

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo expõe algumas particularidades do Exército Brasileiro, de forma a contextualizar uma série de rotinas e práticas que permeiam o cotidiano do militar com relação à marcha. Para facilitar a compreensão de pesquisa realizada, descrevem-se, principalmente, a rotina dos militares quanto à utilização de coturnos, os calçados que compõe o uniforme/fardamento, que são de uso obrigatório em diversas situações (inclusive nas atividades físicas) e que foram analisados nesta dissertação. Em seguida, a fundamentação teórica trata de dois assuntos que guiaram e tornaram possível este estudo: ergonomia física e biomecânica.

2.1. PARTICULARIDADES MILITARES

As Forças Armadas tem como vocação a defesa da Pátria, à garantia dos poderes constitucionais, e da lei e da ordem (em caso de necessidade). Ressalta-se que o Exército Brasileiro (EB) tem o maior efetivo e maior presença no território brasileiro, dentre as três Forças Armadas, sendo responsável por trabalhar nos mais diversos territórios e climas existentes neste país de dimensões continentais.

De acordo com o Decreto Presidencial nº 7.173, de 11 de maio de 2010, que dispõe sobre os efetivos de pessoal militar do Exército, o Brasil conta com cerca de 220 mil militares do exército. Deste efetivo, aproximadamente 140 mil pessoas trabalham como soldados e cabos, graduações estas que compreendem homens entre 18 e 26 anos de idade.

Recorrendo ao Arquivo Histórico do Exército, podem-se citar aqui dois documentos ilustrativos referentes aos uniformes adotados pelo EB. O primeiro deles, “Correspondência da Corte”, remonta ao ano de 1808, quando D. Rodrigo de S. Coutinho doa fardamento para as Tropas da Capitania de Rio Grande. Já o segundo documento trata-se de uma Carta sobre uniformes de 1817, cujo conteúdo tem a seguinte especificação: “Do Palácio do Rio de Janeiro para o

Conselho Supremo Militar determinando do modo regular os uniformes dos Regimentos de Infantaria de Linha da Capitania do Pará, os quais devem ser feitos e regulados de acordo com os figurinos do Exército de Portugal”.

Visando esclarecer a evolução até os dias atuais a respeito dos calçados militares, será dada atenção às botas, conhecidas como coturnos. Pode-se ver na *Figura 1*, à esquerda um coturno utilizado na 2ª Guerra Mundial (GM), ao centro um coturno utilizado atualmente pelos militares brasileiros. Nota-se a pouca evolução dos mesmos quando comparados à imagem da direita, que se trata de um coturno do Exército Americano. Como o Brasil não se envolveu em guerras recentemente, percebe-se que os calçados adotados pelos militares pouco se alteraram em características estéticas.



Figura 1. Coturnos da 2ª GM (a), Exército Brasileiro (b) e Exército Americano (c)

Atualmente as fardas e calçados utilizados pelo EB seguem as referências da Portaria nº 806, de 17 de dezembro de 1998, do Estado-Maior do Exército, que aprova o Regulamento de Uniformes do Exército (R-124). Ressaltam-se neste documento os seguintes artigos:

Art. 1º O presente Regulamento contém as prescrições sobre os uniformes do Exército Brasileiro, peças complementares, insígnias, distintivos e condecorações, regulando sua posse, composição, uso e descrição geral.

(...)

Art. 133. As Organizações Militares do Comando Militar da Amazônia usarão coturnos pretos de lona verde e as Organizações Militares da Brigada de Operações Especiais usarão coturno castanho escuro de lona verde.

Art. 134. As Organizações Militares da Brigada de Infantaria Pára-quedista usarão coturnos de couro marrom e a Organização Militar de Caatinga usará o coturno de couro preto.

Art. 135. As demais Organizações Militares usarão coturnos pretos de lona preta.

Existem ainda outras especificações e detalhamentos dos coturnos nas Instruções Normativas nº 016 / 2010 da Diretoria de Abastecimento do Exército Brasileiro. Os fatores pertinentes a estas normas, que são de interesse desta dissertação, serão apresentados no capítulo Materiais e Métodos, e, por hora, ressalta-se que, adotando como critérios o número de militares utilizando os modelos de coturno, bem como as atividades desenvolvidas com os mesmos, esta dissertação baseou a pesquisa em três modelos: o *coturno comum* (CC) de lona preta - modelo designado para a maioria dos militares no país, o *coturno especial*² de lona preta (CE) - distribuído para os militares que vão para missões de paz no exterior, e o *coturno marrom* (CM) - utilizado pela tropa paraquedista.

Em oposição à situação da maioria dos trabalhadores que usam botas ou outros tipos de calçados que possam incomodar durante um turno de oito horas diárias, os militares, nas mais diversas áreas de atuação, executam tarefas, como o serviço de escala, de modo similar a um plantão de 24 horas, período no qual o indivíduo deve permanecer uniformizado e calçado, e se vê obrigado a manter-se em pé a maior parte do tempo. Uma rotina de trabalho intensa e desgastante é enfrentada, por exemplo, pelos militares que integram missões de paz no exterior, que tem a duração geralmente de seis meses. Essa rotina exige muitas vezes mais de dez horas de trabalho por dia dos militares, além de longos períodos em pé, marchas e atividades diversas.

Os militares do Exército, obrigatoriamente, devem realizar exercícios físicos com frequência regular de acordo com o Manual de Treinamento Físico Militar C-20-20. Dentre as atividades previstas está a “corrida com calça e coturno”, que se faz mais frequente nas tropas paraquedistas, porém ocorre eventualmente em outras organizações militares (OM). Outra ampla utilização dos coturnos é em paradas militares diárias na caserna, denominadas formaturas, onde os militares desfilam de forma cadenciada, atividade especificada pelo termo “marchar”. Na rotina militar, existe ainda outra situação, na qual a marcha com coturnos é exigida, trata-se do exercício de “marcha a pé”, que pode ser tática ou administrativa, está previsto no Manual de Campanha de Marchas a Pé (C-21-18), do Estado Maior do Exército, e consiste em caminhadas carregando equipamento

² A designação de coturno especial foi feita pelo autor da dissertação, visando diferenciar os coturnos pretos.

individual como mochila e armamento, cargas que geralmente tem em torno de 18 a 22 kg, por distâncias normalmente de 8, 12, 16, 24, até 32 km, podendo eventualmente se estender até 52 km em um único dia.

Visando exemplificar as atividades as quais os militares são submetidos de forma rotineira e anual, pode-se constatar na *Figura 2* o Cronograma de Instrução do 19º Batalhão de Infantaria Motorizado – São Leopoldo - RS. Neste documento, destacam-se as atividades de Marcha a Pé realizadas por mais de 100 mil militares do exército anualmente. Só neste quartel são mais de 130 quilômetros percorridos em atividades de marcha militar durante um ano. Esta distância corresponde a mais de 170 mil passos dados por cada militar, aproximando um comprimento de passo de 0,75 m. Considerando um impacto de 80% do peso corporal, pode-se deduzir que um soldado com massa de 70 kg, que caminha com esse comprimento de passada, amortece no contato inicial um total de 74666,67 kg (aproximadamente 75 toneladas) por quilômetro caminhado, ou 37,5 toneladas em cada um dos pés.

Segundo Kaufman *et al.* (2000), as lesões musculoesqueléticas relacionadas ao treinamento físico são um grande problema para a população militar. O número de militares que se lesionam durante os treinamentos variam de 6 a 12 em cada 100 soldados por mês, no período de formação básica, chegando a atingir 35 a cada 100 militares em um mês, na preparação de tropas especiais norte-americanas. Fatores como alto volume de treinamento de corrida, grande quantidade de exercício semanal, idade, e até questões biomecânicas podem estar relacionados às taxas de lesão. Entretanto, o condicionamento físico é uma demanda primordial para que os militares estejam aptos a cumprirem suas tarefas operacionais, e parte deste treinamento deve ser feito com coturnos.

De acordo com Birrell *et al.* (2006), carregar peso é uma situação inevitável durante treinamentos e missões militares. Dentre os itens mais frequentes estão a mochila nas costas, o colete ou suspensório e cinto com equipamentos, e o fuzil. Esse autor menciona que essa carga frequentemente pode ultrapassar 60% do peso corporal. Entretanto, Knapik (1989) informa que, segundo a Escola de Infantaria do Exército Americano, a carga transportada por cada indivíduo não deve ultrapassar 45% do peso corporal em caso de marchas, e respeitar o limite de 30% do peso do militar em caso de combate. Porém, ambos estudos mencionam que o transporte de carga está relacionado diretamente com a ocorrência de lesões durante os exercícios físicos, e que os membros inferiores são os mais afetados, até o ponto de ocorrerem fraturas por estresse³.

Destaca-se que para o Exército Brasileiro, de acordo com o Manual de Marchas a Pé, a carga transportada pelo soldado em marchas não deve ultrapassar 30% do próprio peso. Porém, em alguns cursos operacionais como o Curso de Guerra na Selva e o Curso de Ações de Comandos, essa carga frequentemente supera os 30 kg. Outra tropa operacional, formada por militares paraquedistas brasileiros, foi objeto de estudo de Neves *et al.* (2009) a respeito de lesões durante as atividades de saltos. Uma das conclusões desse estudo aponta para a necessidade de reforçar os tornozelos, porque 32,8% dos soldados se machucaram nos pés e tornozelos.

Meireles (2009) revela em sua revisão sobre fraturas ortopédicas comuns na

³ **Fratu** **por estresse**: ou fratura de fadiga, são fraturas parciais ou completas que tem origem em fissuras microscópicas nos ossos, causadas por ciclos repetidos de carga/impacto, com forças menores que a força suficiente para causar uma fratura se aplicada uma única vez.

prática militar que, do universo de mais de 400 artigos científicos identificados sobre o tema, 150 artigos versavam sobre etiologia⁴, e somente nove das intervenções examinadas tratavam sobre a profilaxia⁵, sendo estas nove realizadas por militares. Ainda, sobre os artigos pesquisados o autor relata que, de 52 textos tratando de fatores de risco de fraturas por estresse, 42 eram estudos militares. Tais resultados remontam à importância do assunto para as forças armadas.

Não somente em atividades consideradas de alto impacto, mas também devido ao número de repetições de uma tarefa, Grier *et al.* (2010) apresentaram um estudo feito com a tropa da Banda de Música do Exército Americano, que tem como rotina centenas de apresentações marchando durante o ano e ficando muito tempo em pé. Estes militares foram avaliados por intermédio de questionários e receberam novos sapatos especialmente desenvolvidos com características para atenuar o desgaste das atividades. Tais sapatos apresentavam maior capacidade de absorção de choque, melhor conforto térmico e flexibilidade.

House *et al.* (2002) apresentaram um teste feito com militares para atenuar os problemas desencadeados por exercícios desgastantes. Foram avaliadas palmilhas especiais que mesmo depois de degradadas, simulando utilização por mais de 100 km de corrida, continuaram tendo a função de reduzir significativamente as pressões sofridas na planta dos pés. Também por meio de experimentos, Windle *et al.* (1999) apresentam uma pesquisa sobre quatro tipos diferentes de palmilhas utilizadas dentro de botas militares durante a corrida de soldados, e os efeitos de redução de impacto transmitido para a planta dos pés. Corroborando as pesquisas sobre o efeito positivo da utilização de palmilhas especiais em botas militares, Larsen *et al.* (2002) concluíram que as fraturas por estresse podem ser reduzidas com o uso de palmilhas.

Assim, ao se considerarem os possíveis problemas decorrentes da utilização de coturnos nas atividades realizadas no dia a dia dos militares, coube ao autor desta dissertação retomar durante a pós-graduação em Engenharia de Produção, uma área multidisciplinar – a ergonomia – e tentar fornecer subsídios para melhorar as condições dos militares no que tange a ferramenta de trabalho mais comum a todos os quartéis e missões do EB, o coturno.

⁴ **Etiologia:** Ciência das causas, da origem das coisas. Parte da medicina que pesquisa as causas das doenças.

⁵ **Profilaxia:** Parte da medicina focada na prevenção de doenças ou lesões.

2.2. ERGONOMIA FÍSICA

Visando apresentar conceitos, explicar ferramentas, e desenvolver aplicações para a solução do problema proposto nesta dissertação, este tópico aborda informações relatadas por Iida (2005), pois seu autor é considerado testemunho vivo da disciplina Ergonomia no Brasil. De forma a se ressaltar as características específicas das atividades desenvolvidas pelos militares, far-se-á também menção à obra de Kroemer & Grandjean (2005).

Em Iida (2005), constata-se que a ergonomia surgiu e cresceu de forma regulamentada logo após a 2ª GM, como consequência da união de diversos profissionais, tais como engenheiros, fisiologistas e psicólogos, trabalhando de forma interdisciplinar na busca em resolver problemas relacionados a grande demanda de produção do esforço de guerra. O surgimento e a adequação de novos produtos, máquinas e tecnologias, como, por exemplo, armamentos, submarinos, carros de combate, radares e aviões também contribuíram para tal crescimento. Porém, o primeiro registro desse termo, derivado das palavras gregas *ergon* (trabalho) e *nomos* (lei natural), data de 1857, quando Wojciech Jastrzębowski o usou em um artigo.

Apesar de ter surgido na década de 40, principalmente com aplicação na área militar, foi na década de 50, com a fundação da *Ergonomic Research Society*, na Inglaterra, a primeira associação nacional de Ergonomia, que se deu o reconhecimento desta disciplina científica. E foi a partir daí que a Ergonomia se desenvolveu em outros países industrializados e em vias de desenvolvimento e se expandiu para a aplicação industrial.

Segundo a *Ergonomic Research Society*, da Inglaterra, constata-se a mais antiga definição apresentada:

Ergonomia é o estudo do relacionamento entre o homem e seu trabalho, equipamento, ambiente e particularmente, a aplicação dos conhecimentos de anatomia, fisiologia e psicologia na solução dos problemas que surgem desse relacionamento.

De acordo com a Associação Brasileira de Ergonomia:

Entende-se por Ergonomia o estudo das interações das pessoas com a tecnologia, a organização e o ambiente, objetivando intervenções e projetos que visem melhorar de forma integrada e não dissociada a segurança, o conforto, o bem-estar e a eficácia das atividades humanas.

A ergonomia trata da ciência da *adaptação do trabalho ao homem*. Sendo este conceito de trabalho bastante amplo, pode-se considerar a máquina, a estação de trabalho, bem como seus móveis e dimensões, a ferramenta, e todos os objetos com os quais o homem deve interagir para executar uma tarefa, sempre visando facilitar e aumentar o rendimento da mesma, com o menor desgaste possível. Esta integração deve ser considerada não somente quanto aos aspectos físicos, mas quanto aos aspectos cognitivos, sociais, organizacionais e ambientais, dentre outros.

De forma internacional, adota-se a conceituação da *International Ergonomics Association*, aprovada no último Conselho Científico em 2000:

Ergonomia (ou Fatores Humanos) é a disciplina científica que trata da compreensão das interações entre os seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teorias, princípios, dados e métodos, a projetos que visam otimizar o bem estar humano e a performance global dos sistemas.

Em Iida (2005, p.3), a ergonomia é dividida em três domínios de especialização, descritos a seguir:

- Ergonomia Cognitiva – relacionada aos processos mentais, e respostas motoras, em relação às interações entre o sistema / equipamentos e os homens. Pode-se ressaltar a tomada de decisão, o desempenho especializado, a carga mental de trabalho, interação homem-computador e estresse, conforme estes assuntos se relacionam ao envolvimento dos trabalhadores e sistemas em um projeto.
- Ergonomia Organizacional - está focada na otimização dos sistemas sócio-técnicos, incluindo suas estruturas organizacionais, corporativas, processos e negócios. Envolve aspectos interdependentes, dentre os quais citam-se: repartição de tarefas no tempo, sistemas de comunicação, gestão do trabalho, formas de estabelecimento de procedimentos de produção e gestão da qualidade.
- Ergonomia Física – nesta área a atenção é voltada para as características da anatomia humana, antropometria, fisiologia e biomecânica, relacionados com a atividade física. Através da interação física do homem com o ambiente de trabalho, equipamentos, e ferramentas, deve-se estudar fatores tais como repetição, vibração, força e postura estática, relacionada com lesões musculoesqueléticas, projeto de postos de trabalho, segurança e saúde do trabalhador.

Avançando os estudos de Kroemer & Grandjean (2005, p.81), ao apresentarem o tema Trabalho Pesado, constata-se a seguinte definição:

Trabalho pesado é qualquer atividade que exige grande esforço físico e é caracterizada por um alto consumo de energia e grandes exigências do coração e pulmões. O consumo de energia e o esforço cardíaco impõem limites ao desempenho sob trabalho pesado, e estas duas funções são geralmente usadas para avaliar a severidade do trabalho físico.

Percebe-se que os militares costumam fazer grande parte dos exercícios e treinamentos sob as condições de um trabalho pesado, devido ao fato de eles transportarem cargas em ombros ou braços, atravessando terrenos de todos os tipos.

Segundo Kroemer & Grandjean (2005), pode-se comparar a diferença de demanda energética em quilojoules (kJ) por minuto (min) de exercício. A atividade de caminhada em superfície macia e nivelada a uma velocidade de 4 km/h demanda 8,8 kJ/min de energia, enquanto que a caminhada com carga de 30 kg também a uma velocidade de 4 km/h demanda 22,3 kJ/min.

Usando as palavras de Kroemer & Grandjean (2005, p.85), “em todo tipo de trabalho pesado, é importante realizá-lo sob máxima eficiência fisiológica, não apenas para economizar energia, mas também para minimizar estresse para o operador”. Esse autor cita ainda Hettinger e Müller (1953), mencionando a velocidade mais eficiente de andar como sendo de 4 a 5 km/h, e esta reduzida para 3 a 4 km/h com o uso de sapatos pesados. No viés dessa informação pode-se destacar o trabalho de Scott & Christie (2004), meio século mais recente e realizado no meio militar, onde os autores encontraram três combinações mais eficientes para manobras militares, sendo estas as seguintes combinações de velocidade de marcha e carga transportada por indivíduo: 3,5 km/h com 50 kg, 4,5 km/h com 35 kg e 5,5 km/h com 20 kg de carga. Nesse sentido, pode-se constatar que o Manual de Marchas a Pé, do EB, prevê uma velocidade dentro dos padrões apontados pelas pesquisas supracitadas, quando preconiza para marchas diurnas com velocidade 4,8 km/h, e para marchas noturnas 3,6 km/h, o transporte de 18 a 22 kg.

Knapik (1989) ressalta que a carga carregada nos pés representa um aumento de desgaste energético de 0,7 a 1,0 % para cada 0,1 kg. Nesse sentido, Perry (2005, p.101) relata que “A colocação de uma carga de 20 kg no tronco de um homem não resultou em um aumento mensurável na taxa de gasto energético.

Por outro lado, uma carga de 2 kg colocada em cada pé, aumentou a taxa do oxigênio captado em cerca de 30%”. Conforme expõe Taylor *et al.* (2011), uma pesquisa feita comparando desgaste energético absoluto e relativo dentre uma série de itens da vestimenta e do equipamento militar, o peso do coturno apresenta a maior relevância, pois remover 0,1 kg de cada calçado, equivaleria, no que tange ao desgaste metabólico, a reduzir a massa de um equipamento de cilindro de oxigênio para respiração em 1,74 kg.

Importante ressaltar outro fator que pode causar grande desconforto para o homem - a vibração absorvida pelo corpo quando um pé entra em contato com o solo durante a caminhada. De acordo com Kroemer & Grandjean (2005), as vibrações no ser humano são produzidas por movimentos periódicos regulares ou irregulares, que o deslocam da posição de repouso. As vibrações podem causar desde um transtorno menor, até um transtorno insuportável, dependendo da frequência das oscilações⁶, da aceleração das oscilações⁷ e da duração da exposição. Corroborando essa idéia, Iida (2005) relata que o homem está exposto a vibrações diárias nas mais diversas situações, porém o efeito das vibrações sobre o organismo na faixa de frequência de 4 a 8 Hz são as que geram maiores incômodos. O referido autor ressalta ainda que entre 1 e 80 Hz, as vibrações “provocam lesões nos ossos, juntas e tendões”. O exposto mostra relevância nessa dissertação, pois Hwang (2006) mensurou as ondas de vibração do impacto do contato do pé com o solo durante a caminhada, e constatou que estão concentradas em uma faixa de frequência de 8 a 30 Hz. Levinger *et al.* (2008), em sua pesquisa sobre processamento de sinais de aceleração durante a caminhada, conseguiu captar vibrações na tíbia entre os valores de 1 a 20 Hz.

Segundo Kroemer & Grandjean (2005), as queixas do ser humano sobre o incômodo gerado pelas vibrações são dependentes da faixa de frequência a que a pessoa está exposta. Ressaltam-se aqui três faixas citadas por esses autores, de 4 a 10 Hz, de 8 a 12 Hz e de 10 a 20 Hz, que causam, respectivamente, reclamações sobre: reações musculares e desconforto severo, dor nas costas, e tensão muscular

⁶ “A extensão dos efeitos biomecânicos e geralmente patológicos das vibrações é dependente da frequência. As frequências particularmente importantes são aquelas na faixa das frequências naturais do corpo e, assim, causam ressonância”. (Kroemer & Grandjean, 2005:273)

⁷ “Dentro da faixa de frequência que é fisiologicamente importante, a aceleração das oscilações é geralmente tomada como medida da carga vibracional. Uma referência comumente usada é a aceleração pelo efeito da gravidade ($g=9,8 \text{ m/s}^2$). (Kroemer & Grandjean, 2005:273)

e dores de cabeça. Ressonância⁸ é o fenômeno físico responsável pelo agravamento desses desconfortos, pois conforme relata Iida (2005), cada estrutura do organismo humano tem uma frequência específica que o faz entrar em ressonância. Interessante mencionar que, de acordo com esse autor, essa frequência de ressonância para o corpo inteiro é de 4 a 5 Hz e de 10 a 14 Hz, causando desconforto geral, para os ombros é de 2 a 10 Hz, por exemplo.

Cabe frisar aqui algumas informações a respeito de materiais para fabricação de calçados e pesquisas sobre absorção de impacto de solados, pois conforme estudo de Silva *et al.* (2009), este é um desafio atual do mercado de calçados, que tem como um dos objetivos melhorar o conforto. Essa pesquisa menciona ainda que a propriedade de absorção de impacto é uma das características que mais afetam o conforto. Para estudar essa questão, os autores realizaram testes físicos com diversos tipos de solados (SBR e NR, dentre eles) e através de correlações entre o binômio energia de compressão/dureza e energia de compressão/desaceleração máxima, concluíram que apesar de vários fatores influenciarem (calçado completo, *espessura* e *formato do solado*, *estrutura interna* e *propriedades específicas de amortecimento de diferentes materiais*), a situação ideal seria um equilíbrio entre a dureza e a capacidade de absorção de impacto do solado. De acordo com Wilson (2006), citado por Silva *et al.* (2009), a espessura da borracha é o principal fator para determinar as propriedades de absorção de impacto, e a composição do material é fator chave nas propriedades mecânicas de dureza e restituição elástica de energia.

Retomando Iida (2005), tem-se que a ergonomia é uma ciência experimental, se assemelhando as ciências naturais e sociais, que constroem os seus conhecimentos a partir de observações, experimentações e pela mensuração dos fenômenos, em condições controladas e comprovadas. Logo, esta dissertação, por sua característica experimental e quantitativa, vai se ater à área denominada de Ergonomia Física. No caso dos militares, a marcha é uma das atividades primordiais e mais comuns, seja qual for o setor de trabalho do militar.

Cabe ressaltar que os trabalhos de Lafortune *et al.* (1995), Mizrahi *et al.* (2000), Bernmark & Wiktorin (2002), King (2002), Tsuruoka *et al.* (2005),

⁸ Ressonância: quando um sistema é submetido a uma frequência igual a sua frequência natural de vibração, ele passa a ter o maior estado de energia, com velocidade e deslocamento máximos. (Halliday et al., 1996)

Hwang (2006), Liikavainio *et al.* (2007), Kavanagh & Menz (2008), Turcot *et al.* (2008), Godfrey *et al.* (2008) e Guisande & Mochizuki (2009) podem ser considerados estudos ergonômicos, uma vez que envolvem a marcha humana analisada de forma experimental por estudos biomecânicos. Essas pesquisas corroboraram o embasamento científico para a realização dessa dissertação.

Feitas breves referências às questões ergonômicas, julga-se necessário expor informações sobre as ferramentas utilizadas para medir e avaliar as condições atuais de interação do soldado com o calçado militar utilizado, o coturno, e para tanto foi necessário resgatar conhecimentos da biomecânica, e ainda detalhá-los discorrendo sobre acelerometria, análise de marcha e cinemetria.

2.3. BIOMECÂNICA

Por intermédio de análises físicas, a biomecânica consiste na aplicação da mecânica aos sistemas biológicos, visando o entendimento dos movimentos do corpo humano, seja em gestos quotidianos, de trabalho ou de esporte. O estudo das tarefas motoras é feito com apoio de ferramentas da mecânica, dentre elas, estruturas de dados, cálculos matemáticos e gráficos. De acordo com Hall (1993), a dinâmica (uma área da mecânica) é o estudo dos sistemas em movimento nos quais a aceleração está presente. Deste modo, a fim de caracterizar os gestos motores de acordo com aspectos dinâmicos, o estudo biomecânico pode envolver a cinemática⁹ e a cinética¹⁰.

Segundo Winter (1990), o interesse a respeito dos padrões de locomoção dos seres humanos remonta aos tempos primitivos, onde se via representações registradas nas pinturas rupestres e nas estátuas. Já os registros mais antigos sobre padrões de locomoção gravados com as primeiras câmeras para análise do movimento datam de dois séculos atrás. Dado o grande avanço tecnológico, agora, se pode registrar e analisar todos os movimentos, desde a marcha de uma criança com paralisia cerebral até o desempenho de um atleta de elite.

Esta dissertação, ao estudar os padrões atuais de locomoção dos militares do EB utilizando diferentes coturnos, adota o enfoque cinemático, ou seja, o estudo

⁹ **Cinemática:** estudo da descrição do movimento incluindo considerações de espaço e de tempo. (Hall, 1993)

¹⁰ **Cinética:** estudo das forças causadoras ou resultantes do movimento. (Hall, 1993)

não se ateu às forças, internas ou externas, que causam o movimento, mas sim aos detalhes do próprio movimento. De acordo com Winter (1990), a descrição quantitativa completa e precisa de um simples movimento requer grande volume de dados e cálculos, mas deve ser entendido que análises podem usar apenas uma pequena fração das variáveis cinemáticas disponíveis. Uma avaliação de um salto com uma perna após a corrida curta, por exemplo, pode exigir apenas a velocidade e altura do centro de gravidade do corpo. Por outro lado, uma análise de energia mecânica da marcha de um amputado pode exigir quase todas as variáveis cinemáticas envolvidas.

Visando descrever o movimento e manter o controle das variáveis cinemáticas, cabe frisar alguns conceitos com origem na literatura anatômica, dentre eles: *plano sagital* - plano vertical que corta o corpo longitudinalmente, dividindo-o em duas metades (direita e esquerda), *proximal* - situado mais próximo à sua fixação ou sua origem, *distal* - situado mais distante à sua fixação ou sua origem, *anterior* - na face anterior, frontal ou ventral do corpo, *posterior* - na face posterior ou dorsal do corpo, *medial* - próxima ou mais próxima do plano mediano do corpo, *lateral* - está mais afastado do plano mediano, *superior* - situado mais próximo ao vértice ou do ponto mais alto do crânio, *inferior* - situado mais próximo à planta dos pés. Os termos de localização citados são relativos, ou seja, eles descrevem a posição de um membro em relação a outro, e não dão referência quanto à posição no espaço, e podem ser vistos na Figura 3.

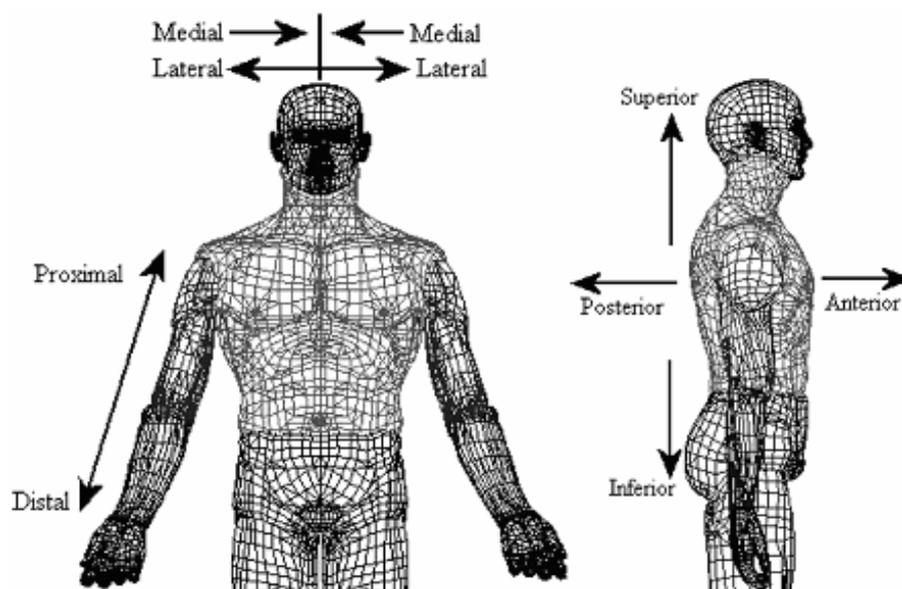


Figura 3. Termos anatômicos para descrever posição e direção (Godfrey, 2008).

Para analisar os movimentos em relação ao solo, ou à direção da gravidade, é necessário utilizar um sistema espacial de referência absoluta. De acordo com Winter (1990), este sistema organiza-se nas direções: vertical, de progressão (anterior-posterior), e lateral (medial-lateral), representadas por Y, X, e Z, respectivamente. A padronização para velocidades e acelerações segue as mesmas convenções de sentido e direção supracitadas e podem ser vistas na *Figura 4*.

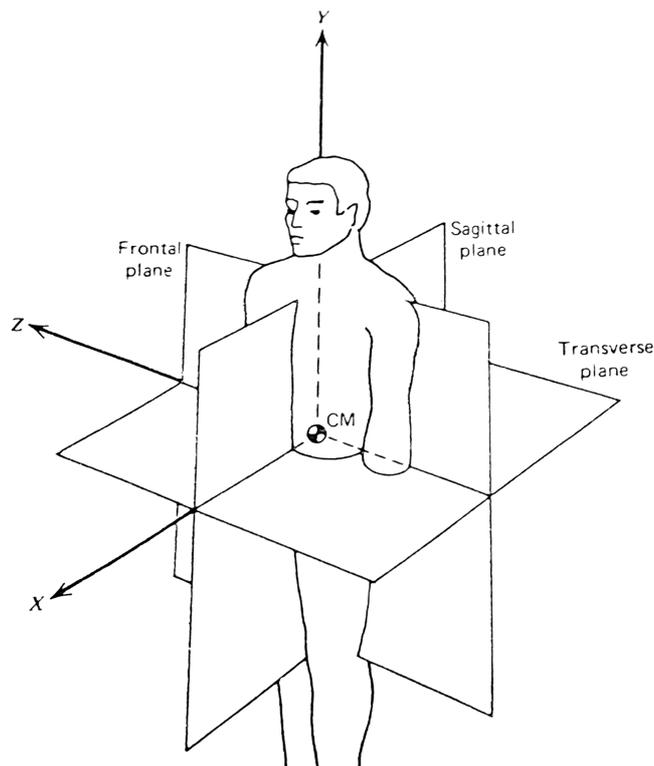


Figura 4. Sistema de coordenadas para análise de movimento (Winter, 1990:13)

2.3.1. ACELEROMETRIA

Para realizar a análise cinemática pode-se lançar mão de uma técnica de medição direta, a *acelerometria*. Winter (1990) menciona que esse método consiste na utilização de pequenos instrumentos eletrônicos denominados acelerômetros, que são transdutores de força fabricados para mensurar as acelerações provocadas e sofridas pelo corpo humano. Retomando Cunhane *et al.* (2005) e Saunders *et al.* (1953), ambos citados por Godfrey (2008), pode-se dizer que os acelerômetros foram concebidos por volta de 1950, para monitorar o movimento humano, porém devido ao seu custo e tamanho naquela época, foram considerados inadequados para esse fim. Considerando Morris (1973), também citado por Godfrey (2008), os avanços da ciência e tecnologia fizeram ressurgir

por volta de 1970 os estudos do movimento humano utilizando a acelerometria. Esse autor sugeriu ainda que o uso de acelerometria como uma medida quantitativa para definir completamente o movimento de um corpo no espaço tinha muitas vantagens sobre a cinematografia e a eletrogoniometria, comumente usadas até aquela época.

De acordo com Kavanagh & Menz (2008), os benefícios atuais do uso de acelerômetros para avaliar o movimento são: o baixo custo em comparação com equipamentos geralmente utilizados em laboratórios de marcha; testes não se restringem a um ambiente de laboratório; acelerômetros são dispositivos pequenos que permitem o sujeito andar relativamente sem restrições; a existência de uma larga variedade de modelos de acelerômetros nas mais diversas faixas de amplitude e sensibilidade para mensuração, e medição direta das acelerações nas três dimensões eliminando os erros associados à diferenciação dos dados deslocamento e velocidade.

Segundo Godfrey *et al.* (2008), a implementação desta técnica obteve sucesso, pois consome pouca energia, possibilita a monitoração não somente em laboratórios, e as informações quantitativas e qualitativas fornecidas por estes sensores tornou possível para engenheiros, clínicos e médicos trabalharem juntos e estarem aptos a entenderem o movimento humano e a ajudarem as pessoas com suas pesquisas.

Kavanagh & Menz (2008), relatam que as classes de acelerômetros comerciais mais comuns para a investigação do movimento humano são *strain gauge*, piezoresistivo, capacitivo e piezelétrico. O mecanismo básico de medição da aceleração é muitas vezes descrito em termos de um sistema massa-mola, que opera sob os princípios da Lei de Hooke ($F = kx$, onde F representa a força, k a constante de característica da mola e x o deslocamento), e também da 2^a Lei de Newton ($F = ma$, onde F representa a força, m a massa e a a aceleração¹¹).

O acelerômetro capacitivo opera com o princípio da mudança de capacitância, através da mudança da posição da placa móvel central, pois a movimentação da mesma é proporcional à aceleração aplicada, esquema

¹¹ É uma grandeza vetorial de dimensão comprimento/tempo² que expressa a taxa de variação (ou derivada em função do tempo) da velocidade. Em unidades do Sistema Internacional, é quantificada em m/s². Um valor bastante utilizado é g , que consiste na aceleração causada pela gravidade da Terra ao nível do mar, cerca de 9,81 m/s².

exemplificado pela *Figura 5*, registrando assim os desequilíbrios do movimento em equivalente variação de voltagem. Conhecendo os parâmetros de configuração do dispositivo, e considerando seu funcionamento linear dentre os limites definidos para a utilização, basta fazer a conversão de volts para o valor correspondente em aceleração ou gravidades. Este transdutor possibilita a quantificação do impacto¹² transmitido ao corpo durante o contato do pé com o solo.

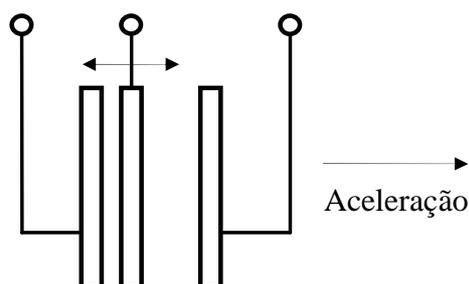


Figura 5. Esquema representativo do acelerômetro capacitivo

Whittle (1999) e Voloshin (2000), ambos citados por Hwang (2006, p.30), mencionam que “o *padrão ouro* para medidas de acelerações corporais consiste na inserção cirúrgica de um ou mais transdutores diretamente nos ossos (...) ‘*Bone Mounted Accelerometers – BMA*’ (Acelerômetros Montados nos Ossos)”, cuja ilustração por ser constatada na *Figura 6*. Porém este método apresenta impedimentos críticos para pesquisas em ambiente de laboratório de biomecânica, pois só pode ser realizado com intervenção cirúrgica através de uma técnica invasiva, por uma equipe médica especializada, além de poder trazer riscos para a saúde dos voluntários. Retomando Whittle (1999), Voloshin (2000) e Derrick & Mercer (2004), todos citados por Hwang (2006), foi validada a técnica identificada de “*Skin-Mounted Accelerometers ou SMA*” (Acelerômetros Montados na Pele) para realizar tais medições, tratando-se de um método não invasivo.

¹² **Impacto:** colisão caracterizada pela ação de uma grande força por um curto intervalo de tempo. (Hall, 1993:314)

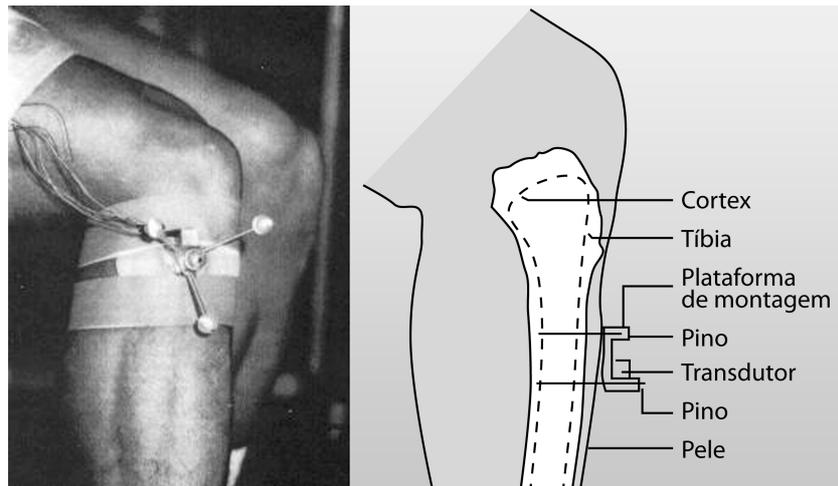


Figura 6. Ilustração da montagem com BMA na tíbia (adaptado de Hwang, 2006)

Para Ziegert & Lewis (1979), citados por Hwang (2006), ao pesquisarem as diferenças entre os métodos BMA e SMA, a respeito da influência dos tecidos moles, constataram que a validade do SMA estava diretamente ligada à massa do acelerômetro, pois foram obtidos resultados bastante precisos com sensores de menor massa. Outra variável que mostrou grande importância foi a rigidez entre o acelerômetro e o osso. Tais conhecimentos ressaltaram algumas recomendações para tornar a medição pela técnica SMA mais precisa, dentre elas: utilizar acelerômetros de massa reduzida; escolher um local para fixação na pele que tenha a menor espessura possível de tecido mole para o contato com o osso; e por fim, prender o sensor de forma firme sobre a pele evitando o movimento do mesmo em relação ao osso. Cappozzo *et al.* (1996) citado por Kavanagh & Menz (2008) afirma também que para obter dados precisos nas medições por acelerometria, é imprescindível escolher acidentes ósseos¹³ para posicionar os sensores, e fixá-los firmemente sobre esses pontos, através de bandagens elásticas e velcros.

Para Mathie *et al.* (2004) citado por Godfrey *et al.* (2008), os fatores importantes para garantir a qualidade dos dados extraídos de uma mensuração de movimento através da acelerometria são: a posição onde o acelerômetro é colocado; sua orientação neste local; a posição do indivíduo; e a forma de fixação do mesmo no indivíduo. De acordo com Liikavainio *et al.* (2007), a utilização da

¹³ **Acidentes ósseos:** são formações existentes na superfície óssea (geralmente proeminências) de forma a permitir a realização de alguma função, como a inserção para músculos ou a passagem de vasos sanguíneos, por exemplo.

técnica SMA, para avaliação de marcha, fixando os acelerômetros logo abaixo do joelho, apresentaram resultados com repetibilidade e confiabilidade muito boa.

Para realizarem estudos cinemáticos da marcha humana com a técnica de acelerometria, Mizrahi *et al.* (2000), Flynn *et al.* (2004), Hwang (2006), Liikavainio *et al.* (2007), Levinger *et al.* (2008), Wüst (2009) e Clark *et al.* (2010) adotaram a tuberosidade da tíbia como acidente anatômico para fixar o acelerômetro. Desta forma, concluiu-se que este ponto de aplicação possibilita a avaliação de parâmetros biomecânicos necessários para a medição de valores de pico de aceleração tibial e a comparação da transmissão de impacto.

O sinal gerado pelo transdutor de acelerometria pode ser gravado e precisa ser tratado por intermédio de métodos matemáticos computacionais, possíveis com apoio de programas computacionais, tal como o Matlab v.7.10 (The MathWorks, EUA). O estudo pode ser realizado tanto no domínio da frequência quanto no do tempo. O cálculo de valores como médias, variâncias, pontos de inflexão e pontos de máximo, a amplitude do sinal e seu comportamento, por meio do cálculo da raiz média quadrática (RMS), permitem uma comparação e graduação de intensidade entre as situações avaliadas no domínio do tempo. Já os valores encontrados através da FFT (Transformada rápida de Fourier), da frequência máxima (FM) e da Densidade Espectral de Potência (PSD) possibilitam o estudo no domínio da frequência. Para Godfrey *et al.* (2008), as pesquisas mais recentes em acelerometria utilizam este tipo de análise, pois avaliando o espectro de frequência por meio da FFT, possibilitam registrar e comparar a intensidade de seus componentes em bandas específicas. Porém, esses autores mencionam ainda que a FFT não fornece dados temporais de ocorrência dessas componentes de frequência. Logo, ao empregar a FFT deve-se considerar o sinal de acelerometria como uma onda estacionária, ou então buscar qual o espectro de componentes de frequência independente do momento de ocorrência dos mesmos.

Segundo Kavanagh & Menz (2008), a melhor utilidade para o acelerômetro durante a análise de marcha é para determinar eventos de contato do pé com o solo, através da análise do sinal no domínio do tempo. É possível, também, decorrente do cálculo do período entre sucessivos picos de acelerações, estimar a duração da passada, a cadência, o comprimento do passo e avaliar a simetria da caminhada. Esses mesmos autores relatam que a análise do sinal de aceleração no

domínio da frequência fornece informações adicionais sobre como o sistema locomotor coordena os movimentos, atenua as vibrações e se acomoda às alterações. Retomam-se, ainda, sobre estudos no domínio da frequência, os resultados encontrados por Hwang (2006), onde o autor constata que a função PSD, através do método *periodograma de Welch*, revela duas bandas de frequência bem distintas. Essa distinção evidencia sinais de baixa frequência decorrentes do movimento, e sinais de alta frequência (8 - 30 Hz) devido às acelerações das ondas de choques dos impactos no contato inicial.

Destaca-se nesse viés, a pesquisa de Levinger *et al.* (2008), que incentiva novos estudos para entendimento de quais seriam os mecanismos biomecânicos que influenciam as frequências mais altas durante o ciclo de marcha. Usando a função FFT, esses autores encontraram com a acelerometria sinais na faixa de frequência de 1-20 Hz, porém, relataram ter observado pacientes com problema de ósteo-artrite no joelho com diferenças significativas no eixo vertical para intensidades de frequência superiores a 5 Hz.

O exposto corrobora as idéias de Turcot *et al.* (2008) que, durante as atividades locomotoras, a quantificação das acelerações segmentares permite a avaliação do equilíbrio, bem como a transmissão do impacto entre os segmentos corporais adjacentes. Os padrões da acelerometria e, também, os picos de aceleração, são então utilizados para identificar as diferenças entre a marcha patológica e a marcha normal, as diferenças entre formas de locomoção, e podem ser influenciados pelo efeito de absorção de diferentes tipos de calçados.

Seguindo os conceitos de utilização de acelerômetros, as pesquisas de Furlanetto *et al.*¹⁴ (2011), comparam o comportamento da aceleração tibial em movimentos de locomoção com e sem o uso de calçado. Para esta análise e as demais citadas nesta Seção (todas tendo por equipamento de medição o acelerômetro), é necessário definir alguns conceitos sobre a locomoção humana, presentes na Seção 2.3.2.

¹⁴ Grupo de pesquisa pertencente ao Laboratório de Biomecânica do Instituto Brasileiro de Tecnologia do Couro, Calçados e Artefatos, que tem por finalidade apresentar soluções tecnológicas para todo o sistema coureiro-calçadista nacional.

2.3.2. ANÁLISE DE MARCHA

Segundo Perry (2005), a forma natural do corpo se deslocar por distâncias curtas de um local ao outro é considerada marcha. Os membros inferiores do corpo humano apresentam uma grande versatilidade funcional para se adaptar a degraus, obstáculos e mudanças de superfície durante sua movimentação. Como termo militar, a palavra marcha tem mais de um significado. Existe a marcha cadenciada, antigamente nomeada de marcha balística (Grier, 2011), que são os movimentos utilizados para desfiles. Há também a marcha a pé (Manual de marchas a pé, Estado Maior do Exército, 1980), representando um deslocamento tático de militares, por não haver transporte motorizado disponível, por ser um deslocamento curto, ou, como na maioria das vezes, por ser um exercício militar. Todas as definições citadas consistem no deslocamento humano bipodal.

Para se estudar a marcha é conveniente definir alguns termos. De acordo com Perry (2005), a marcha é representada por uma sequência de repetições de movimento das partes do corpo (*Figura 7*), para movê-lo para frente enquanto, ao mesmo tempo, mantém a postura estável. O *ciclo de marcha* (CM) pode ser caracterizado por uma sequência de movimentos que ocorre do instante em que um dos pés deixa o chão para avançar a uma nova posição, enquanto o outro pé está como fonte móvel de apoio no solo. Existe nesse ínterim, a situação em que os dois pés estão em contato com o solo, quando ocorre a transferência de peso do corpo de um membro para o outro. Esta é chamada de fase de duplo apoio. Como a movimentação acontece de forma contínua, o início e fim do CM poderia ser adotado em qualquer instante. Por convenção, o contato do pé direito com o solo é geralmente adotado como início do ciclo completo de marcha e marca o início da fase de apoio. A perda do contato do pé com o solo marca o início da fase de balanço. Na marcha normal esses eventos correspondem ao toque do calcanhar no solo e à perda de contato do hálux com o solo, respectivamente. Dá-se ao evento do contato do calcanhar com o solo a denominação de *contato inicial*. A expressão *passada* representa o intervalo do contato do calcanhar com o solo do pé direito até o próximo contato inicial do pé direito, e é equivalente a um CM.

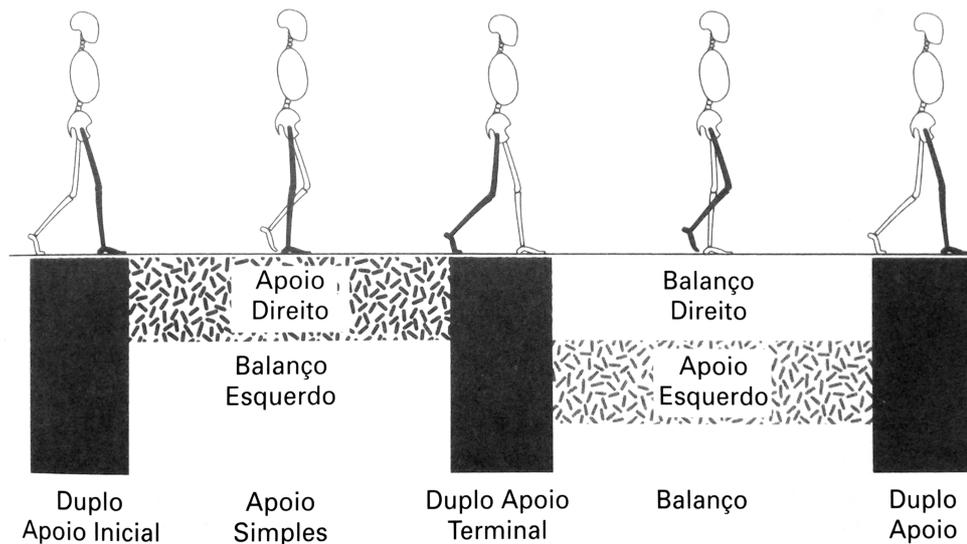


Figura 7. Fases da marcha (Perry, 2005:3)

Perry (2005) menciona, ainda, que durante os instantes em que o corpo se movimenta para frente e o pé vai tocar o solo, decorrente de características físicas, biomecânicas e anatômicas, existe uma fase curta de queda livre (*Figura 8*) que resulta em uma carga abrupta para o membro que está à frente (60% do peso do corpo em 0,02 segundos). Essa ocorrência é consequência ainda de uma transferência abrupta do peso do corpo da parte posterior para a anterior do pé. Conforme menciona esse autor, o corpo humano tem três padrões de movimento responsáveis por absorver a intensidade completa do impacto do contato inicial, sendo eles: a flexão plantar do tornozelo – reação imediata ao contato inicial; a flexão do joelho – segundo mecanismo mais eficiente de absorção; e o movimento de queda pélvica no quadril. Isto é, uma sequência de ações musculares é responsável por absorver gradualmente o impacto a cada ciclo de passada.

Existem acessórios para os calçados atualmente que podem auxiliar estes mecanismos biomecânicos, como visto na pesquisa apresentada por Windle *et al.* (1999) envolvendo quatro tipos de palmilhas utilizadas para reduzir o pico de pressão no calcanhar, onde compara o desempenho das botas militares por meio de um equipamento de medição de pressão colocado dentro dos coturnos.

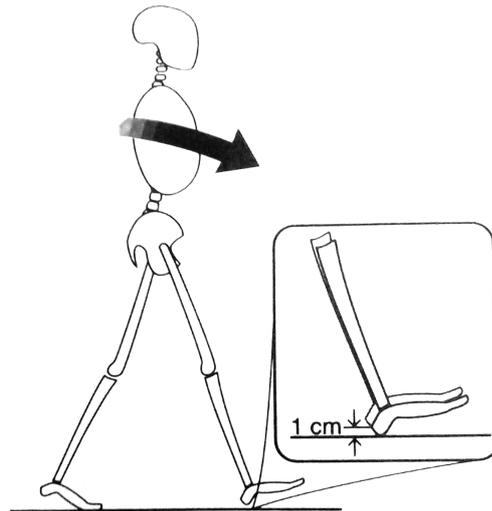


Figura 8. Contato com o solo abrupto (Perry, 2005:35)

Para Amadio (1996), Winter (1990) e David (2005), todos citados por Wüst (2009), existe um tempo de latência desde o instante que o calcanhar toca o solo, até o sistema nervoso responder a esse estímulo com uma sequência de ativações musculares. Esse tempo é de 60 a 100 ms, e durante este período, toda força de impacto incide diretamente sobre as estruturas passivas de absorção do aparelho locomotor, principalmente os ossos e articulações.

Simon *et al.*, citado por Guisande e Mochizuki (2009), declararam que os tecidos moles tem pouca função na atenuação da força de impacto do calcâneo contra o solo, por causa do atraso que ocorre desde o efeito do impacto na articulação até a ativação muscular. Relatos semelhantes são feitos por Smeathers (1989), Whittle (1999) e Voloshin (2000), citados por Hwang (2006), que registraram através de plataformas de força, no instante de impacto do calcanhar com o solo, uma força transiente do contato inicial, antes do pico passivo da força de reação vertical do solo. Segundo os mesmos autores, esse impacto ocorre em um período de 10 a 40 ms, e se propaga do calcanhar até o crânio, através de toda estrutura corporal. Tal constatação é determinante para que se estude e entenda os fatores envolvidos no evento do contato do pé com o solo, como as características dos calçados, que alteram toda adaptação muscular da estrutura corporal e a forma como esta responde a este evento.

Na vertente da caracterização de calçados, o estudo apresentado por Wüst (2009) estabelece o Índice de Correlação de Pearson em 0,447 (moderado) entre o

pico de aceleração tibial e a taxa de aceitação de peso¹⁵ (TAP). Esse autor comparou quatro tipos de calçados através do Índice de Amortecimento¹⁶ (IA), porém baseou sua pesquisa na NBR 14838:2008 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, norma essa que foi cancelada em 6 de fevereiro de 2011 e substituída pela NBR 14838:2011. Para os cálculos de TAP e IA é necessário utilizar um espaço específico para análise de marcha com plataformas de força, porém estes recursos não estão disponíveis no laboratório onde os testes desta dissertação ocorreram.

2.3.3. CINEMETRIA

Existem equipamentos de captura de movimento ótico e optoeletrico disponíveis para gravar sequências de gestos humanos com alta precisão e frequência de amostragem. Os dados cinemáticos destes instrumentos podem ser utilizados em conjunto com outras técnicas como a acelerometria para que, através de programas computacionais, sejam calculadas variáveis de interesse.

De acordo com Perry (2005), os sistemas com diodos que emitem luz, considerados marcadores ativos, são denominados optoeletricos. Já o sistema de vídeo que captura a reflexão de marcadores passivos, por sua vez, é chamado de equipamento ótico de captura de movimento. Este sistema de medição utiliza marcadores que refletem luz infravermelha projetada a partir das câmeras. A posição no espaço destes marcadores é identificada automaticamente pelo sistema por meio da determinação do centro da “área luminosa” capturada. Para que seja possível o sistema montar as coordenadas espaciais dos marcadores durante o movimento avaliado, são necessárias informações de no mínimo duas ou mais câmeras, que controladas por uma unidade central de processamento possibilita o cálculo das coordenadas em três dimensões. Porém, esse sistema demanda alguns cuidados em sua montagem e calibração e está sujeito a problemas como: a excessiva rotação durante o movimento; alguma parte do corpo ocultando a outra durante o gesto motor; ou ainda o fato da sobreposição de marcadores no campo

¹⁵ TAP: razão entre a variação da componente vertical da força de reação do solo no intervalo de 10% a 20% do Primeiro Pico de Força e sua componente temporal, durante a marcha descalça e com diferentes tipos de calçados.

¹⁶ IA: diferença percentual entre a TAP descalça e a TAP com calçado.

de captura das câmeras.

Segundo O'Connor *et al.* (2007), a determinação dos principais eventos da marcha é essencial para o estudo de praticamente todos os aspectos da análise cinemática da caminhada. Retoma-se entre eles o toque do calcanhar no solo, o contato inicial (CI), que marca o início do ciclo completo de marcha, e a perda do contato do hálux com o solo (TO), que marca o início da fase de balanço, isto na marcha normal. As informações temporais desses eventos podem ser usadas na análise de parâmetros individuais da marcha. Perry (2005) reconhece que as plataformas de força são consideradas o método padrão ouro para definir eventos do ciclo de marcha, dentre eles, o CI e TO. Entretanto, este método só pode ser montado em um laboratório de marcha, e fica restrito ao número de plataformas disponíveis (geralmente duas), que, por conseguinte, só possibilitam a avaliação de um ciclo de marcha de cada vez. Métodos alternativos para obter essas variáveis podem ser representados pela utilização de esteiras instrumentadas, sensores de força presos aos pés, ou calçados especialmente instrumentados. Para adquirir informações temporais pode-se processar dados gravados por sinais de acelerômetros ou giroscópios.

De acordo com os estudos desenvolvidos por Desailly *et al.* (2009), os eventos CI e TO podem ser determinados com a utilização exclusiva de dados de cinemetria, após lançar mão de métodos computacionais sobre a análise de pontos previamente determinados. A este método esses autores deram o nome de *high pass algorithm* (HPA). Porém, os resultados calculados por este algoritmo não apresentaram diferença significativa em relação aos valores encontrados por O'Connor *et al.* (2007), através do *foot velocity algorithm* (FVA). Este algoritmo utiliza dados de cinemetria, mais especificamente sobre a velocidade vertical do pé, e calcula estes valores a partir de marcadores reflexivos no calcanhar e sobre a cabeça do segundo metatarso. Para elaboração do FVA, os dados foram extraídos de uma amostra de 54 sujeitos e os erros encontrados foram de 16 ± 15 ms para o CI, ao comparar os valores com os obtidos através do padrão ouro, a plataforma de força.