



A.N.E.I.S.

MEDIA CAMPUS
Formazione Giuridica-Economica

STUDIO TECNICO
SARTORI

aris
analisi ricostruzione incidenti stradali
GROUP

Aspetti biomeccanici ed indagini tecniche sul ‘colpo di frusta’

Ing. Alberto Sartori

alberto.sartori@arisgroup.eu

www.albertosartori.com

www.arisgroup.eu



Seminario Media Campus ‘Dalle più recenti normative alle ultime tecnologie di indagine’

Zelarino, 15 Aprile 2016



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Ingegneria

Master II Livello in Ingegneria Legale

Gli impatti a bassa velocità: aspetti biomeccanici e tecniche ricostruttive

Candidato

Ing. Alberto Sartori

Relatore

Dott. Franco Zuppichini

Tutor Universitario

Prof. Dario Vangi

INDICE

Ringraziamenti.....	3
1. Sommario e finalità	9
2. Introduzione	11
3. Cinematica degli autoveicoli	17
4. Il comportamento degli autoveicoli nei tamponamenti a bassa velocità	29
5. La biomeccanica delle lesioni traumatiche negli impatti a bassa velocità...	61
6. La ricostruzione biomeccanica di impatti con Whiplash Injury	103
7. Conclusioni	141
8. Bibliografia.....	145

SOMMARIO

- 1 Descrizione del comportamento degli autoveicoli negli impatti a bassa velocità (tamponamenti);
- 2 Descrizione del meccanismo della Whiplash Injury ('colpo di frusta');
- 3 Determinazione sperimentale della soglia lesiva;
- 4 La ricostruzione biomeccanica di impatti automobilistici reali con Whiplash Injury;
- 5 Utilizzo delle informazioni della scatola nera per la determinazione delle sollecitazioni;
- 6 Consigli per la corretta istruzione della pratica ergonomica.

Il tamponamento a bassa velocità:

- E' uno degli incidenti più frequenti nell'ambito del traffico urbano;
- Il 75% degli incidenti a bassa velocità in cui vengono riportate lesioni dalle persone coinvolte è il tamponamento (a cui si associa spesso il fenomeno del 'colpo di frusta');
- Nel mondo: le richieste di risarcimento per lesioni lievi sono il 25 % di quelle complessive. Costo annuo: 8,5 mld/dollari USA, 2 mld/eur Germania, 1.6 mld/eur Inghilterra.

INTRODUZIONE

In Italia:

DATI ANIA 2013:

477'000 sinistri con danni alla persona, di cui 452'000 con invalidità sotto i 9 punti punti % (costo annuo di 2,6 mld/euro, 23% del costo totale sinistri)

**320'000 sinistri con invalidità compresa tra 1 e 2 punti % →
400'000 feriti all'anno**

DATI ISTAT 2014:

251'000 sinistri con danni alla persona.

50'000 sinistri da tamponamento con lesioni da 'colpo di frusta' → dati ISTAT si basano solo su incidenti con intervento della forza pubblica.

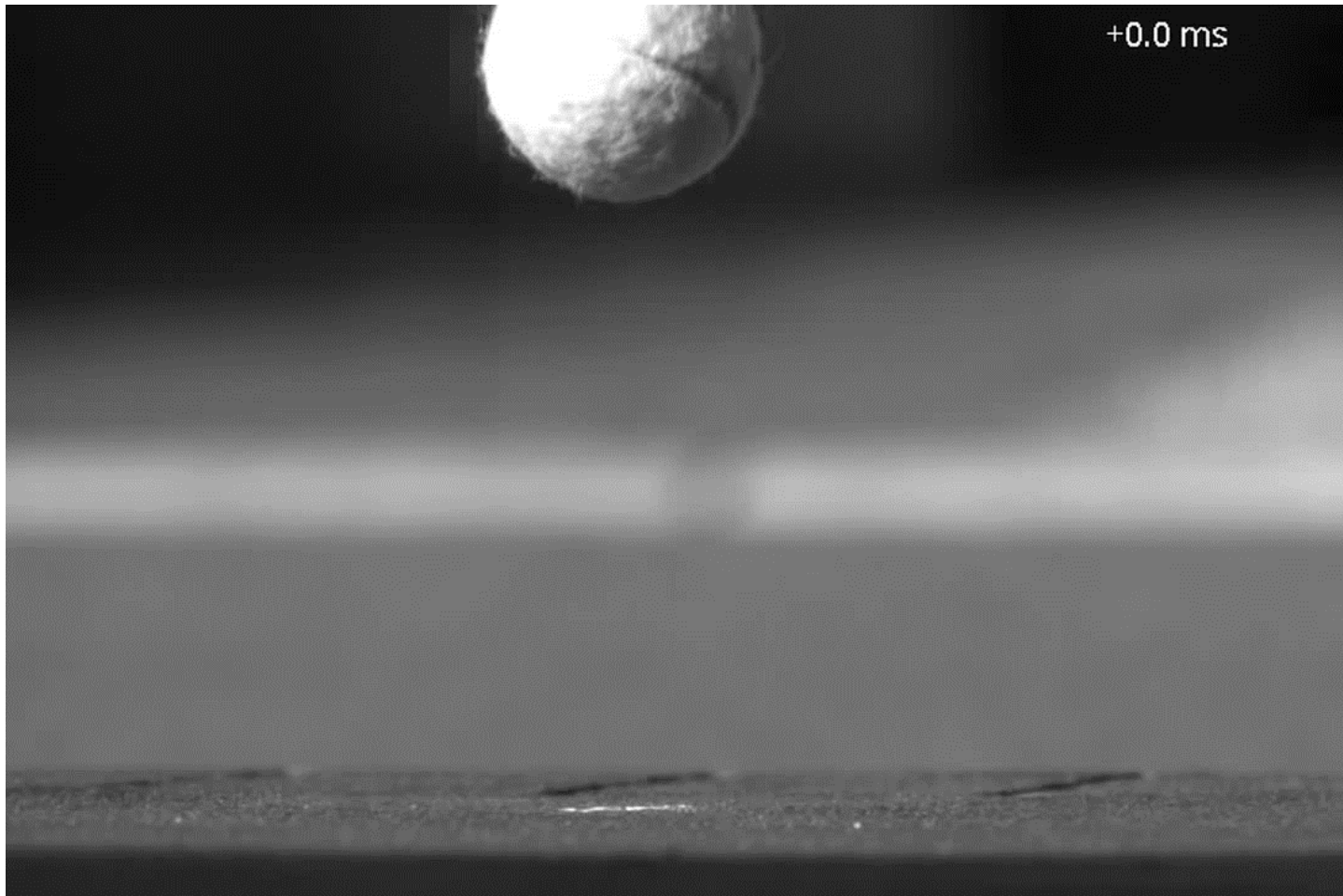
LA CINEMATICA DEL TAMPONAMENTO

Il veicolo che tampona trasmette al tamponato un impulso longitudinale di accelerazione variabile nel tempo e contraddistinto da un valore massimo in ampiezza. Tale impulso si trasferisce poi a tutte le strutture interne dell'abitacolo e ai suoi occupanti.



LA CINEMATICA DEL TAMPONAMENTO

Suddivisione dell'impatto in quattro fasi temporali: contatto, massima compenetrazione, restituzione elastica, separazione.



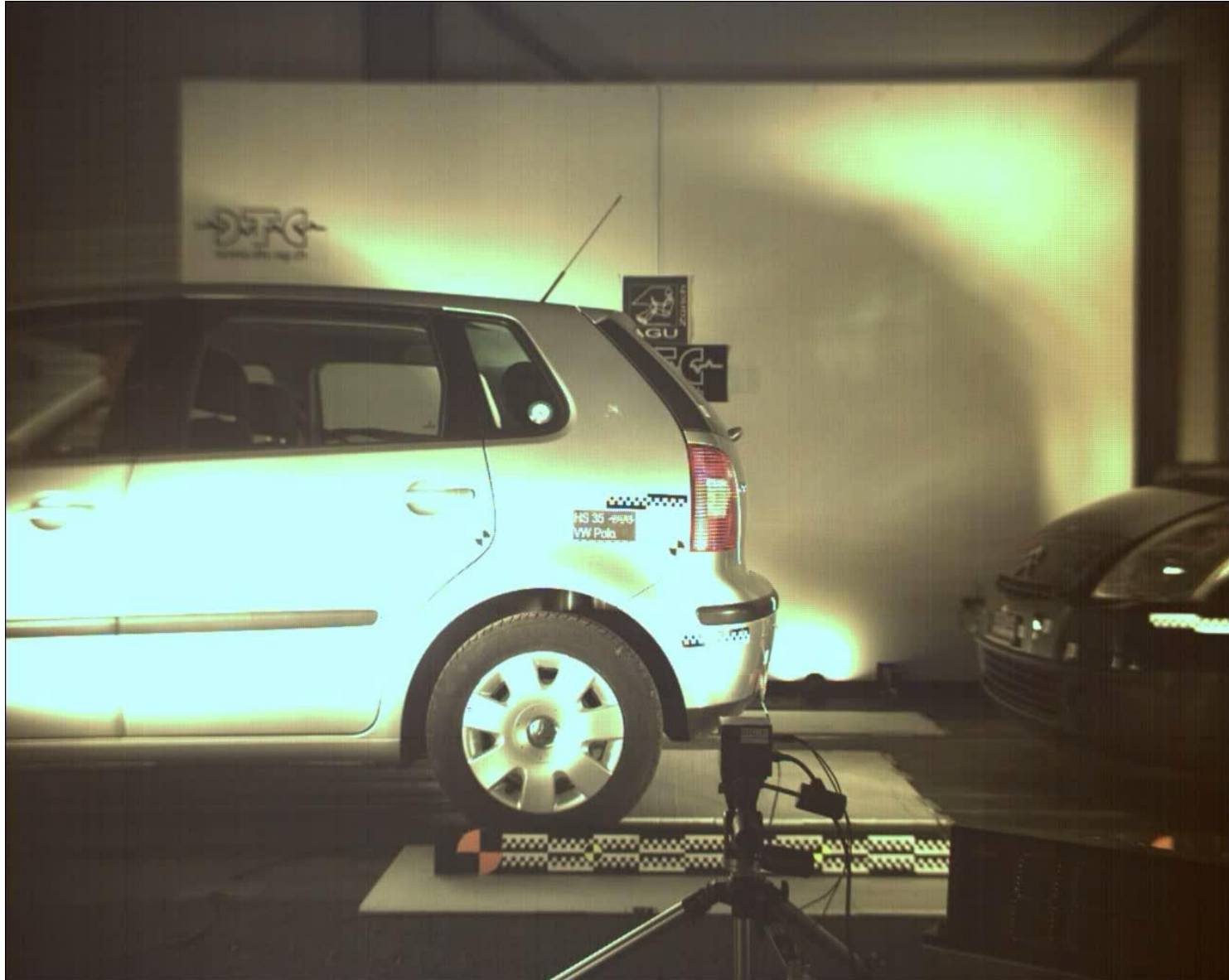
I DANNI AI VEICOLI

Report di crash:

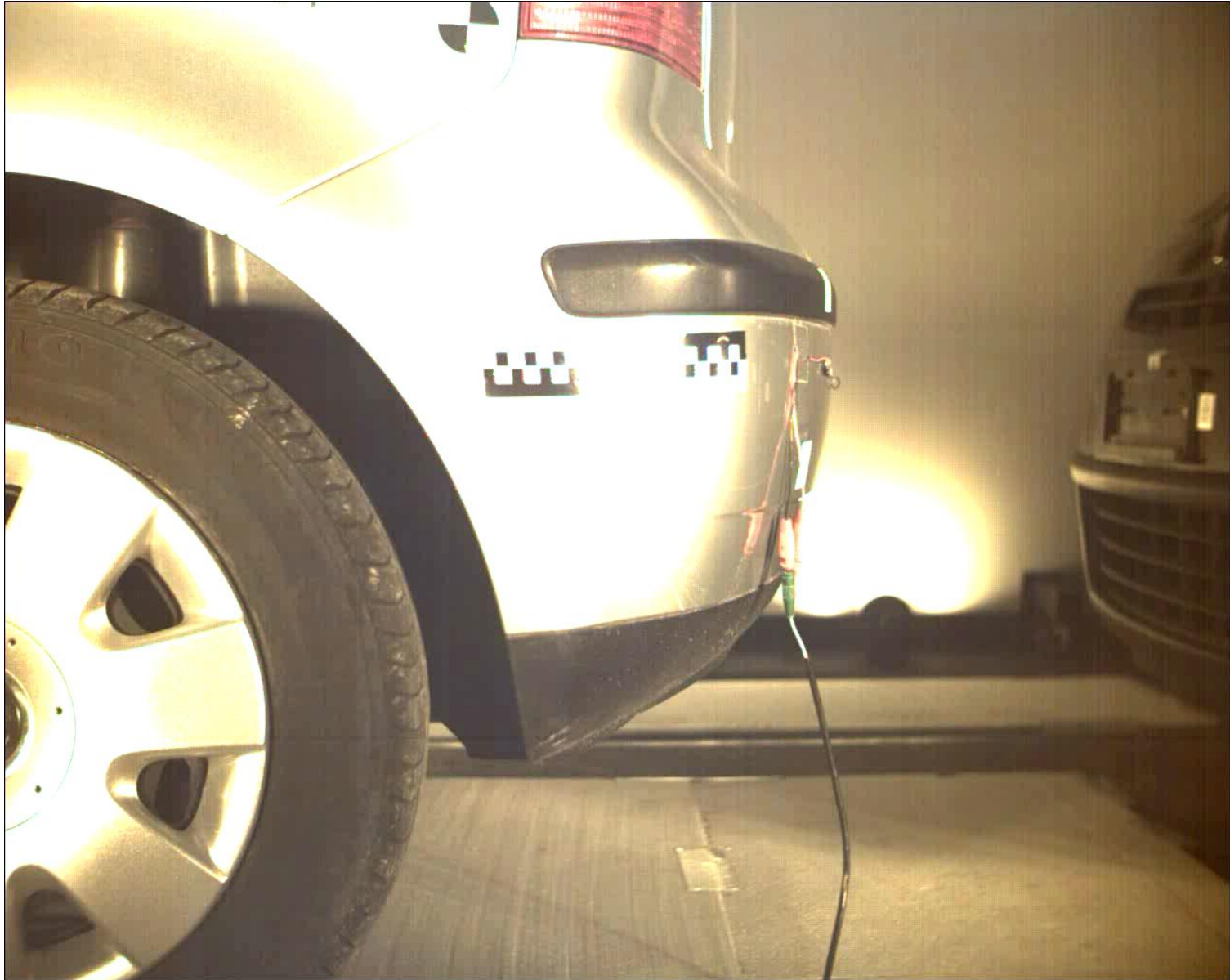
Citroen C3 tampona a 15 km/h una VW Polo ferma.



LA CINEMATICA DEL TAMPONAMENTO



LA CINEMATICA DEL TAMPONAMENTO



I DANNI AI VEICOLI

Citroen C3 (veicolo che tampona a 15 km/h):
Incisioni sul paraurti, deformazione della traversa sottostante,
rottura del radiatore.



I DANNI AI VEICOLI

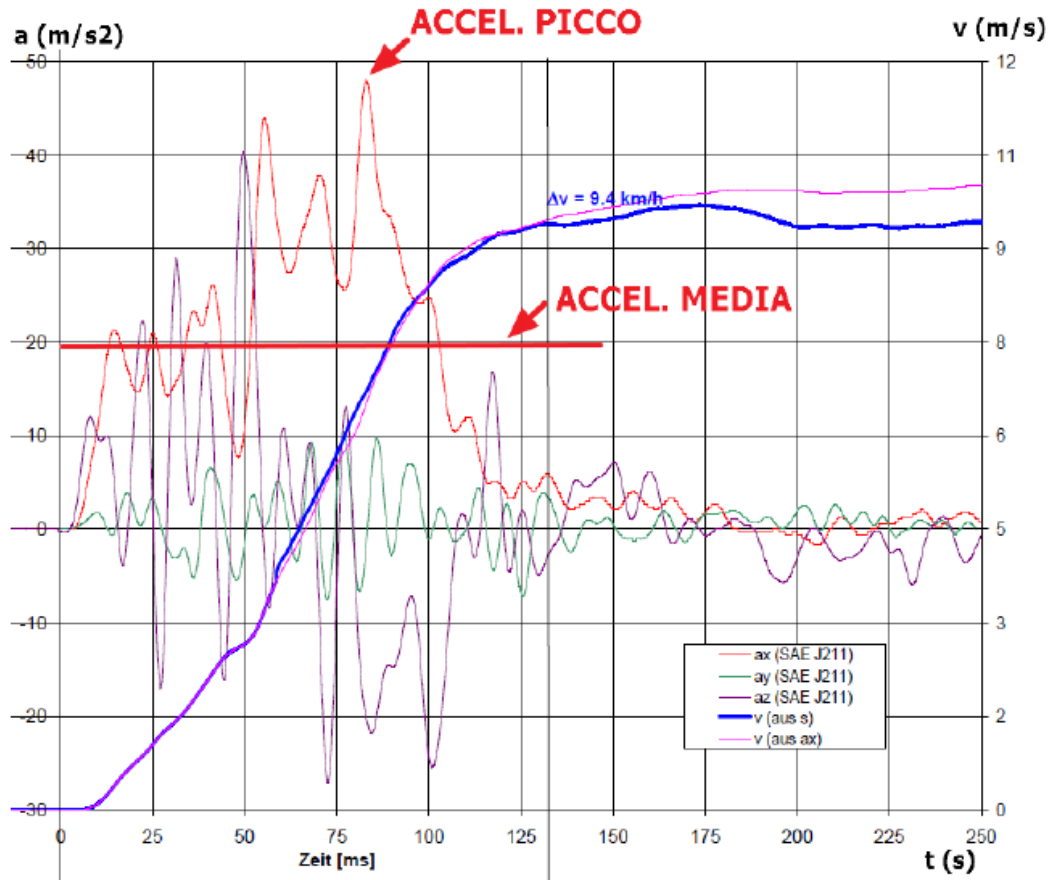
VW Polo (veicolo tamponato a 15 km/h):

Assenza di deformazioni visibili

Accelerazione massima del veicolo a seguito dell'impatto di **5.3 g**
(NB)



I DANNI AI VEICOLI



PRE-URTO VEICOLI:
velocità Citroen C3: 15 km/h
velocità VW Polo: 0 km/h

POST-URTO VEICOLO
TAMPONATO VW POLO:
Variazione velocità: 9.4 km/h
Durata dell'urto: 134 ms
Acceleraz. media: 2 g
Acceleraz. picco: 5.3 g

L'accelerazione massima del veicolo tamponato è 1.5-2.7 volte quella media (*Braun et al. 2001*)

I DANNI AI VEICOLI

- Negli urti a bassa velocità le deformazioni sono minime, in gran parte restituite in forma elastica, l'energia residua in eccesso è trasferita alle strutture sottostanti e agli occupanti.
- **L'entità dei danni subiti non può essere ritenuta un indicatore affidabile della velocità relativa con cui i veicoli sono arrivati all'urto**, né tanto meno delle sollecitazioni a cui sono sottoposti i suoi occupanti. Verifica eventuali deformazioni alle strutture più interne e più rigide del veicolo.



I DANNI AI VEICOLI

- In assenza di danni visibili sul veicolo tamponato, ovvero di lievi deformazioni delle strutture dotate di maggiore rigidità, si possono comunque riscontrare sollecitazioni di una certa intensità;
- A parità di forza applicata, un veicolo che acquista una maggiore accelerazione generalmente sostiene una minore quantità di danni rispetto ad un altro sottoposto ad un'accelerazione inferiore.
Se l'energia del veicolo che tampona è impiegata nello sforzo di accelerare in avanti il veicolo tamponato, quest'ultimo infatti assorbirà una minore quantità di energia e, di conseguenza, presenterà meno danni alla sua struttura.

I DANNI AI VEICOLI



CONFIGURAZIONI OVERRIDE/UNDERRIDE

I danni ai veicoli sono più ingenti rispetto alle configurazioni di impatto con paraurti alla medesima altezza (denominati *engagement*) → accelerazioni risultanti inferiori.



10km/h
Underride



10km/h
Engagement



16km/h
Underride



16km/h
Engagement

Le parti più “morbide” e deformabili del veicolo che tampona vanno infatti a contatto con le parti strutturali, più rigide, del veicolo tamponato.

REVISIONE DELLA LETTERATURA

- Le accelerazioni del veicolo tamponato aumentano, con andamento relativamente lineare, al crescere della velocità di impatto (*Szabo '92, Howard '93,*);
- Vi è una debole correlazione tra la variazione di velocità del veicolo tamponato e la distanza percorsa negli istanti successivi all'urto, soprattutto nei casi in cui conducente applichi una lieve azione frenante durante il tempo di contatto (*Braun '01*).

Come si trasferisce la sollecitazione impressa sul veicolo tamponato al complesso cranio-cervicale dei suoi occupanti?

Richiami anatomici/patologici del rachide cervicale:

- E' costituito da sette vertebre distinguibili, sulla base di alcune peculiarità anatomiche, in una regione superiore (C1-C2) ed in una inferiore (C3-C7);
- E' attraversato da vasi sanguigni e nervi, è serrato da muscoli e legamenti che presiedono ai movimenti;
- Garantisce sostegno e mobilità alla scatola cranica.



Il meccanismo della Whiplash Injury:

Alla base del trauma cervicale da tamponamento sta il fenomeno detto Whiplash, che contraddistingue il movimento inerziale del capo delineante un'escursione, verso l'indietro (estensione) e poi verso l'avanti (flessione).



Possibili lacerazioni di legamenti e tessuti capsulari, modifiche della fisiologica lordosi, e danneggiamento delle strutture nervose del segmento cervicale.

BIOMECCANICA DELLE LESIONI

REASONS OF WHIPLASH



BIOMECCANICA DELLE LESIONI



RACHIDE CERVICALE IN CONDIZIONI NORMALI



RACHIDE CERVICALE RETTILINEIZZATO

PROBLEMA:

La portata dei disturbi rimane al di sotto della soglia di sensibilità delle comuni metodologie diagnostiche (RX, TAC, RMN) → Contenziosi civili / DDL Concorrenza

A parità di sollecitazione, il rischio lesivo è influenzato da:

- Postura degli occupanti al momento dell'urto;
- Stato di tensione/attivazione muscolare;
- Caratteristiche fisiologiche e sesso;
- Utilizzo dispositivi di ritenuta;
- Tipologia del sedile e altezza poggiatesta.

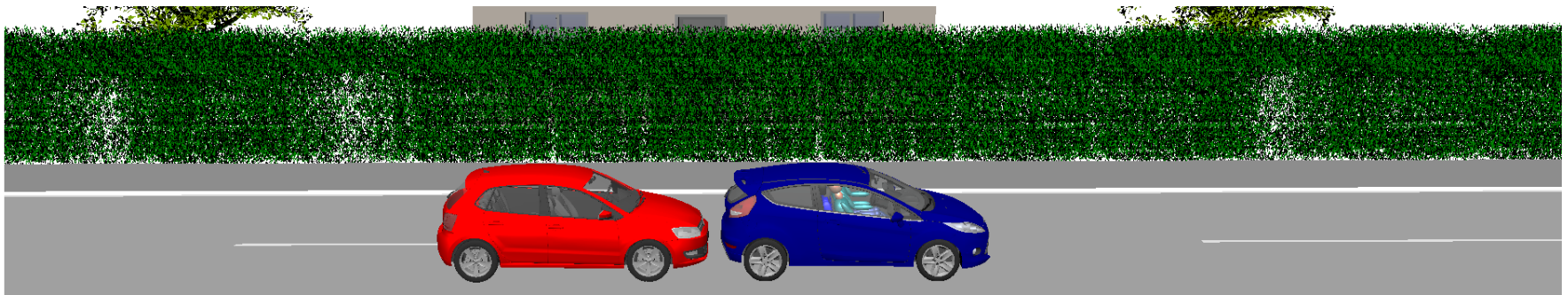
Fattore di amplificazione (k) sul capo delle sollecitazioni impresse sul veicolo (mediamente pari a 2**):**

$$a_{peak,testa} = k * a_{peak,macchina}$$

BIOMECCANICA DELLE LESIONI

L'approccio classico per la ricostruzione cinematica e biomeccanica di un tamponamento:

1. Calcolo (o stima) della di impatto tramite confronto dei danni dei veicoli coinvolti con quelli ottenuti da prove di crash;
2. Calcolo dell'accelerazione media subita dal veicolo tamponato;
3. Stima dell'accelerazione di picco subita dal veicolo tamponato;
4. **Stima dell'accelerazione di picco applicata al capo degli occupanti.**



SOGLIA LESIVA

- Si è più volte cercato di **quantificare una soglia di gravità dell'impatto** al di sotto della quale sia possibile dimostrare con criterio scientifico e con carattere di certezza la pretestuosità della richiesta risarcitoria. L'attualità della ricerca della soglia per il trauma cervicale da tamponamento nasce dalla **frequente assenza di una inoppugnabile documentazione clinica basata su lesioni obiettivabili.**
- Una soglia lesiva non si identifica con un confine preciso ed un valore numerico acriticamente adatto a qualsiasi situazione, ma piuttosto con un fondato termine di riferimento ed una finestra di confidenza.
- **E' un valore sperimentale ricavato dalla letteratura scientifica**

SOGLIA LESIVA

Prove di tamponamento ad alta velocità negli anni '60:



SOGLIA LESIVA

Per la determinazione della soglia lesiva in collisioni stradali a bassa velocità sono state effettuate prove reali e in laboratorio utilizzando volontari, cadaveri, manichini, ovvero simulazioni computerizzate.



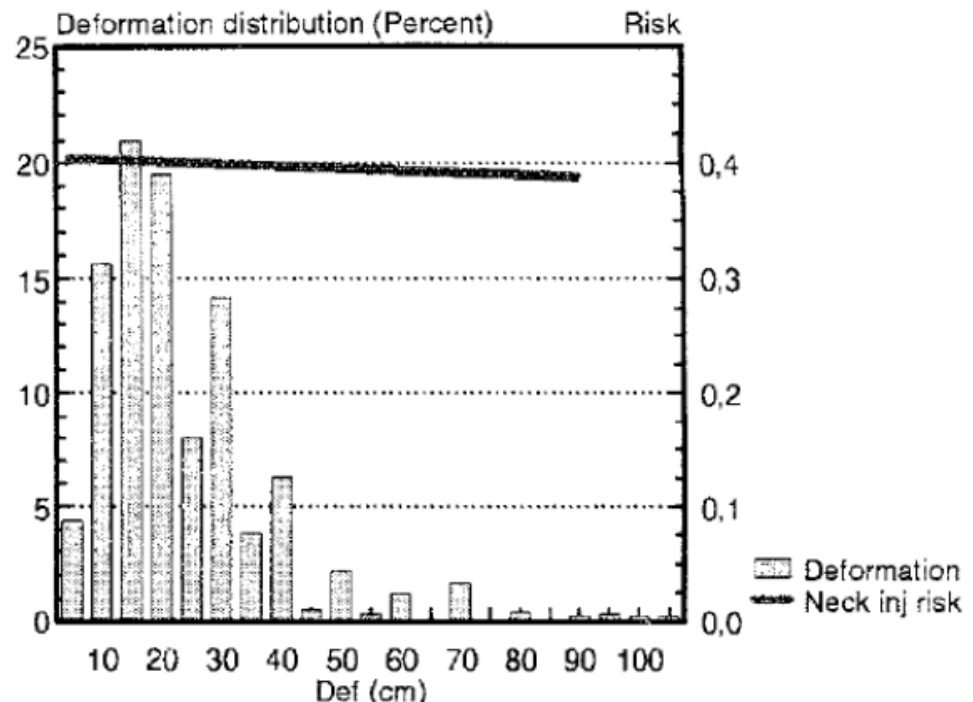
Nissan Micra
urto posteriore
15 km/h



SOGLIA LESIVA

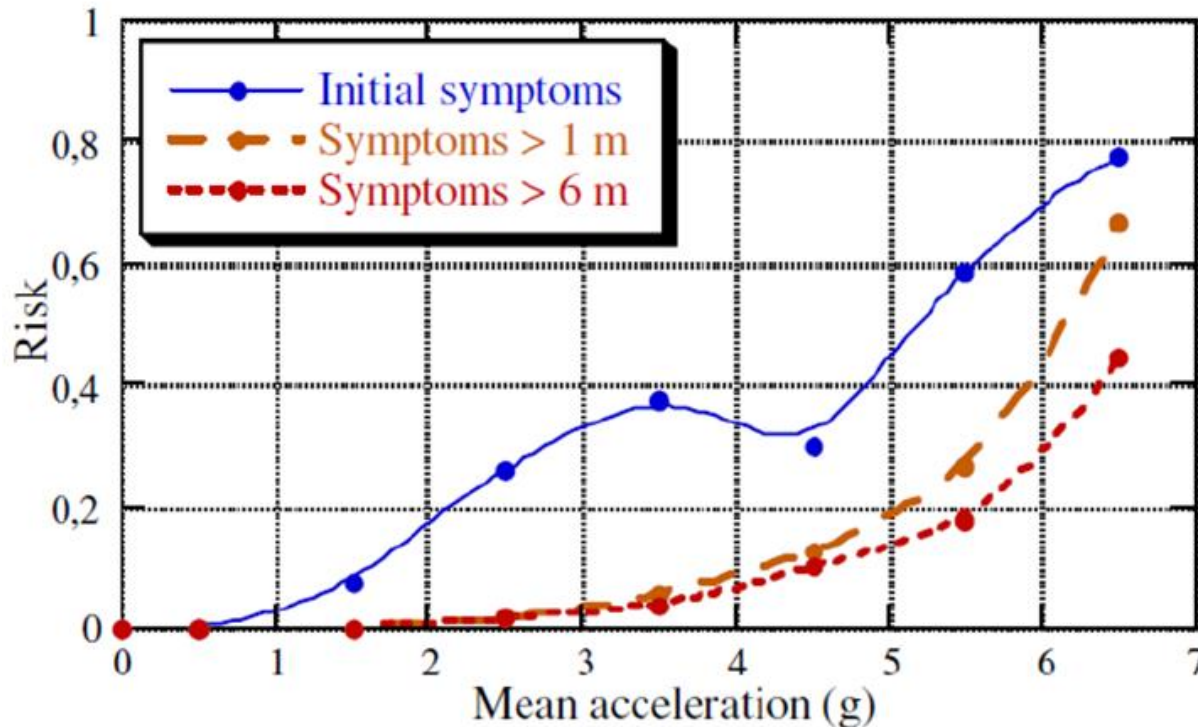
- Alcune pubblicazioni indicano la presenza di lievi lesioni/affaticamenti muscolari in estensione **per variazioni di velocità del veicolo tamponato di circa 8 km/h, ovvero per sollecitazioni a carico del complesso cranio-cervicale di 4 g** (*Schmidt '89, Mc Connell '93, '95*)

- Indagine statistica del 2000: il rischio lesivo del rachide cervicale è **indipendente** dalla deformazione del veicolo (*Lundell*)



SOGLIA LESIVA

- Tra il 2002 e il 2010 alcuni ricercatori hanno ricavato i parametri cinematici da impatti reali, correlando il rischio di lesione alla variazione di velocità ed accelerazione media del veicolo tamponato (*Krafft*)

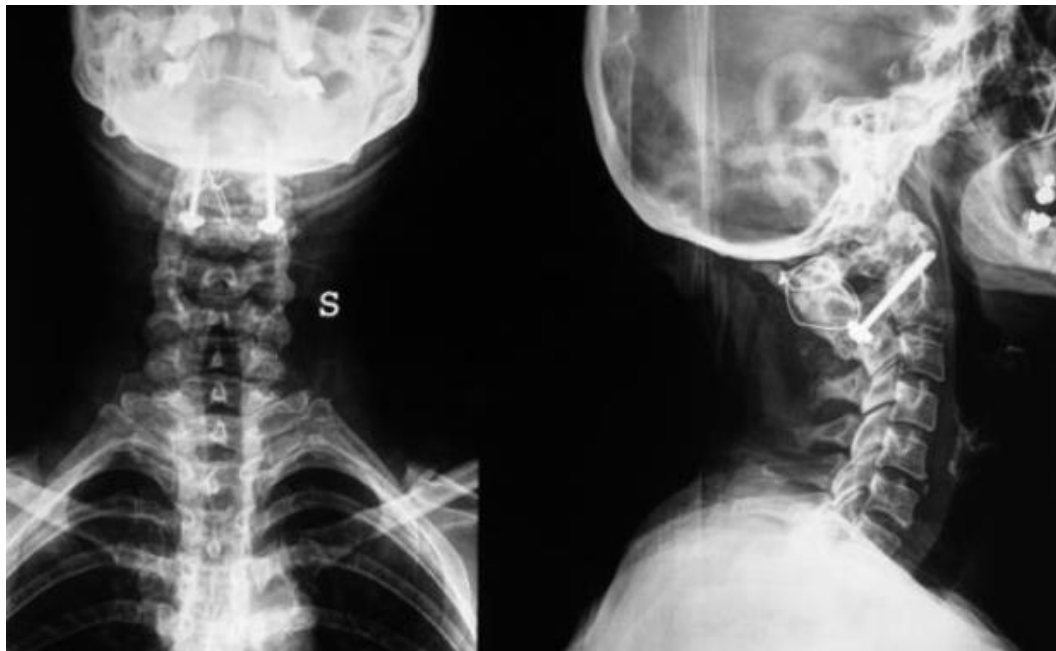


SOGLIA LESIVA

NON ESISTE UN VALORE UNIVERSALE DI SOGLIA LESIVA

Es. : Rachide cervicale con preesistenza di una frattura del dente dell'epistrofeo, trattata chirurgicamente con intervento di sinostosi della prima e seconda vertebra cervicale.

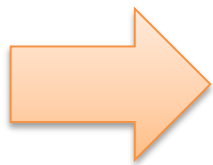
Diagnosi/Prognosi P.S. : Distorsione al collo / 10 gg



*CASISTICA
DR. FRANCO
ZUPPICHINI*

Conclusioni biomeccaniche:

- L'impatto manifestò i suoi effetti su un rachide cervicale sensibilmente più rigido della norma, amplificandone in maniera notevole gli effetti lesivi extra-articolari;
- Ad una maggiore rigidità di un solo tratto corrisponde, a parità di energia cinetica, una maggiore sollecitazione dei tratti adiacenti, che dovranno comunque assorbire l'accelerazione determinata dall'impatto;



**LE RISULTANZE DELL'INDAGINE BIOMECCANICA
DEVONO SEMPRE ESSERE CONFRONTATE CON GLI
ESITI DELLA PERIZIA MEDICO-LEGALE**

RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

Gli errori più frequenti nella ricostruzione biomeccanica di tamponamenti a bassa velocità:

- Errati paragoni con casi di vita quotidiana;

SOLLECITAZIONI INCONTRATE NELLA VITA QUOTIDIANA		
AZIONE	ACCELER. MEDIA	ACCELER. DI PICCO
Voltarsi su un lato	0,1 [g]	0,6 [g]
Starnutire	0,7 [g]	1,5 [g]
Alzarsi	0,4 [g]	1,5 [g]
Scuotere la testa	0,9 [g]	1,9 [g]
Sedersi	0,5 [g]	1,6 [g]
Tossire	0,5 [g]	3 [g]
Saltare uno scalino	1,3 [g]	4,5 [g]
Lasciarsi cadere su una sedia	1,8 [g]	5,6 [g]

RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

- Utilizzo improprio di soglie lesive;

Si rammenta che il corpo umano ha limiti di sopportabilità di gran lunga superiori ai valori emersi:

	limiti	valori
accelerazione	80 g	calcolati 1,88 g
forza longitudinale	2.000 N	" 64,40 N
momento di flessoest.	180 Nm	" 4,51 Nm
attorno alla cerniera del R.C. (il limite che può provocare il colpo di frusta è di 98 Nm)		

Ci si trova quindi di fronte a sollecitazioni assai modeste; che rientrano ampiamente nella fascia minima in cui le accelerazioni e le forze applicate al capo sono irrisorie e tali da non giustificare il cosiddetto " colpo di frusta. "

*CASISTICA
DR. FRANCO
ZUPPICHINI*

RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

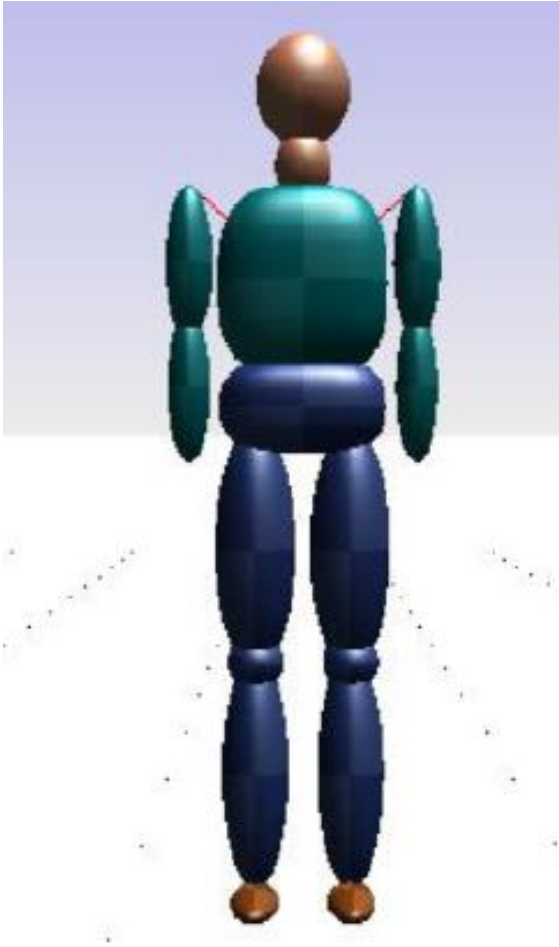
- Errata descrizione del movimento dell'occupante;
- Errata correlazione tra danni ai veicoli e sollecitazioni sugli occupanti.



RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

Utilizzo del software di calcolo Pc-Crash:

PC-CRASH.it

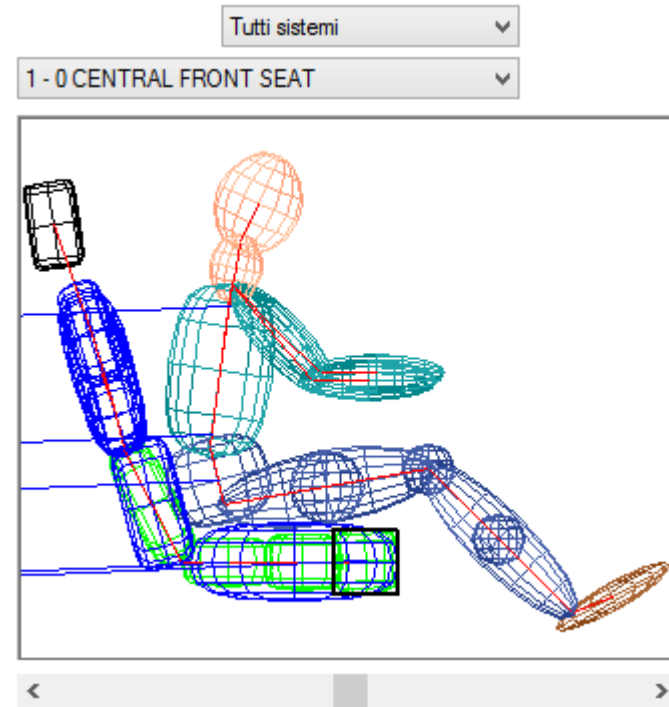
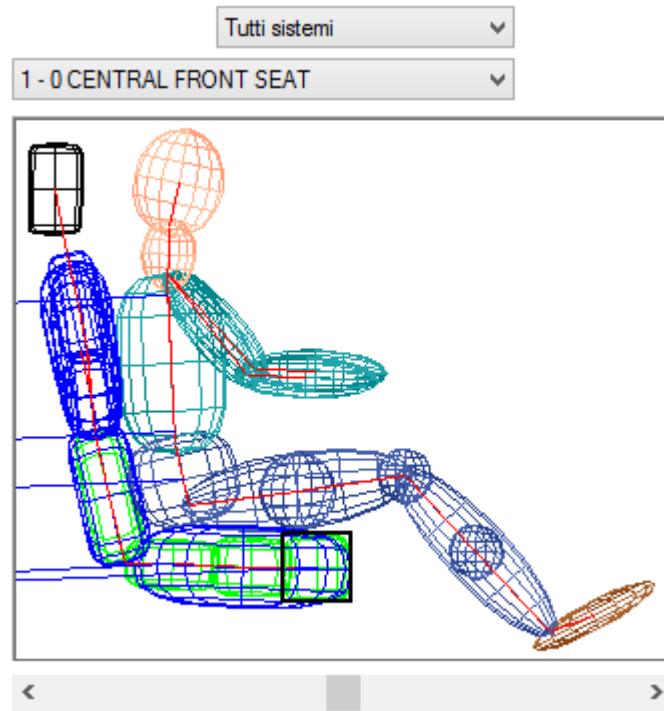


Il corpo umano viene modellizzato in parti rigide interconnesse tra loro attraverso giunzioni che simulano il comportamento delle articolazioni.



RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

Personalizzazione del modello sulla base di età, caratteristiche fisiologiche, postura dell'occupante ed altezza/inclinazione del sedile.



RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

Simulazione Post-urto

Veicolo: 1 Citroen-C 2 VW-CrossP

Prima dell'urto:

v [km/h]: 15.3 0

Direzione [°]: -0.00 0.00

Omega [rad/s]: -0.00 0.00

ϕ POI [°]: 179.8 0.6

Dopo l'urto:

v [km/h]: 4.61 10.69

Direzione [°]: -0.35 -0.15

Delta-v [km/h]: 10.69 10.69

Omega [rad/s]: -0.03 -0.01

Dist.P. impatto[cm]: 16 2

Def. Energy [kJ]: 3.9 0.6

EES [km/h]: 9.26 3.51

☐ delta v: 4 [km/h] (Ist: 6.12)

☒ k: 0.4 Attrito: 0.6

Coordinate [m]:

☐ Punto d'impatto

☐ Superficie contatto

x: 2.07 phi

y: -0.02 psi

z: 0.45 0

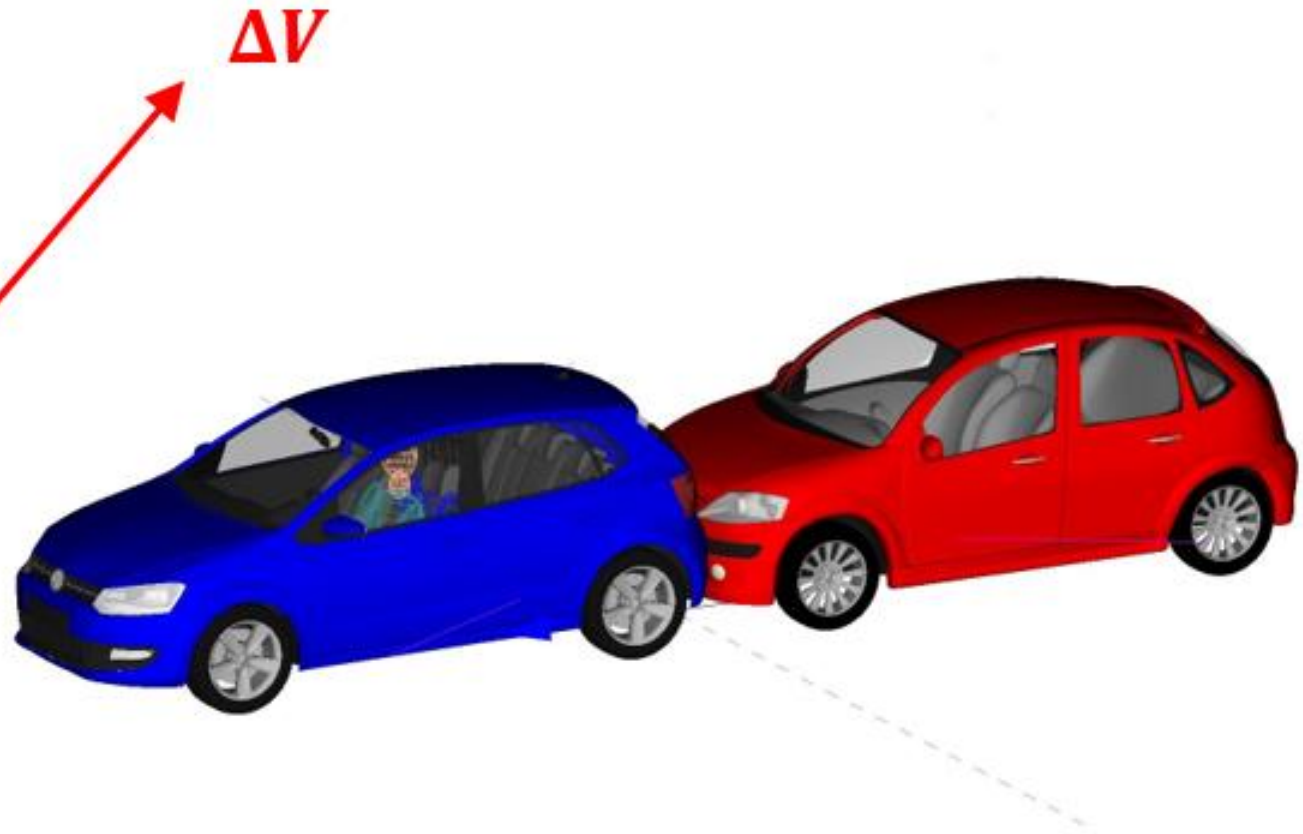
Urto

Opzioni...

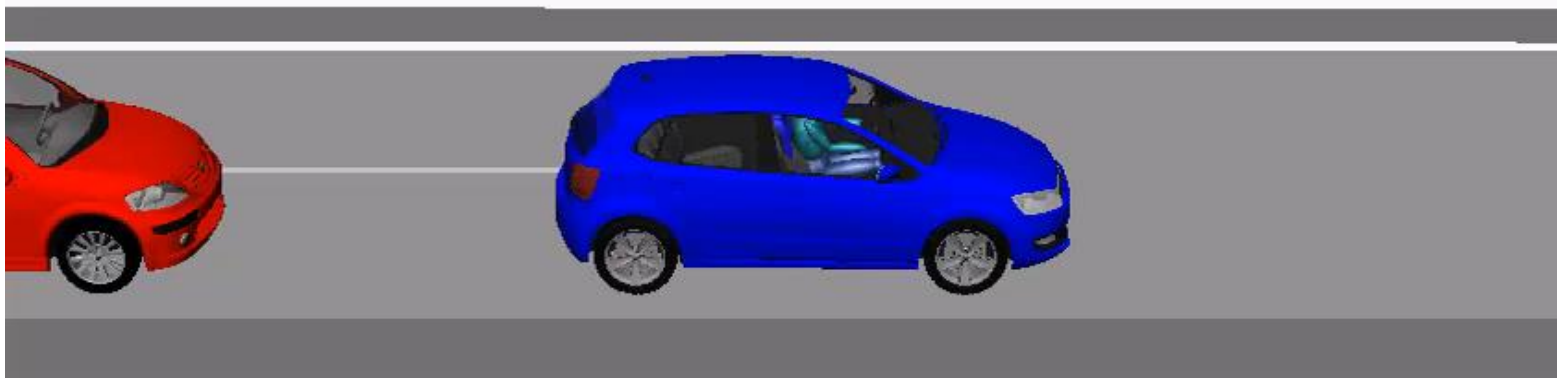
Urto

Nr.: 1

☐ Autom.



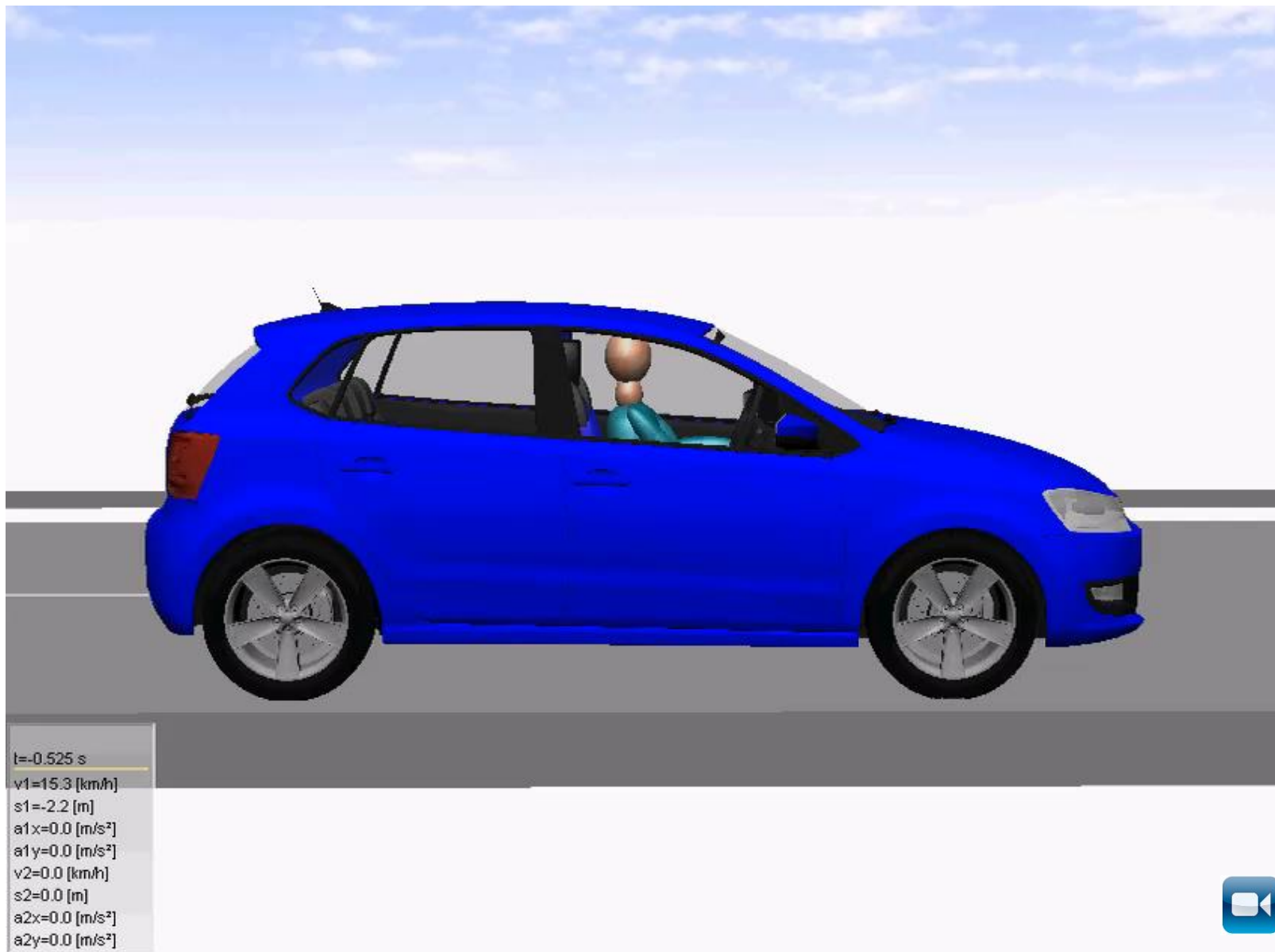
RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'



t=-0.525 s
v1=15.3 [km/h]
s1=-2.2 [m]
a1x=0.0 [m/s²]
a1y=0.0 [m/s²]
v2=0.0 [km/h]
s2=0.0 [m]
a2x=0.0 [m/s²]
a2y=0.0 [m/s²]



RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

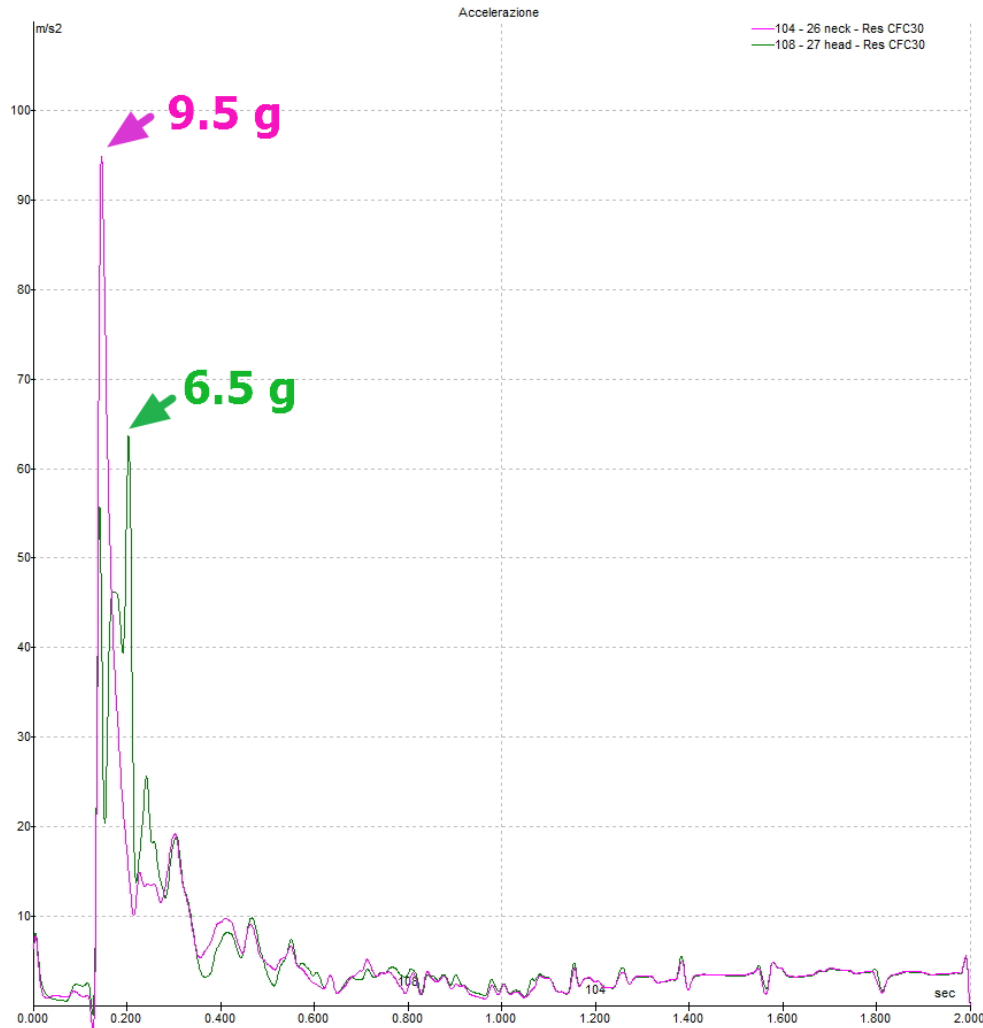


RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'



RICOSTRUZIONE 'ERGONOMICA'

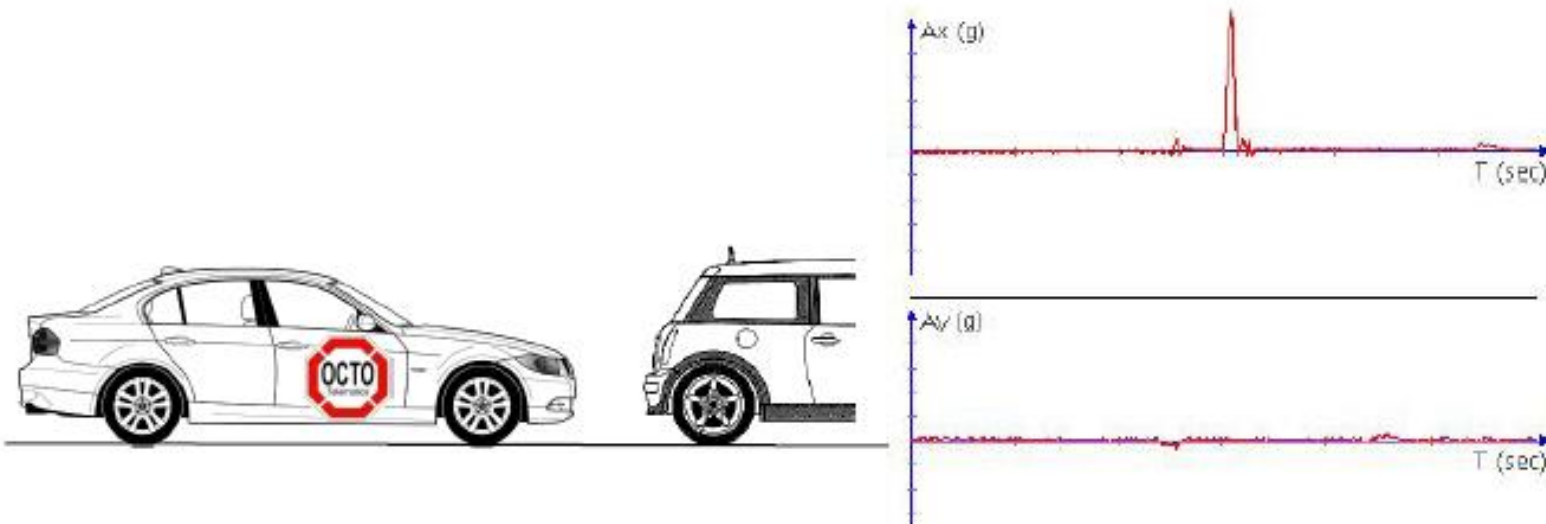
Grafico delle accelerazioni al complesso cranio-cervicale:



LA SCATOLA NERA

In caso di un evento riconosciuto come un incidente, la scatola nera generalmente registra :

- la data e l'ora dell'evento;
- le posizioni del veicolo prima durante e dopo l'urto;
- le accelerazioni del veicolo sui tre assi occorse durante il sinistro.



LA 'CORRETTA' ISTRUZIONE DELLA PRATICA

Documentazione fotografica:

- Effettuare una ricca documentazione fotografica dei danni del veicolo del cliente;
- 'Istruire' il carrozziere ad effettuare fotografie al veicolo con paraurti smontato, per rilevare eventuali deformazioni a traversa e rivestimento posteriore. In alternativa affidarsi fin da subito ad un tecnico di fiducia;
- Scaduti i termini previsti, richiedere alla Compagnia la documentazione peritale del veicolo di controparte ai sensi dell'Art. 146 C.d.A.

INIZIARE IL CONTENZIOSO CIVILE CON TUTTA LA DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA GIA' IN POSSESSO!



A.N.E.I.S.

MEDIA CAMPUS
Formazione Giuridica-Economica

STUDIO TECNICO
SARTORI

aris
analisi ricostruzione incidenti stradali
GROUP

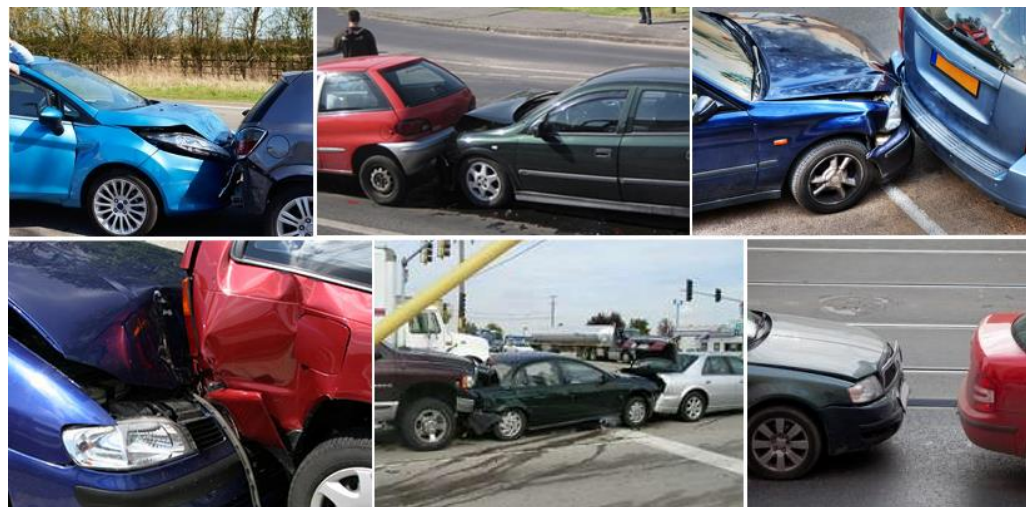
Grazie per l'attenzione

Ing. Alberto Sartori

alberto.sartori@arisgroup.eu

www.albertosartori.com

www.arisgroup.eu



Aspetti biomeccanici ed indagini tecniche sul 'colpo di frusta'

Seminario Media Campus 'Dalle più recenti normative alle ultime tecnologie di indagine'

Zelarino, 15 Aprile 2016