



RBO

REVISTA BRASILEIRA DE ORTOPEDIA

www.rbo.org.br



Artigo de Atualização

Coordenação motora durante a marcha após lesões no ligamento cruzado anterior: uma revisão sistemática da literatura

Gustavo Leporace,^a Leonardo Metsavaht,^b Liszt Palmeira de Oliveira,^c
Jurandir Nadal,^d e Luiz Alberto Batista^{e,*}

^aMestrado em Engenharia Biomédica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Doutorando do Programa de Engenharia Biomédica (UFRJ). Pesquisador do Laboratório de Biomecânica e Comportamento Motor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^bMestrado em Medicina (UFRJ); Diretor Científico do Instituto Brasil de Tecnologias da Saúde, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^cDoutorado em Fisiologia e Fisiopatologia Clínica e Experimental (UERJ); Professor Adjunto da Faculdade de Ciências Médicas (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^dDoutorado em Engenharia Biomédica (UFRJ); Professor Associado do Programa de Engenharia Biomédica (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^eDoutorado em Ciências do Esporte, Universidade do Porto; Professor Adjunto do Instituto de Educação Física e Desportos (UERJ); Coordenador do Laboratório de Biomecânica e Comportamento Motor (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Trabalho realizado no Laboratório de Biomecânica e Comportamento Motor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

INFORMAÇÕES SOBRE O ARTIGO

Histórico do artigo:

Recebido em 8 de maio de 2012

Aceito em 17 de julho de 2012

Palavras-chave:

Biomecânica

Destreza motora, ligamento cruzado anterior/lesões

Marcha

R E S U M O

Investigar o estado da arte acerca da coordenação motora durante a marcha em pacientes com lesão no ligamento cruzado anterior (LCA). Foram realizadas pesquisas, delimitadas entre 1980 e 2010, em diversas bases de artigos com palavras-chave relacionadas à coordenação motora, marcha e lesão no LCA. A partir da análise de títulos e aplicação dos critérios de inclusão/exclusão, 24 estudos foram selecionados inicialmente e, após a leitura do resumo, oito permaneceram na análise final. Os resultados indicam que pacientes com deficiência no LCA tendem a apresentar uma marcha menos variável, enquanto pacientes com reconstrução do LCA têm uma marcha mais variável, em relação a sujeitos hígidos. Os resultados sugerem a existência de diferenças na coordenação motora entre os segmentos entre sujeitos com e sem lesão no LCA, independentemente da reconstrução ligamentar. Pacientes com lesão no LCA apresentam aspectos relacionados ao comprometimento de adaptar seus padrões de marcha a diferentes condições externas, o que pode levar à degeneração precoce. No entanto, as técnicas usadas pelos estudos para o processamento dos dados biomecânicos foram limitadas no que diz respeito à obtenção de informações que possibilitem o desenvolvimento de estratégias de intervenção voltadas para a reabilitação da lesão. Isso se deve ao fato de as técnicas atuais de estudo da coordenação motora, apesar de possibilitar a identificação de alterações no padrão de marcha saudável, não serem capazes de identificar as principais articulações e fases do ciclo da marcha alteradas.

© 2013 Sociedade Brasileira de Ortopedia e Traumatologia. Publicado pela Elsevier Editora Ltda. Todos os direitos reservados.

*Autor para correspondência: Laboratório de Biomecânica e Comportamento Motor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Ginásio Esportivo, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 20550-090.
E-mail: batista.l.a@gmail.com; gustavo@brasilsaude.org (L.A. Batista)

Motor coordination during gait after anterior cruciate ligament injury: a systematic review of the literature

A B S T R A C T

Keywords:

Anterior cruciate ligament/injury
Biomechanics
Gait; motor skills

To investigate the state of art about motor coordination during gait in patients with anterior cruciate ligament (ACL) injury. Searches were carried out, limited from 1980 to 2010, in various databases with keywords related to motor coordination, gait and ACL injury. From the analysis of titles and applying the inclusion/exclusion criteria 24 studies were initially selected and, after reading the abstract, eight studies remained in the final analysis. ACL deficient patients tend to have a more rigid and less variable gait, while injured patients with ACL reconstruction have less rigid and more variable gait with respect to healthy individuals. The overall results suggest the existence of differences in motor coordination between the segments with intact and those with injured knee, regardless of ligament reconstruction. ACL injured patients present aspects related to the impairment of the capability to adapt the gait pattern to different environmental conditions, possibly leading to premature knee degeneration. However, the techniques used for biomechanical gait data processing are limited with respect to obtaining information that leads to the development of intervention strategies aimed at the rehabilitation of that injury, since it is not possible to identify the location within the gait cycle where the differences could be explained.

© 2013 Sociedade Brasileira de Ortopedia e Traumatologia. Published by Elsevier Editora Ltda. All rights reserved.

Introdução

Estima-se que 95.000 casos de lesões do ligamento cruzado anterior do joelho (LCA) aconteçam anualmente nos Estados Unidos e gerem uma despesa em saúde superior a US\$ 650 milhões no mesmo período.¹ A incidência é maior em pessoas que praticam esportes como basquete, esqui na neve, futebol americano e futebol. Considerando-se a frequência na participação esportiva a lesão é 2,4 a 9,7 vezes mais frequente em mulheres do que em homens.²

Para além de alterações funcionais, a lesão do LCA se relaciona com outras comorbidades importantes. Segundo Lohmander et al.,³ entre 50% a 100% de indivíduos com deficiência no referido ligamento apresentarão dor, limitações funcionais e sinais radiográficos de osteoartrite no joelho 12 a 20 anos após a ocorrência da lesão.

A cirurgia de reconstrução do ligamento cruzado anterior (LCA) é amplamente feita para restaurar a estabilidade articular. No entanto, o seu papel na prevenção da degeneração da cartilagem e do desenvolvimento da osteoartrose permanece controverso. Fink et al.⁴ demonstraram elevada prevalência de osteoartrose após a reconstrução ligamentar e observaram a presença de degeneração nos primeiros 15 meses que se seguiram à cirurgia.⁵ Embora essa comorbidade mostre-se mais frequentemente relacionada aos danos da cartilagem articular ocasionados pelo trauma inicial, ou pelos episódios posteriores de falsojo do joelho, resultados de estudos sugerem que ela pode resultar de alterações cinemáticas persistentes na marcha após o procedimento cirúrgico e a reabilitação.^{6,7}

Nesse sentido, há suspeitas de que as alterações na marcha possam ser também resultantes do comprometimento, no pós-lesão, da qualidade da participação do LCA na consecução de aferências sensoriais, o que tende a atenuar a retroalimentação

das informações de posição e aceleração articular entre o ligamento e o sistema nervoso central. Esse comprometimento da capacidade de obtenção de informações sensoriais relacionadas ao LCA pode resultar na geração de alterações no padrão de coordenação motora durante a marcha.⁸

Bernstein⁹ definiu coordenação motora como sendo o domínio dos graus de liberdade redundantes de uma cadeia biocinemática para produzir um movimento controlado. Embora cada elemento da cadeia biocinemática (CBC) possa executar movimentos de forma independente, as relações entre ações motoras dos diferentes segmentos determinam a coordenação motora necessária para cada tarefa.

Segundo Todorov e Jordan,¹⁰ uma das estratégias usadas pelo sistema nervoso central (SNC) para conformar o quadro de coordenação motora durante a marcha consiste em permitir uma determinada variabilidade no comportamento angular, por meio da covariação dos movimentos dos segmentos CBC dos membros inferiores, de forma a compensar as alterações individuais apresentadas. As estratégias de coordenação englobam, para além da modulação dos graus de liberdade de cada articulação da CBC, a alteração da variabilidade e estabilidade do movimento nas ações motoras.¹¹ Dessa forma, em geral, os estudos que abordam a coordenação motora referem-se a aspectos como coordenação inter e intrassegmentar^{12,13} e variabilidade.¹⁴

Infelizmente, apesar do referido tipo de coordenação motora somente ser observável no comportamento na cadeia biocinemática, suspeita-se haver uma tendência nos estudos acerca da marcha em pacientes com lesão do LCA de apenas focar aspectos de forma isolada, como, por exemplo, o comportamento biomecânico de cada articulação como unidade funcional independente.¹⁵⁻¹⁷

Resulta disso serem escassas as informações acerca das estratégias de adequação da coordenação motora

implementadas na CBC para, funcionalmente, compensar a falta do ligamento original. A compreensão dessas estratégias poderia, em parte, explicar o processo de degeneração precoce da articulação do joelho após lesões no referido ligamento e contribuir para o aprimoramento do delineamento de abordagens terapêuticas. Destarte, o objetivo neste estudo foi fazer uma revisão sistemática da literatura acerca da coordenação motora dos membros inferiores durante a marcha em pacientes com lesão no LCA.

Métodos

Foram selecionados relatos de estudos, feitos com seres humanos, nos quais tenham sido examinados aspectos relacionados à coordenação motora dos membros inferiores durante a marcha executada por pacientes com lesão no LCA, com ou sem reconstrução cirúrgica. Os aspectos referentes à coordenação motora incluídos foram coordenação intersegmentar,^{12,13,18} variabilidade^{19,20} e estabilidade/flexibilidade das articulações durante a marcha.^{11,21} Estudos de revisão sistemática, meta-análises ou nos quais tenham sido pesquisadas estratégias de intervenção para reabilitação após lesões no LCA foram excluídos desta revisão.

A busca, delimitada entre janeiro de 1980 e dezembro de 2010, cobriu 30 anos de produção. Foram consultadas as bases de dados Pubmed/MEDLINE, SciELO, OVID, LILACS, ISI Web Knowledge, Embase, Sportdiscus, Scopus, Cochrane Library e Cinahl. Com o propósito de proporcionar uma busca mais sensível e específica foram usadas combinações das seguintes palavras-chave: *ACL, anterior cruciate ligament, gait, coordination e variability*.

Todos os títulos e resumos inicialmente selecionados foram indexados no programa Endnote versão 9 (Thomson, Reuters, Carlsbad, USA) para análise posterior. Os títulos e resumos foram examinados por dois examinadores independentes. No caso de dúvida na seleção do artigo com base no conteúdo do resumo, o texto completo foi analisado. Discrepâncias entre os examinadores foram resolvidas por meio de consenso. Nos casos em que um consenso não foi obtido, um terceiro examinador foi consultado e com base no seu parecer, prestado sem conhecimento prévio dos exames já feitos, decidiu-se pela inclusão ou não do manuscrito (fig. 1).

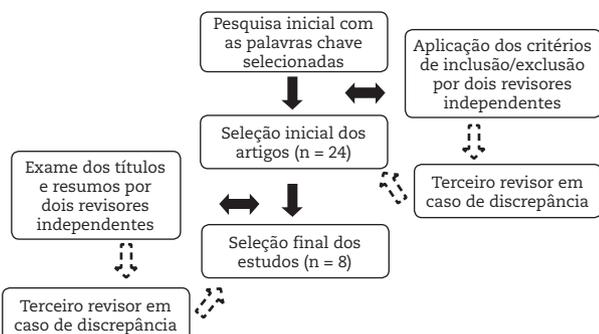


Figura 1 - Diagrama de fluxo que explica o processo de seleção de estudos na revisão sistemática. As setas tracejadas representam os caminhos possíveis em caso de discrepância entre os dois examinadores iniciais.

Resultados

Na busca inicial foram identificados 24 manuscritos. A partir do exame dos títulos e da aplicação dos critérios de inclusão/exclusão foram selecionados oito estudos. Após a leitura dos resumos todos eles foram mantidos (tabela 1). Desses, em sete foram usadas técnicas não lineares para estudar a variabilidade do movimento do joelho no plano sagital durante a marcha, sendo quatro com a técnica de expoentes de Lyapunov (ExLy),²²⁻²⁵ dois com Entropia Aproximada (EnAp)^{26,27} e um com a técnica de Entropia Diferencial (EnDif).²⁸ Outro estudo, de Kurz et al.,²⁹ usou a técnica de fase relativa contínua (FRC), baseado na representação de velocidade-ângulo para medir a coordenação intersegmentar.

Quanto ao LyEx, três estudos compararam pacientes com deficiência no LCA com grupos controle^{22,23,25} e um comparou pacientes com reconstrução no LCA com diferentes tipos de enxerto com um grupo controle.²⁴ A variável dependente de todos os quatro estudos foi o ExLy obtido a partir de deslocamento angular do joelho, no plano sagital, durante a marcha realizada em uma esteira, embora Zampeli et al.²⁵ tenham usado a marcha para trás para comparar os grupos. Os resultados dos estudos mostraram que o joelho lesionado apresentou valores de ExLy mais elevados do que o joelho contralateral, tanto na marcha convencional quanto na marcha para trás. No entanto, ambos os joelhos com deficiência do LCA mostraram menor ExLy em relação a um grupo hígido. Quanto ao grupo LCA-R, o joelho lesionado apresentou valores mais baixos de ExLy em relação ao contralateral. Ambos os joelhos do grupo LCA-R, independentemente do tipo de enxerto, apresentaram valores mais elevados de ExLy comparados com um grupo hígido.

Os estudos que usaram EnAp para calcular a variabilidade da marcha^{26,27} também usaram o deslocamento angular do joelho como variável dependente. O estudo que comparou um grupo hígido com LCA-D²⁷ encontrou valores mais baixos da EnAp para o joelho lesionado em comparação com o joelho contralateral não lesionado. O outro estudo que usou essa técnica comparou dois grupos com reconstrução ligamentar, um com enxerto do tendão patelar e outro do tendão dos flexores de joelho, com um grupo controle. Independentemente do enxerto usado, o grupo LCA-R apresentou valores mais elevados de EnAp em relação ao grupo controle.

Tzagarakis et al.²⁸ usaram uma adaptação da EnAp, chamada EnDif. Eles compararam o espectro de frequências da aceleração tronco entre um grupo LCA-R e indivíduos hígidos e encontraram valores mais elevados de EnDif no eixo médio-lateral para o grupo de LCA-D, em comparação com o controle. O teste usado mostrou uma capacidade de discriminar 96,5% dos participantes em relação à presença de lesão ligamentar.

Kurz et al.²⁹ compararam a coordenação intersegmentar relacionada ao deslocamento angular e à velocidade de FRC. Os autores mostraram que pacientes com deficiência no LCA apresentaram maiores ângulos de fase em relação à coordenação perna e pé e valores mais baixos em relação à coordenação da coxa com a perna em comparação com o grupo controle.

Tabela 1 - Descrição dos oito estudos selecionados para a revisão sistemática

Autores	Amostra	Tarefa motora	Variável biomecânica	Técnica	Resultados
Stergiou et al. ²²	10 LCA-D (3 anos pós-lesão)	Marcha (Esteira) (0,78m/s)	DA do Joelho (Sagital)	ExLy	Maior ExLy no MI lesionado em relação ao sadio em todas as velocidades. Sem influência da velocidade.
Moraiti et al. ²³	7 LCA-D (3 anos pós-lesão) e 7 C	Marcha (Esteira) (LCA-D: 0,74m/s e C: 0,75m/s)	DA do Joelho (Sagital)	ExLy	Menor ExLy no LCA-D em relação ao grupo C.
Moraiti et al. ²⁴	6 M LCA-R-TP (2 anos PO), 6 M LCA-R-ST (2 anos PO) e 6 M C	Marcha (Esteira) (LCA-R-TP:0,86m/s; LCA-R-ST:0,90 m/s e C:0.91 m/s)	DA do Joelho (Sagital)	ExLy	LCA-R-TP e LCA-R-ST apresentaram maiores valores de ExLy do que o grupo controle.
Zampeli et al. ²⁵	15 M LCA-D (8 meses pós-lesão) e 11 M C	Marcha para trás (Esteira) (LCA-D: 0.46 m/s; C: 0.55 m/s)	DA do Joelho (Sagital)	ExLy	Os dois MI do LCA-D apresentaram menor ExLy comparado ao grupo controle. O joelho não lesionado do LCA-D apresentou menores valores de ExLy em relação ao joelho lesionado.
Georgoulis et al. ²⁶	10 LCA-D (3 anos-pós lesão)	Marcha (Esteira) (0,77m/s)	DA do Joelho (Sagital)	EnAp	Menor EnAp no MI lesionado em relação ao não lesionado em todas as velocidades. Quanto maior a velocidade, maior a EnAp nos 2 grupos.
Moraiti et al. ²⁷	6 M LCA-R-TP (2 anos PO), 6 M LCA-R-ST (2 anos PO) e 6 M C	Marcha (Esteira) (LCA-R-TP:0,86m/s; LCA-R-ST:0,90 m/s e C:0.91 m/s)	DA do Joelho (Sagital)	EnAp	LCA-R-TP e LCA-R-ST apresentaram maiores valores de EnAp do que o C. MI lesionado apresentou menores valores em relação ao MI contralateral não lesionado nos dois grupos.
Tzagarakis et al. ²⁸	20 M LCA-D e 20 M C	Marcha (Pista de 40 m)	FFT da Aceleração do Tronco	EnDif	Maiores valores de EnDif no LCA-D para o espectro de frequência no eixo medial-lateral em relação ao grupo C. Teste apresentou 96,5% de discriminar pacientes com e sem lesão no LCA.
Kurz et al. ²⁹	10 LCA-R (3,5 anos PO) e 10 C	Marcha (Esteira) (LCA-D: 1,21m/s, C: 1,23m/s)	FRC da Coxa, Perna e Pé (Sagital)	FRC	LCA-R apresentou maior ângulo de fase na relação pé-perna e menor na relação perna-coxa do que grupo C.

LCA-D: Deficiência no LCA; LCA-R: Reconstrução do LCA; C: Controle; PO: Pós-Operatório; M: Sexo Masculino; F: Sexo Feminino; DA: Deslocamento Angular; Vel: Velocidade; ExLy: Expoente de Lyapunov; FRC: Fase Relativa Contínua; EnAp: Entropia Aproximada; EnDif: Entropia Diferencial; MI: Membro Inferior.

Discussão

Nesta investigação propusemo-nos a revisar sistematicamente o estado da arte da produção de conhecimento acerca dos aspectos relacionados à coordenação motora dos membros inferiores de pacientes com lesões no LCA durante a marcha. Constatamos que a coordenação motora dos membros inferiores na marcha de pacientes acometidos por lesões no LCA é um tema pouco explorado no contexto da investigação científica, o que impossibilita uma meta-análise. A principal limitação encontrada nesta revisão foi o fato de a maioria dos estudos ter sido feita pelo mesmo grupo de pesquisa.^{22-27,29} Isso pode ter levado a vieses na interpretação dos resultados dos artigos selecionados.

Apesar dessa limitação, o processamento dos dados biomecânicos relacionados às estratégias coordenativas dos membros inferiores durante a marcha foi feito por meio de quatro técnicas: Entropia Aproximada (EnAp), expoentes de

Lyapunov (ExLy), Entropia Diferencial (EnDif) e fase relativa contínua (FRC).

A EnAp é uma técnica não linear, baseada na variabilidade dos dados, que quantifica a regularidade ou previsibilidade dos sistemas que mudam com o tempo.³⁰ Mensura a probabilidade de que um determinado segmento da série temporal possa prever a configuração de outro segmento da mesma série de dados. Maiores coeficientes indicam maior irregularidade e maior complexidade, enquanto que menores valores revelam maior regularidade, previsibilidade e comportamento periódico.³⁰

O ExLy é outra estratégia de mensuração não linear que possibilita a medida da sensibilidade do sistema às condições iniciais e a quantidade de instabilidade ou previsibilidade de um sistema.³⁰ A presença de ExLy positivo indica caos, enquanto que, nos sistemas lineares há tendência para valores próximos a zero. Valores mais altos têm sido relacionados com comportamento caótico e a linearidade mostra tendência para o valor zero.

A técnica de FRC usa a análise velocidade-ângulo, na qual as coordenadas cartesianas (x,y) referentes a cada ponto da curva são transformadas em coordenadas polares (r,θ). A fase polar de cada ponto da curva é usada para o cálculo da interação dinâmica entre dois segmentos, de forma que a variável de interesse é a diferença algébrica da fase polar de um segmento distal em relação ao imediatamente proximal, por exemplo, a diferença entre perna e coxa (θ [perna] - θ [coxa]) e entre pé e perna (θ [pé] - θ [perna]).¹⁸ Nessa técnica, valores próximos de 0° indicam que os dois segmentos estão se movendo de maneira convergente, o que caracteriza uma coordenação *in phase*, enquanto que valores próximos a 180° indicam que os segmentos estão se movendo de maneira divergente, o que caracteriza uma coordenação *out of phase*.³¹ A fim de tornar possível a testagem estatística dos novos valores, gerados em cada comparação, a média aritmética absoluta de cada uma dessas curvas é usada.

No tocante aos resultados, o estudo de Kurz et al.²⁹ mostra que tanto a coordenação intersegmentar do joelho como a do tornozelo encontram-se alteradas em pacientes com reconstrução do LCA em relação a indivíduos saudáveis. A diferença na CRP da coxa em relação à perna foi mais pronunciada na fase final de apoio, na qual o grupo LCA-R apresentou uma coordenação com maiores características de *out of phase* em relação ao grupo controle. Os resultados indicam que a coxa se move mais rapidamente em relação à perna no grupo LCA-R, diferentemente do que ocorre nos indivíduos saudáveis. A magnitude dos picos da curva CRP formada pela perna e pelo pé foi diferente entre os grupos, apesar de suas ocorrências terem acontecido em períodos de tempo próximos. As diferentes estratégias usadas pelos pacientes com LCA-R podem aumentar as cargas impostas sobre o joelho e alterar a sua estabilidade.⁸ Esses fatores podem ter um efeito a longo prazo que podem levar à osteoartrite na articulação.²⁹ Este estudo comprovou que mesmo que o sítio da lesão tenha sido a articulação do joelho, outras articulações da cadeia biocinemática alteram seu comportamento secundariamente, o que ratifica a importância de se proceder à avaliação de todas as articulações dos membros inferiores quando se estudam pacientes com lesões no LCA.²⁹

Para os estudos que usaram técnicas não lineares, em geral obtiveram-se resultados semelhantes. Pacientes com deficiência no LCA sem reconstrução cirúrgica apresentaram um padrão de marcha mais rígido e menos variável, enquanto que pacientes com reconstrução ligamentar apresentam uma variabilidade maior do que os pacientes hígidos. Esses achados podem estar relacionados ao fato de que antes do procedimento cirúrgico a instabilidade mecânica causada pela deficiência do ligamento leva a uma maior restrição de movimentos, seja pela insegurança ou pela dor presente nessa fase. Segundo Solomonow³² após a reconstrução há um dano do sistema de propriocepção causado tanto pela lesão quanto pelo procedimento cirúrgico, o que compromete o feedback sensorial, relacionado ao reflexo ligamento-muscular, o que, provavelmente, resulta na deterioração da capacidade de identificação da posição e velocidade articular, o que ocasiona um maior grau de variabilidade cinemática no ato da marcha.

A diminuição do estado ótimo de variabilidade, descrita como a variabilidade de indivíduos hígidos, torna o sistema

mais rígido, enquanto que seu aumento em relação a esse estado ótimo torna o sistema mais instável e mais suscetível a perturbações.³³ Estabelecendo um paralelo com o estudo de sinais, ambas as situações indicam um sistema menos adaptável a perturbações e necessidades impostas pelo ambiente e estão, portanto, diretamente relacionadas à redução do status de saúde, o que já foi identificado para outros tipos de sinais, como os cardiológicos³⁴ e os neurais.³³

Os resultados dos estudos mostram que quando os dois membros inferiores do grupo LCA-D são comparados, o lado intacto do grupo LCA-D apresenta uma marcha mais regular e menos variável em relação ao lado lesado.^{22,23,25} De acordo com Georgoulis et al.²⁶ essa característica atenua a adaptabilidade do sistema e o deixa menos capaz de ajustar o posicionamento articular para lidar com perturbações externas. Isso, possivelmente, pode explicar a alta prevalência de doenças articulares degenerativas, no seguimento de longo prazo, em joelhos lesados.

Esses resultados estão presentes em diferentes condições de análise. Enquanto que na maioria dos estudos foi examinada a marcha convencional, Zampelli et al.²⁵ encontraram os resultados descritos acima (tabela 1) na marcha para trás. Essa conduta é muito usada no âmbito da reabilitação, haja vista existirem evidências de que os posteriores de coxa são mais ativados durante essa tarefa motora. Tzagarakis et al.²⁸ usaram um acelerômetro, posicionado na altura do tronco, para mensurar a variabilidade da aceleração nos eixos medial-lateral e anteroposterior e encontraram resultados semelhantes (tabela 1).

Outro aspecto estudado foi a comparação da variabilidade na marcha entre grupos com reconstrução ligamentar com diferentes tipos de enxertos. Moraiti et al.^{24,27} encontraram que os indivíduos tratados tanto com o enxerto de tendão patelar quanto com o de tendões flexores apresentaram maiores valores de EnAp e ExLy em relação ao grupo sadio. No entanto, não houve diferenças na comparação entre os diferentes tipos de enxerto. Isso pode explicar, em parte, a similaridade de resultados, quanto ao desenvolvimento de osteoartrose, em pacientes submetidos à reconstrução ligamentar por qualquer uma das duas técnicas.³⁶

Moraiti et al.²⁴ constataram ainda que o membro intacto do grupo LCA-R apresentou maiores valores de ExLy em relação ao membro lesado. Esses resultados sugerem que o membro inferior sadio de indivíduos com lesão unilateral do LCA apresenta alterações em relação ao membro lesado mesmo após o restabelecimento total do status funcional. Isso sugere que o membro sadio do grupo LCA-R apresenta um padrão de marcha mais rígido do que o membro lesionado. Os autores justificam esses achados sob o argumento de que essas diferenças podem ter ocorrido por causa de mecanismos compensatórios gerados com o intuito de manter certo grau de simetria entre os dois membros inferiores.²⁴

Apesar de as técnicas de processamento não lineares serem bastante úteis na identificação do status de coordenação motora global do indivíduo, como seus resultados são descritos somente em coeficientes, não é possível identificar qual fase da série temporal é responsável por gerar o aumento ou a diminuição na variabilidade. Com isso, uma interpretação prática e, por consequência, o desenvolvimento de novas

estratégias terapêuticas para retreinamento do padrão de marcha, baseados nesses resultados, mostram-se limitados. Para suprir a limitação apresentada acima, outras técnicas de processamento de sinais multidimensionais, em suas representações espaço-temporais, têm sido usadas no estudo da marcha. Uma das mais usadas é a Análise de Componentes Principais,³⁷ que, além de permitir a análise da série temporal completa, possibilita a identificação do principal local responsável pela variabilidade entre os grupos, por meio do estudo dos fatores de carga presentes nos autovetores da componentes principais.^{38,39}

Outras limitações também estão presentes nos estudos, principalmente relacionadas com o tipo de instrumentação usado para testes e na população estudada. No que tange à instrumentação usada, oito dos nove estudos (tabela 1) usaram esteiras para capturar a marcha. Os autores justificam que a marcha foi coletada em esteiras por causa da necessidade de coleta de um alto número de passadas consecutivas, o que impossibilita a coleta em uma pista. Além disso, alegam que o uso da pista poderia possibilitar a ocorrência de variação da velocidade da marcha entre os grupos. De fato, existem evidências de que a velocidade da marcha afeta a variabilidade dos dados.⁴⁰ No entanto, o uso de esteiras não reproduz perfeitamente o padrão de marcha feito diariamente. Por mais que a velocidade influencie na variabilidade da marcha, essas alterações são as que estão presentes nas atividades diárias. É importante elaborar sistemas de processamento e interpretação que também as considerem como variáveis determinantes dos resultados finais. Além disso, justificar o uso da esteira com base na necessidade de capturar-se um grande número de passos consecutivos não nos parece ser adequado, uma vez que tal demanda processual pode ser suprida pela adoção de outras técnicas, como, por exemplo, o uso de giroscópios, os quais possuem validação e confiabilidade comprovada, com baixa taxa de erro, principalmente nos exames de plano sagital.¹⁶ Em relação à população testada, todos os indivíduos com deficiência no LCA (LCA-D) eram classificados como ligamento-dependentes (*non-copers*). Quanto a isso, Rudolph et al.⁴¹ mostraram que ligamentos dependentes e ligamentos não dependentes apresentam características funcionais diferentes. Logo, os resultados apresentados nesta revisão devem ser restritos a indivíduos classificados como *non-copers*. É necessário fazerem-se estudos futuros para se inferir qualquer informação quanto à estrutura da variabilidade da marcha para a população ligamento não dependente.

Sugerimos para pesquisas futuras o estudo a associação dessas técnicas a medidas de coordenação com interpretação mais prática, como a coordenação intersegmentar, medidas a partir de representações ângulo-ângulo, com procedimentos de processamento dos dados que possibilitem a identificação das alterações e interpretação da série temporal completa, como a Análise de Componentes Principais ou Rede Neurais Artificiais.

Considerações finais

A partir dos resultados dos estudos podem-se concluir duas situações: (1) pacientes com lesão no LCA, independentemente de estruturação cirúrgica, apresentam aspectos relacionados

a menor capacidade de adaptar seu padrão de marcha às diferentes condições ambientais. O grupo LCA-D apresenta uma marcha mais rígida e menos variável, enquanto que o grupo LCA-R apresenta uma marcha menos rígida e mais variável em relação a indivíduos saudáveis; (2) existem diferenças entre o comportamento de joelhos intactos e lesados tanto no grupo LCA-D quanto no LCA-R; (3) as técnicas de processamento usadas nos estudos encontrados (Exponencial de Lyapunov, Etropia Aproximada e Continuous Relative Phase) só permitem a conclusão de que há alterações no padrão de marcha. Não é possível, por meio delas, concluir que fase da marcha está alterada, o que dificulta o desenvolvimento de novas terapêuticas específicas para a reabilitação. Além disso, não se sabe se essas alterações estão relacionadas com o desenvolvimento de osteoartrite no joelho.

Agradecimentos

Esse estudo contou com o apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

1. Ireland ML. Anterior cruciate ligament injury in female athletes: epidemiology. *J Athl Train.* 1999;34(2):150-4.
2. Arendt EA, Agel J, Dick R. Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *J Athl Train.* 1999;34(2):86-92.
3. Lohmander LS, Ostenberg A, Englund M, Roos H. High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury. *Arthritis Rheum.* 2004;50(10):3145-52.
4. Fink C, Hoser C, Hackl W, Navarro RA, Benedetto KP. Long-term outcome of operative or nonoperative treatment of anterior cruciate ligament rupture – Is sports activity a determining variable? *Int J Sports Med.* 2001;22(4):304-9.
5. Asano H, Muneta T, Ikeda H, Yagishita K, Kurihara Y, Sekiya I. Arthroscopic evaluation of the articular cartilage after anterior cruciate ligament reconstruction: a short-term prospective study of 105 patients. *Arthroscopy.* 2004;20(5):474-81.
6. Stergiou N, Ristanis S, Moraiti C, Georgoulis AD. Tibial rotation in anterior cruciate ligament (ACL)-deficient and ACL-reconstructed knees: a theoretical proposition for the development of osteoarthritis. *Sports Med.* 2007;37(7):601-13.
7. Georgoulis AD, Ristanis S, Moraiti CO, Paschos N, Zampeli F, Xergia S, et al. ACL injury and reconstruction: clinical related in vivo biomechanics. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2010;96(Suppl 8):S119-28.

8. Johansson H, Sjölander P, Sojka P. A sensory role for the cruciate ligaments. *Clin Orthop Relat Res.* 1991;(268):161-78.
9. Bernstein NA. *The co-ordination and regulation of movements.* Oxford: Pergamon Press; 1967.
10. Todorov E, Jordan MI. Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nat Neurosci.* 2002;5(11):1226-35.
11. Latash ML. *Synergy.* New York: Oxford University Press; 2008.
12. Crowther RG, Spinks WL, Leicht AS, Quigley F, Golledge J. Intralimb coordination variability in peripheral arterial disease. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2008;23(3):357-64.
13. Seifert L, Leblanc H, Chollet D, Delignières D. Inter-limb coordination in swimming: effect of speed and skill level. *Hum Mov Sci.* 2010;29(1):103-13.
14. Heiderscheit BC, Hammill J, Van Emmerik R. Variability of stride characteristics and joint coordination among individuals with unilateral patellofemoral pain. *J App Biomech.* 2002;18:110-21.
15. Ferber R, Osternig LR, Woolacott MH, Wasielewski NJ, Lee JH. Gait mechanics in chronic ACL deficiency and subsequent repair. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2002;17(4):274-85.
16. Favre J, Luthi F, Jolles BM, Siegrist O, Najafi B, Aminian K. A new ambulatory system for comparative evaluation of the three-dimensional knee kinematics, applied to anterior cruciate ligament injuries. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14(7):592-604.
17. Knoll Z, Kocsis L, Kiss RM. Gait patterns before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2004;12(1):7-14.
18. Winstein CJ, Garfinkel A. Qualitative dynamics of disordered human locomotion: a preliminary investigation. *J Mot Behav.* 1989;21(4):373-91.
19. Hamill J, van Emmerik RE, Heiderscheit BC, Li L. A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1999;14(5):297-308.
20. Paterson K, Hill K, Lythgo N. Stride dynamics, gait variability and prospective falls risk in active community dwelling older women. *Gait Posture.* 2011;33(2):251-5.
21. Latash ML, Scholz JP, Schönner G. Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control.* 2007;11(3):276-308.
22. Stergiou N, Moraiti C, Giakas G, Ristanis S, Georgoulis AD. The effect of the walking speed on the stability of the anterior cruciate ligament deficient knee. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2004;19(9):957-63.
23. Moraiti C, Stergiou N, Ristanis S, Georgoulis AD. ACL deficiency affects stride-to-stride variability as measured using nonlinear methodology. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007;15(12):1406-13.
24. Moraiti CO, Stergiou N, Ristanis S, Vasiliadis HS, Patras K, Lee C, et al. The effect of anterior cruciate ligament reconstruction on stride-to-stride variability. *Arthroscopy.* 2009;25(7):742-9.
25. Zampeli F, Moraiti CO, Xergia S, Tsiaras VA, Stergiou N, Georgoulis AD. Stride-to-stride variability is altered during backward walking in anterior cruciate ligament deficient patients. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2010;25(10):1037-41.
26. Georgoulis AD, Moraiti C, Ristanis S, Stergiou N. A novel approach to measure variability in the anterior cruciate ligament deficient knee during walking: the use of the approximate entropy in orthopaedics. *J Clin Monit Comput.* 2006;20(1):11-8.
27. Moraiti CO, Stergiou N, Vasiliadis HS, Motsis E, Georgoulis A. Anterior cruciate ligament reconstruction results in alterations in gait variability. *Gait Posture.* 2010;32(2):169-75.
28. Tzagarakis GN, Tsvigoulis SD, Papagelopoulos PJ, Mastrokalos DS, Papadakis NC, Kampanis NA, et al. Influence of acute anterior cruciate ligament deficiency in gait variability. *J Int Med Res.* 2010;38(2):511-25.
29. Kurz MJ, Stergiou N, Buzzi UH, Georgoulis AD. The effect of anterior cruciate ligament reconstruction on lower extremity relative phase dynamics during walking and running. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2005;13(2):107-15.
30. Stergiou N, Buzzi UH, Kurz MJ. Nonlinear tools in human movement. In: Stergiou N. *Innovative analyses of human movement: analytical tools for human movement research.* Champaign: Human Kinetics; 2004. p. 63-90.
31. Barela J, Whitall J, Black P, Clark J. An examination of constraints affecting the intralimb coordination of hemiparetic gait. *Hum Mov Sci.* 2000;19:251-73.
32. Solomonow M. Sensory-motor control of ligaments and associated neuromuscular disorders. *J Electromyogr Kinesiol.* 2006 Dec;16(6):549-67.
33. Stergiou N, Harbourne R, Cavanaugh J. Optimal movement variability: a new theoretical perspective for neurologic physical therapy. *J Neurol Phys Ther.* 2006;30(3):120-9.
34. Pincus SM, Viscarello RR. Approximate entropy: a regularity measure for fetal heart rate analysis. *Obstet Gynecol.* 1992;79(2):249-55.
35. Dingwell JB, Cavanagh PR. Increased variability of continuous overground walking in neuropathic patients is only indirectly related to sensory loss. *Gait Posture.* 2001;14(1):1-10.
36. Magnussen RA, Carey JL, Spindler KP. Does autograft choice determine intermediate-term outcome of ACL reconstruction? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19(3):462-72.
37. Leporace G. *Escore de funcionalidade da marcha humana: aplicação em sujeitos com lesão no ligamento cruzado anterior [dissertação].* Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2012.
38. Leporace G, Batista LA, Muniz AM, Zeitoune G, Luciano T, Metsavaht L, et al. Classification of gait kinematics of anterior cruciate ligament reconstructed subjects using principal component analysis and regressions modeling. In: 34th Annual International IEEE EMBS Conference, San Diego, 2012.
39. Leporace G, Muniz AM, Pereira G, Metsavaht L, Batista LA, Nadal J. Application of principal component analysis in the study of tasks with different mechanical constraints. *Rev Port Cien Desp.* 2011;11(2):907-10.
40. Oberg T, Karsznia A, Oberg K. Basic gait parameters: reference data for normal subjects, 10-79 years of age. *J Rehabil Res Dev.* 1993;30(2):210-23.
41. Rudolph KS, Eastlack ME, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Movement patterns after anterior cruciate ligament injury: a comparison of patients who compensate well for the injury and those who require operative stabilization. *J Electromyogr Kinesiol.* 1998;8(6):349-62.