

Actas del  
X Congreso Iberoamericano  
de Ingeniería Mecánica – CIBIM 10

Oporto, Portugal  
4-7 septiembre 2011

Ficha Técnica

*Titulo:* **Actas do X Congresso Ibero-americano em Engenharia Mecânica - CIBEM10**

*Editado por:* R.M. Natal Jorge; João Manuel R.S. Tavares; José Luis Alexandre; António JM Ferreira; Mário Vaz  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

*Data:* Agosto 2011

*Execução gráfica:* Tipografia Nunes Lda - Maia

*Depósito Legal:* 332096/11

*ISBN:* 978-989-96276-2-8

## ÍNDICE

<b>Prefácio</b> .....	1
XIII	
<b>A. Ciências Aplicadas</b>	
1. Métodos numéricos - Mecânica Computacional e Simulação .....	1
2. Mecânica geral - Mecânica Experimental .....	341
3. Vibrações mecânicas e acústica .....	477
5. Mecânica de fluidos .....	609
6. Termotecnia - termodinâmica .....	955
7. Energia - Energia Eólica - Energia Solar .....	1201
8. Sistemas de Representação - CAD - Interfaces e Visualização - Processamento e Análise de Imagem .....	1539
9. Estruturas .....	1591
10. Mecatrónica - Electromecânica - Robótica .....	1691
11. Instrumentação .....	1709
12. Materiais e Metalurgia .....	1723
13. Tribologia .....	2265
14. Biomecânica - Mecanobiologia - Bioengenharia .....	2379
<b>B. Desenho e Concepção de Máquinas e Componentes</b>	
15. Sínteses e análises de mecanismos - Desenvolvimento do Produto .....	2659
16. Veículos automóvel .....	2747
17. Maquinário de transporte .....	2999
18. Máquinas ferramenta .....	3027
19. Desenho de elementos de máquina .....	3087
20. Outras máquinas .....	3169
<b>C. Fabricação de Componentes e Máquinas</b>	
21. Processos de fabricação .....	3205
22. Planeamento e controle da fabricação .....	3577
23. Produção industrial - Gestão de Produção .....	3597
24. Fabricação automatizada (CAM) .....	3651
25. Controle de Qualidade .....	3661
26. Ensaios e verificações .....	3717

27. Metrologia .....	3809
<b>D. Exploração de Máquina</b>	
28. Manutenção .....	3869
29. Aspectos ambientais .....	3927
30. Reacondicionamento .....	3975
<b>E. Métodos e Técnicas para a Formação em Engenharia</b>	
31. Formação .....	3983

## COLISÃO ENTRE VEÍCULOS E PEÕES COM PROJEÇÃO FRONTAL

Sérgio D. L. Rodrigues<sup>1</sup>, Diogo E. C. Brites<sup>2</sup>, Paulo A. G. Piloto<sup>3</sup>

1-Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, Bragança, Portugal, email: sdlrodrigues@hotmail.com

2- Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, Bragança, Portugal, email: diogobrites@live.com

3- Instituto Politécnico de Bragança, IDMEC, Campus Santa Apolónia, Bragança, Portugal, email: ppiloto@ipb.pt

**Palavras chave:** Atropelamento, Colisão, Veículos, Peões, Projecção frontal.

### Resumo

A investigação na reconstituição de acidentes é frequentemente confrontada com atropelamentos de peões por veículos. Grande parte dos acidentes ocorrem por impacto frontal do veículo com o peão, [1], podendo em alguns casos ser considerado um impacto com projecção frontal. Neste trabalho será estabelecida uma relação entre a velocidade de pré-impacto e a distância de projecção, utilizando dois métodos de cálculo.

O método simplificado [1], considera o movimento do peão descrito por três fases distintas; impacto com transferência da quantidade de momento linear do veículo para o peão; queda por movimento plano geral de corpo rígido, descrito pelas equações de equilíbrio dinâmico; deslizamento com imobilização, descrito pelo princípio do trabalho e energia. Este modelo permite determinar a distância de projecção para cada uma das fases.

O método avançado de cálculo utiliza dois modelos de corpos rígidos para o peão [2]. O método A é constituído por um modelo de corpo rígido único e o método B é constituído por um modelo antropométrico de corpos rígidos articulados, ambos para descrever um movimento com impacto entre o veículo e o peão.

Neste trabalho será apresentado um estudo paramétrico para avaliação da influência dos principais parâmetros intervenientes neste tipo de acidentes (velocidade de pré-impacto do veículo, massa do peão e massa do veículo).

### 1. Introdução

Os atropelamentos ocorridos por colisão de veículos com peões dependem do local (rural ou urbano) e do país onde ocorrem. Os atropelamentos ocorridos em Portugal, na última década, sofreram uma variação significativa, em particular aqueles que se verificaram fora das localidades, com uma redução de 50 [3]. Nos dados estatísticos sobre segurança rodoviária da Europa (19 membros) [4], Portugal ocupa a 13º lugar em número de vítimas mortais por milhão de habitantes (14.8), enquanto que a Suécia ocupa a 1º lugar com menor número (6.1). A percentagem de vítimas mortais por atropelamento em relação ao número total de vítimas em acidentes rodoviários foi de 16.1% no ano de 2006.

Neste artigo é analisado um tipo de atropelamento por colisão, com projecção frontal. Estes acidentes ocorrem quando são verificadas determinadas condições: colisão de veículos de elevada altura frontal com peões ou colisão de veículos de passageiros com peões de baixa estatura (ex: crianças).

No âmbito dos estudos de investigação de atropelamentos, a velocidade de pré impacto do veículo assume-se como factor mais importante na reconstituição de acidentes rodoviários. A medição da distância de projecção do peão é determinante para o cálculo da velocidade de pré-impacto do veículo. Existem vários factores que influenciam a relação entre a distância de projecção e a velocidade de pré-impacto, para além dos mecanismos de colisão que se podem verificar na relação do veículo com o peão e do peão com o solo.

Nas secções seguintes são utilizados dois métodos de cálculo para determinação da velocidade de pré impacto: o método simplificado e o método avançado de cálculo. O método simplificado de cálculo deriva das equações fundamentais da dinâmica de corpos rígidos, enquanto que o método avançado de cálculo resulta da aplicação dos mesmos fundamentos, mas com a utilização de segmentos anatómicos articulados.

### 2. Atropelamento com projecção frontal

Este tipo de atropelamento pode ser caracterizado por três fases, ver figura 1. Numa primeira fase ocorre o impacto do veículo com o peão, durante um período de tempo muito curto [5], com os membros inferiores a manterem o contacto com o solo e os membros superiores a sofrerem rotações independentes. Numa segunda fase, mais prolongada, o peão entra em movimento plano geral, com o corpo em queda por acção da gravidade. Na fase final, considera-se o corpo do peão em contacto com o solo, estando submetido a uma acção de atrito.

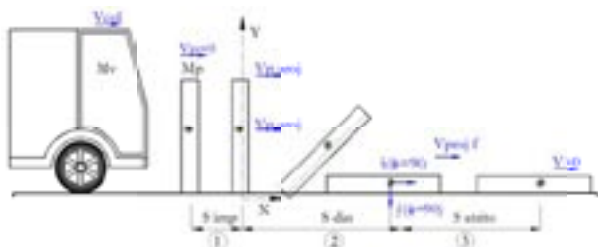


Figura 1: Representação do movimento do peão.

Para análise das fases descritas, é fundamental o conhecimento da geometria e da massa do veículo, a massa e a posição do peão, a duração do impacto, os coeficientes de restituição entre os diferentes corpos e o coeficiente de atrito entre o peão e o solo.

### 3. Métodos de análise

Nesta secção são apresentados três métodos de análise. O método simplificado considera o corpo humano representado por um único corpo rígido, sujeito às três fases definidas. Para o método avançado de cálculo A foi definido um modelo semelhante ao anterior, com um corpo rígido, utilizando o programa Interactive Physics.

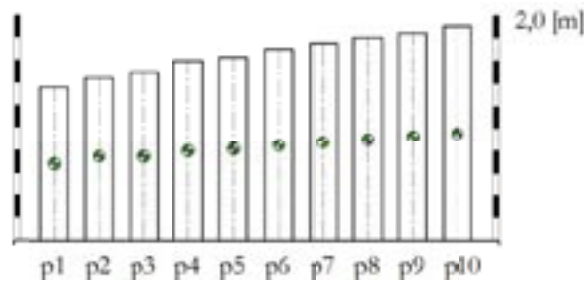


Figura 2: Representação do corpo rígido do peão.

No método avançado de cálculo B foi considerado um modelo antropométrico, constituído por vários segmentos anatómicos, articulados entre si, [6]. Neste modelo foi possível expressar a massa de cada segmento como uma percentagem da massa corporal total, ver figura 3.

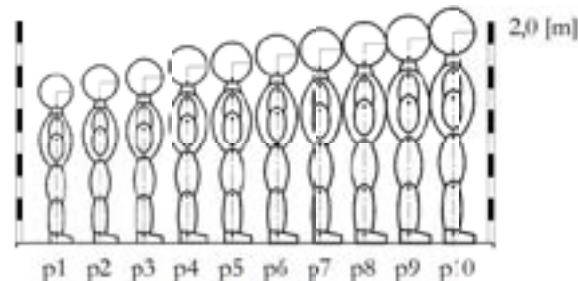


Figura 3: Representação do multi-corpo rígido do peão.

Em todos os métodos de análise foram consideradas diferentes massas para os veículos ( $M_v$ ), considerando dois tipos de veículos (mistos e pesados). As massas dos peões ( $M_p$ ) tiveram em consideração os dados antropométricos ideais, considerando a altura ( $2h$ ) adequada para cada massa [7].

Foram ainda consideradas várias velocidades de colisão. As tabela 1 apresenta um resumo das variáveis utilizadas nas simulações.

$M_v$ [kg]	$V_{col}$ [km/h]	$M_p$ [kg] / $2h$ [m]
$M_v1=2000$	$V_{col1}=30$	$p1=30.9/1.37$
$M_v2=3000$	$V_{col2}=40$	$p2=43.0/1.45$
$M_v3=20000$	$V_{col3}=50$	$p3=47.6/1.50$
$M_v4=30000$	$V_{col4}=60$	$p4=56.8/1.60$
	$V_{col5}=70$	$p5=59.1/1.63$
	$V_{col6}=80$	$p6=66.0/1.70$
	$V_{col7}=90$	$p7=70.6/1.75$
	$V_{col8}=100$	$p8=75.1/1.80$
	$V_{col9}=110$	$p9=79.7/1.85$
	$V_{col10}=120$	$p10=84.3/1.91$

### 3.1. Método simplificado

Neste método foi determinada a distância de projecção do corpo humano (Stotal), através da soma das distâncias determinadas pelas três fases (Simp., Sdin., Satrito) [1], utilizando o manipulador simbólico Maple.

Durante a fase de impacto verifica-se a transferência da quantidade de momento linear entre o veículo de massa  $M_v$ , e o peão de massa  $M_p$ , ver equação 1.

$$M_v v_{col} = M_v v_{p\ proj} + M_p v_{p\ proj} \quad (1)$$

A relação entre as velocidades dos dois corpos, antes ( $v_p$  e  $v_{col}$ ) e depois do impacto ( $v_{p\ proj}$  e  $v_{v\ proj}$ ), é caracterizada pelo coeficiente de restituição ( $e$ ), ver equação 2.

$$e = \frac{v_{v\ proj} - v_{p\ proj}}{v_p - v_{col}} \quad (2)$$

O valor do coeficiente de restituição varia com o valor da velocidade de colisão, conforme estudos desenvolvidos por Wood e Walsh [8] sobre os testes desenvolvidos por Lucchini e Weissner [9], ver equação 3.

$$e = \begin{cases} 0.12 - 0.006 v_{col} & \text{se } v_{col} < 20 \text{ [m/s]} \\ 0 & \text{se } v_{col} \geq 20 \text{ [m/s]} \end{cases} \quad (3)$$

Esta fase desenvolve-se durante o curto período de tempo ( $t_{imp}$ ), assumindo um movimento rectilíneo uniforme, ver equação 4. Para este movimento foi assumido um tempo médio de contacto de 0.056 [s], [5].

$$S_{imp} = v_{p\ proj} \times t_{imp} \quad (4)$$

No final da fase de impacto é assumida a transferência completa de momento linear, não assumindo qualquer interacção, entre o veículo e peão, nas duas fases posteriores.

Durante a fase do movimento plano geral, o peão adquire uma velocidade inicial  $v_{p\ proj}$ , assumindo que o peão mantém os pés em contacto com o solo. Este contacto implica a existência de uma força de atrito e será responsável pela rotação do corpo do peão, ver figura 4.

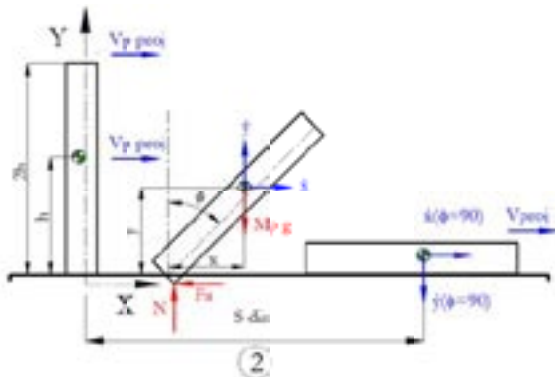


Figura 4: Representação da fase 2.

O peão estará sujeito à acção da gravidade durante todo este período, sendo o equilíbrio dinâmico traduzido pelas equações 5-6.

$$\sum \vec{F} = m \times \vec{a}_{CM} \quad (5)$$

$$\sum \vec{M}_{CM} = \dot{\vec{H}}_{CM} \quad (6)$$

A restrição ao movimento do peão serve para garantir que o peão se mantém em contacto com o solo, utilizando a equação 7. Esta equação permite efectuar o acoplamento entre o movimento vertical ( $y$ ) e a rotação do corpo rígido ( $\phi$ ).

$$y = b \cos(\phi) \Leftrightarrow \ddot{y} = -b \times \ddot{\phi} \times \sin \phi - b \times \dot{\phi}^2 \times \cos \phi \quad (7)$$

As equações 5-7 podem ser reagrupadas num sistema de equações diferenciais acopladas 8, que relacionam a posição do centro de massa e a posição angular do corpo.

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu} \ddot{x} - b \sin(\phi) \ddot{\phi} = b \dot{\phi}^2 \cos(\phi) - g \\ \left[ \frac{k^2 + (\mu + 1) b^2 \sin(\phi) \cos(\phi)}{(\sin(\phi) + \mu \cos(\phi))} \right] \ddot{\phi} = [g b - b^2 \dot{\phi}^2 \cos(\phi)] \end{cases} \quad (8)$$

Nestas equações a componente horizontal da aceleração do centro de massa está representada por  $\ddot{x}$ ,  $k$  representa o raio de giração do corpo rígido em relação ao centro de massa, enquanto  $\mu$  representa o coeficiente de atrito. Os investigadores Wood e Simms [10], propõem um valor para o coeficiente de atrito de 0.58, baseado no trabalho de dez grupos de investigação diferentes.

O sistema foi ser resolvido em ordem a "x" e a "phi", utilizando o método numérico de Runge Kutta, Fehlberg quarta-quinta ordem, com as seguintes condições iniciais.

$$\begin{aligned} t = 0, \quad x = 0 \quad \phi = 0 \\ t = 0, \quad \dot{x} = v_{p\ proj} \quad \dot{\phi} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Esta solução permitiu determinar a distância percorrida pelo corpo rígido "Sdin", durante o movimento plano geral. A simulação deverá ficar concluída quando a posição angular atingir 90°.

Na terceira fase deste método, verifica-se o impacto do corpo rígido com o solo, para uma velocidade vertical dada pela equação 10.

$$\dot{y}_{(\phi=90^\circ)} = -b \dot{\phi} \quad (10)$$

Durante este processo (impacto vertical), verifica-se uma diminuição da quantidade de momento linear na direcção horizontal, que se traduz numa diminuição do valor da velocidade horizontal.

$$v_{proj} = \dot{x}_{(\phi=90^\circ)} - \mu \dot{y}_{(\phi=90^\circ)} \quad (11)$$

Por aplicação do princípio do trabalho e energia, é determinado o valor da distância percorrida nesta fase.

$$\frac{1}{2} M_p v_{proj}^2 + [-\mu(M_p g)] \times S_{atrito} = 0 \tag{12}$$

Depois deste último passo, é possível determinar a distância total percorrida “Stotal”.

$$S_{total} = S_{imp.} + S_{div.} + S_{atrito} \tag{13}$$

Nas figuras 5-9 estão representados os resultados da distância percorrida em função da velocidade de colisão, para o atropelamento dos peões p2, p4, p6 p8 e p10. A distância aumenta com a velocidade de colisão. O efeito da massa do veículo é semelhante mas em menor escala. A distância de projecção diminui ligeiramente com o aumento da massa do peão.

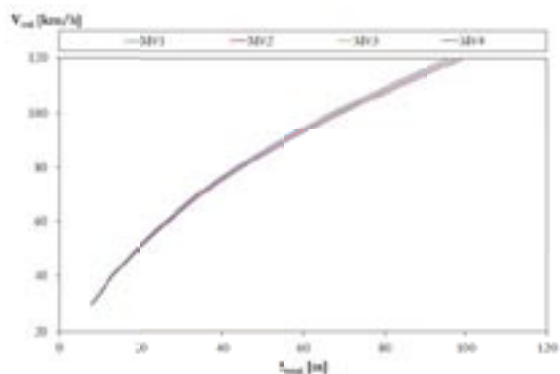


Figura 5: Distância de projecção em função da velocidade de colisão para peão (p2).

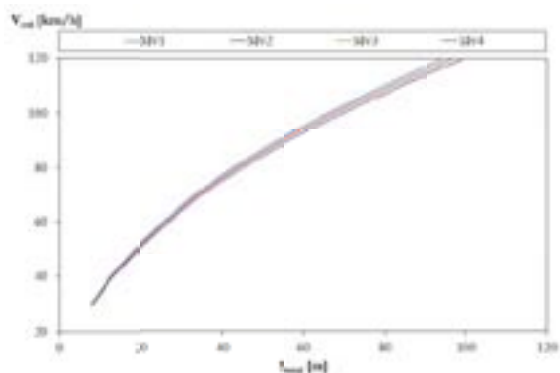


Figura 6: Distância de projecção em função da velocidade de colisão para peão (p4).

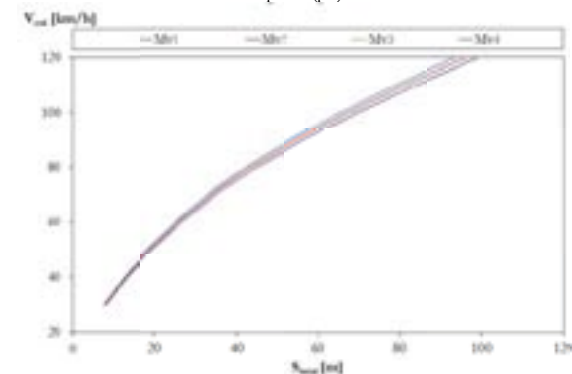


Figura 7: Distância de projecção em função da velocidade de colisão para peão (p6).

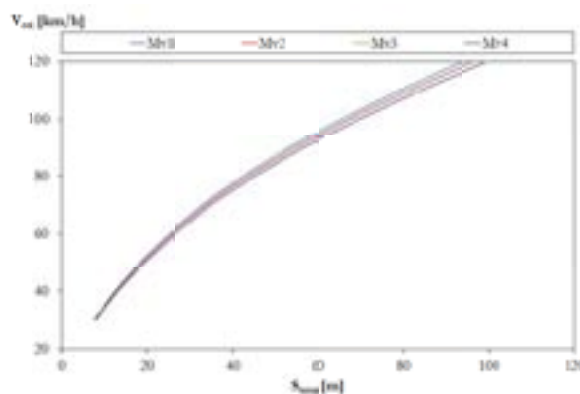


Figura 8: Distância de projecção em função da velocidade de colisão para peão (p8)

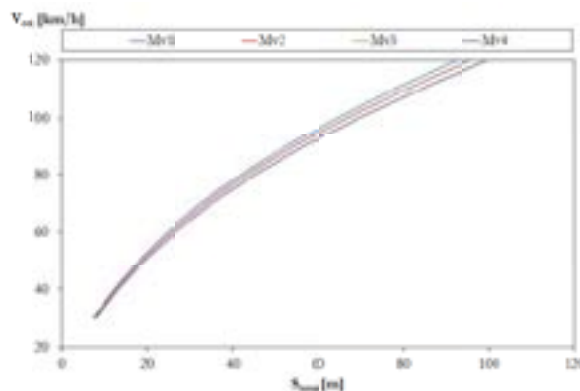


Figura 9: Distância de projecção em função da velocidade de colisão para peão (p10).

### 3.2. Método avançado A

Neste método foi utilizado o método numérico de Kutta-Merson para determinação do movimento de colisão do veículo com o peão. Neste modelo foram definidas as mesmas condições iniciais dos corpos intervenientes (Mv, Vcol, Mp, 2h) e os mesmos parâmetros de impacto (coeficiente de restituição) e atrito (coeficiente de atrito). O tempo de integração foi de 1 [ms]. Na figura 10 está representado o resultado da simulação de um peão p1, com veículo de massa Mv1 e baixa velocidade de colisão (Vcol1).

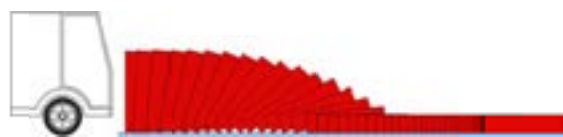


Figura 10: Simulação da projecção para Vcol1.

Na figura 11 está representado o resultado da simulação de um peão p1, com veículo de massa Mv1 e baixa velocidade de colisão (Vcol1).



Figura 11: Simulação da projecção para Vcol10.

Foram determinados valores semelhantes para a distância de projecção, conforme se pode verificar pela comparação de resultados das distâncias de projecção dos peões (p1,p3,p5,p7,p9), ver figura 12.

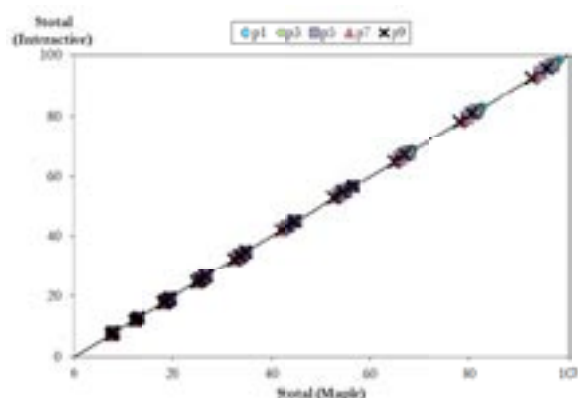


Figura 12: Comparação de resultados entre método simplificado e avançado A.

Resultados semelhantes foram encontrados para as colisões dos restantes peões. O erro máximo encontrado foi de 3%.

### 3.3. Método avançado B

Neste método foi utilizado o mesmo método de integração, para determinação do movimento de colisão do veículo com o peão. Neste modelo foram definidas as mesmas condições iniciais dos corpos intervenientes ( $M_v$ ,  $V_{col}$ ,  $M_p$ ,  $2h$ ) e os mesmos parâmetros de impacto. A massa foi distribuída pelos vários segmentos anatómicos. Algumas articulações (tornozelo, joelho, cotovelo, pescoço, etc.) possuem limites na rotação, conforme comportamento do corpo humano.

Na figura 13 está representado o resultado da simulação do atropelamento de um peão p1, com veículo de massa  $M_{v1}$  e baixa velocidade de colisão ( $V_{col1}$ ).



Figura 13: Simulação da projecção para  $V_{col1}$ .

Na figura 14 está representado o resultado da simulação do atropelamento do mesmo peão p1, com veículo de massa  $M_{v1}$  e elevada velocidade de colisão ( $V_{col10}$ ).



Figura 14: Simulação da projecção para  $V_{col10}$ .

As soluções obtidas com o método avançado B dão origem a maiores distâncias de projecção. Este facto é devido ao aumento da quantidade de momento produzido pela rotação de alguns segmentos anatómicos.

## 4. Conclusões

Neste artigo foram apresentados diferentes métodos de análise de atropelamentos de peões, com colisões frontais. Estes métodos permitem estabelecer uma relação entre a distância de projecção e a velocidade de colisão dos veículos.

## Anexo (instruções Maple)

```
restart;
Mp:=43;
Mv:=2000;
Vcol:=((30*1000)/3600);
e:=0.12-0.006*Vcol;
Vproj:=((Mv)/(Mv+Mp))*(1+e)*Vcol;
timp:=0.056;
Simpact:=Vproj*timp;
L:=1.45;
k:=(0.23)*L;
h:=L/2;
dsys1:={((9.81*h*sin(f(t)))+(9.81*h*(0.58))*cos(f(t)))+(h*
sin(f(t)))*(-h*(diff(f(t), t, t))*sin(f(t)))+(h*sin(f(t))*(-
h*(diff(f(t), t)^2*cos(f(t)))+(h*0.58*cos(f(t))*(-h*(diff(f(t),
t, t))*sin(f(t)))+(h*(0.58))*cos(f(t))*(-h*(diff(f(t),
t)^2*cos(f(t)))+(diff(f(t), t, t))*(k)^2,(1/(.58))*((diff(x(t), t,
t)))-h*sin(f(t))*(diff(f(t), t, t)))=h*(diff(f(t), t))^2*cos(f(t))-
9.81};
init1 := {x(0)=Simpact, D(x)(0)=Vproj, f(0)=0,
D(f)(0)=0};
dsol1 := dsolve(dsys1 union init1, numeric,
method=rkf45, output=array([0,0.01,...,0.49,]));
Xtempo:=4.38358360095493;
Vtempo:=8.13646013287423;
Vrottempo:=4.95047136682966;
Sfallover:=Xtempo-Simpact;
Vv:=h*Vrottempo;
Vprojf:=Vtempo-(0.58*Vv);
Sarrasto:=(Vprojf)^2/(2*0.58*9.81);
Stotal:=Simpact+Sfallover+Sarrasto;
```

## Referências

- [1] D P Wood, C K Simms, and D G Walsh, " Vehicle-pedestrian collisions: validated models for pedestrian impact and projection ", *Proc. IMechE. Vol. 219 Part D: J. Automobile Engineering*, IMechE, 2005
- [2] MSC Software, "Interactive physics, user's manual", 2000.
- [3] Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, "Principais indicadores de sinistralidade continente", *Observatório de Segurança Rodoviária*, 2011.
- [4] SafetyNet, "Traffic Safety Basic Facts 2008", *European Road Safety Observatory*, October 2008.
- [5] Aldman, B., Thorngren, L., Bunketorp, O., and Romanus, B., "An experimental model for the study of lower leg and knee injuries in car pedestrian impacts", *International Research Council on Biomechanics of Injury conference*, pp. 180-193, 1980.
- [6] Raquel Santos & Carlos Fuião, "Antropometria", *Curso Pós Graduação: Técnico Superior de HST*, Universidade de Évora, Fevereiro 2003.
- [7] Devine BJ, "Gentamicin therapy", *Drug Intell Clin Pharm*, 8: 650-655, 1974.
- [8] Wood, D. P. and Walsh, D. G.; "Pedestrian forward projection impact", *Int. J. Crashworthiness*, 7(3), 285-305, 2002.
- [9] Lucchini, E., Weissner, D., "Differences between the kinematics and loadings of impacted adults and

children results from dummy tests”, *International Research Council on Biomechanics of Injury conference*, 1980.

- [10] Wood D.P & Simms C.K., “Coefficient of friction in pedestrian throw”, *Impact, Vol 9, no 1, 12-15*, 2000.