



# Inizio lezione





# Progettazione di sistemi di trasporto

## LANCIO BALISTICO DEL CORPO

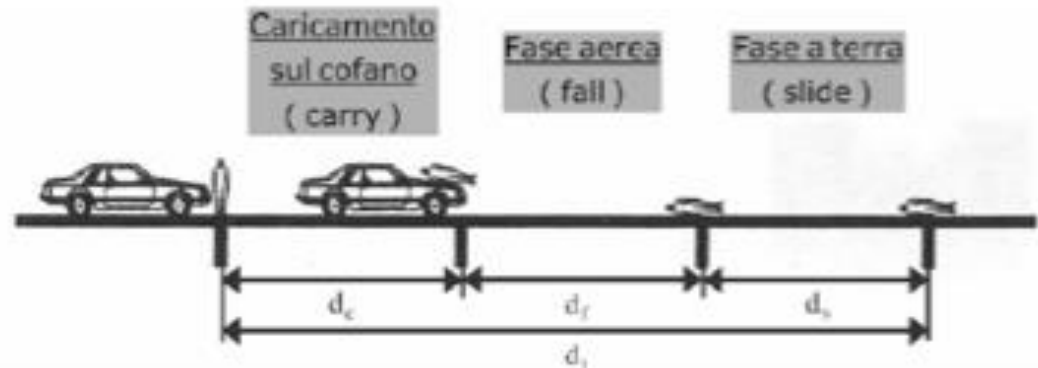


ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Prof. Ing. Mattia Strangi

# Il sinistro tra autoveicolo e pedone

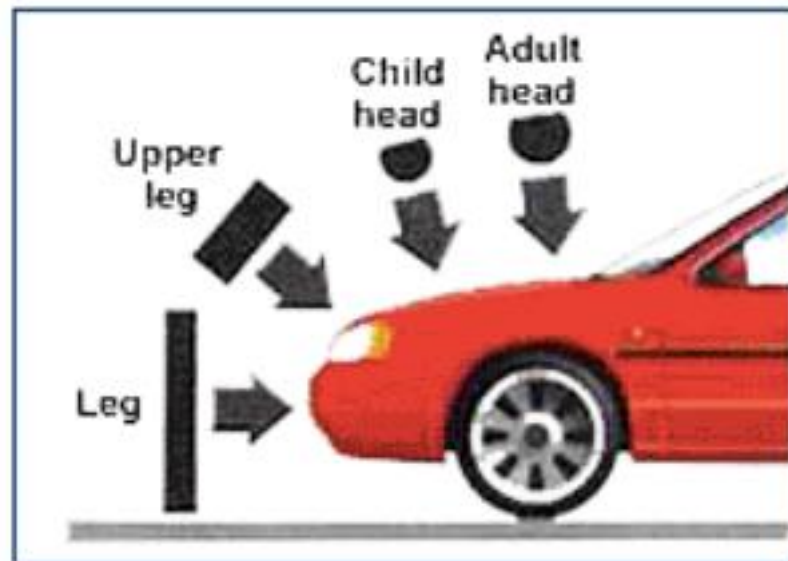
Si procederà ad **analizzare e confrontare metodi e strumenti che consentono di risalire alla velocità posseduta da un veicolo al momento di un sinistro**. Tra i possibili sinistri esamineremo un particolare tipo di incidente: l'investimento di un pedone da parte di un autovettura. In particolar modo, si cercheremo di fornire una panoramica generale sui diversi metodi d'indagine per la ricostruzione del sinistro, di valutarne le differenze e di stabilire il miglior modo di operare al fine di poter determinare la velocità d'impatto dell'autovettura, in funzione delle modalità di investimento e di altri parametri facilmente rilevabili che influenzano il fenomeno.



# Esame della casistica

Dall'esame di un congruo e rappresentativo campione di collisioni veicolo-pedone, emerge che i possibili scenari di interazione sono contenuti in 5 categorie principali:

- FENDER VAULT
- WRAP
- ROOF VAULT
- FORWARD PROJECTION



# Fender Vault

Il pedone è colpito da un angolo anteriore del veicolo. A causa della posizione vicino al bordo del veicolo, il pedone generalmente non colpisce il cofano ma cade a lato colpendo il suolo. La posizione post-urto del corpo generalmente verrà a trovarsi a lato o dietro il veicolo. Non essendo il contatto veicolo-pedone prolungato, il pedone non acquista la piena velocità del veicolo. Di conseguenza non è possibile risalire facilmente alla velocità del veicolo investitore partendo dalla gittata del pedone.

FENDER VAULT  
POSITION 1

FENDER VAULT  
POSITION 2

FENDER VAULT  
POSITION 3

FENDER VAULT  
POSITION 4



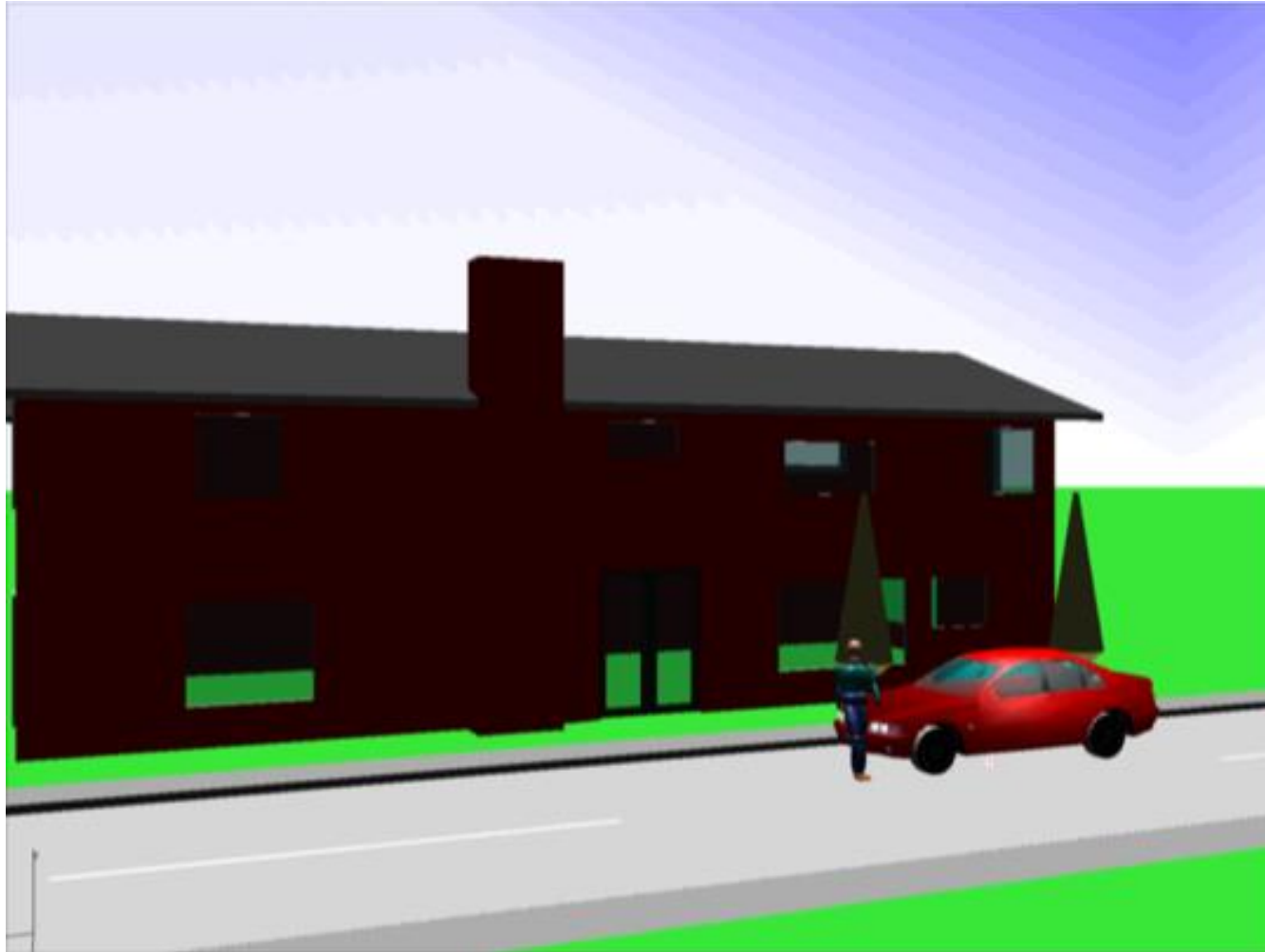
**Fender Vault Sequence**

# Fender Vault





# Fender Vault



# Fender Vault

---



# Fender Vault



# Fender Vault

---



# Fender Vault

---



# Fender Vault

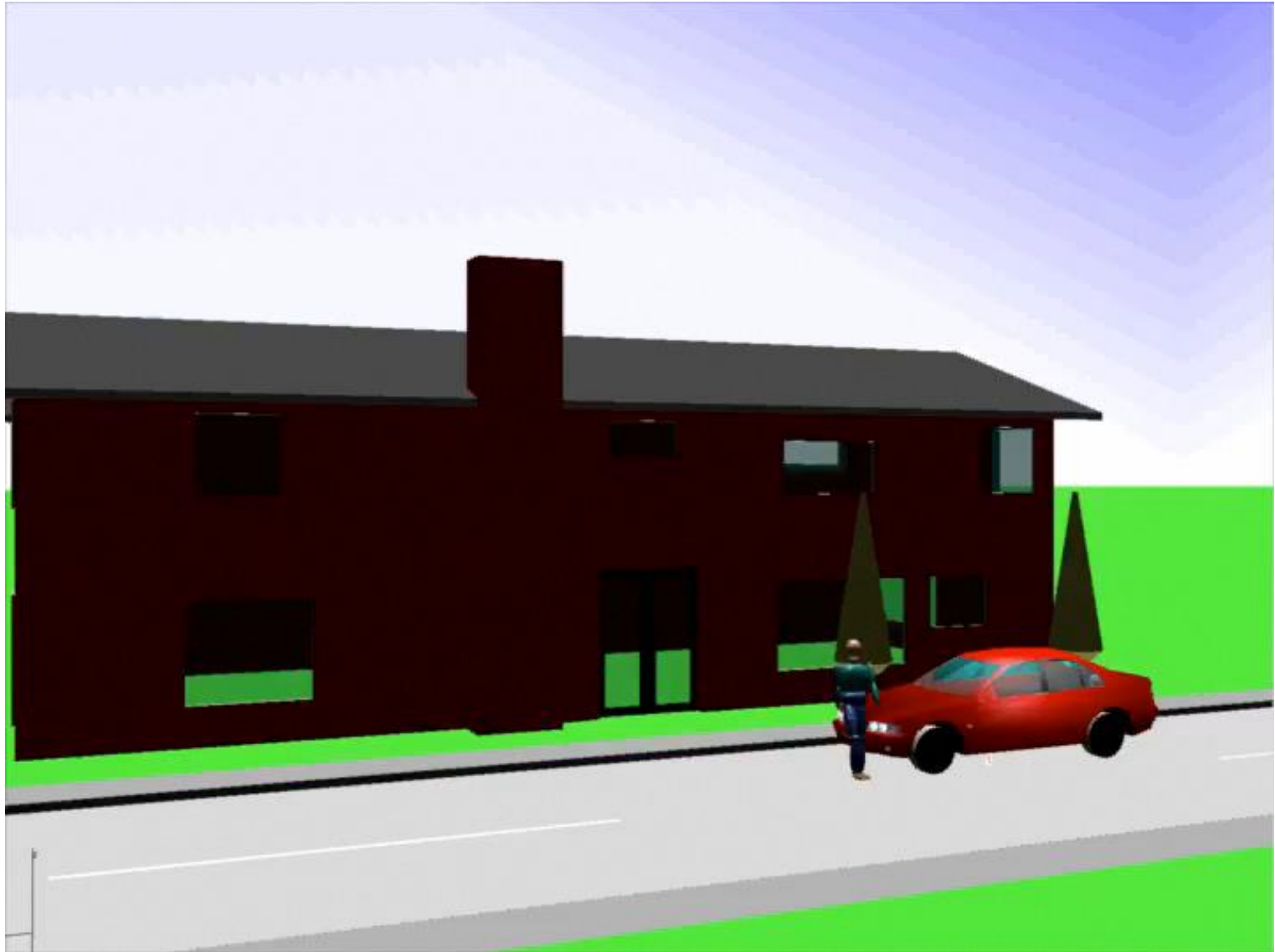


# Fender Vault





# Fender Vault: video



# Wrap

Si ha questo tipo di traiettoria quando lo spigolo principale del veicolo che colpisce il pedone si trova più in basso del centro di massa del pedone stesso. Il pedone, a causa della forza trasmessa dal veicolo è sottoposto ad un momento che tende a farlo ruotare verso il cofano. Essendo il contatto prolungato il pedone acquisisce la medesima velocità del veicolo investitore. Dopo l'urto iniziale, il pedone tende a rimanere sul cofano dell'automobile fino al suo arresto, a volte scivola via dal cofano all'arresto.

WRAP TRAJECTORY  
POSITION 1



WRAP TRAJECTORY  
POSITION 2



WRAP TRAJECTORY  
POSITION 3



WRAP TRAJECTORY  
POSITION 4



**Wrap Sequence**

# Wrap

---





# Wrap



# Wrap

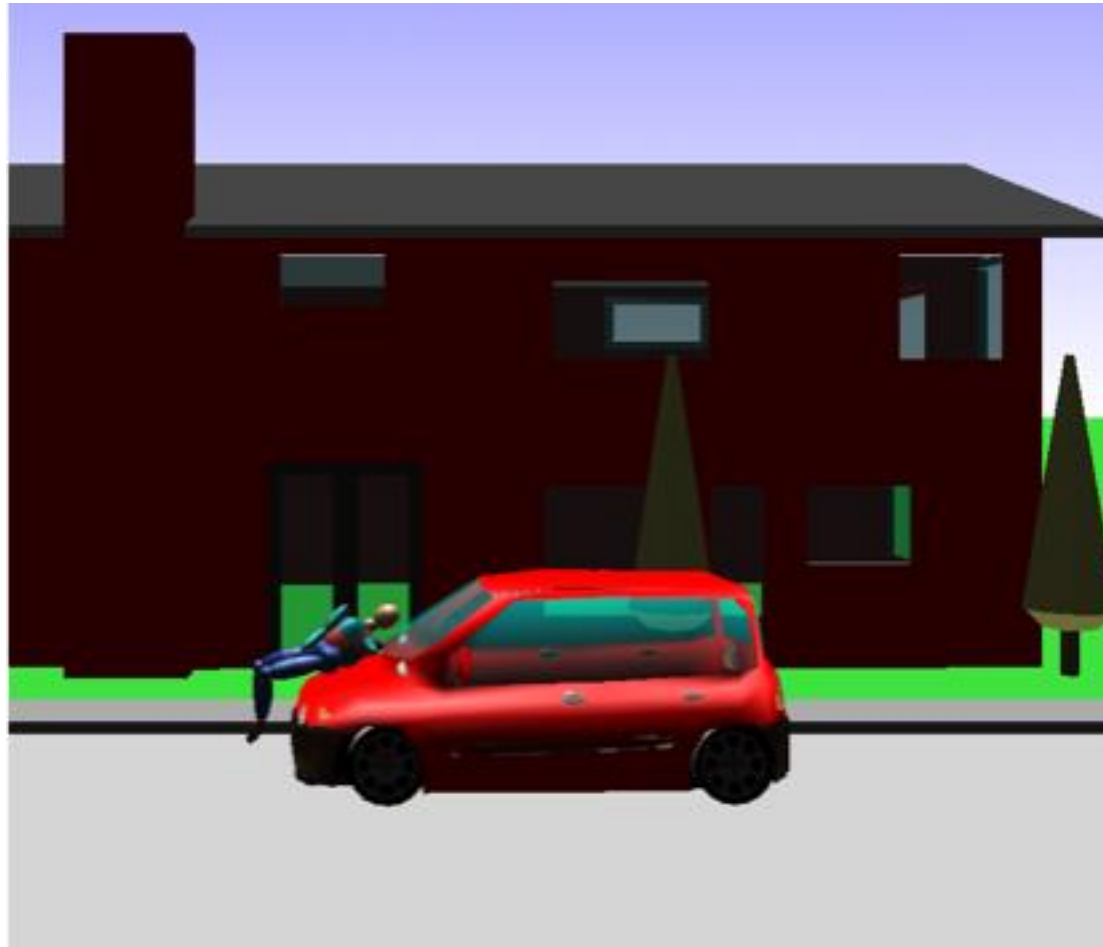


# Wrap

---



# Wrap





# Wrap

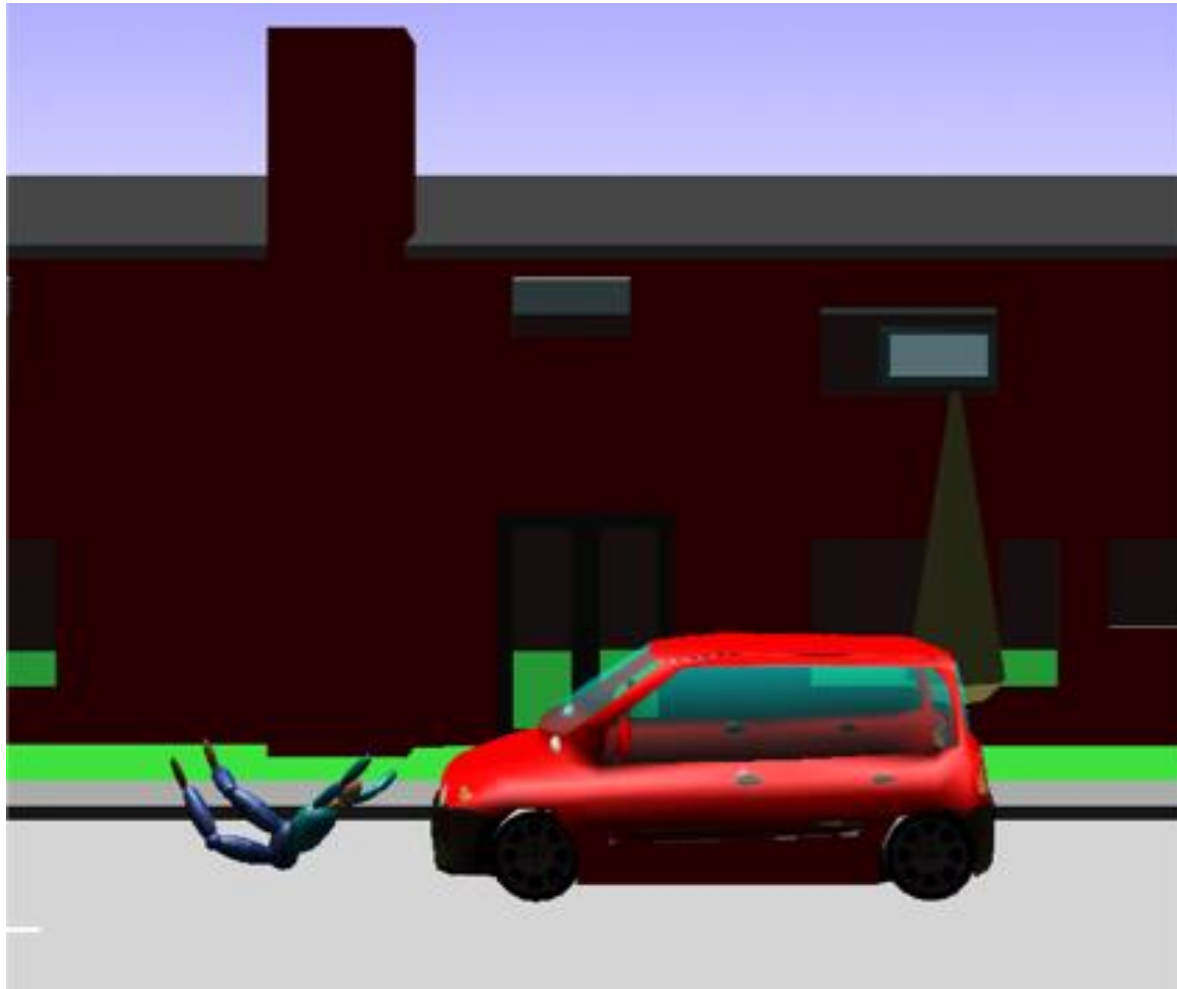


# Wrap

---



# Wrap



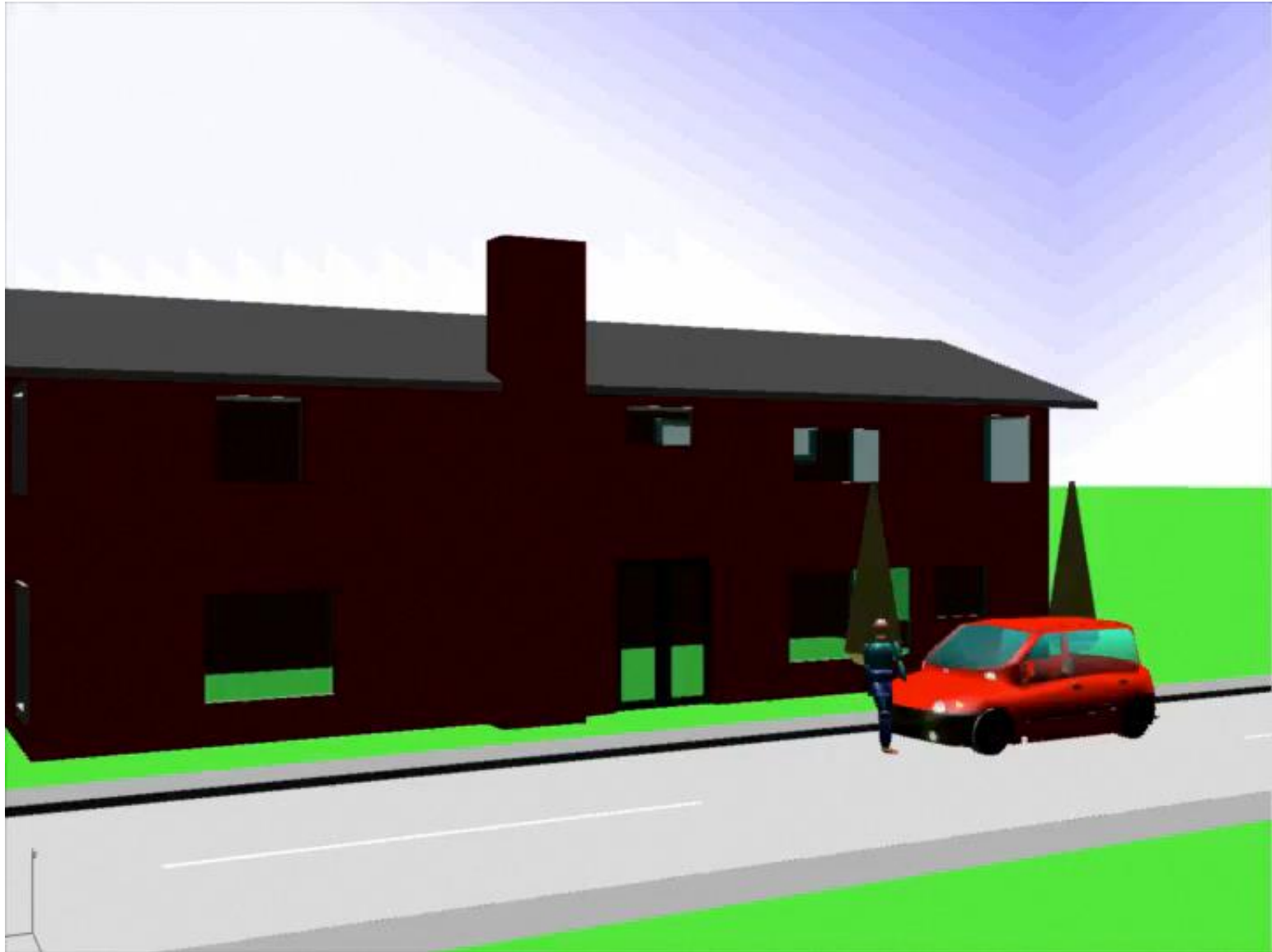
# Wrap

---



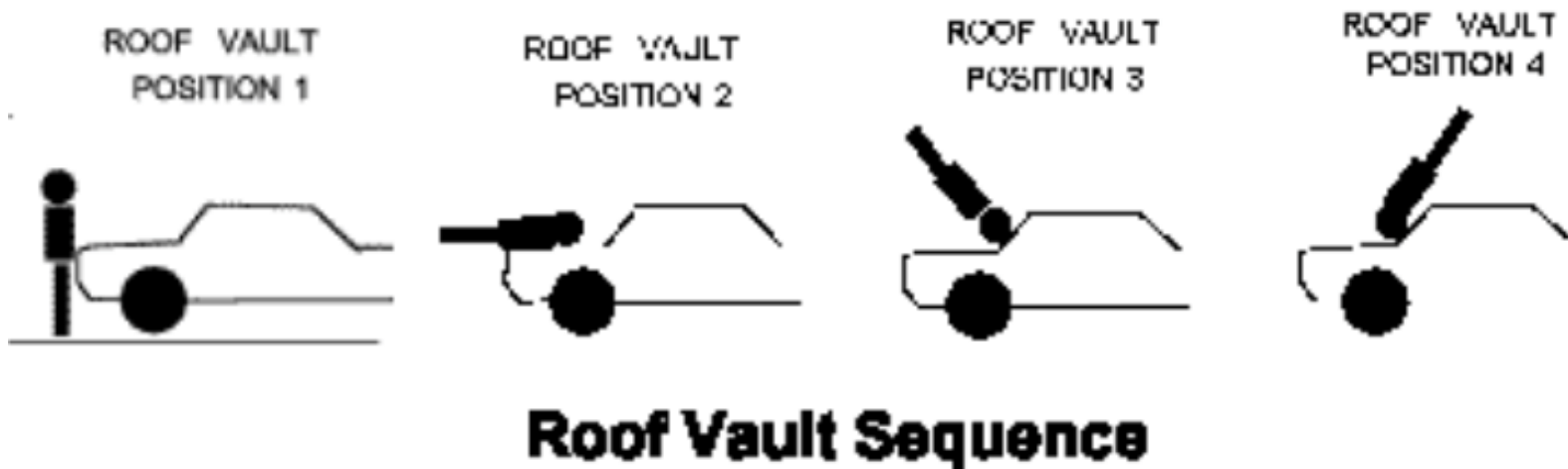


# Wrap: video



# Roof Vault

Il modello Roof vault descrive un impatto simile al Wrap in cui il veicolo non è in fase di frenatura o sta addirittura accelerando. Comincia inizialmente come una traiettoria Wrap. Il pedone, dopo aver sbattuto sul cofano e sul parabrezza, si leva in piedi sulla sua testa sopra o all'altezza del tetto del veicolo ruotando in aria mentre il veicolo gli passa al disotto. Anche in questo caso sono possibili contatti multipli.



# Roof Vault



# Roof Vault



# Roof Vault



# Roof Vault



# Roof Vault



# Roof Vault

---



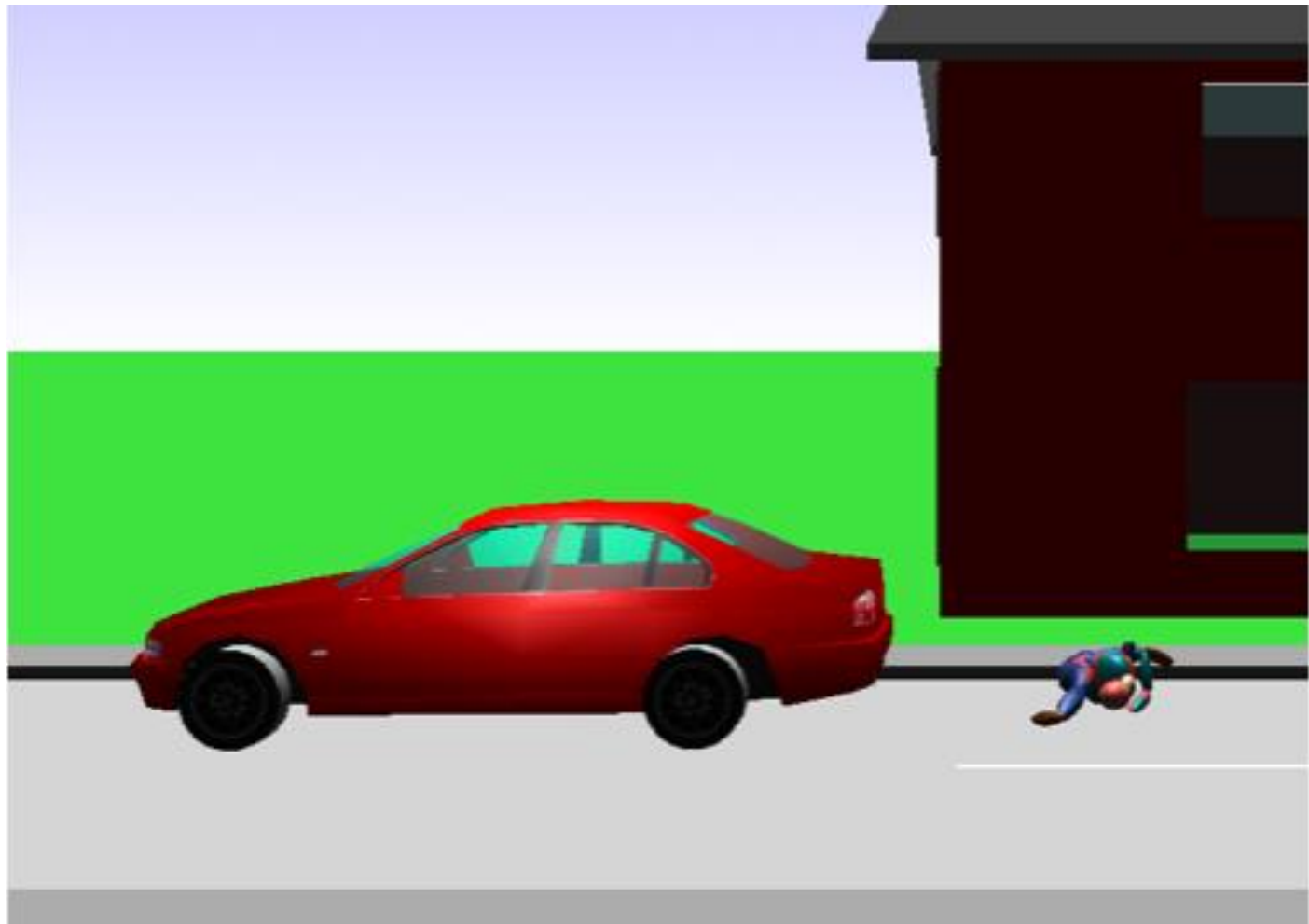


# Roof Vault



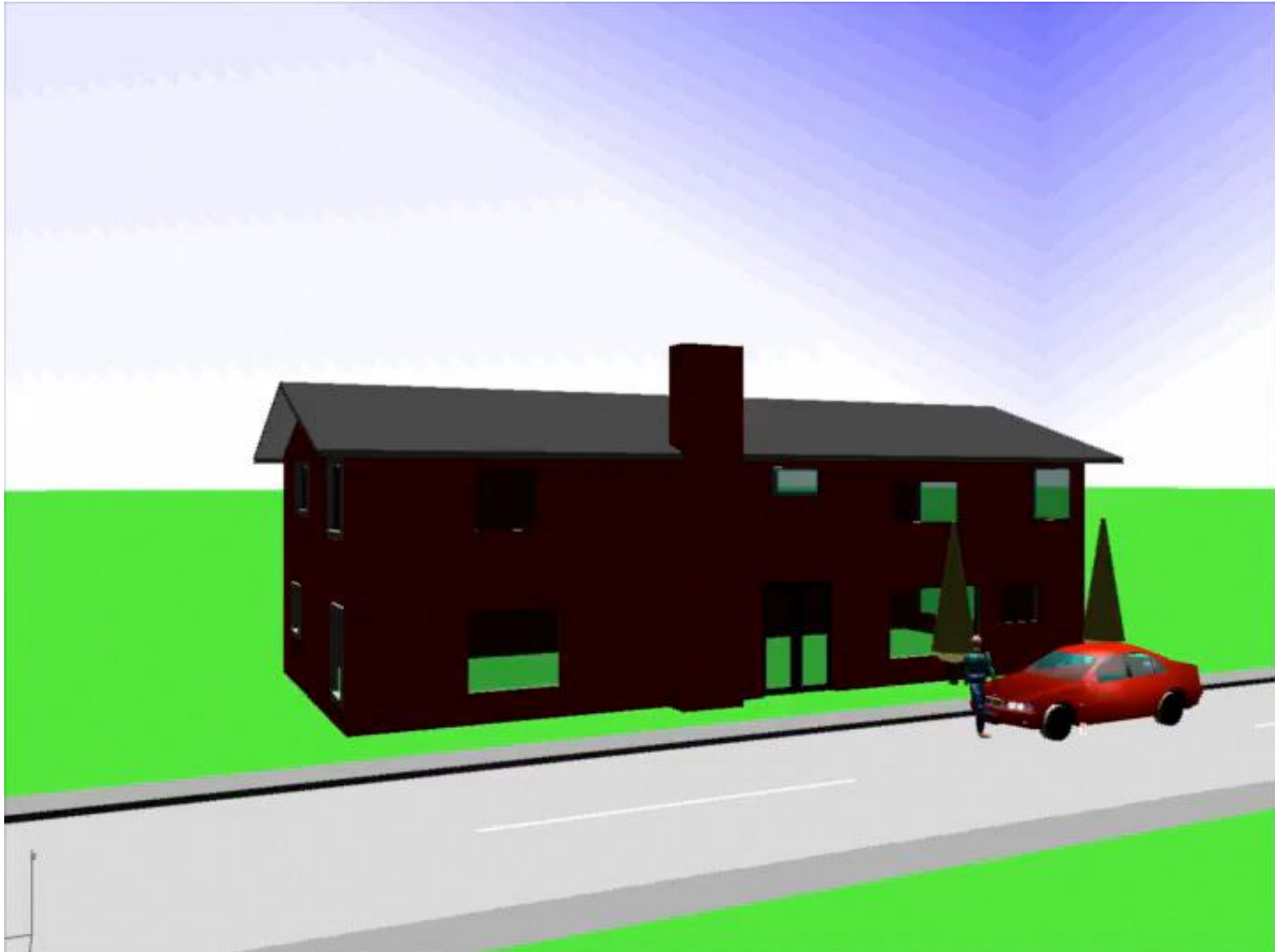


# Roof Vault





# Roof Vault: video





# Forward Projection

---

Il modello Forward projection considera quel tipo d'impatto che avviene quando lo spigolo principale del veicolo che colpisce il pedone si trova più in alto del centro di massa del pedone stesso. Anziché sbattere sul cofano, il pedone viene proiettato in avanti e sbatte al suolo. Questo caso è tipico quando ad essere investito è un bambino o anche quando è investito un adulto da veicoli con una superficie frontale piatta tipo furgoni o autobus. Generalmente il corpo viene ritrovato davanti al veicolo. A volte invece il veicolo prosegue la sua marcia e il corpo viene a trovarsi dietro allo stesso, dopo possibili arrotamenti.



# Forward Projection

---





# Forward Projection

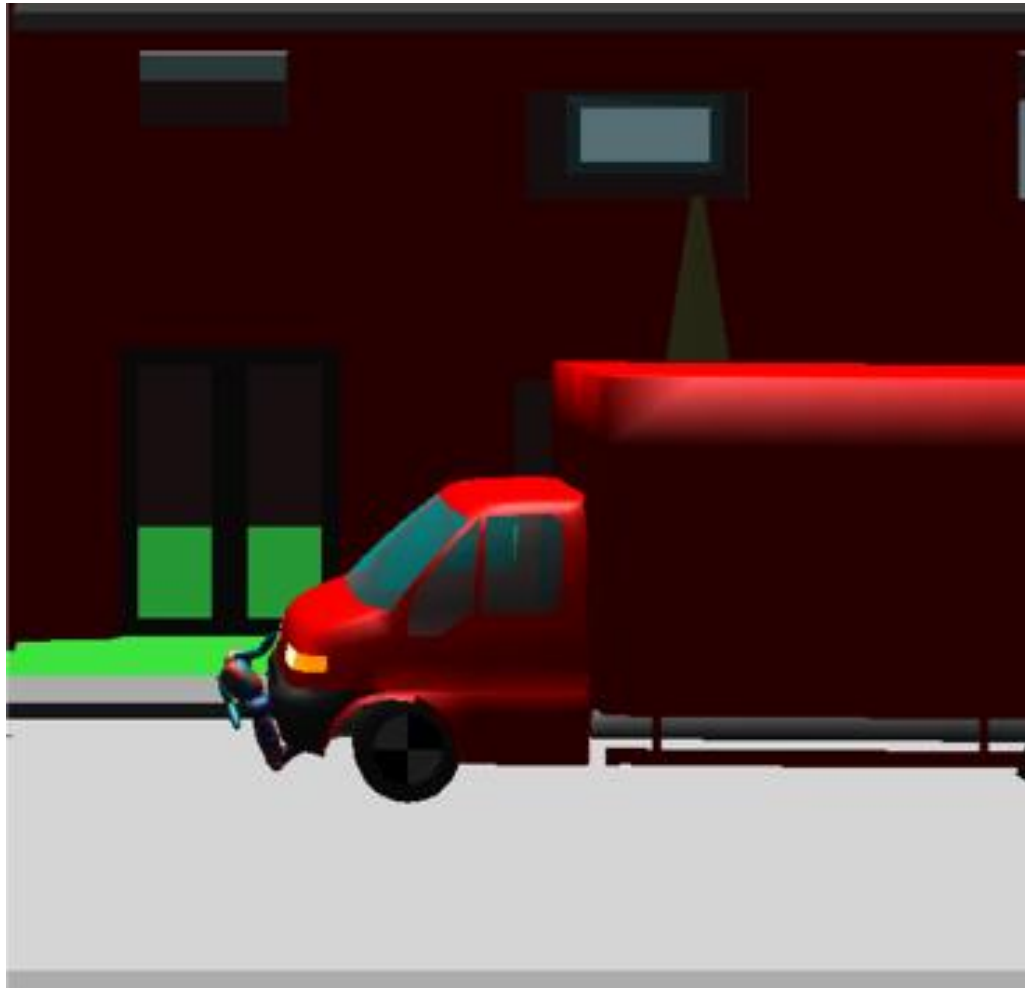
---





# Forward Projection

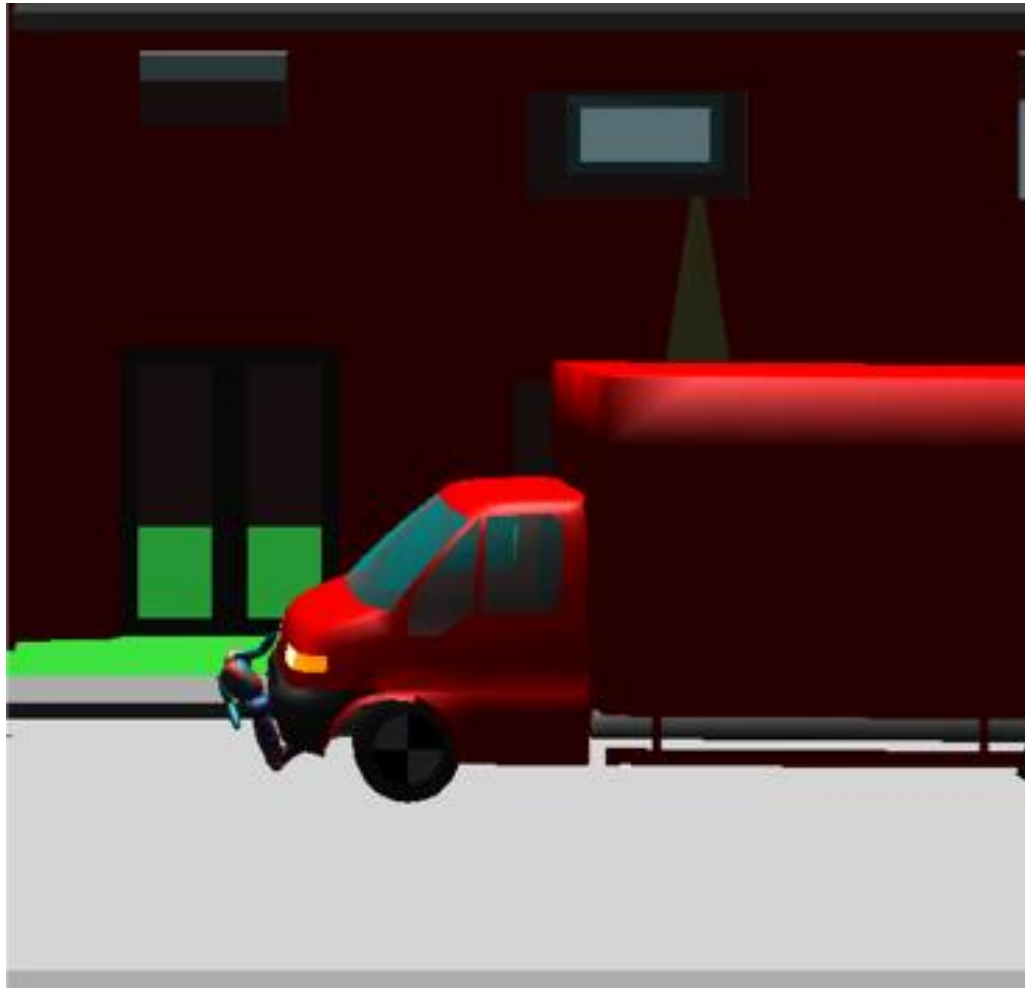
---





# Forward Projection

---





# Forward Projection

---





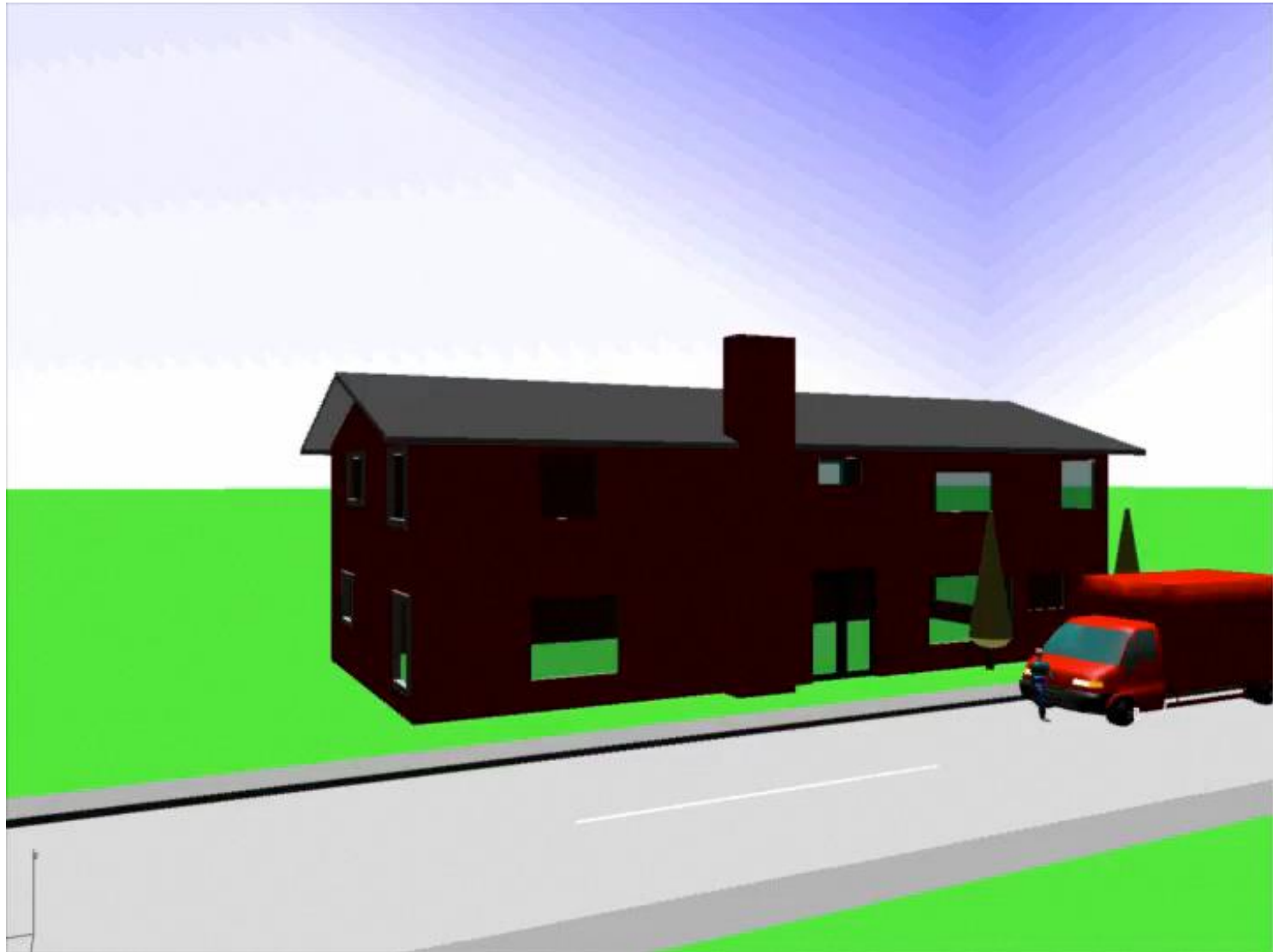
# Forward Projection





# Forward Projection: video

---



# Metodi d'indagine

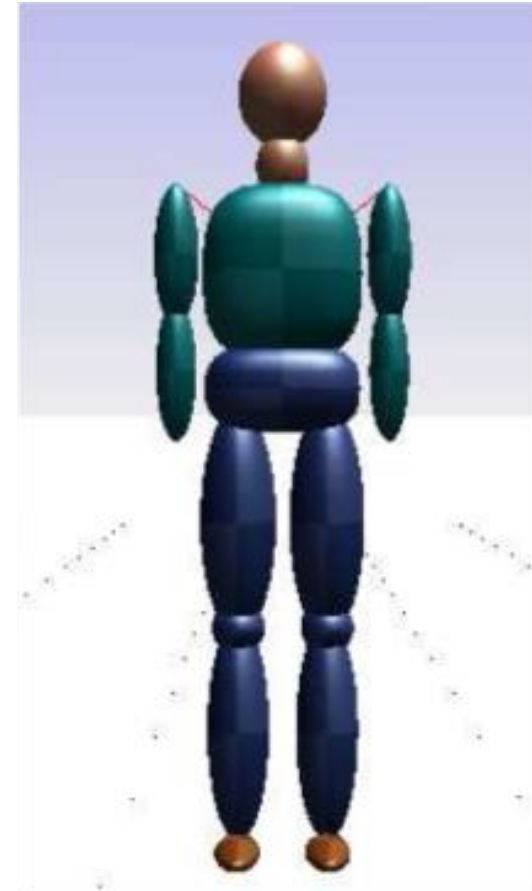
- Simulazioni
- Metodi fisico-matematici
- Relazioni empiriche
- Metodo grafico



# Metodi d'indagine

**Le simulazioni** sono l'unico metodo capace di cogliere l'effettiva complessità del fenomeno potendo analizzarne tutti i parametri d'influenza.

- Modellizzazione multibody del pedone (applicazione del MEF al corpo umano, 20 corpi 19 giunzioni)
- Effettiva geometria 3D del veicolo investitore.





# Simulazione digitale





# Metodo fisico matematico

---

Il metodo presentato da *J.A.Searle & A. Jearle*. I due tecnici hanno ricavato una relazione *fisico-matematica* che **tiene conto della distanza totale percorsa dal corpo dopo l'urto**, compreso il rimbalzo e lo slittamento del corpo dopo l'urto sul manto stradale. La traiettoria post-urto del pedone viene tipicamente divisa in due fasi: fase aerea e fase a terra. La relazione proposta è la seguente:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times \mu \times g \times S}{(\cos \vartheta + f \times \sin \vartheta)^2}}$$

dove *teta* è l'angolo di lancio. Esso non è solitamente conosciuto, ed è comunque difficile, quando non impossibile, riuscire a rilevarlo basandosi sulla sola analisi della scena del sinistro.



# Metodo fisico matematico: *J.A. Searle & A. Jearle*

Per questo motivo *J.A. Searle & A. Jearle* hanno derivato delle equazioni che individuano i limiti superiore e inferiore, considerando il valore dell'angolo di proiezione che massimizza e minimizza l'espressione:

$$v_{max} = \sqrt{2 \times \mu \times g \times S}$$

$$v_{min} = \sqrt{2 \times \mu \times g \times \frac{S}{1 + \mu^2}}$$

con:

$\mu$  = coefficiente d'attrito medio corpo – suolo;

$g$  = accelerazione di gravità  $9.81 [m/s^2]$ ;

$S$  = spazio percorso dal corpo dal punto d'urto alla posizione di quiete [m].

Il coefficiente d'attrito pedone-suolo è il dato critico di tutta la procedura. Gli autori assumono per il loro modello i valori di 0,66 per l'asfalto e di 0,79 per l'erba, senza distinzione tra superficie bagnata o asciutta, essendo in effetti l'aspetto poco rilevante giacché i sobbalzi si verificano ugualmente.



# Coefficiente di proiezione

---

I valori sopra riportati non tengono conto del tipo di urto a cui è sottoposto il corpo, il valore numerico risultante dovrà inoltre tenere conto del coefficiente di proiezione 'e' che varia a seconda del tipo di urto ed è generalmente compreso tra 0,7 e 1

$$V_{\text{auto}} = V_{\text{lancio}} / e$$



# Coefficiente di proiezione

## Metodo: J.A.Searle & A. Jearle

$$v_{min} = \sqrt{2 \times \mu \times g \times \frac{S}{1 + \mu^2}}$$

$$v_{max} = \sqrt{2 \times \mu \times g \times S}$$

Input			
S	15	m	Distanza totale
$\mu$	0,66	m	Coefficiente di attrito
g	9,81	m/s <sup>2</sup>	
Output			
$v_{min}$	11,6 42	m/s km/h	Velocità minima acquisita dal pedone
$v_{max}$	13,9 50	m/s km/h	Velocità massima acquisita dal pedone
Velocità del veicolo			
Input			
e	0,9		Efficienza di proiezione
$v_{imp,min}$	11,6	m/s	
$v_{imp,max}$	13,9	m/s	
Output			
$v_{imp,min}$	12,9 47	m/s km/h	Velocità di impatto del veicolo minima
$v_{imp,max}$	15,5 56	m/s km/h	Velocità di impatto del veicolo massima



# Metodi Empirici

---

Diversi ricercatori hanno trovato delle relazioni che legano la distanza di proiezione del pedone alla velocità posseduta dal veicolo al momento dell'impatto in soddisfacente accordo con dati sperimentali ottenuti da crash tests o da incidenti reali, monitorati con telecamere posizionate in corrispondenza degli incroci.

- Appel (1975)
- Evans e Smith (1999)
- Happer (2000)



# Appel

Il metodo sviluppato da Appel fornisce una correlazione diretta tra la distanza di proiezione del pedone e la velocità d'investimento.

	Sample	Equation	Correlation
High front veh.	n=56	$S=0.084V^2$	$r^2=0.76$
Low front veh.	n=11	$S=0.065V^2$	$r^2=0.69$
Adults	n=31	$S=0.070V^2$	$r^2=0.68$
Children	n=39	$S=0.088V^2$	$r^2=0.80$



# Evans e Smith

---

Un'ulteriore relazione empirica che lega la distanza di proiezione alla velocità del veicolo è stata ricavata dai tecnici Evans e Smith nel 1999:

$$v = \sqrt{\frac{S}{C_1}} - C_2$$

con:

$S$  = spazio percorso dal corpo dal punto d'urto alla posizione di quiete [m];

$C_1$  = costante 0.078 [  $s^2/m$  ];

$C_2$  = costante 0.00 [  $m/s$  ]



# Happer

In seguito il metodo di Evans e Smith è stato ripreso da Happer, lo studioso ha modificato i valori delle costanti, mantenendo invariata la relazione matematica:

$$v = \sqrt{\frac{S}{C_1}} - C_2$$

con:

$S$  = spazio percorso dal corpo dal punto d'urto alla posizione di quiete [m];

$C_1$  = costante 0.08 [  $s^2/m$  ];

$C_2$  = costante 0.72 [  $m/s$  ].

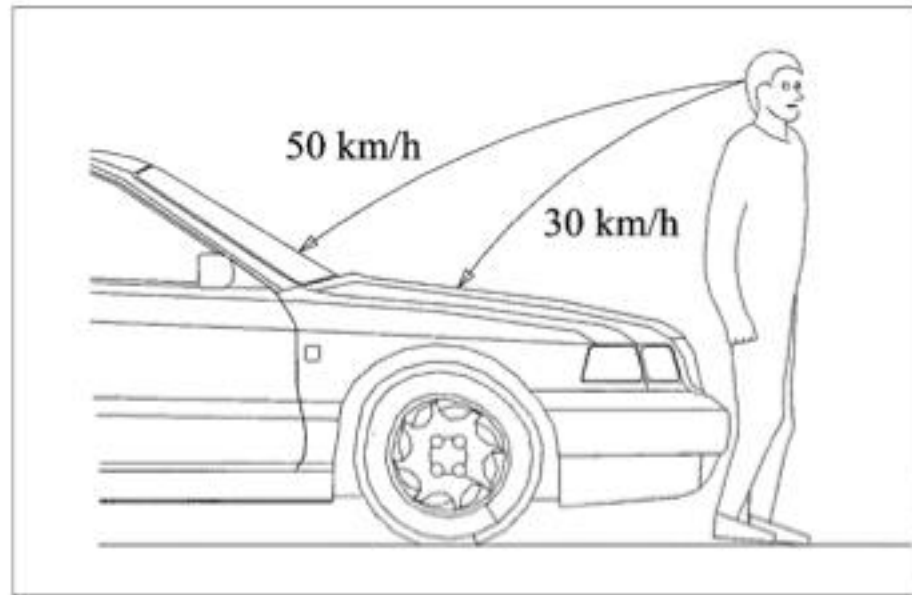
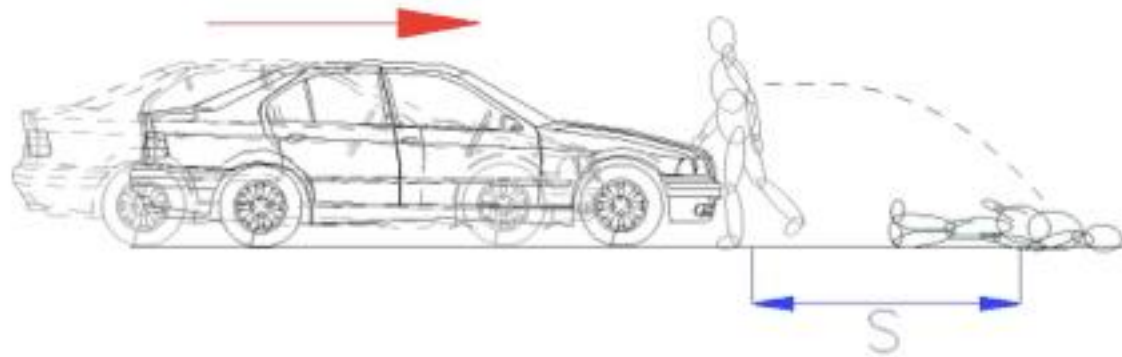


# Metodo grafico

---

E' possibile stimare la velocità d'impatto prendendo in considerazione i crash tests, esaminando la traiettoria tenuta dal corpo in seguito all'urto, in particolare il punto d'impatto fra la testa del pedone e il parabrezza dell'autovettura.

# Metodo grafico



# Metodo grafico



# Metodo grafico

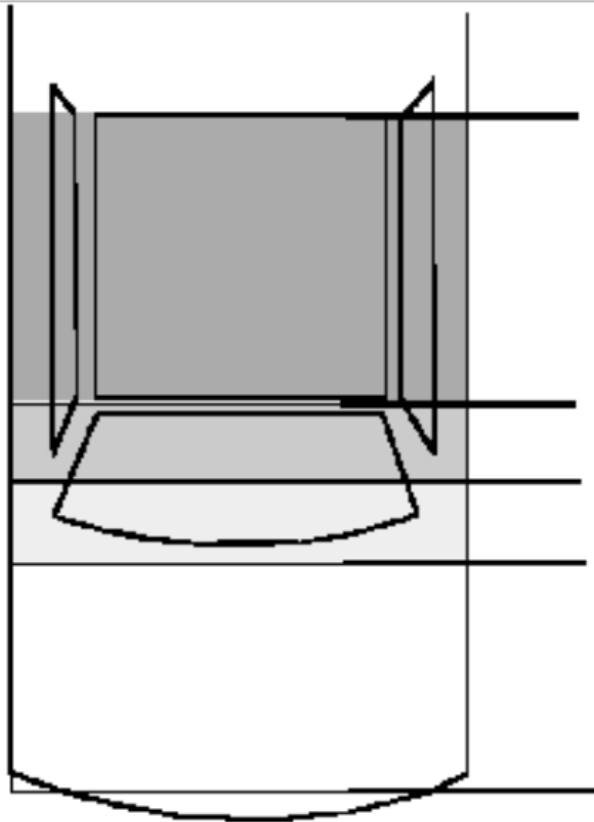




# Metodo grafico

## From Vehicle Damage

Vehicle damage is another, albeit less reliable, method for estimating impact speed. The higher the impact



**60+ MPH**  
**HEAD**  
**STRIKE**

**45 -60 MPH**  
**LOCATION**

**30 - 45 MPH**

**25 - 30 MPH**

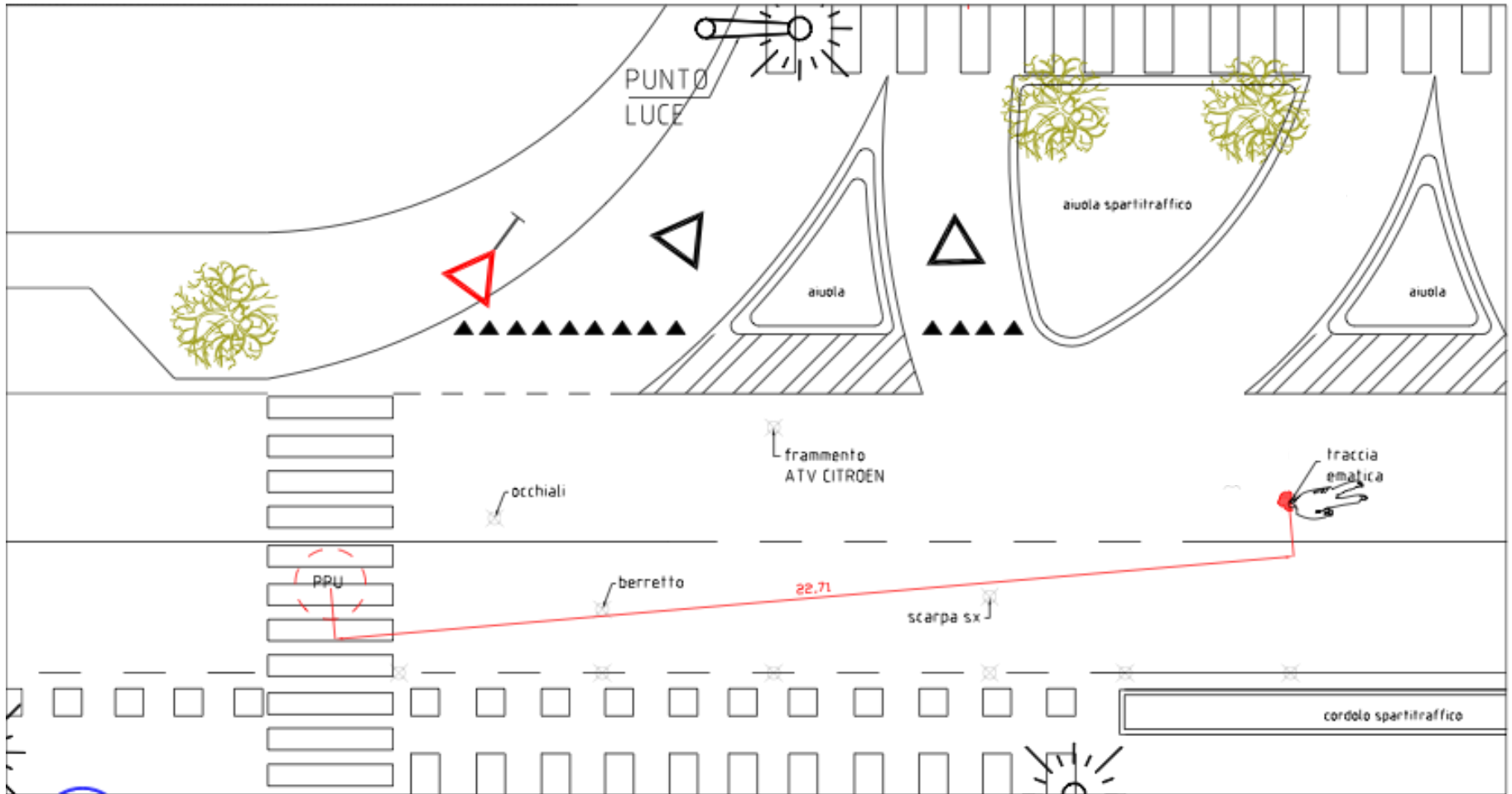
speed of the vehicle the further back from the front end of the vehicle the damage will tend to be, and the more severe. This is a general rule and, as all such rules, should be applied judiciously and with massive amounts of common sense. The pedestrian's position at impact, his position in relation to the front of the vehicle, as well as the height of the pedestrian are factors that will influence the location of impacts.

# Esercizio: caso pratico





# Planimetria luogo del sinistro





# Esercizio: soluzione

Metodo: J.A.Searle & A. Jearle			
$v_{min} = \sqrt{2 \times \mu \times g \times \frac{S}{1 + \mu^2}}$ $v_{max} = \sqrt{2 \times \mu \times g \times S}$			
Input			
S	22,5	m	Distanza totale
$\mu$	0,66	m	Coefficiente di attrito
g	9,81	m/s <sup>2</sup>	
Output			
$v_{min}$	14,2	m/s	Velocità minima acquisita dal pedone
	51	km/h	
$v_{max}$	17,1	m/s	Velocità massima acquisita dal pedone
	61	km/h	
Velocità del veicolo			
Input			
e	0,9		Efficienza di proiezione
$v_{imp,min}$	14,2	m/s	
$v_{imp,max}$	17,1	m/s	
Output			
$v_{imp,min}$	15,8	m/s	Velocità di impatto del veicolo minima
	57	km/h	
$v_{imp,max}$	19,0	m/s	Velocità di impatto del veicolo massima
	68	km/h	

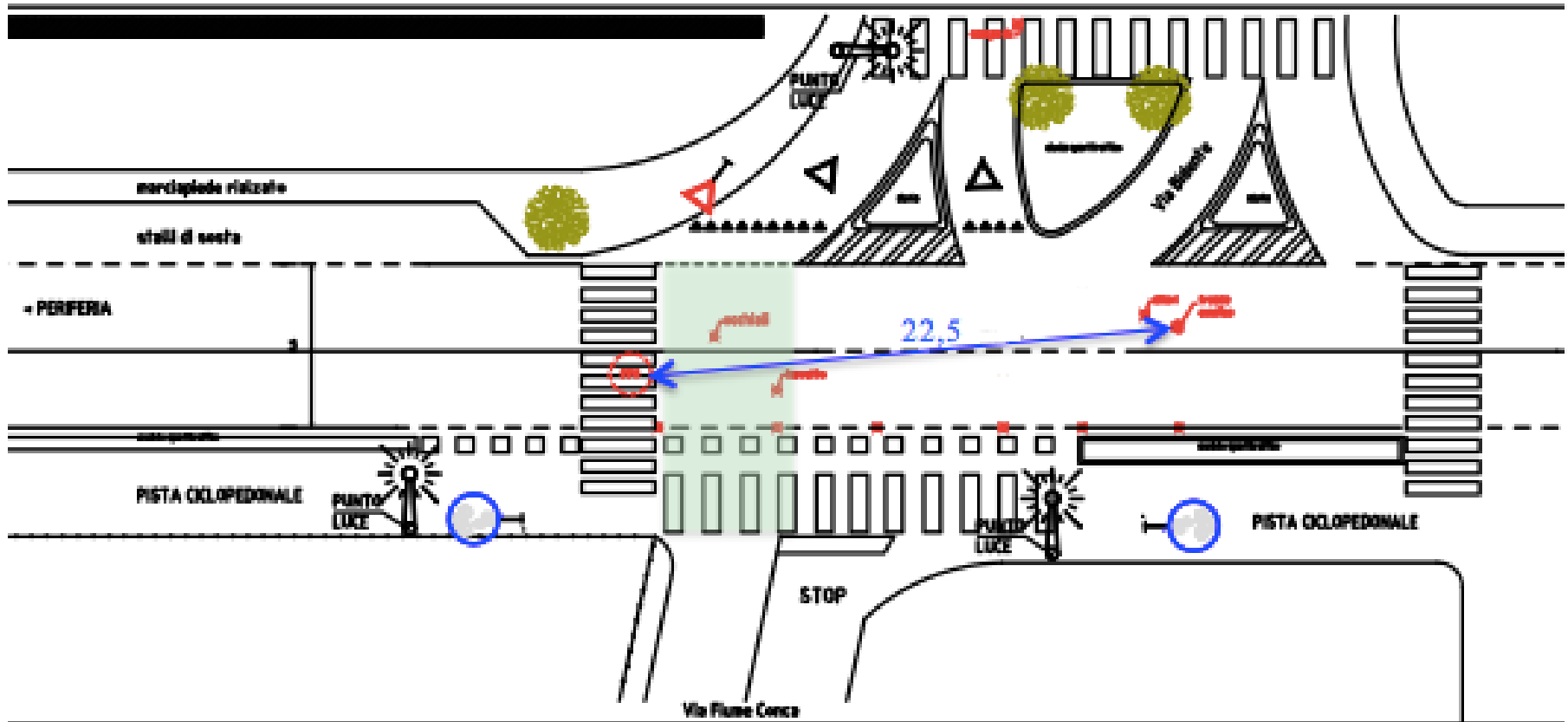
Metodo: Evans & Smith			
$v_{imp} = \sqrt{\frac{S}{C_1} - C_2}$			
Input			
S	22,5	m	Distanza totale
$C_1$	0,078		
$C_2$	0		
Output			
$v_{imp}$	17,0	m/s	Velocità di impatto del veicolo
	61	km/h	

Metodo: Appel			
$v_{imp} = \sqrt{\frac{S}{k}}$			
Input			
S	22,5	m	Distanza totale
$k_{veicolo}$	0,084		Veicolo_alto
$k_{persona}$	0,07		Adulto
Output			
$v_{imp,k\_altezza\ veicolo}$	16,4	m/s	Velocità di impatto del veicolo
	59	km/h	
$v_{imp,k\_tipo\ persona}$	17,9	m/s	Velocità di impatto del veicolo
	65	km/h	
Metodo: Wood			
$v_{imp} = k \cdot \sqrt{S}$			
Input			
S	22,5	m	Distanza totale
$k_{min}$	8,77		Wrap_min
$k_{max}$	13,76		Wrap_max
Output			
$v_{imp,min}$	11,6	m/s	Velocità di impatto del veicolo minima
	42	km/h	
$v_{imp,max}$	18,1	m/s	Velocità di impatto del veicolo massima
	65	km/h	

Metodo: Happer			
$v_{imp} = \sqrt{\frac{S}{C_1} - C_2}$			
Input			
S	22,5	m	Distanza totale
$C_1$	0,08		
$C_2$	0,72		
Output			
$v_{imp}$	16,1	m/s	Velocità di impatto del veicolo
	58	km/h	



# Esercizio: punto d'urto

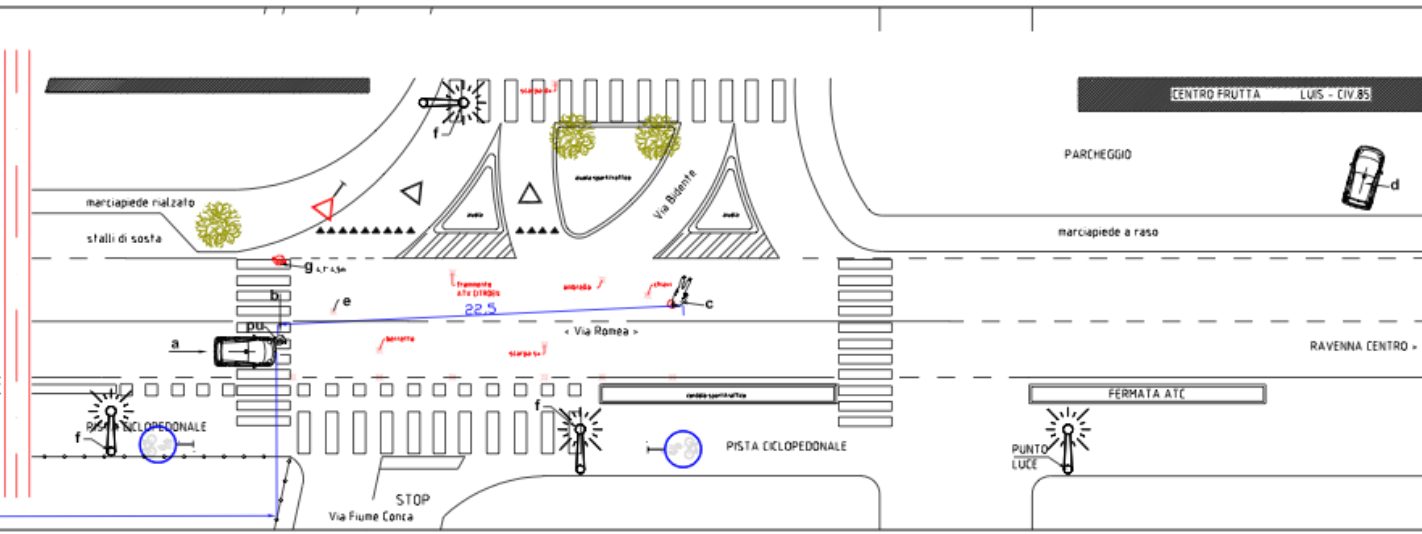
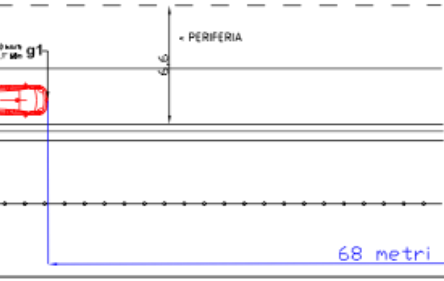


# Planimetria totale

**LEGENDA**

a) Direzione di marcia dell'autovettura CITROEN;  
 b) Direzione del pedone;  
 pu) Il punto d'urto;  
 c) Posizione di quiete del pedone;  
 d) Posizione indicativa finale dell'autovettura CITROEN desunta dal fascicolo fotografico delle autorità intervenute nell'immediatezza dei fatti;  
 e) Posizione a terra degli occhiali del pedone in prossimità del pu;  
 f) I diversi punti luce presenti sul campo del sinistro;  
 g) Posizione del pedone al momento dell'immissione sulla carreggiata, a 4,5 metri dal pu e a 4,1 sec. dallo stesso;  
 g1) Corrispondente posizione dell'autovettura CITROEN, che alla velocità di 60 km/h si trovava a 68 metri dal pu.

SCALA 1:100



# Progettazione di sistemi di trasporto

---



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Prof. Ing. Mattia Strangi

Università degli Studi di Bologna  
Dipartimento DICAM – [www.dicam.unibo.it](http://www.dicam.unibo.it)  
e-mail: [mattia.strangi@unibo.it](mailto:mattia.strangi@unibo.it)