



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ALEXANDRE JEHAN MARCORI

**LATERALIDADE EM TAREFAS DE APONTAMENTO
MANUAL E PODAL**

Londrina
2019

ALEXANDRE JEHAN MARCORI

**LATERALIDADE EM TAREFAS DE APONTAMENTO
MANUAL E PODAL**

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação Stricto-Sensu em Educação Física associado UEM-UEL.

Orientador: Prof. Dr. Victor Hugo Alves Okazaki

Londrina
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Marcori, Alexandre Jehan.

Lateralidade em tarefas de apontamento manual e podal / Alexandre Jehan Marcori. - Londrina, 2019.
65 f. : il.

Orientador: Victor Hugo Alves Okazaki.

Dissertação (Mestrado em Educação Física) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Educação Física e Esportes, Programa de Pós-Graduação em Educação Física, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Controle motor - Tese. 2. Preferência lateral - Tese. 3. Especificidade hemisférica - Tese. 4. Lateralidade motora - Tese. I. Okazaki, Victor Hugo Alves. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Educação Física e Esportes. Programa de Pós-Graduação em Educação Física. III. Título.



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 13 dias do mês de março do ano de 2019, na sala 08 do LABESC na Universidade Estadual de Londrina, às 14 horas, reuniu-se a Banca Examinadora homologada pelo Programa de Pós-Graduação, composta por Dr. Victor Hugo Alves Okazaki, orientador como presidente da banca, Dra. Juliana Bayeux Dascal e Dr. Luis Augusto Teixeira, na condição de membro remoto. A reunião teve por objetivo julgar o trabalho do estudante ALEXANDRE JEHAN MARCORI, sob o título "LATERALIDADE EM TAREFAS DE APONTAMENTO MANUAL E PODAL". Os trabalhos foram abertos pelo professor Dr. Victor Hugo Alves Okazaki. A seguir foi dada a palavra ao estudante para apresentação do trabalho. Cada examinador arguiu o mestrando, com tempos iguais de arguição e resposta. Terminadas as arguições, procedeu-se o julgamento do trabalho, sendo que o professor Dr. Luis Augusto Teixeira membro remoto enviou simultaneamente o formulário de avaliação o qual foi impresso e anexado à presente ata. A Banca Examinadora concluiu pela Aprovação do trabalho. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos demais membros da Banca Examinadora.

O estudante deverá reformular seu trabalho no prazo de dias: () SIM (X) NÃO

Se houver alteração no título do trabalho, informar o novo título abaixo:

OBS.: Este documento não deve conter rasuras ou corretivo e deve ser preenchido de forma legível)

Londrina, 13 de março de 2019.

PRESIDENTE

Dr. VICTOR HUGO ALVES OKAZAKI UEL

TITULARES

Dr. LUIS AUGUSTO TEIXEIRA USP

Dra. JULIANA BAYEUX DASCAL UEL

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANEXO I A

DECLARAÇÃO DE PARTICIPAÇÃO À DISTÂNCIA EM BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE Mestrado UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, PARANÁ, BRASIL.

Declaro que no dia 13/03/2019, às 14:00 horas participei de forma síncrona remota com os demais membros que assinam a Ata física deste ato público, da banca de Defesa da Dissertação de mestrado sob o título **LATERALIDADE EM TAREFAS DE APONTAMENTO MANUAL E PODAL** do candidato ALEXANDRE JEHAN MARCORI, do Programa de Pós-Graduação em Educação Física.

Considerando o trabalho avaliado e as respostas do candidato aos questionamentos dos membros da banca examinadora, ao preencher e assinar este documento declaro minha decisão de que o candidato pode ser considerado: (1) APROVADO

[(1) Aprovado(a); ou (2) Aprovado(a) com reformulação ; ou (3) Reprovado(a)].

Atenciosamente,



Dr. LUIS AUGUSTO TEIXEIRA

Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

À minha família, fonte de toda inspiração. O carinho e amor incondicional de vocês me motiva diariamente. Sou eternamente grato por tê-los ao meu lado.

Aos pais, Rosa e Oton, pelo apoio incessante aos meus estudos em todos os momentos da minha vida, em especial após entrada no ensino superior. Obrigado por tudo que fizeram por mim até aqui, me ensinando a ser uma pessoa honesta e determinada. Sem vocês, este trabalho não existiria.

À Bruna, noiva e melhor amiga, que há mais de 8 anos tem me tornado uma pessoa melhor, ficando ao meu lado frente a todas dificuldades.

Ao professor Victor, por ter aceitado me orientar e acreditado no meu potencial desde o primeiro ano de graduação. Seu exemplo de ética, competência e profissionalismo com certeza levarei comigo pelo resto da vida.

Ao Pedro, amigo, colega de laboratório e aluno dedicado, por ter me auxiliado em todos os momentos deste trabalho e por tudo que aprendemos juntos nestes dois anos de co-orientação.

À Giulia, que além de amiga e cunhada, passou a ser co-orientanda e colega de área, pela ajuda na coleta de dados e tantos outros ótimos momentos juntos.

Aos amigos Bruno e Rafael, pelos momentos de descontração, conversas produtivas, artigos idealizados, e todo aprendizado nesta caminhada em comum.

Aos colegas da pós-graduação, Vitor, Leonardo, Anderson e Alessandra, pelos trabalhos juntos e inúmeras conversas e discussões produtivas.

A todos do grupo PET/NEMO, sem os quais este trabalho não teria sido viável. Também agradeço ao grupo pela minha formação inicial em pesquisa e por fornecer um ambiente plural, rico e construtivo, auxiliando no crescimento de todos envolvidos.

A todos que participaram da coleta de dados, em especial às crianças e os pais/responsáveis que os acompanharam de boa vontade.

À banca, Luis e Juliana, pelos comentários essenciais na qualificação, contribuindo grandemente para o direcionamento e qualidade deste trabalho.

A todos professores que fui aluno durante o Mestrado, os quais contribuíram para minha formação e desenvolvimento desta pesquisa.

À CAPES, pela concessão da Bolsa de estudos durante estes dois anos de Mestrado.

À Deus, por ter me acompanhado e me guiado até aqui.

“O pouco que aprendi até aqui é quase nada, comparado ao que ignoro, e que não desespero de poder aprender; pois os que descobrem aos poucos a verdade nas ciências sucede quase o mesmo que àqueles que, começando a enriquecer, têm menos dificuldades de fazer grandes aquisições, do que o tiveram antes, quando mais pobres, em relação a outras bem menores. “

René Descartes, Discurso do Método (1637).

MARCORI, Alexandre Jehan. **Lateralidade em tarefas de apontamento manual e podal**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado em Educação Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

RESUMO

Introdução: O modelo da dominância dinâmica tem se apresentado consistente para explicação de assimetrias interlaterais de desempenho, atribuindo tais diferenças à mecanismos neurais distintos de controle, especializados em cada hemisfério cerebral. Porém, o modelo ainda não contemplou análises em diferentes faixas etárias e em tarefas podais. **Objetivo:** analisar assimetrias de controle em uma tarefa de apontamento manual em diferentes faixas etárias (experimento 1) e em uma tarefa de apontamento podal (experimento 2). **Métodos:** No experimento 1, foi realizada análise em diferentes faixas etárias (4 até 55 anos) para verificar o processo de desenvolvimento das assimetrias manuais; e no experimento 2, analisamos assimetrias podais em adultos, de forma isolada e integrada entre as pernas. Ambos experimentos contaram com análise cinemática de um marcador, rastreado no espaço durante o apontamento, para cálculo das variáveis de interesse. **Resultados:** O experimento 1 identificou que as assimetrias neurais relacionadas ao controle diferencial das mãos são mais evidentes após os 9-11 anos de idade, sugerindo que o uso desigual dos hemisférios gera mudanças neuroplásticas levando à formação destas assimetrias. O experimento 2 verificou que as assimetrias de desempenho são significativas quando o uso integrado/coordenado das pernas é exigido, também sugerindo que a prática ao longo da vida é responsável por tal fenômeno. **Conclusão:** Ambos os estudos fornecem suporte para o modelo da dominância dinâmica e agregam informações desenvolvimentistas sugeridas para explicar as assimetrias neurais de controle e a especialização hemisférica.

Palavras-chave: Preferência lateral. Lateralidade motora. Especificidade hemisférica. Controle motor. Mecanismos de controle.

MARCORI, Alexandre Jehan. **Laterality in manual and pedal pointing tasks.** 2019. 65 p. Dissertation (Master's Degree in Physical Education) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

ABSTRACT

Introduction: The dynamic dominance model has consistently explained interlateral asymmetries of performance, assigning these differences to distinct neural control mechanisms, specialized in each brain hemisphere. However, there are still gaps in the model that need to be fulfilled, regarding analysis in different ages and tasks performed with the lower limbs. **Goals:** Analyze control asymmetries during a pointing task performed with the upper limbs in different ages (experiment 1) and performed with the lower limbs by younger adults (experiment 2). **Methods:** In experiment 1, we analyzed the developmental process of the manual asymmetries in different ages (4 up to 55 years old); and in experiment 2 pedal asymmetries were investigated in an isolated and integrated/coordinated manner. Both experiments had cinematic analysis of a marker, tracked in space during the pointing task, to compute the motor control variables of interest. **Results:** Experiment 1 verified the neural asymmetries related to differential control of the hands are most evident after 9-11 years old, suggesting the asymmetric use of the hemisphere might induce neuroplastic changes associated with hemispheric specialization. Experiment 2 identified the asymmetries are significant when the lower limbs need to act in a coordinated fashion, also suggesting that practice across lifespan might underlie the asymmetries formation. **Conclusion:** Both studies provide support for the dynamic dominance model, suggesting a developmental approach associated with the neural asymmetries related to hemispheric specialization.

Key-words: Functional laterality. Handedness. Footedness. Motor control. Control mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Tarefa experimental de apontamento manual, vista diagonal (A) e frontal (B)	15
Figura 2.	Layout experimental de posicionamento das câmeras	15
Figura 3.	Comparação entre os grupos e as mãos, em ambos alvos, para variáveis do modelo da dominância dinâmica.....	19
Figura 4.	Comparação entre os grupos e as mãos, em ambos alvos, para variáveis de controle motor	21
Figura 5.	Tarefa experimental de apontamento podal com apoio (A) e equilíbrio unipodal (B)	34
Figura 6.	Layout experimental de posicionamento das câmeras	35
Figura 7.	Comparação entre os membros inferiores na tarefa de apontamento com apoio.....	37
Figura 8.	Comparação entre os membros inferiores na tarefa de equilíbrio unipodal, para comportamento do COP	38
Figura 9.	Tarefa experimental de apontamento podal sem apoio	39
Figura 10.	Comparação entre os membros inferiores no componente dinâmico da tarefa de apontamento sem apoio	41
Figura 11.	Comparação entre os membros inferiores no componente estabilizador da tarefa de apontamento sem apoio.....	42

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. Introdução geral	1
CAPÍTULO II	8
2. Estudo Experimental I: “Assimetrias de controle entre as mãos na tarefa de apontamento, em diferentes faixas etárias”	8
2.1 Resumo	8
2.2 Abstract	9
2.3 Introdução	10
2.4 Métodos	13
2.4.1 <i>Participantes</i>	13
2.4.2 <i>Tarefa</i>	14
2.4.3 <i>Análise de movimento</i>	15
2.4.4 <i>Variáveis</i>	16
2.4.5 <i>Processamento de sinais e análise estatística</i>	16
2.5 Resultados	17
2.6 Discussão	21
2.7 Conclusão	25
CAPÍTULO III	27
3. Estudo Experimental II: “Assimetrias de controle em tarefas de apontamento podal”	27
3.1 Resumo	27
3.2 Abstract	28
3.3 Introdução	29
3.4 Métodos do experimento 2.1	32
3.4.1 <i>Participantes</i>	32
3.4.2 <i>Tarefa</i>	32
3.4.3 <i>Análise de movimento e equilíbrio</i>	34
3.4.4 <i>Variáveis cinemáticas e cinéticas</i>	35
3.4.5 <i>Processamento de sinais e análise estatística</i>	36
3.5 Resultados do experimento 2.1	37

3.6	Métodos do experimento 2.2	39
3.6.1	<i>Participantes</i>	39
3.6.2	<i>Tarefa</i>	39
3.6.3	<i>Análise de movimento e equilíbrio</i>	40
3.6.4	<i>Variáveis cinemáticas e cinéticas</i>	40
3.6.5	<i>Processamento de sinais e análise estatística</i>	40
3.7	Resultados do experimento 2.2	40
3.8	Discussão dos experimentos 2.1 e 2.2	43
3.9	Conclusão	46
CAPÍTULO IV	47
4.	Considerações Finais	47
REFERÊNCIAS	48

CAPÍTULO I

1. Introdução geral

Assimetrias interlaterais de desempenho são um tema de grande importância na comunidade científica há anos, principalmente em tarefas manuais (WOODWORTH, 1899). A hipótese da dominância dinâmica, proposta por Sainburg e colaboradores, fornece explicações para tais assimetrias, além de sugerir que estas diferenças entre os hemisférios são um dos fatores que contribuem para a preferência manual assimétrica. Os estudos iniciais desta hipótese analisaram assimetrias entre os membros superiores em uma tarefa de apontamento (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000). Foram medidos os torques articulares produzidos pelo ombro e cotovelo, além da linearidade da trajetória da mão em direção ao alvo e o erro absoluto da posição final, visto que não havia disponível feedback visual da mão para o participante saber se acertou o alvo ou não. Os resultados indicaram que o lado preferido teve uma melhor capacidade de coordenação interarticular, ao usar de forma mais eficiente o torque entre os segmentos e apresentar maior linearidade da trajetória da mão. O lado não-preferido, por sua vez, apresentou maior precisão na posição final da mão, chegando mais perto do alvo por meio de uma trajetória menos linear e usando praticamente o dobro do torque produzido pelo lado preferido (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000).

Com base nestas assimetrias supracitadas, os autores propõem que as diferenças entre as mãos estão necessariamente relacionadas a mecanismos neurais de controle do movimento. Isso se dá com base em dois argumentos principais: 1) a musculatura utilizada na tarefa de apontamento é controlada majoritariamente pelo córtex cerebral contralateral à mão (KUYPERS, 1982); e 2) uma sequência hierárquica de passos que ocorre para o controle do movimento (KAWATO, 1999; KRAKAUER et al., 2000; ROSENBAUM; CHAIKEN, 2001). Nesta sequência, há inicialmente a transformação viso-motora, na qual a informação visual da posição do alvo é traduzida em *frames* de referência internos, como posições e ângulos articulares para levar os segmentos até o alvo. Em seguida, ocorre a especificação da trajetória com base em uma sequência temporal das posições dos segmentos no espaço. E, finalmente, a transformação dinâmica, na qual a

especificação da trajetória é transformada nas propriedades dinâmicas, ou seja, forças e torques necessários para completar o movimento e atingir a posição inicialmente estipulada. Assim, os autores propõem que as assimetrias entre os braços na tarefa de apontamento decorrem da terceira fase deste modelo (transformação dinâmica), de forma que o hemisfério preferido possui vantagem para controlar os componentes dinâmicos da tarefa, pois usa de forma mais eficiente o torque dos segmentos e a coordenação interarticular.

Para verificar se as assimetrias entre as mãos de fato são decorrentes deste modelo hierárquico de controle, Sainburg (2002) testou a adaptação que cada hemisfério teria frente a duas manipulações: 1) rotação viso-motora, em que o feedback visual do movimento era dado em ambiente virtual, mas com uma rotação de 30° em relação ao movimento real; e 2) nova dinâmica intersegmentar, em que um peso era adicionado ao antebraço do participante, exigindo adaptação à nova demanda da tarefa. Como a especificação dos *frames* de referência ocorre anteriormente à transformação dinâmica da especificação da trajetória, os autores esperavam que não haveria diferença entre os braços na adaptação à rotação viso-motora. Por outro lado, se houvesse realmente um controle facilitado do hemisfério preferido na transformação dinâmica, haveria assimetria na adaptação entre os braços na segunda condição, favorecendo o preferido. De fato, os resultados apontaram adaptações semelhantes entre os braços na rotação viso-motora, mas uma superioridade do hemisfério preferido para a nova condição de dinâmica intersegmentar. Com este suporte à hipótese da dominância dinâmica, Sainburg conclui que as assimetrias encontradas refletem ativações e organizações neurais distintas entre os hemisférios.

Em 2003, Bagesteiro e Sainburg compararam a reposta aguda de cada braço frente a uma perturbação inesperada (adição de peso ao antebraço) durante a tarefa de apontamento. Os autores encontraram uma melhor posição final da mão não preferida nas condições de perturbação, sugerindo eficiência na compensação de cargas inesperadas. Este resultado deu suporte inicial à noção de que cada hemisfério cerebral é especializado para um tipo de controle, diferente das ideias anteriores em que o lado preferido era superior em praticamente todas as tarefas e características. Com base neste e nos estudos anteriores, a hipótese da dominância dinâmica avança ao sugerir que em destros, o hemisfério cerebral esquerdo é

especializado em movimentos mecanicamente eficientes e com trajetórias lineares (controle dinâmico), enquanto o hemisfério direito é especializado em posicionamento e estabilização de movimentos (controle de impedância) (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000). Tal divisão de controle está diretamente de acordo com as características das tarefas diárias que realizamos com ambas as mãos de forma simultânea. Fatiar alimentos, cortar um papel com uma tesoura e abrir uma garrafa são exemplos em que a mão não preferida estabiliza o objeto, enquanto a preferida realiza movimentos dinâmicos com trajetórias pré-definidas. Assim, Sainburg e colaboradores começaram a sugerir que a opção de usar uma das mãos nas tarefas diárias é uma consequência destas assimetrias motoras e especificidades neurais hemisféricas de controle (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000).

Revisando todos estes achados em 2005, Sainburg dá mais um passo ao propor que a lateralização destes mecanismos de controle se relaciona com otimizar a adaptação e evolução da espécie humana (GAZZANIGA, 2000), uma vez que ter cada especificidade em hemisférios distintos aumenta os recursos neurais disponíveis para executar cada processo. Com as vantagens de cada hemisfério para funções diferentes, mas complementares, o desempenho motor se torna aprimorado para tarefas bimanuais. E, se considerarmos que a preferência manual de fato emerge a partir destas assimetrias neurais de controle, a falta de coordenação em crianças sem um padrão claro de lateralidade pode ser explicada pela hipótese da dominância dinâmica. Uma vez que a coordenação é o resultado da especialização hemisférica para o controle dinâmico e de impedância, a ausência de um padrão lateralizado no comportamento necessariamente causará déficits na coordenação. Logo, esta sugestão está de acordo com os resultados mostrando a relação entre transtornos no desenvolvimento da coordenação motora (como atraso no desenvolvimento de movimentos básicos, problemas na coordenação mão-olho) e a ausência de uma preferência manual bem estabelecida (SIGMUNDSSON; WHITING, 2002).

Em canhotos, as assimetrias na tarefa de apontamento também foram encontradas, mas em menores magnitudes (PRZYBYLA; GOOD; SAINBURG, 2012). Novamente, a mão-preferida apresentou melhor linearidade da trajetória e

aproveitamento do torque intersegmentar (controle dinâmico), enquanto a mão não preferida demonstrou leve superioridade no posicionamento final (controle de impedância). Além disto, neste estudo os autores sugerem que, apesar de cada mão ser primariamente controlada pelo hemisfério cerebral contralateral, há uma contribuição de ambos os hemisférios para o controle do movimento, porém em diferentes magnitudes. Tal sugestão foi confirmada empiricamente por um modelo computacional de controle híbrido, trazendo resultados além das medidas motoras analisadas anteriormente (YADAV; SAINBURG, 2011). Alterando apenas o instante em que cada hemisfério utiliza sua forma primária de controle (impedância x dinâmico), os autores conseguiram, por meio do modelo, replicar os resultados na tarefa de apontamento. Resumidamente, o hemisfério preferido utiliza o controle dinâmico durante quase toda extensão do movimento, alternando para o controle de impedância no final da trajetória. O hemisfério não-preferido, por sua vez, inicia o movimento com o controle dinâmico, mas rapidamente passa para o controle de impedância, que se mantém até o final do movimento (SAINBURG, 2014; YADAV; SAINBURG, 2014).

Uma vez que a hipótese também foi proposta com o intuito de explicar a preferência manual com base nas assimetrias neurais de controle, ainda era preciso testar se realmente há relação entre a preferência e as assimetrias. Para isso, Coelho e colaboradores (2013) utilizaram uma tarefa de alcance, a alvos dispostos medial e lateralmente ao participante, e realizaram as mesmas medidas anteriores de torque dos segmentos e articulações, e linearidade da trajetória da mão. Os resultados indicaram que os alvos mediais receberam mais alcances da mão preferida, a qual apresentava maior linearidade e melhor aproveitamento da dinâmica intersegmentar nesta condição (torque do ombro e cotovelo). Contudo, os autores não atribuem a escolha das mãos exclusivamente a estas assimetrias, entendendo que a preferência manual é um comportamento complexo, em que diversos fatores interagem para a seleção de um dos membros em uma tarefa motora. Um destes fatores levantados é a experiência prévia com uma das mãos construída ao longo dos anos (COELHO et al., 2013).

Com outra revisão de seus principais resultados, Sainburg (2014) compila uma quantidade considerável de estudos experimentais dando suporte à hipótese da dominância dinâmica, a qual passa para um *status* de modelo. O principal avanço

desta revisão é a aproximação de seu modelo com o modelo de lateralização cerebral de vertebrados, proposto por MacNeilage, Rogers e Vallortigara (2009). Nesta abordagem, os autores sugerem que uma série de assimetrias comportamentais (emocionais, cognitivas, de linguagem), em várias espécies de animais e humanos, podem ser explicadas por um princípio simples de organização cerebral: a especialização hemisférica de processamento. O hemisfério cerebral esquerdo é responsável por comportamentos bem estabelecidos e executados em ambientes previsíveis, enquanto o hemisfério direito é responsável por comportamentos relacionados às condições ambientais imprevisíveis. De forma análoga para o comportamento motor, é exatamente isto que Sainburg propõe com o modelo da dominância dinâmica, com o controle dinâmico no hemisfério esquerdo (mais relacionado a trajetórias pré-estabelecidas e controle preditivo) e de impedância no hemisfério direito (mais relacionado à repostas de posicionamento, perturbações e controle reativo). Uma vez que ambas as linhas de pesquisa foram desenvolvidas separadamente, a similaridade de seus resultados é notória. Juntos, estes modelos contribuem para um entendimento amplo do processo de lateralização neural de um ponto de vista evolutivo e biológico.

Apesar do grande respaldo científico encontrado pelo modelo da dominância dinâmica até o momento, ainda há alguns pontos que precisam ser testados para sua melhor consolidação. Inicialmente, é preciso considerar que padrões neurais de ativação relacionados às tarefas motoras são passíveis de profunda reorganização cortical com a prática (MORGEN et al., 2004; PUTTEMANS; WENDEROTH; SWINNEN, 2005). Isto quer dizer que as assimetrias verificadas nos adultos (amostra de todos os estudos de Sainburg e colaboradores) podem ser uma consequência do uso diferencial das mãos ao longo dos anos, e não a causa em si. Ainda, a neuroplasticidade acentuada em crianças (DENNIS et al., 2013) também é um fator que pode contribuir para a formação destas assimetrias neurais de controle nos primeiros anos de vida. Finalmente, se as assimetrias são de fato a causa da preferência manual, elas devem estar presentes em idades anteriores à sugerida para a consolidação deste comportamento, ou seja, antes dos 5-8 anos de idade (BELMONT; BIRCH, 1963; GABBARD, 1993; GAILLARD; SATZ, 1989; MCMANUS et al., 1988; SCHAROUN; BRYDEN, 2014). Uma vez que a preferência manual se desenvolve ao longo da infância (MICHEL et al., 2013) e continua se acentuando

com o passar dos anos (MARCORI et al., 2018; TEIXEIRA, 2008), testar as assimetrias de controle em diferentes faixas etárias se torna necessário para entender o fenômeno de forma mais ampla.

Outra lacuna a ser preenchida no modelo da dominância dinâmica diz respeito às assimetrias em tarefas motoras realizadas com os membros inferiores. Se as assimetrias manuais são decorrentes de especificidades de cada hemisfério cerebral no controle do movimento, é de se esperar que também haja assimetrias semelhantes no controle dos membros inferiores. Em aspectos comportamentais, a divisão das características motoras entre os hemisférios em tarefas do cotidiano é semelhante à divisão verificada nas tarefas manuais. A especificidade de estabilização e impedância é observada na perna não-preferida, da mesma forma que a especificidade dinâmica e preditiva é observada na perna preferida. Chutar uma bola, trazer um objeto para perto do corpo, desenhar na areia ou no chão e pisar em um alvo em movimento são exemplos de tarefas com divisão clara destes componentes. De fato, estas tarefas manipulativas possuem preferência acentuada para a perna direita (BACELAR; TEIXEIRA, 2015), assim como as tarefas de manipulação realizadas com as mãos (escrever, arremessar uma bola, etc). Considerando tais aspectos, pode-se especular que o modelo da dominância dinâmica também propõe assimetrias interlaterais de desempenho nos membros inferiores. Porém, a preferência podal é menos marcante que a manual (GABBARD, 1993; MARCORI et al., 2018), sugerindo que, possivelmente, estas assimetrias estejam presentes, porém em menores magnitudes. Logo, analisar assimetrias de controle com membros inferiores também é uma estratégia importante para avançar com o conhecimento nesta área, uma vez que esta dimensão da lateralidade não tem sido foco de investigação, tanto em análises comportamentais, quanto em análises de controle motor e assimetrias neurais.

Em vista do exposto, a presente dissertação tem a seguinte estrutura: uma introdução geral (já apresentada) sobre o desenvolvimento da teoria da dominância dinâmica e suas lacunas, seguida de dois estudos experimentais, os quais analisam assimetrias interlaterais de desempenho em tarefas de apontamento manual (1) e podal (2). Os estudos compararam as assimetrias entre os lados preferido e não preferido, em tarefa de apontamento (em diferentes idades no experimento 1, e em adultos jovens no experimento 2), com abordagens experimentais e análises

semelhantes às empregadas pelos estudos de Sainburg e colaboradores. Os resultados desta dissertação preenchem duas lacunas importantes: 1) a análise em diferentes faixas etárias na tarefa manual responde se tais assimetrias entre os lados já estão presentes desde idades iniciais; e 2) a análise podal adiciona conhecimento ao modelo da dominância dinâmica, uma vez que a literatura a respeito de assimetrias podais com esta abordagem é escassa.

CAPÍTULO II

2. Estudo Experimental I: “Assimetrias de controle entre as mãos na tarefa de apontamento, em diferentes faixas etárias”.

2.1 Resumo

Introdução: Assimetrias neurais de controle entre as mãos têm sido sugeridas como o fator responsável pela preferência manual assimétrica em humanos. Contudo, tais evidências são provenientes de populações adultas, necessitando testá-las em crianças para confirmar tal proposição. **Objetivo:** Comparar os diferentes mecanismos de controle entre as mãos na tarefa de apontamento, em diversas faixas etárias. **Métodos:** Oitenta participantes foram selecionados para esta pesquisa, sendo 16 de cada faixa etária: 4-5, 6-8, 9-11, 18-25 e 35-55 anos de idade. A tarefa de apontamento foi realizada em dois alvos (ipsi e contralateral) posicionados a 75% do alcance horizontal máximo, a 45 graus da linha medial do participante. O participante levava uma manopla até o alvo, com um marcador reflexivo rastreado no espaço por um sistema de 7 câmeras optoeletrônicas. Cinco tentativas por alvo com cada mão foram realizadas. Linearidade da trajetória da mão, erro da direção inicial, erro absoluto da posição final, e outras variáveis de controle (instante relativo da velocidade máxima, tamanho % da fase pré-programada e número de submovimentos) foram analisadas. **Resultados:** As assimetrias de desempenho concordaram com o modelo da dominância dinâmica, pois as variáveis que denotam controle dinâmico apresentaram melhor desempenho na mão direita. Ainda, as assimetrias entre as mãos foram apenas evidentes após os 9-11 anos de idade, sendo mais significativas nos grupos mais velhos, de 18-25 e 35-55 anos. **Discussão:** Os resultados apontam que as assimetrias neurais de controle são dependentes do uso diferencial das mãos ao longo dos anos, o que sugere um componente desenvolvimentista atrelado ao modelo da dominância dinâmica.

Palavras-chave: Lateralidade; Assimetria interlateral; Desenvolvimento motor; Especialização hemisférica; Controle motor.

2.2 Abstract

Asymmetries in motor control during a pointing task, analyzed in different ages.

Introduction: Neural asymmetries of control between hands has been suggested as a primary cause of handedness in humans. However, these evidences are based on studies with adult population, thus needing to be tested in children to confirm such claims. **Aim:** Compare distinct neural mechanisms of control between hands during a pointing task, from children to late adulthood. **Methods:** Eighty participants were selected for this research, sixteen of each age range: 4-5; 6-8; 9-11; 18-25 and 35-55 years old. The pointing task was performed to two targets (ipsi and contralateral) positioned at 75% of the maximum horizontal reach capacity, at 45 degrees of midline. The participant took a handle, with a reflective marker, to the target, being tracked by an optoelectronic system with 7 cameras. Five trials per target with each hand were performed. Deviation from linearity, initial direction error and final position error, among other control variables (relative moment of maximum velocity, % duration of pre-programmed movement phase and number of sub movements), were analyzed. **Results:** Performance asymmetries agreed with the dynamic dominance model, as the variables reflecting dynamic control had better scores in the right hand. Additionally, the asymmetries between hands were only evident after 9-11 years old, being more significantly different in the older groups, i.e. 18-25 and 35-55 years old. **Discussion:** The results suggests the neural asymmetries of control are developed upon differential use of the hands along lifespan, attributing a developmental approach to the dynamic dominance model.

Key-words: Functional laterality; Interlateral asymmetries; Motor development; Hemispheric specialization; Motor control.

2.3 Introdução

O modelo de dominância dinâmica tem encontrado amplo suporte experimental desde seus estudos iniciais (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2005; SAINBURG; KALAKANIS, 2000), com resultados robustos a respeito de assimetrias de desempenho entre as mãos e os hemisférios cerebrais. Estas assimetrias, provenientes de diferentes mecanismos de controle (YADAV; SAINBURG, 2011), são entendidas como uma possível causa da preferência manual (PRZYBYLA; GOOD; SAINBURG, 2012; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000). Logo, sugere-se que as consequências comportamentais de uma preferência manual assimétrica são determinadas por assimetrias fisiológicas que estão presentes antes da oportunidade de experiências motoras serem desenvolvidas (ANNETT, 1992; MCMANUS, 1985). Neste contexto, há a sugestão de que a preferência manual emerge a partir de circuitos neurais distintos em cada hemisfério, os quais são especializados para controlar aspectos específicos dos movimentos dos membros (GOBLE; BROWN, 2008; OTTAVIANO et al., 1989; SAINBURG, 2002).

Resumidamente, o modelo da dominância dinâmica (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2014; YADAV; SAINBURG, 2014) sugere que a mão preferida apresenta maior linearidade na trajetória ao apontar para um alvo, maior eficiência de movimento pelo aproveitamento do torque e da coordenação intersegmentar e melhor desempenho em ambientes preditivos. Por outro lado, melhor habilidade de posicionamento final, melhores respostas a perturbações inesperadas e vantagens em condições de estabilização são aspectos verificados na mão não-preferida. Concordando que estas assimetrias neurais de controle são inatas, uma estudo experimental com bebês de 20 a 32 semanas de idade demonstrou maior linearidade da mão direita ao alcançar um objeto (MORANGE-MAJOUX; PEZE; BLOCH, 2000). Esta variável necessariamente denota a capacidade coordenativa do hemisfério em controlar os segmentos e articulações (SAINBURG, 2002). Assim, até esta idade, de fato pouca experiência manual assimétrica foi acumulada, sugerindo justamente que as assimetrias neurais são responsáveis pela formação do controle motor distinto entre as mãos, e, conseqüentemente, da preferência assimétrica no futuro.

Outro ponto de vista, porém, foi levantado na discussão de Bagesteiro e Sainburg (2002). Os autores discutem a possibilidade de que tais assimetrias neurais e de desempenho podem ser consequências da prática lateralizada e o uso desigual das mãos ao longo dos anos. Esta noção tem suporte experimental de pesquisas indicando que a coordenação das forças musculares com as forças ambientais e intersegmentais (controle dinâmico) são dependentes do aprendizado (LACKNER; DIZIO, 1994; SAINBURG; GHEZ; KALAKANIS, 1999), e que esta coordenação é aprendida durante os primeiros anos de vida (ZERNICKE; SCHNEIDER, 1993). Também devemos considerar a susceptibilidade neuroplástica do córtex motor primário em se reorganizar a partir de práticas motoras (KAMI et al., 1995; PASCUAL-LEONE; GRAFMAN; HALLETT, 1994), assim como o caráter plástico da preferência manual (PORAC, 2009; STOLOFF et al., 2011).

Diversos estudos mostram modulações da preferência com a prática lateralizada (TEIXEIRA; DA SILVA; DE FREITAS, 2010; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2007; TEIXEIRA; OKAZAKI, 2007), além de alterações no padrão de ativação cortical devido ao uso continuado de uma das mãos (GRABOWSKA et al., 2012; KLOPPEL et al., 2007, 2010). Ainda, um estudo sobre assimetrias cerebrais em mais de 15 mil pessoas encontrou correlação com a idade, e não com a preferência manual (GUADALUPE et al., 2017), sugerindo que o uso das mãos ao longo dos anos se correlaciona com as assimetrias neurais, e não a preferência lateral em si. Abordagens desenvolvimentistas sobre a preferência manual também sugerem que este comportamento assimétrico passa por um período de desenvolvimento até seu estabelecimento, no qual alguns fatores afetam seu curso de consolidação (MICHEL et al., 2013). De forma análoga, então, é possível que as assimetrias neurais de controle também sejam influenciadas pelo desenvolvimento motor e o uso diferencial das mãos. Assim, com base nestes argumentos, as assimetrias interlaterais no controle dinâmico e de impedância podem emergir secundariamente devido às experiências assimétricas com cada mão/braço.

Dadas as divergências entre estes dois pontos de vista e possível influência do desenvolvimento motor neste cenário, ainda é preciso responder se as assimetrias neurais de controle são parte da causa ou da consequência das diferenças comportamentais e de desempenho motor verificadas em movimentos manuais. Analisar tais assimetrias em várias faixas etárias, desde crianças até

adultos, é uma forma de responder esta questão e dar mais um passo para avançar com o modelo da dominância dinâmica, pois fornece a oportunidade de investigar se estas assimetrias estão presentes em idades anteriores à proposta para formação da preferência manual, ou seja, entre 5-8 anos de idade (BELMONT; BIRCH, 1963; GABBARD, 1993; GAILLARD; SATZ, 1989; MCMANUS et al., 1988; SCHAROUN; BRYDEN, 2014). Apesar de alguns estudos experimentais já terem feito esta análise de assimetria em tarefas de apontamento em recém-nascidos ou crianças (BRYDEN; ROY, 2005; MORANGE-MAJOUX; PEZE; BLOCH, 2000; RAW et al., 2012; RÖNNQVIST; DOMELLÖF, 2006), nenhum realizou análises comparando as assimetrias em diferentes idades. Ainda, para aproximar os resultados do modelo da dominância dinâmica, é necessário testar tais diferenças com um protocolo experimental semelhante ao utilizado nas pesquisas de Sainburg, isto é, sem feedback visual da mão e analisando variáveis específicas de controle como erro da posição final, erro da direção inicial e desvio da linearidade conforme seus cálculos (SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000).

Dentro deste contexto, analisar as repostas motoras das mãos em uma tarefa de apontamento com características semelhantes às dos experimentos conduzidos no modelo da dominância dinâmica se faz necessário, de forma que a comparação e aplicação destes resultados se aproximem mais fielmente ao modelo proposto. O objetivo deste estudo, então, foi comparar mecanismos de controle do movimento entre as mãos preferida e não preferida em uma tarefa de apontamento, em diferentes faixas etárias (de crianças a adultos). Com base nos estudos apresentados na introdução, foram levantadas as seguintes hipóteses: (H₁) as diferenças entre as mãos serão acentuadas em crianças e progressivamente menores nos adultos; (H₂) será verificado menor desvio da linearidade com a mão direita, indicando melhor controle dinâmico do hemisfério cerebral esquerdo; (H₃) outras variáveis de controle, tal como erro da direção inicial, número de submovimentos e duração % da fase pré-programada, também terão indicadores melhores na mão direita (menores erros e quantidades de submovimentos e maior duração da fase pré-programada), os quais favorecem a especificidade preditiva e dinâmica deste hemisfério; e (H₄) haverá semelhança na capacidade de posicionamento final entre as mãos.

2.4 Métodos

2.4.1 Participantes

O tamanho amostral foi calculado pelo programa G*Power 3.1 (Franz Faul, Alemanha) para uma ANOVA mista com interações (5 grupos x 2 mãos), considerando um tamanho de efeito de Cohen moderado ($d = 0,5$) (COHEN, 1988), significância bicaudal $\alpha = 0,05$ e poder $(1-\beta) = 0,8$, conforme as recomendações de Faul e colaboradores (2007). Baseado nestes parâmetros, um tamanho mínimo de 55 participantes foi estimado.

Participaram desta pesquisa 80 indivíduos, selecionados por conveniência, sendo 16 de cada faixa etária: 4-5; 6-8; 9-11; 18-25 e 35-55 anos de idade. Todos os grupos contaram com 8 homens e 8 mulheres. Os menores de 18 anos foram acompanhados pelos pais ou responsáveis, sendo estes os responsáveis pela assinatura do termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE). Os procedimentos deste estudo foram aprovados pelo comitê de ética e pesquisa com seres humanos da Universidade Estadual de Londrina (CAAE 92987718.4.0000.5231). Todos foram esclarecidos sobre os objetivos e benefícios da pesquisa e assinaram o TCLE antes da pesquisa iniciar.

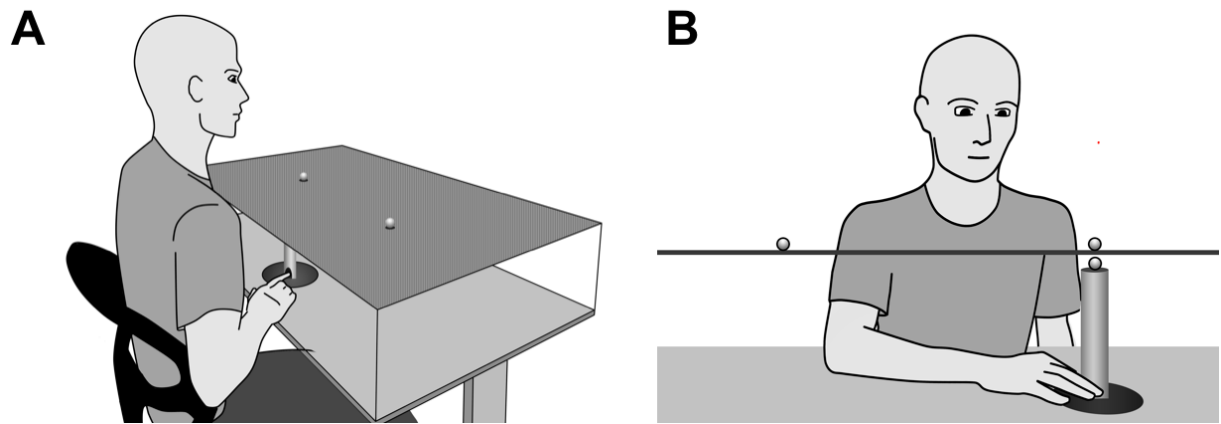
Como critério de inclusão, os participantes deveriam ser neurologicamente intactos, sem doenças/condições osteomioarticulares que impedissem a realização da tarefa e destros. Em crianças menores de 9 anos, a medida da preferência manual se deu por observação comportamental em cinco tarefas unilaterais, repetidas três vezes, sendo elas: desenhar um círculo com uma caneta, pegar uma bolinha, arremessar a bolinha, apontar para um alvo e tocar o dedo indicador no nariz (SCHAROUN; BRYDEN, 2014). Foram incluídas apenas crianças que utilizaram a mão direita em pelo menos 90% das tentativas (13 ou mais). Além disso, os responsáveis preenchem o questionário de Edinburgo de 10 perguntas pela criança (OLDFIELD, 1971). Crianças acima de 9 anos e adultos responderam o mesmo questionário, e foram incluídos apenas se tivessem escore maior que 90 no quociente de lateralidade do inventário (OLDFIELD, 1971). Adultos também responderam ao IPLAG para membros superiores (MARIM; LAFASSE; OKAZAKI, 2011) e foram incluídos apenas se classificados como fortemente destros.

2.4.2 Tarefa

Foi realizada uma tarefa de apontamento com os membros superiores. Os participantes ficaram sentados confortavelmente em uma cadeira, com altura ajustável para que o cotovelo ficasse logo a cima do nível da mesa. Uma manopla, com base redonda de madeira e haste em PVC ($\cong 90g$), especificamente confeccionada para este estudo, foi posicionada medialmente ao participante. Foi utilizado feltro na base da manopla para reduzir atrito com a mesa. O objetivo da tarefa era levar a manopla em direção a um alvo, sem feedback visual da mão. Para tal manipulação, um aparato preto foi posicionado na altura da clavícula do participante e estendido por toda mesa, impedindo a visualização do próprio braço, mas permitindo a visualização dos alvos, fixados por cima do aparato. Foram posicionados dois alvos a 75% do alcance horizontal máximo, a 45 graus da linha medial do participante, em ambos os lados (ipsi e contralateral). A distância média de cada grupo do ponto inicial de movimento até o alvo foi de: $17 \pm 1,7cm$ (4-5 anos); $22 \pm 3,9cm$ (6-8 anos); $25 \pm 2,4cm$ (9-11 anos); $29 \pm 4,9cm$ (18-25 anos) e $28 \pm 3,6cm$ (35-55 anos). Cada participante realizou 5 tentativas de apontamento por alvo, com cada uma das mãos, aleatorizadas entre os alvos e mãos para evitar efeito da ordem. Um total de 20 tentativas por participante foi analisado. A Figura 1 apresenta o design experimental da tarefa.

Os participantes receberam instruções para sentar confortavelmente e ajustar a altura da cadeira. Em seguida, foram instruídos a realizar o apontamento ao alvo estipulado em um movimento único e contínuo, ficando parado tanto no início, quanto no final da tarefa, soltando a manopla. Três tentativas de familiarização foram fornecidas ao participante com cada mão. Nestas tentativas, os alvos estavam posicionados fora do local da aquisição de dados, e os participantes recebiam feedback visual sobre a precisão do apontamento no final de cada tentativa. O movimento do tronco foi restrito pelo encosto da cadeira e a borda da mesa. Após cada tentativa, o participante retornava com a manopla até a posição inicial, encostando a base em dois aparatos fixos na estrutura, para fins de padronização. Os comandos “alvo x, valendo” e “voltou” foram utilizados para iniciar o movimento e retornar à posição inicial, respectivamente. “x” representava os alvos a serem apontados (ipsi ou contralateral / 1 ou 2, para crianças).

Figura 1. Tarefa experimental de apontamento manual, vista diagonal (A) e

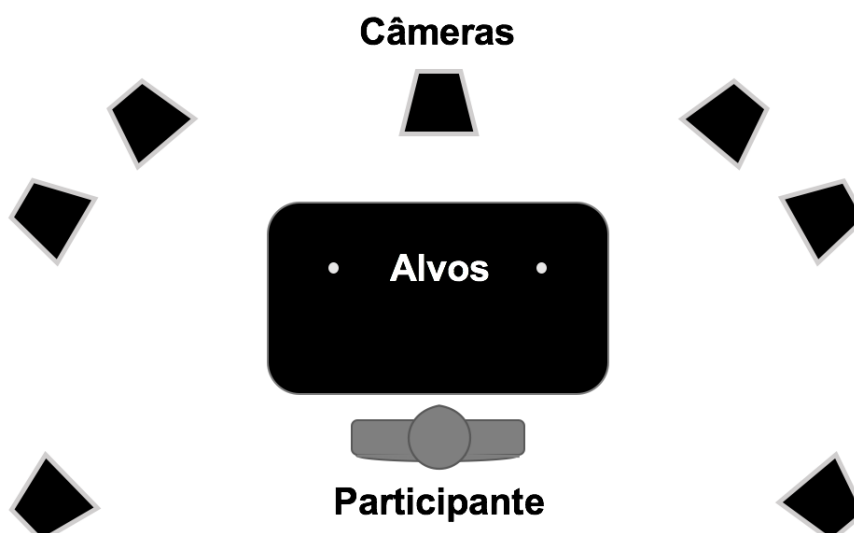


frontal (B).

2.4.3 Análise de movimento

Para análise das variáveis descritas a baixo, um marcador reflexivo afixado na manopla e outros dois como alvos foram utilizados (Figura 1). O rastreamento do marcador da manopla no espaço durante a tarefa de apontamento foi utilizado para calcular as variáveis. As análises cinemáticas foram realizadas por 7 câmeras optoeletrônicas (*Vicon Motion System, Oxford, UK*) e um amplificador analógico-digital *MX Giganet* do sistema *Vicon* e o software *Vicon Nexus (v.1.8.5)*, com frequência de aquisição de 100hz. O erro médio das câmeras ao longo da aquisição dos dados foi de 0.161 centímetros. A figura 2 mostra o layout experimental para estas análises.

Figura 2. Layout experimental de posicionamento das câmeras



2.4.4 Variáveis

As variáveis independentes do estudo foram: grupo etário (4-5; 6-8; 9-11; 18-25 e 35-55 anos de idade), mão utilizada (preferida x não preferida) e alvo (ipsi ou contralateral). As variáveis dependentes analisadas derivadas do deslocamento linear da manopla foram: a) erro absoluto da posição final, normalizado: módulo da diferença entre o posicionamento espacial do alvo e a manopla no final do movimento, normalizado pelo tamanho da trajetória; b) desvio da linearidade da trajetória: divisão entre o eixo menor (maior distância perpendicular entre um ponto do eixo maior e uma linha reta virtual traçada do ponto inicial do movimento até o alvo) e maior (maior distância entre dois pontos quaisquer da trajetória); c) erro da direção inicial: desvio, em graus, da trajetória da mão em relação à reta virtual entre ponto inicial e o alvo no instante de velocidade máxima; d) instante percentual do pico de velocidade: momento em que ocorreu o pico de velocidade, normalizado pelo tempo de movimento, e) número de submovimentos: número de vezes em que a curva da aceleração completa um ciclo senoidal; e f) duração % da fase pré-programada: duração do primeiro submovimento, relativo ao tempo total de movimento.

O comportamento do torque e da ativação muscular durante esta tarefa não foi analisado por já ter sido extensivamente descrito por estudos anteriores (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000). As principais variáveis deste estudo (desvio da linearidade, erro da direção inicial e erro da posição final) foram calculadas de acordo com os procedimentos utilizados pelos estudos de Sainburg e colaboradores (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000), com o intuito de comparar nossos resultados de forma mais fiel aos encontrados por estes pesquisadores.

2.4.5 Processamento de sinais e análise estatística

Após aquisição dos dados, um filtro *Butterworth* recursivo de quarta-ordem foi utilizado, com frequência de corte em 5Hz, determinada após análise residual,

conforme Winter (2009). Após filtrada a posição do marcador no espaço, este dado foi utilizado para derivar a velocidade e a aceleração do movimento. O início da tentativa foi estipulado quando a velocidade do marcador da manopla fosse maior do que 2.5mm/s, enquanto o término foi considerado quando a velocidade do marcador fosse menor que este valor. A extração das variáveis dos conjuntos de dados se deu por uma rotina personalizada no *software MatLab (Mathworks, v.2017a, USA)*.

Como o objetivo deste estudo foi verificar assimetrias entre as mãos e seu comportamento nos diferentes grupos etários, comparações entre os alvos ipsi e contralaterais não foram conduzidas, pois refletem apenas restrições da tarefa. Assim, apenas comparações entre os grupos, mãos e interação grupo*mão foram realizadas.

Os dados foram descritos em média e erro padrão. Modelos de Equações de Estimativa Generalizada (GEE) com *link function* apropriada (*identity* ou *log*) e distribuição (linear, *gamma* ou *tweedie*) assumida (BALLINGER, 2004) foram utilizados para comparar as variáveis dependentes entre as mãos, grupos e interação (mão*grupo). O modelo de distribuição foi selecionado (*best overall fit*) com base no menor valor de *Quasi likelihood under independence model criteria* (QIC) (CUI, 2007). Foi utilizada matriz de estrutura AR1 e, quando necessário, o *post-hoc* sequencial de *Sidak* para comparações posteriores.

O tamanho do efeito (d de Cohen) foi estimado para um delineamento de medidas repetidas para todas as variáveis de cada grupo (mão direita vs esquerda), considerando a correlação entre as duas medidas (MORRIS; DESHON, 2002) e interpretado como: $d < 0,20$ sem efeito, $d = 0,2-0,49$ efeito pequeno, $d = 0,5-0,79$ efeito moderado, $d > 0,8$ efeito grande (COHEN, 1988). A significância foi estipulada em 5% para todas análises e os dados foram processados no *SPSS (v.24, IBM Statistics)*.

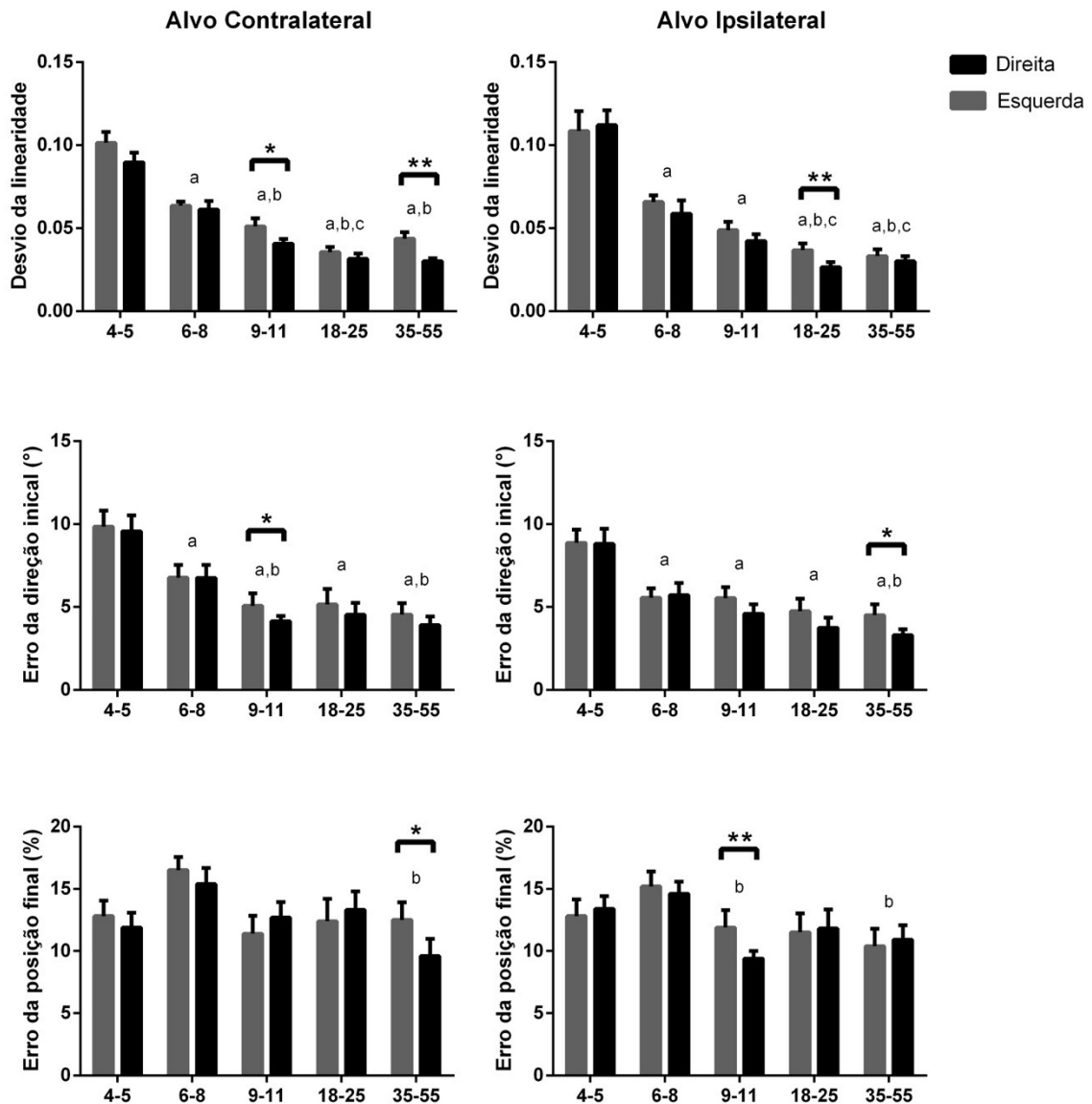
2.5 Resultados

Considerando o alvo ipsilateral, algumas diferenças foram verificadas entre os grupos e as mãos. A linearidade da trajetória apresentou efeito significativo do grupo ($W_t = 99,3$; $df = 4$; $P < 0,001$), porém sem diferença entre as mãos e interação

grupo*mão. Análises posteriores indicaram uma redução do desvio da linearidade conforme a idade do grupo aumentava, descritas na Figura 3. O grupo de 18-25 anos apresentou tamanho do efeito grande na comparação entre as mãos ($d = 0,81$), sugerindo forte assimetria favorecendo a mão direita. Para o erro da direção inicial, verificou-se efeito do grupo ($W_t = 53,6$; $df = 4$; $P < 0,001$) e da mão ($W_t = 4,15$; $df = 1$; $P = 0,042$). Comparações posteriores indicaram redução do erro com avançar da idade (Figura 3), assim como menores erros da mão direita, independente do grupo ($P = 0,043$). O grupo de 35-55 anos apresentou tamanho do efeito moderado na comparação entre as mãos ($d = 0,66$), com assimetria também favorecendo a mão direita. O erro da posição final, normalizado pelo tamanho da trajetória, também apresentou efeito do grupo ($W_t = 16,4$; $df = 4$; $P < 0,01$), sem diferença entre as mãos e interação grupo*mão. *Post-hoc* indicou que o grupo de 6-8 anos apresentou erros significativamente maiores que os grupos de 9-11 ($P < 0,01$) e 35-55 anos ($P = 0,03$). O grupo de 9-11 anos apresentou tamanho do efeito grande na assimetria entre as mãos nesta variável, favorecendo a mão direita ($d = 1,17$).

Para o alvo contralateral, a linearidade da trajetória apresentou efeito significativo do grupo ($W_t = 159,9$; $df = 4$; $P < 0,001$) e da mão ($W_t = 13,6$; $df = 1$; $P < 0,001$), porém sem efeito na interação grupo*mão. *Post-hoc* sequencial de *Sidak* indicou redução do desvio da linearidade com o avançar da idade (Figura 3), e superioridade da mão direita nesta variável, independente do grupo ($P < 0,001$). Nos grupos de 9-11 e 35-55 anos, assimetrias favorecendo a mão direita (mais linear) foram verificadas por um tamanho do efeito moderado ($d = 0,66$) e grande ($d = 1,48$), respectivamente. Para o erro da direção inicial, verificou-se apenas efeito do grupo ($W_t = 52,9$; $df = 4$; $P < 0,001$). Comparações posteriores indicaram redução do erro com avançar da idade (Figura 3), e o grupo de 9-11 anos apresentou tamanho do efeito moderado ($d = 0,66$) na assimetria entre as mãos, favorecendo a direita. O erro da posição final também apresentou apenas efeito do grupo ($W_t = 15,6$; $df = 4$; $P < 0,01$). *Post-hoc* indicou que o grupo de 6-8 anos apresentou erros significativamente maiores que o grupo de 35-55 anos ($P < 0,01$). Nesta variável, assimetria entre as mãos com tamanho do efeito moderado foi verificada para o grupo mais velho ($d = 0,65$), também favorecendo a mão direita.

Figura 3. Comparação entre os grupos e as mãos, em ambos alvos, para



variáveis do modelo da dominância dinâmica.

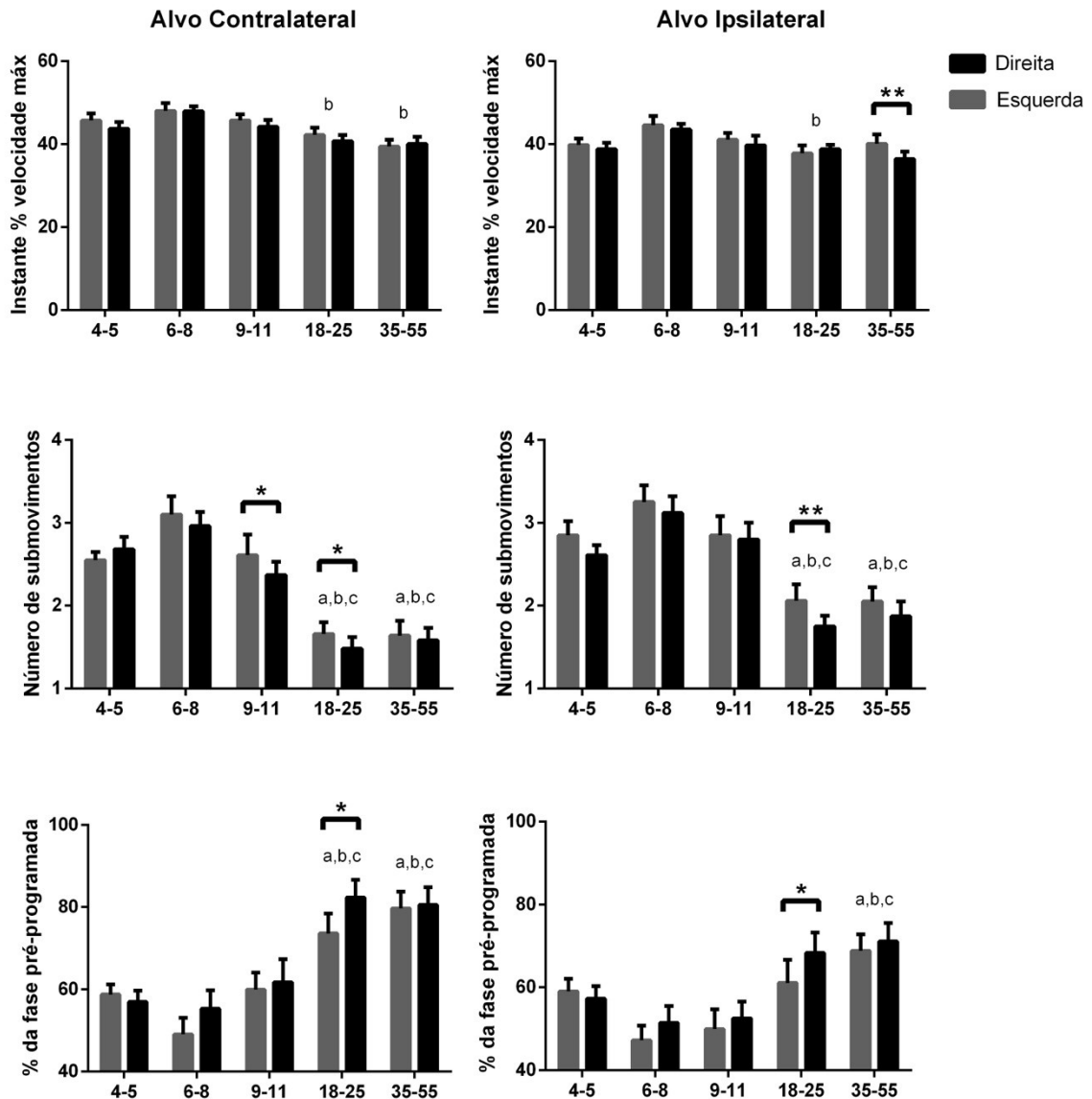
Legenda: diferença ($P < 0,05$) quando comparado a: ^a4-5 anos, ^b6-8 anos e ^c9-11 anos. Classificação do tamanho do efeito: *moderado ($d = 0,5$ a $0,79$) e **grande ($d > 0,8$).

Considerando as outras variáveis de controle, os resultados foram muito próximos. Para o alvo ipsilateral, o instante percentual da velocidade máxima apresentou apenas efeito do grupo ($W_t = 11,9$; $df = 4$; $P = 0,018$). *Post-hoc* sequencial de *Sidak* indicou que o grupo de 6-8 anos chegava ao pico de velocidade depois (44% do movimento) que o grupo de 18-25 anos (38% do movimento; $P = 0,028$). Foi verificado tamanho do efeito grande para comparação entre as mãos no

grupo de 35-55 anos, favorecendo a mão direita, que atingia o pico antes que a esquerda (36 vs 46%; $d = 0,82$). O número de submovimentos, diferentemente, apresentou efeito tanto do grupo ($W_t = 41,2$; $df = 4$; $P < 0,001$) quanto da mão ($W_t = 8,26$; $df = 1$; $P < 0,01$). Análises de *post-hoc* também indicaram redução do número de submovimentos nos grupos de maiores idades (Figura 4), assim como superioridade da mão direita (menos submovimentos) quando comparada à mão esquerda, independente do grupo ($P < 0,01$). Nesta variável, o grupo de 18-25 anos apresentou tamanho do efeito grande na comparação entre as mãos, favorecendo a direita ($d = 1,01$). O tamanho % da fase pré-programada apresentou apenas efeito do grupo ($W_t = 24,1$; $df = 4$; $P < 0,001$). Comparações posteriores verificaram aumento progressivo do tamanho % da fase pré-programada com o avançar da idade, indicado na Figura 4. O grupo de 18-25 anos apresentou assimetria entre as mãos, com tamanho do efeito moderado ($d = 0,58$), de forma que a mão direita passa mais tempo na fase pré-programada.

Nestas mesmas variáveis, para o alvo contralateral, os resultados também são muito parecidos. O instante percentual da velocidade máximo apresentou efeito do grupo ($W_t = 19,0$; $df = 4$; $P < 0,001$), com o grupo de 6-8 anos chegando ao pico de velocidade significativamente depois (48% do movimento) que os grupos de 18-25 (41%; $P = 0,013$) e 35-55 (39%; $P < 0,001$) anos. Para o número de submovimentos, foi verificado efeito do grupo ($W_t = 59,3$; $df = 4$; $P < 0,001$) e da mão ($W_t = 4,32$; $df = 1$; $P < 0,04$). *Post-hoc* sequencial de *Sidak* indicou redução do número de submovimentos nos grupos de maiores idades (Figura 4), e na mão direita ($P = 0,04$), independente do grupo. Para esta variável, foi verificado efeito moderado na comparação entre as mãos para os grupos de 9-11 ($d = 0,73$) e 18-25 ($d = 0,51$) anos, ambos favorecendo a mão direita, que realizou menos submovimentos. Semelhantemente, o tamanho percentual da fase pré-programada apresentou efeito do grupo ($W_t = 49,9$; $df = 4$; $P < 0,001$) e da mão ($W_t = 4,04$; $df = 1$; $P = 0,04$). Comparações posteriores indicaram aumento da fase pré-programada com o avançar da idade (Figura 4) e superioridade da mão direita (66 vs 63%; $P = 0,045$), independente do grupo. O grupo de 18-25 anos apresentou tamanho do efeito moderado na comparação entre as mãos ($d = 0,63$), com a mão direita passando mais tempo da fase pré-programada que a esquerda (82 vs 73%).

Figura 4. Comparação entre os grupos e as mãos, em ambos alvos, para variáveis de controle motor.



Legenda: diferença ($P < 0,05$) quando comparado a: ^a4-5 anos, ^b6-8 anos e ^c9-11 anos. Classificação do tamanho do efeito: *moderado ($d = 0,5$ a $0,79$) e **grande ($d > 0,8$).

2.6 Discussão

O principal objetivo deste estudo foi comparar assimetrias de desempenho entre as mãos em diferentes faixas etárias na tarefa de apontamento. Os resultados indicaram diferença entre os grupos em todas as variáveis analisadas, de forma que os grupos com mais idade (18-25 e 35-55 anos) apresentaram um controle dinâmico

mais eficiente. As assimetrias entre as mãos, porém, foram apenas verificadas em algumas variáveis, também para os grupos mais velhos. Desta forma, H_1 foi refutada, pois não verificamos maiores assimetrias nas crianças. Menor desvio da linearidade com a mão direita foi confirmado, aceitando H_2 . As outras variáveis que refletem o controle dinâmico e preditivo também tiveram melhores indicadores na mão direita, confirmando H_3 . E, apesar de termos verificado simetria da capacidade de posicionamento final entre as mãos na maioria dos grupos, dois deles apresentaram assimetria favorecendo a mão direita, refutando H_4 . De maneira geral, estes resultados estão de acordo com o modelo da dominância dinâmica, assim como análises de desenvolvimento motor relacionadas às assimetrias interlaterais.

Os valores de desvio da linearidade e erro da direção inicial encontrados no grupo de 18-25 são semelhantes aos verificados pelas pesquisas de Sainburg e colaboradores, que fizeram análises com esta mesma faixa etária (SAINBURG, 2005, 2014). Assim, nosso estudo está de acordo os resultados prévios propostos pelo modelo da dominância dinâmica. Uma vez que tais análises ainda não haviam sido conduzidas com crianças, nossos resultados avançam no sentido de agregar ao modelo um caráter desenvolvimentista nestas assimetrias neurais de controle. Quando analisados os grupos mais novos (4-5 e 6-8 anos), o tamanho do efeito para as comparações entre mão direita e mão esquerda apresentaram apenas resultados pequenos ($d < 0,30$) para todas as variáveis. Por outro lado, efeitos grandes foram verificados para os grupos mais velhos (18-25 e 35-55 anos) nas principais variáveis do modelo. Este é um forte indicativo de que as assimetrias verificadas nos grupos de mais idade são decorrentes do uso desigual das mãos ao longo dos anos. Assim, nossos resultados sugerem que as assimetrias nos controles dinâmicos e de impedância emergem secundariamente devido às experiências desiguais dos hemisférios.

Com base nestes resultados, podemos sugerir que o controle dinâmico é aprendido devido ao uso diferencial das mãos, uma vez que a diferença de desempenho favorece os grupos mais velhos para as variáveis que refletem esta especificidade de controle (Figura 3 e 4). Este resultado está de acordo com pesquisas que verificaram a dependência do aprendizado para o desenvolvimento da coordenação das forças musculares com as intersegmentais e ambientais (LACKNER; DIZIO, 1994; SHADMEHR; MUSSA-IVALDI, 1994), um ponto já

discutido por Sainburg (SAINBURG, 2002). Possivelmente, o córtex motor passa por reorganizações devido ao uso distinto das mãos, desenvolvendo a especificidade de controle em cada hemisfério ao longo dos anos. Evidências de que a prática unilateral altera ativação de áreas motoras do córtex (GRABOWSKA et al., 2012; KLOPPEL et al., 2007, 2010), e de que assimetrias corticais anatômicas se correlacionam com a idade (GUADALUPE et al., 2017), concordam e dão base para esta explicação.

O controle de impedância, mensurado pelo erro da posição final, apresentou resultado semelhante na maior parte dos grupos, concordando com resultados prévios de Sainburg em adultos (SAINBURG, 2002, 2005). Logo, a assimetria de especificidade do controle em cada hemisfério parece ser desenvolvida a partir do controle dinâmico, que se acentua no hemisfério cerebral esquerdo com o passar dos anos. Esta ausência de assimetria nas crianças concorda com alguns estudos anteriores que empregaram protocolos experimentais parecidos. Souza e colaboradores (2012) não verificaram assimetria entre as mãos na linearidade do alcance em crianças de 5 meses. Com crianças de até 12 meses, Rönnqvist e Domellöf (2006) também não verificaram assimetria na linearidade em uma tarefa de alcance e preensão, de forma que seus resultados não os permitiram entender se as assimetrias de controle são parte da causa ou da consequência do uso desigual das mãos, pois crianças maiores de 1 ano não foram analisadas.

É preciso destacar que a linearidade da trajetória da mão nas tarefas de alcance é uma variável importante no modelo da dominância dinâmica, necessariamente refletindo a capacidade coordenativa do sistema neuromuscular, e as possíveis assimetrias neurais de controle (SAINBURG, 2002; SAINBURG; KALAKANIS, 2000). É provável, então, que até determinada idade, ainda não haja experiência suficiente para que as especificidades de controle tenham sido desenvolvidas assimetricamente em cada hemisfério. Nesta direção, nossos resultados mostram que assimetrias em algumas variáveis já são verificadas entre as mãos no grupo de 9-11 anos de idade, o que concorda com o caráter desenvolvimentista da preferência manual. Evidências apontam que a preferência se consolida apenas após os 5-8 anos de idade (BELMONT; BIRCH, 1963; GABBARD, 1993; GAILLARD; SATZ, 1989; MCMANUS et al., 1988; SCHAROUN; BRYDEN, 2014), que é justamente a idade em que as assimetrias neurais de controle foram

inicialmente verificadas. Ou seja, esta idade é suficiente para que experiências lateralizadas sejam vivenciadas suficientemente para desenvolver e consolidar as assimetrias de controle, as quais se correlacionam com a preferência manual (COELHO et al., 2013; PRZYBYLA; GOOD; SAINBURG, 2012).

Outras variáveis analisadas nesta pesquisa adicionam ao modelo da dominância dinâmica ao enfatizar a especificidade de controle preditivo do movimento na mão direita. O instante percentual para alcançar a velocidade máxima, a duração % da fase pré-programada e o número de submovimentos refletem a capacidade preditiva do hemisfério em controlar o movimento (THOMAS; YAN; STELMACH, 2000; YAN et al., 2000). Nos adultos, estas variáveis apresentam melhor desempenho na mão direita, reforçando seu caráter dinâmico e preditivo de controle, de acordo com os resultados de Sainburg (2005, 2014). Contudo, estas análises também não demonstram assimetrias nos grupos mais novos, sugerindo novamente o aspecto desenvolvimentista atrelado às assimetrias nos mecanismos de controle.

A maturação do sistema nervoso central (CNS) auxilia o entendimento destes resultados. O cérebro atinge 90% do seu tamanho até os 6 anos de idade (KENNEDY et al., 2002; LENROOT; GIEDD, 2006), mas pesquisas indicam que seu desenvolvimento completo ocorre até o final da adolescência (GRAAF-PETERS; HADDERS-ALGRA, 2006). Estas mudanças estruturais acompanham mudanças funcionais e na organização cerebral, especializando áreas específicas para diferentes processos (STILES; JERNIGAN, 2010). Pesquisas sobre o desenvolvimento do CNS sugerem que este é um fenômeno dinâmico, no qual interações entre as expressões genéticas e experiências individuais ao longo dos anos tem influência na formação e organização funcional do sistema nervoso (GRAAF-PETERS; HADDERS-ALGRA, 2006; STILES; JERNIGAN, 2010). Assim, podemos sugerir que as assimetrias neurais de controle verificadas em nossa pesquisa são dependentes da inter-relação entre uso diferencial das mãos e do desenvolvimento deste sistema, pois são mais evidentes no início da vida adulta (18-25 anos), idade em que a maturação do CNS está finalizada.

Nesta mesma direção, um ponto importante que precisamos considerar é o fato de que a preferência manual se torna mais assimétrica com o avançar da idade (MARCORI et al., 2018; TEIXEIRA, 2008). Logo, seria de se esperar um aumento

proporcional na assimetria de desempenho, principalmente entre os dois grupos de adultos (18-25 e 35-55 anos). Contudo, isto não foi verificado em nossa pesquisa, pois a magnitude das assimetrias de desempenho é semelhante entre estes grupos, e o grupo de 9-11 anos também apresentou assimetrias em algumas variáveis. A principal explicação para este fenômeno é a transferência de informação entre os hemisférios cerebrais via corpo caloso, que permite aprendizado com o lado não preferido mesmo sem a prática (BONZANO et al., 2011; RUDDY; CARSON, 2013). Assim, este parece ser um mecanismo de compensação para evitar aumento das assimetrias entre as mãos, e nossos resultados estão de acordo com tal proposta. Outro fator que pode explicar nossos resultados é a característica da tarefa. Por ser uma tarefa de apontamento, com baixa complexidade, ambos os hemisférios são capazes de desempenhar bem. Tarefas mais especializadas, devido ao uso e experiência, provavelmente apresentariam de maneira mais evidente assimetrias de desempenho ao longo dos anos.

Nosso estudo experimental foi elaborado para testar o modelo da dominância dinâmica, em que foram empregados cálculos semelhantes às principais variáveis utilizadas no modelo original (Figura 3). O protocolo experimental utilizado também foi muito semelhante (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003; SAINBURG, 2005; SAINBURG; KALAKANIS, 2000), com exceção do uso de *Air Sleds* para redução do atrito durante o movimento. De fato, os resultados do grupo de 18-25 anos é o que mais se assemelha com os encontrados nos estudos anteriores por ter sido a mesma faixa etária analisada por Sainburg e colaboradores. Inclusive, magnitudes semelhantes das variáveis de linearidade, erro da direção inicial e erro de posicionamento final também foram encontradas. Logo, nosso experimento concorda com a direção das assimetrias propostas pelo modelo da dominância dinâmica, porém adiciona informações iniciais a respeito do desenvolvimento destas assimetrias ao longo dos anos.

2.7 Conclusão

O modelo da dominância dinâmica é robusto, e encontramos resultados muito semelhantes aos descritos por Sainburg (2005, 2014). Contudo, nossos resultados sugerem que tais assimetrias são uma consequência do uso desigual das mãos, e

não o contrário. Nosso estudo adiciona uma abordagem desenvolvimentista ao modelo, sugerindo que as assimetrias neurais de controle relacionadas às especificidades de cada hemisfério se desenvolvem ao longo dos anos, sendo verificadas de maneira mais expressiva a partir dos 9-11 anos de idade e consolidadas após os 18-25 anos.

CAPÍTULO III

3. Estudo Experimental II: “Assimetrias de controle em tarefas de apontamento podal”

3.1 Resumo

Introdução: As diferenças entre os componentes de impedância e dinâmicos, apesar de aparentarem ser marcantes para membros inferiores (MMII), ainda não foram testadas. Analisar estas especificidades de forma isolada entre os MMII é uma abordagem importante, porém o uso integrado dos membros também pode revelar assimetrias significativas, e foi pouco descrito na literatura até o momento. Logo, este experimento está subdividido em duas partes **Objetivo:** O experimento 2.1 objetivou comparar os mecanismos de controle entre os hemisférios de forma isolada, enquanto o experimento 2.2 fez esta análise de maneira integrada/coordenada. **Métodos:** Vinte adultos jovens (18-25 anos) foram selecionados para os dois experimentos. No experimento 2.1, foi realizada a tarefa de apontamento com apoio para as mãos e uma tarefa de equilíbrio quase estático unipodal. Assim, os componentes dinâmicos e de impedância foram avaliados para cada hemisfério isoladamente. No experimento 2.2, foi realizada a tarefa de apontamento sem apoio, exigindo controle dinâmico do membro que aponta e de impedância do membro estabilizador. O rastreamento de um marcador posicionado no pé foi utilizado para análise de variáveis que refletem o controle dinâmico, enquanto o comportamento do centro de pressão (COP) foi utilizado para avaliar o controle de impedância, em ambos experimentos. **Resultados:** Não foram verificadas assimetrias de desempenho no experimento 2.1, em nenhuma variável analisada. Ou seja, os MMII foram simétricos nas duas tarefas. Contudo, para o experimento 2.2, o deslocamento total do COP foi significativamente menor quando o MMII esquerdo estava no solo, e o direito apresentou melhor desempenho nas variáveis dinâmicas durante o apontamento. **Discussão:** Uma vez que este uso coordenado dos MMII é o mais comum na vida diária, foi proposto um caráter desenvolvimentista atrelado às assimetrias neurais. Ainda, o modelo da dominância dinâmica foi verificado para MMII apenas na tarefa integrada, mostrando especificidades complementares em cada hemisfério.

Palavras-chave: Lateralidade; Preferência podal; Especificidade hemisférica; Assimetria interlateral; Controle motor.

3.2 Abstract

Control asymmetries in the lower limbs during a pointing task.

Introduction: Even though differences in impedance and dynamic control mechanisms seems to be evident in the lower limbs, they were not yet tested. Analyzing them in an isolated fashion is a crucial approach. However, the coordinated usage of the legs can also reveal significant asymmetries, and has not been described so far. Hence, this experiment is subdivided in two parts. **Aim:** Experiment 2.1 compared the control specificity of each hemisphere separately, while the experiment 2.2 did this analysis in a bipedal, coordinated movement. **Methods:** Twenty young adults (18-25 years old) were selected for both experiments. In experiment 2.1, an aiming task with support for the hands, and a unipedal quiet balance task were performed. Hence, the dynamic and impedance control were analyzed separately. In experiment 2.2, the pointing task was performed without support, simultaneously requiring dynamic control of the moving leg, and impedance control of the stabilizing one. A reflective marker was positioned on the foot and tracked in space for cinematic analysis of the dynamic variables during pointing. The center of pressure (COP) behavior was analyzed to assess impedance control in both experiments. **Results:** Asymmetries of performance between lower limbs were not verified in any variables in experiment 2.1. However, for experiment 2.2, total COP displacement was significantly smaller when the left limb was stabilizing the movement, while the right limb performed better during pointing. **Discussion:** Considering the coordinated usage of the legs is the most common during everyday life activities, it was suggested a developmental aspect to the asymmetries related to neural control. Furthermore, the dynamic dominance model was only consistent for the lower limbs during the coordinated task, showing complementary hemisphere specificities of control.

Key-words: Functional laterality; Footedness; Hemisphere specificity; Interlateral asymmetries; Motor control.

3.3 Introdução

Assimetrias podais são pouco descritas na literatura quando comparamos a quantidade de evidência a respeito de assimetrias manuais. Uma preferência lateral menos marcante para esta dimensão (GABBARD, 1993; MARCORI et al., 2018) pode ser um possível motivo para o menor número de investigações neste contexto. Contudo, análise de assimetrias entre os membros inferiores (MMII) é uma fonte importante de informação, pois é um indicador robusto das assimetrias funcionais cerebrais, uma vez que o uso diferencial dos pés é menos decorrente de pressões sociais, e mais relacionado a assimetrias comportamentais ou neurais de controle (GABBARD, 1993; KALAYCIOĞLU et al., 2008). Dentro deste panorama, o modelo de dominância dinâmica fornece um pano de fundo teórico para investigar e interpretar tais assimetrias interlaterais.

Este modelo atribui as diferenças no controle do movimento entre os lados a especificidades neurais relacionadas a cada hemisfério cerebral (COELHO et al., 2013; SAINBURG, 2002, 2014, YADAV; SAINBURG, 2011, 2014). A principal análise para identificação destas assimetrias de desempenho em membros superiores foi a partir de tarefas de apontamento, mensurando o desempenho dos membros superiores isoladamente (SAINBURG, 2002, 2005, 2014). Porém, este protocolo ainda não foi replicado em tarefas podais. A tarefa de apontamento também pode ser utilizada para MMII especificamente com o intuito de avaliar o componente dinâmico de controle. Linearidade da trajetória e erro da direção inicial, por exemplo, são variáveis importantes que refletem a capacidade coordenativa do sistema de aproveitar o torque intersegmentar e articular de forma eficiente (SAINBURG, 2002). Assim, avalia-las para os membros inferiores é uma forma de entender se há especialização hemisférica a respeito do controle dinâmico/preditivo. Por outro lado, para avaliar a especificidade do controle de impedância, é possível utilizar tarefas que demandem equilíbrio.

Nesta direção, uma pesquisa com hemiparéticos demonstrou que aqueles com lesão no hemisfério cerebral direito apresentaram piores desempenhos em tarefas estabilizadoras de postura e respostas a perturbações (FERNANDES et al., 2017). Este resultado demonstra déficit do controle de impedância justamente devido à lesão no hemisfério em que há sua especialização, concordando com o modelo da dominância dinâmica. Em adultos saudáveis, porém, há divergência na literatura a

respeito das assimetrias entre os MMII durante postura quieta unipodal (KIYOTA; FUJIWARA, 2014; VIEIRA; COELHO; TEIXEIRA, 2014). Seria esperado um desempenho superior no membro inferior esquerdo, não preferido, devido à especificidade de controle de impedância. Porém, para a postura dinâmica/perturbada a maioria dos estudos aponta para um desempenho simétrico entre os lados (KIYOTA; FUJIWARA, 2014; TEIXEIRA et al., 2011; VIEIRA; COELHO; TEIXEIRA, 2014).

Apesar de testar os dois mecanismos de controle de forma isolada ser uma forma eficiente de verificar as assimetrias existentes entre os membros (SAINBURG, 2002, 2005, 2014), na vida diária, a vasta maioria das tarefas que realizamos exige o uso simultâneo dos membros. Para os MMII, chutar uma bola, escrever na areia com os pés, trazer um objeto para perto são exemplos de tarefas que exigem tais componentes de forma coordenada. Nestes movimentos bipodais, o membro inferior que fica no solo estabiliza os movimentos do lado contralateral, caracterizando o controle de impedância simultaneamente ao controle dinâmico do membro que se movimenta. Assim, considerando que as tarefas do dia a dia exigem o uso coordenado de ambos os mecanismos de controle simultaneamente, é possível que as assimetrias sejam mais evidentes em condições que estes mecanismos sejam testados ao mesmo tempo. De fato, avanços recentes do modelo da dominância dinâmica encontraram resultados robustos em uma tarefa computadorizada, equivalente à de cortar um pão, a qual exige movimentos mecanicamente acoplados e coordenados entre os membros para o sucesso da tarefa (WOYTOWICZ et al., 2018). Esta abordagem é especialmente relevante no sentido de entender se há uma dominância global (lado preferido é superior em todas as tarefas) ou complementar (cada lado é especializado em aspectos específicos de controle e demanda motora) na dimensão podal da lateralidade, fator já investigado para dimensão manual (WOYTOWICZ et al., 2018; YOKOI; HIRASHIMA; NOZAKI, 2014). Contudo, tal abordagem também não foi utilizada para analisar assimetrias de MMII.

A partir destas ideias, este segundo experimento da presente dissertação foi subdividido em duas partes: experimento 2.1, em que foi realizada uma tarefa de apontamento podal e outra tarefa de equilíbrio unipodal quase estático, com o intuito de investigar assimetrias interlaterais de maneira isolada entre os MMII; e experimento 2.2, em que foi realizada uma a tarefa de apontamento podal em

equilíbrio unipodal juntamente, com o intuito de investigar estas assimetrias de maneira integrada. A tarefa de apontamento podal permite fazer análises muito semelhantes às empregadas pelos estudos iniciais de Sainburg, com medidas que refletem o controle dinâmico do movimento (linearidade, erro da direção inicial, etc) (SAINBURG, 2002, 2005). A tarefa de equilíbrio unipodal, por sua vez, mensura o controle de impedância em cada hemisfério, sendo que o comportamento do centro de pressão (COP) fornece uma maneira clara de avaliar a capacidade de estabilização dos membros. De maneira complementar, também foi realizada a análise de forma integrada entre as tarefas de apontamento podal e equilíbrio unipodal, por meio da tarefa de apontamento sem apoio (experimento 2.2). Desta forma, o membro inferior que fica ao solo exige do controle especializado de impedância (estabilização) e o segmento que se movimenta exige do controle dinâmico para coordenar a trajetória em direção ao alvo. Estes estudos agregam conhecimento ao modelo da dominância dinâmica ao investigar assimetrias podais nestas tarefas e fornecem subsídio adicional ao entendimento do uso coordenado dos membros inferiores.

Com base no exposto, e considerando que as diferenças de desempenho entre os membros superiores são realmente decorrentes de assimetrias neurais de controle, esperamos que o mesmo comportamento seja verificado nos MMII, dado que estes mecanismos de controle são semelhantes. Assim, foram levantadas as seguintes hipóteses para o experimento 2.1: (H₁) será verificado menor desvio da linearidade com a perna direita, indicando melhor controle dinâmico do hemisfério cerebral esquerdo; (H₂) outras variáveis de controle, como erro da direção inicial, número de submovimentos e duração % da fase pré-programada, também terão indicadores melhores no membro inferior direito (menores erros e quantidades de submovimentos, e maior duração da fase pré-programada); e (H₃) haverá superioridade para o membro inferior esquerdo na tarefa de equilíbrio estático. Para o experimento 2.2, foi levantada a hipótese de que (H₄) haverá assimetrias de controle entre os lados, favorecendo o hemisfério não-preferido na tarefa de estabilização (menores valores de deslocamento total, velocidade e amplitude do COP) e o preferido na tarefa de apontamento (maior linearidade da trajetória, menor desvio da direção inicial, menos submovimentos e maior tempo na fase pré-programada).

3.4 Métodos do experimento 2.1

3.4.1 Participantes

O tamanho amostral foi calculado pelo programa G*Power 3.1 (Franz Faul, Alemanha) para uma comparação pareada (membro inferior direito vs esquerdo), considerando um tamanho de efeito de Cohen moderado ($d = 0,6$) (COHEN, 1988), significância unicaudal $\alpha = 0,05$ e poder $(1-\beta) = 0,8$, conforme as recomendações de Faul et al. (FAUL et al., 2007). Baseado nestes parâmetros, um tamanho mínimo de 19 participantes foi estimado.

Participaram desta pesquisa 20 adultos jovens (18-25 anos), selecionados por conveniência, sendo 10 homens e 10 mulheres. Como critério de inclusão, os participantes deveriam ser neurologicamente intactos, sem doenças/condições osteomioarticulares que impedissem a realização da tarefa e destros. A preferência podal foi mensurada pelo IPLAG de membros inferiores (MARIM; LAFASSE; OKAZAKI, 2011), e apenas participantes classificados como fortemente destros para as tarefas manipulativas do inventário foram inclusos.

Os procedimentos deste estudo foram aprovados pelo comitê de ética e pesquisa com seres humanos da Universidade Estadual de Londrina (CAAE 92987718.4.0000.5231). Todos participantes foram esclarecidos sobre os objetivos e benefícios da pesquisa e assinaram o TCLE antes da pesquisa iniciar.

3.4.2 Tarefa

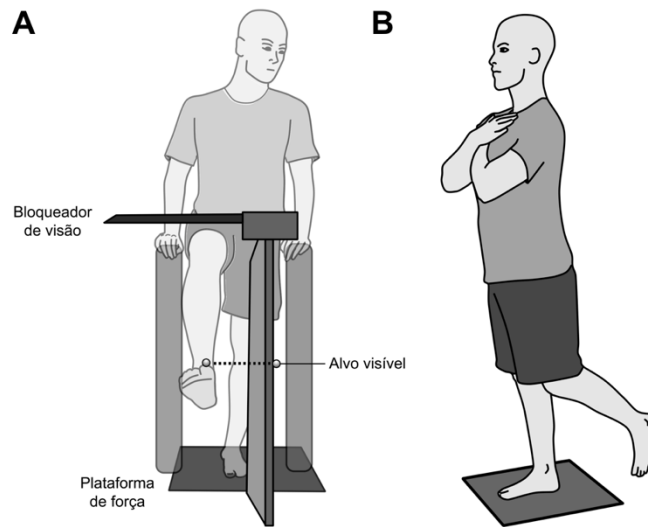
Foram realizadas duas tarefas: uma de apontamento unipodal, com apoio, e outra de equilíbrio quase estático unipodal. Para a tarefa de apontamento, os participantes ficaram em pé, em frente a um aparato de madeira, vertical, posicionado a 10cm de distância dos pés. O objetivo da tarefa era levar o pé em direção a um alvo, sem feedback visual do membro inferior. Para tal manipulação, um aparato preto foi posicionado na altura da crista ilíaca do participante, e estendido por toda extensão possível de movimento, impedindo a visualização do próprio membro inferior, mas permitindo a visualização do alvo (fixado no lado contrário à perna utilizada para o apontamento). Foi posicionado um alvo na altura do joelho, a frente do participante a uma distância de 120% do comprimento da perna (medida do epicôndilo lateral do fêmur até o maléolo lateral da tíbia). O

tamanho médio da distância do joelho do participante até o alvo foi de $M = 48 \pm DP = 3,6\text{cm}$. Esta distância foi selecionada pois exigia flexão de quadril e de joelho para acertar o alvo. Logo, este movimento de apontamento, para ser bem-sucedido, demandava coordenação interarticular, e não apenas um movimento de flexão de quadril com o joelho estendido. O apoio foi fornecido por dois tripés estáveis, com altura regulável, posicionados um de cada lado do participante, em uma altura confortável, próxima à crista ilíaca. Desta forma, era possível apoiar em ambos tripés, reduzindo consideravelmente a demanda de equilíbrio para a tarefa. Cada participante realizou 10 tentativas de apontamento com cada MMII, aleatorizadas entre os participantes para evitar efeito de ordem. Um total de 20 tentativas de apontamento por participante foi analisado.

Os participantes receberam instruções para realizar o apontamento em um movimento único e contínuo, retornando à posição inicial logo após terminar o apontamento. Todo início de tentativa foi padronizado com ambos os pés inteiramente no chão. Seis tentativas de familiarização foram fornecidas ao participante com cada MMII. Nestas tentativas, os alvos estavam posicionados fora do local da aquisição de dados, e os participantes recebiam feedback visual sobre a precisão do apontamento no final de cada tentativa. O comando “valendo” foi utilizado para iniciar o movimento até o alvo estipulado, e a volta à posição inicial era realizada logo em seguida pelo participante.

A tarefa de equilíbrio unipodal quase estático consistiu em manter o equilíbrio durante 45 segundos com apenas um dos pés no solo. Os participantes foram instruídos a flexionar o joelho da perna contralateral de forma que o pé ficasse levemente elevado, o suficiente para que não tocasse no solo. Três tentativas foram realizadas com cada uma das pernas, e um descanso sentado de 1 minuto foi fornecido entre as tentativas, as quais foram aleatorizadas entre as pernas e participantes. Além disso, a ordem de execução das tarefas (apontamento ou equilíbrio) também foi aleatorizada entre os participantes. A Figura 5 apresenta o design experimental de ambas tarefas.

Figura 5. Tarefa experimental de apontamento podal com apoio (A) e equilíbrio unipodal (B).

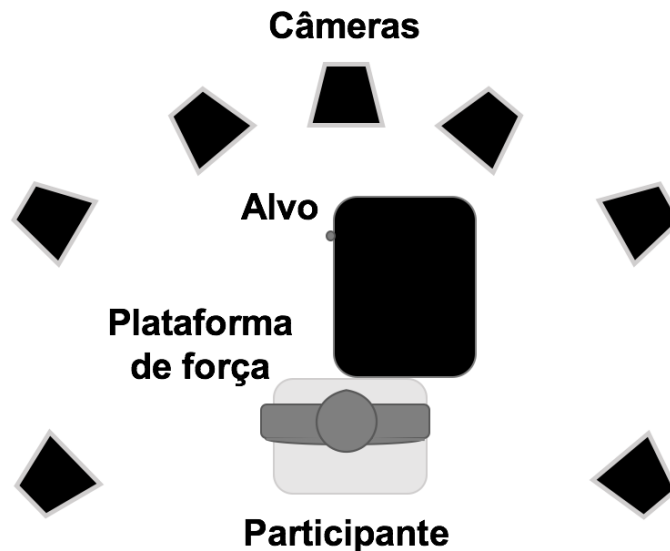


3.4.3 Análise de movimento e equilíbrio

Para análise da tarefa de apontamento, com as variáveis descritas a baixo, um marcador reflexivo foi afixado na base da falange do primeiro metatarso, e outro foi utilizado como alvo, fixados no aparato (Figura 5). O rastreamento do marcador do pé no espaço durante a tarefa de apontamento foi utilizado para calcular as variáveis. Todas as análises cinemáticas foram realizadas por 7 câmeras optoeletrônicas (*Vicon Motion System, Oxford, UK*) com frequência de aquisição de 100hz e um amplificador analógico-digital *MX Giganet* do sistema *Vicon* e o *software Vicon Nexus (v.1.8.5)*. O erro médio das câmeras ao longo da aquisição dos dados foi de 0.224 centímetros. A Figura 6 apresenta o layout experimental para estas análises.

Para análise da tarefa de equilíbrio, os participantes ficaram posicionados em cima de uma plataforma de força AMTI (modelo OR6-7-2000), com dimensões de 464mm (comprimento), 508mm (largura) e 82,5mm (altura). Foi utilizada frequência de aquisição de 100hz e um amplificador analógico-digital *MX Giganet* do sistema *Vicon* e o *software Vicon Nexus (v.1.8.5)*.

Figura 6. Layout experimental de posicionamento das câmeras



3.4.4 Variáveis cinemáticas e cinéticas

As variáveis independentes do estudo foram: membro inferior utilizado (preferido x não preferido). As variáveis dependentes (cinemáticas) analisadas derivadas do deslocamento linear do marcador do pé foram: a) erro absoluto da posição final: módulo da diferença entre o posicionamento espacial do alvo e o marcador do pé no final do movimento; b) desvio da linearidade da trajetória: divisão entre o eixo menor (maior distância perpendicular entre um ponto do eixo maior e uma linha reta virtual traçada do ponto inicial do movimento até o alvo) e maior (maior distância entre dois pontos quaisquer da trajetória); c) erro da direção inicial: desvio, em graus, da trajetória do pé em relação à reta virtual entre ponto inicial e o alvo no instante de velocidade máxima; d) instante percentual do pico de velocidade: momento em que ocorreu o pico de velocidade, normalizado pelo tempo de movimento; e) número de submovimentos: número de vezes em que a curva da aceleração completa um ciclo senoidal; e f) duração % da fase pré-programada: duração do primeiro submovimento, relativo ao tempo total de movimento.

As variáveis dependentes (cinéticas) analisadas derivadas do COP durante a tarefa de equilíbrio foram: a) deslocamento total: somatória de todo o deslocamento realizado pelo COP em centímetros; b) velocidade média: deslocamento total

dividido pelo tempo de percurso do COP em centímetros por segundo; c) amplitude médio-lateral e anteroposterior: diferença do maior e menor valor de deslocamento em centímetros; d) velocidade média médio-lateral e anteroposterior: deslocamento total de uma direção (médio-lateral ou anteroposterior) dividido pelo tempo de percurso do COP em centímetros por segundo. Estas medidas denotam a capacidade do sistema de se manter em equilíbrio, traduzindo o controle de impedância.

As principais variáveis deste estudo (erro da posição final, linearidade de trajetória e erro da direção inicial) foram calculadas de acordo com os estudos de Sainburg e colaboradores (BAGESTEIRO; SAINBURG, 2002, 2003, SAINBURG, 2002, 2005; SAINBURG; KALAKANIS, 2000), com o intuito de comparar nossos resultados de forma mais fiel aos encontrados por estes pesquisadores.

3.4.5 *Processamento de sinais e análise estatística*

Após aquisição dos dados na tarefa de apontamento, um filtro *Butterworth* recursivo de quarta-ordem foi utilizado, com frequência de corte em 5Hz, determinada após análise residual, conforme Winter (2009). Após filtrada a posição do marcador no espaço, este dado foi utilizado para derivar a velocidade e a aceleração do movimento. Para fins de padronização, o início da tentativa foi estipulado quando a velocidade do marcador do pé atingisse um valor maior do que 2.5mm/s, enquanto o término foi considerado quando a velocidade do marcador fosse menor que este valor.

Os dados do centro de pressão passaram por um filtro passa-baixa *Butterworth* de quarta-ordem com frequência de corte em 10Hz, e foram excluídos os primeiros 10 e os últimos 5 segundos da análise, sobrando 30s de tentativa válida. A extração das variáveis dos conjuntos de dados se deu por rotinas personalizadas no *software Excel (Microsoft, v.2017 for Mac, USA)*.

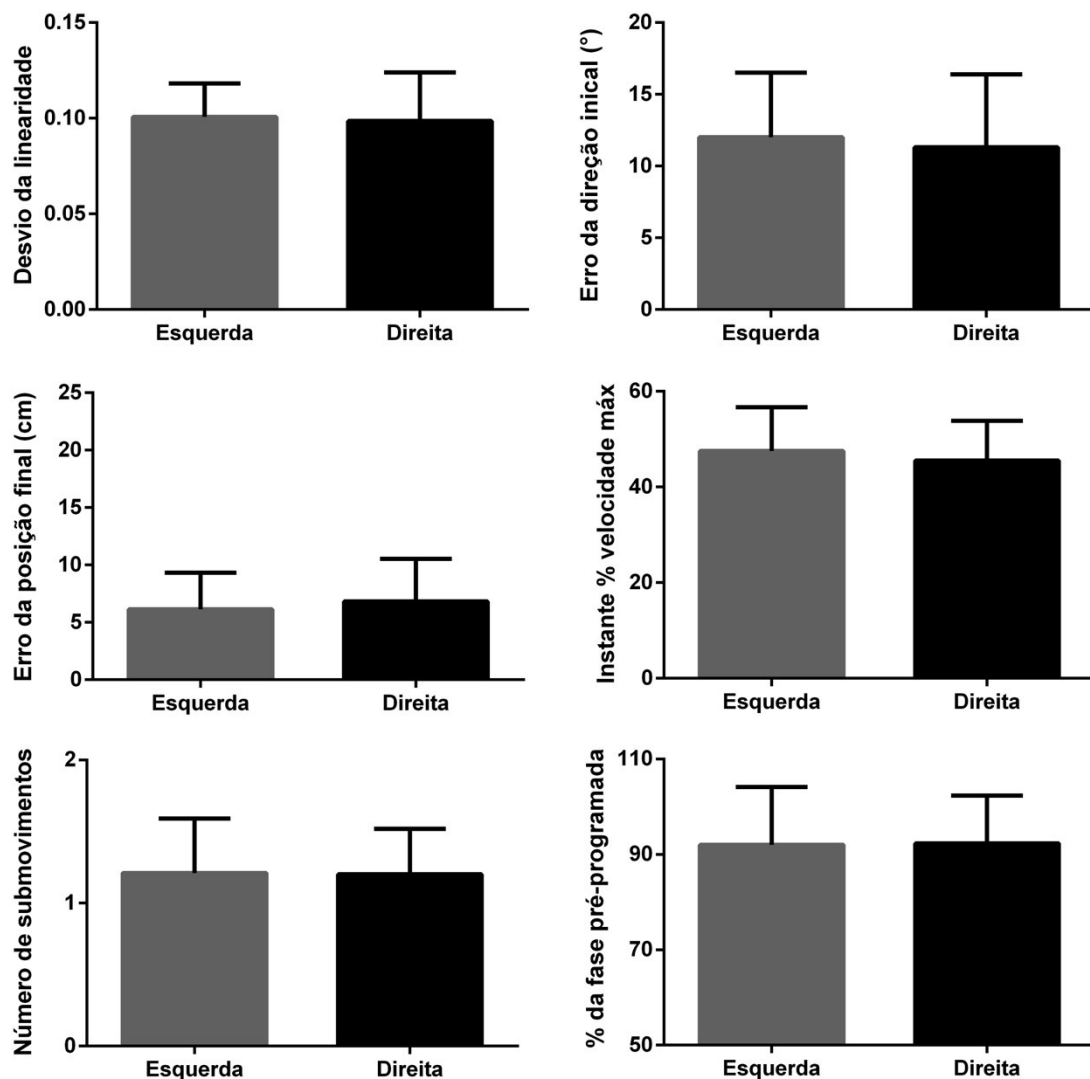
Os dados foram descritos em média e desvio padrão. Como a normalidade dos dados não foi verificada em algumas variáveis pelo teste de *Shapiro-Wilk*, então o teste de *Wilcoxon* foi utilizado para comparações pareadas entre o membro inferior direito e esquerdo. O tamanho do efeito (d de Cohen) foi estimado para teste não paramétrico em um delineamento de medidas repetidas, com base no valor de z e tamanho da amostra (COHEN, 2008), e interpretado como segue: $d < 0,20$ sem

efeito, $d = 0,2-0,49$ efeito pequeno, $d = 0,5-0,79$ efeito intermediário, $d > 0,8$ efeito grande (COHEN, 1988). A significância foi estipulada em 5% para todas análises e os dados foram processados no *SPSS (IBM Statistics, v.24)*.

3.5 Resultados do experimento 2.1

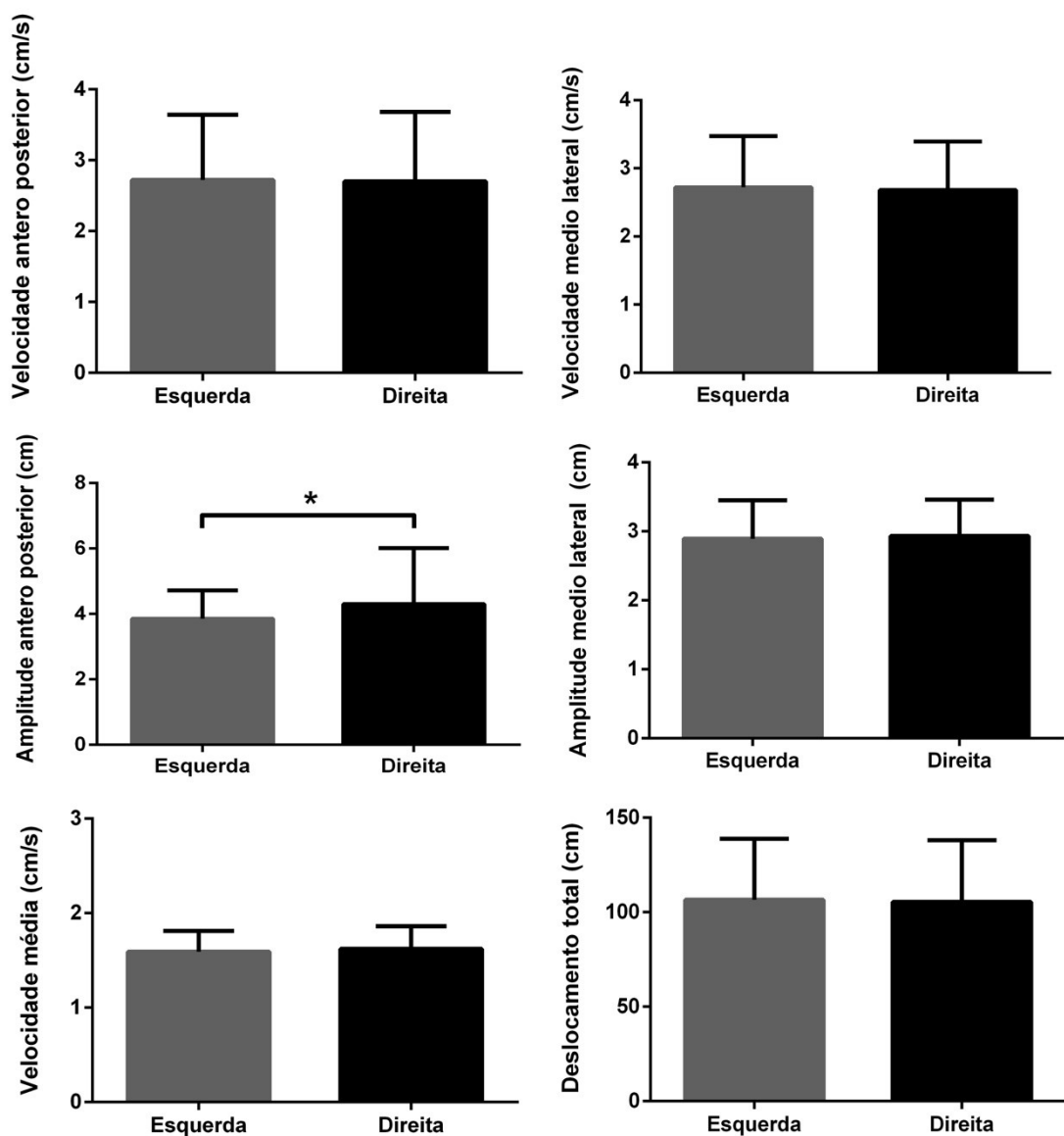
Não foram verificadas assimetrias entre os MMII direito e esquerdo em nenhuma variável na tarefa de apontamento ($P > 0,37$; $Z < 0,89$). Para esta tarefa, a Figura 7 apresenta as médias de cada hemisfério, identificando uma grande simetria entre os lados. Não foram verificados tamanho do efeito moderado ou grande para nenhuma comparação entre os membros ($d < 0,30$).

Figura 7. Comparação entre os membros inferiores na tarefa de apontamento com apoio.



De forma semelhante, a Figura 8 apresenta as médias do comportamento do COP em ambos os MMII na tarefa de equilíbrio unipodal, também sem diferença entre eles ($P > 0,13$; $Z < 1,53$). Foi verificado efeito moderado para amplitude antero posterior do COP ($d = 0,57$), favorecendo a perna esquerda, a qual se deslocou menos nesta direção. Para as outras variáveis do COP, não foram identificados efeitos ($d < 0,10$).

Figura 8. Comparação entre os membros inferiores na tarefa de equilíbrio unipodal, para comportamento do COP.



Legenda: COP = centro de pressão; Classificação do tamanho do efeito = *moderado (0,57).

3.6 Métodos do experimento 2.2

3.6.1 Participantes

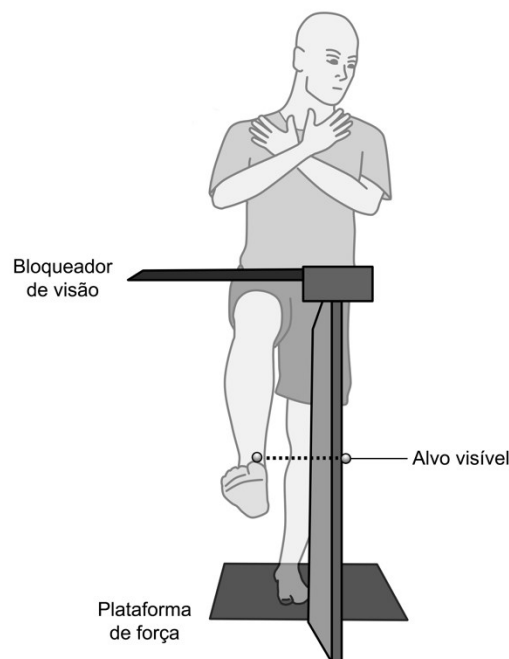
Participaram desta pesquisa os mesmos 20 adultos jovens selecionados no estudo anterior, com os mesmos critérios de inclusão. Os procedimentos deste estudo foram aprovados pelo comitê de ética e pesquisa com seres humanos da Universidade Estadual de Londrina (CAAE 92987718.4.0000.5231). Todos participantes foram esclarecidos sobre os objetivos e benefícios da pesquisa e assinaram o TCLE antes da pesquisa iniciar.

3.6.2 Tarefa

Foi realizada uma tarefa de apontamento unipodal, sem apoio. A tarefa foi a mesma de apontamento empregada no estudo anterior, porém sem o apoio para mãos. Cada participante realizou 10 tentativas de apontamento com cada um dos MMII, aleatorizadas entre os participantes para evitar efeito da ordem. Um total de 20 tentativas de apontamento por participante foi coletado. As mesmas instruções, familiarização e procedimentos do experimento 2.1 foram empregados. Para fins de padronização, os participantes eram instruídos a cruzar os braços na frente do tronco durante o apontamento. A Figura 9 ilustra o design experimental e a tarefa realizada.

Figura 9.
de apontamento podal

Tarefa experimental
sem apoio.



3.6.3 Análise de movimento e equilíbrio

As mesmas análises do estudo anterior foram realizadas, com os mesmos equipamentos. A sincronização do sistema optoeletrônico com a plataforma de força foi feita pelo amplificador analógico-digital *MX Giganet* do sistema *Vicon* e pelo software *Vicon Nexus* (v.1.8.5). O erro médio das câmeras ao longo da aquisição dos dados foi de 0.217 centímetros. O layout experimental foi o mesmo da Figura 6.

3.6.4 Variáveis cinemáticas e cinéticas

Foram avaliadas as mesmas variáveis cinemáticas e cinéticas do estudo anterior.

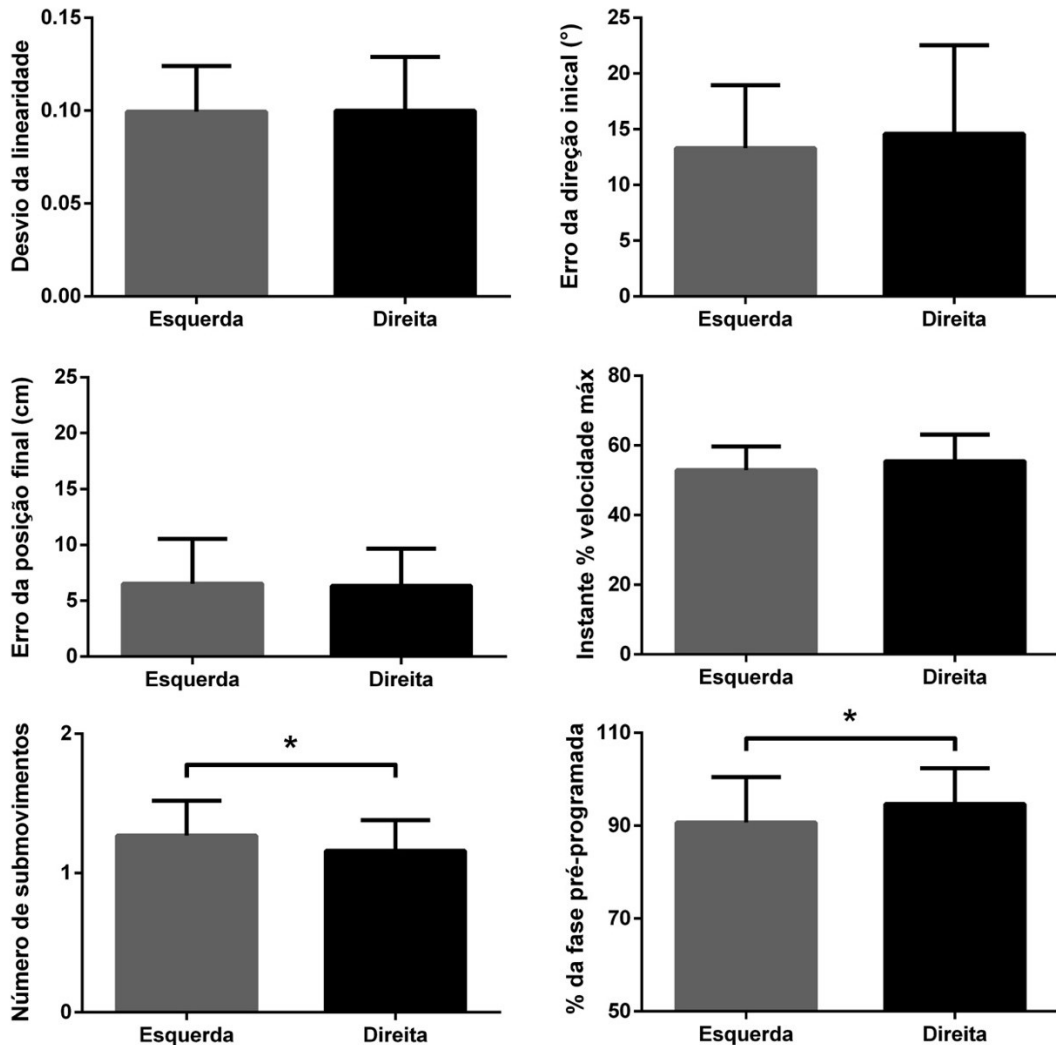
3.6.5 Processamento de sinais e análise estatística

Foram utilizados os mesmos procedimentos do estudo anterior para processar os sinais e realizar as análises estatísticas.

3.7 Resultados do experimento 2.2

Considerando o componente dinâmico da tarefa (apontamento), não foram encontradas assimetrias significativas entre os MMII em nenhuma das variáveis analisadas ($P > 0,06$; $Z < 1,80$). Porém, efeitos moderados foram verificados para o número de submovimentos ($d = 0,66$) e tamanho % da fase pré-programada ($d = 0,52$), ambos favorecendo a perna direita, a qual teve menor número médio de submovimentos e maior % da fase pré-programada. A Figura 10 apresenta estes resultados e a comparação entre os hemisférios nas outras variáveis da tarefa de apontamento.

Figura 10. Comparação entre os membros inferiores no componente dinâmico da tarefa de apontamento sem apoio.

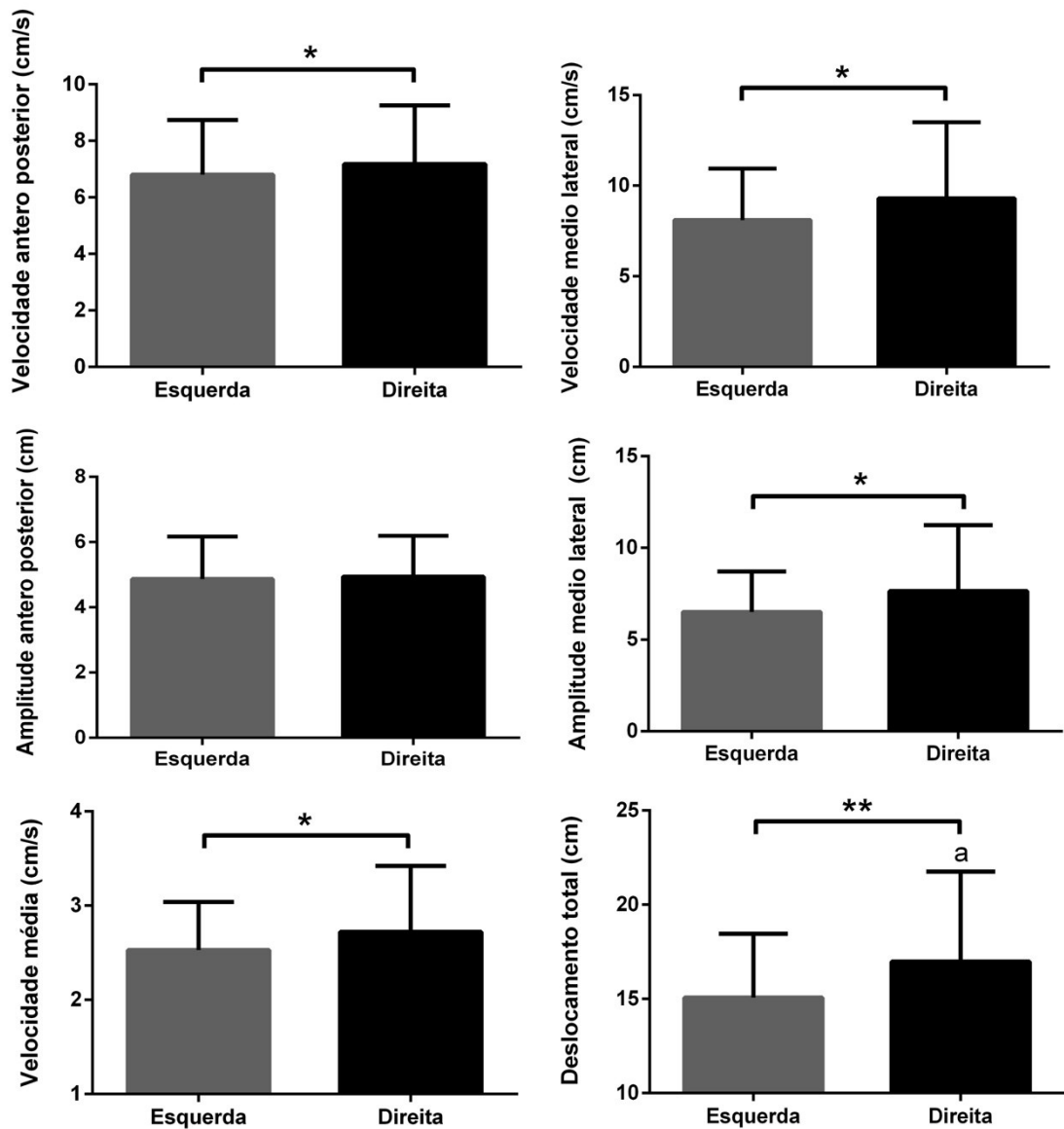


Legenda: classificação do tamanho do efeito = *moderado (0,5 – 0,79)

Para a perna estabilizadora durante o movimento, os resultados apresentaram algumas assimetrias significativas. O deslocamento total do COP foi significativamente menor quando o membro inferior esquerdo estava no solo ($P = 0,01$; $Z = 2,59$), com efeito grande ($d = 0,96$), e a velocidade média do COP também foi menor para o lado esquerdo, com valores estatísticos muito próximos à significância ($P = 0,058$; $Z = 1,89$) e efeito moderado ($d = 0,66$). Para as outras variáveis analisadas (amplitudes e velocidades mediolateral e anteroposterior) não houve diferença entre as pernas ($P > 0,09$; $Z < 1,72$), porém efeitos moderados foram verificados para velocidade anteroposterior ($d = 0,59$) e mediolateral ($d = 0,52$)

e amplitude mediolateral ($d = 0,45$) do COP, todos favorecendo o desempenho do membro esquerdo. A Figura 11 apresenta estes resultados.

Figura 11. Comparação entre os membros inferiores no componente estabilizador da tarefa de apontamento sem apoio.



Legenda: diferença ($P < 0,05$) quando comparado a perna esquerda (a). Classificação do tamanho do efeito: *moderado ($d = 0,5$ a $0,79$) e **grande ($d = 0,96$).

3.8 Discussão dos experimentos 2.1 e 2.2

Este estudo teve como principal objetivo analisar assimetrias de controle entre MMII de duas formas: testando cada MMII isoladamente e de forma integrada. Para isso, duas tarefas experimentais foram conduzidas. No experimento 2.1, foi realizada uma tarefa de apontamento com apoio e outra de equilíbrio quase estático unipodal, as quais refletem o controle dinâmico e de impedância, respectivamente. No experimento 2.2, foi realizada uma tarefa de apontamento sem apoio, exigindo o uso coordenado dos mecanismos de controle. As predições do modelo da dominância dinâmica propõem que haveria assimetrias de desempenho entre os MMII durante estas tarefas, dado que as assimetrias verificadas nos estudos com tarefas manuais são decorrentes de mecanismos neurais assimétricos do controle do movimento. Porém, no experimento 2.1, este resultado não foi verificado, tanto para a tarefa de apontamento quanto para a de equilíbrio, uma vez que o desempenho entre os membros foi simétrico em todas as variáveis analisadas. Assim, as hipóteses 1, 2 e 3 foram refutadas. Contudo, para o experimento 2.2, foram verificadas assimetrias significativas entre os lados, concordando com o modelo da dominância dinâmica. O segmento inferior direito apresentou melhor desempenho na tarefa de apontar, enquanto o esquerdo apresentou menores valores do COP quando estabilizava o movimento. Assim, a hipótese 4 foi aceita.

Para as assimetrias manuais, é consolidado na literatura que o uso diferencial das mãos tem grande influência no processo de lateralização, tanto comportamental (MICHEL et al., 2013; TEIXEIRA; OKAZAKI, 2007) quanto cortical (GRABOWSKA et al., 2012; KLOPPEL et al., 2010). Juntamente com os resultados do experimento 1 desta dissertação (apontamento manual), fica evidente que a experiência unilateral acumulada ao longo dos anos é um fator determinante para o desenvolvimento das assimetrias de desempenho. Logo, o uso relativamente simétrico das pernas na maioria do tempo, devido ao caminhar e à postura bípede, somado à baixa complexidade das tarefas realizadas no cotidiano com os membros inferiores, parece atenuar o desenvolvimento de assimetrias. Esta abordagem desenvolvimentista auxilia no entendimento e na explicação dos resultados de ambos experimentos.

Uma vez que o modelo da dominância dinâmica explica a preferência manual com base nas assimetrias neurais (SAINBURG, 2002, 2005, 2014), uma preferência

podal menos acentuada em comparação à manual (GABBARD, 1993; MARCORI et al., 2018) concorda diretamente com nossos resultados, pois as assimetrias ainda foram verificadas, mas em menores magnitudes. Especificamente a respeito do experimento 2.1, a simetria no equilíbrio estático unipodal está de acordo com investigações anteriores, em que um desempenho igual entre os hemisférios também foi verificado (KIYOTA; FUJIWARA, 2014; TEIXEIRA et al., 2011). No componente comportamental, uma preferência indiferente para tarefas estabilizadoras dos membros inferiores (BACELAR; TEIXEIRA, 2015) também fornece base para nossos resultados. Ainda, a simetria na tarefa de apontamento pode ser explicada pela ausência de uso assimétrico em tarefas que exijam o controle dinâmico. Diferentemente dos membros superiores, em que o uso de apenas uma das mãos é algo constante, as tarefas realizadas com os MMII na vida diária não exigem um uso desigual e altamente especializado de cada hemisfério. Assim, ao testarmos os mecanismos de controle isoladamente em cada hemisfério (experimento 2.1), não são verificadas diferenças significativas entre os lados.

Contudo, no experimento 2.2, algumas diferenças foram verificadas entre os hemisférios, concordando com as especificidades hemisféricas propostas pelo modelo da dominância dinâmica (SAINBURG, 2002, 2005, 2014). Apesar das principais variáveis do modelo não terem apresentado diferença entre os membros inferiores (linearidade da trajetória, erro da direção inicial e posição final), outras duas variáveis, que denotam controle preditivo do movimento, apresentaram tamanho do efeito moderado favorecendo a perna direita: número de submovimentos e tamanho % da fase pré-programada. Tanto um menor número de submovimentos, quanto o maior % de tempo gasto durante a fase pré-programada refletem melhor capacidade preditiva e de pré-programação, características do controle dinâmico. Melhores desempenhos nestas variáveis foram encontrados em comparações entre crianças e adultos (THOMAS; YAN; STELMACH, 2000), sendo que os autores deste estudo reforçaram a necessidade da prática para o desenvolvimento de um apontamento com menos submovimentos, o que consequentemente levou a um maior tempo de duração da fase pré-programada. Assim, o caráter desenvolvimentista atrelado a estas assimetrias de controle se torna ainda mais evidente.

A respeito da perna estabilizadora, seu desempenho foi melhor quando o membro inferior esquerdo estava ao solo (Figura 11), de forma que apenas uma variável apresentou efeito pequeno, enquanto as outras cinco analisadas apresentaram efeito moderado ou grande na comparação entre os lados. Um estudo em pacientes hemiparéticos fornece embasamento adicional a estes resultados. Fernandes e colaboradores (2017) verificaram que lesões no hemisfério cerebral direito reduzem a qualidade das respostas posturais, tanto em postura bípede quieta, quanto em uma condição reativa, na qual os participantes deveriam responder a uma perturbação inesperada. Assim, a especificidade de impedância no hemisfério cerebral direito é verificada para os membros inferiores, mesmo em tarefas bipodais.

Além disso, evidências de análises bilaterais com as mãos dão suporte aos resultados do experimento 2.2. Yokoi, Hirashima e Nozaki (2014) verificaram que a função especializada de estabilização do braço não-dominante tem um papel significativo de controle especialmente em movimentos bilaterais. De forma semelhante, Woytowicz e colaboradores (2018), ao replicar em um ambiente virtual uma tarefa semelhante à de cortar pão, encontraram melhor desempenho da mão direita nos parâmetros cinemáticos de linearidade, enquanto a mão esquerda foi melhor para estabilizar os movimentos realizados pelo hemisfério contralateral. Estes resultados fornecem suporte à noção de especialização complementar de cada hemisfério no controle do movimento manual. Nosso estudo estende tal abordagem para os membros inferiores, pois identifica algumas especificidades nos mecanismos de controle em uma tarefa podal que exige, coordenadamente, o controle dinâmico e de impedância em cada hemisfério. Assim, as assimetrias de desempenho e as especificidades hemisféricas propostas pelo modelo da dominância dinâmica se apresentam, para membros inferiores, apenas durante movimentos coordenados entre as pernas.

Ademais, vale ressaltar que, para os membros inferiores, o uso coordenado das pernas nas tarefas da vida diária que possuem esta característica (impedância no membro não preferido e dinâmico no preferido) é mais comum do que o uso isolado de cada MMII em sua especificidade. Apesar de não serem numerosos, exemplos de algumas tarefas que exigem este uso coordenado dos pés são: chutar uma bola, desenhar na areia, trazer um objeto no chão para perto, chutes em geral e

saltos unilaterais. Contudo, tarefas que exigem os componentes isolados em cada hemisfério são ainda mais raras de serem realizadas pelos membros inferiores no dia a dia. Logo, assim como verificado para os membros superiores no experimento 1 desta dissertação, o caráter desenvolvimentista destas assimetrias também foi sugerido para explicar os resultados verificados nos membros inferiores, uma vez que as assimetrias foram mais evidentes na condição em que há maior demanda no controle integrado entre os membros inferiores (realizado com mais frequência na vida diária), reforçando a ideia de que as assimetrias neurais de controle emergem secundariamente ao uso desigual dos lados.

3.9 Conclusão

Durante a análise do movimento coordenado entre os membros inferiores na tarefa de apontamento, o lado direito apresentou a característica dinâmica de controle e o lado esquerdo de controle de impedância, sugerindo a dominância complementar entre os hemisférios, de acordo com o modelo da dominância dinâmica. Todavia, ao testar as especificidades de cada mecanismo de controle isoladamente, não foram verificadas assimetrias entre os lados. Possivelmente, a ausência de tarefas na vida diária que exigem a especialização hemisférica de forma isolada para membros inferiores é responsável pela simetria de desempenho entre os lados nesta condição. Na mesma direção, uma vez que este uso coordenado dos membros inferiores em tarefas bipodais é o mais comum na vida diária, foi proposto um caráter desenvolvimentista atrelado às assimetrias neurais de controle, pois tais diferenças entre os hemisférios parecem estar sujeitas ao uso desigual ao longo dos anos para serem desenvolvidas.

CAPÍTULO IV

4. Considerações Finais

Os resultados da presente dissertação fornecem suporte parcial ao modelo da dominância dinâmica, pois demonstram a importância de uma abordagem desenvolvimentista (experiência acumulada) atrelada às assimetrias neurais de controle motor relacionadas às especificidades hemisféricas. Tanto para os membros superiores quanto inferiores, as diferenças de desempenho entre os lados são mais evidentes em situações que o uso desigual dos membros é mais acentuado. Isto se denota nos grupos mais velhos no experimento 1, e no uso dos membros inferiores na tarefa integrada de apontamento podal com equilíbrio unipodal no experimento 2.2.

Algumas limitações que podem ser avançadas para estudos futuros dizem respeito às análises longitudinais com relação às assimetrias interlaterais de controle. Apesar do experimento 1 ter investigado faixas etárias distintas, este protocolo agudo não garante que estas assimetrias de fato se desenvolveram ao longo dos anos. Um acompanhamento crônico é essencial para confirmar tais resultados. Sobre o segundo experimento, descrever o comportamento do torque interarticular na tarefa de apontamento podal também poderá fornecer novas informações a respeito do controle de cada hemisfério e de sua especialização, podendo entender mais profundamente se o membro inferior preferido realmente aproveita melhor da dinâmica intersegmentar para realizar seus movimentos. Ainda, análises em diferentes faixas etárias também são necessárias para compreender este caráter desenvolvimentista associado às assimetrias de desempenho. Outras tarefas da vida diária podem ser analisadas para confirmar estes resultados em estudos futuros. O uso coordenado dos membros inferiores e suas interações relacionadas à mecanismos de controle são fenômenos pouco descritos na literatura até o momento.

De forma geral, nossos resultados contribuem com a área de comportamento motor, especificamente de controle motor, trazendo novas perspectivas sobre assimetrias interlaterais de desempenho dos membros superiores e inferiores, dando mais um passo com o modelo da dominância dinâmica.

REFERÊNCIAS

- ANNETT, M. Parallels between asymmetries of Planum temporale and of hand skill. **Neuropsychologia**, v. 30, n. 11, p. 951–62, nov. 1992.
- BACELAR, A. M.; TEIXEIRA, L. A. Footedness across ages: Distinction between mobilization and stabilization tasks. **Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition**, v. 20, n. 2, p. 141–153, 4 mar. 2015.
- BAGESTEIRO, L. B.; SAINBURG, R. L. Handedness: Dominant Arm Advantages in Control of Limb Dynamics. **Journal of Neurophysiology**, v. 88, n. 5, p. 2408–2421, 2002.
- BAGESTEIRO, L. B.; SAINBURG, R. L. Nondominant Arm Advantages in Load Compensation During Rapid Elbow Joint Movements. **Journal of Neurophysiology**, v. 90, n. 3, p. 1503–1513, 2003.
- BALLINGER, G. A. Using Generalized Estimating Equations for Longitudinal Data Analysis. **Organizational Research Methods**, v. 7, n. 2, p. 127–150, 29 abr. 2004.
- BELMONT, L.; BIRCH, H. G. Lateral dominance and right-left awareness in normal children. **Child development**, v. 34, p. 257–70, jun. 1963.
- BONZANO, L. et al. Structural integrity of callosal midbody influences intermanual transfer in a motor reaction-time task. **Human Brain Mapping**, v. 32, n. 2, p. 218–228, fev. 2011.
- BRYDEN, P. J.; ROY, E. A. Unimanual performance across the age span. **Brain and Cognition**, v. 57, n. 1, p. 26–29, 2005.
- COELHO, C. J. et al. Hemispheric differences in the control of limb dynamics: a link between arm performance asymmetries and arm selection patterns. **Journal of Neurophysiology**, v. 109, n. 3, p. 825–838, 2013.
- COHEN, B. **Explaining psychological statistics**. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. [s.l.: s.n.]. v. 2nd
- CUI, J. QIC program and model selection in GEE analyses. **Stata Journal**, v. 7, n. 2,

p. 209–220, 2007.

DE GRAAF-PETERS, V. B.; HADDERS-ALGRA, M. Ontogeny of the human central nervous system: What is happening when? **Early Human Development**, v. 82, n. 4, p. 257–266, abr. 2006.

DENNIS, M. et al. Age, plasticity, and homeostasis in childhood brain disorders. **Neuroscience & Biobehavioral Reviews**, v. 37, n. 10, p. 2760–2773, dez. 2013.

FAUL, F. et al. G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. **Behavior research methods**, v. 39, n. 2, p. 175–91, maio 2007.

FERNANDES, C. A. et al. Right cerebral hemisphere specialization for quiet and perturbed body balance control: Evidence from unilateral stroke. **Human Movement Science**, v. 57, n. April, p. 374–387, 2017.

GABBARD, C. Foot laterality during childhood: A review. **International Journal of Neuroscience**, v. 72, n. 3–4, p. 175–182, 1993.

GAILLARD, F.; SATZ, P. Handedness and reading disability: a developmental study. **Archives of clinical neuropsychology : the official journal of the National Academy of Neuropsychologists**, v. 4, n. 1, p. 63–9, 1989.

GAZZANIGA, M. S. Cerebral specialization and interhemispheric communication: does the corpus callosum enable the human condition? **Brain : a journal of neurology**, v. 123 (Pt 7), p. 1293–326, jul. 2000.

GOBLE, D. J.; BROWN, S. H. The biological and behavioral basis of upper limb asymmetries in sensorimotor performance. **Neuroscience and Biobehavioral Reviews**, v. 32, n. 3, p. 598–610, 2008.

GRABOWSKA, A. et al. Switching handedness: fMRI study of hand motor control in right-handers, left-handers and converted left-handers. **Acta Neurobiologiae Experimentalis**, v. 72, n. 4, p. 439–451, 2012.

GUADALUPE, T. et al. Human subcortical brain asymmetries in 15,847 people worldwide reveal effects of age and sex. **Brain Imaging and Behavior**, v. 11, n. 5, p. 1497–1514, 13 out. 2017.

- KALAYCIOĞLU, C. et al. Aspects of foot preference: differential relationships of skilled and unskilled foot movements with motor asymmetry. **Laterality**, v. 13, n. 2, p. 124–42, mar. 2008.
- KAMI, A. et al. Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. **Nature**, v. 377, n. 6545, p. 155–158, 14 set. 1995.
- KAWATO, M. Internal models for motor control and trajectory planning. **Current opinion in neurobiology**, v. 9, n. 6, p. 718–27, dez. 1999.
- KENNEDY, D. N. et al. Basic principles of MRI and morphometry studies of human brain development. **Developmental Science**, v. 5, n. 3, p. 268–278, 1 ago. 2002.
- KIYOTA, T.; FUJIWARA, K. Dominant side in single-leg stance stability during floor oscillations at various frequencies. **Journal of Physiological Anthropology**, v. 33, n. 1, p. 25, 15 ago. 2014.
- KLOPPEL, S. et al. Can Left-Handedness be Switched? Insights from an Early Switch of Handwriting. **Journal of Neuroscience**, v. 27, n. 29, p. 7847–7853, 2007.
- KLOPPEL, S. et al. Nurture versus Nature: Long-Term Impact of Forced Right-Handedness on Structure of Pericentral Cortex and Basal Ganglia. **Journal of Neuroscience**, v. 30, n. 9, p. 3271–3275, 2010.
- KRAKAUER, J. W. et al. Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. **The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience**, v. 20, n. 23, p. 8916–24, 1 dez. 2000.
- KUYPERS, H. G. A new look at the organization of the motor system. **Progress in brain research**, v. 57, p. 381–403, 1982.
- LACKNER, J. R.; DIZIO, P. Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory. **Journal of Neurophysiology**, v. 72, n. 1, p. 299–313, jul. 1994.
- LENROOT, R. K.; GIEDD, J. N. Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. **Neuroscience & Biobehavioral Reviews**, v. 30, n. 6, p. 718–729, jan. 2006.
- MACNEILAGE, P. F.; ROGERS, L. J.; VALLORTIGARA, G. Origins of the left & right brain. **Scientific American**, v. 301, n. 1, p. 60–7, jul. 2009.

- MARCORI, A. J. et al. Beyond handedness: assessing the lateral preference of younger adults and older people in six laterality dimensions. **Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition**, v. In Press, n. 0, p. 1–13, 2018.
- MARIM, E.; LAFASSE, R.; OKAZAKI, V. H. A. Inventário de Preferência Lateral Global (IPLAG). **Brazilian Journal of Motor Behavior**, v. 6, n. 3, p. 14–23, 2011.
- MCMANUS, I. C. Handedness, language dominance and aphasia: a genetic model. **Psychological medicine. Monograph supplement**, v. 8, p. 1–40, 1985.
- MCMANUS, I. C. et al. The development of handedness in children. **British Journal of Developmental Psychology**, v. 6, n. 3, p. 257–273, 1 set. 1988.
- MICHEL, G. F. et al. Multiple trajectories in the developmental psychobiology of human handedness. **Advances in child development and behavior**, v. 45, p. 227–60, 2013.
- MORANGE-MAJOUX, F.; PEZE, A.; BLOCH, H. Organisation of left and right hand movement in a prehension task: A longitudinal study from 20 to 32 weeks. **Laterality**, v. 5, n. 4, p. 351–362, 2000.
- MORGEN, K. et al. Kinematic specificity of cortical reorganization associated with motor training. **NeuroImage**, v. 21, n. 3, p. 1182–1187, mar. 2004.
- MORRIS, S. B.; DESHON, R. P. Combining effect size estimates in meta-analysis with repeated measures and independent-groups designs. **Psychological methods**, v. 7, n. 1, p. 105–25, mar. 2002.
- OLDFIELD, R. C. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. **Neuropsychologia**, v. 9, n. 1, p. 97–113, mar. 1971.
- OTTAVIANO, S. et al. Laterality of arm movement in full-term newborn. **Early human development**, v. 19, n. 1, p. 3–7, abr. 1989.
- PASCUAL-LEONE, A.; GRAFMAN, J.; HALLETT, M. Modulation of cortical motor output maps during development of implicit and explicit knowledge. **Science (New York, N.Y.)**, v. 263, n. 5151, p. 1287–9, 4 mar. 1994.
- PORAC, C. Hand preference and skilled hand performance among individuals with successful rightward conversions of the writing hand. **Laterality: Asymmetries of**

Body, Brain and Cognition, v. 14, n. 2, p. 105–121, 2009.

PRZYBYLA, A.; GOOD, D. C.; SAINBURG, R. L. Dynamic dominance varies with handedness: Reduced interlimb asymmetries in left-handers. **Experimental Brain Research**, v. 216, n. 3, p. 419–431, 2012.

PUTTEMANS, V.; WENDEROTH, N.; SWINNEN, S. P. Changes in brain activation during the acquisition of a multifrequency bimanual coordination task: from the cognitive stage to advanced levels of automaticity. **The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience**, v. 25, n. 17, p. 4270–8, 27 abr. 2005.

RAW, R. K. et al. Reduced motor asymmetry in older adults when manually tracing paths. **Experimental Brain Research**, v. 217, n. 1, p. 35–41, 2012.

RÖNNQVIST, L.; DOMELLÖF, E. Quantitative Assessment of Right and Left Reaching Movements in Infants: A Longitudinal Study from. **Developmental Psychobiology**, v. 48, p. 444–459, 2006.

ROSENBAUM, D. A.; CHAIKEN, S. R. Frames of reference in perceptual-motor learning: evidence from a blind manual positioning task. **Psychological research**, v. 65, n. 2, p. 119–27, 2001.

RUDDY, K. L.; CARSON, R. G. Neural pathways mediating cross education of motor function. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 7, n. July, p. 1–22, 2013.

SAINBURG, R. L. Evidence for a dynamic-dominance hypothesis of handedness. **Experimental Brain Research**, v. 142, n. 2, p. 241–258, 2002.

SAINBURG, R. L. Handedness: Differential specializations for control of trajectory and position. **Exercise and Sport Sciences Reviews**, v. 33, n. 4, p. 206–213, 2005.

SAINBURG, R. L. Convergent models of handedness and brain lateralization. **Frontiers in Psychology**, v. 5, n. SEP, p. 1–14, 2014.

SAINBURG, R. L.; GHEZ, C.; KALAKANIS, D. Intersegmental dynamics are controlled by sequential anticipatory, error correction, and postural mechanisms. **Journal of neurophysiology**, v. 81, n. 3, p. 1045–56, mar. 1999.

SAINBURG, R. L.; KALAKANIS, D. Differences in control of limb dynamics during

- dominant and nondominant arm reaching. **Journal of neurophysiology**, v. 83, n. 5, p. 2661–75, 2000.
- SCHAROUN, S. M.; BRYDEN, P. J. Hand preference, performance abilities, and hand selection in children. **Frontiers in Psychology**, v. 5, n. FEB, p. 1–15, 2014.
- SHADMEHR, R.; MUSSA-IVALDI, F. A. Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. **The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience**, v. 14, n. 5 Pt 2, p. 3208–24, maio 1994.
- SIGMUNDSSON, H.; WHITING, H. T. A. Hand preference in children with developmental coordination disorders: cause and effect? **Brain and cognition**, v. 49, n. 1, p. 45–53, jun. 2002.
- SOUZA, R. M. et al. Is early manual preference in infants defined by intermanual performance asymmetry in reaching? **Infant Behavior and Development**, v. 35, n. 4, p. 742–750, 2012.
- STILES, J.; JERNIGAN, T. L. The basics of brain development. **Neuropsychology review**, v. 20, n. 4, p. 327–48, dez. 2010.
- STOLOFF, R. H. et al. Effect of reinforcement history on hand choice in an unconstrained reaching task. **Frontiers in Neuroscience**, v. 5, p. 41, 2011.
- TEIXEIRA, L. A. Categories of manual asymmetry and their variation with advancing age. **Cortex**, v. 44, n. 6, p. 707–716, jun. 2008.
- TEIXEIRA, L. A. et al. Leg preference and interlateral asymmetry of balance stability in soccer players. **Research quarterly for exercise and sport**, v. 82, n. 1, p. 21–7, mar. 2011.
- TEIXEIRA, L. A.; DA SILVA, R. P. P.; DE FREITAS, S. L. Amplification and diffusion of manual preference from lateralized practice in children. **Developmental Psychobiology**, v. 52, n. 8, p. 723–730, dez. 2010.
- TEIXEIRA, L. A.; TEIXEIRA, M. C. T. Shift of manual preference in right-handers following unimanual practice. **Brain and Cognition**, v. 65, n. 3, p. 238–243, 2007.
- TEIXEIRA, L.; OKAZAKI, V. Shift of manual preference by lateralized practice generalizes to related motor tasks. **Experimental Brain Research**, v. 183, n. 3, p.

417–423, 2007.

THOMAS, J. R.; YAN, J. H.; STELMACH, G. E. Movement substructures change as a function of practice in children and adults. **Journal of Experimental Child Psychology**, v. 75, n. 3, p. 228–244, 2000.

VIEIRA, O.; COELHO, D. B.; TEIXEIRA, L. A. Asymmetric balance control between legs for quiet but not for perturbed stance. **Experimental Brain Research**, v. 232, n. 10, p. 3269–3276, 24 out. 2014.

WINTER, D. A. **Biomechanics and motor control of human movement**. [s.l.] Wiley, 2009.

WOODWORTH, R. The accuracy of voluntary movement. **The Journal of Nervous and Mental Disease**, v. 26, n. 12, p. 743–752, 1899.

WOYTOWICZ, E. J. et al. Handedness results from complementary hemispheric dominance, not global hemispheric dominance: evidence from mechanically coupled bilateral movements. **Journal of Neurophysiology**, v. 120, n. 2, p. 729–740, 2018.

YADAV, V.; SAINBURG, R. L. Motor lateralization is characterized by a serial hybrid control scheme. **Neuroscience**, v. 196, p. 153–167, 2011.

YADAV, V.; SAINBURG, R. L. Limb dominance results from asymmetries in predictive and impedance control mechanisms. **PLoS ONE**, v. 9, n. 4, 2014.

YAN, J. H. et al. Developmental features of rapid aiming arm movements across the lifespan. **Journal of Motor Behavior**, v. 32, n. 2, p. 121–140, 2000.

YOKOI, A.; HIRASHIMA, M.; NOZAKI, D. Lateralized Sensitivity of Motor Memories to the Kinematics of the Opposite Arm Reveals Functional Specialization during Bimanual Actions. **Journal of Neuroscience**, v. 34, n. 27, p. 9141–9151, 2 jul. 2014.

ZERNICKE, R. F.; SCHNEIDER, K. Biomechanics and developmental neuromotor control. **Child development**, v. 64, n. 4, p. 982–1004, ago. 1993.