11].

A partir da análise de modelos biomecânicos pode-se concluir que a estabilidade envolve o aumento da rigidez do segmento em questão, sendo a contração muscular um mecanismo eficaz para desempenhar este papel [1]. Portanto, o grande número de músculos que cruza a coluna pode atuar no aumento de sua rigidez estrutural, contribuindo em sua estabilização [1]. Nesse contexto, grupamentos musculares específicos desempenham papéis distintos no contexto da obtenção de estabilidade [1,12].

Os músculos do tronco são categorizados em dois grandes grupos funcionais: os músculos locais e os globais [12]. Junto aos últimos inclui-se os grandes e superficiais músculos do tronco que não possuem ligações diretas nas vértebras e aqueles que cruzam diversos segmentos, como o grande dorsal, reto abdominal e porções dos eretores espinhais [1,12,13]. Em contra partida, os locais seriam os pequenos músculos e determinadas porções profundas de outros que têm ligações diretas nas vértebras [1,12,13]. Considera-se que os músculos “globais” são os responsáveis por gerar os torques necessários para as movimentações da coluna e tronco, controlar sua orientação, balancear as cargas externas e as transferir do tórax à pelve, minimizando-as sobre a coluna e seus componentes [1,12,13]. Entretanto, apesar de fundamentais para a estabilidade da coluna não são capazes de realizar o “ajuste fino” dos movimentos intervertebrais, como o controle dos movimentos intersegmentares específicos e das forças de cisalhamento [1,12,13]. Para isso se faz necessária a ação dos componentes do outro grupo [1,12,13]. Admite-se que os ditos músculos “locais” controlam a rigidez e a relação intervertebral, além da postura dos segmentos lombares, apesar de não serem efetivos no controle da orientação vertebral [1,11-13]. Nesse grupo se incluem, além de outros, a porção profunda do oblíquo interno, o multífido e o transverso abdominal, o qual tem sido amplamente investigado na última década [1,10,11].

Devido à especialização dos componentes do subsistema ativo com ações locais e globais, e a existência de diversos “níveis” de requerimento de estabilidade, uma coordenação interdependente adequada na ativação dos músculos do tronco é requerida para que possam desempenhar suas funções [1,11-13]. Para explicar a forma como o subsistema neural controla todo esse mecanismo, os autores se

munem do pressuposto da existência de uma “representação interna” da dinâmica corporal, ou seja, modelos abstratos construídos pela experiência nos quais se tem informação sobre as interações entre as forças internas e externas [1,11]. Diante de perturbações previsíveis, baseando-se no modelo interno disponível, o Sistema Nervoso Central (SNC) define previamente as respostas musculares a serem dadas [1,11]. Assim, um mecanismo de ajuste antecipatório *feedforward* seria o responsável por essa modulação [1,11]. Além disso, consideram que em situações nas quais não há previsibilidade da perturbação o sistema responde *a posteriori* e em resposta às desestabilizações [1,11]. Através das informações obtidas pelos receptores periféricos e mecanismos reflexos o sistema age em busca da retomada do equilíbrio articular, exemplo clássico de mecanismo por *feedback* [1,11].

Em suma, para os defensores da linha teórica apresentada o sistema de controle da estabilidade vertebral seria interdependente, com músculos funcionando a nível local ou global, através de mecanismos de *feedback* e *feedforward*, com a utilização de representações internas, reflexos e reações [1,10-13].

Rigidez estrutural e seqüenciamento de ativação

A estabilidade é a capacidade de manter o estado original durante posturas e movimentos através de uma rigidez adequada [3]. Nesse contexto, rigidez pode ser entendida como a resistência oferecida por uma estrutura ou tecido à sua deformação [3]. Considerando um sistema de molas, o equilíbrio é atingido quando a soma de todas as forças aplicadas, da deformação dos componentes e de seus coeficientes elásticos for igual a zero [2,3,14]. Em uma articulação inerentemente instável, a rigidez passiva das estruturas, por si só, é insuficiente para manter a estabilidade articular durante as tarefas da vida diária [3,15]. Assim, a contração coordenada dos músculos é fundamental para o controle articular [2,3,16]. Um músculo mais rígido apresenta maior capacidade de armazenar energia elástica, criando alto nível de estabilidade no sistema [2,3,16]. Porém, é ressaltada a importância de ter uma rigidez adequada evitando restrição de movimento [2,3]. Na coluna vertebral, as forças compressivas provocadas pela ação muscular nas articulações e também a tensão gerada em suas estruturas passivas aumentam a rigidez propiciando maior estabilidade [15-17]. A tensão aplicada pelos músculos do tronco na fásia tóraco-lombar contribui de forma significativa na estabilização da coluna lombar [2,3,17].

Tais afirmações relacionadas com importância do subsistema ativo para o controle de uma estrutura inerentemente instável estão de acordo com o modelo citado anteriormente [1,3]. Porém, a teoria de controle da rigidez não considera níveis interdependentes de ação muscular para controle da estabilidade [1,3]. Para o desempenho de uma tarefa específica, a teoria de controle da rigidez propõe que a contração mus-

cular se modifica continuamente de acordo com os graus de liberdade requeridos a determinado movimento para adequar a rigidez gerando estabilidade [2,3]. Assim, a contribuição de cada músculo é modificada continuamente em cada momento [3]. Em relação à proposta anterior (níveis interdependentes), essa outra proposta discute que se há alteração da tarefa, haveria alteração do padrão de recrutamento para adaptar à nova demanda [1,3]. Ou seja, não haveria níveis de contração interdependentes e sim ajuste contínuo da rigidez [3].

Nesse contexto, as instabilidades são entendidas como resultado do comprometimento nas rigidezes ativa e passiva [2,3]. A presença de instabilidades se relaciona principalmente à falta de resistência e controle dos músculos do tronco [3].

Tensigridade

Em uma terceira proposta, afirma-se que a estabilidade articular deve considerar um sistema que aceite carga proveniente de todas as direções, seja independente da gravidade e evolua estruturalmente dentro de uma hierarquia mecanicamente funcional e estável [6,18-20]. Um modelo que comporta esta estrutura é denominado tensigridade [6].

Sistemas de tensigridade têm estabilidade mecânica através de tensão contínua e compressão local ou descontínua [6]. Esta estrutura depende de um pré-estresse (tensão pré-existente) para conferir estabilidade antes da aplicação de uma carga externa [21]. Uma vez aplicada esta carga, as estruturas movem e mudam suas orientações em relação às outras até que se alcance um novo equilíbrio, considerando que a tensão é transmitida a todo o sistema [21]. Observa-se desta forma que emerge um comportamento coletivo entre os elementos que interativamente compõem o sistema [20]. Esta formulação é característica da Sinérgica que corresponde à imprevisibilidade do comportamento de um sistema se considerado pelas suas partes isoladamente [6,18-21]. A ação local pode causar deformação à distância em função da distribuição de tensão pelo sistema como um todo [6,18-21]. Um exemplo disso ocorre na carga imposta entre os sesamóides e o metatarso durante a impulsão na marcha, onde essa carga deve ser distribuída através do sistema de tensão e compressão presentes [6,18-21]. A deformação ocorrida é inerente à estrutura e este comportamento permite a absorção de cargas diferentemente de uma análise através do diagrama de corpo livre, por exemplo [6,18-21]. Este modelo de diagrama para análise biomecânica assume uma característica reducionista pela observação de segmentos isolados [6]. As cargas calculadas através deste instrumento excedem frequentemente a capacidade de resistência à tensão dos tecidos biológicos, tornando a redução pouco representativa [6].

A característica mais notável da estrutura de tensigridade é a triangulação [6]. Triângulos são inerentemente estáveis [6]. Os elementos desta estrutura estão sob tensão mesmo sem qualquer torque em seus vértices ou articulações [6]. A capa-

cidade de distribuir a carga é inerente à estrutura tornando este sistema de baixo consumo energético [6]. Do ponto de vista tridimensional, as estruturas que contêm triangulação em seus níveis são os poliedros [6]. O icosaedro é o poliedro que mais perfeitamente assume o preenchimento espacial em triangulação [6,18]. Em uma análise na perspectiva biológica, algumas estruturas como os vírus, as células lipídicas, o parênquima do fígado e os alvéolos pulmonares têm ou se comportam como icosaedros de tensigridade [6,19].

A base estrutural fornecida admite estresses multidirecionais e transmite cargas através de seus sistemas de tensão como os tecidos moles, e compressão com músculos agindo em uníssono e não como antagonistas [6,18,19]. O corpo é estabilizado através de uma série contínua de componentes de compressão (ossos) e tensão (músculos, tendões, ligamentos, fásCIAS) cuja rigidez varia com as propriedades mecânicas dos tecidos (pré-estresse) [6,18,19]. O aumento da carga imposta aos tecidos implica em aumento na força do sistema, como aumento da força muscular à medida que o músculo contrai ou aumenta a densidade e força óssea à medida que uma carga é imposta a este tecido [6,18,19].

A transmissão de tensão tecidual torna-se um importante foco de pesquisa [17,22-25]. Este fator é fundamental na constituição do sistema proposto e vem sendo demonstrado importante na transmissão de força intra, inter e extra-muscular em animais [22-24,26]. Cerca de 40% da força pode ser transmitida através de estruturas adjacentes ao músculo [25]. Desta maneira a transmissão de força miofascial pode exercer importante função na imposição de forças sobre as articulações, uma vez que cápsula articular e ligamentos capsulares estão arrançados em série com músculos [25]. A definição da rigidez inclusive das fásCIAS dificulta ainda mais um possível controle da estabilidade pelo sistema nervoso central uma vez que as interações e o número de graus de liberdade aumentam [25]. Reforça-se o papel estático e dinâmico da tensigridade na estabilidade do sistema [6].

Resultados e discussão

A revisão foi realizada a fim de esclarecer as controvérsias entre três teorias frequentemente difundidas na literatura para explicar os mecanismos de controle da estabilidade da coluna. A compreensão desses mecanismos através dos quais se alcança uma estabilidade vertebral adequada ainda é obscuro. Duas linhas teóricas se destacam no cenário científico contemporâneo [1,3]. Uma delas afirma que a estabilidade é um fenômeno que contempla níveis interdependentes de controle, alcançados através da atuação de músculos, alguns agindo no controle intersegmentar e outros de forma mais global [1]. A outra assume a estabilidade como dependente da tarefa e funcionando através da regulação das rigidezes componentes do sistema [3]. Entretanto, novas teorias, como a tensigridade, se mostram como alternativas promissoras para a explicação e entendimento do tema [6].

Ficam claras as contradições e divergências dos modelos de controle da estabilidade vertebral apresentados [1,3,6]. Entretanto, algumas considerações devem ser feitas em relação a questões que são comuns a ambos e, por isso, não debatidas pelos autores.

A ativação seqüencial da musculatura, seja através de contrações interdependentes dos músculos locais e globais, ou pela ativação coordenada dos músculos controlada por um programa motor, é característica de um sistema que requer níveis avançados de processamento [1,3,6,27-29]. Um modelo que assume uma decomposição entre estímulos recebidos, comparação com modelos internos de dinâmica corporal, planejamento da ação e geração de uma resposta sobrecarregam inequivocamente o sistema nervoso central [1,3,27-29]. Além dos inúmeros graus de liberdade inerentes aos componentes musculares, articulares e do movimento, as diferentes fases de processamento aumentam ainda mais a demanda sobre este sistema [1,3,27-29].

Em relação aos mecanismos de controle por *feedback*, além da sobrecarga computacional imposta sobre o sistema [27,29], outros problemas levam à reflexão sobre seu real papel como mecanismo primário de controle da estabilidade [30,31]. Dados de situações fisiológicas mostram um atraso significativo da resposta neuromotora em relação ao estímulo, o que sugere esse mecanismo como incapaz de fornecer proteção diante de situações potencialmente lesivas [30,31]. Além disto, o reflexo ligamento-muscular necessita de estímulos de alta intensidade e aplicados no final da amplitude de movimento, fatores pouco comuns nas atividades funcionais de vida diária [30,31]. Por outro lado, o ajuste dinâmico da rigidez muscular parece ser capaz de manter um controle da estabilidade de maneira contínua e prospectiva [30,31]. Este mecanismo aproxima-se do modelo ecológico de Gibson [27], uma vez que extrai informação do ambiente de maneira dinâmica e interativa [27,30,32]. Devido a suas múltiplas fontes de informação e inputs, o ajuste da co-contracção via fuso muscular-gama apresenta também a flexibilidade necessária para lidar com os diferentes tipos de demandas ambientais [30,31].

Considerada no paradigma tradicional, a coluna é vista pelos autores como um complexo arquitetônico constituído de blocos estruturais que funcionam como pilares orientados verticalmente [1,3-5]. Através de cálculos biomecânicos relativos à estabilidade deste sistema em situações de rotina diária, conclui-se que uma leve flexão lateral da coluna provocaria falha estrutural, além do que, uma pessoa mal conseguiria carregar o peso da própria cabeça [6]. Por isso, considera-se que esse é um sistema instável.

A dualidade flexibilidade-estabilidade é desfeita quando tratamos de um sistema global desfazendo a divisão entre percepção e ação [6,27,33]. Nesta perspectiva, o controle da estabilidade torna-se inerente a um sistema estável onde o conjunto de estruturas é capaz de transmitir tensão e dissipá-la [6,27]. Esta análise evita a necessidade de um processador

central sobrecarregado diante dos numerosos graus de liberdade a serem controlados [1,6,27,34,35]. A estabilidade articular, portanto, deve ser entendida como regra e não como processo integrativo de etapas ordenadas por um único subsistema [36,37].

Conclusão

Embora as três teorias levantadas no estudo para explicar o controle da estabilidade da coluna: controle por níveis interdependentes, controle da rigidez e tensigridade sejam coerentes e amplamente testadas através de estudos clínicos, ainda não há um consenso sobre qual seria a melhor explicação. Os modelos de controle de níveis interdependentes e controle da rigidez consideram a coluna como inerentemente instável e dependente do subsistema ativo para controle da estabilidade, enquanto a tensigridade considera que a coluna é capaz de dissipar carga continuamente através da tensão e compressão provocada pelos subsistemas passivo, ativo e neural agindo ao mesmo tempo sem processamento central prévio da informação. Futuras investigações devem esclarecer as controvérsias dos três modelos de estabilidade citados a fim de buscar uma abordagem mais adequada em situações de instabilidade.

Referências

- Hodges P. Lumbopelvic stability: a functional model of the biomechanics and motor control. In: Richardson C, Hodges P, Hides J. Therapeutic exercise for lumbopelvic stabilization: A motor control approach for the treatment and prevention of low back pain. 2a ed. Edinburgh: Churchill Livingstone; 2004. p. 13-28.
- McGill SM, Cholewicki J. Biomechanical basis for stability: an explanation to enhance clinical utility. J Orthop Sports Phys Ther 2001;31(2):96-100.
- McGill SM, Grenier SG, Kavcic N, Cholewicki J. Coordination of muscle activity to assure stability of the lumbar spine. J Electromyogr Kinesiol 2003;13:353-9.
- Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation and enhancement. J Spinal Disord 1992a;5(4):383-9.
- Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. J Spinal Disord 1992b;5(4):390-6.
- Levin SM. The tensegrity-truss as a model for spine mechanics: biotensegrity. Journal of Mechanics in Medicine and Biology 2002; 2(3/4):375-88.
- Wagner H, Blickhan R. Stabilizing function of skeletal muscles: an analytical investigation. J Theor Biol 1999;199(2):163-179.
- Gay RE, Ilharreborde B, Zhao K, Zhao C, An KN. Sagittal plane motion in the human lumbar spine: Comparison of the in vitro quasistatic neutral zone and dynamic motion parameters. Clin Biomech 2006;21(9):914-19.
- Panjabi MM. Clinical spinal instability and low back pain. J Electromyogr Kinesiol 2003;13(4):371-79.

10. Hodges PW. Is there a role for transversus abdominis in lumbopelvic stability? *Man Ther* 1999;4(2):74-86.
11. Hodges PW, Moseley GL. Pain and motor control of the lumbopelvic region: effect and possible mechanisms. *J Electromyogr Kinesiol* 2003;13(4):361-70.
12. Bergmark A. Stability of the lumbar spine. A study in mechanical engineering. *Acta Orthop Scand* 1989;230(Suppl):1-54.
13. Comerford MJ, Mottram SL. Movement and stability dysfunction-contemporary developments. *Man Ther* 2001;6(1):15-26.
14. Latash ML, Zatsiorsky VM. Joint stiffness: myth or reality? *Hum Mov Sci* 1993;12:653-92.
15. Wingerden JP, Vleeming A, Buyruk HM, Raissadat K. Stabilization of the sacroiliac joint in vivo: verification of muscular contribution to force of the pelvis. *Eur Spine J* 2004;13(3):199-205
16. Lee PJ, Rogers EL, Granata KP. Active trunk stiffness increases with co-contraction. *J Electromyogr Kinesiol* 2006;16(1):51-7.
17. Barker PJ, Briggs CA, Bogeski G. Tensile transmission across the lumbar fasciae in unembalmed cadavers: effects of tension to various muscular attachments. *Spine* 2004;29(2):129-38.
18. Chen CS, Ingber DE. Tensegrity and mechanoregulation: from skeleton to cytoskeleton. *Osteoarthritis Cartilage* 1999;7(1):81-94.
19. Ingber DE. Cellular tensegrity: defining new rules of biological designs that govern the cytoskeleton. *J Cell Sci* 1993;104:613-27.
20. Ingber D. The origin of cellular life. *Bioessays* 2000;22(12):1160-70.
21. Sultan C, Corless M, Skelton RE. The prestressability problem of tensegrity structures: some analytical solutions. *Int J Solids Struct* 2001;38(30/31):5223-52.
22. Huijing PA. Muscular force transmission: a unified, dual or multiple system? A review and some explorative experimental results. *Arch Physiol Biochem* 1999; 107(4):292-311.
23. Maas H, Huijing PA. Myofascial force transmission in dynamic muscle conditions: effects of dynamic shortening of a single head of multi-tendoned rat extensor digitorum longus muscle. *Eur J Appl Physiol* 2005;94(5/6):584-92.
24. Meijer HJM, Baan GC, Huijing PA. Myofascial force transmission is increasingly important at lower forces: firing frequency-related length-force characteristics of rat extensor digitorum longus. *Acta Physiol* 2006;186(3):185-95.
25. Smeulders MJC, Kreulen M, Joris Hage J, Huijing PA, Van Deer Horst CMAM. Spastic muscle properties are affected by length changes of adjacent structures. *Muscle Nerve* 2005;32(2):208-15.
26. Yucesoy CA, Koopman BHFJM, Baan GC, Grootenboer HJ, Huijing PA. Effects of inter- and extramuscular myofascial force transmission on adjacent synergistic muscles: assessment by experiments and finite-element modeling. *J Biomech* 2003;36(12):1797-811.
27. Turvey MT, Fonseca ST. Nature of Motor Control: Perspectives and issues. In: Sternad D, Ed. *Progress in motor control: A multidisciplinary perspective*. New York: Springer Verlag; 2008. p. 93-123.
28. Mannion AF, Pulkovski N, Schenk P, Hodges PW, Gerber H, Loupas T, Gorelick M, Sprott H. A new method for the noninvasive determination of abdominal muscle feedforward activity based on tissue velocity information from tissue Doppler imaging. *J Appl Physiol* 2008;104(4):1192-201.
29. Tsao H, Galea MP, Hodges PW. Reorganization of the motor cortex is associated with postural control deficits in recurrent low back pain. *Brain* 2008; 131(8):2161-71.
30. Aquino CF, Viana SO, Fonseca ST, Brício RS, Vaz DV. Mecanismos neuromusculares de controle da estabilidade articular. *Rev Bras Ciênc Mov* 2004;12(2):35-42.
31. Fonseca ST, Ocarino JM, Silva PLP. Ajuste da rigidez muscular via sistema fuso-muscular-gama: implicações para o controle da estabilidade articular. *Rev Bras Fisioter* 2004;8(3):187-95.
32. Carello C, Wagman JB. Mutuality in the perception of affordances and the control of movement. In: Sternad D, ed. *Progress in motor control*. New York: Springer Verlag; 2008. p. 271-89.
33. Fonseca ST, Turvey MT. Biotensegrity perceptual hypothesis: A medium of haptic perception. Paper presented at the North America Meeting of the International Society for Ecological Psychology. Cincinnati, Ohio, June 22-24; 2006.
34. Carello C, Silva PL, Kinsella-Shaw JM, Turvey MT. Muscle-based perception: theory, research and implications for rehabilitation. *Rev Bras Fisioter* 2008;12(5): 339-350.
35. Turvey MT. Action and perception at the level of synergies. *Hum Mov Sci* 2007;26(4):657-97.
36. Turvey MT, Fonseca S. Nature of motor control: perspectives and issues. *Adv Exp Med Biol* 2009;629:93-123.
37. Turvey MT. Nature of motor control: not strictly motor, not quite control. *Adv Exp Med Biol* 2009;629:3-6.