

1 - Premessa

Due autovetture (nel prosieguo veicolo A e veicolo B) pervengono ad uno scontro frontale. Ci si prefigge di determinare le velocità d'impatto e le responsabilità sull'accaduto.

2 - Il fatto

Sulla scorta degli accertamenti effettuati risulta che in data 15 gennaio 2008, alle ore 18,00 circa, sulla Strada Provinciale \$\$... all'altezza del km 167+100 del comune di XXX, si verificava un incidente stradale che vedeva coinvolta l'autovettura SMART targata UU999UU (nel prosieguo denominata veicolo A) condotta dalla Sig.ra EEE e l'autovettura Fiat Bravo targata OO999OO (nel prosieguo denominata veicolo B) condotta dal Sig. WWW.

In particolare, il veicolo A percorreva la SP \$\$\$ proveniente da XXX in direzione YYY, mentre il veicolo B proveniva dalla direzione opposta.

In prossimità della curva in corrispondenza del km 167+100, l'autoveicolo A collideva frontalmente con l'anteriore del veicolo B.

In seguito all'urto il primo veniva sospinto all'indietro e, dopo aver effettuato una rotazione di circa 180° rispetto l'asse verticale, assumeva la posizione di quiete con l'anteriore rivolto in senso opposto alla originaria direzione di percorrenza.

Il veicolo B, a sua volta, percorreva, nella originaria direzione, un modesto spazio per arrestarsi poi a ridosso del margine destro della carreggiata.

A seguito del violento urto entrambi i conducenti, ed il passeggero del veicolo B, subivano lesioni e venivano trasportati al vicino Pronto Soccorso.

Per i rilievi del caso interveniva una pattuglia dei Carabinieri della Stazione di XXX e veniva redatto un verbale dell'accaduto corredato di uno schizzo andante di campagna della zona del sinistro.

2 - Il luogo del sinistro

Allo scopo di meglio inquadrare il caso si ritiene di indubbia utilità premettere una breve descrizione del luogo che ne fu teatro.

Nel prosieguo di questa trattazione si assumerà come orientamento il senso di percorrenza del veicolo A.

Quindi, quando saranno utilizzate le locuzioni: avanti, indietro, destra e sinistra, si farà riferimento a tale orientamento, salvo diversa indicazione.

L'intorno dell'area del sinistro è costituito da un tratto di strada a doppio senso di marcia con andamento curvilineo destrorso ad unica carreggiata ed una corsia per ogni senso di percorrenza.

La carreggiata, nel tratto rettilineo prossimo alla curva, ha larghezza pari a 5,65 mt, mentre al centro curva la larghezza assume la dimensione di 7,10 mt.

La strada è fiancheggiata a destra da una barriera in acciaio a singolo nastro posta ad una distanza di 0,85 mt dal bordo dalla limitazione della carreggiata, a sinistra si innalza un muro in pietra dell'altezza di circa 0,50 mt alla distanza di 0,75 mt dal bordo della carreggiata.

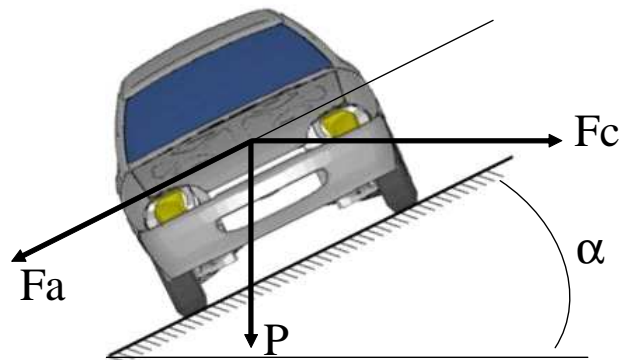
La sede stradale è dotata di segnaletica orizzontale di suddivisione delle corsie di marcia ed in particolare, nel tratto in cui avveniva l'impatto tra i due veicoli, esiste linea continua a demarcazione dei due sensi di marcia.

Le corsie di marcia, tuttavia, risultano avere larghezza differente, nella fattispecie, quella riservata ai veicoli provenienti da XXX ha una ampiezza di 3,0 mt (direzione del veicolo A), a differenza di quella riservata all'opposto senso di marcia che misura 2,65 mt (direzione del veicolo B).

In prossimità del km 167+100 la curva ha un raggio di curvatura pari a circa 45 mt ed il piano viabile ha una pendenza interna di circa 7°.

La pendenza ha lo scopo di consentire di affrontare la curva a velocità più elevata rispetto a quella che si potrebbe tenere sul piano orizzontale.

Alla luce dei rilievi effettuati e di cui si è detto, è possibile ricavare matematicamente la velocità massima di percorrenza con cui un veicolo con ugual carreggiata anteriore e posteriore può affrontare la curva avente le caratteristiche appena descritte (v. immagine seguente).



Indichiamo con :

F_a = forza di attrito trasversale

F_c = forza centrifuga

P = forza peso

Si ha che

$$F_a = f \cdot N$$

dove:

f = coefficiente di attrito tra pneumatici e asfalto

N = forza premente sul terreno = $P \cdot \cos(\alpha) + F_c \cdot \sin(\alpha)$

La forza peso è il prodotto della massa del veicolo per l'accelerazione di gravità, mentre la forza centrifuga è legata alla velocità e al raggio di curvatura, ossia:

$$P = m \cdot g$$

$$F_c = m \cdot \frac{V^2}{R}$$

dove:

m = massa del veicolo

g = accelerazione di gravità

R = raggio di curvatura

V = velocità

Per la percorrenza in sicurezza della curva, ovvero senza perdere aderenza, occorre che sia soddisfatta la seguente equazione di equilibrio delle forze in direzione parallela al suolo:

$$F_a + P \cdot \sin(\alpha) = F_c \cdot \cos(\alpha)$$

quindi, sostituendo le forze con le loro espressioni matematiche, si ha che:

$$f \cdot (P \cdot \cos(\alpha) + F_c \cdot \sin(\alpha)) + P \cdot \sin(\alpha) = F_c \cdot \cos(\alpha)$$

$$P \cdot (f \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) = F_c \cdot (\cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha))$$

$$mg \cdot (f \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) = m \frac{V^2}{R} \cdot (\cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha))$$

da cui:

$$V = \sqrt{R \cdot g \frac{(f \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha))}{(\cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha))}}$$

Nel caso che ci occupa si ha:

R = raggio di curvatura medio = 45 mt

g = accelerazione di gravità = 9,81 m/s²

f = coefficiente di attrito pneumatici asfalto umido = 0,5

α = angolo di inclinazione della curva = 7°

quindi

$$V = \sqrt{45 \cdot 9,81 \frac{(0,5 \cdot \cos(7^\circ) + \sin(7^\circ))}{(\cos(7^\circ) - 0,5 \cdot \sin(7^\circ))}} = 17,11 \text{ m/s} \rightarrow 61,6 \text{ km/h}$$

Ne deriva che un'autovettura a carreggiata costante può percorrere la curva specifica, nelle particolari condizioni ambientali vigenti al momento del sinistro, alla velocità massima di 61,6 km/h.

Tale limite risulta inferiore a quello imposto dall'Ente proprietario della strada che, in condizioni ambientali ottimali, lo ha fissato pari a 90 km/h.

3 – Dinamica del sinistro

I Carabinieri, a seguito del sopralluogo effettuato pochi minuti dopo l'accadimento del sinistro, rilevavano segni di scalfitture e frammenti di carrozzeria sul manto stradale, e rilevavano le posizioni di quiete assunte dai mezzi coinvolti dopo l'urto.

I militari, tuttavia, non identificavano con assoluta certezza il punto d'urto tra i due mezzi.

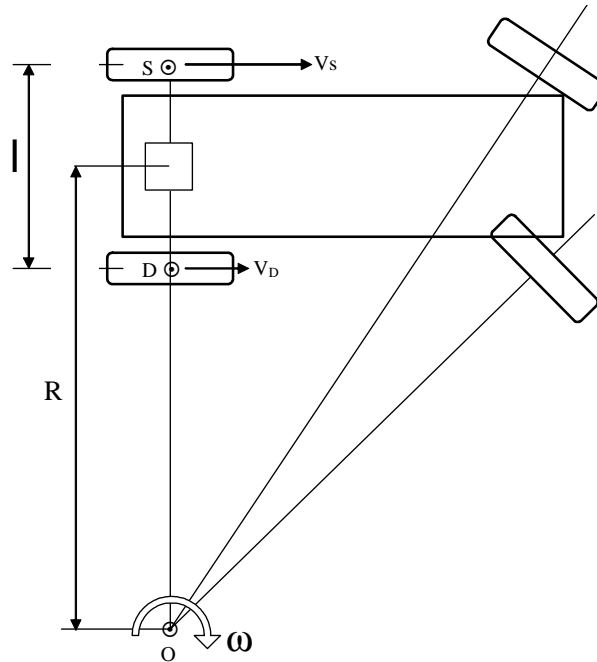
La Smart è una city-car che può ospitare solo due persone: conducente e passeggero.

Le caratteristiche salienti di questa autovettura, che l'hanno resa molto diffusa sul mercato mondiale, sono essenzialmente attribuibili alle sue ridotte dimensioni ed alla estrema agilità nel traffico cittadino.

I progettisti, allo scopo di rendere possibili queste peculiarità, hanno incentrato la loro attenzione sull'ottimizzazione dei seguenti parametri: passo e carreggiata ridotti e minimo raggio di sterzo.

Proprio quest'ultima caratteristica, coniugata con la trazione posteriore, rende la Smart molto agile in quanto le consente di affrontare le curve con una velocità superiore rispetto ad altre piccole vetture ma con trazione anteriore.

Al proposito preme ricordare che, le formule della Meccanica Applicata alle Macchine concernenti le velocità di rotazione degli organi epicicloidali del differenziale di una automobile a trazione posteriore, implicano che la velocità di traslazione delle ruote durante una traiettoria curvilinea dipende dalla distanza dal centro di istantanea rotazione e dalla carreggiata del veicolo (v. immagine seguente).



Se ne deduce che la velocità angolare di rotazione del corpo della vettura attorno al centro di istantanea rotazione è data da:

$$\omega = \frac{V_s}{R + \frac{l}{2}} = \frac{V_D}{R - \frac{l}{2}}$$

dove:

V_D = Velocità di traslazione della ruota posteriore destra

V_S = Velocità di traslazione della ruota posteriore sinistra

l = carreggiata dell'autovettura

R = raggio di curvatura

da cui il rapporto tra le velocità dei centri delle ruote:

$$\frac{V_S}{V_D} = \frac{R + \frac{l}{2}}{R - \frac{l}{2}}$$

La caratteristica aggiuntiva che contraddistingue la Smart è quella di disporre di una carreggiata posteriore allargata rispetto a quella anteriore, il che si traduce in un maggiore rapporto tra velocità della ruota esterna rispetto a quella interna.

Ciò permette di affrontare a velocità maggiore le traiettorie curvilinee, con un aumento della velocità stimabile intorno al 5% rispetto ad autovetture di normale concezione (medesimo principio utilizzato per le auto da competizione).

Avendo in precedenza determinato che la velocità massima di percorrenza della curva specifica è pari a 61,6 km/h per un'autovettura a carreggiata costante, si ha che la Smart può affrontare la stessa curva, al limite dell'aderenza, a circa 65 km/h.

Tuttavia analizzando la planimetria, si esclude che la conducente possa avere affrontato la curva oltre il limite massimo di aderenza in quanto, perdendo aderenza, la traiettoria conseguente

sarebbe stata tangente alla curva ed avrebbe portato l'autovettura verso il muro di cinta eretto alla sinistra della sede stradale.

In siffatta ipotesi l'autovettura avrebbe dovuto raggiungere il muro e lo scontro col veicolo antagonista sarebbe avvenuto in quella posizione e con diverse conseguenze, soprattutto con differenti evoluzioni dei mezzi dopo l'urto.

Va quindi affermato che la Smart, posto che non aveva perso aderenza, viaggiava con una velocità certamente inferiore ai 60 km/h.

Stabilito questo principio, è possibile determinare la velocità del veicolo antagonista una volta individuato il punto d'urto.

Come verrà appresso dimostrato anche col filmato di simulazione d'incidente, questo punto si colloca in zona mediana dell'arco.

Infatti, ove l'urto fosse avvenuto nella corsia di pertinenza del veicolo B, necessariamente la velocità originaria dello stesso risulterà di un maggiore ordine di grandezza e ciò in considerazione del fatto

che l'energia necessaria per far percorrere alla Smart una distanza maggiore risulta superiore a quella che verrà di seguito calcolata.

Di contro, ove la velocità del veicolo B fosse stata di un minore ordine di grandezza, necessariamente, il punto d'urto viene a collocarsi nella corsia di pertinenza del veicolo A.

Per determinare la velocità cercata, occorre stabilire il valore dell'energia posseduta dal veicolo A.

Partendo dal presupposto che la velocità di crociera, nel tratto specifico, era di 60 km/h (16,7 m/s), ne deriva una energia data da:

$$Ec_{1,A} = \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot V_A^2$$

dove

m_A = massa del Veicolo A comprensiva di conducente = 800 kg

V_A = Velocità iniziale del veicolo A = 60 km/h = 16,7 m/s

quindi

$$Ec_{A,1} = \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot V_A^2 = \frac{1}{2} \cdot 800 \cdot 16,7^2 = 111.556,0 \text{ J}$$

Subito dopo l'impatto, il baricentro del veicolo A veniva proiettato con movimento di deriva posteriore a distanza di circa 7,0 mt, mentre il corpo dell'autovettura compiva una rotazione di 180°.

Lo spazio totale percorso dovrà perciò comprendere la traslazione del baricentro e la rotazione della vettura.

Traslazione Baricentro Veicolo A: $S_{A,traslazione} = 7,00 \text{ mt}$

Rotazione Veicolo A attorno al centro di gravità: $S_{A,rotazione} = \frac{\pi \cdot p \cdot \beta}{180}$

dove :

$p =$ passo dell'automobile = 1,812 mt

$\beta =$ angolo di rotazione = 180°

quindi

$$S_{A,rotazione} = \frac{\pi \cdot p \cdot \beta}{180} = \frac{\pi \cdot 1,812 \cdot 180}{180} = 5,69 \text{ mt}$$

lo spazio totale percorso dal veicolo A durante questa fase sarà:

$$S_{A,TOTALE} = S_{A,traslazione} + S_{A,rotazione} = 7,00 + 5,69 = 12,69 \text{ mt}$$

L'energia cinetica necessaria per far compiere al veicolo A la traslazione e la rotazione appena descritte sarà:

$$Ec_{A,2} = m_A \cdot g \cdot f \cdot S_{A,TOTALE}$$

dove :

$m_A =$ massa veicolo A comprensivo di conducente = 800 kg

g = accelerazione di gravità = $9,81 \text{ m / s}^2$

f = coefficiente di attrito pneumatici-asfalto = $0,5$

$S_{A,TOTALE}$ = spazio totale percorso dal veicolo A = $12,69 \text{ mt}$

$$Ec_{A,2} = m_A \cdot g \cdot f \cdot S_{A,TOTALE} = 800 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot 12,69 = 49.795,6 \text{ J}$$

La rotazione e traslazione in senso opposto alla iniziale percorrenza non può che essere impressa dal veicolo antagonista che pertanto doveva prima azzerare l'iniziale energia posseduta dal veicolo A e poi conferire allo stesso quell'energia necessaria per fargli compiere le evoluzioni appena descritte e quindi l'energia ceduta da B risulterà pari a:

$$Ec_{B,1} = Ec_{A,1} + Ec_{A,2} = 111.556,0 + 49.795,6 = 161.351,6 \text{ J}$$

Va poi aggiunto che, in conseguenza dell'urto, i mezzi hanno riportato avarie alle carrozzerie e parti meccaniche e pertanto occorre maggiore energia in funzione del coefficiente di restituzione che, in via equitativa, potrà essere assunto pari a $\varepsilon = 0,3$.

Quindi, la probabile energia cinetica posseduta e poi trasferita dal veicolo B al veicolo A nell'urto risulterà:

$$Ec_{B,2} = (1 + 0,3) \cdot Ec_{B,1} = 209.757,1 \text{ J}$$

A ciò va aggiunta l'energia residua e necessaria a far compiere al veicolo B uno spostamento, nella iniziale direzione di marcia di 6,00 mt.

L'energia dissipata in questa fase risulta pari a:

$$Ec_{B,3} = m_B \cdot g \cdot f \cdot S_B$$

dove :

m_B = massa veicolo B comprensivo di conducente = 1.100,0 kg

g = accelerazione di gravità = 9,81 m / s²

f = coefficiente di attrito pneumatici-asfalto = 0,5

S_B = spazio totale percorso dal veicolo B = 6,0 mt

$$Ec_{B,3} = m_B \cdot g \cdot f \cdot S_B = 1.100,0 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot 6,0 = 32.373,0 J$$

Ne consegue che, un istante prima dell'urto, il veicolo B era animato da una energia complessiva pari a:

$$Ec_{B,TOTALE} = Ec_{B,2} + Ec_{B,3} = 242.130,1 J$$

Per cui la velocità di entrata in campo risulterà pari a:

$$V_{B,URTO} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{B,TOTALE}}{m_B}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 242.130,1}{1100}} = 21,00 \text{ m/s} \rightarrow 75,6 \text{ km/h}$$

Avuto riguardo al fatto che la velocità massima di percorrenza della curva specifica è pari a 61,6 km/h per un veicolo con carreggiata costante (come la Fiat Bravo), se ne deduce che il conducente viaggiava ad una velocità di ben 15 km/h superiore a quella che il mezzo poteva consentire.

Alla velocità di 75,6 km/h il raggio di curvatura minimo che può garantire aderenza è pari a:

$$R = \frac{V_{B,URTO}^2}{g} \frac{(\cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha))}{(f \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha))} = 67,8 \text{ mt}$$

Ne consegue che il conducente, avendo affrontato la curva ad una velocità superiore a quella massima ammissibile, allo scopo di conservare aderenza, tagliava la traiettoria portandosi all'interno della curva stessa e quindi finendo con l'occupare, illegittimamente, la corsia riservata all'opposto senso di marcia.

La manovra gli consentiva di aumentare il raggio di curvatura che da 45 mt (quello del tracciato stradale) veniva corretto dalla traiettoria scelta in 67,8 mt. per migliorare l'aderenza.

La ricostruzione proposta porta ad affermare che l'invasione della corsia opposta era dell'ordine di almeno 70 cm.

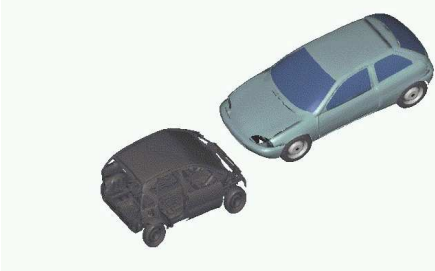
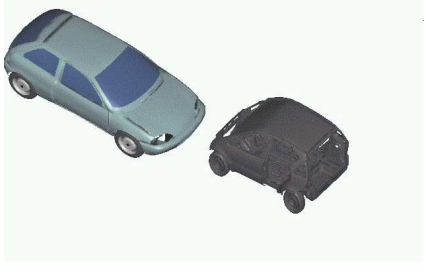
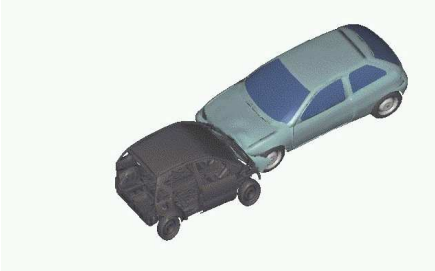
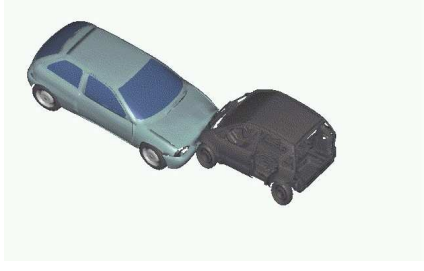

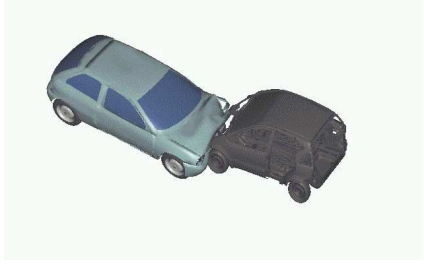

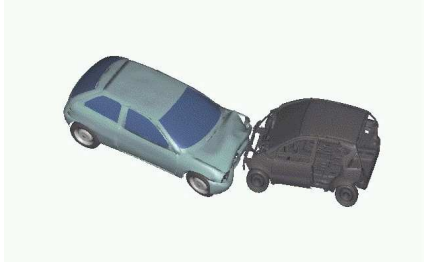
In verifica ai calcoli proposti, sono state effettuate simulazioni numeriche con l'ausilio di calcolatore utilizzando veicoli di massa e dimensioni paragonabili a quelle dei veicoli effettivamente coinvolti nel sinistro.

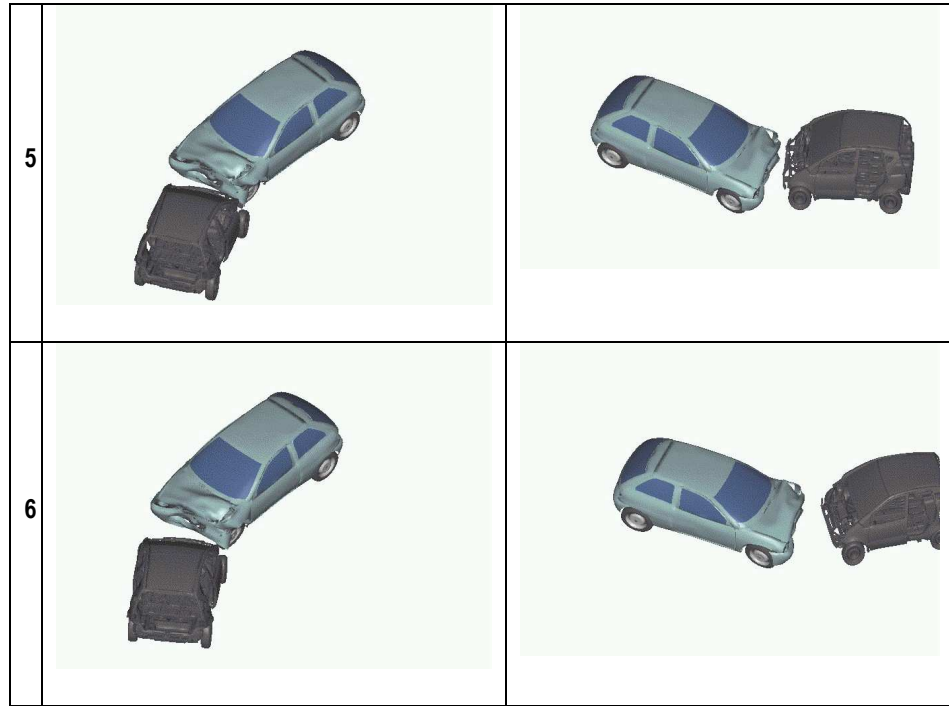
La simulazione (<http://www.studioiorillo.it/cinematica.wmv>) consente anche di meglio apprezzare i comportamenti dei due mezzi nelle evoluzioni prima, durante e dopo l'urto, e permette di attribuire i gradi di responsabilità a carico dei due antagonisti.

Per il veicolo A, sapendo che i pannelli di rivestimento non sono in lamiera, ma in materiale sintetico quindi non collaborante alla rigidità della struttura, si è preferito modellare numericamente la sola cellula in acciaio (Tridion), al fine di ottenere un alleggerimento di calcolo che non pregiudica la bontà dei risultati ottenuti.

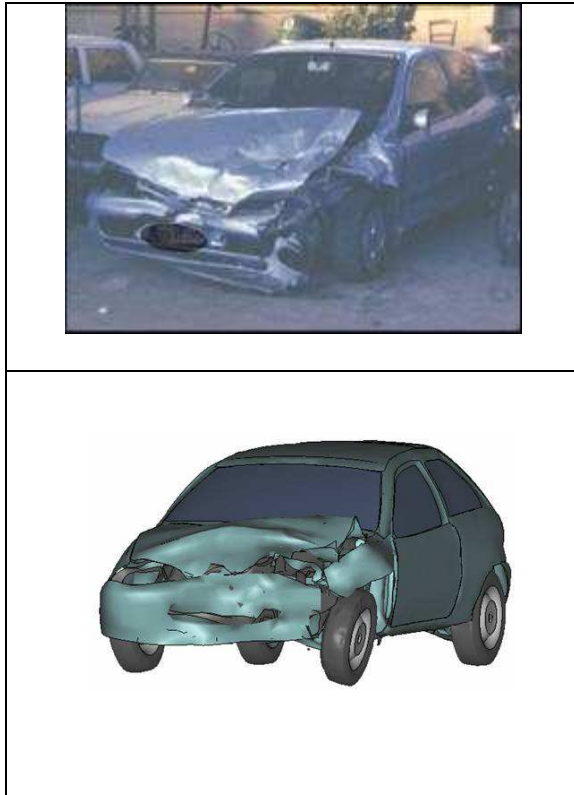
Modello: Mercedes Smart	
<p>Modello Reale</p> 	<p>Modello Numerico</p> 
<p>Altezza: 1549 mm Larghezza: 1515 mm Lunghezza: 2500 mm Peso: 800 kg</p>	<p>Altezza: 1553 mm Larghezza: 1524 mm Lunghezza: 2495 mm Peso: 796,9 kg</p>
Modello: Fiat Bravo	
<p>Modello Reale</p> 	<p>Modello Numerico</p> 
<p>Altezza: 1414 mm Larghezza: 1755 mm Lunghezza: 4025 mm Peso: 1100 kg</p>	<p>Altezza: 1412 mm Larghezza: 1743 mm Lunghezza: 4080 mm Peso: 1084 kg</p>

Qui di seguito si riportano alcuni fotogrammi, estratti dalla simulazione da due differenti angolazioni, con presupposto che lo scontro è leggermente eccentrico rispetto all'asse di simmetria dei veicoli.

	PRIMA ANGOLAZIONE	SECONDA ANGOLAZIONE
1		
2		
3		
4		



Si può infine apprezzare come le deformazioni subite dal



veicolo B siano assimilabili a quelle calcolate nell'analisi numerica (si veda ad esempio l'imbozzamento del cofano anteriore lato conducente).

Conclusioni

Dai calcoli effettuati emerge che l'autovettura condotta dalla sig.ra EEE viaggiava, un istante prima del sinistro, alla velocità di circa 60 Km/h.

Tale velocità era ben al di sotto del limite di velocità imposto dal CdS in quel tratto di strada (limite di 90 km/h) e soprattutto era

commisurata alle particolari condizioni ambientali e tale da scongiurare il verificarsi di perdita di aderenza dei pneumatici con l'asfalto.

Di contro emerge che il sig. WWW viaggiava a velocità prossima ai 76 km/h.

Posto che tale velocità non consentiva di mantenere aderenza con l'asfalto, veniva tagliata la curva e ciò determinava una illegittima invasione della opposta corsia.

A carico del WWW si ravvisa quindi violazione dell'art. 141 comma 1 CdS (velocità non commisurata alle caratteristiche e alle condizioni della strada in quel momento), e violazione dell'art. 143 comma 11 del Cds (circolazione contromano).