

UFBA

Universidade Federal da Bahia
Instituto de Ciências da Saúde

MARCUS DE LEMOS FONSECA

PROCESSOS INTERATIVOS
DOS ÓRGÃOS E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO • ICS • UFBA



**APRENDIZADO MOTOR COMO UM
PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE
PADRÕES MOTORES PRIMITIVOS**

Salvador
2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
PROCESSOS INTERATIVOS DOS ÓRGÃOS E SISTEMAS**

MARCUS DE LEMOS FONSECA

**APRENDIZADO MOTOR COMO UM PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO
DE PADRÕES MOTORES PRIMITIVOS**

Salvador
2023

MARCUS DE LEMOS FONSECA

**APRENDIZADO MOTOR COMO UM PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO
DE PADRÕES MOTORES PRIMITIVOS**

Tese apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Processos Interativos dos Órgãos e Sistemas, do Instituto de Ciências da Saúde, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Nildo Manoel da Silva Ribeiro

Salvador
2023

Ficha catalográfica: Keite Birne de Lira CRB-5/1953

Fonseca, Marcus de Lemos

Aprendizado motor como um processo de otimização de padrões motores primitivos./ [Manuscrito]. Marcus Lemos Fonseca. Salvador, 2023.

65 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Nildo Manoel da Silva Ribeiro.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Ciências da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Processos Interativos dos Órgãos e Sistemas, Salvador, 2023.

1.Movimento. 2. Aprendizado. 3.Cinemática. 4. Otimização.
I. Ribeiro, Nildo Manoel da Silva. II. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Ciência da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Processos Interativos dos Órgãos e Sistemas.
III. Título

CDD – 796.012 21. ed.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Instituto de Ciências da Saúde



TERMO DE APROVAÇÃO DA DEFESA PÚBLICA DE TESE

MARCUS DE LEMOS FONSECA

**APRENDIZADO MOTOR COMO UM PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE PADRÕES
MOTORES PRIMITIVOS**

Salvador, Bahia, 13 de fevereiro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA:

DocuSigned by:

Nildo Manoel da Silva Ribeiro

2CC605BD3368418

PROF. DR. NILDO MANOEL DA SILVA RIBEIRO (Examinador Interno)

DocuSigned by:

Cleber Luz Santos

62AC75F0606344B

PROF. DR. CLEBER LUZ SANTOS (Examinador Interno)

DocuSigned by:

Karen Trippo

1D45E3680BC84E9

PROFA. DRA. KAREN VALADARES TRIPPO (Examinadora Interna)

DocuSigned by:

Igor de Matos Pinheiro

87A30755EEB647E

PROF. DR. IGOR DE MATOS PINHEIRO (Examinador Externo)

DocuSigned by:

Juliana Viana Freitas

5228CC5676B740B

PROFA. DRA. JULIANA VIANA FREITAS (Examinadora Externa)

Dedico esta tese a minha família, em especial a meus pais, meu irmão, minha esposa, meu filho e minha afilhada. Porto seguro para voos maiores. Certeza de carinho, apoio, amparo... amor. A jornada é sempre prazerosa com a presença de vocês. É força para seguir em frente, desbravando novos horizontes e se superando todo dia.

AGRADECIMENTOS

Impossível avançar sem expressar sincera gratidão a figuras fundamentais nesse processo...

Minha gratidão, em primeiro lugar, a Deus, por ser a energia que me move, motiva e mantém. Espero irradiar a paz, o amor e a serenidade que ele me traz.

A meu pai Alfredo Raymundo Rocha Gomes da Fonseca, pelo exemplo de ser humano. Íntegro, trabalhador, justo e dedicado à família. Sempre presente nos meus dias, nos meus atos, nas minhas decisões, para sempre. Meu exemplo maior de vida e espelho para meu filho, Francisco de Azevedo Fonseca.

A minha mãe Edi-Heli de Lemos Fonseca, por todo amor incondicional, carinho, amizade, compreensão, conselhos e porto seguro. Meu maior exemplo de sabedoria de vida. Você faz minha vida ter luz e sentido. Amo você.

A meu único irmão, parceiro e amigo, Cláudio Márcio de Lemos Fonseca. Presença fundamental para equilíbrio e serenidade de nossa família. Destemido e corajoso segue como meu ídolo mais próximo.

A minha mulher, esposa, parceira e cúmplice Tissiane Chamusca de Azevedo Fonseca, a quem escolhi para ser companheira por toda esta vida. Quem me dá estabilidade e condições de seguir em frente, cuidando de forma admirável do nosso maior bem, nosso filho amado Francisco de Azevedo Fonseca, razão maior de nossas vidas hoje.

A toda minha família, aquela que me escolheu e também a que escolhi: especialmente a minha sogra Clarissa Chamusca de Azevedo: sua presença, carinho e proteção são essenciais para conseguir seguir adiante.

A meu orientador, o ilustre Professor Doutor Nildo Manoel da Silva Ribeiro, que aceitou este desafio e depositou em mim tamanha confiança,

verdadeiramente me transformando nesse período. Obrigado de verdade, meu amigo. Você é um ser humano admirável!

Ao exemplo na profissão e que me inspira: Dr. José Vicente Pereira Martins – MESTRE e orgulhosamente AMADO AMIGO, para mim um ideal de fisioterapeuta.

A toda a equipe do NITRE (Núcleo de Inovação Terapêutica em Reabilitação), pessoas sensacionais, especialmente Professor Norberto Peña, Ângelo Fred Torres, Vitor Sotero, Ana Paula Quixadá, Thiago Figueiredo e Matheus Santos.

Meu agradecimento especial ao amigo-irmão João Paulo Bomfim Cruz Vieira. Esta realização só foi possível porque ele, na sua melhor característica, que é a solidariedade, me apresentou a um grupo de pesquisa chefiada por uma pessoa “fora do normal”.

Ao “fora do normal”: Professor José Garcia Vivas Miranda. O mais próximo que alguém pode chegar da expressão “guru”. Sabedoria, carisma, simpatia e trabalho. Uma honra poder dividir algumas horas de minha semana com você.

A todos os meus verdadeiros amigos que são fundamentais nesta jornada, especialmente Pedro de Farias Porto, pelo estímulo diário e parceria de vida.

Há que se cuidar da vida,
Há que se cuidar do mundo,
Tomar conta da amizade.
Alegria e muito sonho,
Espalhados no caminho,
Verdes, planta e sentimento
Folhas, coração,
Juventude e fé.

Milton Nascimento e Wagner Tiso. *Coração de estudante*

Fonseca M de L. Aprendizado motor como um processo de otimização de padrões motores primitivos [Tese]. Salvador: Instituto de Ciências da Saúde, Universidade Federal da Bahia; 2023.

RESUMO

Introdução – O aprendizado motor é a elaboração contínua de estratégias motoras cada vez mais eficientes para vencer as várias demandas ambientais ao longo da vida. Por suas características específicas, os movimentos do Tai Chi Chuan (TC) favorecem estudos biomecânicos que buscam identificar importantes parâmetros de aprendizado motor. **Objetivos** – Delinear as características cinemáticas dos movimentos empreendidos no TC e verificar se existe um comportamento de otimização de padrões motores primitivos em processos de aprendizado motor nos seus movimentos. **Metodologia** – Trata-se de uma revisão integrativa seguida de um estudo observacional de corte transversal. Para a revisão integrativa, foram selecionadas publicações das bases de dados PubMed, Biblioteca Cochrane, PEDro e Scielo, além de citações manuais de pesquisas originais relacionadas e artigos de revisão para qualquer estudo adicional. Os critérios de seleção foram: artigos publicados em português ou inglês, sem limites de período de publicação e que rastreassem a análise biomecânica dos movimentos do TC. As palavras-chave utilizadas foram TC e suas correlatas, associadas aos termos biomecânica, cinemática, movimento, fenômenos biomecânicos e captura de movimento. Na metodologia do estudo observacional foram analisados dados a partir de base secundária. Dados cinemáticos de grande precisão de 12 indivíduos praticantes de TC divididos em quatro grupos conforme o nível de habilidade (iniciante, intermediário, avançado e especialista), durante três interpretações de 13 técnicas específicas. Foi, então, aplicado um modelo de decomposição de movimentos, o *Movement Element Decomposition* (MED), capaz de identificar aspectos que indicam otimização do gestual motor, como o número de elementos do movimento por tempo (N_t), o número de picos de movimento (N_p) e a suavização do movimento (W), conforme economia de custo em relação ao tempo. **Resultados** – 13 publicações com métodos semelhantes de análise, descrevendo os movimentos do TC como lentos, amplos, suaves, com menos arranques e com centro de gravidade mais baixo e desempenhando maior variação de trajetória. No estudo observacional verificou-se, através do teste de Kruskal Wallis, diferença significativa nos praticantes mais experientes com relação à redução dos N_t , aumento do N_p e também do W . **Conclusão** – Os movimentos do TC são mais lentos, amplos, suaves e fluidos. Nos praticantes mais experientes, observa-se um comportamento de otimização do gestual, caracterizado por um N_t menor, ou seja, menos elementos de movimento necessários para o movimento e um N_p maior, associado a uma curva mais lenta de W , indicando maior controle e suavidade, mesmo em movimentos mais complexos.

Palavras-chave: Movimento; Aprendizado; Cinemática; Otimização.

Fonseca M de L. Motor learning as a process of optimizing primitive motors patterns [Thesis]. Salvador: Institute of Health Sciences. Federal University of Bahia; 2023.

ABSTRACT

Introduction: Motor learning is the continuous development of increasingly efficient motor strategies to overcome the various environmental demands throughout life. Due to their specific characteristics, the Tai Chi Chuan (TC) movements favor biomechanical studies that seek to identify important motor learning parameters. **Objectives:** to outline the kinematic characteristics of the movements undertaken by the TC and attest if there is an optimizing behavior towards primitive motor patterns in motor learning processes and their movements. **Methodology:** This is an integrative review followed by an observational cross-sectional study. For the integrative review, publications from PubMed, Cochrane Library, Pedro and Scielo databases were selected, in addition to citations of concerning original research and review articles for any supporting study. The selection criteria were: articles published both in Portuguese and English that tracked biomechanical analysis of TC movements, without publication timeline restrictions. some keywords used were TC and other correlated ones, in addition to terms such as biomechanics, kinematics, movement, biomechanical phenomena and motion capture. In the observational study's methodology, data from a secondary base were analyzed. Also, highly accurate kinematic data from 12 TC practitioners, who were divided into 4 groups according to skill level (beginner, intermediate, advanced and expert) and during 3 interpretations of 13 specific techniques, were analyzed. A movement decomposition model, the Movement Element Decomposition (MED), was then applied, which was capable of identifying aspects that indicate motor gesture optimization such as the Number of Movement Elements per time (Nt), the Number of Movement Peaks (Np) and Motion Smoothing (W) as cost savings over time. **Results:** it was identified 13 publications with similar methods of analysis, which described TC movements as slow, wide, smooth, with fewer starts and with a lower center of gravity, performing greater variation in its trajectory. In the observational study, through the Kruskal Wallis test, a significant difference was observed in more experienced practitioners when it came to the reduction of Nt, to the increase of Np and also to W. **Conclusions:** TC movements are slower, larger, smoother and more fluid. In more experienced practitioners, a gesture optimization behavior is observed, characterized by a smaller Nt, which means lesser movement elements necessary for the movement and larger Np associated with a slower W curve, indicating greater control and smoothness, even in more complex movements.

Key-Words: Movement; Apprenticeship; Kinematic; Optimization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese das publicações selecionadas	35
Tabela 2 – Dados descritivos da amostra	45
Tabela 3 – Movimentos do Tai Chi Chuan	47
Tabela 4 – Teste de homogeneidade de variância	49
Tabela 5 – N_t . Comparação dos pares	50
Tabela 6 – Suavização do movimento: comparação dos pares	51
Tabela 7 – Número de picos: comparação dos pares	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento dos N_t entre os grupos	51
Gráfico 2 – Comportamento do W entre os grupos	52
Gráfico 3 – Comportamento do N_p entre os grupos	53
Gráfico 4 – N_t entre os grupos	53
Gráfico 5 – W entre os grupos	54
Gráfico 6 – N_p entre os grupos	54

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SNME – Sistema neuro-músculo-esquelético

SNC – Sistema nervoso central

EM – Elementos do movimento

TC – Tai Chi Chuan

W – Suavização do movimento

AVC – Acidente vascular cerebral

SN – Sistema nervoso

MED – Decomposição de elementos de movimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 JUSTIFICATIVA	18
3 OBJETIVOS	19
4 REVISÃO DE LITERATURA	20
5 MATERIAIS E MÉTODOS	30
6 RESULTADOS	32
6.1 ARTIGO 1 – Aspectos cinemáticos dos movimentos do Tai Chi Chuan. Uma revisão integrativa	32
6.1.1 Introdução	32
6.1.2 Material e métodos	33
6.1.3 Resultados e Discussão	34
6.1.4 Conclusão	41
6.2 ARTIGO 2 – Aprendizado motor como um processo de otimização de padrões motores primitivos	43
6.2.1 Introdução	43
6.2.2 Material e Métodos	44
6.2.3 Resultados	50
6.2.4 Discussão	54
6.2.5 Conclusão	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O movimento é um aspecto essencial para a vida, pois permite ao ser humano interações vitais com o ambiente onde está inserido. Essa essencialidade pode ser percebida desde as primeiras fases de vida, ainda na etapa intrauterina, quando já é possível perceber intensa movimentação do feto, ainda que ela seja muito primitiva e sem o controle necessário para a realização de tarefas motoras voluntárias^{1,2}.

O curso natural do desenvolvimento e do aprendizado motor é a elaboração contínua de estratégias motoras cada vez mais eficientes para vencer as várias demandas ambientais ao longo da vida. Embora seja possível identificar que a prática leva ao aprimoramento das respostas motoras, e que tarefas motoras simples são caracterizadas por um processo de otimização de padrões motores primitivos, ainda não estão muito bem esclarecidos os mecanismos que o sistema neuro-musculo-esquelético (SNME) utiliza para promover melhora no desempenho de tarefas motoras mais complexas^{1,3-6}.

Tradicionalmente, a literatura considera que o sistema nervoso central (SNC) controla os movimentos com o objetivo de aprimorar parâmetros biomecânicos ou gerenciar recursos fisiológicos, embora alguns autores não tenham constatado tais comportamentos. Mais recentemente, pesquisadores propuseram um modelo em que é possível observar que, em tarefas motoras simples, o organismo se comporta como um sistema capaz de otimizar padrões motores primitivos, promovendo redução da variabilidade de estratégias motoras, bem como seu custo de trabalho, emergindo, assim, uma estratégia motora mais eficiente, capaz de responder a demandas da tarefa e do ambiente. Contudo, se continua desconhecendo se esse processo também ocorre em movimentos mais complexos e como pode ser extrapolado para aspectos como retenção e transferência motora²⁻¹⁰.

A literatura apresenta os primeiros relatos sobre as possibilidades de quantificação da função motora com o trabalho de Von Hofsten¹¹, publicado em 1979, baseado em achados de pesquisa anterior, do ano de 1974, na qual Brooks¹², tendo estudado os movimentos dos membros anteriores de primatas, sugere que um movimento total é composto por subunidades do movimento, como pequenos

movimentos de alcance dentro do movimento maior. Von Hofsten¹¹ (1979) chamou esses submovimentos de “elementos do movimento” (EMs), que são caracterizados por mudanças na aceleração e na desaceleração do gesto motor, e variam de velocidade zero até velocidade zero em determinada direção, compondo, assim, um EM. Logo, quanto mais EMs tiver um movimento, menos aprimorado ele será, sendo o inverso verdadeiro^{11,12}.

Posteriormente, Hoff verificou que o movimento total é composto por trajetórias de movimentos de ponto a ponto, os quais, quando aprimorados, tendem a minimizar o custo do movimento global pela minimização do número de arranques desses submovimentos^{9,10}.

Em 2019, Fonseca et al.⁸ verificaram que era possível identificar um processo de otimização desses EMs durante um processo de adaptação sensório-motor de indivíduos que foram expostos a uma demanda motora de controle postural durante um jogo de videogame. Contudo, não foi possível identificar se esse processo ocorreria também em movimentos mais complexos e em períodos mais longos de análise⁸.

Uma abordagem do processo de aprendizado sensório-motor ou de adaptação sensório-motora que tem recebido contribuições importantes nos últimos anos é a que considera esse aprendizado ou adaptação como um sistema complexo de interações entre o indivíduo e o ambiente¹⁻⁶. Nessa abordagem ecológica, o aprendizado motor apresenta uma dinâmica não linear, com fases de estabilização e desestabilização, nas quais a variabilidade apresenta um papel fundamental e um foco na interação entre o sistema sensório-motor e o ambiente em que a tarefa é realizada¹³⁻¹⁵.

Nessa perspectiva, os movimentos complexos necessários para o cumprimento de técnicas específicas do Tai Chi Chuan (TC) compõem dados muito interessantes para análise biomecânica do comportamento motor de seus praticantes. O TC é considerado como uma arte marcial milenar chinesa, que se espalhou pelo mundo ao longo do tempo e, hoje, figura como uma opção de atividade física indicada para o controle da estabilidade dos movimentos e da velocidade da respiração, atuando também em ganhos da força muscular, flexibilidade, equilíbrio e controle postural,

com benefícios reconhecidos para a melhora da capacidade funcional de indivíduos hígidos, ou mesmo acometidos por alguma disfunção motora, como nos casos de acidente vascular cerebral (AVC), por exemplo^{16,17}.

Por suas características específicas, os movimentos empreendidos no TC para execução das técnicas e habilidades próprias dessa arte marcial apresentam velocidade mais lenta e amplitudes maiores, combinando segmentos corporais mais estáveis com outros de maior grau de mobilidade, em uma complexidade notável. Aliada a essas nuances, existe a busca constante pelo aprimoramento da execução das técnicas, através de movimentos mais suaves, fluidos e harmônicos, favorecendo estudos biomecânicos que buscam identificar importantes parâmetros de controle e aprendizado motor¹⁶⁻¹⁸.

2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento disponível sobre o comportamento motor, especialmente do aprendizado motor, abrange muitas informações sobre possíveis mecanismos envolvidos nos processos de aprimoramento do movimento, em programas de treinamento ou mesmo tratamentos de reabilitação e melhora de *performance* físico-funcional.

Contudo, essas informações são, em sua grande maioria, baseadas em teorias que tentam organizar alguns conceitos, de maneira que um conteúdo sistematizado possa explicar o complexo processo de aprendizado motor e embasar intervenções que objetivem potencializar o melhor desenvolvimento de respostas motoras para demandas específicas ou variadas.

Com o melhor acesso a informações quantitativas relacionadas ao movimento nos últimos anos, novas perspectivas de estudo do comportamento motor podem ser analisadas, a fim de se desenvolver um método prático de observação concreta das estratégias motoras empreendidas durante processos de aprendizado motor.

Este estudo busca contribuir, baseado em recentes pesquisas e modelos validados de estudo quantitativo do movimento humano, com uma proposta factível de análise do comportamento biomecânico, especialmente em seu componente cinemático, que explique mecanismos corporais envolvidos na determinação de um comportamento motor otimizado.

Além de preencher uma lacuna importante nos conceitos das ciências do movimento, este estudo pode também contribuir sobremaneira para as estratégias empreendidas por profissionais do movimento, aqueles interessados em oferecer abordagens mais eficientes nos processos de melhora da *performance* motora.

3 OBJETIVOS

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho consistem em delinear as características cinemáticas dos movimentos empreendidos no Tai Chi Chuan e verificar se existe um comportamento de otimização de padrões motores primitivos em processos de aprendizado motor em movimentos próprios dessa arte marcial chinesa.

4 REVISÃO DE LITERATURA

Movimento é a capacidade de o corpo, ou de um segmento do corpo, se mover. Deslocar de um local para outro, em diferentes direções, é um exemplo. O movimento é um elemento importante para a vida humana e para a integração do indivíduo na sociedade, uma vez que tarefas cotidianas, das mais simples às mais complexas, envolvem a necessidade de se mover¹⁻³.

O conceito de controle motor voluntário pode ser compreendido como a capacidade de o organismo controlar adequadamente seus variados sistemas, em harmonia com as influências ambientais e restrições da tarefa, para produção de um ato motor. Contudo, sua descrição definitiva é perseguida há muito tempo pelos profissionais que lidam direta ou indiretamente com movimento humano, distúrbios motores, limitações funcionais ou técnicas de melhora de *performance* motora humana^{2,15}.

Embora os estudos relacionados a esse tema datem do século XIX, ainda hoje as ciências do movimento estão em busca de um consenso que delinieie e explique definitivamente como o ser humano é capaz de produzir atos motores variados e adaptados às necessidades cotidianas^{1,3,15,19}.

Ao longo de todo esse período, alguns pesquisadores propuseram teorias que tentam compilar achados práticos com abordagens teóricas que sintetizam uma proposta factível de ação motora voluntária e eficiente^{1-5,20,21}.

A primeira teoria de que se tem registro foi desenvolvida ainda no final dos anos de 1800 e início de 1900 e publicada pelo neurofisiologista britânico Charles Sherrington. Designada "teoria dos reflexos", era baseada em estudos com animais deaferentados, os quais, mesmo com lesões que provocavam a interrupção dos comandos cerebrais descendentes, ao receberem estímulos sensoriais e ao terem contrações musculares provocadas, os movimentos eram visíveis. A partir dessas observações, foi possível descrever circuitos reflexos simples, como o arco reflexo, e teorizar que o movimento voluntário era resultante de uma estimulação sensorial, logo, produzido a partir de uma resposta reflexa a um determinado estímulo^{19,21,22}.

Essa teoria se manteve, no mínimo, por 50 anos e influenciou a maioria dos pesquisadores e profissionais que trabalhavam diretamente com o movimento humano. No entanto, por volta dos anos de 1950, outros pesquisadores a questionaram, principalmente pelo fato de que, por se tratar de uma tentativa de descrever o controle motor voluntário, era insuficiente atribuir apenas aos movimentos reflexos a capacidade de produzir movimentos tão complexos e delicados, ainda que organizados em uma possível sequência^{22,23}.

Assim, Fonseca, Faria, Ocarino, Mancine² (2007) propuseram uma organização mais complexa do controle motor, na qual estruturas do sistema nervoso (SN) funcionavam de maneira organizada e hierárquica para a realização do movimento voluntário. Nessa descrição teórica, o córtex cerebral tem papel preponderante e é considerado o nível mais alto de controle motor, pois dele partem a intenção e toda a coordenação do movimento. Em seguida, centros motores chamados de mais primitivos, localizados em nível de tronco encefálico e medula espinhal, modulariam interações motoras mais reflexas de movimentos mais sinérgicos e grosseiros. Essa definição é conhecida com o nome de teoria hierárquica e tem importante papel na evolução dos entendimentos sobre controle motor²⁴.

Outra teoria de destaque é a teoria dos sistemas, desenvolvida por Berstein²⁵, também em meados do século XX. Nessa descrição, embora ainda exista uma organização de estruturas neurais comandando as ações motoras, novos componentes são incluídos, pois Berstein entendia o movimento humano como a capacidade de controlar os mais variados sistemas do organismo na solução de problemas de ordem física, sob todas as influências de forças internas e externas que agem ininterruptamente sobre os segmentos corporais^{25,26}.

Embora essa última teoria seja bem mais abrangente do que as outras referidas, ainda existe uma lacuna de descrição muito importante, acrescida à teoria da segunda metade do século XX.

A teoria ecológica descreve o controle do movimento como o produto de um sistema integrado, mas de íntima relação com o ambiente, pois não é possível conceber o movimento, em sua plenitude, se não for considerado o ambiente onde ele ocorre. Proposta por Gibson¹¹ e desenvolvida por seus alunos posteriormente,

essa teoria considera que a forma como percebemos o ambiente é fundamental para planejarmos o movimento que vamos executar, e que esse controle motor é influenciado justamente pela tarefa a ser executada, o ambiente onde ela vai ocorrer e as características próprias do indivíduo que vai executá-la^{27,28}.

Todavia, todas essas e outras teorias estão mais no campo da observação empírica e ainda não conseguem definir de que maneira o ser humano é capaz de produzir uma variedade tão grande de respostas motoras frente às demandas cotidianas e às influências ambientais. Em última análise, o que se pode inferir é que essas teorias são complementares e produzem uma constante e fundamental reflexão, capaz de manter em atividade pesquisadores na busca de uma explicação cabível para os fenômenos encontrados em suas respectivas práticas profissionais^{28,29}.

Segundo Latash et al.²⁰ (2010), o controle motor se reporta aos movimentos produzidos e controlados, por meio da relação entre SNC e a coordenação de músculos e articulações. Essa condição facilita os movimentos e proporciona informações sensoriais do meio ambiente e do próprio corpo, que são utilizadas na própria coordenação e no controle deles^{20,27}.

Outro tipo de investigação relacionada ao movimento humano é a capacidade de mensurá-lo quantitativamente. Essa tarefa se apresenta com grande importância, pois é capaz de fornecer dados objetivos do ato motor produzido e, dessa maneira, permitir que disfunções sejam percebidas, compreendidas e registradas, bem como de propiciar orientações sobre estratégias que permitam o aprimoramento do controle motor²⁷⁻²⁹.

Contudo, os poucos métodos quantitativos existentes assumem modelos lineares e são quase sempre específicos para movimentos simples, normalmente os alcances com o membro superior, e exigem equipamentos sofisticados e de alto custo, que só podem ser utilizados em ambientes de laboratório ou em condições desconectadas da realidade funcional do indivíduo.

Uma abordagem do processo de adaptação sensório-motora durante a realização do movimento e que tem recebido contribuições importantes nos últimos anos é a abordagem que considera o comportamento motor como um sistema

complexo de interações entre o indivíduo e o ambiente³⁰⁻³². Nessa abordagem ecológica, o controle motor apresenta uma dinâmica não linear, com fases de estabilização e desestabilização, nas quais a variabilidade apresenta um papel fundamental e um foco na interação entre o sistema sensório-motor e o ambiente onde a tarefa é realizada.

Aliada à abordagem ecológica, a teoria de sistemas dinâmicos³³⁻³⁵ fornece ferramentas conceituais importantes para a análise do movimento, justamente por trazer conceitos como estabilidade e metaestabilidade, flutuações, auto-organização³⁶, criticalidade e por lidar com sistemas abertos com muitos graus de liberdade³⁷.

Uma das maneiras mais conhecidas e amplamente utilizadas para se quantificar o aspecto motor humano é através da área da ciência conhecida como cinemática, que é o ramo da mecânica que descreve os componentes espaciais e temporais do movimento. A descrição envolve posição, velocidade e aceleração de um corpo, sem levar em consideração as forças que causam o movimento, sendo elas as variáveis. Na análise quantitativa, o movimento é decomposto numericamente com base em medições provenientes de dados coletados durante sua realização. O instrumento básico para o registro de medidas cinemáticas é uma câmera de vídeo. Atualmente, através de *softwares* específicos, utilizam-se as imagens capturadas para calcular as variáveis cinemáticas de interesse e delinear quantitativamente os aspectos específicos da tarefa motora, bem como suas variações no tempo^{6,8,12-14,18,22-24}.

Os primeiros relatos dessa análise datam de 1974, em estudo realizado em primatas pelo pesquisador britânico Brooks¹², que descreve os aspectos cinemáticos dos movimentos dos membros dianteiros desses animais. Von Hofsten¹¹, em 1979, citando o estudo de Brooks, utilizou a mesma estratégia para verificar o comportamento motor do membro superior de lactantes, durante semanas, para estudar de que maneira se comportavam os aspectos cinemáticos do movimento de alcance. Como, à época, não havia *softwares* que pudessem fazer essa análise, Hofsten utilizou a divisão do vídeo em quadros, observou de que maneira os movimentos se desenvolviam e, por meio de cálculos baseados na aceleração,

portanto uma medida cinemática, descreveu um comportamento motor que variava ao longo do tempo de maturação do SN e do desenvolvimento motor³⁷.

Quantificar os aspectos inerentes ao movimento humano permite que uma outra área do controle e do comportamento motor seja desenvolvida: o aprendizado motor. Essa área mais recente das ciências do movimento permite que conheçamos de que maneira os seres humanos promovem a melhora da *performance* motora, produzindo um movimento que, ao mesmo tempo, seja suficiente para a execução da tarefa proposta, mas também envolva o menor dispêndio possível de energia ou outras demandas desnecessárias, aproximando-se de uma estratégia a mais eficiente possível^{2,4,5,6,27,30,31}.

Dentro do campo de estudo usualmente conhecido como aprendizagem sensório-motora, ou aprendizado sensório-motor, é possível identificar dois processos conceitualmente distintos: a aquisição de novas habilidades e a adaptação sensório-motora^{37,38}.

No processo de aquisição de novas habilidades, o sistema sensório-motor se organiza para executar uma nova tarefa, pelo estabelecimento de modelos internos da dinâmica da tarefa funcional a ser executada, designada de estratégia motora^{4,5,39}.

Já a adaptação sensório-motora pode ser encarada como um processo no qual o sistema motor reotimiza sua atividade quando novas restrições lhe são impostas, de forma a executar, com a maior qualidade possível, tarefas novas ou aprendidas anteriormente³⁹. Colocado de outra forma, o SNC busca construir novos modelos internos de dinâmica que possibilitem a execução da tarefa em novas condições biomecânicas e neurofisiológicas⁴⁰. Essa adaptação tem implicação direta, por exemplo, no processo de reabilitação neurológica, no qual indivíduos precisam executar movimentos já conhecidos, sob novas condições impostas por lesões cerebrais, envelhecimento ou doenças neurológicas³⁷⁻⁴¹.

Os relatos históricos sobre os processos de aprendizado motor versam basicamente sobre aspectos teóricos que embasariam o desenvolvimento de uma nova habilidade motora. Contudo, é percebida uma escassez de relatos quantitativos sobre o comportamento das estratégias motoras durante tais processos.

A literatura busca um modelo de programação motora que utilize leis gerais capazes de explicar a escolha da estratégia de execução do movimento. Alguns conceitos já foram descritos com o objetivo de desenvolver uma forma eficiente de quantificação do aspecto motor, quase sempre baseados no estudo dos movimentos simples dos membros superiores, como no alcance e na escrita^{41,42}.

Um conceito encontrado na literatura do ano de 1983 versa sobre a *isogony*, ainda sem tradução para o português; esse termo se refere a um modelo baseado na busca pela manutenção constante da velocidade, quando realizamos um determinado movimento, ou seja, o determinante para o movimento seria a velocidade angular de execução, buscando-se, assim, uma velocidade ideal que permitisse fazer o gesto motor de forma eficiente^{43,44}.

Outro modelo desenvolvido por pesquisadores italianos considera que o movimento é realizado aumentando-se a velocidade para adequar o tempo de realização da tarefa, sendo assim chamado de *isocrony*, também sem tradução para a língua portuguesa. Nele, o essencial seria o ajuste da velocidade conforme as imposições da tarefa, com o objetivo de cumprir o movimento no menor tempo possível⁴⁴.

Estudos posteriores identificaram que essas teorias eram aplicadas, em sua maior parte, a movimentos curvilíneos, mas que, de certa forma, se afastavam do movimento humano normal, esse com complexidade notavelmente maior⁴⁵.

Flash, Handzel⁴⁰ (2007) avançaram com a aplicação dessas teorias para tentar criar modelagens de movimentos mais complexos. Na lei chamada de *segunda potência*, foi encontrada uma afinidade com um princípio proposto por Flash, Hogan³⁷ (1985), o princípio de minimização dos arranques, segundo o qual basicamente o aprimoramento do controle motor se daria por movimentos mais fluídos e sem grandes variações nos aspectos relacionados à aceleração dos segmentos compreendidos na tarefa. Porém os movimentos que atendem a essa proposição levam em consideração uma velocidade constante, negligenciando o que se chama de "custo de tempo", aspecto que parece ser fundamental no controle do movimento^{46,47}.

Outro modelo leva em consideração o custo do tempo e tem relação consistente com o princípio da minimização dos arranques. Foi proposto por Hoff⁴² (1994), em estudos com movimentos bidimensionais de alcance com o membro superior, de acordo com o princípio de uma expressão polinomial da soma da trajetória de movimentos de ponto a ponto, que minimizem o custo do movimento global. Hoff⁴² (1994) mostrou também que o movimento unidimensional de um ponto a outro é marcado pelo perfil da velocidade que aumenta, atinge seu ápice e, logo em seguida, volta a zero novamente⁴².

Esses achados, de certa forma, já tinham sido observados em estudos mais antigos. A contribuição de Van Hofsten¹¹ em 1979, já citada, sugere que um movimento total é composto por subunidades do movimento, ou seja, pequenos movimentos de alcance dentro do "movimento maior" que, somadas, permitem uma estratégia eficiente de execução da tarefa motora. Hofsten chamou esses submovimentos de "elementos do movimento", ou movimentos balísticos, caracterizados por variações na aceleração e desaceleração do gesto motor, variando de velocidade zero até velocidade zero em determinada direção, compondo, assim, um elemento do movimento (EM), como chamaremos neste trabalho. Sendo assim, quanto mais EM tiver um movimento, menos aprimorado ele será, sendo o inverso verdadeiro^{7,8,13}.

Estudos posteriores conduzidos por Li et al.⁴³, em 2015, Miranda et al.⁷ (2018), em 2018, e Davidson, Wolpert⁴⁴, em 2003, compararam a evolução dos movimentos de alcance entre indivíduos de idades diferentes, observando que a ideia de Hofsten se aplicava aos sujeitos estudados, na medida em que aqueles mais experientes na tarefa eram capazes de executar o mesmo movimento com um número consideravelmente menor de elementos, definido como um movimento menos complexo, mais suave e, portanto, mais eficiente^{7,8,43,44}.

Embora esses achados tenham sido correlacionados a movimentos mais simples, como os de alcance com o membro superior, pesquisadores mais recentes revelaram que esse conceito pode ser extrapolado para movimentos mais complexos, através de sistemas capazes de identificar, no gestual motor, as variações de aceleração e, principalmente, de outra medida cinemática, a velocidade. Sendo

assim, toda vez que, dentro de um movimento funcional, seja possível identificar esses elementos que variam de velocidade zero ao máximo de velocidade e depois retornam à velocidade zero novamente, encontraremos um EM^{7,8,48}.

Os estudos de Miranda et al.⁷, em 2018, buscaram identificar, então, um princípio que embasasse a generalização de movimentos complexos com os membros superiores. Uma série de metodologias foram utilizadas para se identificar, em movimentos variados dos membros superiores, a presença da combinação dos “submovimentos”, ou movimentos de ponto a ponto, os EM.

Baseados, então, nos estudos de Van Hofsten¹¹ (1979) e Brooks¹² (1974), porém com uma abordagem mais cartesiana, ou seja, analisando a magnitude das velocidades nos três planos de movimento (x, y e z), Miranda et al.⁷ (2018) conseguiram desenvolver, com seus resultados, um modelo que embasa a realização da tarefa motora, como a utilização da combinação dos movimentos de ponto a ponto (EM), chamada então de *Movement Element Decomposition* (MED), ou seja, decomposição dos elementos do movimento⁷.

Dentre esses experimentos, todos os movimentos voluntários analisados, em qualquer que fosse o plano, apresentavam características regulares, de acordo com a utilização de mais ou menos EM, e se aplicavam ao modelo proposto, exceto justamente àqueles movimentos avaliados que não tinham um objetivo claro, sem início e fim predeterminados, isto é, movimentos aleatórios. Esses achados permitem reconhecer que existe um princípio básico e que ele pode ser utilizado para a análise de movimentos variados, sejam eles retos ou curvilíneos, refletindo um processo de otimização, tanto para a suavidade, como para os “custos de tempo” na realização da tarefa motora⁷.

Fonseca et al.⁸, em 2019, baseados nesse modelo, demonstraram que realmente existe uma mudança na quantidade de EMs empreendidos durante um processo de adaptação sensório-motora. Nesse estudo, 29 indivíduos realizaram uma tarefa motora totalmente nova por sete ocasiões. As atividades envolviam o controle e a oscilação do peso corporal sobre uma plataforma, com o objetivo de pontuação, em um jogo de videogame. Todas as tentativas ocorreram em um único dia e, consecutivamente, levavam 1 minuto cada, intercaladas por período de descanso

entre 2 e 5 minutos⁸. Observou-se uma redução gradativa, especialmente a partir da terceira série, da quantidade de EMs empreendidas na tarefa. Por outro lado, a pontuação apresentou crescimento importante, apontando uma forte relação, nesse caso inversa, em que, à medida que o movimento ganhava eficiência, traduzido por pontuações maiores, a quantidade de EM utilizados na tarefa diminuía significativamente⁸.

O modelo do MED⁷ propõe ainda duas outras medidas capazes de identificar a otimização do movimento. São elas: a suavização e o número de picos de movimento dentro de cada EM. A suavização do movimento é baseada no modelo de economia do custo, através do tempo de cada elemento, proposta por Hoff⁴² em 1994, em que a característica do EM é mais constante nas variações de velocidade zero até retornar à velocidade zero, descrevendo, assim, um gráfico mais regular e próximo da forma de um sino.

Já o número de picos de movimento durante o EM pode identificar mais controle sobre o gestual, dependendo de sua complexidade, pois esses picos descrevem variações de velocidade dentro do EM. Porém, como não variam a velocidade zero, não podem ser caracterizados como um novo elemento do movimento, contribuindo, assim, para uma melhor resposta de ajuste fino do movimento, caso seja necessário.

Contudo, ainda não é possível compreender, em sua totalidade, de que maneira se dá o processo de aprendizado motor, principalmente em tarefas mais complexas e que envolvam processos mais longos, nos quais seja possível analisar as características cinemáticas do movimento ao longo do tempo^{7,8,49}.

Embora a literatura já tenha discutido diferentes estratégias durante o período do aprendizado e seus efeitos práticos sobre a melhora da *performance* motora, não encontramos uma descrição de como se dá esse processo, quando ocorre de forma espontânea, e nem sobre quais os seus efeitos sobre o aprendizado em si^{48,50}.

Uma proposta interessante poderia ser o estudo biomecânico e o comportamento motor de indivíduos praticantes de alguma atividade motora mais complexa, que exigisse uma busca constante por controle, coordenação, equilíbrio e suavidade do movimento. O Tai Chi Chuan é uma excelente opção para estudos

dessa natureza. Por se tratar de uma técnica milenar, considerada uma arte marcial de origem chinesa e que é praticada em todo o mundo ao longo de décadas, o TC demanda de seus praticantes um nível muito avançado de controle motor, associado com outras habilidades como respiração, concentração e maior integração entre corpo e mente na prática das técnicas específicas^{16,17}.

Os movimentos propostos pelo TC, além de serem complexos – por exigirem um grau muito elevado de coordenação entre os segmentos, modulando estabilidade de algumas partes corporais e mobilidade controlada de outras –, são realizados mais lentamente e com grandes amplitudes, o que pode favorecer a identificação de aspectos biomecânicos específicos. Outra característica interessante é que o objetivo do praticante é sempre no sentido de produzir um movimento mais eficiente possível, caracterizado pelo controle, pela suavidade e harmonia na execução das técnicas. Assim, todos esses fatores concorrem para que a análise cinemática dos movimentos do TC forneça dados valiosos na caracterização do controle e do aprendizado motor^{17,18}.

Portanto, um melhor entendimento sobre o processo de aprendizado e suas possíveis variações e resultados pode ser extremamente valioso para as profissões que trabalham com a melhora da *performance* motora, pois, a partir dessas evidências, todo o programa de treinamento ou tratamento de recuperação físico-funcional pode ser mais bem delineado e obter resultados superiores^{8,49,50}.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta investigação constitui uma revisão integrativa, seguida de um estudo observacional de corte transversal, para, inicialmente, identificar as características cinemáticas dos movimentos do Tai Chi Chuan e, posteriormente, verificar como se comportam esses dados biomecânicos em praticantes da arte milenar chinesa de vários níveis de habilidade, permitindo, assim, analisar dados que indiquem estratégias biomecânicas envolvidas nos processos de aprendizado motor.

Para a revisão integrativa, foram selecionadas publicações das bases de dados PubMed, Biblioteca Cochrane, PEDro e Scielo, além de citações manuais de pesquisas originais relacionadas e artigos de revisão para qualquer estudo adicional.

Os critérios de seleção foram: artigos publicados em língua portuguesa ou inglesa, sem limites de período de publicação; e artigos que rastreassem a análise biomecânica baseada em dados cinemáticos quantitativos dos movimentos característicos do Tai Chi Chuan.

As palavras-chave utilizadas foram Tai Chi Chuan e suas correlatas, associadas aos termos biomecânica, cinemática, movimento, fenômenos biomecânicos e captura de movimento.

Nos procedimentos metodológicos do estudo observacional, de corte transversal, foram analisados dados a partir de base secundária, disponíveis gratuitamente em base de dados compartilhada sob forma de arquivos "C3d". Essas informações são referentes aos dados cinemáticos de grande precisão de 12 indivíduos praticantes de TC, durante três interpretações de 13 técnicas específicas, durante um sistema de captura de movimento que rastreou 68 pontos distribuídos pelo corpo dos praticantes e forneceram todas os dados cinemáticos para posterior análise.

Os 12 praticantes foram divididos em quatro grupos, a partir da avaliação de três professores experientes de TC. Os professores conferiram notas aos praticantes a partir do conhecimento sobre o desempenho de cada um, e essa amostra foi, então, assim alocada: três indivíduos iniciantes, três intermediários, três avançados e três especialistas.

De posse dos dados cinemáticos dos quatro grupos, foi aplicado um modelo de decomposição de movimentos, o MED, capaz de identificar, em cada praticante, aspectos que indicam o grau de aprimoramento do gestual motor. Esse modelo foi publicado por Miranda et al.⁷, em 2018, e depois aplicado em estudo de adaptação sensório-motora por Fonseca⁸ et al., em 2019.

O MED identifica componentes do movimento, ou seja, subunidades que compõem o movimento propriamente dito, traduzidos por variações de velocidade em todos os planos do movimento (velocidade zero até a máxima e depois retornando a zero novamente). Esses submovimentos, chamados de elementos do movimento, são pequenos movimentos de alcance, muitas vezes imperceptíveis ao olho humano, mas que, combinados, promovem o gestual. Assim, é possível identificar que quanto menor o número de EM mais aprimorado é o movimento funcional, indicando que uma quantidade menor de submovimentos de alcance é necessária para cumprir a tarefa motora^{7,8}.

Outras características podem também ser analisadas em cada EM e demonstrar mais controle por parte do indivíduo que realiza o movimento. Primeiro, há a suavidade de cada EM, caracterizada pela melhor combinação de variação da velocidade em uma tendência de minimização de custo; e depois, o número de picos de movimento em cada EM. Uma vez analisadas, essas características podem indicar que, em indivíduos mais experientes no gestual motor, os picos são controlados para escolha da estratégia motora mais eficiente e maior variação de resposta de ajustes, caso alguma nova demanda seja necessária para a tarefa motora^{7,8}.

Com a aplicação desse modelo, é possível verificar como se comportam esses aspectos nos grupos de praticantes do TC, delineando, assim, de que maneira o grupo de praticantes especialistas, com maior tempo de prática das técnicas e com melhor nota atribuída pelos professores, controlam esses aspectos de otimização do movimento.

6 RESULTADOS

6.1 ARTIGO 1

Aspectos cinemáticos dos movimentos do Tai Chi Chuan. Uma revisão integrativa.

6.1.1 Introdução

A medicina tradicional chinesa prima pela saúde e bem-estar geral, com mais de mil anos de desenvolvimento. Nela, a atividade física sempre teve papel fundamental no equilíbrio da saúde mental e física e, por isso, tem muito destaque como estratégia de prevenção e promoção da saúde^{51,52}.

Os relatos que apontam métodos e conceitos de exercícios físicos são abundantes e datam do ano 221 a 770 a.C. na medicina oriental. Varias são as abordagens encontradas na história chinesa: métodos para respiração, fortalecimento muscular, flexibilidade, coordenação dos movimentos, artes marciais para defesa pessoal, dentre outras. Contudo o Tai Chi Chuan (TC) permanece, ainda hoje, como o mais conhecido e praticado, inclusive em muitos outros países do mundo^{51,53}.

Tai Chi significa “supremo” e Chuan “punho”, o que associa o TC como uma arte marcial de treino de movimentos de luta e relaciona sua origem ao século 13 d.C., através de um sacerdote taoísta, após presenciar a luta entre um pássaro e uma cobra^{51,54}.

Embora não seja definitiva sua origem, o TC evoluiu com o passar dos anos e desenvolveu algumas escolas específicas; Yang, Chen, Sun e Yin, sendo a Yang a mais difundida. Cada escola tem características particulares, embora os princípios básicos do TC permaneçam os mesmos⁵¹⁻⁵³.

O TC, além de um exercício físico, é também considerado uma arte, pois seus movimentos são realizados de maneira lenta, fluída e harmoniosa. O praticante deve estar relaxado, mas, ao mesmo tempo, concentrado no seu centro de massa, para

realizar os movimentos naturais e circulares, fluindo continuamente e sem interrupções de um para outro^{51,54}.

Na literatura, são bastante frequentes os resultados favoráveis da prática do TC em variadas condições de saúde, tanto no que concerne a aspectos estruturais e funcionais, como no desempenho de atividades e na participação social. Porém não estão ainda bem delineadas, quantitativamente, as características cinemáticas próprias envolvidas no gestual típico do TC^{53,55,56}.

Assim, o objetivo deste estudo é verificar, na literatura, como se comportam os principais dados cinemáticos empreendidos nos movimentos típicos do TC.

6.1.2 Material e métodos

Para a elaboração desta revisão integrativa, algumas etapas foram estabelecidas e cumpridas. Inicialmente, a definição da pergunta de investigação e os objetivos da revisão. Em seguida: estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão dos artigos ou a seleção da amostra; definição das informações a serem extraídas dos artigos selecionados; análise dos resultados; discussão e considerações finais da revisão.

A pergunta de investigação que norteou todo o trabalho de revisão integrativa foi: Quais as características cinemáticas, analisadas quantitativamente, dos movimentos empregados no Tai Chi Chuan?

Os artigos foram selecionados a partir das bases de dados PubMed, Biblioteca Cochrane, PEDro e Scielo, além de citações manuais de pesquisas originais relacionadas e artigos de revisão para qualquer estudo adicional.

Os critérios de seleção dos artigos para compor esta revisão integrativa foram: artigos publicados em português ou inglês; com resumos disponíveis nas bases de dados selecionadas; sem limites de período de publicação; artigos publicados cuja metodologia adotada permitisse obter dados cinemáticos quantitativos do gestual do Tai Chi Chuan, ou seja, revisões sistemáticas, ensaios clínicos, ou estudos com

delineamento de pesquisa quase-experimental; e artigos que rastreassem a análise biomecânica baseada em dados cinemáticos quantitativos.

As buscas nas bases de dados foram feitas por dois pesquisadores independentes, que usaram os descritores DECS/MeSH e operadores booleanos. A amostra final dessa revisão integrativa foi constituída de 13 artigos.

Para extração dos dados dos artigos incluídos nessa revisão, foi construído um instrumento, avaliado e validado por dois juízes. Os juízes (dois fisioterapeutas pesquisadores com experiências em análise do movimento) realizaram revisão e sugestões que foram incluídas no instrumento, que contemplou, ao final: identificação do artigo, características metodológicas e avaliação do rigor metodológico na obtenção dos dados cinemáticos.

Um quadro de síntese foi utilizado para posterior análise dos artigos selecionados contemplando informações relevantes como: título do estudo, nome dos autores, método de obtenção dos dados cinemáticos, resultados e análise geral do gestual no Tai Chi Chuan.

A apresentação dos resultados será realizada de forma conjunta com a discussão, de maneira descritiva, possibilitando uma análise geral mais aprofundada do tema específico e respondendo à pergunta de investigação, de modo a alcançar, assim, o objetivo desta revisão, que é verificar as características cinemáticas dos movimentos utilizados na prática do Tai Chi Chuan

6.1.3 Resultados e discussão

Nessa revisão integrativa, na busca com base nas estratégias estabelecidas, foram encontrados, inicialmente, 113 artigos (60 PubMed/Medline, 42 Scielo, 10 Cochrane, 1 PEDro), porém foram analisados treze que atenderam aos critérios de seleção estabelecidos nos procedimentos metodológicos.

Dentre os artigos incluídos na revisão, doze foram de pesquisas de campo e apenas um de revisão. Quatro foram publicados em periódicos específicos de biomecânica, três em medicina do esporte, dois em biociências e engenharia, dois em saúde pública, um em fisiologia e um em medicina física e reabilitação.

Os artigos elegeram alguns gestos do TC, sendo três publicações com a marcha do Tai Chi, duas sequências de 5 movimentos, uma sequência de 21 posturas, uma sequência de 42 posturas, duas combinações de membros superiores, um movimento de soco no Tai Chi, quatro movimentos envolvidos no “empurrar”, e quatro gestos específicos que envolvem movimentos mais globais; o *Repulse Monkey* e o *Wave Hand in Cloud*; o *Brush Knee* e o *Twist Step*.

Na Tabela 1, encontra-se a síntese das publicações selecionadas.

Tabela 1 – Síntese das publicações selecionadas

Título do artigo	Autores	Métodos de obtenção dos dados cinemáticos	Resultados	Análise geral do gestual no TC
Is beauty in the eyes of the beholder? Aesthetic quality versus technical skill in movement evaluation of Tai Chi ⁵⁷	Zamparo P Zorzi E Marcantoni S Cesari P	Vídeo em 3 diferentes velocidades e análise de especialistas e não especialistas no TC, para gestual de iniciante experientes praticantes do TC.	Centro de massa com tempo maior, menor frequência do movimento, mais amplitude, menos arranques durante o movimento.	Indivíduos mais experientes apresentam movimentos mais graciosos e harmônicos, caracterizados por mais lentidão na execução, maior amplitude e mais fluidez (menos arranques).
The characteristics of foot movements in Tai Chi Chuan ⁵⁸	Chau KW Mao DW	Análise pela American image analysis system (APAS)	Existem 17 subformas de apoio no TC. O duplo apoio é o mais usado.	Os movimentos suaves e precisos do tronco e membros superiores e suas variações dependem de uma boa base de suporte.
Biomechanical analysis of arm	Dong X	Análise pela American image	Maior trajetória (amplitude) e	Movimentos mais coordenados,

manipulation in Tai Chi ⁵⁹	Hu X Chen B	analysis system (APAS) dos movimentos de membros superiores	menores interrupções durante os movimentos	fluidos e harmônicos.
Biomechanics of Tai Chi: A review ⁶⁰	Hong Y Li JX	Análise através de vídeos. Não identificou sistemas.	Maior amplitude, centro de massa mais baixo (flexão dos quadris, joelhos e tornozelos), variação mais lenta e estável de uma posição para outra. Maior duração do ciclo da marcha do TC e maiores variações de transferência de peso em todas as direções.	Maior lentidão dos movimentos, com mais controle e coordenação. Maiores amplitudes e menor velocidade, porém com mais fluência nas variações das trajetórias.
Comparative study on the joint biomechanics of different skill level practitioners in Che-Style Tai Chi punching ⁶¹	Hua H Zhu D Wang Y	Análise com o VICON 3D <i>Motion Analysis System</i>	Movimentos de ombros, cotovelos e mãos dos mais experientes são mais precisos e potentes. Velocidades angulares significativamente maiores em todas as articulações.	Praticantes mais experientes de TC apresentam melhor flexibilidade articular, postura de golpe e efeito na aplicação do soco.
The temporospatial and kinematic characteristics of typical Tai Chi movements: Repulse Monkey and Wave-hand in cloud ⁶²	Law NY Li JX	Análise com o VICON 3D <i>Motion Analysis System</i>	<i>Repulse Monkey</i> movimento mais lento com menor base de suporte. <i>Wave-hand in cloud</i> base de suporte semelhante e diferença mínima no comprimento dos passos.	Os movimentos do TC apresentaram características, mas suaves e mudanças fluidas da posição de segmentos superiores e articulações dos segmentos inferiores.

Spatial, temporal and muscle action patterns of Tai Chi gait ⁶³	Wu G Liu W Hitt J Millon D	Plataforma de força e sistema de análise de movimento (Elite Plus, Itália)	Velocidade média de marcha no TC mais lenta e com maior duração do ciclo (apoio e balanço). Maior amplitude de movimento das articulações do membro inferior, especialmente o tornozelo.	A marcha do TC é significativamente mais lenta, com maiores amplitudes e maior duração das fases.
Kinematic and electromyographic analysis of the push movement in Tai Chi ⁶⁴	Chan SP Luk TC Hong Y	Análise pela American image analysis system (APAS)	Movimento mais lento em todas as direções. Maiores amplitudes dos membros inferiores, especialmente o MID, com tronco sempre em posição ereta.	Movimentos de avanço e recuo do centro de gravidade com menor velocidade, maior amplitude e menor efeito de variações de direção. Movimento mais fluido e harmônico.
Biomechanical analysis of the meniscus and cartilage of the knee during a typical Tai Chi movement -brush-Knee and twist step ⁶⁵	Li Y Wang K Wang L Chang T Zhang S Niu W	Análise com o VICON 3D <i>Motion Analysis System</i>	Comparados com a marcha normal, os movimentos do TC apresentaram maior amplitude articular com velocidade média menor.	Os movimentos testados demonstraram maior fluidez, amplitude e menor velocidade, bem como menor estresse para os componentes articulares.
A Kinematic and metabolic analysis of the first Lu of Tai Chi in experts and beginners ⁶⁶	Zorzi E Nardello F Fracasso E Franchi S Clauti A Cesari P Zamparo P	Análise com o VICON 3D <i>Motion Analysis System</i>	Diferenças significantes entre os grupos para todos parâmetros cinemáticos: frequência do movimento menor e tempo e amplitudes maiores.	Tempos maiores na execução, velocidades menores e movimentos mais amplos e suaves caracterizam os praticantes mais experientes do TC.

Biomechanical mechanism of Tai Chi gait for preventing falls: a pilot study ⁶⁷	Yang F Liu W	Análise com o VICON 3D <i>Motion Capture System</i>	Deslocamento mais lento do centro de massa na marcha do Tai Chi. Variação maior da trajetória do centro de massa em médio-lateral. Maiores ADMs gerais em quadril, joelho e tornozelo.	Os movimentos da marcha do TC são mais suaves, demonstrando velocidade mais lenta, maiores amplitudes e menores perturbações.
Age-related differences in Tai Chi gait kinematics and leg muscle electromyography: a pilot study ⁶⁸	Wu G	Sistema de análise de movimento com três câmeras	Houve diferença entre os idosos e jovens nos parâmetros flexão de quadril e joelho, estando os idosos em postura mais alta na marcha do Tai Chi, contudo, ainda assim, mais baixa do que a marcha normal.	A marcha do TC é realizada de maneira mais lenta, com centro de massa mais baixo e maiores amplitudes de movimentos, mesmo em idosos, se comparada com a marcha normal.
Speed effect of selected Tai Chi Chuan movement on leg muscle activity in young and old practitioners ⁶⁹	Wu G Ren X	Sistema de análise de movimento (Elite Plus, Itália)	Houve diferença significativa no comprimento do passo entre idosos (mais curto) e jovens, também na altura da postura, sendo os jovens mais capazes de executar os movimentos com o centro de massa mais baixo, devido a maiores ADMs em articulações dos MMII.	Os movimentos do TC exigem maiores amplitudes de movimento, maiores deslocamentos dos segmentos e maior refinamento nas mudanças de direção.

Fonte: dados da pesquisa

Em relação ao objetivo dessa revisão, é possível identificar uma tendência maior em delinear cinematicamente os movimentos do TC dos anos 2000 em diante, provavelmente pela maior acessibilidade e fidedignidade dos métodos de captação e análise do movimento a partir de suas características cinéticas e cinemáticas.

Uma vez que se trata de uma técnica cada vez mais usada para melhora de performance física e mental, o número maior de publicações a partir desse período parece ser também uma necessidade de embasar biomecânicamente os possíveis mecanismos próprios do TC e suas repercussões sobre o praticante^{57,59,61}.

Na literatura revisada, é possível observar que os estudos utilizam estratégias semelhantes para identificação dos aspectos cinemáticos do movimento: a gravação da execução de técnicas específicas do TC e a posterior análise através de sistema específico que fornece os dados biomecânicos.

Embora seja possível, até para observadores não treinados, perceber algumas características próprias do movimento empreendido no TC, como a velocidade mais lenta e a maior amplitude dos movimentos, a captura e a análise biomecânica conseguem detectar outras características associadas à técnica do TC. Os estudos convergem, em muitos aspectos, com a observação qualitativa, especialmente na fluidez e harmonia dos movimentos realizados durante o TC, embora dados cinemáticos sejam capazes de explicar tal graciosidade^{58,61,68,69}.

A literatura apresenta comparação mais frequente dos movimentos do TC com a marcha, devido à maior facilidade de análise e à importância funcional. Essa comparação permite verificar que todas as características cinemáticas próprias dos movimentos do TC se destacam^{63,67,68,69}.

Outra estratégia de análise dos componentes biomecânicos dos movimentos do TC é a comparação de praticantes com relação ao nível de habilidade, com a qual é possível identificar que quanto mais experiente é o praticante, mais elaboradas são as características cinemáticas dos movimentos realizados^{66,68}.

Além de uma velocidade média geral menor e maior amplitude articular global, é possível detectar que o centro de gravidade, ou centro de massa, apresenta um comportamento muito particular, normalmente com uma altura menor, ou seja, mais

próximo do solo devido à flexão das articulações dos membros inferiores (quadril, joelhos e, principalmente, tornozelos), e também a uma maior variação de trajetória, dependendo das demandas de cada técnica^{61,62,64,69}.

Essa característica do centro de massa demanda do praticante maior controle e coordenação dos movimentos, pois qualquer perturbação maior pode interferir no equilíbrio, na estabilidade e na fluidez dos movimentos. Alguns autores associam essa demanda biomecânica com os benefícios já demonstrados que a prática do TC apresenta sobre o equilíbrio e a estabilidade postural^{61,62,66,67,69}.

Dentro da perspectiva do controle e do aprendizado motor, a estabilidade axial é fundamental para um bom desempenho da mobilidade apendicular. Assim, um bom desenvolvimento do controle do centro de massa permite que os movimentos dos membros, especialmente os superiores, aconteçam de maneira mais eficiente. Talvez, por esse aspecto, a própria organização da prática do TC se inicie com atividades posturais e de estabilidade, para depois evoluir em tarefas que exijam mais movimentos dos membros e em variadas posições da base de suporte^{51,53}.

Outra característica cinemática que se destaca, nesta revisão, é que a fluidez dos movimentos do TC se dá pela continuidade dos movimentos que se sucedem. Especialmente em praticantes mais experientes, não se observam pausas ou interrupções abruptas durante a execução do gestual. Na análise cinemática, isso se evidencia pela diminuição de "arranques" durante o movimento. Esses arranques seriam fragmentos de movimentos intencionais pouco controlados e, quando presentes, teriam interferência negativa sobre a fluidez do movimento, pois produziriam movimentos com maior velocidade, especialmente com mudanças de direção, prejudicando a graciosidade necessária do gestual^{61,64,66,69}.

As características biomecânicas próprias do TC de maiores amplitudes articulares e também de maior variação na trajetória do movimento, seja na extensão ou nas mudanças de direção, demandam controle neuromuscular muito refinado por parte do praticante, pois todas essas nuances impõem demandas complexas de controle e coordenação, pois as mudanças de tipo de contração muscular devem acontecer da maneira mais harmônica possível para que o resultado final seja um gestual fluido, suave e gracioso^{61,66}.

Embora esta revisão tenha trazido algumas informações valiosas sobre as características biomecânicas dos movimentos empregados no TC, ainda são poucos os estudos que abordam esse tema, especialmente com relação à quantidade de movimentos analisados, a natureza intencional de cada um deles, seja terapêutica, como atividade física ou mesmo esportiva, e também a evolução desses aspectos biomecânicos conforme a prática e a experiência do praticante.

6.1.4 Conclusão

Nesta revisão integrativa, foi possível identificar que a literatura discute sobre aspectos cinemáticos específicos dos movimentos de Tai Chi Chuan. Embora a maioria das publicações tenham como objetivo embasar biomecânicamente os efeitos positivos do TC sobre a saúde física e mental de seus praticantes, mais recentemente é possível encontrar publicações que buscam, principalmente, caracterizar cinética e cinematicamente o gestual próprio do TC.

Independentemente da motivação, os dados são fidedignos, pois são obtidos através de princípios metodológicos confiáveis e contribuem muito para o entendimento das nuances dos movimentos característicos do Tai Chi.

As informações biomecânicas presentes na literatura corroboram as observações empíricas acerca do gestual do TC. Além de quantificar aspectos observáveis, acrescenta outros dados, muitas vezes imperceptíveis ao olho humano, e que possibilitam uma análise muito mais completa, criando melhores condições de análise, bem como de campos de estudos diversificados.

Assim, as características de suavidade e fluidez dos movimentos do TC são explicadas por fenômenos biomecânicos, como menor velocidade média, maior amplitude de movimento articular, trajetórias maiores e mais variadas, mudanças de direção de movimento mais suaves, menos arranques durante o movimento, maior controle sobre o centro de massa e mais estabilidade axial e apendicular.

Contudo ainda são necessários mais estudos sobre o tema, especialmente que pesquisem sobre uma diversificação maior dos movimentos, sua evolução em

processos de aprendizado e sua aplicação em tarefas específicas da arte marcial, seja em programas de atividade física, competição ou mesmo terapeuticamente.

6.2 ARTIGO 2

Aprendizado motor como um processo de otimização de padrões motores primitivos

6.2.1 Introdução

O movimento humano é uma condição fundamental para a independência e a autonomia dos indivíduos frente às mais variadas demandas de tarefas cotidianas, das mais básicas às mais complexas. Essa ação deve ser capaz de produzir uma resposta eficiente em situações diferentes, proporcionando condições de cumprir tarefas com o menor gasto energético possível^{1,3,5,15}.

A literatura apresenta esse tema como "comportamento motor". O comportamento motor é um campo da ciência dedicado ao estudo do movimento humano. Dentro desse contexto, assim como o "controle motor" e o "desenvolvimento motor", os conceitos de "aprendizado motor" são historicamente postulados como teorias ou proposições baseadas em um conjunto de observações empíricas que tentam explicar os fenômenos envolvidos no processo de aprimoramento do movimento^{1,19,21,22}.

Embora seja tradicionalmente aceito que o treinamento é capaz de produzir um movimento mais elaborado, ainda não encontramos publicações que evidenciem de que maneira as estruturas ligadas ao sistema locomotor se baseiam e se organizam para garantir um processo de otimização do gestual²⁴.

Mais recentemente, devido a uma maior facilidade de acesso a sistemas confiáveis de análise do movimento, alguns autores têm proposto que mecanismos biomecânicos podem ser utilizados como parâmetros para verificação quantitativa das estratégias utilizadas em processos de aprendizado motor. Contudo essas publicações se limitam a estudos com movimentos mais simples, como os movimentos oculares ou de alcance com o membro superior, ou, quando exploram

movimentos mais elaborados, o fazem por um período muito curto de tempo^{11,15,21,23,24}.

Dentro de uma perspectiva de estudo de processos de comportamento motor, um tipo específico de movimento vem ganhando muito destaque na literatura. Trata-se do Tai Chi Chuan. Por ser uma prática milenar de origem chinesa, mas já difundida e praticada mundialmente, os benefícios do TC para muitas condições de saúde já são publicados há bastante tempo e têm muito destaque na ciência, que busca, através do estudo de suas características próprias, como gestos mais lentos, amplos e suaves, explicar as razões de esse tipo de movimento ter tantos efeitos positivos sobre a saúde de seus praticantes^{16,17,18}.

Já para o aprendizado motor, o TC se apresenta como uma excelente possibilidade de estudos, pois, além de oferecer movimentos mais fáceis de serem rastreados por suas características de velocidade e amplitude, apresenta uma busca constante pelo aprimoramento do gestual, que deve ser o mais controlado, harmônico, fluido e gracioso possível, permitindo extrair informações valiosas do comportamento de parâmetros biomecânicos em grupos de praticantes de diferentes níveis de habilidade^{17,18}.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consiste em verificar se existe um comportamento de otimização de padrões motores primitivos em processos de aprendizado de movimentos do Tai Chi Chuan.

6.2.2 Material e métodos

Trata-se de um estudo observacional, de corte transversal, realizado a partir da análise de dados secundários, incluindo 12 indivíduos saudáveis, praticantes de Tai Chi Chuan de vários níveis, alunos da escola de Tai Chi Chuan Eric Caullier, na cidade de Mons, Bélgica, que concordaram em participar voluntariamente de uma apresentação de 5 exercícios e 8 técnicas durante captura de dados cinemáticos por 2 sistemas de análise de movimento¹⁸.

Os praticantes foram classificados em quatro grupos de níveis (iniciante, intermediário, avançado e especialista) por um colegiado de três professores especialistas na arte e integrantes da escola, de maneira independente, através de pontuação de 0 a 10. Dos 12 participantes, três foram classificados como especialistas, três avançados, três intermediários e três como iniciantes, conforme avaliação dos professores (Tabela 2).

Os dados foram obtidos a partir da captação da execução dos movimentos das 13 tarefas pelos 12 indivíduos, através do sistema Qualisys[®]. Esse é um sistema de *Motion Capture* (MoCap), ou seja, um sistema de aquisição de dados relacionados ao movimento em três dimensões, que grava, digitaliza e analisa movimentos. Consiste de 11 câmeras de infravermelho, que rastreiam até 68 marcadores retroreflexivos dispostos em pontos anatômicos do sujeito analisado, a uma taxa de 179 Hz e uma precisão espacial de 1mm.

Tabela 2 – Dados descritivos da amostra

Identificação	Sexo	Idade	Anos de prática	Classificação	Média das notas dos professores
P01	M	56	32	Especialista	9.43
P02	F	57	30	Especialista	9.57
P03	F	62	24	Especialista	8.67
P04	F	47	12	Avançado	8.07
P05	F	71	14	Avançado	7.23
P06	M	25	10	Avançado	8.5
P07	F	49	4	Intermediário	6.77
P08	F	34	3	Intermediário	7.43
P09	M	51	2.5	Intermediário	6.85

P10	F	59	1	Iniciante	6.1
P11	F	65	0.2	Iniciante	4.97
P12	M	28	0.6	Iniciante	5.85
Média		50,33	11.1		7.45
Desvio padrão		14	11.5		1.38

Fonte: dados da pesquisa

Todos os participantes realizaram 13 técnicas diferentes do estilo popular do Tai Chi Chuan “yang”, que aprenderam na escola Eric Caullier. Essas técnicas são divididas em duas categorias principais; cinco exercícios (Wu gong) compostos por 5 gestos simples e oito técnicas (Bafa), compostas por 8 gestos mais complexos. Durante a sessão de gravação, cada participante foi solicitado a realizar três tipos de interpretações (Tabela 3).

Tabela 3 – Movimentos do Tai Chi Chuan

Identificação do gesto	Nome	Tipo de movimento
Cinco exercícios (Wu gong)		
G01	Posição Inicial (Wuji)	Postura estática, simétrica
G02	Postura da árvore (Taiji)	Postura estática, simétrica
G03	Abra e fecha a flor de lótus	Simétrico
G04	Junte o céu e a terra	Simétrico
G05	Canalizar energia	Assimétrico (esquerdo ou direito)
Oito Técnicas (Bafa)		
G06	Afaste o macaco	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G07	Mova as mãos como nuvem	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G08	Parta a crina do cavalo selvagem	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G09	Galo dourado fica em uma perna	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G10	A senhora trabalha nos ônibus	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G11	Chute com o calcanhar	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G12	Escove o joelho e torça o passo	Assimétrico (esquerdo ou direito)
G13	Segure a cauda do pássaro	Assimétrico (esquerdo ou direito)

Fonte: dados da pesquisa

Este banco de dados é aberto e está disponível em:
<https://github.com/numediart/UMONS-TAICHI>.

A partir desses dados cinemáticos, aplicamos a análise para o presente estudo através do modelo de decomposição de elementos do movimento (MED)⁷, cujo objetivo é identificar a quantidade de submovimentos presentes no movimento propriamente dito. Esse modelo é baseado nos estudos de Hofsten¹¹ (1979), Brooks¹² (1974) e Hoff⁴² (1994) para verificação de movimentos primitivos compondo o

movimento funcional. Essa proposta foi ampliada para movimentos complexos por Miranda et al.⁷ em 2018, e aplicada durante processo de adaptação sensório-motora por Fonseca et al.⁸ em 2019.

Esse modelo de análise cinemática é realizado utilizando-se um sistema de coordenadas cartesianas com eixos orientados aos planos anatômicos (médio-lateral 'x', anteroposterior 'z' e vertical 'y'). Assim, cada ponto marcado no sujeito da pesquisa é rastreado, e toda vez que, em cada eixo, esse marcador cruza o ponto zero de velocidade (partindo de velocidade zero até a velocidade máxima e depois voltando a zero novamente), é possível detectar submovimentos, ou seja, pequenos movimentos de alcance ou elementos de movimento que se sucedem e compõem o movimento completo.

A partir dessa análise, da quantidade das variações dessas velocidades nos três planos do movimento total (x, y e z), é possível detectar pequenos movimentos de alcance compondo o movimento total, além de identificar como se comporta a quantidade desses EMs durante o processo de prática da tarefa motora.

Além de quantificar os EMs, é possível também verificar o comportamento de cada um deles, comparando com o modelo proposto por Hoff⁴² em 1994, em que é possível verificar se existe um padrão de suavização do movimento (W), caracterizado pelo perfil de minimização de custo através do tempo de cada elemento, assemelhando-se, assim, mais a um modelo ideal de movimento e aproximando-se de um gráfico em forma de sino, descrito por uma velocidade mais lenta e contínua.

Outra abordagem de identificação de processos de otimização do movimento é a identificação de picos de velocidade dentro de cada EM. Esses picos existem nos EM, variando em velocidade para mais ou para menos, mas não atingem a velocidade zero. Assim, não podem ser considerados EM. Porém o número desses picos pode indicar um comportamento de otimização do gestual, especialmente se analisado em conjunto com o número de EM e o padrão de suavização (W).

Dos 68 pontos rastreados, elegemos 16 pontos distribuídos pelo corpo de todos os praticantes, para ter uma amostra mais global das estratégias biomecânicas, eliminando dados redundantes.

Assim, é possível quantificar, em todos os praticantes e em todas as técnicas específicas, a quantidade de EMs por tempo (N_t), a suavidade de cada um, empregada nos gestos do TC (W) e o número de picos por elemento (N_p). Os pontos escolhidos foram: frontal à esquerda, esterno, espinhas ilíacas anteroinferiores, epicôndilos laterais dos úmeros, terço médio dos antebraços, terceiros metacarpos, terço proximal dos fêmures, tuberosidades anteriores das tíbias e tálus direito e esquerdo.

Esses dados foram tabulados e analisados por *script* especificamente desenvolvido em plataforma MATLAB para cálculo do número total de EM por tempo (N_t), suavização do movimento (W) e número de picos (N_p).

Os dados cinemáticos dos 16 pontos anatômicos foram obtidos no banco de dados disponível, estavam no formato "C3d", e, para anular possíveis ruídos na obtenção das informações que identificassem fragmentos de movimentos não intencionais, foi utilizado um filtro de frequência passa-baixa de 10Hz, um limite mínimo de deslocamento de 3 mm, duração menor do que 100ms e velocidade inferior a 100m/s.

Os dados não passaram no teste de homogeneidade de variância de Levene (Tabela 4). Por isso, os resultados foram submetidos à análise estatística através do teste não paramétrico ANOVA de uma via, Kruskal Wallis, para verificar o efeito da habilidade do praticante de Tai Chi Chuan nas variáveis do MED: N_t , W e N_p , considerando o nível de significância igual ou inferior a 0,05.

Tabela 4 – Teste de homogeneidade de variância

Dados biomecânicos	Estatística de Levene	df1	df2	Significância
W	75,922	3	31597	,000
N_p	404,148	3	31597	,000
N_t	28,068	3	31597	,000

Fonte: dados da pesquisa

6.2.3 Resultados

Foram analisados dados de 12 sujeitos, em 13 técnicas, totalizando 486 amostras (16 marcadores com precisão espacial de 1mm e frequência de 179 Hz). Alguns dados precisaram ser corrigidos manualmente, preenchidos e filtrados automaticamente.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há efeito da habilidade do praticante de TC sobre os parâmetros de otimização do movimento: suavização [$X^2(3) = 165,227$; $p < 0,001$], número de picos [$X^2(3) = 257,827$; $p < 0,001$] e elementos de movimento [$X^2(3) = 799,669$; $p < 0,001$].

As comparações em pares, POS HOC, evidenciaram os números da análise combinada de todos os pontos, e puderam demonstrar uma diferença significativa entre os grupos de praticantes de Tai Chi Chuan conforme sua classificação de nível de habilidade, sendo sempre o grupo de especialistas, os mais experientes, o que apresentou resultados inferiores com relação à quantidade de elementos de movimento por tempo (N_t) (Tabela 5).

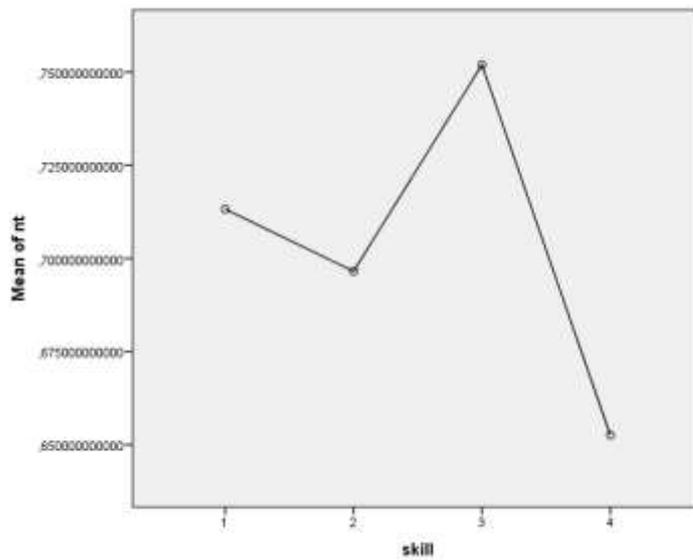
Tabela 5. N_t – Comparação dos pares

Grupos	Teste estatístico	Ajuste de significância
4 - 2	308,380	,000
4 - 1	328,426	,000
4 - 3	614,528	,000
2 - 1	1,230	1,000
3 - 2	59,118	,000
1 - 3	48,158	,000

Fonte: dados da pesquisa

Contudo, o comportamento geral não apresentou uma queda regular no número de N_t . Observa-se uma queda inicial mínima (sem significância) entre os dois primeiros grupos, depois um crescimento para o Grupo 3 e, finalmente, uma redução significativa no grupo dos especialistas, onde é possível perceber uma redução importante no N_t , com quantidade menor do que em todos os outros grupos (Gráfico 1).

Gráfico 1– Comportamento dos N_t entre os grupos.



Fonte: autoria própria

Quanto à suavização do movimento, o W (Tabela 6), observamos uma tendência significativa de queda entre os grupos, mas um aumento no grupo mais experiente (Gráfico 2). Esse achado sugere que talvez, nos indivíduos especialistas, exista uma maior flexibilidade de estratégias devido ao maior controle sobre o movimento.

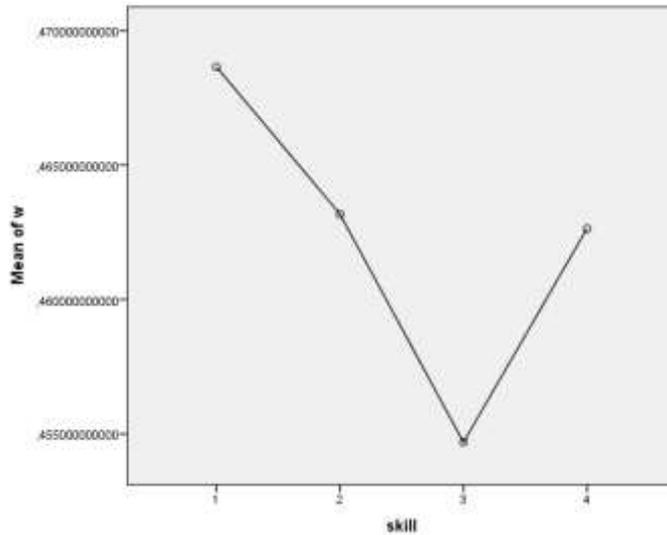
Tabela 6 – Suavização do movimento: comparação dos pares

3 - 2	12,771	,002
3 - 4	31,403	,000
3 - 1	106,062	,000
2 - 4	1,347	1,000

2 - 1	41,647	,000
4 - 1	41,585	,000

Fonte: dados da pesquisa

Gráfico 2 – Comportamento do W entre os grupos.



Fonte: autoria própria

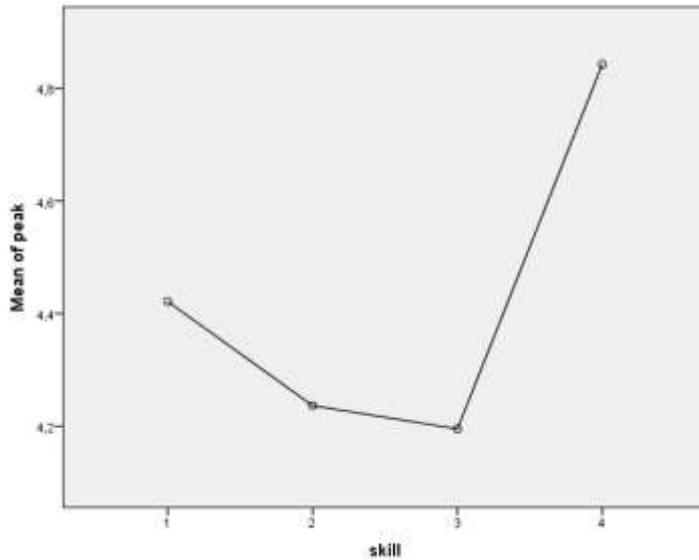
No aspecto Número de Picos (N_P), analisando-se a média geral de todos os grupos, foi possível observar uma curva descendente entre os grupos 1, 2 e 3, porém um crescimento significativo no Grupo 4 (Gráfico 3), se comparado a todos os outros grupos (Tabela 7).

Tabela 7 – Número de picos: comparação dos pares

2 - 3	,218	1,000
2 - 1	8,887	,017
2 - 4	117,396	,000
3 - 1	11,347	,005
3 - 4	106,628	,000
1 - 4	57,286	,000

Fonte: dados da pesquisa

Gráfico 3 – Comportamento do N_p entre os grupos.

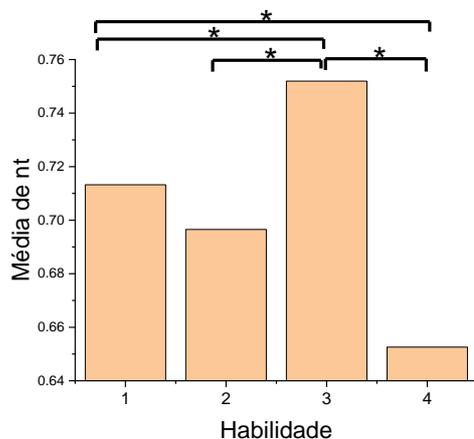


Fonte: autoria própria

O comportamento do número de picos entre os grupos se apresenta semelhante ao W , com queda inicial, voltando a aumentar significativamente no grupo 4. Esse aumento do número de picos interfere na curva de suavização, porém não se traduz em novos EM. Assim, denota que o movimento é mais suave, coordenado e controlado, mas guarda uma possibilidade maior de estratégias motoras a serem utilizadas caso seja necessário algum ajuste ou modificação do padrão por qualquer nova demanda imposta, sem afetar substancialmente a suavidade final do gestual.

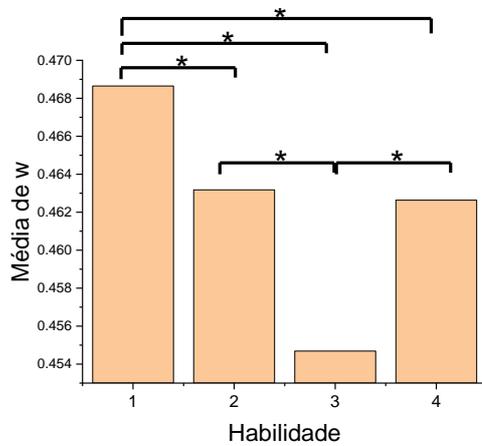
Esses resultados demonstram que o processo de aprendizado motor não é regular e nem estável. A redução dos N_t acontece como uma estratégia de otimização mais básica para o aprimoramento do movimento, alcançando o menor número necessário de EM para a tarefa. Já a suavização e o N_p seguem como possibilidades mais refinadas de ajustes para otimização do gesto motor, como pode ser visto, em conjunto, nos gráficos 4, 5 e 6.

Gráfico 4 – N_t entre os grupos.



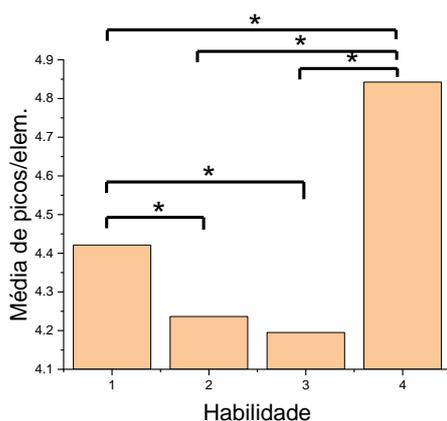
Fonte: autoria própria

Gráfico 5 – W entre os grupos.



Fonte: autoria própria

Gráfico 6 – N_p entre os grupos.



6.2.4 Discussão

Os resultados deste estudo sugerem que os movimentos voluntários, mesmo os mais complexos, são aprimorados a partir de um processo de otimização de movimentos primitivos. Os praticantes do Tai Chi Chuan, todos da mesma escola, portanto com metodologias semelhantes de treino, apresentaram melhores resultados relacionados ao tempo de prática e ao nível de habilidade atribuído pelos professores especialistas¹⁸. Na medida em que são expostos à prática das técnicas da arte marcial, desenvolvem estratégias mais eficientes com movimentos mais fluidos, compostos por uma quantidade menor de EM e com maior controle sobre a suavidade e os picos de movimento.

Schmidt, Lee⁴⁸, em 2005, já destacavam que os processos de aprimoramento do comportamento motor complexo eram caracterizados por melhor combinação e controle de componentes mais isolados e simples que, uma vez aperfeiçoados, se refletem em um movimento mais suave, fluido e harmônico.

Na literatura disponível, os relatos de estudos que apontam esse aperfeiçoamento são mais frequentes em movimentos mais simples, como movimentos de alcance com o membro superior^{49,50}. Miranda et al.⁷, em 2018, trouxeram as primeiras contribuições, considerando que um processo de otimização de movimentos mais primitivos poderia ser identificado também em movimentos mais complexos, o que foi observado posteriormente por Fonseca et al.⁸ em 2019, em tarefas motoras envolvendo controle e ajustes mais amplos, em demandas como transferência de peso e regulação postural.

Todavia esses achados só puderam ser observados em tarefas motoras mais aprimoradas, com um corte de tempo muito restrito, em um processo de adaptação sensório-motora, o que não poderia ser extrapolado para processos mais robustos de aprendizado motor em tarefas ainda mais complexas.

Embora outros autores, como Friedman, Korman⁷⁰, em 2016, tenham sugerido que o processo de aprimoramento do movimento seja resultante de melhorias no planejamento da sequência e no tempo de execução da tarefa, se distanciando dos aspectos mais biomecânicos do movimento, os resultados de nosso estudo parecem ser mais abrangentes, uma vez que analisam movimentos de grande complexidade de controle, em um considerável intervalo de tempo para seu desenvolvimento. Ainda assim, é possível que a natureza da tarefa motora pesquisada pelos autores do estudo de 2016 seja muito diferente daquela investigada em nosso estudo.

A suavidade do movimento sempre foi um parâmetro muito usado para identificar o aprimoramento do movimento, especialmente pela característica de análise qualitativa. Contudo, desde os anos 80, muitos autores já propunham mecanismos quantitativos que modelavam o processo de suavização do movimento.

Feeters, Told⁷¹, em 1987, Cirstea, Levin⁷², em 2000, e Rohrer et al.⁷³, em 2002, ressaltavam a redução de picos de velocidade dentro do movimento. Já Flash, Hogan⁹, em 1984, e Edelman, Flash⁴⁹, em 1987, se baseavam em um processo de

minimização de arranques durante o movimento. No presente estudo, buscamos verificar o processo de suavização através de um índice de similaridade (W), que avaliou o quão próximo os EMs se aproximaram de um modelo teórico proposto por Hoff⁴² em 1994, ou seja, uma proposta de minimização de uma função de custo.

Embora essa proposta tivesse apenas relatos aplicados em movimentos menos complexos, no nosso estudo, com movimentos de grande complexidade, parece que a suavização e os picos de movimento demonstraram ser fatores importantes e que revelam o comportamento flexível de estratégias motoras nos indivíduos mais treinados. Embora tenham sido percebidos em todos os grupos, no grupo mais experiente, a diferença se mostrou significativa, apontando que esse processo é contínuo e parece ser importante tanto mais experiente seja o praticante da tarefa motora e tenha se reduzido substancialmente o número de elementos do movimento.

Nossos achados demonstram também que a suavização do movimento parece acontecer ao longo do processo, mas, em determinada etapa, existe uma redução final dos EMs, alcançando um número mínimo suficiente para a tarefa, e, a partir desse momento, parece ser a suavização dos EM o fator que determina a otimização do gestual. Justamente como afirma Izawa, Rane, Donchin, Shadmehr em 2008, concluindo que, no aprendizado motor, o que ocorre é um processo de otimização ou reotimização por meio da prática, o que possibilita prever consequências sensoriais dos comandos motores. Assim, é possível, por meio de um sistema de recompensa, usar um modelo interno capaz de aprimorar o ato motor, minimizando custos implícitos e maximizando o resultado final do gestual motor.

Pela característica dos movimentos analisados neste estudo, é interessante notar que o processo de otimização se dá em todos os planos de movimento, indicando uma redução geral dos N_t , especialmente a partir dos praticantes mais experientes (Grupo 4). Tal achado, conforme descrição ampla da literatura, sugere que o sistema neuro-musculo-esquelético (SNME) se organiza para reduzir, ou melhor controlar a variabilidade de estratégias motoras ao longo da prática, com a finalidade de encontrar um modelo menos complexo para realização da tarefa, logo,

uma estratégia motora mais eficiente, capaz de vencer as diferentes demandas impostas pelo movimento, com o menor gasto energético possível⁷⁴⁻⁷⁶.

Em última análise, as demandas que incidem sobre o movimento são variadas e complexas. Do ponto de vista do sistema locomotor, é possível destacar o importante papel dos componentes diretamente relacionados ao movimento. Músculos, estruturas articulares e fásia são fontes de informações constantes e valiosas para a pronta análise e elaboração de respostas adaptativas do sistema nervoso em busca de uma melhor efetividade na execução da tarefa motora⁷⁷.

Nessa perspectiva, teorias apontam que o SNME, durante o processo de aprendizado motor, depende sobremaneira dos componentes sensoriais do movimento, e que, durante a prática, o sistema seria capaz de comparar as possibilidades de estratégias e as restrições da tarefa motora para desenvolver um movimento mais otimizado⁷⁸. Nesse sentido, os resultados de nosso estudo apontam que o número maior de EMs, nos primeiros estágios de prática do Tai Chi Chuan, serviriam como probabilidades estatísticas de variabilidades analisadas pelo SNME para desenvolvimento de uma estratégia motora final mais efetiva, emergindo, assim, uma resposta motora mais adequada para cada tarefa, bem como uma maior capacidade de responder a outras demandas durante sua execução.

Orban et al.⁷⁹, em 2011, identificaram que, durante o aprendizado para tarefas como a digitação, era possível se verificar uma melhora da *performance* através de mudanças na velocidade e intervalos entre os movimentos, o que era mediado por redes cerebrais sobrepostas, porém segregadas, caracterizando, assim, um processo de redução de complexidade de controle para o movimento.

Nossos achados corroboram, então, essa perspectiva quando apontam que o processo de aprendizado motor se caracteriza pela otimização de padrões primitivos de movimento, que, combinados biomecânicamente de uma maneira mais eficiente, são capazes de aprimorar o desempenho do ato motor durante processos de aprendizado, mesmo em movimentos mais complexos como os das técnicas do TC.

6.2.5 Conclusão

A partir dos resultados obtidos, pode-se inferir que, durante o processo de aprendizado motor, existe uma modificação nas estratégias biomecânicas empreendidas, que demonstram ser uma evolução ou aprimoramento de movimentos primitivos, os elementos de movimento.

O sistema neuro-musculo-esquelético, como a literatura propõe, realmente parece se organizar de forma a realizar pequenos alcances durante a execução do gestual motor. Esses alcances ocorrem em todos os planos do movimento, e, à medida em que ocorre a prática, esses elementos vão sendo ajustados, demonstrando uma redução no número de EM, bem como um melhor controle sobre a suavização e número de picos, causando uma otimização final do movimento e, dessa forma, uma estratégia motora final mais efetiva.

Em vista da metodologia utilizada, nossos achados constataam uma possibilidade real, fidedigna e factível de reprodução dos resultados encontrados. Embora ainda não possam ser extrapolados para processos de retenção e, especialmente, transferência motora, os resultados deste trabalho apontam para caminhos promissores, tais como a compreensão sobre a forma pela qual somos capazes de aprender, aprimorar ou reaprender tarefas motoras simples ou complexas e ainda a possibilidade de quantificar estágios durante o processo de aprendizado motor.

REFERÊNCIAS

1. Turvey MT, Fonseca S. Nature of motor control: perspectives and issues. In: Progress in Motor Control. Springer US 2009;629:93-123. doi: 10.1007/978-0-387-77064-2_6
2. Fonseca ST, Faria CD, Ocarino JM, Mancini MC. Abordagem ecológica à percepção e ação: fundamentação para o comportamento motor. Braz J Motor Behavior. 2007;2(1):1-10.
3. Lima RCM, Nascimento LR, Teixeira-Salmela LF. O Movimento Funcional de alcance em uma abordagem ecológica. Fisioter Pesqui. 2010;17(2):184. doi: <https://doi.org/10.1590/S1809-29502010000200016>
4. Tani G, Freudenheim AM, Meira Júnior CDM, Corrêa U. Aprendizagem motora: tendências, perspectivas e aplicações. Rev Paul Educ Fís. 2004;18:55-72.
5. Kawato M. Internal models for motor control and trajectory planning. Curr Opin Neurobiol. 1999;9(6):718-27. doi: 10.1016/s0959-4388(99)00028-8
6. Izawa J, Rane T, Donchin O, Shadmehr R. Motor adaptation as a process of reoptimization. J Neurosci. 2008;28(11):2883-91. doi: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5359-07.2008>
7. Miranda JGV, Daneault, JF, Vergara-Dias, G, Torres, AFSOT, Quixadá, AP, Fonseca ML, et al. Complex upper-limb movements are generated by combining motor primitives that's scale with the movement size. Scientific reports. 2018;8:1-11.
8. Fonseca ML, Daneault J-F, Vergara-Dias G, Quixadá AP, Torres AFS de OE, Sena EP, et al. Motor skill acquisition during a balance task as a process of optimization of motor primitives. Eur J Neurosci. 2019;51(10):1-13. doi: 10.1111/ejn.14649
9. Flash T, Hogan N. The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. J Neurosci. 1985;5(7):1688-703. In: Hoff B. A model of duration in normal and perturbed reaching movement. Biol Cybern, 1994;71:481-4.
10. Huh D, Sejnowski T. Spectrum of power laws curved hand movements. Exp Brain Res. 2015;112(29):3950-58. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.151020811>
11. Von Hofsten C. Development of visually guided reaching: the approach phase. J Hum Mov Stud. 1979;5:160.

12. Brooks V. Some examples of programmed limb movements. *Brain Res.* 1974;71(2-3):299-308. doi: 10.1016/0006-8993(74)90973-1
13. Latash M, Scholz JP, Schöner G. Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control.* 2007;11(3):276-308. doi: 10.1123/mcj.11.3.276
14. Schmidt RC, Carello C, Turvey MT. Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 1990;16(2):227-47. doi: 10.1037//0096-1523.16.2.227
15. Finley JM, Bastian AJ, Gottschall JS. Learning to be economical: the energy cost of walking tracks motor adaptation. *J Physiology.* 2013;591(4):1081-95. doi: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.245506>
16. Lyu D, Lyu X, Zangh Y, Ren Y, Yang F, Zhou L, et al. Tai Chi for stroke rehabilitation: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Physiol.* 2018;9:983. doi: 10.3389/fphys.2018.00983
17. Law N, Li JC. The temporospatial and kinematic characteristics of typical tai chi movements: repulse monkey and wave-hand in cloud. *Res Sports Med.* 2014;22:111-23.
18. Tits M, Laraba S, Caulier E, Tilmanne J, Dutoit T. UMONS-TAICHI: a multimodal motion capture dataset of expertise in taijiquan gestures. *Data in brief.* Elsevier. 2018;19:1214-21.
19. Todorov E, Jordan MI. Optimal feedback control as theory of motor control. *Nature neurosci.* 2002;5(11):1226-35.
20. Latash M, Levin FM, Scholz JP, Schöner G. Motor control theories and their applications. *Medicin.* 2010;46(6):382-92.
21. Doyon J, Benallil H. Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opin Neurobiology.* 2005;15(2):161-7. doi: 10.1016/j.conb.2005.03.004
22. Muratori LM, Lamberg EM, Quinn L, Duff SV. Applying principles of motor learning and control to upper extremity rehabilitation. *J Hand Therapy.* 2013;26(2):94-103. doi: 10.1016/j.jht.2012.12.007
23. Merel J, Botvinik M, Wayne G. Hierarchical motor control in mammal and machines. *Nature communications.* 2019;10:1-12.
24. Bastian, AJ. Understanding sensorimotor adaptation and learning adaptation. *Current Opinions in Neurology.* 2008;21:628-33.

25. Sibiridonov V, Loginov N, Ivanchel I, Kurgansky AV. The role of motor activity in insight problem solving (The Case of the Nine — Dot Problem). *Front Psychol.* 2019;10(2):1-17. doi: 10.3389/fpsyg.2019.00002
26. Thelen E, Corbetta D, Spencer JP. Development of reaching during the first year: role of movement speed. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 1996;22(5):1059-76. doi: 10.1037//0096-1523.22.5.1059
27. LI S, Pathirana PN, Galea MP, Ottmann G, Kahn F. Quantitative assessment in ADL: a Pilot study of upper extremity reaching tasks. *J Sensors.* 2015;2015:1-14. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/236474>
28. Lacquaniti F, Terzuolo C, Viviani P. The law relating kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychol.* 1983;54:115-30. doi: [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(83\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90027-6)
29. Strogatz SH. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology and chemistry.* Perseus Publishing. 2001;12(2):122-33.
30. Kelso JS. Multistability and metastability: understanding dynamic coordination in the brain. *Philos Trans Royal Soc Biol Sci.* 2012;367(1591):906-18. doi: 10.1098/rstb.2011.0351
31. Kelso JS. *Dynamic patterns: the self-organization of brain and behavior.* MIT Press. 1997;11(1):23-39.
32. Makino H, Hwang EJ, Hendrick NG, Komiyama T. Circuits mechanisms of sensorimotor learning. *Neuron.* 2016;92(4):705-21. doi: 10.1016/j.neuron.2016.10.029
33. Latash M. Evolution of motor control: from reflexes and motor programs to the equilibrium point hypothesis. *J Hum Kinet.* 2008;19(19):3-24. doi: 10.2478/v10078-008-0001-2
34. Shadmehr R, Brashes-Krug T. Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *J Neurosci.* 1997;17(1):409-19. doi: 10.1523/JNEUROSCI.17-01-00409.1997
35. Berthier NE. Learning to reach: a mathematical model. *Dev Psychol.* 1996;5:811-23.
36. Viviani P, Terzuolo C. Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience.* 1982;7(2):431-7. doi: 10.1016/0306-4522(82)90277-9

37. Flash T, Hogan N. The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *J Neurosci*. 1985;5(7):1688-703. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.05-07-01688.1985>
38. Viviani P, McCollum C. The relation between linear extent and velocity in drawing movements. *Neuroscience*. 1983;1(10):211-8. doi: [https://doi.org/10.1016/0306-4522\(83\)90094-5](https://doi.org/10.1016/0306-4522(83)90094-5)
39. Viviani P, Cenzato M. Segmentation and coupling in complex movements. *J Expl Physiol Hum Percept Perform*. 1985;6(11):828-45. doi: 10.1037//0096-1523.11.6.828
40. Flash T, Handzel AA. Affine differential geometry analysis of human arm movements. *Biol Cybern*. 2007;96:577-601.
41. Viviani P, Flash T. Minimum-jerk, two thirds power law, and isochrony: Converging approaches to movement planning. *J Exp Physiol Hum Percept Perform*. 1995;1(21):32-53. doi: 10.1037//0096-1523.21.1.32
42. Hoff B. A Model of duration in normal and perturbed reaching movement. *Biol Cybern*. 1994;71:481-8.
43. Li S, Phatirana PN, Galea MP, Ottman G, Khan F. Quantitative assessment of ADL: A pilote study of upper extremity reaching tasks. *J Sensors*. 2015; 03(2):1-13.
44. Davidson PR, Wolpert DM. Motor learning and prediction in a variable environment. *Current Opin Neurobiol*. 2003;13(2):1-6. doi: 10.1016/s0959-4388(03)00038-2
45. Wolpert DM, Diedrichsen J, Flanagan JR. Principles of sensorimotor learning. *Nat Rev Neuroscience*. 2011;3:1-13.
46. Kal E, Proseé R, Winters M, Van der Kamp J. Does implicit motor learning lead to greater automatization of motor skills compared to explicit motor learning? A Systematic Review. *PloS One*. 2018;13(9):1-25. doi: 10.1371/journal.pone.0203591
47. Jeannerod M. The neural and behavioural organization of goal-directed movements. *Neuroscience*. 1988;2(12):213-24.
48. Schmidt RA, Lee TD. *Motor control and learning: a behavioral emphasis. Champaign, II: Human Kinectis*. 2005.
49. Edelman S, Flash T. A model of handwriting. *Biol Cybern*. 1987;57(1-2):25-36. doi: 10.1007/BF00318713

50. Shadmehr R. The Computational neurobiology of reaching and pointing: a foundation for motor learning. MIT press 2002.
51. Koh TC, Susan MBB. Tai Chi Chuan. Institute for advanced research in Asian and science medicine. Am J Chinese Med. 1981;9:15-22.
52. Yang GY, Sabag A, Hao WL, Zhang LJ, Jia MX, Dai N, et al. Tai Chi for health and well-being: a bibliometric analysis of published clinical studies between 2010 and 2020. Complement Ther Med. 2021;60:1-7. doi: 10.1016/j.ctim.2021.102748
53. Gatts S. A Tai Chi Chuan training model to improve balance control in older adults. Current Aging sci. 2008;1:68-70. doi: 10.2174/1874609810801010068
54. Pan J, Liu C, Li L, Zhang X. The effect of Tai Chi Chuan exercise on postural time-to-contact in manual fitting task among older adults. Gait Posture. 2020; 82:61-7. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.08.124
55. Wu G. Biomechanical characteristics of stepping in older Tai Chi practitioners. Gait Posture. 2012;36(3):361-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.03.029>
56. Yang Y, Hao Y-L, Tian W-J, Gong L, Zhang K, Shi Q-G, et al. The effectiveness of Thai Chi for patients with Parkinson's disease: study protocol for a randomized controlled trial. Biomed Central. 2015;16:1-7. doi: 10.1186/s13063-015-0639-8
57. Zamparo P, Zorzi E, Marcantoni S, Cesari P. Is beauty in the eyes of the beholder? Aesthetic versus technical skill in movement evaluation of Tai Chi. PloS One: 2015;10(6):1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0128357
58. Chau KW, Mao DW. The characteristics of foot movements in Tai Chi Chuan. Res Sports Med. 2007;14:19-28. doi: 10.1080/15438620500528216
59. Dong X, HU, X, Chen, B. Biomechanical analysis of arm manipulation in Tai Chi. Computat Intell Neurosci. 2022;1-12.
60. Hong Y, Li JX. Biomechanics of Tai Chi. A Review. Sports Biomech. 2007; 6(3):453-64. doi: 10.1080/14763140701491674
61. Hua H, Zhu D, Wang Y. Comparative study on the joint biomechanics of different skill level practitioners in chen-style Tai Chi punching. Int J Environ Res Public Health. 2022;19(10):1-12. doi: 10.3390/ijerph19105915

62. Law NY, Li JX. The temporospatial and kinematic characteristics of typical Tai Chi movements: repulse monkey and wave-hand in cloud. *Res Sports Med.* 2014;22(2):111-23. doi: 10.1080/15438627.2014.881819
63. Wu G, Liu W, Hitt J, Millon D. Spatial, temporal and muscle action patterns of Tai Chi gait. *J Electromyogr Kinesiol.* 2004;14(3):343-54. doi: 10.1016/j.jelekin.2003.09.002
64. Chan SP, Luk TC, Hong Y. Kinematic and electromyographic analysis of the push movement in Tai Chi. *Br J Sports Med.* 2003;37(4):339-44. doi: 10.1136/bjism.37.4.339
65. Li Y, Wang K, Wang L, Chang T, Zang S, Niu W. Biomechanical analysis of the meniscus and cartilage of the knee during a typical Tai Chi movement – brush and knee and twist-step. *Math Biosciences Eng.* 2018;16(2):898-908. doi: 10.3934/mbe.2019042
66. Zorzi E, Nardelo F, Fracasso E, Franchi S, Clauti A, Cesari P, et al. kinematic and metabolic analysis of the first Lu of Tai Chi in experts and beginners. 2015. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2015;40(10):1082-5. doi: 10.1139/apnm-2015-0064
67. Yang F, Liu W. Biomechanical mechanism of Tai Chi gait for preventing falls: a pilot study. *J Biomech.* 2020;105:1-10. doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109769
68. Wu G. Age-related differences in Tai Chi gait kinematics and leg muscle electromyography: a pilot study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2008;89(2):351-8. doi: 10.1016/j.apmr.2007.08.147
69. Wu G, Ren X. Speed effect of selected Tai Chi Chuan movement on leg muscle activity in young and old practitioners. *Clin Biomech.* 2009;24(5):415-21. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2009.03.001
70. Friedman J, Korman M. Offline optimization of the relative timing of movements in a sequential is blocked by retroactive behavioral interference. *Front Hum Neurosci.* 2016;10:1-15. doi: 10.3389/fnhum.2016.00623
71. Fetters T, Hogan N. Quantitative assessment of infant reaching movements. *J Mot Behav.* 1987;19(2):147-66. doi: <https://doi.org/10.1080/00222895.1987.10735405>
72. Cirstea MC, Levin MF. Compensatory strategies for reaching in stroke. *Brain.* 2000;123(Pt 5):940-53. doi: 10.1093/brain/123.5.940
73. Roher B, Fasoli S, Krebs HI, Huges R, Volpe B, Frontera WR, et al. Movement smoothness changes during stroke recovery. *J Neurosci.* 2002;22: 8297-8304.

74. Scholz JP, Schoner G. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for functional task. *Exp Brain Res.* 1999;126(3):289-306. doi: 10.1007/s002210050738
75. Latash ML, Anson JG. Synergies in health and disease: relations to adaptive changes in motor coordination. *Phys Ther.* 2006;86:1151-60.
76. Van Beers RJ, Brenner E, Smeets JBJ. Random walk of motor planning in task-irrelevant dimensions. *J Neurophysiol.* 2013;109(4):969-77. doi: 10.1152/jn.00706.2012
77. Dhawale AK, Smith MA, Olcese BP. The role of variability in motor learning. *Annu Rev Neurosci.* 2017;40:479-98. doi: 10.1146/annurev-neuro-072116-031548
78. Hillis JM, Ernst MO, Banks MS, Landy MS. Combining sensory information: mandatory fusion within, but not between, senses. *Science.* 2002;298(5598):1627-30. doi: 10.1126/science.1075396
79. Orban P, Peigneux P, Lungu O, Debas K, Barakat M, Bellec P, et al. Functional neuroanatomy associated with the expression of distinct movement kinematics in motor sequence learning. *Neuroscience.* 2011;179:94-103. doi: 10.1016/j.neuroscience.2011.01.040.



Instituto de Ciências da Saúde

Programa de Pós-Graduação

Processos Interativos dos Órgãos e Sistemas

Avenida Reitor Miguel Calmon s/n - Vale do Canela. CEP: 40110-100