



**Marcel Passos Zylberberg**

**Análise da transmissão de impacto de diferentes calçados militares**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientadora: Prof. Fernanda Maria Pereira Raupp

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2012



**Marcel Passos Zylberberg**

**Análise da transmissão de impacto de diferentes calçados militares**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Fernanda Maria Pereira Raupp**

Orientadora

Departamento de Engenharia Industrial – PUC - Rio

**Prof. Liliam Fernandes de Oliveira**

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

**Prof. Adriane Mara de Souza Muniz**

Escola de Educação Física do Exército - EsEFEx

**Prof. Roger Gomes Tavares de Mello**

Escola Naval - EN

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC - Rio

Rio de Janeiro, 09 de fevereiro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

### **Marcel Passos Zylberberg**

Graduou-se em Ciências Militares na AMAN (Academia Militar das Agulhas Negras), e durante os dois anos que trabalhou como oficial em Campo Grande – MS, cursou três semestres da graduação em Educação Física na UFMS (Universidade Federal do Mato Grosso do Sul). Após optar por nova área de trabalho, mudou-se para o Rio de Janeiro e graduou-se em Engenharia de Materiais no IME (Instituto Militar de Engenharia). Trabalhou durante três anos no Arsenal de Guerra do Rio, período no qual cursou uma Pós-graduação em Conhecimentos Militares. Ingressou em seguida no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio para obtenção do título de Mestre. Nesse período foi transferido para o IPCFEx (Instituto de Pesquisa da Capacitação Física do Exército), onde exerce a função de pesquisador do Laboratório de Biomecânica. Participou de diversos congressos nas áreas de ergonomia, engenharia e biomecânica.

#### Ficha Catalográfica

Zylberberg, Marcel Passos

Análise da transmissão de impacto de diferentes de calçados militares / Marcel Passos Zylberberg; orientadora: Fernanda Maria Pereira Raupp. – 2012.

81 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Ergonomia. 3. Biomecânica. 4. Análise Cinemática. 5. Acelerômetros. 6. Calçados militares. I. Raupp, Fernanda Maria Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Força Maior que faz passar os segundos e dita o ritmo dos acontecimentos na vida. Obrigado por ter proporcionado as oportunidades de estudo e aperfeiçoamento que tive até hoje. À minha família, que me inseriu e deu apoio neste mundo, e mesmo à distância se fez sempre presente, me sustentando em todos os momentos.

Às pessoas que estiveram mais próximas nesse período e participaram de alguma forma nesta dissertação ou possibilitaram a execução da mesma. Obrigado aos amigos Adriane, Beatriz, Fernanda, Jaqueline, Lílian, Priscila, Márcio Leão, Renault, Roger, Izabela, Guilherme e Natália.

À minha Orientadora Fernanda Raupp, pela compreensão, apoio incondicional e acompanhamento nessa etapa. Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

À pessoa do Gen Ribeiro Souto, pela oportunidade da minha inclusão no convênio do CTEEx com a PUC-Rio, e conseqüente realização deste curso de mestrado. Ao IPCFEx pela oportunidade de realizar os testes. Aos voluntários que participaram do estudo, sem os quais esta pesquisa experimental não seria possível.

Aos professores, amigos e funcionários do DEI da PUC-Rio, pelos ensinamentos e apoio proporcionados, sendo o professor Dalcol, a Cláudia, a Ana e o Eduardo àqueles os quais dei mais trabalho.

Não fossem os conhecimentos adquiridos pelas disciplinas estudadas, o apoio e ensinamento de amigos da PUC e companheiros do trabalho, as críticas construtivas sobre elaboração da dissertação, e os momentos de descontração nessa cidade do Rio de Janeiro, este trabalho não seria concluído. Guardarei sempre com muita estima as lembranças desse período de 2009 a 2011. Agradeço a todos que me ajudaram nestes três anos para conseguir concluir este curso.

## Resumo

Zylberberg, Marcel Passos; Raupp, Fernanda Maria Pereira (Orientadora). **Análise da transmissão de impacto de diferentes calçados militares**. Rio de Janeiro, 2012. 81p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação teve como objetivo analisar a transmissão de impacto de três diferentes modelos de um calçado militar por meio de sua influência na aceleração tibial. A variável pico de aceleração e as intensidades da frequência do sinal em determinadas faixas foram medidas no eixo vertical, por intermédio da técnica de acelerometria, visando caracterizar os coturnos quanto sua adequação ergonômica e biomecânica como ferramenta de trabalho para os militares. Dez (10) sujeitos caminharam numa esteira ergométrica em velocidade constante e padronizada, descalços e com três calçados diferentes. As variáveis foram medidas por meio de um acelerômetro capacitivo fixado sobre a pele, na tíbia, e o procedimento reavaliado em dois dias diferentes. Os valores encontrados apresentaram excelente confiabilidade. O valor médio de redução do pico de impacto mensurado na tíbia dos sujeitos utilizando os coturnos foi próximo de 50%, em relação à situação descalço. Após a análise da média de pico da aceleração, os resultados encontrados não foram conclusivos quanto à diferença significativa de absorção de impacto entre os tipos de coturno, porém em conjunto com as avaliações de intensidades de faixas de frequência da transmissão do impacto, parece que o coturno comum apresentou melhor resultado. Existe a necessidade de novos estudos com outros equipamentos, como palmilhas instrumentadas e plataformas de força, para caracterização mais precisa dos calçados, bem como realizar testes de reavaliação de propriedades mecânicas após ciclos de desgastes dos calçados.

## Palavras-chave

Ergonomia; biomecânica; análise cinemática, acelerômetros; calçados militares.

## Abstract

Zylberberg, Marcel Passos; Raupp, Fernanda Maria Pereira (Advisor). **Analysis of the impact transmitted by different military boots.** Rio de Janeiro, 2012. 81p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The dissertation aimed to analyze the transmission of impact of three different models of a military boot through its influence on tibial acceleration. The variable peak acceleration, and the intensities of the signal in certain frequency bands, were measured on the vertical axis using accelerometer, in order to characterize the boots suitability as ergonomic and biomechanics tool for the military. Ten (10) subjects walked on a treadmill at constant and standard speed, barefoot and with three different shoes. The variables were measured using a capacitive accelerometer fixed to the skin on the tibia and the procedure re-evaluated on two different days. The values found showed excellent reliability. The average reduction in peak impact measured in the tibia of the subjects using the boots was near 50%, as compared to the barefoot. After analysis of the average peak acceleration, the results were not conclusive as to the significant difference in shock absorption between the types of boots. Studying the acceleration data in conjunction with assessments of intensities of frequency bands of the transmission of impact, it seems that the common buskin had the best result. There is a need for further studies with other equipment, such as instrumented shoe insoles and force platforms, for more precise characterization of the military boots as well as testing of mechanical properties after shoe degradation cycles.

## Keywords

Ergonomics; biomechanics; kinematic analysis; accelerometers; military boots.

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                            | <b>12</b> |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                 | <b>16</b> |
| 2.1. PARTICULARIDADES MILITARES                 | 16        |
| 2.2. ERGONOMIA FÍSICA                           | 23        |
| 2.3. BIOMECÂNICA                                | 28        |
| 2.3.1. ACELEROMETRIA                            | 30        |
| 2.3.2. ANÁLISE DE MARCHA                        | 36        |
| 2.3.3. CINEMETRIA                               | 39        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>                   | <b>41</b> |
| 3.1. AMOSTRA                                    | 41        |
| 3.2. CALÇADOS MILITARES                         | 42        |
| 3.3. EQUIPAMENTOS                               | 44        |
| 3.4. PROTOCOLO EXPERIMENTAL                     | 47        |
| 3.5. ANÁLISE E PROCESSAMENTO DOS SINAIS         | 49        |
| <b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> | <b>52</b> |
| 4.1. DADOS DE CINEMETRIA                        | 52        |
| 4.2. ACELEROMETRIA E TRANSMISSÃO DE IMPACTO     | 56        |
| <b>5. CONCLUSÃO</b>                             | <b>69</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>               | <b>71</b> |
| <b>APÊNDICE A</b>                               | <b>74</b> |
| <b>APÊNDICE B</b>                               | <b>75</b> |
| <b>APÊNDICE C</b>                               | <b>78</b> |
| <b>ANEXO A</b>                                  | <b>81</b> |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Coturnos da 2ª GM (a), Exército Brasileiro (b) e Exército Americano (c)    | 17 |
| Figura 2. Cronograma de Instrução de um Batalhão de Infantaria                       | 20 |
| Figura 3. Termos anatômicos para descrever posição e direção (Godfrey, 2008)         | 29 |
| Figura 4. Sistema de coordenadas para análise de movimento (Winter, 1990:13)         | 30 |
| Figura 5. Esquema representativo do acelerômetro capacitivo                          | 32 |
| Figura 6. Ilustração da montagem com BMA na tíbia (adaptado de Hwang, 2006)          | 33 |
| Figura 7. Fases da marcha (Perry, 2005:3)  | 37 |
| Figura 8. Contato com o solo abrupto (Perry, 2005:35)                                | 38 |
| Figura 9. Coturnos avaliados – CC (a), CE (b), CM (c)                                | 42 |
| Figura 10. Representação esquemática do solado (InstrNorm/DAbst EB)                  | 43 |
| Figura 11. Acelerômetro fixado sobre a tuberosidade da tíbia                         | 45 |
| Figura 12. Acelerômetro MMA7361 Sparkfun – instrumentado                             | 45 |
| Figura 13. Equipamento de análise cinemática 3D                                      | 46 |
| Figura 14. Localização dos marcadores passivos da cinemetria                         | 48 |
| Figura 15. Picos de acelerometria considerados para cálculo da média                 | 51 |
| Figura 16. PSD para a cinemetria e aceleração indicando mesma frequência máxima      | 53 |
| Figura 17. Gráfico de FVA e acelerometria - falta de sincronia ao longo das amostras | 54 |
| Figura 18. Gráficos da média do pico de aceleração dos testes                        | 58 |
| Figura 19. Gráfico representando as bandas de frequência avaliadas                   | 59 |
| Figura 20. Gráfico <i>Box-Plot</i> da variável média do pico de aceleração           | 61 |
| Figura 21. Coturnos CC (a), CE (b) e CM (c) seccionados – estrutura dos solados      | 62 |
| Figura 22. Gráfico da magnitude média das bandas de frequência avaliadas             | 64 |
| Figura 23. Gráfico <i>Box-Plot</i> da variável magnitude das bandas de frequência    | 65 |
| Figura 24. Equações de predição dos valores de pico de aceleração                    | 67 |
| Figura 25. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos <i>studentized</i>           | 67 |
| Figura 26. Gráfico de resíduos <i>studentized</i> por ordem de teste                 | 68 |

## Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Dados técnicos sobre materiais e dimensões dos diferentes modelos de coturnos                 | 43 |
| Tabela 2. Valores médios e extremos de pico de aceleração dos testes                                    | 56 |
| Tabela 3. Reprodutibilidade intra-avaliações das variáveis de aceleração                                | 60 |
| Tabela 4. Média $\pm$ DP dos picos de aceleração e testes estatísticos                                  | 60 |
| Tabela 5. Média $\pm$ DP da potência do sinal nas diferentes bandas de frequência e testes estatísticos | 63 |

## Lista de abreviaturas

EsEFEx – Escola de Educação Física do Exército  
EN – Escola Naval  
EB - Exército Brasileiro  
IME – Instituto Militar de Engenharia  
AMAN – Academia Militar das Agulhas Negras  
RUE – Regulamento de Uniformes do Exército  
OM – Organização Militar  
CC – coturno de lona preto comum  
CE – coturno de lona preto especial  
CM – coturno marrom  
GM – Guerra Mundial  
kJ – quilojoules  
BMA - Acelerômetros Montados nos Ossos  
SMA - Acelerômetros Montados na Pele  
RMS - raiz média quadrática  
FFT - Transformada rápida de Fourier  
FM - frequência máxima  
PSD – densidade espectral de potência  
ms – milissegundos  
CI – contato inicial  
TO – perda de contato do hálux com o solo  
HPA - *high pass algorithm*  
FVA - *foot velocity algorithm*  
QTM – *Qualisys Track Manager*  
mV/g – milivolts por gravidade  
A/D – analógico-digital  
TAP - taxa de aceitação de peso  
IA - índice de Amortecimento  
EVA – Etileno acetato de vinila  
SBR – Borracha de Butadieno Estireno (borracha sintética)  
NR – Borracha natural

*Se os conhecimentos científicos e tecnológicos, atualmente disponíveis no mundo, fossem devidamente difundidos, adaptados e aplicados, contribuiriam para reduzir grande parte das inúmeras mazelas, que tanto nos entristecem e envergonham como seres humanos.*

Itiro Iida