



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

Técnicas de Absorção de Queda do Parkour: Uma Abordagem Física e Computacional

Acadêmico: Luiz Fernando Menezes Pantaleão

Orientador: Fernando Carlos Messias Freire

Maringá, 9 de maio de 2022



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

Técnicas de Absorção de Queda do Parkour: Uma Abordagem Física e Computacional

TCC apresentado ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do professor Dr. Fernando Carlos Messias Freire, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Física

Acadêmico: Luiz Fernando Menezes Pantaleão

Orientador: Fernando Carlos Messias Freire

Maringá, 9 de maio de 2022

Sumário

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Introdução	1
1 Fundamentação Teórica	3
1.1 Colisões: Correlação com Parkour	3
1.2 Avaliação de Performance	13
1.3 Métricas	15
2 Metodologia	19
2.1 Interface do <i>Tracker</i>	20
2.2 Coleta da posição do centro de massa pelo trackeamento de um único ou vários marcadores	24
2.3 Inclusão da Análise do Rolamento	25
3 Conclusões	32
A Apêndice	34
Referências Bibliográficas	37

Agradecimentos

Este trabalho é uma composição coletiva. Meu objetivo não é solucionar dúvidas grandiosas; é devolver à minha comunidade um senso de que ela possui especificação material, quase como se morasse em outro universo: sua existência merece ser estudada. Também homenageio, aqui, a Física, que me acompanhou em tantos momentos de solidude e aumentou o poder de minha lucidez quanto às coisas do mundo material, ou seja, do tudo. Agradeço a todos meus companheiros e companheiras que alimentaram minha consciência com palavras positivas, de tal modo que me ajudaram a contrapor todo descrédito que eu dava à minha vontade de exaltar o simples. Este trabalho será simples, e por isso altruísta, porque os motivos de minhas incursões conceptuais em busca de sentido, como num feitiço de ouroboiros, me levaram de volta à minha infância, à origem do pensamento sofisticado. Agradeço Leonardo Campelli, um russeliano de carteirinha, especialista em desbravar minhas lógicas junto comigo. Agradeço imensamente a meus amigos participantes do estudo, praticantes apaixonados do movimento. Agradeço minhas amigas e amigos, e minha *eternal wife* que sempre esteve comigo quando precisei. A minha mãe e meu pai: sem vocês eu não conseguiria. Também agradeço a meu orientador por acompanhar meu conturbado processo criativo. Por fim, agradeço às poesias de Nietzsche, fundamento da real crítica à ciência.

Resumo

Neste trabalho estudamos diversos casos de vídeos de praticantes realizando determinadas técnicas de parkour (precisão e rolamento) em comparação aos mesmos praticantes realizando técnicas tradicionais de absorção com o intuito de refinar os dados, em vídeo, coletados através da análise do trackeamento das imagens e obter em qual escala mínima o software escolhido em questão trabalhava. Observamos múltiplos vídeos e como o algoritmo escolhido associava a evolução das imagens. Comparamos os dados que obtivemos com situações semelhantes já medidas em trabalhos da Biomecânica e fizemos observações de casos diferentes para o mesmo tema. Por fim, concluimos acerca da precisão do algoritmo escolhido e avaliamos perspectivas futuras sobre o tema.

Palavras chave: física, biomecânica, análise de trackeamento em vídeos.

Abstract

Parkour has evolved a lot as a practice since it's beginning in the 80's. Recently work has been done towards the area of ground reaction force measurement and it seems that there is a lack of studies about those measurements from a computer vision perspective. This work has the objective to elucidate about some analysis we can do with movement without laboratorial restrictions and the means to evaluate the precision of the correlations we got. We observed a nice correlation with the data we collected from Tracker Software and the Data we already have in biomechanical papers on parkour movement.

palavras-chave: physics, classical mechanics, computer vision, tracking systems, biomechanics, parkour.

Introdução

A biomecânica é uma área acadêmica recente [1], e dela provém muitos estudos de movimentos de seres vivos que são pertinentes para validar ou aprofundar conhecimentos que temos de leis gerais da Física. Como os seres vivos possuem movimentos complexos, estes não são facilmente reduzíveis a problemas simples, o que torna seu estudo complicado pois desta forma tende-se a ser necessária a contribuição de outras áreas.

Ainda assim, quando o objetivo de estudar determinado movimento é sua performance, há a possibilidade de reduzi-lo a um problema simples, ou suficientemente simples, sob o ponto de vista da Física (por exemplo podemos estudar as variações de momento linear de um corpo através da observação de seu centro de massa). Em tais casos, há um número limitado de variáveis que influenciam de forma significativa a performance do movimento; e a observação destas variáveis é suficiente para responder o problema em questão. Desta maneira, muitas práticas esportivas são beneficiadas pela análise da Física. Dentre as práticas esportivas, temos o parkour: interesse deste trabalho. O parkour é uma área que busca, em sua origem [2], otimizar o impacto. Podemos entender a otimização de impacto sob o escopo da Biomecânica e da Física. Ambas as áreas possuem repertório escasso, atualmente, acerca do tema. Este trabalho visa acrescentar ao tema a sua devida análise, sob a perspectiva da Física. Essa área é de interesse para a análise Física pois uma das principais preocupações de seus praticantes, no que tange o refinamento das técnicas que praticam, é a absorção eficiente de impacto. Devido ao fato de o rolamento do parkour ser entendido como uma forma de absorção de impacto muito eficiente por seus praticantes, este trabalho tem o objetivo de verificar se esta afirmação possui razão sob o ponto de vista físico. Mais especificamente, nos referimos a estudar as variações de momento linear de um sistema, com o intuito de verificar quais variações são mais intensas que outras, buscando através dessas variações as suas respectivas forças, assim associando ao conceito do que cotidianamente entendemos como: impacto.

Os praticantes de parkour, ou ‘traceurs’ [2], lidam com quedas de alturas consideráveis para o corpo humano, tornando relevante que se observe a validade física de suas técnicas, visto que uma absorção é definida como eficiente ou não a partir de indicadores mecânicos. A princípio, objetivávamos estudar os algoritmos de *trackeamento* de dois softwares gratuitos neste trabalho, mas identificamos que um deles, o *Kinovea*, não possuía liberdade suficiente para que o refinássemos devido ao fato do mesmo *software* não permitir a manipulação de parâmetros do trackeador (consideramos a análise de um *track system* o problema de encontrar as melhores combinações de parâmetro do *trackeador* de modo que tenhamos a maior precisão possível, referente ao *software* que analisamos, na extração dos dados). Considerando o fato mencionado, estudamos neste trabalho a eficiência da absorção de impacto pelo corpo humano através de três técnicas: técnica de absorção tradicional (não parkour); e técnicas de absorção por precisão e rolamento (ambas do parkour), utilizando como base a análise em vídeos com o uso do *Tracker software*.

Pelas observações dessas três técnicas de absorção de impacto, objetivamos verificar, sob os olhos da mecânica clássica, através dos conceitos de força, energia e momento, a eficiência das

duas técnicas de parkour mencionadas em relação à técnica tradicional, como prevê [3], com o intuito de estimar a precisão de nossas análises. Objetivamos que se obtivéssemos resultado positivo do *trackeador* mencionado, estudaríamos as três técnicas mencionadas no *range* de alturas maiores que as estudadas por [3].

Na Fundamentação Teórica, abordaremos os conceitos físicos utilizados para esse estudo e justificaremos a validade da análise em vídeo sob a ausência de um equipamento de medida chamado plataforma de forças.

Em Metodologia, discutiremos a metodologia da análise em vídeos utilizada neste trabalho. Discutiremos também sobre as limitações do método e sua precisão.

Por fim, são apresentadas Conclusões acerca da precisão deste trabalho em comparação à referência.

Capítulo 1

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, alguns conceitos que temos como evidentes em relação à Física de movimentos em baixas velocidades serão expostos em forma de desigualdade para que no futuro as usemos de critério para análise no *Tracker software*. Também definiremos o conceito de impacto sob os olhos da Biomecânica e interpretaremos esses mesmos conceitos sob o ponto de vista da Física. Por último, apresentaremos métricas de performance para análise em vídeos com o intuito de interpretá-las qualitativamente para refinarmos nossa análise, enquanto operadores de um trackeador semiautomático, que pergunta ao usuário se cada correspondência encontrada está correta.

1.1 Colisões: Correlação com Parkour

A área física de colisões forma grande parte do interesse dos estudos biomecânicos na área dos esportes [1], porque a potencialidade de lesões para casos de movimentos humanos que envolvem colisões, e, mais especificamente, quedas, é mensurada através de grandezas físicas obtidas das forças de reação do solo (FRS) sobre o corpo [4]. Essas grandezas são de natureza mecânica, e mais especificamente referem-se à Segunda Lei de Newton.

Na Biomecânica, as medidas que estimam quantitativamente o impacto são muitas vezes representadas na escala de peso corporal do atleta, *BW* (de *bodyweight*), de forma que uma compreensão intuitiva dos dados seja mais facilmente elaborada. Para o caso dos trabalhos desta área, a interpretação estatística e gráfica do problema é colocada em foco no lugar da teoria Física, base da análise.

Este trabalho buscou estudar o movimento do corpo humano sob esses dois aspectos, tanto sob parâmetros da Biomecânica quanto sob parâmetros da Física, utilizando como base estudos prévios, com respaldo em dados laboratoriais. A porção teórica deste trabalho será centrada nos conceitos de energia e impulso como derivações da Segunda Lei de Newton, também o conceito de força de reação do solo (FRS) será definida à partir de análise em vídeo; serão também apresentadas métricas para avaliação dos experimentos realizados, e, por fim, os dados obtidos a partir dos gráficos gerados nos softwares selecionados serão analisados na conclusão. Primeiramente, será contextualizado o tema deste trabalho.

Quando falamos sobre forças, temos como noção primitiva a ideia de movimento. O parkour, por ter em sua ideia central o movimento, e por ser uma prática contemporânea [2], também carrega consigo, e por consequência na mentalidade de seus praticantes, a ideia física de força. Praticantes de parkour a todo momento, durante suas práticas, buscam estipular, ou conjecturar, as forças envolvidas em seus saltos, com o objetivo de tornar um salto a priori arriscado em algo previsível, minimizando, assim, as chances de erro. Evidentemente esse tipo

de análise conjetural não possui validade Física acadêmica, pois os problemas da Biomecânica envolvem um grande número de forças envolvidas e seus praticantes não são capazes de prever informações dessas forças, de forma acurada e certa, sem o uso de equipamentos (ou técnicas) de medida. Dentre esses, um dos principais equipamentos de medida que mensura forças nos movimentos humanos é a plataforma de forças. Historicamente, as plataformas de força, usadas para coletar estes referidos dados do movimento, são utilizadas sob restrições de espaços laboratoriais e não são viáveis para o uso na aplicação de campo. Sabendo que a Segunda Lei de Newton descreve a relação entre massa, aceleração e força resultante, hipotetizamos que seja possível que a análise através de captura em vídeo possa nos oferecer, com precisão razoável, os parâmetros para que estimemos as forças de reação do solo (FRS) envolvidas em um movimento.

De fato, notamos no estudo bibliográfico que há uma significativa precisão na correlação entre análise em vídeos e *outputs* de uma plataforma de forças, particularmente em Johnson et al. [5] é observado que as correlações tendem a ser mais aproximadas (a uma plataforma de forças) na direção vertical (em relação ao plano do movimento). Também temos em Fry et al [6] que essas estimativas, suficientemente acuradas, de forças de reação do solo (FRS) podem ser observadas, inclusive, como cita o autor, em *softwares* amigáveis ao usuário (tradução livre de "user friendly softwares"). Também Post et al [7] reiteram a possibilidade de realizar *motion tracking* com *softwares Open Source*, gratuitos, e obter resultados satisfatórios, onde o programa usado em questão fora o *Tracker software*, um programa *Open Source* baseado em Java. De início, procurávamos também comparar o *Tracker* ao *Kinovea* (outro programa bastante usado no Brasil para análises de Biomecânica), mas constatamos que o *Kinovea* não fornecia acesso suficiente a parâmetros do seu sistema de *tracking* para que o usuário pudesse, através de manipulação dos parâmetros, estudar a fundo a sua precisão.

Ao estudar os vídeos no *Tracker*, escolhemos sempre vídeos que respeitassem as precauções necessárias para minimização de erros que ocorrem no *tracking* - onde em [7] se sintetiza que os erros são minimizados se, preferencialmente, filmarmos os movimentos com eles ortogonais em relação à câmera. Desta forma, podemos permitir-nos buscar observar relações satisfatórias entre a bibliografia e o estudo realizado neste trabalho. Na bibliografia em questão, Post et al. [7] encontram relação satisfatória entre medidas de velocidade realizadas por uma câmera comum e uma *high speed camera*, onde a *high speed camera* utilizada gravava a 250fps e a câmera comum gravava a 30fps. É de se esperar que, devido ao fato de neste trabalho uma câmera que grava em fps > 60 ter sido utilizada, podemos tomar como garantido que a correlação (ao menos para as velocidades) respeitará os resultados do trabalho citado.

Claro, quando falamos de forças pensamos nas acelerações, ou seja, nas variações temporais das velocidades medidas, $\dot{v}(t)$, e devemos pensar que, se há erro, mesmo que mínimo, nas medidas de velocidade obtidas pela análise no *Tracker*, este se propagará para as medidas de aceleração. O motivo de nos preocuparmos com as acelerações não consiste somente em determinar as equações diferenciais da mecânica clássica para os casos em análise, mas consiste em estabelecer uma relação clara entre os parâmetros da Biomecânica que mensuram impacto, e o pensamento de impacto sob uma interpretação da mecânica clássica. Sabemos que, em Knudson [1], a biomecânica é fundamentada na mecânica newtoniana, e portanto as medidas biomecânicas de impacto estarão relacionadas com força e tempo. Estas forças envolvidas em impacto são quaisquer forças externas que causem estresse significativo no corpo humano durante um curto período de tempo (não implica que impactos devem ter curta duração). No contexto dos esportes, esses impactos são principalmente interpretados medindo-se as forças envolvidas no movimento de corpos humanos quando acima de uma plataforma de forças (que como observamos são comumente utilizadas em trabalhos da Biomecânica). Estas plataformas

de força medem as forças externas que atuam no corpo e que são chamadas de forças de reação do solo (FRS). No parkour, a força externa que causa o impacto também é a FRS, somente (pois o parkour envolve contato somente entre praticante e objeto, não há contato corpo a corpo); onde, mecanicamente, tomamos a soma vetorial da FRS e da força peso como força resultante (e dela também podem ser obtidos os torques). No caso desse trabalho, não buscamos compreender o comportamento dos torques envolvidos, dando prioridade a continuar observações feitas por Puddler et al. [3], sobre o rolamento do parkour e a precisão do parkour (figura 1.1) e seus impactos quando comparados com técnicas tradicionais (como definido em [3]), adotadas como corretas por muitos esportes. Como as variações de momento linear de um corpo humano são causadas pelas forças de reação do solo (FRS), tomaremos a sua análise como essencial para a discussão deste trabalho.

Para exemplificar o porquê de darmos atenção especial ao comportamento destas forças, e entendendo o parkour como o esporte de alta competitividade que é atualmente [8], tomemos como exemplo a lesão do ligamento cruzado anterior (LCA), que é uma lesão que pode ser fim-de-carreira para muitos atletas e que também causa o aumento de chances de desenvolver osteoartrite patológica (lesão também potencialmente finalizadora de carreira). Esta lesão majoritariamente não é causada por contato corpo a corpo. Em esportes como futebol australiano, basquete e *hockey*, a maioria das lesões de LCA (51 a 80%) acontecem durante a movimentação do corpo quando há uma "manobra de desvio", geralmente quando esta é executada fazendo-se a absorção do impacto com uma única perna (80% dos casos [5]), e é o entendimento do comportamento das forças de reação do solo (FRS) envolvidas nesses casos que nos permite estimar os momentos de torque no joelho envolvidos, assim nos oferecendo indicativos de quais estratégias tomar para prevenir o aparecimento de torques potenciais causadores de lesão. Claro que, neste trabalho, nossa análise se retém às forças de reação do solo (FRS), enquanto estimativas aproximadas, em si, e não aos torques que elas geram. Ainda sim o exemplo é válido porque FRSs maiores possuem maior probabilidade de causar lesões, enquanto concepção geral, e buscar evitar o aparecimento dessas forças maximizadas (ou buscar a minimização das forças de reação do solo) é uma solução para prevenção de lesões.

As forças encontradas nesse estudo sem o uso da plataforma de forças não são igualmente acuradas em relação aos estudos de previsão citados (porque os softwares - pagos -, possuem mais parâmetros de análise, e porque os ambientes laboratoriais em questão possuem maior qualidade de câmera e de marcadores), mas suporemos, e justificaremos, que o comportamento geral (e qualitativo), não sofrerá grande alteração em relação aos estudos tomados como referência. Também buscamos minimizar o erro das nossas suposições para aproximação entre as FRS envolvidas e as FRS reais, que seriam medidas por uma plataforma de forças (as precauções tomadas foram especificadas na seção de Metodologia).

Parâmetros Biomecânicos Observados

Através da análise destes parâmetros biomecânicos citados, foi verificado por Puddler e Maulder [3], mediante uso de plataforma de forças para obtenção das forças de reação do solo (FRS), que as duas técnicas de absorção de impacto do parkour descritas anteriormente, a precisão e o rolamento (figura 1.1), são consideravelmente mais eficientes que a técnica de absorção tradicional, já amplamente estudada, presente na literatura dos esportes [3]. Ou seja, a precisão e o rolamento possuem, em relação às técnicas tradicionais, menor força vertical máxima; menor *loading rate*, isto é, a divisão entre força vertical máxima e tempo até a força vertical máxima; e maior tempo para força vertical máxima. Resultados estes foram obtidos em [3].

Este trabalho também se concentrou em comparar estas duas técnicas do parkour (precisão

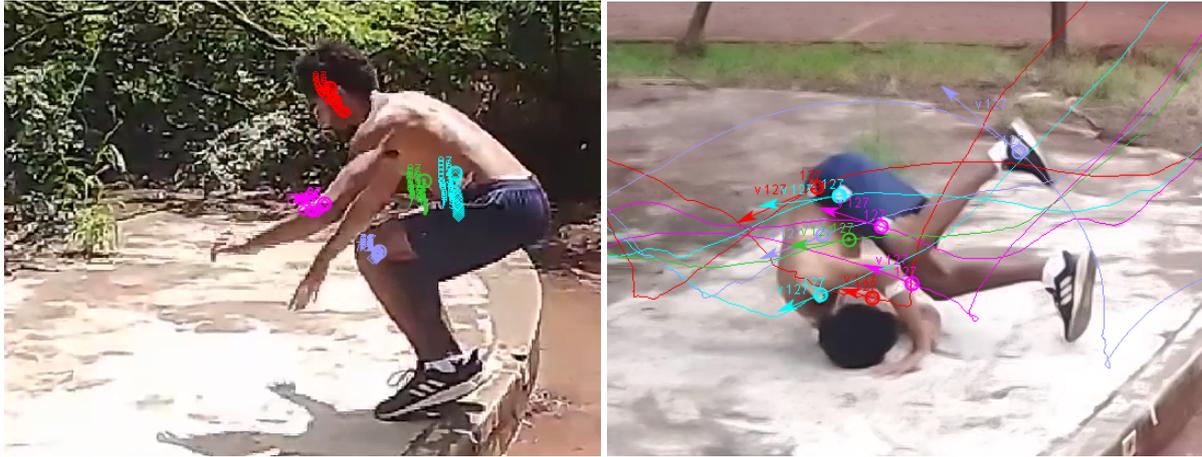


Figura 1.1: Precisão, imagem à esquerda. Rolamento, imagem à direita

e rolamento) entre si, com o objetivo de verificar o porquê de no estudo do Puddler et al. não ter sido observado significativa diferença entre o rolamento e a precisão do parkour. Este interesse se dá pelo fato de os praticantes da comunidade comumente associarem o rolamento a uma forma de absorção mais adequada para alturas consideradas grandes (aqui neste estudo definida como alturas maiores que as estudadas pelas medições de [3]), sendo entendida, por seus praticantes, como a mais segura entre as outras técnicas nesses casos. De fato, no trabalho de Puddler et. al tomado como referência, as absorções foram analisadas partindo de até uma altura máxima de 0,75m, o que nos leva à hipótese que diferenças significativas entre FRS máxima e *loading rate* possam ser observadas para alturas maiores que 0,75 metros.

Sabemos que as FRS não são obtíveis ou estimadas facilmente, pois levamos em consideração que, de acordo com nossa bibliografia, múltiplos fatores interferem na estimativa do vetor FRS. Mais especificamente, sabemos que as forças de reação do solo (FRS), medidas pelas plataformas de força, possuem dependência em relação à área de contato com o solo, e em relação à posição do corpo. A depender de como o corpo está posicionado, a força de reação do solo mudará de direção. Via de regra, as FRS apontam para o centro de massa (CM) do corpo, e a origem de seu vetor se encontra sob uma seção de área pertencente à área (ou conjunto de áreas) de contato do corpo com o solo.

O fato de as FRS apontarem para o centro de massa (CM) nos permite avaliar a atuação da força resultante que age sobre um corpo que, após queda, entra em contato com o chão. Como as duas forças externas ao corpo, FRS e P (força peso), atuam sobre o centro de massa (CM), podemos considerar que, se o movimento ocorrer em duas dimensões em relação ao nosso eixo de escolha, e se a posição do CM é uma função $f(x, y)$, então $f(\ddot{x}, \ddot{y})$ nos oferecerá um indicativo da intensidade com que a FRS altera o momento linear do corpo em questão (exemplo de caminhos do estimado centro de massa do participante na figura 1.2).

Embora percamos informações acerca da mecânica do movimento sob esta análise (como qual é magnitude da FRS para diferentes regiões do corpo em contato com o solo, ou sua direção precisa), temos a vantagem de que podemos resumir, com considerável certeza, o papel do impacto enquanto intensidade da FRS em termos da análise de somente o movimento do centro de massa (CM). Caso fosse necessária a estimativa de torques externos causados pelas FRS, esta interpretação seria insuficiente, mas nosso foco se retém aos parâmetros lineares do movimento.

Pensar no corpo enquanto centro de massa (CM) envolve um breve, porém global, conhecimento prévio acerca de corpos rígidos. Corpos Rígidos porque, evidentemente, um corpo



Figura 1.2: Deslocamentos dos centros de massa (CM) medidos pelo *Software*. A imagem à esquerda ilustra a técnica de precisão, e à direita o rolamento.

humano não é um ponto material, mas também porque o corpo humano não é, enquanto corpo em si, rígido. Realizaremos uma breve, e simples, contextualização para estabelecermos a relação entre corpo humano e um corpo rígido.

Corpo Rígido é definido como um conjunto de pontos materiais agrupados de forma que a distância entre as partes que constituem o corpo ou o sistema não sofram mudança, ou seja, as distâncias relativas entre as partículas pertencentes ao corpo não se alteram para um referencial fixado no próprio corpo. Sob essa definição percebemos que o corpo humano não é rígido, pois ao flexionarmos nosso braço, por exemplo, podemos perceber que a distância relativa entre dois pontos hipotéticos, um localizado no bíceps e outro no antebraço, por exemplo, sofrem mudança. Uma forma simples de contornar esse problema é entender o corpo humano como um conjunto de corpos rígidos, pois nosso corpo é dividido por estruturas rígidas, os ossos, que constituem efetivamente um corpo rígido.

Da dinâmica de corpos rígidos, sabemos que seu movimento pode ser entendido como a composição de dois movimentos: rotacional e translacional. Onde o movimento translacional é equivalente ao movimento do centro de massa (CM); e o movimento rotacional do corpo é equivalente à rotação (momento angular ou torque) em relação ao CM.

Construímos o centro de massa (CM) como sendo, em coordenadas cartesianas ortogonais (coordenadas \hat{x} , \hat{y} , \hat{z}):

$$\frac{1}{M} \sum_n r_n \cdot m_n = r_{CM} \quad (1.1)$$

Em que M é a massa total do corpo; r_{CM} é o vetor posição do CM; e $r_n \cdot m_n$ é o produto entre a massa e o vetor posição de uma partícula perante ao sistema corpo.

Partindo da equação (1.1), fazendo a derivada segunda, temos:

$$r_{\ddot{CM}} = \frac{1}{M} \sum_n m_n \cdot \ddot{r}_n \quad (1.2)$$

$$M \cdot r_{\ddot{CM}} = \sum_n m_n \cdot \ddot{r}_n \quad (1.3)$$

Devido à somatória das forças de cada partícula apontar na direção de $r_{\ddot{CM}}$, estabelecemos que a variação segunda da posição de cada partícula devido a uma força externa é equivalente à variação segunda da posição do centro de massa (CM) devido à mesma força externa. Isto é geral para o movimento de translação de corpos rígidos.

Neste trabalho utilizaremos o estimado CM do corpo que coletarmos (mediante uso de um modelo de marcação de pontos no corpo humano), para especular quais as forças externas

agindo sobre o mesmo. Focamos apenas nas partes translacionais dos movimentos de corpos rígidos pois, como já exposto, respaldamos que o *loading rate* possui uma dependência com as variações de momento linear do corpo [3].

Correlação entre Teorema Trabalho-Energia e a Física dos Parâmetros Biomecânicos que Mensuram Impacto

Devido ao fato de o parkour ser uma prática que data do final da década de 80, há uma escassez de estudos acadêmicos que validem ou desvalidem a eficiência das técnicas que pertencem a essa prática. É sabido que o parkour envolve a execução constante de técnicas de absorção de impacto, e neste sentido, instrutores de parkour não possuem embasamento físico-científico que os dê base evidencial para priorizar uma técnica a ser ensinada em relação a outra; e, neste trabalho, essas técnicas a ser ensinadas são as duas principais do parkour: a precisão, e o rolamento (figura 1.1). Quando um praticante está treinando, seu corpo efetua absorções em superfícies majoritariamente duras (comumente concreto), o que torna necessário que as técnicas executadas possuam boa eficiência. De fato, altas forças de reação do solo (FRS) podem causar lesões ósseas nos membros inferiores (como já citado anteriormente e também em Gittoes et al. [9]). Assim, para que entendamos o quanto uma técnica é eficiente, ou seja, o quanto ela evita lesões, devemos estudar a sua Física, pois já sabemos que seu agente causador de lesão é mecânico. O praticante não pode garantir que uma técnica, por responder bem ao problema imediato da absorção de impacto, seja de fato a mais adequada para dada situação sem evidência Física. Este estudo tem o objetivo de adicionar à literatura de pesquisas escassas sobre parkour observações sobre o tema que explora a técnica de precisão e do rolamento do parkour, além da análise da técnica tradicional citada, com objetivo de estabelecer comparação de dados.

Sob o ponto de vista da Biomecânica, para que tentemos buscar quais quedas são menos abruptas para o atleta, devemos minimizar o "impacto". Aqui não nos referimos a impacto de maneira imprecisa, este é quantitativamente calculado nos estudos de Biomecânica vigentes através de observação de determinados parâmetros, e mais especificamente para o caso geral de nosso trabalho, estes são: *loading rate*, força vertical máxima (F_{max}), e tempo para a força vertical máxima, medidas sob um intervalo que corresponde entre à aterrissagem e a completude do movimento. Para nossas análises a completude do movimento foi definida partindo do instante antes que se toque o chão, estando, o corpo, com determinada energia cinética K , em $t = t_0$ até que pare (aproximadamente), ficando com energia cinética final $\Delta K \approx 0$, em $t = t$. Entendemos que os conceitos de forças verticais máximas (F_{max}), assim como os de tempo para forças verticais máximas, são evidentes, sob o ponto de vista teórico da Mecânica Clássica. Em síntese, as forças de reação do solo (FRS) são o que comumente chamamos (em nossos exemplos repletos de considerações simétricas) de Força Normal. Deixamos a conceitualização sobre como obtivemos essas FRS para a parte metodológica, porque os processos para estimação das FRS máximas são condicionados pelas ferramentas disponibilizadas pelo *software* que escolhemos, e também pelas métricas oferecidas posteriormente nesse mesmo capítulo. Foque-mos, para início de nossa abordagem Física do mencionado, no conceito de "*loading rate*", que é interpretado como o tempo que um pico de força de reação do solo (FRS) age sobre um corpo; mais especificamente, é medido tomando a razão entre F_{max} e $\Delta t = t - t_0$. Não obstante, mais especificamente pensando em "maneiras de pensar impacto", podemos recorrer, primeiramente, ao conceito de momento linear. Do resultado da dinâmica de corpos rígidos, podemos definir a variação do momento linear:

$$\Delta P = \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (1.4)$$

Em que $t = t_0$ é o instante de tempo em que o corpo inicia o contato com o solo; e t é o instante de tempo em que o corpo termina seu movimento, estando ao final, no tempo t , com velocidade $v \approx 0$ (como ilustrado na sequência de figuras 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6).

Para os casos que analisamos, podemos dividir o movimento do corpo humano, de forma geral e aplicada a todos os casos (como ilustram as figuras 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6), em duas partes: primeiro quando o corpo salta partindo do ponto de saída e até o momento de sua aterrissagem adquire variação de momento ΔP . E segundo quando o corpo aterrissa e absorve a queda, com variação de momento ao longo do impacto $\Delta P'$. Como no final das absorções observamos geralmente velocidade baixas, $v \approx 0$, comparadas às velocidades iniciais presentes na região próxima a $t = t_0$, consideramos $\Delta P \approx -\Delta P'$ como uma observação esperada que o *trackeador* analisado obtenha.

De fato, seu momento dp , durante a queda até o momento em que toca o solo, na aterrissagem, variará de acordo com $f(t)dt$. Do mesmo modo, se durante o processo de aterrissagem o momento do corpo (localizado no ponto material de interesse) varia:

$$\Delta P = mv_f - mv_i \quad (1.5)$$

De modo que a causa Física dessa variação de momento linear é o Impulso das forças externas no CM (que no caso de nosso trabalho é a soma entre FRS e força Peso):

$$\Delta P = \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (1.6)$$

De modo que, se tivermos, para dois sistemas que possuem a mesma massa, sob as mesmas condições de velocidade e posição iniciais (partindo da mesma altura), absorções diferentes que ocorram em tempos diferentes mas que preservem o fato que, durante a segunda fase do movimento:

$$\Delta P \approx \Delta P' \quad (1.7)$$

E sabendo que, para esses dois sistemas, as velocidades iniciais durante o início do contato com o solo serão aproximadamente iguais ($mv_{i_1} \approx mv_{i_2}$) se considerarmos que durante a primeira fase (durante a queda, no ar) somente há ação da força peso (aproximadamente), justificando que então aterrissam com mesma velocidade. Então, se $t[a, b]$ é o tempo da segunda fase do primeiro sistema (chamaremos de sistema 1) e $t[c, d]$ é o tempo da segunda fase do movimento do segundo sistema (chamaremos de sistema 2), e se os vídeos dos movimentos estiverem sincronizados de modo que $t_a = t_c$, e $d > b$, então:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \quad (1.8)$$

$$\int_a^b f(t)_1 dt = \int_a^b f(t)_2 dt + \int_b^c f(t)_2 dt \quad (1.9)$$

Devemos considerar, claro, que $f(t)_1 \neq f(t)_2$ pois as forças de reação do solo (FRS) serão diferentes, como constatado pela bibliografia (as forças de reação do solo possuem dependência com a área de contato do corpo com o solo, com a pressão sob as regiões do corpo), de modo que, sendo razoável considerar que todas as contribuições virtuais de momento $\delta p = f(t)\delta t$



Figura 1.3: Participante inicia o salto



Figura 1.4: Participante no ar durante a queda

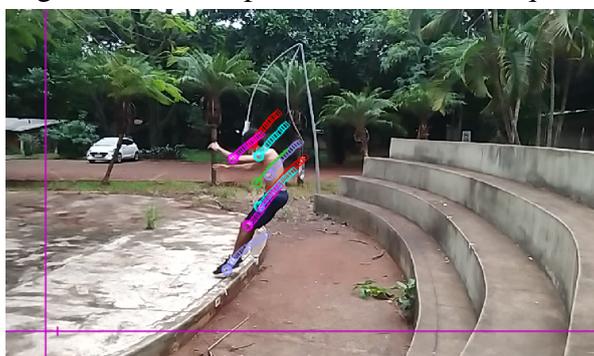


Figura 1.5: Participante iniciando a aterrissagem, tempo t_0



Figura 1.6: Participante absorvendo a queda, fim do movimento, tempo t

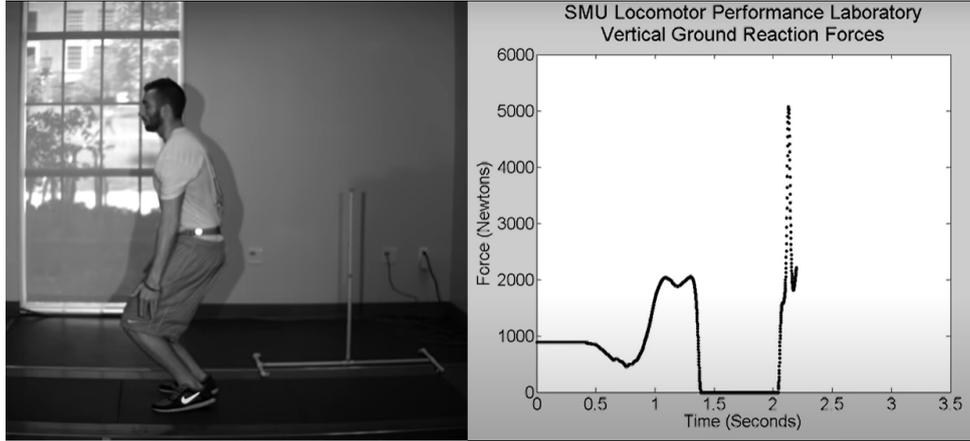


Figura 1.7: Comportamento de uma FRS durante impacto, registrado por uma plataforma de forças [10]. Nesta imagem o participante salta da plataforma e depois cai (no instante de tempo por volta de 2 segundos).

serão positivas enquanto a $f(t) = -mg + g(t)$ durante a aterrissagem até a completude do movimento (onde $g(t)$ representa a FRS), podemos assumir que:

$$\int_a^b f(t)_1 dt > \int_a^b f(t)_2 dt \quad (1.10)$$

$$\int_a^b f(t)_1 dt > \int_b^c f(t)_2 dt \quad (1.11)$$

Sabemos que muitos instrutores de parkour se referem ao rolamento como uma boa forma de transformar momento vertical em momento horizontal. Discutiremos posteriormente este argumento lúdico sob o ponto de vista dessas desigualdades na sessão experimental.

Estas desigualdades estão sendo apresentados pois quando esperamos um certo impacto, esperamos contribuições de força sempre pra cima inicialmente, ou seja buscamos:

$$f(t)_1 dt > 0 \quad (1.12)$$

$$f(t)_2 dt > 0 \quad (1.13)$$

E também esperamos que fisicamente as contribuições de força iniciais, pelo menos, entre uma técnica e outra, serão diferentes. Tudo isso sempre comparando o mesmo participante com ele mesmo, ou comparando-os entre si através de metanálise tomando a escala de força em *bodyweight*. Quando nos referimos a estas "contribuições de força", nos referimos ao comportamento do gráfico da função FRS versus tempo. Temos como exemplo do comportamento que esperamos de uma força de reação do solo a figura 1.7.

Podemos associar também o conceito de impacto ao conceito de Energia, estabelecendo, agora, uma relação entre força e caminho. Sabendo que Trabalho, W é definido como:

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (1.14)$$

Da Segunda Lei de Newton, temos:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1.15)$$

$$\int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int m \left(\frac{d\vec{v}}{dt} \right) d\vec{r} = \int m \vec{v} d\vec{v} \quad (1.16)$$

$$W = \Delta \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) \quad (1.17)$$

Esse é o Teorema do Trabalho-Energia, que é válido para forças conservativas e não conservativas que agem sobre um ponto material. Podemos entender o movimento de queda e absorção de queda de um corpo à partir do seu ponto material centro de massa (CM), de acordo com as equações acima. Dividindo o movimento de queda e absorção de queda em duas partes (como fizemos anteriormente com o caso do momento):

Primeira parte. O corpo salta: o corpo é lançado -de modo aproximado- horizontalmente, com velocidade vertical inicial $V_x = V$, e $V_{yi} \approx 0$ e, enquanto no ar e até o momento de aterrissagem, sofrerá ação externa somente das forças de atrito do ar (aqui, desprezíveis) e da força peso, de modo que, quando aterrissar, possuirá uma energia cinética que seja a variação da sua energia potencial devido à força peso. Se a altura inicial de lançamento é h , a variação da energia potencial gravitacional é $\Delta U = mgh = \Delta K$, considerando que a altura no final do movimento (instantes antes da aterrissagem), é $h' = 0$. Esta descrição corresponde à primeira parte do movimento.

Segunda parte. O corpo aterrissa: Quando o corpo aterrissa, possui energia cinética $K = mgh$, e, à partir do contato entre o corpo e o solo, surge uma força externa aplicada ao corpo $(-P + F_{RS}) \neq -P$ diferente da força peso. Se analisarmos a diferença de energia cinética partindo do instante em que o corpo está prestes a tocar o solo até a posição onde o corpo possui a condição $K = 0$, teremos $\Delta K = -mgh$, onde $\Delta K < 0$. Então, para o caso descrito, nossa integral de trabalho-energia será:

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \Delta K = -mgh \quad (1.18)$$

Podemos dizer que, para dois saltos que partem de uma mesma altura, sob as mesmas condições de velocidades iniciais, ambos ao final da absorção da queda terão um $(\Delta K)_1 = (\Delta K)_2 = -mgh$, de modo que:

$$(mgh)_1 = (mgh)_2 \quad (1.19)$$

Deste modo, podemos dizer que, para duas absorções distintas de um mesmo corpo de massa m , realizadas de modo que as suas energias cinéticas reduzam a zero, estas terão variações de energia cinética numericamente iguais. Então, os trabalhos das forças resultantes sob o centro de massa ao longo do caminho percorrido pelo CM devem ser (aproximadamente) iguais. Considerando que as forças de reação do solo (FRS) possuem majoritária influência no impacto na direção vertical [3], podemos rescrever as integrais na forma diferencial de modo que:

$$\int F_1(t) \cdot d\vec{r}_1 = \int F_2(t) \cdot d\vec{r}_2 \quad (1.20)$$

Também sabemos que, num impacto, o corpo somente tende, inicialmente, a diminuir a sua velocidade, e não a aumentar, então temos como garantia também que nos instantes iniciais de um impacto teremos:

$$F_1^{\vec{}}(t) \cdot d\vec{r}_1 < 0$$

$$F_2^{\vec{}}(t) \cdot d\vec{r}_2 < 0$$

Em verdade podemos medir essas relações no *Tracker* ao tomarmos esta relação como:

$$F_1^{\vec{}}(t) \cdot \vec{v}_1 dt < 0 \quad (1.21)$$

$$F_2^{\vec{}}(t) \cdot \vec{v}_2 dt < 0 \quad (1.22)$$

Embora pareça solta essa apresentação de desigualdades. Usaremos esses critérios de desigualdade para julgar qualitativamente correlações entre um impacto e outro. Queremos dizer que se enxergamos que um impacto parece ser mais intenso que outro, podemos esperar que o algoritmo leia uma variação de posição mais elevada. Também esperamos que durante o início das absorções o algoritmo registre consistentemente trabalhos negativos e variações de momento positivas, como forma de guiar, por inferências do operador do sistema, a precisão do mesmo. Agradecemos imensamente a colaboração de Douglas Brown para esse trabalho. Esperamos que os resultados obtidos nesse trabalho sejam valiosos tanto para a comunidade de usuários do *Tracker* quanto para os praticantes de parkour.

1.2 Avaliação de Performance

O propósito da introdução dessas métricas de avaliação de *motion tracking* é porque permitimos entender qual o limite de correlação entre *Ground Truth* (GT) e *system track* (ST) que podemos obter para uma amostra coletada sob condições de manipulação do software diferentes. *Ground Truth* (GT) é entendido como a medida real que obteríamos entre um frame e outro, e *system track* (ST) é a correlação entre frames medida pelo trackeador. Definimos *motion tracking* como o problema de estimar a posição e o espaço externo (tradução livre [11]) de objetos em primeiro plano de um vídeo.

O movimento resultante de uma *track* é o *set* de *tracks* $T_j, j = 1 \dots M$ para todos os M objetos se movendo numa cena. Uma *track* T_j é definida como $T_j = x_{ij}, B_{ij}, i = 1 \dots N$, onde x_{ij} e B_{ij} são o centro e o "espaço externo" (geralmente representado por um *bounding box*; e no *Tracker* o encontramos assim, porém apresentado de forma lúdica) de um objeto j para o frame i , onde N é o número de frames.

Em *performance evaluation*, se propõem métricas que comparam *outputs* um sistema de trackeamento com uma *Ground Truth* (geralmente esse procedimento é feito com machine learning; *Ground Truth* pode ser facilmente obtido mediante exposição a algoritmo no Matlab, por exemplo).

Antes de dizermos quais são as métricas é importante que definamos os conceitos de *overlap* espacial e temporal entre trechos de um vídeo, pois esta compreensão é requerida para quantificarmos o quanto temos de correspondência positiva entre *ground truth* (GT) e *system tracks* (ST), ambos no espaço e no tempo (exemplo conceitual na figura 1.8).

Uma intersecção espacial entre GT e ST é definido como o *overlap* $A(GT_i, ST_j)$ entre os "trechos" (tradução livre de "tracks") GT_i e ST_j de um específico frame k .

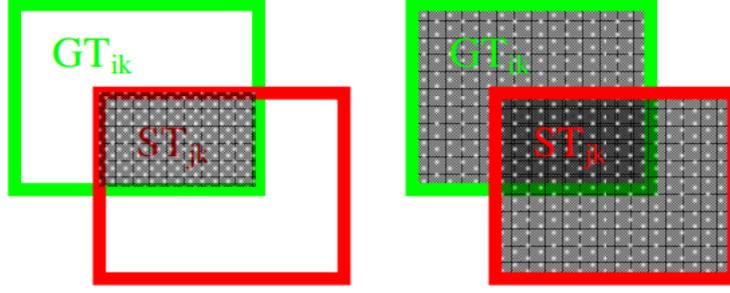


Figura 1.8: Intersecção e União dos *overlaps* de GT e ST

$$A(GT_{ik}, ST_{jk}) = \frac{Area(GT_{ik} \cap ST_{jk})}{Area(GT_{ik} \cup ST_{jk})} \quad (1.23)$$

Definimos também a variável:

$$O(GT_i, ST_j)$$

Baseada em uma limitação arbitrária, imposta pelo código, T_{ov} (discutiremos acerca do que pensamos ser a limitação arbitrária do programa analisado no próximo capítulo):

$$O(GT_{ik}, ST_{jk}) = \begin{cases} 1 & \text{se } A(GT_{ik}, ST_{jk}) > T_{ov} \\ 0 & \text{se } A(GT_{ik}, ST_{jk}) \leq T_{ov} \end{cases} \quad (1.24)$$

Temos também a medida de *overlap* temporal:

$$TO(GT_i, ST_j)$$

Overlap temporal é um número que nos indica um δt mínimo de ST e GT . Por exemplo, se pensarmos no *overlap* temporal de um ST , esta é a duração mínima de um ST [12]. O mesmo vale para outras combinações temporais entre ST_j e GT_i :

$$TO(GT_i, ST_j) = \begin{cases} TO_E - TO_S & \text{se } TO_E > TO_S \\ 0 & \text{se } TO_E \leq TO_S \end{cases} \quad (1.25)$$

Em que TO_S é o maior tempo de movimento de um *frame index* e TO_E é o menor tempo de movimento de um *frame index* entre duas suscetivas *tracks*.

Também define-se um critério de *overlap* temporal que associa ST *tracks* com GT *tracks* de acordo com a seguinte condição:

$$\frac{L(GT_i \cap ST_j)}{L(GT_i \cup ST_j)} > TR_{ov} \quad (1.26)$$

L vem de "*Lenght*", e TR_{ov} vem de *Threshold*, que significa uma limitação imposta no código. As condições do *threshold* também serão especificadas.

Se a equação acima é verdadeira, então torna-se possível associarmos ST *tracks* e GT *tracks* e começarmos a avaliar a performance de um *System Track* (ST). No caso deste trabalho, decidimos estudar o comportamento de um *software* antigo de análise em vídeos (talvez até um pouco rústico) que descobrimos possuir grande potencial através da análise de metadados. Acreditamos que este potencial do *software* em questão tenha em seu âmago o código *Open Source*

com *script* em Java, e seu criador, Douglas Brown, que é tão ativo e participante na comunidade (principalmente a nível de Ensino Médio). Acreditamos que neste trabalho acrescentamos ao *Tracker* uma riqueza de detalhes sobre o mesmo que ainda não é discutida, nem em seus manuais, nem em seus fóruns.

Ressaltamos que, embora nos referimos a uma posição visual determinada correta entre *tracks* como "*Ground Truth*" (GT), deve-se enfatizar que há o componente subjetivo significativo do julgamento humano também envolvido no processo [12].

1.3 Métricas

Utilizamos como referência as métricas propostas por [12] e [13], tentando tirar o melhor delas sob análise do *TS* que escolhemos estudar, o *Tracker Software*.

Nesta seção serão dadas definições de métricas de alto nível, como os conceitos de Positivo Verdadeiro (*TP*) e Positivo Falso (*FP*) e sobre o que são *tracks* Falso Negativo (*FN*). Também definiremos métricas que mensuram a precisão de um algoritmo de trackeamento ao estimar variações de posição dentro do seu *bounding box* e no externo ao seu *bounding box*. No *software* em questão o externo da caixa de colisões do *ST* possui geometria de retângulo fixa, podendo ser alterada em escala mas não de geometria. Os templates (versões lúdicas da escolha de um *bounding box*) possuem mais liberdade de escolha mas ainda sim são muito restritivos, pois somente conseguimos gerar elipses em escala livre fixadas na horizontal.

Trackeamento correto (CDT) ou Verdadeiro Positivo (TP)

Uma *GT track* é considerada corretamente detectada quando satisfaz ambas as seguintes condições:

Condição 1: O *overlap* temporal entre *GT track* i e o *ST track* j é maior do que um "*track overlap threshold*" TR_{ov} pré-definido. No *software* que analisamos o *Threshold* pode ser manipulado de forma mais ou menos lúdica, permitindo que apliquemos as regras de TP e FP na nossa análise. Uma discussão mais detalhada sobre a interface do *software* será exposta no capítulo seguinte.

$$\frac{L(GT_i \cap ST_j)}{L(GT_i)} \geq TR_{ov} \quad (1.27)$$

Condição 2: O *track* do sistema j tem *overlap* espacial suficientemente grande com a *GT track* i .

$$\sum \frac{A(GT_{ik} \cap ST_{jk})}{N} \geq TR_{ov} \quad (1.28)$$

Cada *GT track* é comparada com um *ST* de acordo com as condições acima. Aqui neste trabalho tivemos a vantagem de estimar qualitativamente quais seriam as prováveis *GT tracks*, pois os impactos mensurados provavelmente respeitariam condições específicas, como uma força repentina e rápida surgir no sistema, como um pico, mas possuindo correlação alta com todos os outros pontos do *tracking*. Mesmo que exista mais de um *ST track* que satisfaça as condições para uma *GT track* esperada, ainda sim consideramos a *GT track* como corretamente detectada.

Track Falso Alarme (FAT) ou Falso Positivo (FP)

Embora de acordo com [12], e também de acordo com nossa experiência de coleta de dados, saibamos que seja fácil para operadores humanos detectarem o que é um evento de Falso Alarme, mesmo em situações complexas, para o algoritmo não é. Segue outra métrica que define *False Alarm track* se o *ST* obedece ao qualquer das condições seguintes:

Condição 1: Um *system track j* não possui *overlap* temporal maior que TR_{ov} com qualquer *GT track i*

$$\frac{L(GT_i \cap ST_j)}{L(ST_j)} < TR_{ov} \quad (1.29)$$

Condição 2: Uma *track* do sistema *j* não tem *overlap* espacial suficiente com qualquer *GT track* embora possua *overlap* temporal suficiente com a *GT track i*:

$$\frac{\sum A(GT_{ik}, ST_{jk})}{N} < T_{ov} \quad (1.30)$$

Falha na Detecção de Uma Track

Uma *GT track* é considerada incorretamente detectada quando satisfaz qualquer das seguintes condições:

Condição 1: A *GT track i* não possui *overlap* temporal maior que TR_{ov} com qualquer *track* do sistema *j*

$$\frac{L(GT_i \cap ST_j)}{L(GT_i)} < TR_{ov} \quad (1.31)$$

Condição 2: A *GT track i* não possui *overlap* espacial suficiente com qualquer *track* do sistema, embora possua *overlap* temporal suficiente com o *systema track j*.

$$\frac{\sum A(GT_{ik}, ST_{jk})}{N} < T_{ov} \quad (1.32)$$

Fragmentação de Track (TF)

A Fragmentação indica a falta de continuidade entre uma *system track* para um único *GT track*. Em condições ótimas, o erro da fragmentações da *track* deve ser zero (ou tender a zero), e isto significa que o *tracking system* é capaz de produzir um trackeamento contínuo e estável em relação ao *GT* objeto.

Como mencionamos, permitiremos múltiplas associações entre *GT track* e *system track* então a fragmentação pode ser mensurada através das análises dos dados e correspondência [12].

Latência Do System Track (LT)

Latência é o *gap (delay)* temporal do *tracking* do sistema entre o tempo que o objeto começa a ser trackeado pelo sistema e a primeira aparição do objeto. A latência ideal deve ser zero. Por exemplo, em nossas análises, após o refinamento (discutido na seção anterior) obtivemos uma latência bem baixa, da ordem de $+ - 1$ *frame*. Uma latência grande significa que o sistema não é

sensível o suficiente para ativar a *tracking* a tempo ou indica que a detecção do movimento (pelo vídeo e suas condições de iluminação, se os objetos ficam borrados ou possuem nitidez...etc).

Se estima a Latência pela diferença de frames entre o primeiro *system track* e o primeiro frame do *GT track*.

$$LT = \Delta(ST_j, GT_i)_{frame} \quad (1.33)$$

Track Matching Error (TME)

Essa métrica mensura o erro posicional do trackeamento dos sistemas. TME é o erro médio de distância entre *system track* e *GT track*. Quando menor o TME melhor a precisão do sistema de trackeamento será. Nas nossas análises, após longa exposição do software aos dados em diversas condições, obtivemos um TME significativamente baixo, ainda mais para nossos objetivos, pois nosso dt é da ordem de $\Delta t \approx 10^{-3} s$.

$$TME = \frac{\sum Dist(GTC_{ik}, STC_{jk})}{L(GT_i \cap ST_j)} \quad (1.34)$$

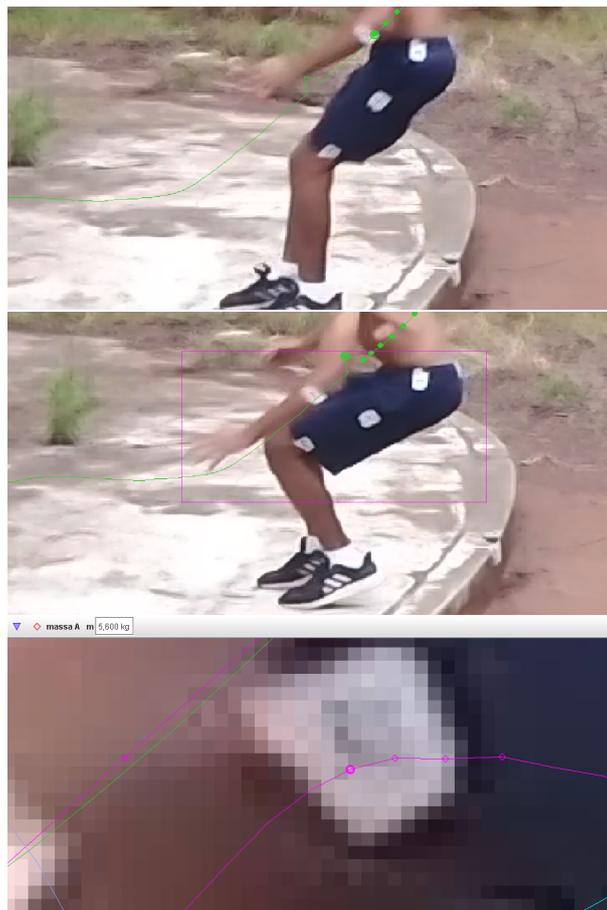


Figura 1.9: Caminho mínimo registrado pelo ST do software estudado em instantes antes (figura no topo) e instantes após (figura no meio) o impacto estimado (visualmente, pela observação do operador).

Nesta sequência da figura 1.9 podemos ver o instante em que nós interpretamos visualmente

que o corpo acabou de iniciar o contato com o solo, e o instante que o ponto do CM registrado registra o impacto. O diferença para esse caso (melhor caso) foi de 6 frames.

Proximidade Entre *Tracks*

Para um par associado *GT track* e *ST track* há uma sequência espacial de overlaps, onde [11] definem como:

$$CT(GT_i, ST_j) = A(GT_{i1}, ST_{j1}), \dots, A(GT_{iNes}, ST_{jNes}) \quad (1.35)$$

Com essa equação pode-se estimar a proximidade relativa entre um certo par específico de *GT* e *ST tracks*. Para que se compare todos os *M* pares de um sequência de vídeo, define-se que o *closeness*(tradução livre?) do vídeo em questão é a média ponderada da *track closeness* com todos os *M* pares:

$$CTM = \frac{\sum CT_t}{\sum L(CT_t)} \quad (1.36)$$

E o desvio padrão dessa *track* em suas redondezas será:

$$CTD = \frac{\sum L(CT_t) \times std(CT_t)}{\sum L(CT_t)} \quad (1.37)$$

Em que $std(CT_t)$ é o desvio padrão de CT_t .

A partir dessas métricas, e principalmente interpretando-as qualitativamente enquanto coletávamos e refinávamos os dados coletados na nossa pesquisa (exemplo de resultados do nosso refinamento na figura 1.10), buscamos atingir a máxima precisão de trackeamento do *software* em questão e, comparando os resultados que obtivemos com resultados que já existem sobre plataformas de forças para casos de parkour sob certas alturas [3], [14], verificamos se estes eram precisos; e se precisos, quanto mediriam para casos que ainda não foram analisados por [3], assim contribuindo para a continuação dos estudos para esta área de pesquisa.

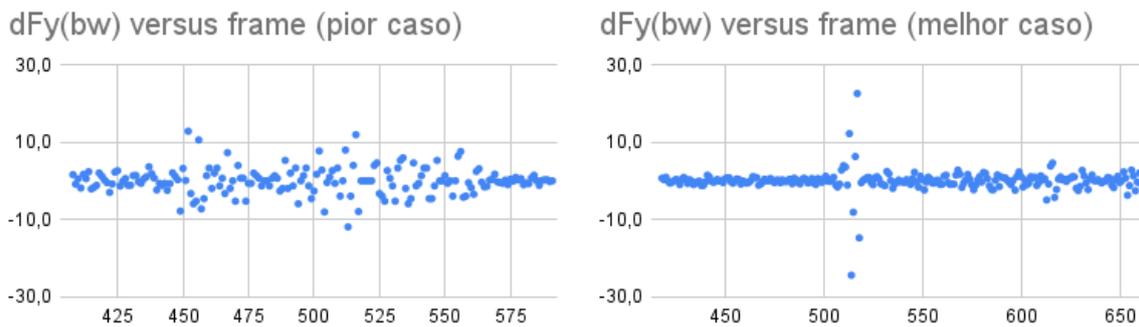


Figura 1.10: Correlações Infundadas versus Correlações Satisfatórias. O gráfico à esquerda nos mostra os incrementos de força vertical para cada frame, e o gráfico à direita nos mostra a mesma relação. À esquerda podemos ver que os incrementos de força não parecem com resultados esperados de uma plataforma de forças (um pico de força concentrado no instante de tempo da aterrissagem). À direita vemos que os incrementos de força vertical se tornam maiores em uma região de frame pontual, se assemelhando com resultados esperados de plataformas de força.

Capítulo 2

Metodologia

Baseado em estudos anteriores [5], foram analisados os movimentos de três participantes neste estudo. Os participantes possuíam todos mais de dois anos de prática e os mesmos não possuíam, durante o período em que os vídeos foram gravados para este trabalho, lesões que os impedissem de executar os movimentos de forma correta. Um movimento foi entendido como correto quando a técnica deste movimento era respaldada pelo que ensinam instrutores de parkour validados pela *World Freerunning and Parkour Federation*. Além disso, os movimentos só foram finalmente considerados como corretos quando o participante se sentia satisfeito com a execução de sua técnica, dentro do que tange a definição da técnica. Essa metodologia de intuição do participante foi adotada com a finalidade de respeitar as diferenças das técnicas de absorção de cada participante.

Os participantes foram filmados com o uso do celular *Xiaomi Redmi Note 8*, posicionado de modo que o movimento ocorresse em um plano bidimensional e ortogonal em relação à câmera. Para a efetivação dessa condição de imagem inicial, foi utilizado um aplicativo de celular que utilizava o giroscópio do celular para definir a angulação da imagem em relação a um objeto fixo. Posicionamos uma régua entre dois participantes que a seguravam posicionando-a no caminho do movimento a ser filmado. Através do uso do aplicativo foi definido qual a melhor posição para que a imagem filmada fosse ortogonal ao plano do movimento, que coincide com o plano atleta-régua-atleta. A qualidade da imagem selecionada foi 1080p para a taxa de quadros de 120fps; e 720p (por limitações da câmera) para a taxa de quadros de 240 fps. Com essas condições de arquivos de vídeo, as escalas de tempo obtidas pelo *Tracker* foram:

fps	dt(s)
120	$8,34 \cdot 10^{-3}$
240	$4,17 \cdot 10^{-3}$

Para a análise física do movimento foi acompanhado somente um ponto de interesse: o estimado CM do participante. Não buscamos averiguar nada espantoso, mas como notamos em [3] que para estimar a força vertical máxima a partir dos dados de uma plataforma de forças basta considerar as forças que atuam na direção vertical do plano de observação do movimento. Achamos curioso que talvez, devido ao dt do programa ser consideravelmente pequeno, e mesmo analisando impactos que ocorrem ao longo de um intervalo de tempo da ordem de $\approx 0.1s$ ainda temos alcance de dados neste intervalo de tempo para o dt dado pelo *software*.

Quando necessário, e somente quando necessário, as posições dos CM foram estimadas de forma também qualitativa. Consideramos sempre a distribuição de massa ao longo das seções do corpo de acordo com o oferecido na pela bibliografia da Biomecânica, de forma que mesmo tendo que realizar algumas concessões para que os marcadores funcionassem (mesmo que se

distanciando do ponto geométrico ideal) de forma razoavelmente consistente de acordo com as condições de t́nhamos. Nosso intuito não foi recriar as práticas de um ambiente laboratorial em minúcia, mas de explorar a capacidade de gerar um sistema que dependesse do que observamos, visualmente, do sistema [1].

2.1 Interface do *Tracker*

De acordo com Douglas Brown, criador do *software*, sob uma visão geral o automarcador do *Tracker* funciona da seguinte maneira:

Uma região do primeiro frame do vídeo de interesse é selecionada; esta região fica inscrita em outra janela que define onde o software procurará correspondências para a região de pixels escolhida de início (o *template*). Uma correspondência é obtida quando a diferença entre os pixels da região definida como molde inicial e os pixels de um frame seguinte é suficientemente pequena. A equação que mede a diferença de pixels entre o molde e uma possível correspondência de uma região-teste é, ainda de acordo com Douglas Brown, a seguinte:

$$\sum_i [(\Delta R_i)^2 + (\Delta G_i)^2 + (\Delta B_i)^2] = \Delta(RGB) \quad (2.1)$$

Em que, R é vermelho, G verde, B azul, e m e t são espaços de coleta. Um é definido pelo aplicativo, restringido e fixo. O outro podemos manipulá-lo. No programa a manipulação dos *templates* é bastante intuitiva se considerar a interpretação de [13] de que a correspondência do deslocamento entre os deslocamentos ST e GT é medida pelo centroide. Percebemos após longa exposição ao *Tracker* que a interpretação qualitativa do centroide é de grande ajuda para aumentar consideravelmente a precisão do aplicativo.

$$\Delta R_i = R_{ti} - R_{mi}$$

$$\Delta G_i = G_{ti} - G_{mi}$$

$$\Delta B_i = B_{ti} - B_{mi}$$

Dentro das possibilidades de possíveis correspondências para o molde, a priorizada é a que obedece a um mínimo "*match score*" (imposto pelo usuário, e varia de 0 a 10), definido como:

$$MS = \frac{1}{\Delta RGB} \quad (2.2)$$

Nosso trackeamento será baseado no marcador que escolhermos, que é uma fita crepe de coloração branca, e na forma como manipulamos as variáveis do automarcador. Experienciamos durante a obtenção de dados que, muitas vezes, um marcador deixava de marcar com precisão quando passava a oscilar dentro de uma região de cor que a *frames* anteriores era uma região de contraste e poucos frames depois se tornava um *frame monocromático*. Após longa exposição ao *software*, percebemos que este é capaz de estimar, com boa correlação, até mesmo o deslocamento de um *template* monocromático (embora seja uma situação longe do ideal e evitamos ao máximos analisar trechos monocromáticos). Conseguimos, por exemplo, em nossas análises, trackear com boa precisão o movimento da cabeça de um participante, mesmo que essa fosse uma coleção de pixels de somente uma cor.

Importa que saibamos que no software que escolhermos, disponível gratuitamente e com código *Open Source*, durante o processo de trackeamento alguns parâmetros podem ser ajustados



Figura 2.1: *Template*: círculo. O retângulo fora do *template* se chama *keyframe*. Os pontos marcados nesta imagem são a cabeça (vermelho) e o ombro (azul). Cada número nas marcações representa um frame.

pelo usuário. É nestes parâmetros que residem os limites quantitativos da precisão máxima do nosso software. Nos manuais encontrados sobre o *Tracker* e nos fóruns de discussão do mesmo, não encontramos qualquer menção sobre a abordagem que interpretamos, após longa coleta, como ideal. Acreditamos que a falta de conhecimento sobre essa capacidade do *software* reside na explicação do manual sobre o funcionamento dos parâmetros. Estes parâmetros em questão são "*Evolve Rate*", "*Tether Rate*" e "*Automark*". Como utilizamos o *software* na sua versão em português, estes parâmetros são chamados de "Taxa de Evolução", "Tether" e "Auto Marcação".

- *Taxa de Evolução*: define como o *template* se adapta às mudanças de forma e cor. Uma taxa de evolução de 0, por exemplo, não evolui de forma alguma, enquanto uma taxa de evolução de 100% atualiza um *template* novo inteiro para cada frame.
- *Tether*: Limita as mudanças repentinas de frame dentro de um *template*. Um *Tether* grande significa, por exemplo, que esperamos que dentro do *template* que escolhemos haja rápido movimento de frame. O outro caso é o caso do *tether* pequeno (como já vem padrão no software) que significa que dentro do *template* quase não ocorrerá evolução.
- *Auto Match*: Define a pontuação mínima exigida para que uma correspondência seja considerada correta. O nível padrão é quatro mas consideramos que quanto maior o melhor para precisão, pois o software passará a fazer escolhas somente com o máximo de correspondência. Ainda sim ele pode corresponder errado [11], mas não deixamos de considerar que o *tracking* foi eficiente pois possuiu informação contínua entre os dados.

Sob primeira análise, para adquirirmos conhecimento experimental sobre como o *tracking* do aplicativo em questão funciona, e sabendo que o funcionamento do mesmo respeitaria as métricas já expostas, realizamos diversos testes com o intuito de experimentar como o *ST* funcionaria para diversas combinações dos parâmetros do *software* mencionados para cada vídeo-caso.

Primeiramente tomamos os parâmetros pré-selecionados do *software* como os "mais adequados", os mantivemos na sua configuração *default* e realizamos diversas medidas, sempre para os movimentos de parkour, para várias condições de especificidade do movimento. Quando tentávamos trackear um único marcador que se mantinha nítido ao longo de toda película, obtínhamos deslocamentos aparentemente contínuos, e se respeitando as indicações do manual do *Tracker* para escolha de ambiente, angulação em relação à câmera, cor e tamanho do marcador, obtínhamos ligeiros melhores resultados.

Quando encontramos algum problema relacionado ao automarcador a estratégia utilizada inicialmente foi marcar manualmente a possível região de interesse. Óbvio que isso gera imprecisão mas inferimos dados sobre várias abordagens com o intuito de ponderar com a maior certeza possível que estávamos estudando o comportamento do algoritmo do *ST* em questão, em si.

Devemos ressaltar que as técnicas sofreram ligeiros porém consideráveis desvios em relação a como os praticantes a executavam fora do ambiente de filmagem. Isso devido ao fato de que certas precauções motoras foram tomadas com o intuito de não tampar os marcadores, fazendo com que o movimento dos braços dos participantes fosse alterado em relação a como eles os executam usualmente, e conseqüentemente fazendo alterar sua absorção usual [14]. Em alguns casos os movimentos foram efetuados de maneira livre, sem que fossem estabelecidas restrições para o movimento dos participante durante a execução da sua técnica, e obtivemos mais erros devido ao fato de os marcadores sofrerem alterações em sua visibilidade.

Tomamos como prioritários os casos em que os marcadores estavam melhor iluminados e os casos onde o contraste da iluminação estava favorável para o uso do *autotracker*. Evitamos ao máximo, e com rigor (pois em nossas análises finais foram tomadas menos de 5 decisões manuais para cada 100 frames), usar o trackeamento manual pois nosso objetivo foi de testar a precisão do *autotracker* na escala em que ele permite ser utilizado. Após longa exposição percebemos que os vídeos em 240fps geravam muita imprecisão pois a qualidade gráfica da imagem era muito inferior à qualidade das gravações em 120fps. Mais especificamente, o celular utilizado só permitia gravações em 240fps com resolução de 720 pixels. A diminuição de pixels trackeáveis diminui evidentemente a precisão do algoritmo, pois ele funciona baseado nessa relação. Assim, ficamos ao final somente refinando análises das gravações em 120 fps e resolução 1080p pois possuíamos melhor nitidez.

No que enseja o trackeamento, nossa estratégia foi simples: dividimos o corpo em corpos rígidos com centros de massa (CM) que seguem a descrição qualitativa de acordo com os modelos biomecânicos mais recentes que encontramos:

Considerando que analisamos filmagens dos participantes sempre de perfil, reduzimos o número de marcadores pela metade sem perder a simetria.

Montamos uma tabela de pesos para cada ponto de interesse baseado nos modelos de Biomecânica vigentes. Ao final da análise refinamos os vídeos de somente um participante e montamos a sua distribuição de massa ao longo do corpo.

De início, para exposição experimental à coleção de informação do *tracker*, estudamos vídeos onde os marcadores fossem todos visíveis ao longo de quase todo o vídeo e depois de refinamento passamos a estudar situações onde os marcadores eram tampados ou perdiam nitidez. Obtivemos, após refinamento das técnicas de utilização do *software*, precisão significativa até mesmo para casos onde não tínhamos marcadores sempre visíveis.

Nos casos onde o automarcador do *software* realizava a maior parte das marcações sem conflito crasso com o *template*, reservamos mais confiança na obtenção de dados e conseqüentemente realizamos o *plot* das forças versus tempo estimadas. Isto porque o algoritmo do programa é consistente com a evolução dos pixels do vídeo, e filmamos os movimentos em

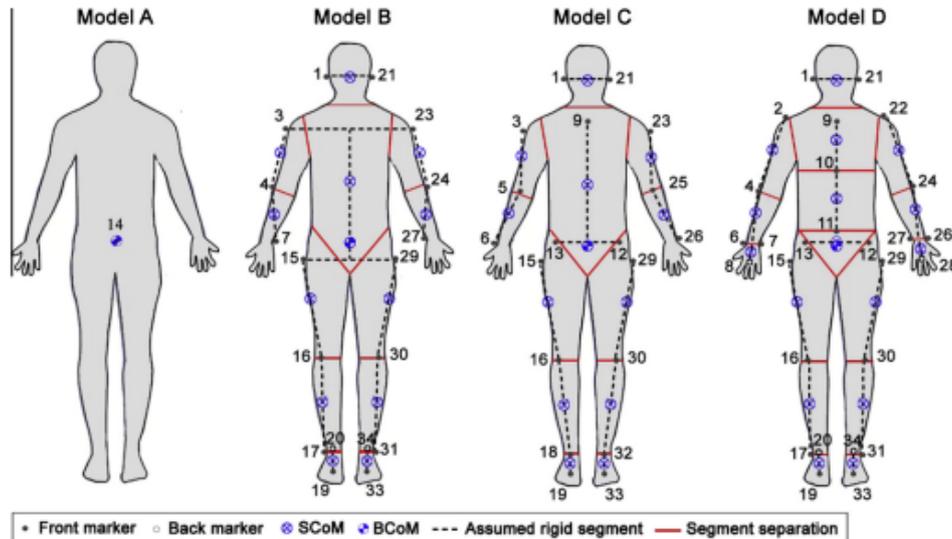


Figura 2.2: Pontos que marcamos para o tracking [15]. Nas análises iniciais usamos o modelo A, e fomos progredindo tentando, na medida do possível, alcançar um modelo com mais pontos, como o Modelo D. Ressaltamos que filmamos os corpos executando seus movimentos de perfil e por isso, na prática, trackeamos somente os pontos para a metade do corpo.

relação ao plano mais favorável possível para que o marcador possua melhor precisão.

Como mencionado, uma coleção de vídeos foi estudada e um criterioso processo de discriminação entre vídeo com boa qualidade para melhor aproveitamento do automarcador e vídeo com má qualidade para o *trackeamento* foi incidido sob as amostras em mãos.

Quando os movimentos não envolviam mudanças de posição que viessem a tampar os marcadores, e quando quase não se fazia necessária a correção das marcações por análise qualitativa, entendemos que deveria ser esperado uma relação entre os dados mais coesa para quase todos os dados obtidos. Quase todos porque, em alguns instantes, recorremos a corrigir manualmente eventuais marcações que denotassem erro crasso do automarcador - muito provavelmente por simples problema de falta de contraste suficiente no *template*, fazendo que que o marcador não permanecesse coeso na estrutura que almejávamos seguir. Levamos em consideração as observações de Bryan et al. [16], que afirma que os resultados podem ser muito afetados se os pixels do corpo analisado se misturam com o fundo.

De fato, em nossas coletas esse erro foi recorrente devido aos marcadores. Tomamos como certo que o automarcador seria capaz de seguir os braços normalmente porém há muito deslize de pontos quando o automarcador busca numa região que possui pouca variação de cor.

Como exposto no início da sessão, nossos Δt são pequenos o suficiente, na ordem de 10^{-3} , de modo que possamos permitir-nos investigar se há boas correlações nas forças medidas pelo *software*. Como estamos estabelecendo uma relação experimental próxima (sob abordagens diferentes) a Puddler [3], dividimos nossa análise em duas laboriosas partes.

A primeira consiste em verificar se o mero trackeamento das posições estimadas representadas por pixels de interesse, sob o algoritmo do autotracker (otimizado para o nosso caso, como verificamos de antemão nos manuais) pode estabelecer relação coesa com potenciais resultados de uma plataforma de forças em comparação.

Antes de prosseguir com a introdução do procedimento de verificação comparativa, faremos uma breve consideração acerca do que tomamos como geral para nossas amostras:

2.2 Coleta da posição do centro de massa pelo trackeamento de um único ou vários marcadores

Mantemos um certo rigor tácito em tentar sempre iniciar a marcação quando o corpo estivesse no ar, já em queda livre, numa posição propícia para que os marcadores tivessem boas condições iniciais de evolução, de modo que esperamos, que nos primeiros instantes de tempo as nossas marcações para todas as coletas tendam para a força peso $-P$, ou, como será representado em nossa escala comparativa, em *bodyweight*, para os instantes iniciais das amostras devemos coletar em média o valor -1 , de modo que o erro encontrado na medida do *Tracker* em relação às forças que esperamos observar será o desvio padrão que obtivermos nessa primeira filtragem por calibração em relação às condições certas sobre a evolução temporal do sistema.

Enquanto o corpo não toca o solo, deveríamos observar, em média, uma coleta de dados dos marcadores que tendesse a aproximadamente a força peso. Nas nossas amostras, todos os corpos estavam mais ou menos sincronizados (priorizamos a escolha por frames que favorecessem o automarcador, mesmo que perdêssemos sincronia), de modo que todos encostavam no chão, após a queda livre devido ao salto, no tempo inicial médio:

$$t_i = 0,134s \pm (0,060)SD$$

Em que SD é o desvio padrão, de modo que podemos estabelecer uma comparação entre múltiplas medidas de uma mesma técnica para uma mesma altura. Como consideramos estabelecer relações quantitativas com trabalhos anteriores, utilizaremos o conceito de força na escala de peso corporal em lugar da notação em Newtons. Primeiramente vamos definir quais movimentos observamos e de que forma os observamos.

Observamos primeiramente tentativas livres de execução de precisão, rolamento e técnica tradicional realizadas pelos participantes. Estes tentaram, sob todo seu alcance e conhecimento de treino, respeitar o que se entendia pelos movimentos (e também como descreve Puddler et al). Observamos os vídeos coletados em análise posterior e discriminamos quais técnicas possuíam boas condições para serem marcadas e quais vídeos teriam sua coleta de dados muito provavelmente interferida por perturbações. Obtivemos:

Não obtivemos relação confiável entre as medidas mas pudemos perceber que nos instantes iniciais do movimento, quando olhávamos para o eixo negativo, começava a surgir uma força Peso, embora estivesse sendo estimada incorretamente. Avaliamos que fosse possível aumentar a precisão dos experimentos para averiguar se o algoritmo passaria a correlacionar melhor, pois como tendia a correlacionar para uma força externa Peso versus Atrito enquanto o praticante estava no ar (figura 2.3), pensamos que seria possível testar formas de aumentar sua precisão mediante comparação com as condições iniciais, antes do impacto, enquanto os participantes estivessem no ar. Obtivemos dados cada vez mais correlacionados para as tentativas sucedentes.

Sabemos que de acordo com [3] que as forças de reação do solo para os casos de absorção tradicionais são maiores mas mesmo que os dados iniciais em conjunto pareçam ter certa resposta positiva em relação à [3], não foi possível garantir que as correlações estavam corretas mediante a métrica utilizada. Afinal, o trackeador marca a evolução dos *templates* e um rápido movimento que um corpo faz entre *frames* pode ser confundido, pelo trackeador, com um rápido movimento do centro de massa (CM) do corpo.

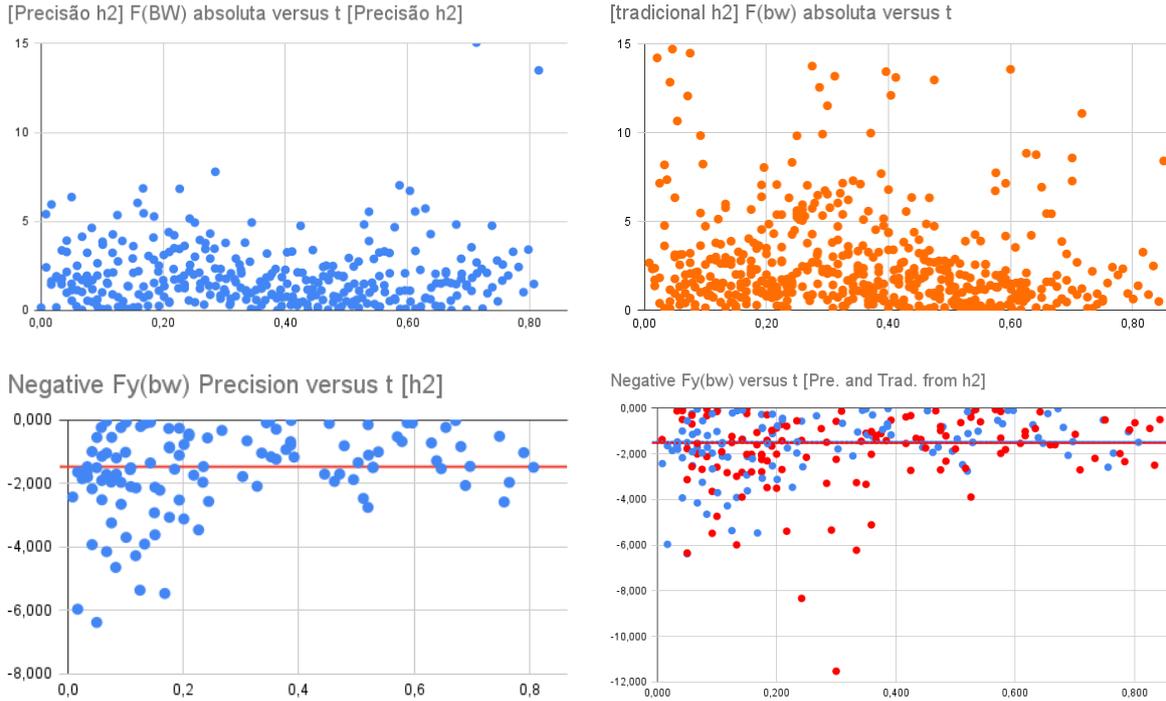


Figura 2.3: Correlações iniciais que obtivemos. Coluna à esquerda: Força versus tempo para a precisão. Coluna à direita: Força versus tempo para a técnica tradicional. Inicialmente embora a distribuição dos pontos se parecesse muito pouco com resultados obtidos por plataformas de força, percebemos que ainda sim se seguia uma tendência da precisão ter menor força vertical máxima que a força máxima da técnica tradicional.

2.3 Inclusão da Análise do Rolamento

A figura 2.4 nos mostra promissora melhora do *tracking system* (TS) do *Tracker*. Nesse instante de tempo da figura, a posição da cabeça estava sendo trackeada e qualitativamente podíamos dizer que, nesse instante de tempo, a cabeça possuía mais velocidade na horizontal do que na vertical. Percebemos que embora o algoritmo tenha errado na medida de deslocamento da cabeça entre um frame e outro suscetivo, ele fez um deslocamento de tal forma que interferisse menos na medida horizontal (onde no contexto da figura inferíamos que, por observação do vídeo, era a direção onde havia maior deslocamento do respectivo corpo).

Primeiro, começamos tentando estudar o comportamento do *tracking system* quando trackeando um único ponto de referência e que ficasse visível em primeiro plano na maior parte do tempo, de forma que o *keyframe* e o *template* se associassem de modo a obtermos correlações corretas (de início usamos as configurações padrão do *software*, que se traduzem a manter o *template* parado (tether 5%) e o *background* evoluindo (Taxa de evolução 20% a 30%). Mantivemos inicialmente a configuração inicial de Auto Marcação (fixada no valor 4). Posteriormente, para aumento de precisão do *tracking*, utilizamos a Auto Marcação fixada no 10.

Enquanto observadores, podemos facilmente estabelecer uma métrica que nos permite dizer se um *tracking* é uma correlação provavelmente correta. Por exemplo, se observamos um impacto entre um frame $[x, x + 1]$, e se antes do impacto o objeto possuía uma força $df < 0$, então esperamos que logo após o impacto o ST registre uma força $df > 0$ num curto intervalo de tempo. Basicamente o que queremos dizer é que por inferência qualitativa nós podemos coletar dados e observar se eles de alguma forma convergem para algo preciso ou se eles se espalham



Figura 2.4: A figura acima nos mostra o participante executando um rolamento, onde cada linha representa o deslocamento de um ponto trackeado. Abaixo temos um deslocamento realizado entre um frame e outro (da esquerda para a direita), o vetor representa a velocidade medida nos deslocamentos em questão.

demais e não são confiáveis.

Os dados foram coletados com o uso majoritário do *trackeador* e apenas fizemos seleções manuais quando o próprio algoritmo não encontrou correspondência. Não obtivemos tendência favorável para a precisão durante esse caso. Hipotetizamos que se talvez dobrássemos a altura de queda teríamos variações mais perceptíveis mas a análise de dados não nos demonstrou relação provável. Obtivemos para esse caso que nossas observações tenderam a respeitar as observações anteriores do tema (acerca da precisão de técnica tradicional [3]), mas sem confiabilidade enquanto *trackeávamos* poucos pontos. O processo de escolher se uma correspondência é ou não correta é trabalho de observação visual do operador do *TS* e deveras tedioso para ser recapitulado em minúcias. No caso das técnicas tradicionais e precisão o *trackeamento* é facilitado porque dificilmente os marcadores ficam tampados durante um intervalo significativo entre *frames*. No caso do rolamento a análise é mais delicada porque muitos marcadores ficam tampados (devido a posição que o corpo assume enquanto rola) e a decisão de uma correlação correta deve ser mais rigorosa.

A nossa suposição para averiguar se o *Tracker* tem capacidade de obter dados de forma precisa está respaldada no vasto repertório bibliográfico acerca da possibilidade de obter resultados semelhantes às plataformas de forças, com até 10% [16] de erro máximo, usando aplicativos de marcador.

Em verdade não foi tão complicado estudar o rolamento com poucos marcadores pois as participantes efetuaram diversos movimentos e a biblioteca de dados era grande o suficiente para conseguirmos escolher os melhores vídeos (com menos saltos de frames, menos quantidade de borraduras nas regiões que são de interesse para nosso *tracking*).

Embora nas primeiras triagens os resultados foram não correlacionados, pudemos perceber

que mesmo assim os caminhos escolhidos pelo *TS* para os *GT* movimentos estavam sendo consistentes com uma certa proporção entre os deslocamentos horizontais e verticais, ou seja, o algoritmo estava conseguindo dizer qual deslocamento era maior que outro, porém não conseguia medir corretamente nem a força nem a direção correta do movimento.

Neste período de testes começamos a refinar mais nossos parâmetros. A partir daqui todas as análises foram feitas com a Auto Marcação no valor 10, o que implica que é o maior rigor que podemos dar para que o *template* e o *keyframe* avaliem se uma dada interpolação é um *match*. Mesmo que a partir daqui experienciemos medidas incorretas, se correlacionarmos corretamente os *templates* com a estimada *GT* (que estimamos, em seu comportamento, através da observação visual do movimento).

Com o auto marcador fixado no máximo, realizamos relações geométricas e mudanças no *tether* e na taxa de evolução o quanto fossem necessárias para que **somente** o software fizesse qualquer *track* de posição. A partir daqui refinamos ao máximo nossa coleta, sempre estabelecendo relações entre o *template* e sua taxa de evolução de acordo com o que sabemos por inferência experimental. Afinal, este autor possui anos de contato empírico com esta prática.

Nos estágios finais de refinamento obtivemos boas correlações. A partir dessa etapa todos os vídeos estavam sincronizados com erros de ± 2 frames, de modo que após horas de análise, obtivemos cerca de duzentos frames trackeados com apenas 5 decisões humanas arbitrárias no caminho. E quando foi necessário que fizéssemos uma suposição, a fizemos de modo que favorecesse à evolução da geometria do *template*, e não a simples inferências qualitativas nossas, para que o algoritmo correlacionasse com sigilo mesmo de forma mais consistente. Sob esses critérios o *Tracker* nos ofereceu dados satisfatórios em relação aos que esperávamos. Mesmo quando *trackeava* um caminho incorreto, a variação de *overlap* espacial e temporal correspondia ao que imaginávamos qualitativamente para o frame em que se relacionava.

Embora não saibamos quanto seja o *Threshold* do software, sabemos que trabalhamos com seu valor de modo a ele só permitir 100% de correlação em sua escala, de modo que mesmo os Falso Positivos (FP) que surgissem possuíssem correlação contínua.

Os resultados que obtivemos de cada melhor análise (consideramos uma melhor análise aquelas que tiveram menos intervenções humanas no trackeamento possíveis) nos apontaram que, embora as técnicas do rolamento e da precisão não sejam diferenciáveis no sentido das forças máximas que elas sentem para o *range* de alturas de [3] (figuras 2.7, 2.8, e 2.6), o rolamento experiencia menor força vertical máxima do que a precisão para alturas maiores que as medidas por [3](figuras 2.9 e 2.12). Em verdade sabemos por [14] que os torques experienciados durante o rolamento são mais favoráveis para uma absorção ótima do que as outras técnicas do parkour. Não existem dados até então que tentem medir a diferença das forças verticais máximas para esses casos de alturas elevadas.

Destacamos que durante esse estágio de análise, encontramos evidências interessantes de que nossas medidas possuíam correlação. Onde, na figura 2.5, percebemos que apareceriam contribuições de variação segunda de posição que indicavam que o *Tracker* estava sendo capaz de medir o atrito durante a queda. Estes resultados demonstram que a capacidade do trackeador é maior do que imaginávamos, principalmente para um programa gratuito. Constatamos que o algoritmo possui alta inteligência mas que as limitações dadas pelas restrições de escolha de templates e na clareza sobre os parâmetros torna o uso do aplicativo um pouco mais limitante do que outros mais modernos oferecidos pelo Mercado. Temos perspectivas futuras em trazer uma metodologia mais clara acerca da abordagem qualitativa em relação aos parâmetros do *Tracker* sob o olhar da *performance evaluation*. Constatamos que o *ST* do sistema poderia ser muito mais preciso sobre as *GT tracks* se fosse permitido maior liberdade para escolha de *templates*. No caso do *Tracker*, só são possíveis os *templates* elípticos ou circulares orientados somente

no eixo x. Embora exista essa limitação de uso o *software* ainda sim possui boa precisão para medidas relativas a diversos movimentos.

Quando comparamos nossos melhores *trackings* realizados dentro e fora do *range* de altura de Puddler et al, onde este *range* está entre 0 e 0.75 metros, obtivemos (figuras 2.6 a 2.12):

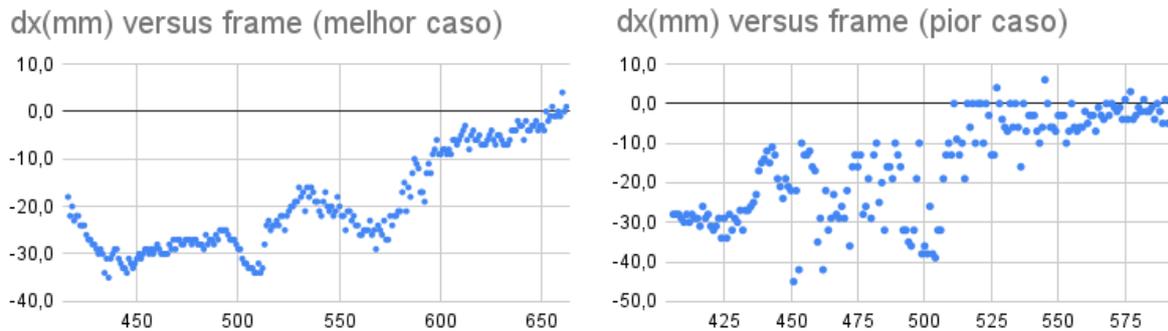


Figura 2.5: o corpo está no ar em movimento de queda entre os frames 450 e 500, tanto pra o gráfico da esquerda quanto para o da direita. Podemos perceber que no gráfico da esquerda, aparece, enquanto o corpo está no ar, identificado temporalmente como o instante de tempo entre os *frames* 450 e 500, aproximadamente, um decréscimo no valor absoluto dos deslocamentos mínimos horizontais, indicando que durante a queda o corpo é desacelerado horizontalmente (pela força de atrito do ar). Na imagem da direita a correlação não aparece entre os *frames* 450 e 500.

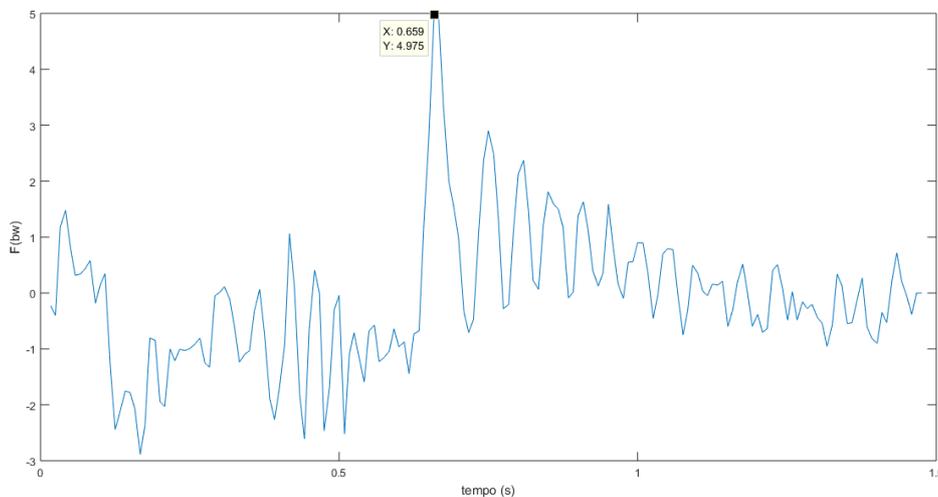


Figura 2.6: F(BW)(precisão) versus t. Altura dentro do *range* de [3]

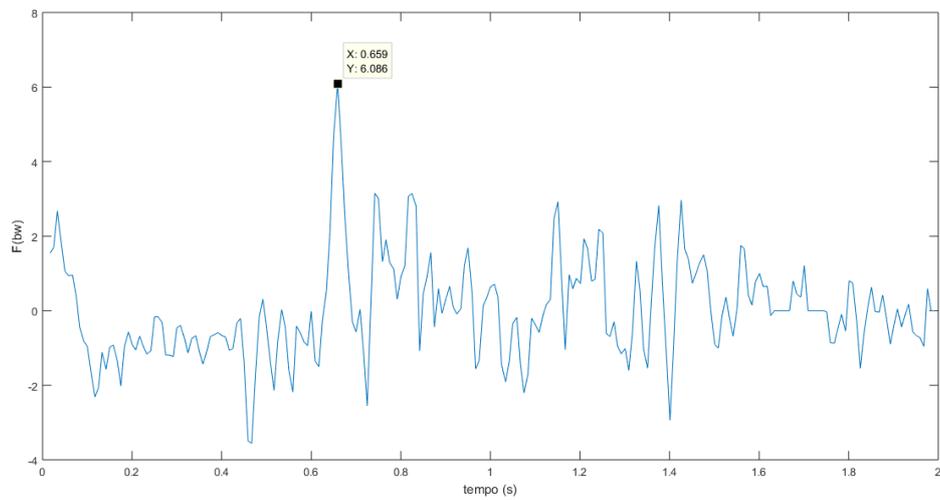


Figura 2.7: F(BW)(rolamento) versus t. Altura dentro do range de [3]

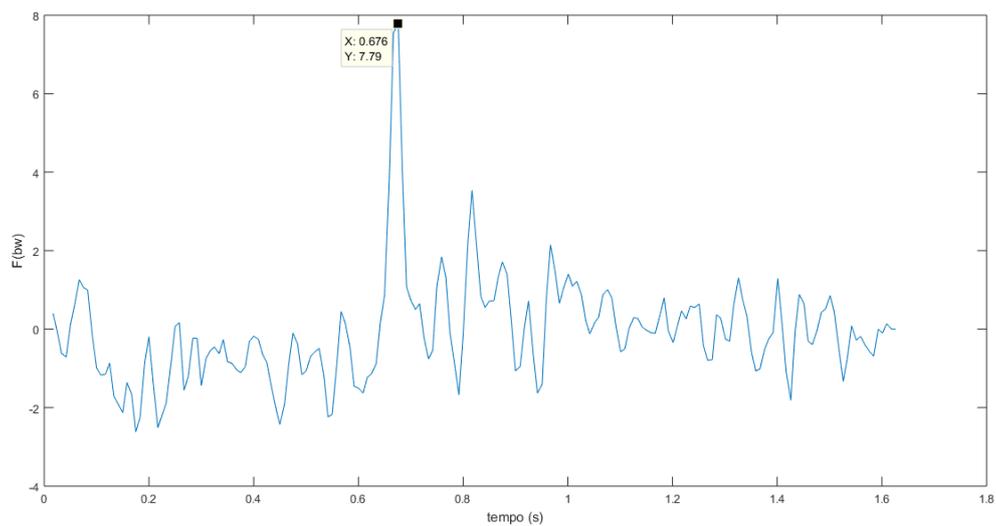


Figura 2.8: F(BW)(tradicional) versus t. Altura dentro do range de [3]

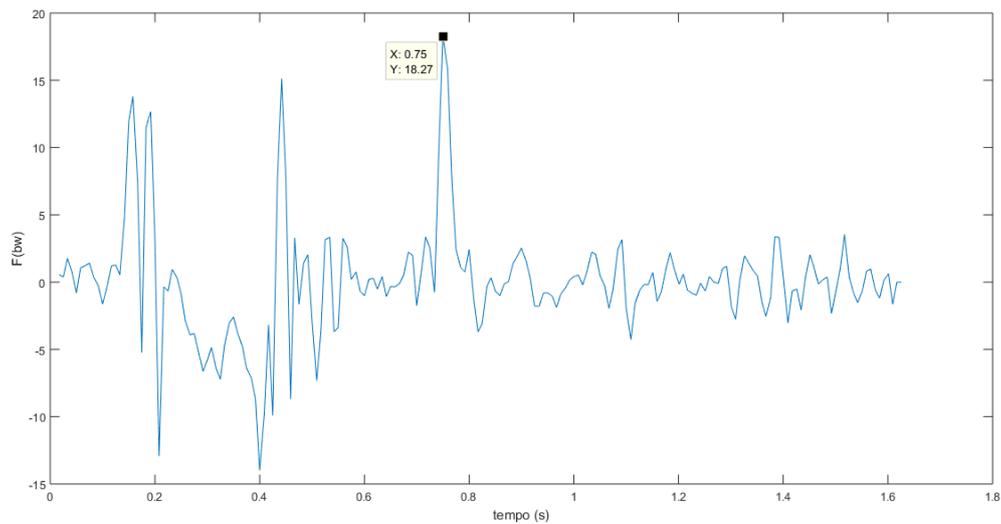


Figura 2.9: $F(BW)$ versus t (precisão a alturas maiores que [3])

Para esta análise, escolhemos um pico de força que coincidia com a GT que esperávamos, no instante 0.8s, e não antes. Supomos que o pico de força anterior seja movimento residual de algum *template*, pois, quando utilizamos como referência as condições $Fdt > 0$ e $Fvdt < 0$ (equações 1.21, 1.22) vemos que o pico próximo de 0.4s não obedece à primeira condição, como podemos ver nos gráficos 2.10 e 2.11.

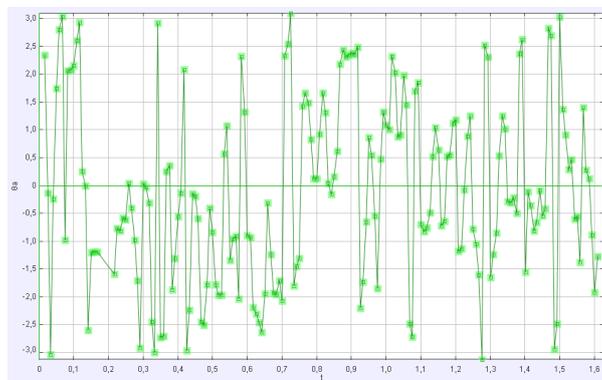


Figura 2.10: Ângulo da aceleração em relação à horizontal versus t (caso da figura 2.9)



Figura 2.11: Ângulo da velocidade em relação à horizontal versus t (caso da figura 2.9)

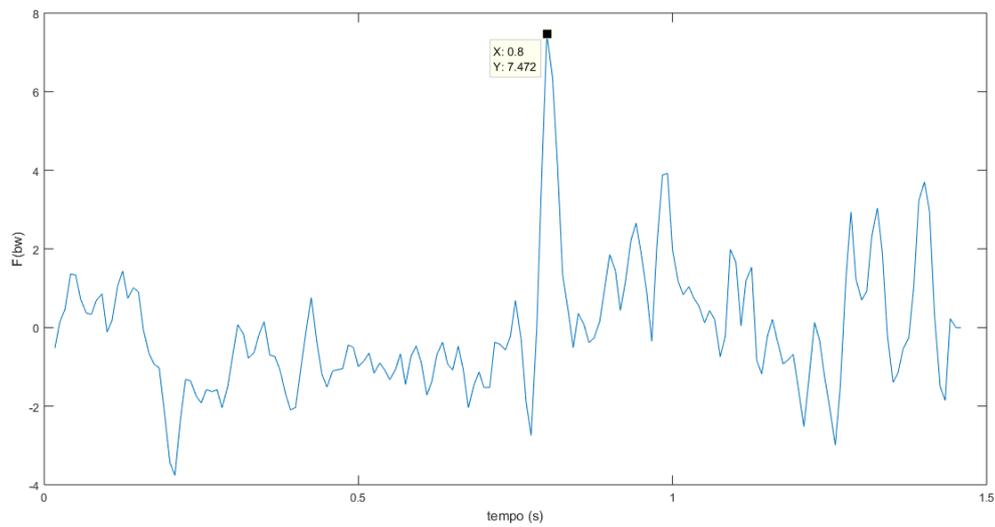


Figura 2.12: F(BW) versus t (rolamento a alturas maiores que [3])

Essa foi uma das melhores correlações que obtivemos para o rolamento. Podemos ver que o pico inicial de impacto está característico como em medidas feitas por plataforma de força. Como os movimentos de precisão e rolamento para essas alturas maiores foram analisadas sincronizadas, podemos perceber que o pico de força do rolamento demora mais a aparecer em comparação com o pico de força da precisão, configurando, assim, também menor *loading rate* em comparação à precisão.

Capítulo 3

Conclusões

Ao compararmos nossos resultados com os tomados como referência, obtivemos, para a precisão, em BW:

Fmax referência	Fmax obtido
3.2(.5)	5.0(1.2)

Para o rolamento, obtivemos, em BW:

Fmax referência	Fmax obtido
2.9(.2)	6.1(1.4)

Por fim, para a absorção tradicional, obtivemos, em BW:

Fmax referência	Fmax obtido
5.2(1.2)	7.8(1.4)

Os valores oferecidos para as forças verticais máximas obtidas pela plataforma de força no trabalho de Puddler et al. [3] estão indicados por "Fmax referência". Notamos que os valores-referência são as médias das medidas de forças obtidas entre 0 e 0.75 metros. E as nossas medidas efetuadas se encontram no teto de 0.75 metros. Consideramos que as relações são satisfatórias porque a indistiguibilidade do rolamento e da precisão para alturas entre 0 a 0.75 metros se mantém, e a maior intensidade das forças de absorção tradicional em comparação com as duas técnicas do parkour também se mantém.

Concluimos que o software *Tracker* nos oferece maior precisão do que o esperado. Ao longo do nosso trabalhos descartamos estudar o Kinovea pois este software não possui clareza em relação aos seus parâmetros e não é possível manipular de forma alguma o *Threshold* mesmo que indiretamente (como acontece no *Tracker*). Observamos que é possível coletar informações em escala ainda mais baixa no *software* por ele demonstrar correlação forte com a realidade em pequena escala. Observamos também que o *software* possui uma interface amigável e é possível que pessoas sem conhecimentos da área se aventurem em calibrações de suas análises. Acreditamos que seja possível obter valores mais detalhados mas que não cabem ao escopo deste trabalho. Observamos durante a coleta e refinamento de dados que os caminhos mínimos tomados pelo *software* estudado são todas retas, onde podemos tomar um caminho mínimo de deslocamento entre frames através de uma relação pitagórica, como:

$$dr^2 = dx^2 + dy^2$$

Obtivemos resultados interessantes para análises futuras.

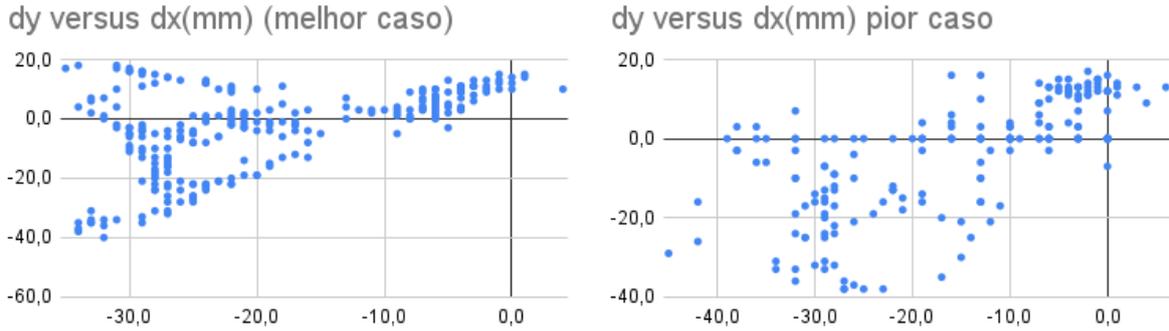


Figura 3.1: Duas leituras do rolamento. À esquerda vemos a coleção dos deslocamentos mínimos horizontais e verticais tomado pelo trackeador na análise mais refinada. À direita vemos a mesma coleção de pontos mas para o caso menos refinado. Os dados estão plotados na escala de milímetros pois fica mais fácil visualizar os pontos, coincidindo com a escala espacial do *software*, que é 10^{-3} m.

Algumas observações de metadados interessantes que obtivemos ao longo dessa jornada:

Na figura 3.1 percebemos que no melhor caso há uma concentração alta de pontos na região de dy alto, com valor absoluto $|dy| \approx 20mm$ e entendemos que os pontos estão correlacionados assim e continuamente, provavelmente, durante movimentos entre frames nas proximidades do impacto real GT. Provavelmente as leituras mais altas também estariam corretas (possibilidade de estudarmos impactos ainda mais elevados em condições diferentes) pois há um acúmulo significativo de pontos nos incrementos $|dy| > 20mm$. No caso ruim a correlação é boa para os incrementos dy positivos entre 0 e 20. Acreditamos que nessa situação o software estivesse trackeando bem um *template* e sua taxa de evolução, mas não podemos afirmar que era consistente porque para quase quaisquer outros pontos (dx, dy) a continuidade é baixa.

Podemos perceber pela figura 3.2 que os deslocamentos infinitesimais escolhidos pelo programa nas condições ideais buscadas possuem evolução mais contínua.

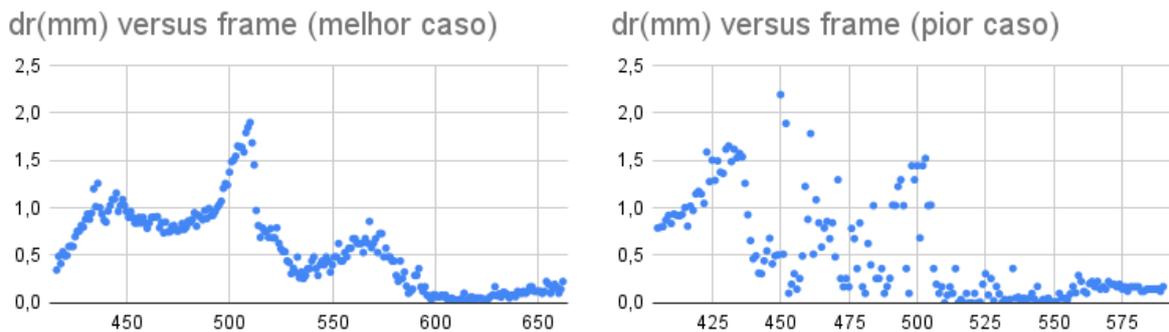


Figura 3.2: duas leituras para o mesmo movimento, o impacto se inicia por volta do frame 500

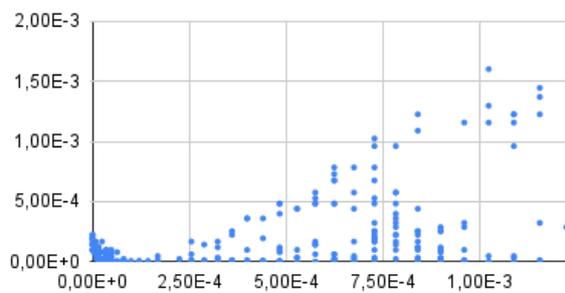
Ressaltamos que obtivemos correlação boa na análise que indica que o rolamento seja duas vezes mais eficiente na região de altura que é o dobro da usada em [3]. Temos a predisposição de investigar casos de parkour em cenários mais variados, pois sem a restrição da necessidade do uso da plataforma de forças para obter bons dados podemos avaliar movimentos mais complexos.

Apêndice A

Apêndice

Observação dos Dados ao Longo Desta Jornada:

dy² versus dx² (m) (melhor caso)



dy² versus dx² (m) (pior caso)

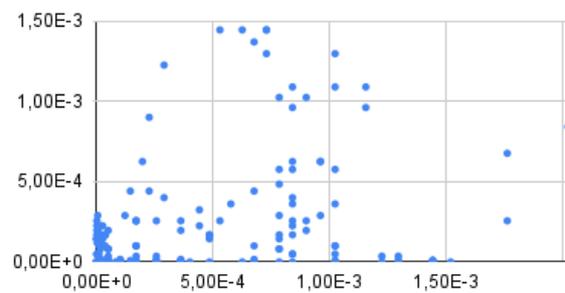
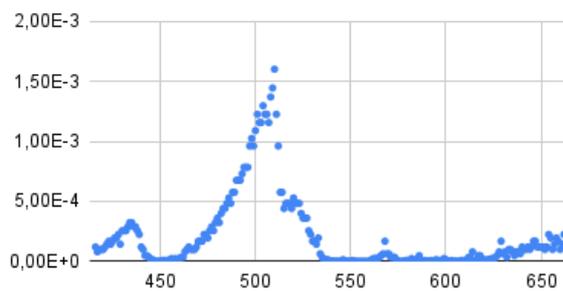


Figura A.1: da relação pitagórica dos caminhos feitos para a evolução de cada frame do ST, $r^2 = x^2 + y^2$, plotamos os dx^2 e dy^2 para o pior e o melhor caso de obtenção de dados para um rolamento.

dy² versus frame (melhor caso)



dy² versus frame (pior caso)

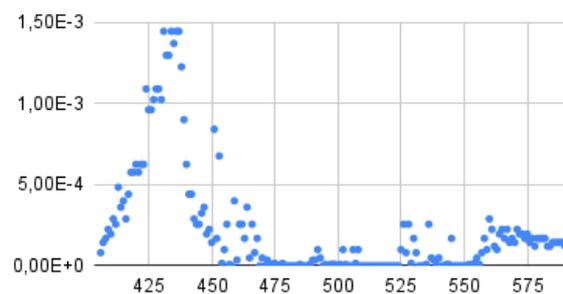


Figura A.2: Relação entre os caminhos dy^2 e o frame. Podemos enxergar uma evolução mais contínua entre os pontos

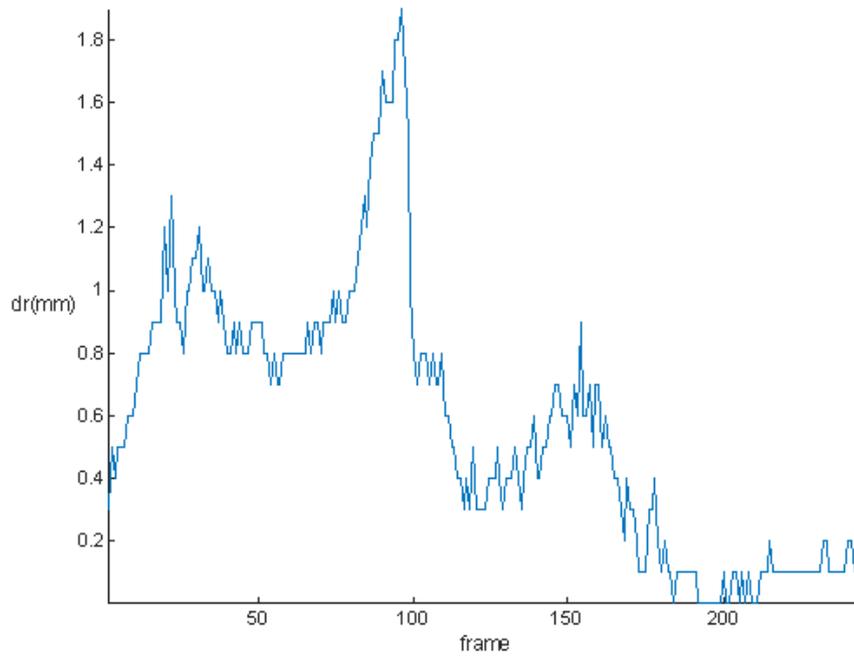


Figura A.3: caminhos mínimos entre cada frame tomados pelo software ao longo da análise do rolamento mais refinada

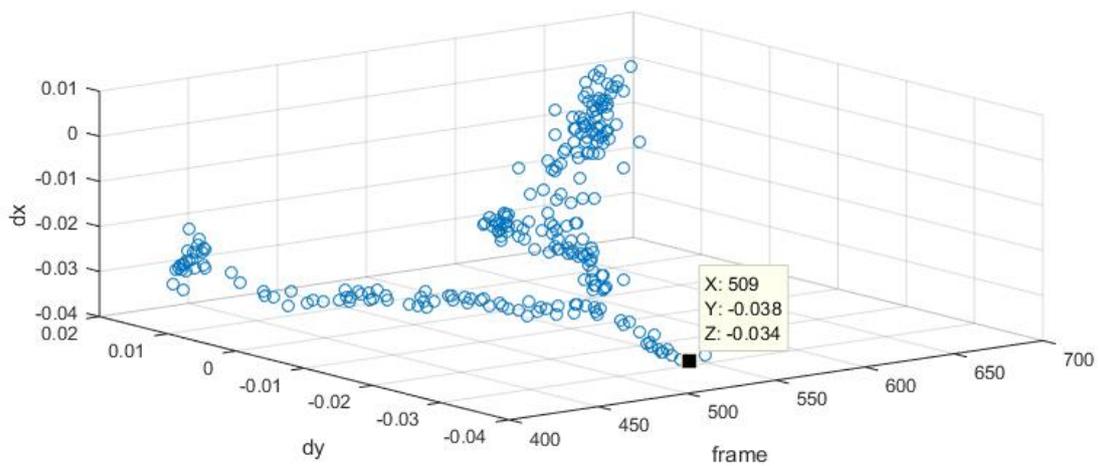


Figura A.4: dx,dy versus frame (melhor caso de rolamento)

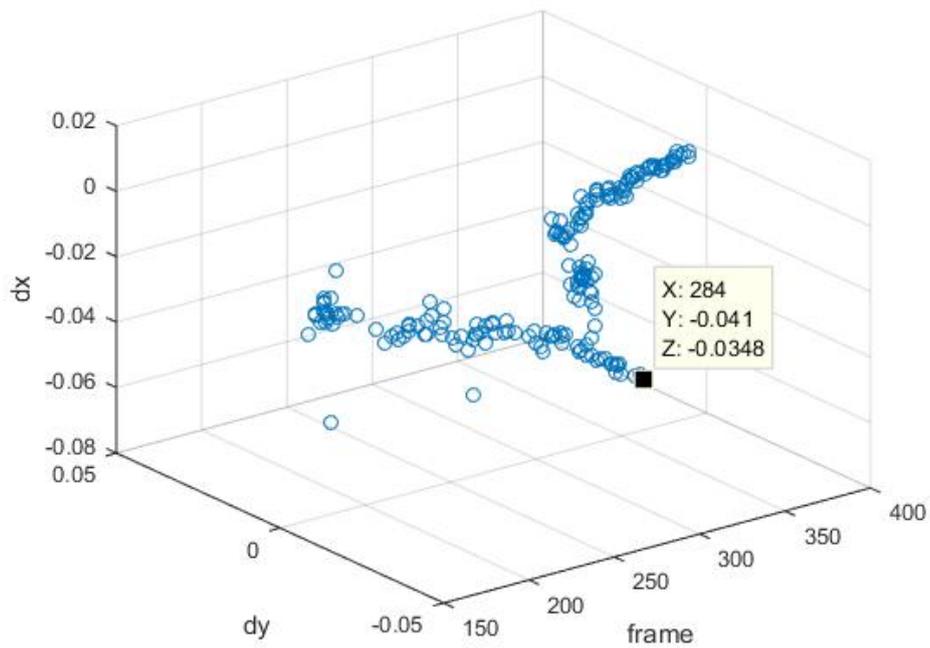


Figura A.5: dx,dy versus frame (melhor caso de absorção tradicional)

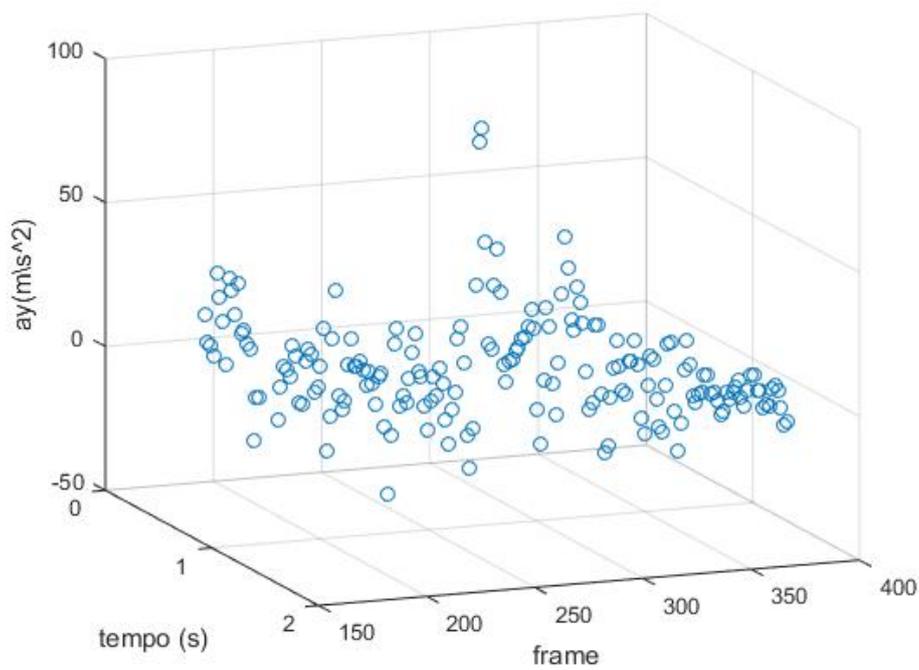


Figura A.6: aceleração vertical versus tempo e frame (um caso de rolamento com poucos marcadores)

Referências Bibliográficas

- [1] D. Knudson, *Fundamentals of Biomechanics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] A. L. M. Stramandinoli, J. G. Remonte, and P. H. Marchetti, “Parkour: história e conceitos da modalidade,” *Revista Mackenzie de Educação física e esporte*, vol. 11, no. 2, 2012.
- [3] D. L. Puddle and P. S. Maulder, “Ground reaction forces and loading rates associated with parkour and traditional drop landing techniques,” *Journal of sports science & medicine*, vol. 12, no. 1, p. 122, 2013.
- [4] J. L. McCrory, S. C. White, and R. M. Lifeso, “Vertical ground reaction forces: objective measures of gait following hip arthroplasty,” *Gait & posture*, vol. 14, no. 2, pp. 104–109, 2001.
- [5] W. R. Johnson, A. Mian, C. J. Donnelly, D. Lloyd, and J. Alderson, “Predicting athlete ground reaction forces and moments from motion capture,” *Medical & biological engineering & computing*, vol. 56, no. 10, pp. 1781–1792, 2018.
- [6] A. C. Fry, T. J. Herda, A. J. Sterczala, M. A. Cooper, and M. J. Andre, “Validation of a motion capture system for deriving accurate ground reaction forces without a force plate,” *Big Data Analytics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2016.
- [7] A. Post, D. Koncan, M. Kendall, J. Cournoyer, J. Michio Clark, G. Kosziwka, W. Chen, S. de Grau Amezcua, and T. Blaine Hoshizaki, “Analysis of speed accuracy using video analysis software,” *Sports Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 235–241, 2018.
- [8] D. W. Pereira and R. B. Mattos, “Parkour, transpondo o obstáculo da competição,” *Conexões*, vol. 19, pp. e021011–e021011, 2021.
- [9] M. J. Gittoes and G. Irwin, “Biomechanical approaches to understanding the potentially injurious demands of gymnastic-style impact landings,” *Sports medicine, arthroscopy, rehabilitation, therapy & technology*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2012.
- [10] LocomotorLabSMU, “Slow motion video of vertical jump with synchronized vertical force data,” 2012.
- [11] F. Yin, D. Makris, and S. A. Velastin, “Performance evaluation of object tracking algorithms,” in *IEEE International Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance*, Rio De Janeiro, Brazil, vol. 25, Citeseer, 2007.
- [12] L. M. Brown, A. W. Senior, Y.-I. Tian, J. Connell, A. Hampapur, C.-F. Shu, H. Merkl, and M. Lu, “Performance evaluation of surveillance systems under varying conditions,” in *Proceedings of IEEE Pets Workshop*, pp. 1–8, Citeseer, 2005.

- [13] A. Senior, A. Hampapur, Y.-L. Tian, L. Brown, S. Pankanti, and R. Bolle, “Appearance models for occlusion handling,” *Image and Vision Computing*, vol. 24, no. 11, pp. 1233–1243, 2006.
- [14] G. Maldonado, P. Soueres, and B. Watier, “Strategies of parkour practitioners for executing soft precision landings,” *Journal of Sports Sciences*, vol. 36, no. 22, pp. 2551–2557, 2018.
- [15] H. V. Dang and S. Živanović, “Experimental characterisation of walking locomotion on rigid level surfaces using motion capture system,” *Engineering Structures*, vol. 91, pp. 141–154, 2015.
- [16] T. B. Scalley, *Vertical ground reaction force estimation using position data measured from a markerless motion capture system*. PhD thesis, The Ohio State University, 2012.