

COLLISIONI VEICOLI- PEDONI: DINAMICHE E PARAMETRI DI RIFERIMENTO

Rosario Colombrita⁽¹⁾, Christian Donnini⁽²⁾, Salvatore Leonardi⁽³⁾

⁽¹⁾ Professore associato di Costruzione di Strade Ferrovie e Aeroporti – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Università degli Studi di Catania

⁽²⁾ Dottorando di ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Università degli Studi di Catania

⁽³⁾ Ricercatore universitario di Costruzione di Strade Ferrovie e Aeroporti – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Università degli Studi di Catania

In Italia, il problema delle collisioni in cui vengono coinvolti utenti deboli sta assumendo proporzioni allarmanti. A tal proposito, i dati ISTAT evidenziano come, negli ultimi 10 anni, si siano avuti oltre 9000 decessi e 161000 feriti, con un incremento delle vittime tra i pedoni del 51% negli ultimi 5 anni. In percentuale, gli utenti deboli vittime di incidenti si attestano mediamente al 17,6% del totale.

Si percepisce così la necessità di analizzare il fenomeno degli incidenti coinvolgenti le utenze deboli e di prevedere, conseguentemente, una serie di interventi che affrontino tale problema nelle diverse componenti (pedoni, ciclisti, automobilisti) e nei diversi ambiti (urbano, extraurbano).

In tale contesto, si ritiene importante la comprensione delle cause, delle modalità e degli effetti direttamente associati ai sinistri pedonali.

La cognizione esatta della sequenza di eventi che si manifestano nel caso di impatto tra una vettura e un pedone, rappresenta un punto cruciale per la ricostruzione complessiva della dinamica dell'incidente e, conseguentemente, per la caratterizzazione dei diversi parametri entranti in gioco (velocità, accelerazione, distanza di proiezione). Occorre infatti notare che le modalità di analisi (sia quelle "a priori", tipiche degli scenari previsionali, sia quelle "a posteriori", caratteristiche delle indagini in situ susseguenti l'evento sinistro) degli incidenti che coinvolgono i pedoni siano generalmente più complesse di quelle riguardanti, ad esempio, l'urto tra 2 veicoli o la collisione di una vettura con un elemento di ritenuta.

Gli elementi fisici, utili per l'analisi della collisione veicolo-pedone, spesso non sono adeguatamente documentati. Se si considera, poi, che molti aspetti importanti sono transitori, si può comprendere come, la mancanza di alcune informazioni significative,

costringa l'analista a svolgere ipotesi azzardate che possono condurre, a volte, a conclusioni prive di fondamento.

Con il presente studio, gli autori intendono in primo luogo fornire un contributo razionale per la comprensione della dinamica degli incidenti tra veicoli e pedoni. In seconda battuta, col supporto di un software di simulazione (PC-CRASH ver. 7.1), in dotazione presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Catania, si perverrà alla proposta di relazioni analitiche utili a dedurre i principali parametri caratterizzanti le collisioni tra le diverse categorie di veicoli a motore ed i pedoni.

Si ritiene, in proposito, che gli strumenti analitici preposti alla valutazione numerica di parametri come la velocità d'impatto e le distanze di proiezione dei pedoni investiti, possano risultare di notevole utilità nelle perizie di incidenti, per le quali vengono richieste complesse indagini retrospettive (ad es. la ricostruzione della velocità d'urto a partire dalle tracce di frenatura impresse sulla superficie stradale).

DINAMICA DELL'URTO TRA VEICOLO E PEDONE

In generale la descrizione della dinamica di un incidente in cui viene coinvolto un pedone è molto semplice, quasi banale: "il ragazzo stava attraversando la strada, quando è stato investito da un'automobile. A causa dell'urto, il giovane è finito a terra". Tale descrizione, pur nella sua semplicità, cela eventi solitamente più complessi. Occorre infatti comprendere *come* e *dove* il pedone attraversava la strada, *in che punto* è investito e *di quanto* il suo corpo viene spostato *dopo* l'urto; a tale scopo è indispensabile determinare parametri fondamentali come la velocità d'impatto, l'azione di frenatura esercitata dal veicolo, la relazione angolare tra il pedone e la vettura collidente.

La sequenza degli eventi ha inizio quando un pedone scende dal marciapiedi (se presente) e comincia ad attraversare la strada o, in alcuni casi, quando un'automobile si immette in un'area pedonale. In entrambi i casi, il momento in cui il pedone e il veicolo entrano nel luogo in cui si verificherà la collisione, segna l'inizio delle fasi di percezione e reazione sia per il conducente del veicolo che per il pedone. È proprio durante la fase di percezione che il pedone diviene visibile al conducente attento, così come l'auto diventa visibile al pedone prudente. In molti casi, è il pedone ad accorgersi per primo dell'automobile.

Se non ci si avvede del pericolo (rappresentato dall'automobile, nel caso del pedone) o dell'ostacolo sulla carreggiata (si tratta del pedone, nel caso della vettura), il processo di percezione e reazione non inizia o non ha il tempo di completarsi.

In tutti quei casi in cui, al termine della fase di percezione e reazione, né il conducente né il pedone possono evitare la collisione imminente, si può ipotizzare che entrambe le parti coinvolte abbiano superato “*the point of no escape*” e, se non interviene alcun evento contingente, si verificherà l’impatto.

Le fasi caratteristiche di un incidente pedonale si possono così sintetizzare:

- 1) Contatto
- 2) Accelerazione del corpo del pedone
- 3) Caricamento sul cofano del veicolo
- 4) Scivolamento al suolo del pedone
- 5) Movimento sul suolo del corpo del pedone

Il contatto avviene quando una parte della vettura tocca una parte del corpo del pedone. Statisticamente, nella maggior parte degli incidenti tra pedoni e veicoli, la parte dell’automobile che urta con il pedone è quella frontale. Meno frequentemente, la collisione coinvolge i lati o il retro del veicolo.

L’entità dell’impatto, funzione della velocità e dell’accelerazione del veicolo, determina la dinamica dell’urto e il grado di accelerazione a cui è assoggettato il pedone investito e successivamente “caricato”. È durante la fase di accelerazione che la vettura “raccolge” il pedone dal suolo e ne accelera il corpo sollevandolo in un moto rotatorio. Infatti, l’impatto tra il davanti dell’autovettura (generalmente nella zona del paraurti) ed un pedone adulto (di solito alle gambe) impartisce una componente di accelerazione rotazionale sul pedone. La fase del caricamento non si verifica nel caso di veicoli caratterizzati da una conformazione “piatta” dell’avantreno (ad es., i veicoli commerciali e quelli industriali) o in situazioni in cui la vittima è un bambino piccolo, il cui baricentro è più basso del paraurti.

Dopo l’impatto e l’inizio dell’accelerazione rotazionale del corpo del pedone, la situazione che si percepisce è tipicamente quella del pedone che viene spinto in aria verso il parabrezza. Nella realtà, a meno che il pedone stia correndo verso il veicolo, egli non ha velocità in direzione del parabrezza.

Per comprendere meglio questo aspetto, supponiamo, ad esempio, che un pedone stia camminando da est verso ovest, di fronte a una macchina diretta verso nord. Il pedone ha un vettore velocità diretto verso ovest. Il veicolo ha un vettore velocità diretto verso nord. Né il pedone, né la vettura hanno una componente della velocità diretta verso sud. Quando il pedone è colpito, si ha l’impressione che il corpo del pedone si muova verso il parabrezza della macchina che è a sud rispetto al paraurti diretto verso nord. Ciò che effettivamente accade è che, dopo l’impatto, viene prima accelerata la parte bassa del

corpo del pedone; questa accelerazione, sotto il baricentro, causa una rotazione del pedone tale che la parte inferiore del corpo si muove verso nord solidalmente al veicolo, mentre la parte superiore continua a muoversi verso ovest (la direzione che il pedone aveva mentre attraversava la strada).

A causa dell'effetto combinato della velocità (che imprime uno spostamento verso ovest) e dell'accelerazione (che innesca il moto rotazionale), il corpo del pedone acquisisce una componente della velocità nella direzione ovest – sud/ovest. Il risultato finale è proprio quello che vede il pedone colpito e ruotato sul cofano dell'automobile. Se la velocità impartita dal veicolo è tale che il pedone venga spinto sul cofano fino al parabrezza, si può manifestare un ulteriore sollevamento del corpo che, nel caso di impatti particolarmente violenti, può essere proiettato fin sopra e oltre il tetto della vettura.

Le fasi successive della dinamica dell'urto sono fortemente condizionate dal comportamento tenuto dal veicolo collidente. Si possono avere fondamentalmente due casi:

- 1) il veicolo, dopo l'impatto, continua nella sua direzione originale a una velocità costante e senza rallentare;
- 2) la vettura, successivamente al contatto col pedone, rallenta fino ad arrestarsi.

Nel primo caso, il corpo del pedone si muoverà secondo una delle tre seguenti modalità: (1) rimarrà sul cofano del veicolo vicino o contro il parabrezza, (2) sarà sollevato dal parabrezza e scivolerà verso il suolo, lungo un lato della macchina o, (3) se la velocità è abbastanza elevata, sarà proiettato sul parabrezza e oltre il tetto dietro la vettura. Se il corpo rimane bloccato sul cofano, assumerà lo stesso vettore velocità della vettura che lo ha investito. Se il corpo si muove verso il parabrezza, molto probabilmente raggiungerà la stessa velocità del veicolo e inizialmente, lo stesso vettore. Se il corpo non resta intrappolato dal vetro del parabrezza e, a causa della forma convessa del parabrezza medesimo, viene deviato verso un lato della macchina, assumerà una direzione di allontanamento diversa da quella della vettura, ma probabilmente avrà la stessa velocità. Se il corpo, infine, viene sollevato prima sul parabrezza e poi sul tetto, non raggiungerà la stessa velocità del veicolo.

Nel secondo caso, ovvero quando la vettura comincia a rallentare, si avrà una decelerazione del veicolo maggiore di quella del corpo durante il volteggio in aria. Il corpo si muoverà più velocemente del veicolo in fase di frenatura, e scivolerà davanti al frontale dell'auto sulla carreggiata o sul suolo (supponendo che il corpo non sia caricato sulla macchina).

La fase finale della collisione tra il veicolo e il pedone consiste nello spostamento al suolo del corpo del pedone; esso può cadere al suolo e fermarsi quasi subito o può rotolare per una certa distanza. Ogni tipo di movimento e il grado di rallentamento subito dal corpo sono funzione della velocità assunta dallo stesso, dell'angolo con cui si manifesta il contatto con la superficie e del coefficiente di attrito tra il corpo e lo strato superficiale del suolo. Esistono naturalmente alcune situazioni particolari di difficile previsione. Il corpo può, ad esempio, incastrarsi sotto il frontale della vettura, subire un urto secondario ed essere trascinato per una certa distanza, fino a che l'auto si arresta definitivamente.

È possibile schematizzare le possibili traiettorie assunte dal corpo del pedone successivamente alla collisione con un veicolo. In generale, si fa ragionevolmente riferimento a cinque possibili schemi d'urto (Figura 1), ovvero:

- 1) Spinta in avanti.
- 2) Proiezione in avanti (diretta).
- 3) Caricamento sul cofano e proiezione in avanti.
- 4) Volteggio sul paraurti.
- 5) Volteggio sul tetto.

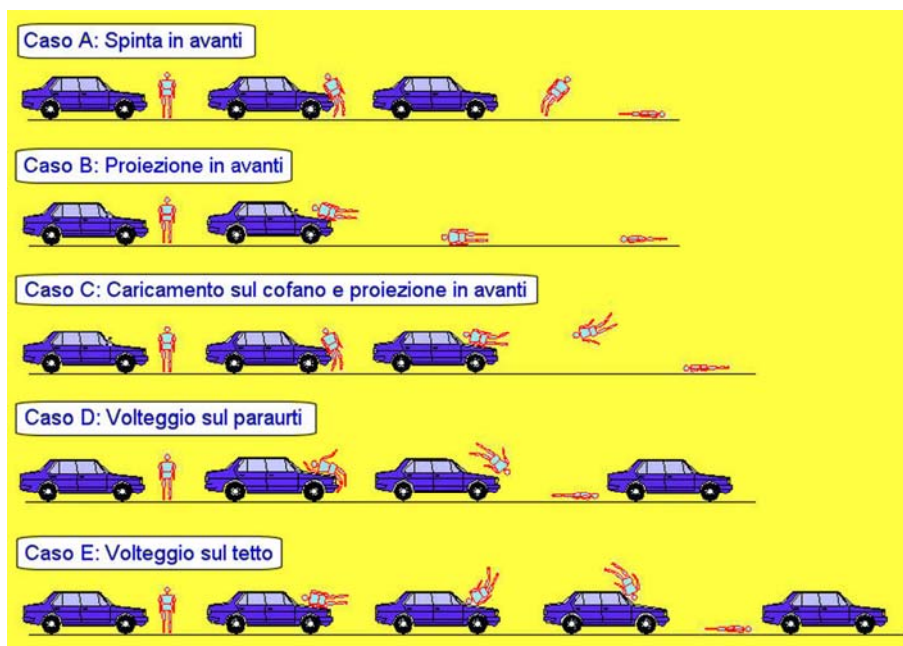


Figura 1. Possibili schemi d'urto tra veicolo e pedone

- **Spinta in avanti**: si tratta della traiettoria, successiva all'urto, statisticamente più frequente nel caso di collisioni tra veicoli e pedoni. La dinamica è molto semplice da descrivere: subito dopo l'impatto con l'autoveicolo, l'investito cade a terra (Caso A).
- **Proiezione in avanti**: è la seconda tipologia di traiettoria più diffusa. Si tratta di una collisione dove, al momento dell'impatto, il baricentro del pedone è più basso rispetto

al paraurti. Risulta pertanto tipica degli incidenti coinvolgenti bambini o persone di media-bassa statura. Nella proiezione in avanti, il tronco superiore del pedone è rapidamente accelerato nella direzione verso cui è applicata la forza d'urto che proietta il corpo davanti al veicolo. Nella fase immediatamente successiva, il veicolo rallenta e il pedone cade sulla carreggiata, spostandosi poi fino a raggiungere la posizione finale (Caso B).

- **Caricamento sul cofano e proiezione in avanti:** è il tipo di dinamica caratteristico delle collisioni che avvengono quando il veicolo impatta il pedone rallentando energicamente. In tal caso, il pedone è caricato sul cofano anteriore dell'auto col suo tronco superiore e può essere proiettato o verso il parabrezza o, meno frequentemente, verso un lato del veicolo; seguono la fase di caduta del pedone al suolo e quella dello scivolamento a terra, fino al punto di arresto (Caso C).
- **Volteggio sul paraurti:** questa particolare traiettoria si può riscontrare sia nel caso di urti coinvolgenti veicoli in fase di frenatura, sia quando i veicoli investono un pedone senza rallentare (generalmente a velocità superiore ai 40 km/h). Il pedone di solito è colpito vicino alla fiancata o all'angolo del veicolo ed è caricato sul paraurti. La sagoma del veicolo e la componente verticale della velocità applicata al baricentro del pedone influenzano il movimento del corpo e, conseguentemente, la traiettoria assunta dallo stesso. Nella fase finale della collisione, il pedone ricade dietro al veicolo e, meno frequentemente, a lato della vettura collidente (Caso D).
- **Volteggio sul tetto:** in questo caso la traiettoria descritta dal pedone urtato è simile a quella associata al volteggio sul paraurti. Il volteggio sul tetto si manifesta in quelle situazioni in cui un pedone, con un baricentro più alto del paraurti, è sollevato in aria a causa dell'effetto combinato della velocità d'impatto e della sagoma del veicolo. Questa traiettoria si verifica anche nei casi in cui il veicolo ha accelerato dopo l'impatto o quando l'auto, a velocità sostenuta (circa 60 km/h), non ha rallentato fino al momento dell'urto. Al termine del volteggio, il corpo del pedone si posiziona generalmente dietro il veicolo che lo ha urtato (Caso E).

IL SOFTWARE PER LA SIMULAZIONE DELLE COLLISIONI

Il software PC-CRASH rel. 7.1 si avvale di un modello di veicolo schematizzato come corpo rigido e di un modello di pedone basato sul sistema "multi-body".

Al fine di simulare il movimento del pedone, "il manichino virtuale" è formato da varie parti rigide (testa, torso, braccia, gambe) interconnesse da giunture (Figura 2).



Figura 2. Modello di pedone utilizzato nel software PC-Crash

Per il modello di pedone vengono utilizzate 24 parti interconnesse da 15 giunture. Inoltre il software prevede la possibilità di caratterizzare ogni parte del “manichino”, specificando persino la statura e il peso complessivo.

In particolare, al fine di pervenire ad una definizione compiuta del sistema multi-body, è necessario introdurre i seguenti parametri:

- *Indicatori geometrici*: ogni parte è rappresentata da un generico ellissoide, di cui possono essere specificati sia il grado che la lunghezza dei semi-assi.
- *Massa e momenti di inerzia*: è possibile inserire i valori di tali parametri, o accettare le indicazioni di default.
- *Coefficienti di rigidezza*: servono a definire il comportamento del manichino durante le simulazioni degli urti. Si può fare riferimento a coefficienti di rigidezza dedotti da indagini sperimentali.
- *Coefficienti di attrito*: si possono introdurre due differenti coefficienti di attrito; uno per caratterizzare l'urto tra l'ellissoide e il veicolo, l'altro è usato per il contatto tra due ellissoidi o tra ellissoide e suolo.

Il modello di impatto, per calcolare la forza d'urto dovuta a un valore certo di penetrazione tra due parti del manichino o tra una parte e un oggetto, è basato su una funzione di rigidezza lineare. Può essere immesso il valore del coefficiente di restituzione per descrivere la risposta elastica a seguito del contatto. Il software consente poi di valutare le forze d'impatto durante lo scivolamento al suolo del corpo del pedone.

È possibile inoltre scegliere il tipo di veicolo da utilizzare nelle simulazioni: può esserne definito uno ex-novo, oppure si può utilizzare uno di quelli contenuti nel database interno al software PC-Crash.

L'utilizzatore di PC-Crash può infine definire le condizioni iniziali, quali la posizione e l'orientamento di ogni parte, come pure le velocità e i parametri del moto prima dell'impatto.

Una volta avviata la simulazione, si assisterà alla dinamica dell'urto e si potrà, al termine del processo, consultare i vari dati (forze, spostamenti, velocità, accelerazioni, ecc.) associati all'interazione dinamica tra il corpo rigido del veicolo e la struttura articolata del pedone.

Riguardo all'attendibilità della modellazione offerta da PC-Crash, occorre osservare come siano stati svolti molti crash-test e vari collaudi per verificare la precisione dei risultati delle simulazioni e, conseguentemente, per tarare le procedure analitiche che stanno alla base del modello di collisione.

Tali prove di crash sono state eseguite mediante l'impiego di manichini standardizzati e di vetture caratterizzate da forme diverse del cofano anteriore. I movimenti del pedone e del veicolo, al momento dell'impatto, venivano registrati mediante l'utilizzo di una videocamera ad elevate prestazioni e di un accelerometro posto sull'automobile. È stata particolarmente studiata l'influenza delle diverse sagome del cofano sul movimento del manichino successivo all'impatto.

La successione di immagini riportata nell'esempio mostrato in figura 3 - relativo alla collisione, a circa 55 km/h, tra un manichino ed una VW Polo - evidenzia una buona correlazione tra i crash-test effettuati "dal vero" e le simulazioni eseguite con PC-Crash. In particolar modo, sia la traiettoria del pedone successiva all'impatto così come i punti in cui esso urta contro l'automobile, sono previsti con notevole precisione dal modello di simulazione. Anche il movimento del veicolo successivo all'impatto è stato previsto con grande fedeltà (Figura 4).

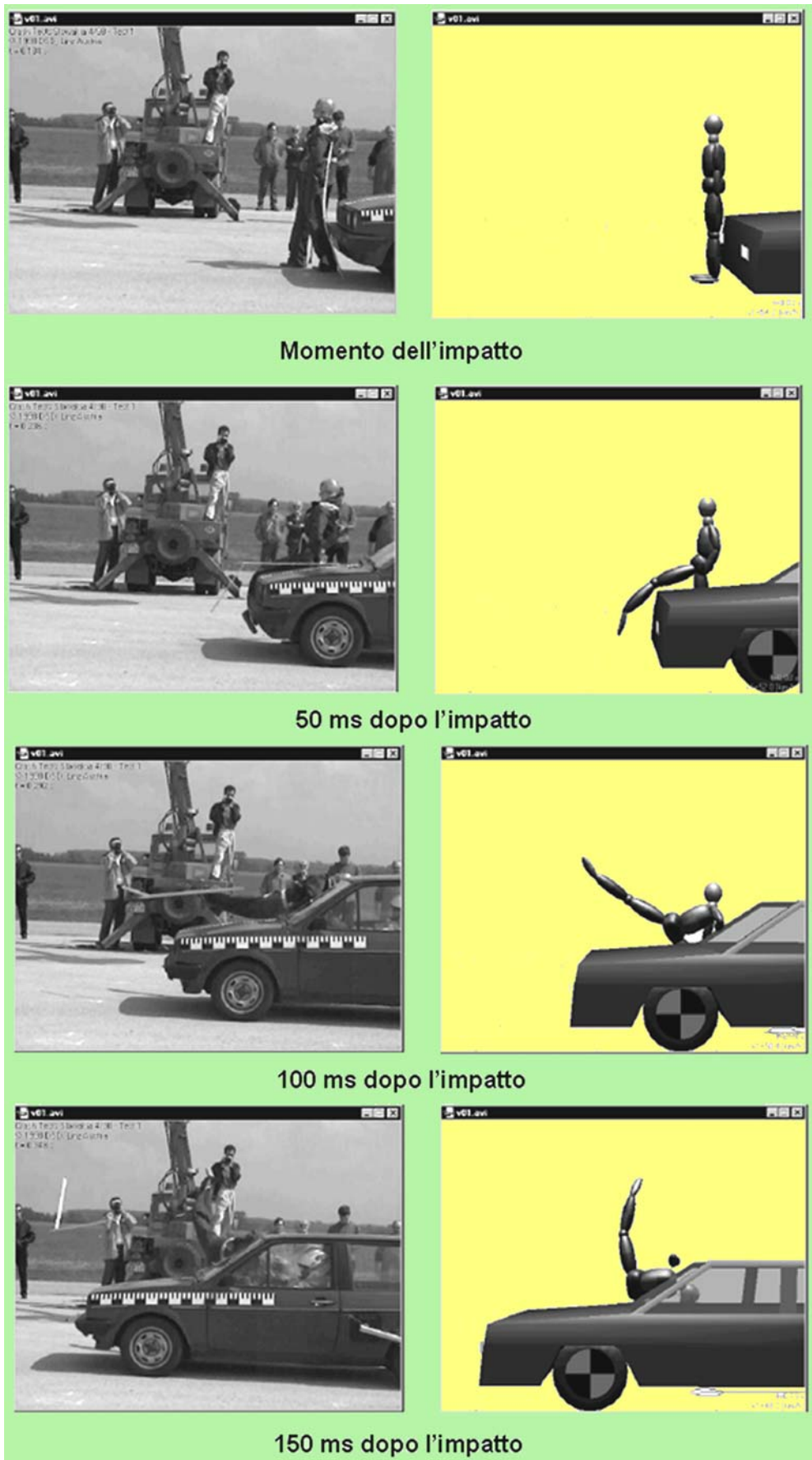


Figura 3. Confronto tra un crash-test reale ed uno simulato con PC-Crash

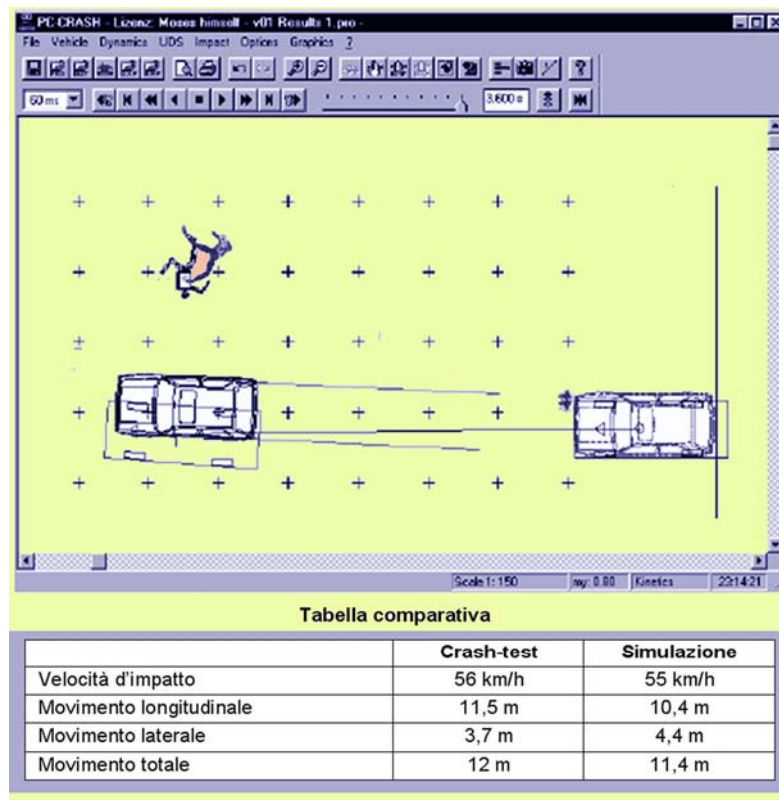


Figura 4. Confronto tra i parametri associati a un crash-test reale e ad uno simulato

MODALITÀ DI IMPOSTAZIONE DELLE SIMULAZIONI DEGLI URTI

Le simulazioni presentate in questo studio hanno come obiettivo principale quello di consentire la valutazione della distanza di proiezione dei pedoni urtati dai veicoli (ovvero la distanza che intercorre tra il punto d'urto veicolo-pedone e la posizione finale di quiete del pedone investito), in funzione della velocità di collisione. In maniera analoga, sarà possibile dedurre la velocità d'urto associata ad un'assegnata distanza di proiezione.

Per le simulazioni sono stati considerati venticinque veicoli (Tabella 1): 17 autovetture (4 utilitarie, 4 di fascia "media", 2 di fascia "lusso", 5 vetture sportive e 2 "4x4"), 2 furgoni, 2 mini-bus, 2 autobus e 2 veicoli industriali.

Le differenti caratteristiche di tali veicoli (forma del cofano e del paraurti anteriore, massa, altezza del baricentro) originano diversi comportamenti del pedone subito dopo l'urto sempre riconducibili agli schemi di collisione analizzati precedentemente.

Le simulazioni sono state impostate con riferimento ai seguenti parametri di input:

- velocità dei veicoli al momento dell'urto variabile, a step di 10 km/h, dal valore minimo di 20 km/h al valore massimo di 70 km/h;
- sequenza di movimento, comune a tutti i veicoli, in base alla quale il conducente al momento dell'impatto inizia a frenare energicamente con una decelerazione pari a $6,47 \text{ m/s}^2$ fino all'arresto del mezzo;

- modello multi-body per la schematizzazione del pedone avente le seguenti proprietà: peso di 70 kg, statura di 1,75 m;
- “manichino virtuale” fermo davanti al veicolo in un punto centrale rispetto al cofano anteriore.

	Massa (kg)	Passo (cm)	Categoria di veicolo
Opel Corsa	885	244	Utilitarie
Renault Clio	940	247	
Citroen C3	1022	246	
Fiat Punto	1040	246	
Alfa 156	1240	259.5	Fascia “media”
Audi A3	1200	251	
BMW 316	1235	270	
Fiat Brava	1195	254	
BMW 320	1470	272	Fascia “lusso”
Fiat Marea	1195	254	
Audi TT	1530	243	Vetture sportive
Ferrari 360 M.na	1390	260	
Lamborghini M.go	1820	266	
Lotus	900	268	
Porsche Carrera	1470	227	
BMW X5	2090	282	Vetture 4x4
Porsche Cayenne	2500	285	
Fiat Scudo	1430	282	Furgoni
Fiat Ducato	2030	320	
Mercedes Touring	4500	425	Mini-Bus
Iveco Turbodaily	2900	331	
Mercedes Citaro	13000	585	Autobus
Mercedes Tour	18000	625	
E330 Eurocomet	14000	610	Veicoli industriali
Iveco EuroTrakker	26000	350	

Tabella 1. Modelli di veicolo utilizzati nelle simulazioni

Tenendo conto del numero complessivo di veicoli (25) e dei diversi valori di velocità (6), si sono eseguite 150 simulazioni, per ognuna delle quali è stata rilevata la distanza di proiezione (crescente all’aumentare della velocità).

Si osservi che, in virtù della schematizzazione adottata, risulta sempre univocamente determinato il punto di impatto, a partire dal quale si computa la distanza di proiezione (D). Ciò trova riscontro reale in tutti quegli scenari incidentali in cui il punto (o la zona) d’impatto è desumibile da fattori oggettivi, quali:

- le tracce di frenatura lasciate sulla pavimentazione (le quali possono talvolta presentare delle discontinuità proprio in corrispondenza della zona d’urto);
- la presenza di elementi (oggetti, tracce di sangue, ecc.) indicativi della posizione iniziale dell’impatto;

- le testimonianze offerte dai protagonisti del sinistro e/o da persone esterne all'accaduto.

Esistono ovviamente situazioni per le quali è difficile determinare univocamente la zona d'impatto e per le quali occorre, quindi, formulare opportune ipotesi sulla dinamica del sinistro.

A titolo d'esempio, si riportano nelle figure 5 e 6, alcune schermate relative alle dinamiche d'urto associate, rispettivamente, ad un'utilitaria (Opel Corsa 1.4) e ad un furgone (Fiat Scudo 1.9 D).

Le differenze riscontrabili nei due casi sono evidenti:

- Nel caso dell'utilitaria, alla fase dell'urto segue quella del caricamento – il cui verificarsi è dovuto alla forma anteriore e alla posizione del baricentro – in cui il corpo dell'investito, urtato dal veicolo al di sotto del suo baricentro, viene per così dire “caricato” sul cofano. Successivamente si osservano le fasi di caduta a terra e di scivolamento al suolo.
- Nel caso del furgone, la particolare forma della parte anteriore non consente il verificarsi della fase del caricamento: il movimento del pedone, successivo all'impatto, consiste infatti in una prima fase di caduta e in una seconda di scivolamento al suolo.

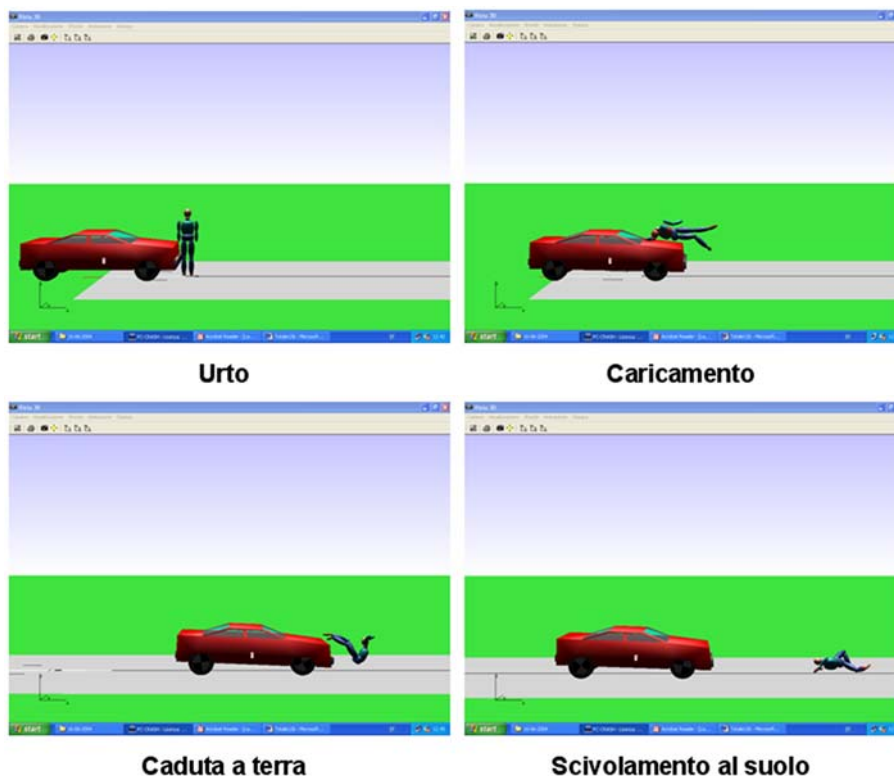


Figura 5. Dinamica di collisione tra un'utilitaria (Opel Corsa 1.4) e un pedone

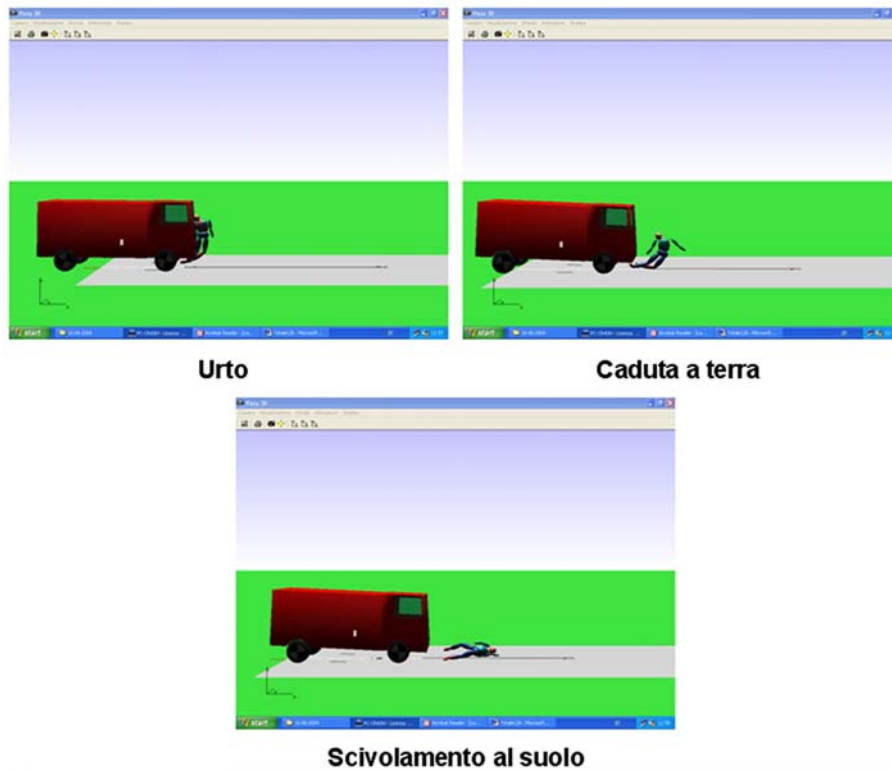


Figura 6. Dinamica di collisione tra un furgone (Fiat Scudo 1.9 D) e un pedone

DEDUZIONE DELLE RELAZIONI ANALITICHE PER LA VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DELL'URTO

Al termine delle simulazioni, tutti i dati ottenuti sono stati elaborati ed analizzati criticamente. In particolare, è stato possibile evincere che:

- le dinamiche d'urto sono pressoché identiche per tutte le 17 autovetture: trattasi dello schema di collisione che prevede la sequenza “urto, caricamento, caduta, scivolamento al suolo”;
- i rimanenti veicoli (furgoni, bus, mini-bus, mezzi commerciali) presentano similmente una dinamica di collisione basata sulla sequenza “urto, caduta, scivolamento al suolo”;
- i valori delle distanze di proiezione, variabili con la velocità d'urto, risultano paragonabili per tutte le 17 vetture (utilitarie, fascia “media”, fascia “lusso”, vetture sportive e “4x4”) impiegate per le simulazioni;
- i 4 veicoli appartenenti alle categorie “furgoni” e “mini-bus” offrono distanze di proiezione del pedone tra loro confrontabili;
- i 4 mezzi di trasporto catalogati come “autobus” e “veicoli industriali” forniscono risultati analoghi per le distanze di proiezione.

In virtù delle osservazioni precedenti, si è proceduto ad un accorpamento ragionato dei dati ottenuti dalle simulazioni. In particolare, si sono realizzati i seguenti grafici:

- i diagrammi rappresentati nelle figure 7, 8 e 9, in cui, per ognuna delle tre classi di veicoli omogenee dal punto di vista delle distanze di proiezione ottenute, sono riportate le distanze di proiezione del pedone (D), poste in ordinata, in funzione della velocità d'urto (V), riportata in ascissa. Ciascuno di tali grafici presenta inoltre la curva di regressione (polinomio di secondo grado) che meglio approssima la successione dei dati;
- il grafico di figura 10, in cui vengono rappresentate le curve di regressione e le relative equazioni, necessarie alla valutazione della velocità di collisione (V) in funzione di una qualsivoglia distanza di proiezione (D) del pedone investito. Si può notare come, a parità di distanza di proiezione, le velocità d'urto associate alle autovetture sono significativamente più elevate di quelle relative a tutte le altre categorie di veicoli. Ciò, come è deducibile dalle diverse dinamiche d'urto, è dovuto prevalentemente alla maggiore dissipazione di energia che si manifesta nel corpo del pedone per effetto della fase di caricamento (fase del tutto assente nel caso dei mezzi pesanti). I veicoli industriali, per contro, provocano il raggiungimento del massimo valore di energia cinetica da parte del pedone investito (e quindi distanze di proiezione più elevate).

La tabella 2, infine, fornisce i parametri per il corretto utilizzo delle formule che permettono la deduzione delle distanze di proiezione in funzione della velocità d'urto e viceversa.

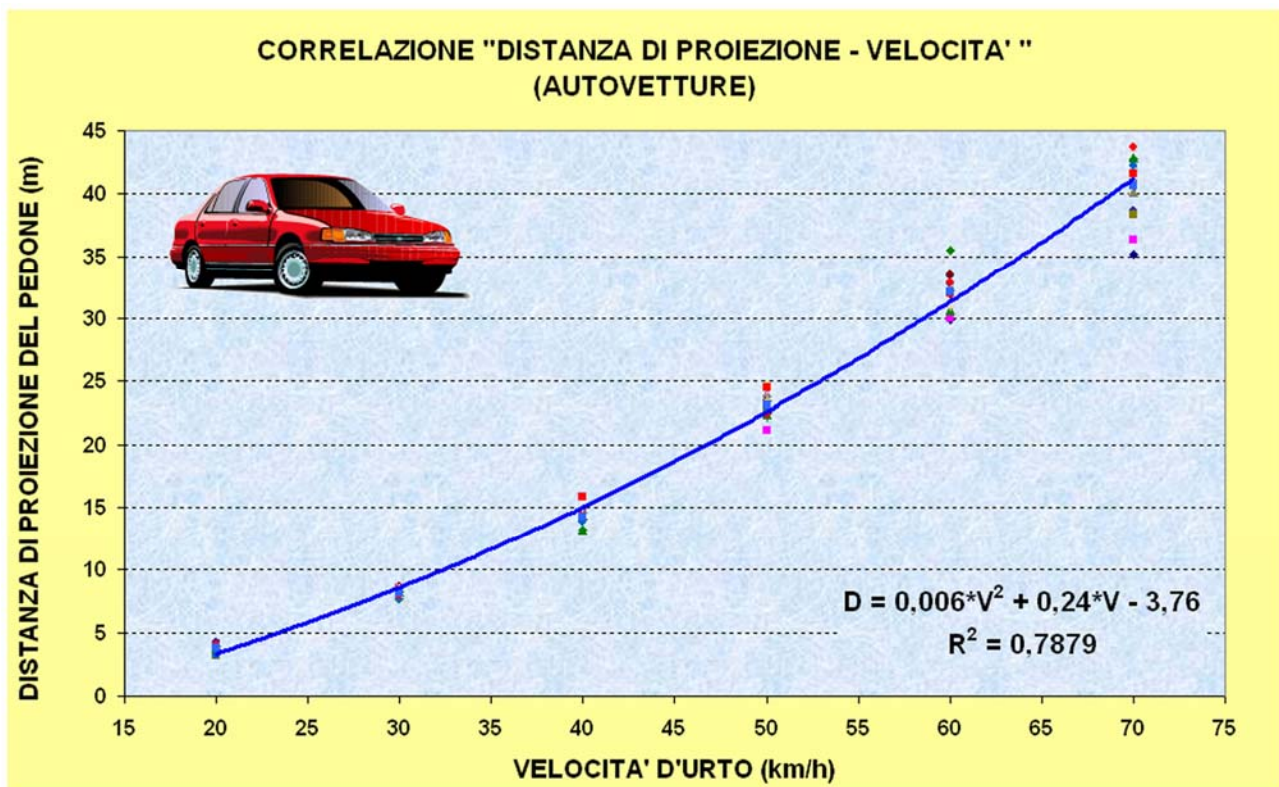


Figura 7. Correlazione tra distanza di proiezione e velocità di collisione (classe di veicoli: autovetture)

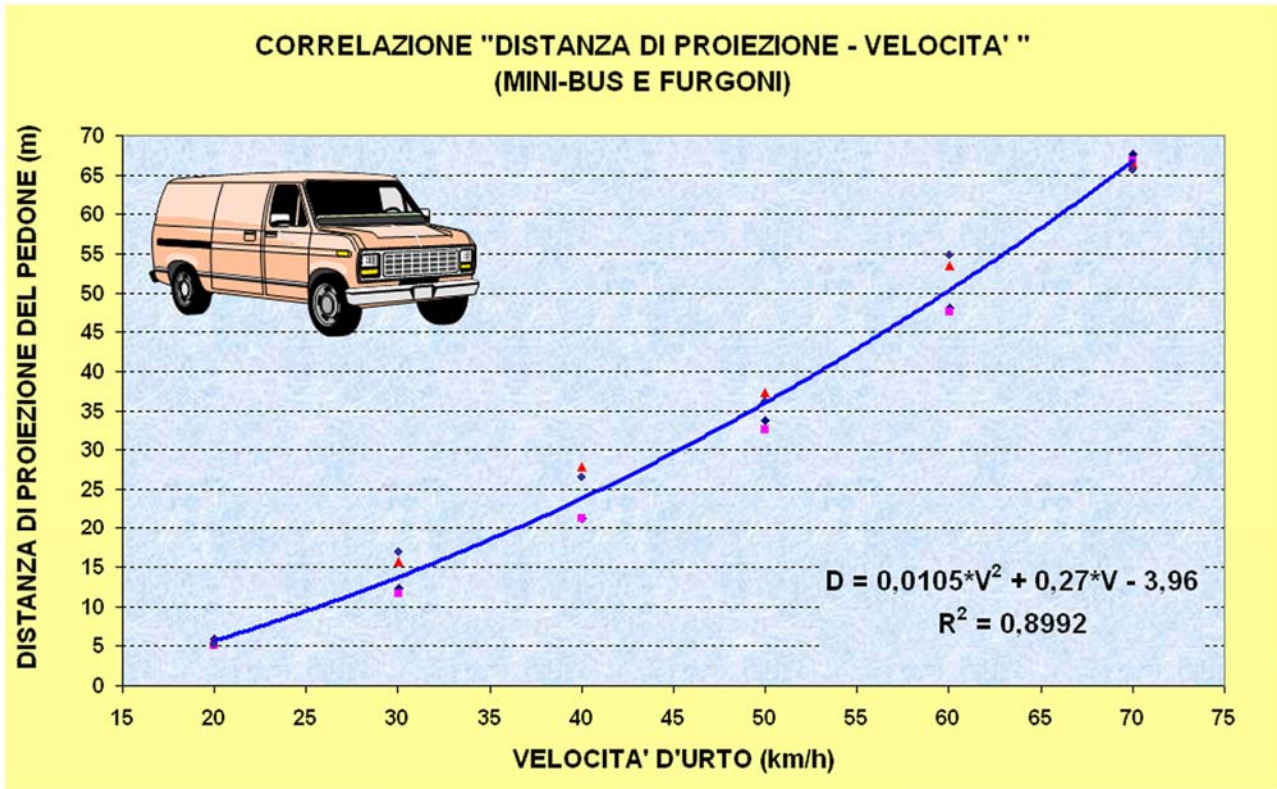


Figura 8. Correlazione tra distanza di proiezione e velocità di collisione (classe di veicoli: furgoni e mini-bus)

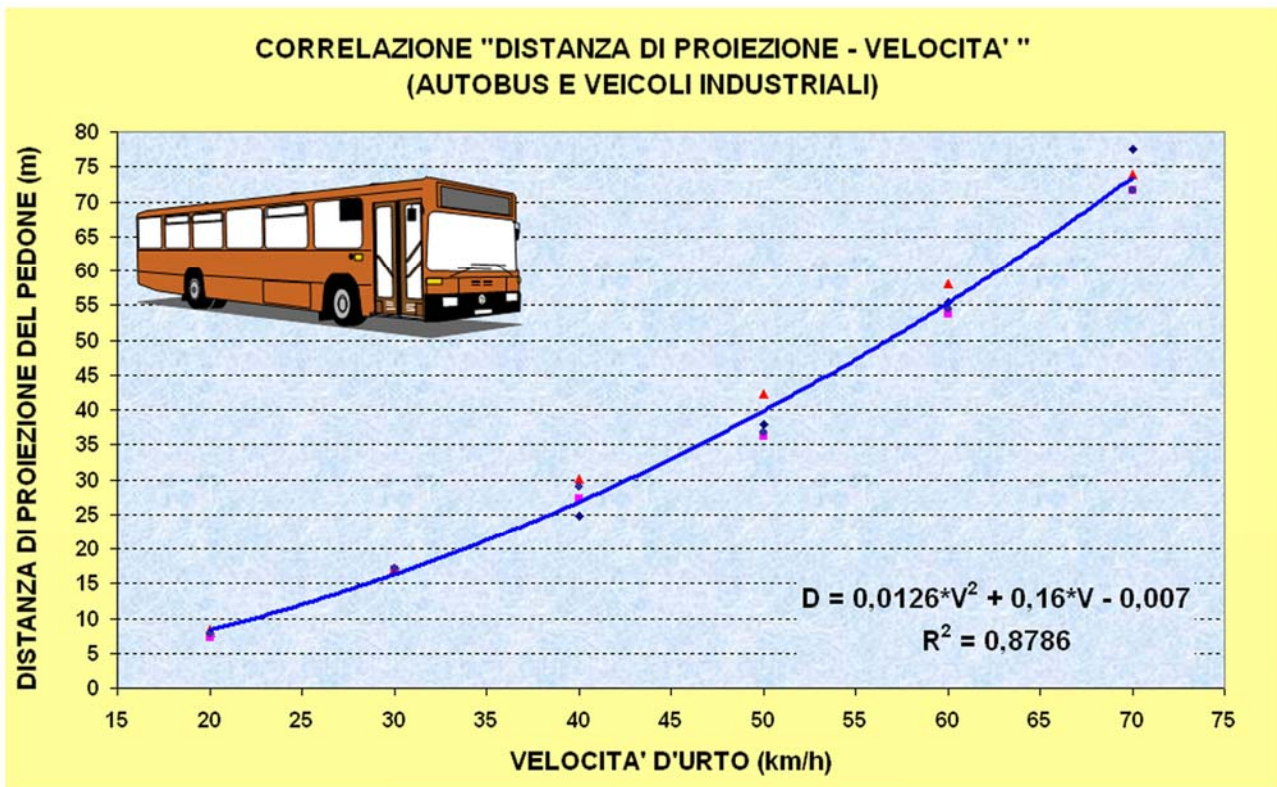


Figura 9. Correlazione tra distanza di proiezione e velocità di collisione (classe di veicoli: autobus e veicoli industriali)

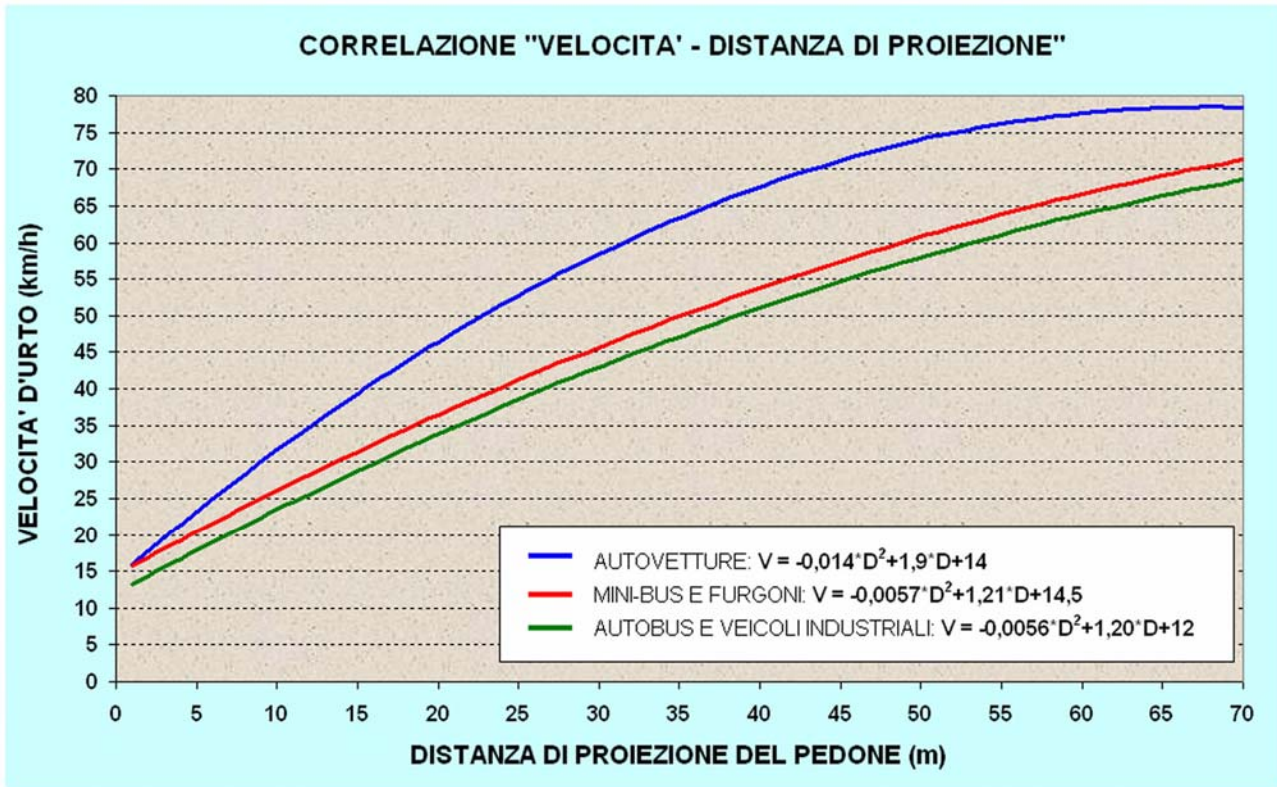


Figura 10. Correlazione tra velocità di collisione e distanza di proiezione per tutte le classi veicolari

Distanza di proiezione in funzione della velocità di collisione: $D = a \cdot V^2 + b \cdot V + c$			
	a	b	c
Autovetture	0.006	0.24	-3.76
Furgoni e mini-bus	0.0105	0.27	-3.96
Veicoli industriali e autobus	0.0126	0.16	-0.007
Velocità di collisione in funzione della distanza di proiezione: $V = x \cdot D^2 + y \cdot D + z$			
	x	y	z
Autovetture	-0.014	1.90	14
Furgoni e mini-bus	-0.0057	1.21	14.5
Veicoli industriali e autobus	-0.0056	1.20	12

Tabella 2. Correlazioni analitiche tra i parametri dell'urto (velocità di collisione e distanza di proiezione)

CONCLUSIONI

Mentre l'Unione Europea e la maggior parte dei paesi sviluppati registrano un'intensa riduzione del numero e, soprattutto, della gravità degli incidenti stradali, in Italia si manifesta un trend crescente. Infatti con il 75% degli incidenti in ambito urbano, il nostro

paese si trova al secondo posto nella graduatoria della pericolosità della circolazione stradale in Europa, dove la media si attesta intorno al 66%.

In questo contesto, il fenomeno degli incidenti pedonali ha assunto, negli ultimi anni, connotazioni sempre più drammatiche: esso rappresenta una considerevole percentuale degli incidenti complessivi.

Si è visto, nel presente lavoro, come la collisione veicolo-uomo presenti aspetti peculiari, per l'analisi dei quali non è possibile far riferimento alle tecniche di previsione e di ricostruzione utilizzate per lo studio degli urti tra veicoli.

Le simulazioni effettuate con PC-Crash, software per l'analisi e la ricostruzione di incidenti stradali, hanno evidenziato come la traiettoria del pedone dopo l'urto consti di fasi tipiche, fortemente condizionate dalla sagoma e dalla velocità dei veicoli impattanti.

La forma, il peso del veicolo e la sua velocità di impatto determinano, altresì, peculiari effetti lesivi. A tal proposito, uno studio condotto dalla NHMRC-RARU statunitense (National Health and Medical Research Council – Road Accident Research Unit) ha mostrato che un pedone adulto colpito da un'auto che viaggia a 65 km/h ha l'85% di probabilità di venire ucciso. A 50 km/h, la probabilità di morte è dell'55%. Se questa velocità viene ridotta di un'ulteriore terzo (32 km/h), la probabilità di morte dell'investito si riduce al 5%.

Inoltre è risaputo che un guidatore che viaggia a velocità elevata è meno disposto a fermarsi per dare precedenza a un pedone su un passaggio pedonale.

Minori velocità dei veicoli inducono inoltre ad un comportamento più sicuro da parte degli automobilisti: una velocità più bassa permette infatti ad un guidatore un maggior tempo di reazione e riduce la gravità degli incidenti.

Piccole riduzioni nella velocità di percorrenza si traducono, quindi, in grandi riduzioni della velocità di impatto nelle collisioni con il pedone, evitando a volte lo stesso verificarsi dell'incidente.

Le osservazioni appena svolte servono a ribadire come la deduzione della velocità di impatto, sia nel caso di incidente pedonale realmente verificatosi, sia nel caso delle analisi di tipo preventivo, possa risultare di estrema utilità.

Il presente gruppo di ricerca, proponendo le formulazioni che mettono in relazione le velocità d'urto delle diverse categorie veicolari con le distanze di proiezione dei pedoni investiti, ritiene di aver fornito un contributo significativo per la comprensione teorica e per la caratterizzazione parametrica di un fenomeno complesso come il sinistro veicolo-pedone.