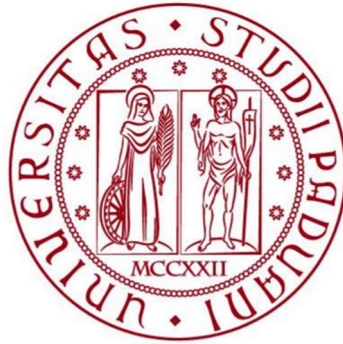


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Sistemi e Infrastrutture di Trasporto



TESI DI LAUREA

Analisi di urti non convenzionali tra veicolo e sistema di ritenuta stradale mediante software FEM

Relatore:
Chiar.mo PROF. MARCO PASETTO

Laureando: MARCO MILANO
Matricola: 1241248

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Sommario

1. Introduzione	3
2. Normativa di riferimento.....	8
3. Cenni sui dati statistici d'incidentalità.....	13
4. Tipologie di sistemi di ritenuta stradale	18
5. Criteri di scelta dei dispositivi di sicurezza stradale	20
6. Specifiche tecniche e prestazioni dei dispositivi di ritenuta stradale	22
6.1. Livello di contenimento, L_c	22
6.2. Indice di severità di accelerazione, ASI.....	26
6.3. Velocità teorica d'urto della testa, THIV	26
7. Introduzione ai Metodi agli Elementi Finiti	28
7.1. Software LS-DYNA.....	30
7.2. Modellazione al FEM	32
7.2.1. Sistema veicolo	32
7.2.2. Sistema guard-rail.....	38
8. Introduzione alle simulazioni.....	43
8.1. Caso Studio 1.a.	45
8.2. Caso Studio 1.b.	49
8.3. Caso Studio 1.c.	53
8.4. Caso Studio 1.d.	57
8.5. Caso Studio 2.a.	62
8.6. Caso Studio 2.b.	66
8.7. Caso Studio 2.c.	70
8.8. Caso Studio 2.d.	74
8.9. Caso Studio 3.a.	78
8.10. Caso Studio 3.b.	82
8.11. Caso Studio 3.c.	86
8.12. Caso Studio 3.d.	90
9. Considerazioni relative alle simulazioni lanciate.....	94
9.1. Analisi dei dati delle forze d'urto.....	95
9.2. Analisi e considerazioni sui dati di decelerazione	97
9.3. Analisi dei dati delle energie d'urto.....	100
10. Sviluppi futuri	106

1. Introduzione

Il seguente elaborato vuole essere un approfondimento tecnico sullo studio concernente l'interazione tra un veicolo modello ed una barriera stradale.

Tale trattazione è stata ampiamente sviluppata in numerose pubblicazioni scientifiche, per questo motivo l'analisi che seguirà si concentrerà su impatti cosiddetti "non convenzionali", ovvero che avvengono secondo angoli superiori o uguali a 20° . E' dunque d'interesse osservare il comportamento deformativo della barriera di sicurezza sottoposta evidentemente ad una componente d'urto ad essa ortogonale considerevolmente più rilevante rispetto ad angoli più contenuti in cui la barriera ha più una funzione di reindirizzamento del veicolo nella carreggiata piuttosto che un compito di contenimento ed anti sfondamento, associato ad una dissipazione energetica maggiore da parte del sistema di ritenuta che mira sempre a minimizzare i potenziali danni agli occupanti.

La sicurezza stradale risulta essere un argomento sempre più considerato nelle nuove progettazioni e negli adeguamenti dell'esistente; per questo motivo le normative dedicate si stanno arricchendo sempre più di indicazioni volte alla salvaguardia degli utenti che usufruiscono delle reti stradali. Spesso, infatti, si ricorre ad espedienti che non richiedono nemmeno l'implementazione di sistemi fisici di protezione, come interventi di gestione delle promiscuità al fine di moderare il traffico veicolare. Il cambiamento funzionale dei tracciati è reso necessario al fine di rispettare la gerarchizzazione delle reti, ovvero un ordinamento delle strade basato sulla loro funzione nel territorio. Tale classificazione è introdotta nell'ambito di studio al fine di poter, in un secondo e più appropriato momento, individuare le tipologie infrastrutturali e le caratteristiche che richiedono l'installazione delle barriere di sicurezza.

Secondo infatti quanto esposto dal D.M. 05/11/2001, i fattori fondamentali che consentono di collocare la rete oggetto di analisi in una classe specifica sono:

- Entità dello spostamento in termini di distanza percorsa dai mezzi transitanti;

- Tipo di movimento effettuato (se di transito piuttosto che non di distribuzione o accesso);
- Funzione assunta nel contesto territoriale: si distinguono collegamenti locali, provinciali, interregionali e nazionali;
- Categorie di traffico.

La classificazione proposta risulta dunque essere la seguente:

TIPI SECONDO IL CODICE		AMBITO TERRITORIALE	
AUTOSTRADA	A	EXTRAURBANO	strada principale eventuale strada di servizio
		URBANO	strada principale eventuale strada di servizio
EXTRAURBANA PRINCIPALE	B	EXTRAURBANO	Strada principale eventuale strada di servizio
EXTRAURBANA SECONDARIA	C	EXTRAURBANO	C1 C2
URBANA DI SCORRIMENTO	D	URBANO	strada principale eventuale strada di servizio
URBANA DI QUARTIERE	E	URBANO	
LOCALE	F	EXTRAURBANO	F1 F2
		URBANO	

Figura 1.1 – Classificazione rete stradale

Le interconnessioni e le transizioni da una tipologia stradale ad un'altra devono essere garantite mediante precise tipologie di intersezioni consentite, come esplicitato dal D.M. 19/04/2006. Laddove invece v'è una continuità del tracciato ma un cambio di funzionalità della tipologia stradale, è possibile adottare strategie di gestione delle promiscuità - o *traffic-calming* - che permettono di far osservare la necessità di variare le caratteristiche di approccio alla condotta del mezzo. Spesso si ricorre, ad esempio, ad interventi di restringimento (o allargamento) della corsia sfruttando *l'effetto tubo*: una modifica della sola segnaletica orizzontale che induce ad una percezione visivo-psicologica

da parte dell'utente alla guida del veicolo che le condizioni di viabilità stanno cambiando, portandolo conseguentemente ad adottare un comportamento più adatto e coscienzioso.

Altre forme di moderazione del traffico che aiutano a prevenire situazioni potenzialmente pericolose per l'incolumità materiale e individuale, possono essere riassunte nei seguenti tre punti:

- i. Realizzazione di soglie e porte d'ingresso in corrispondenza di accessi a zone cittadine abitate o aree con destinazione prevalentemente pedonale, evidenziate dalla presenza di cambio di pavimentazione (*Fig 1.1*), presenza di portali d'accesso anche storico-artistico, segnaletica verticale e vegetazione;
- ii. Trattazione della sede mediante riduzione del modulo delle corsie e l'apporto di una maggiore sinuosità delle traiettorie al fine di contenere le velocità (*Fig 1.2*);
- iii. Attrezzatura dei punti di conflitto prevedendo, ad esempio, attraversamenti pedonali dotati di isole salvagente di protezione (*Fig 1.3*).

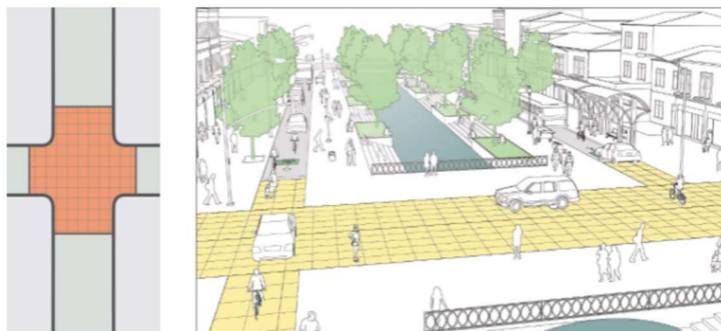


Figura 1.2 – Cambio pavimentazione



Figura 1.3 – Chicane



Figura 1.4 – Isola salvagente per attraversamento pedonale

Tra gli altri provvedimenti finalizzati ad evitare o abbattere le probabilità di incidentalità si riconoscono:

- Aggiornamento e osservanza delle disposizioni normative;
- Interventi mirati al miglioramento dell'illuminazione e visualizzazione della segnaletica;
- Attento monitoraggio e opportuna conseguente manutenzione straordinaria e ordinaria dell'infrastruttura;
- Accurata progettazione geometrica e funzionale dell'infrastruttura, assicurandosi la verifica delle distanze di visibilità lungo tutto il tracciato; andamenti planimetrici ed altimetrici soddisfatti nei loro criteri di verifica e compatibilità reciproca; caratteristiche della superficie di scorrimento con adeguati coefficienti di aderenza anche in condizioni climatiche avverse;
- Implementazione di tecnologie (come radar, sensori, ABS, controlli di trazione come ESP e TCS, e sistemi di guida parzialmente o completamente autonomi) sui veicoli;
- Adeguata formazione mediante corsi e campagne di sensibilizzazione.

Da ciò si evince che si possono principalmente individuare due tipologie di approccio alla sicurezza stradale: la prima di natura *attiva-preventiva*, dunque atta a scongiurare sinistri, disponendo le condizioni ottimali di transito e fruizione della sede. A questa categoria appartengono gli interventi

sopra citati. La seconda di natura *passiva*, in quanto i sistemi ad essa appartenenti mirano a ridurre quanto più possibile i danni al veicolo, ai suoi occupanti e ai terzi, in seguito ad incidente già avvenuto. A tale categoria fanno voce:

- Sistemi di monitoraggio video e/o impianti a spire induttive capaci di percepire anomalie nello scorrimento del traffico veicolare e trasmettere i dati tempestivamente agli enti appositi di soccorso nel caso di eventuale sinistro stradale;
- Tecnologie passive di sicurezza a bordo del veicolo, quali air-bag, cinture di sicurezza e poggiatesta.
- Caratteristiche strutturali del veicolo appositamente studiati per assorbire l'urto e dissiparne quanto più possibile l'energia generata;
- *Installazione di attenuatori d'urto, terminali di barriera, guard-rail e newjersey;*

L'attività di ricerca di questo documento si concentrerà sull'approfondimento di quest'ultimo aspetto della sicurezza passiva, mediante l'ausilio di un software capace di analizzare il comportamento derivante dall'impatto tra veicolo e dispositivo di contenimento secondo il "Metodo agli Elementi Finiti" (FEM). I due modelli fondamentali che costituiscono tale studio verranno infatti discretizzati in elementi triangolari-prismatici rigidi capaci di rotazioni relative in seguito ad una specifica interazione. L'attenzione verrà dunque posta sul comportamento della barriera e sulla sua deformazione post-urto, valutando grado di sfondamento, modalità di contenimento, potenziale ribaltamento del veicolo e il comportamento del sistema secondo diverse circostanze d'input che in seguito verranno più opportunamente introdotte ed approfondite.

2. Normativa di riferimento

La normativa che si occupa dei sistemi di ritenuta stradale è la “UNI EN 1317”, sviluppata in ambito europeo dal comitato per la standardizzazione (CEN). L’obiettivo di tale commissione è quello di sviluppare delle indicazioni omogenee per la comunità europea affinché ogni paese membro possa adeguarsi ad esse.

Lo sviluppo delle varie normative e direttive concernenti i numerosi temi riguardanti l’infrastruttura stradale (che si estendono dalla regolamentazione della segnaletica orizzontale, a quella verticale, agli impianti d’illuminazione e ai dispositivi di sicurezza) ha richiesto al CEN di formare un comitato *tecnico specifico*, il TC 226, il quale, a sua volta, ha istituito differenti *gruppi di lavoro* per l’elaborazione specifica di determinate classi di prodotto.

Tali gruppi di lavoro vengono individuati mediante la sigla WG, *work group*. Il WG1 si occupa dei sistemi di ritenuta, affidando a diversi *gruppi tecnici* (TG) problemi precisi; ad esempio:

- Il TG1 tratta i sistemi di ritenuta stradale in senso lato;
- Il TG2 si occupa della marcature CE;
- Il TG3 analizza le questioni legate ai parapetti e sistemi di protezione pedonali;
- Il TG4 si occupa degli attenuatori TMA, ovvero speciali carrelli appendice montati sul retro dei mezzi di lavoro, mirati a difendere chi lavora lungo le arterie stradali e tutelare la circolazione nel suo complesso (*Fig. 2.1 e 2.2*)
- Il Gruppo Tecnico 5 affronta il tema delle prove virtuali tramite simulazioni al calcolatore, aspetto che sta assumendo un ruolo sempre più fondamentale per il corretto utilizzo dei sistemi di ritenuta stradale.

Per quest’ultimo punto è bene approfondire il fatto che i più importanti standard a cui attenersi per l’omologazione dei sistemi di ritenuta stradale (che principalmente sono l’NCHRP report 350 ⁽¹⁾ e l’UNI EN 1317) richiedono che sia assolutamente necessario validare i dispositivi attraverso prove

reali condotte attraverso i *crash test*. Queste prove distruttive richiedono laboratori specializzati, strumentazione dedicata e personale altamente qualificato, comportando alti costi di conduzione e tempistiche prolungate per l'elaborazione dei dati. Inoltre, le condizioni degli standard omologativi testati possono differire in maniera significativa rispetto alle numerosissime combinazioni di situazioni reali identificabili. Le caratteristiche di impatto reali hanno infatti una variabilità impossibile da considerare nella sua interezza in fase di classificazione. Ne citiamo, a titolo di esempio, solo alcune: posizionamento della barriera in curva o con pendenze longitudinali o trasversali, traiettorie variabili dei veicoli, dimensioni e distribuzione delle masse dei veicoli, effetto di urti multipli. Una situazione frequente è, ad esempio, l'urto con la barriera da parte di un mezzo secondo una direzione d'impatto derivante da un testa-coda generato da una perdita di controllo del veicolo da parte del conducente, o dal suo speronamento, causato da un altro veicolo. La dinamica appena descritta è caratterizzata da componenti di velocità e di velocità di rotazione del mezzo difficilmente riproducibili generando un comportamento (in termini di deformazione, sfondamento della barriera ed effetti sugli occupanti) molto differente rispetto ad una prova sperimentale, magari anche basata sull'utilizzo dello stesso veicolo (in termini di peso) e dello stesso sistema di ritenuta stradale che prevede il loro impatto in maniera più standardizzata. E' perciò sempre più richiesta la necessità di implementare le barriere di sicurezza su piattaforme virtuali (software) che permettano di ottenere un controllo preventivo della qualità del design della barriera sotto molteplici condizioni circostanti, evitando la ripetizione di costosi crash test.

⁽¹⁾ National Cooperative Highway Research Program. Programma di ricerca americano aggiornato annualmente e sviluppato sulla base della necessità di raccolta di informazioni riguardanti la sicurezza stradale richiesta dal dipartimento dei trasporti locale e dall'AASHTO. E' un documento contenente le raccomandazioni e le procedure per la valutazione delle performance di sicurezza dei vari dispositivi di sicurezza stradale installati sulla rete.



Figura 2.1 - TMA (Truck Mounted Attenuator)



Figura 2.2 - Particolare di TMA

Le “virtual testing”, ovvero le simulazioni condotte al computer mediante l’utilizzo di codici agli elementi finiti, rappresentano uno strumento chiave per gli organismi preposti, per il produttore e per il gestore.

Di recente è stata approvata la “UNI EN 16303” che specifica le metodologie per la validazione dei modelli sviluppati per lo studio dei sistemi di protezione stradale. In tale normativa è possibile estrarre le specifiche necessarie affinché avvenga l’approvazione dei dispositivi studiati mediante modello numerico, previa validazione del modello stesso: la EN 16303 infatti descrive il metodo per il confronto tra la prova certificativa reale e l’analisi numerica al fine di dimostrare l’affidabilità di quest’ultima.

Il procedimento appena descritto viene generalmente applicato nei casi di analisi e nei test di sistemi di ritenuta obsoleti che devono essere modificati o che semplicemente richiedono un aggiornamento correggendone il design al fine di raggiungere requisiti più elevati e performanti. Una volta effettuata la validazione del modello è possibile studiare la modifica del prodotto e osservarne le nuove prestazioni. In seguito si sottoporrà all'organismo notificato per l'approvazione e quindi poi la marcatura CE.

La stessa struttura gerarchica adottata dal CEN è successivamente duplicata a livello nazionale, dove l'UNI (Ente Italiano di Normazione), all'interno del Comitato tecnico "Costruzioni stradali ed opere civili delle infrastrutture", ha creato il gruppo di lavoro "Barriere stradali di sicurezza", che è l'equivalente del WG1 previsto dal CEN e studia a livello nazionale la Norma riportando a livello europeo le posizioni italiane.

La Norma italiana corrispondente è composta da diverse parti, alcune di carattere generale, altre relative alla classificazione di specifici prodotti. Si ha infatti che la parte 1 descrive la terminologia, i metodi di prova e di misura, la parte 2 tratta le barriere di sicurezza, la parte 3 gli attenuatori d'urto, la parte 4 terminali, transizioni e chiusure varchi, la parte 5 si occupa di tutte le procedure relative alla marcatura CE, la parte 6 dei parapetti pedonali e la parte 8 delle protezioni per motociclisti.

La norma UNI EN 1317 tratta la sola classificazione dei sistemi di sicurezza ma non si esprime in merito alla modalità del loro utilizzo, il quale è lasciato ai singoli stati membri. Nel caso italiano, tale trattazione è stata sviluppata da qualche decreto ministeriale:

- DM 18/02/1992 n° 223: "Regolamento recante le istruzioni tecniche sulla progettazione, omologazione ed impiego delle barriere di sicurezza stradale";
- Allegato "Istruzioni Tecniche" del DM 21/06/2004;
- DM 28/06/2011 citante le "Disposizioni sull'uso e sull'installazione dei dispositivi di ritenuta stradale";
- "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

Il progettista dell'installazione si deve quindi districare tra normative di classificazione, prodotti a marcatura CE, Decreti Ministeriali e regolamenti dei contratti pubblici che richiedono competenze non solo specificatamente tecniche, ma anche procedurali e normative. Uno dei pochi strumenti innovativi che la Norma ha messo a disposizione del progettista è rappresentato dalle prove virtuali.

3. Cenni sui dati statistici d'incidentalità

Affrontare queste tematiche incentrate sulla sicurezza stradale risulta essere sempre più all'ordine del giorno considerando lo sviluppo della mobilità negli ultimi decenni.

Secondo il CARE (Community database on Accidents on the Roads in Europe) a causa degli incidenti stradali nei paesi membri dell'UE si è registrato, nel 2015, un numero di decessi⁽²⁾ pari 26.100 ed un numero di feriti quantificabile in oltre 1.4 milioni.

In ambito italiano l'andamento dei dati registra tendenzialmente valori analoghi rispetto a quelli europei. In particolare, secondo i dati ISTAT del 2019, si sono contate nello stesso anno 3.173 vittime da incidente stradale e 241.384 feriti.

Come si può osservare dalla Figura 6, l'andamento a livello europeo dei trend di incidentalità è di tipo decrescente. Questo miglioramento progressivo è stato garantito anche grazie gli accordi e agli impegni di standardizzazione a livello di sicurezza stradale che i vari paesi membri si sono impegnati ad osservare attraverso l'istituzione dell'ETSC (European Transport Safety Council). Si è infatti posta l'attenzione sui tre principali campi d'intervento:

- Utente;
- Infrastruttura;
- Veicolo.

L'incidentalità dovuta all'utente alla guida, che spesso risulta essere il fattore principale della sua causa, viene affrontata e trattata mirando a una più elevata formazione attraverso campagne di sensibilizzazione, all'inasprimento delle pene e delle sanzioni e organizzando corsi per il rilascio delle licenze di guida.

⁽²⁾ Secondo la definizione espressa dal World Health Organization, si definisce “morto da incidente stradale” qualsiasi persona deceduta immediatamente o entro 30 giorni dopo l'incidente stradale, escludendo i suicidi.

Nella pratica, le cause più comuni sono: distrazione derivante dall'utilizzo di telefoni cellulari, colpi di sonno, eccesso di velocità, inosservanza del codice della strada e della segnaletica; ma anche errata percezione e conseguente valutazione della velocità sostenuta e mancato rispetto delle distanze di sicurezza e della precedenza. Il veicolo, invece, tendenzialmente è causa rara di incidentalità, soprattutto grazie alle nuove tecnologie sempre più di serie previste sui nuovi mezzi, dotati di differenti sistemi di sicurezza sia attiva che passiva. Alcuni di questi sono: ABS (sistema elettronico di antibloccaggio delle ruote), ESP (dispositivo di sicurezza attiva elettronico, il cui compito è mantenere l'auto stabile), TCS (regola automaticamente la potenza che arriva ad ogni ruota, assicurando un'aderenza ottimale con qualsiasi condizione meteorologica o in presenza di olio, sabbia o fango sull'asfalto), cinture di sicurezza ed airbag. Inoltre, la comunità europea ha stabilito una serie di sistemi ADAS, sistemi avanzati di assistenza alla guida, non ancora presenti come dotazioni standard, che dovranno essere resi obbligatori su tutti i modelli automobilistici a partire dal 2024. Alcuni tra questi sono:

- L'assistente automatico per il mantenimento della corsia di percorrenza;
- Il controllo tramite sensori del livello di stanchezza del conducente;
- Il montaggio della scatola nera per la registrazione dei dati del veicolo e delle condizioni di circolazione;
- La frenata automatica d'emergenza

Il tema infrastruttura si è osservato e stimato avere una responsabilità totale o parziale (intesa come causa principale o con-causa) in ambito d'incidentalità pari a circa il 30% del totale. Questo aspetto è legato, ad esempio, a condizioni non ottimali della superficie di scorrimento come: perdita delle caratteristiche di scabrezza e conseguente calo dell'attrito pneumatico-manto stradale, formazione di avvallamenti e ormaie con successivo accumulo di acqua piovana e quindi potenziale fenomeno di acqua-planing, ed altri ammaloramenti che riducono le prestazioni dell'infrastruttura. Si aggiungono poi: scorretto posizionamento della segnaletica verticale, mancata manutenzione e

rinnovamento di quella orizzontale e scarso o scorretto posizionamento dei dispositivi di ritenuta stradale.

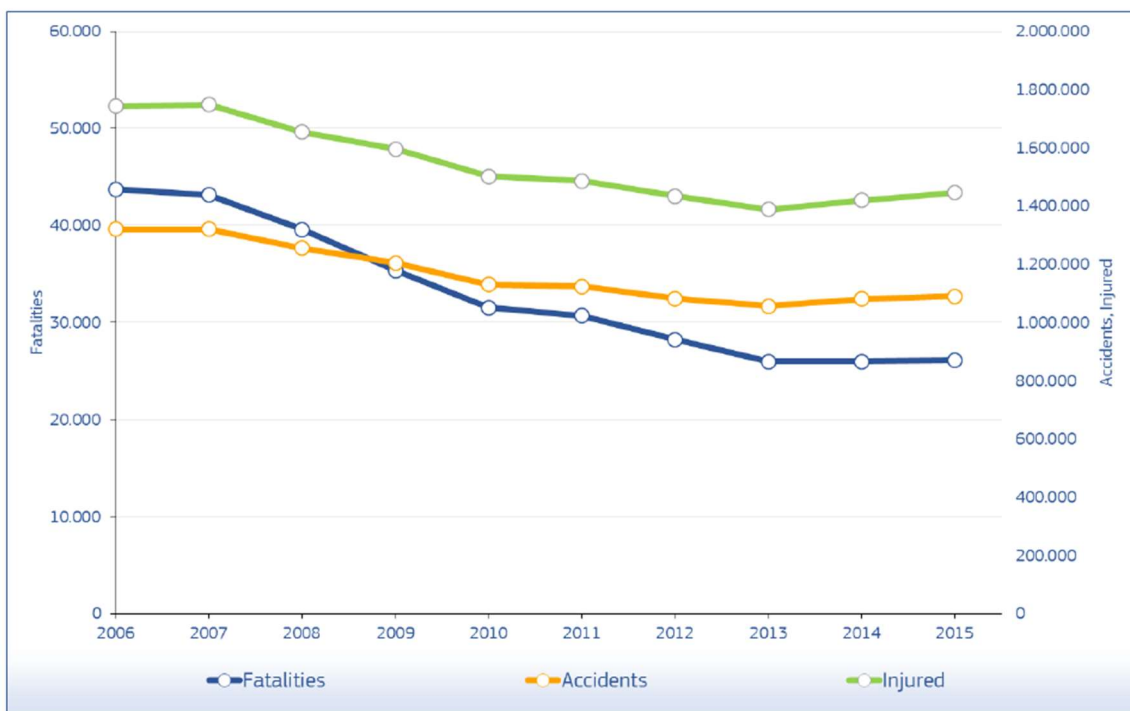


Figura 3.1 - Numero di incidenti, feriti e decessi dal 2006 al 2015

Come è possibile osservare dalla Figura 3.2, l'evoluzione del numero delle vittime nel corso del precedente decennio consta in una riduzione del 24% delle vittime stradali. Questo traguardo, raggiunto grazie ad una più attenta osservanza e messa in atto di espedienti risolutivi o comunque di tamponamento del problema, risulta tuttavia non essere in linea con le direttive e le aspettative che l'Unione Europea si era posta nel 2010. La volontà era difatti quella di mirare a ridurre drasticamente (- 50%) il numero dei decessi da incidente stradale.

La pendenza iniziale delle due curve (quella reale in linea continua e quella posta come obiettivo in linea tratteggiata) risulta essere pressoché coincidente, fatto giustificato dall'implementazione di migliorie che nel primo periodo hanno per l'appunto dimostrato un significativo cambiamento che però nel tempo (essendo sempre più diffuse) ha portato alla saturazione l'ambito d'applicazione, riducendo conseguentemente il margine di progresso.

Considerando poi che entro il 2050 l'UE vuole raggiungere l'obiettivo di azzerare il numero dei morti negli incidenti stradali, impegnandosi a ridurre sensibilmente anche il numero dei feriti gravi, si capisce la necessità di continuare a investire e occuparsi di queste tematiche legate alla sicurezza delle nostre infrastrutture, investendo in ricerca e applicazioni. Questo studio altro non vuole essere che un estratto di supporto alla stessa finalità.

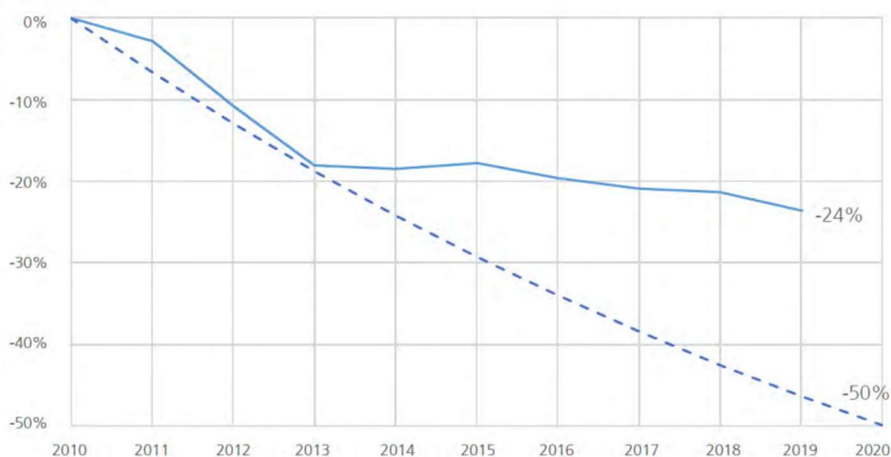


Figura 3.2 - Progressione del numero di vittime stradali nell'ultimo decennio

Come è già stato precedentemente osservato, le barriere di sicurezza vengono poste in opera al fine di realizzare accettabili condizioni di sicurezza in rapporto alla configurazione dell'infrastruttura, garantendo, entro certi limiti, il contenimento dei veicoli che dovessero tendere alla fuoriuscita dalla carreggiata stradale. Esse devono essere idonee ad assorbire parte dell'energia di cui è dotato il veicolo, limitando però, al tempo stesso, gli effetti d'urto sui passeggeri.

Le barriere stradali devono quindi contenere e reindirizzare il veicolo provocando il minor danno possibile.

In base a quanto appena espresso e considerando i seguenti dati ISTAT del 2012 che riportano rispettivamente il numero totale di incidenti per tipologia assieme al numero di vittime, per tale anno solare, correlato a sinistri di fuoriuscita dalla sede stradale, si comprende quanto sia fondamentale

prevedere dispositivi di contenimento e conseguentemente studiarne il momento dell'urto col veicolo al fine di mitigare il fenomeno.

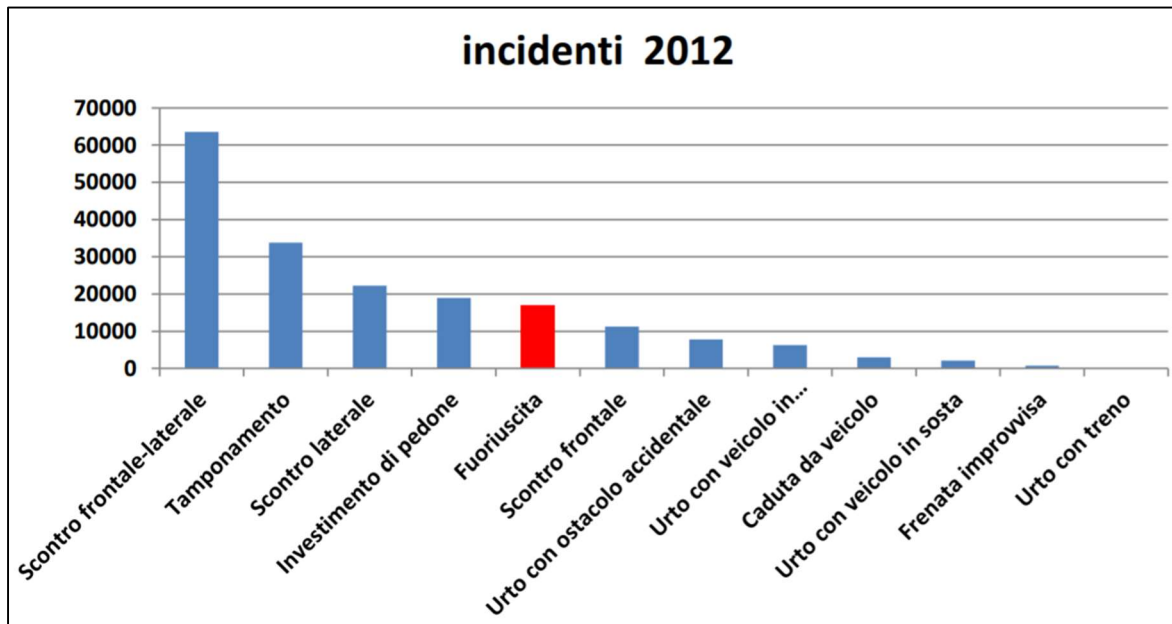


Figura 3.3 - L'incidente per fuoriuscita non sarà il più frequente...

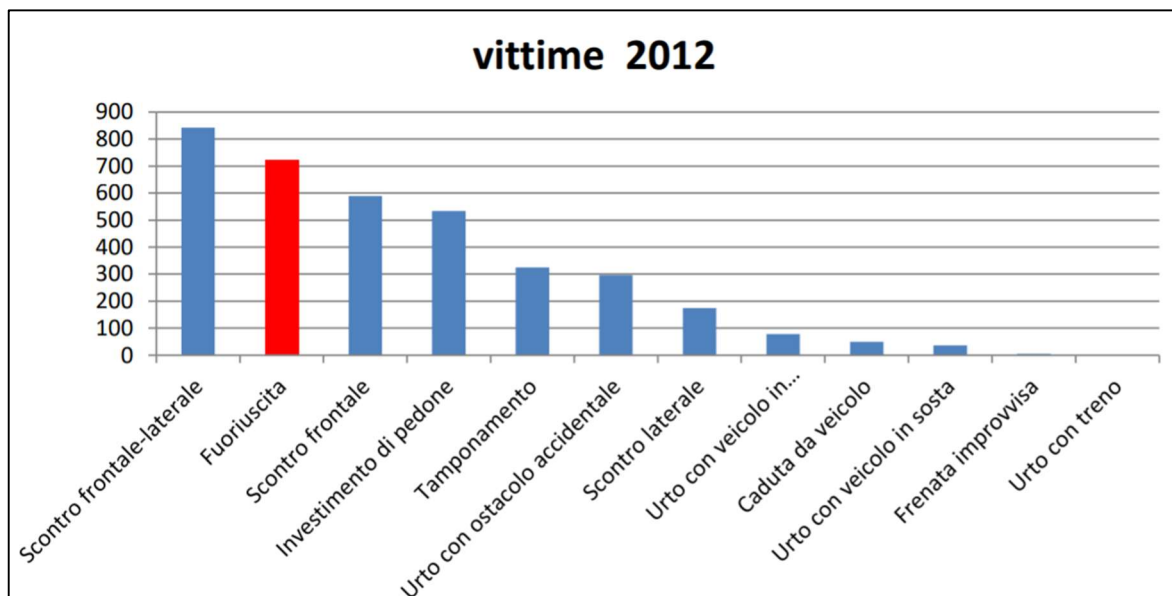


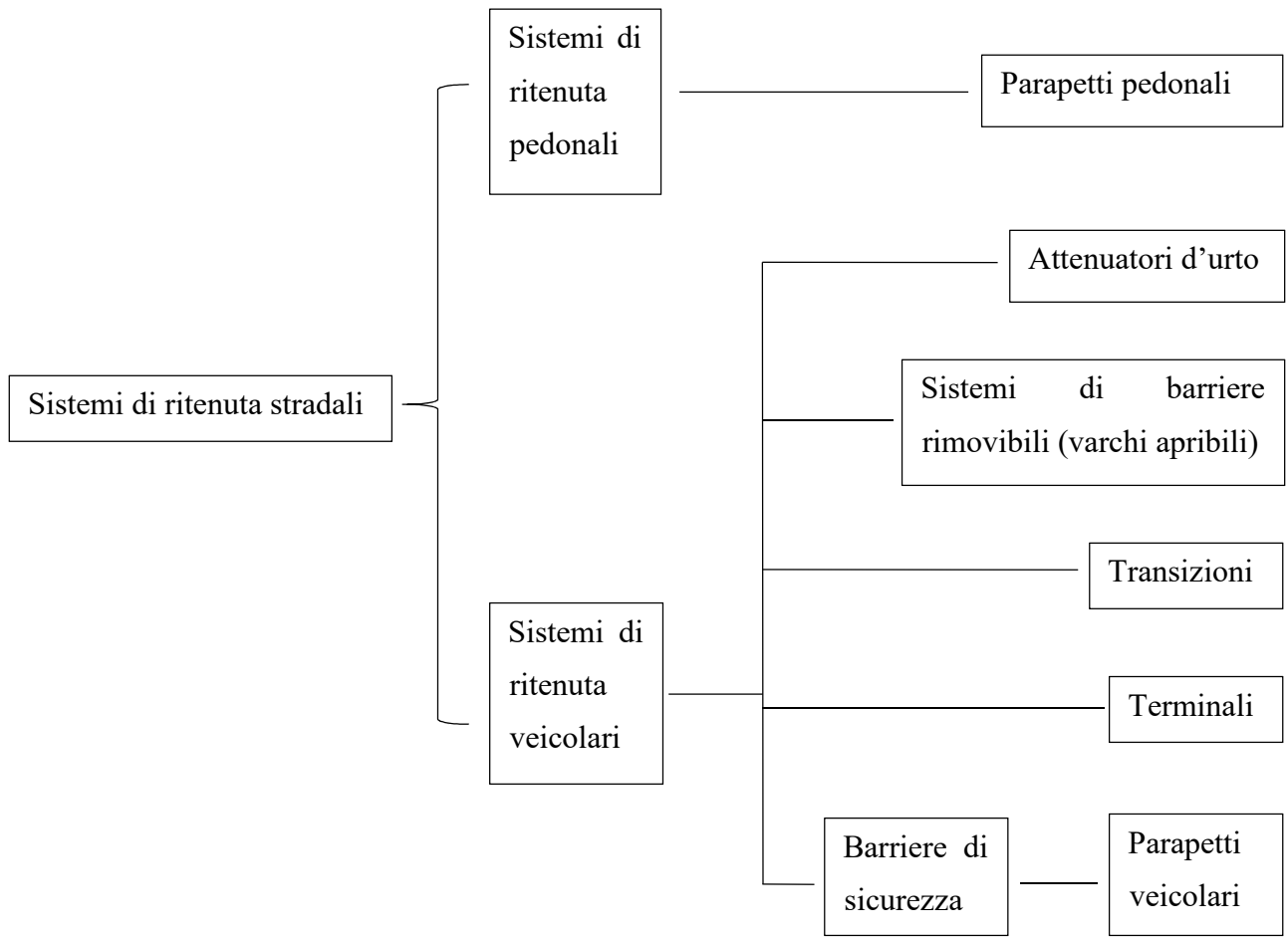
Figura 3.4 - ... ma è molto pericoloso

4. Tipologie di sistemi di ritenuta stradale

La struttura dell'UNI EN 1317 è caratterizzata da otto capitoli in cui si sviluppa la tematica delle barriere di sicurezza in maniera completa:

- **Parte 1:** Terminologia e criteri generali per i metodi di prova;
- **Parte 2:** Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza, inclusi i parapetti veicolari;
- **Parte 3:** Classi di prestazione, criteri di accettabilità basati sulla prova di impatto e metodi di prova per attenuatori d'urto;
- **Parte 4:** Linee guida per la meccanica computazionale di prove d'urto sul sistema di ritenuta del veicolo;
- **Parte 5:** Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento di veicoli;
- **Parte 6:** Sistema di ritenuta dei pedoni – Parapetti pedonali;
- **Parte 7:** Livello di contenimento, metodi di prova e criteri di accettazione per i terminali;
- **Parte 8:** Sistemi di ritenuta stradali motociclistici in grado di ridurre la severità dell'urto del conducente in caso di collisione con le barriere di sicurezza.

Grazie alla UNI EN 1317 vengono impostati e diversificati i sistemi di contenimento in due macro gruppi, i quali a loro volta individuano un'ulteriore classificazione in funzione del loro posizionamento sulla carreggiata, all'obiettivo di ritenuta e alle disposizioni funzionali e circostanziali dello specifico caso. La catalogazione degli s.r.s. è la seguente:



L'analisi, come già preannunciato, si concentrerà sui sistemi di ritenuta veicolari e in particolar modo sulle *barriere longitudinali*.

5. Criteri di scelta dei dispositivi di sicurezza stradale

La scelta dei dispositivi di sicurezza avverrà tenendo conto di una serie di parametri, tra cui: la loro destinazione, l'ubicazione, la tipologia della strada, le caratteristiche della stessa e i dati del traffico cui essa sarà soggetta. Sarà poi controllata la compatibilità dei carichi trasmessi dalle barriere alle opere con le relative resistenze di progetto.

Per la composizione del traffico, in mancanza di indicazioni fornite dal committente o gestore dell'infrastruttura, sarà necessario risalire ad una sua stima attraverso la determinazione del TGM (Traffico Medio Giornaliero), cioè uno studio previsionale. Ai fini applicativi la UNI EN 1317 riporta la tabella di riferimento che distingue principalmente tre tipologie di traffico in funzione del TGM e dell'incidenza dei veicoli pesanti:

Tipo di traffico	TGM	% Veicoli con massa > 3,5 t
I	≤ 1000	Qualsiasi
I	> 1000	≤ 5
II	> 1000	$5 < n \leq 15$
III	> 1000	> 5

La normativa assegna quindi le classi minime di protezione principalmente in base al tipo di strada, di traffico e della destinazione della barriera stradale. Le tabelle di riferimento sono tre:

- **Tabella A** – Barriere longitudinali;
- **Tabella B** – Attuatori frontali;
- **Tabella C** – Terminali speciali testati.

Si riporta la prima, essendo di specifico interesse per lo sviluppo di tale elaborato:

Tipo di strada	Tipo di traffico	Barriere spartitraffico	Barriere bordo laterali	Barriere bordo ponte ⁽²⁾
Autostrade (A) e Strade extraurbane principali (B)	I II III	H2 H3 H3 - H4 ⁽¹⁾	H1 H2 H2 - H3 ⁽¹⁾	H2 H3 H3 - H4 ⁽¹⁾
Strade extraurbane secondarie (C) e Strade urbane di quartiere (E) e Strade locali (F)	I II III	H1 H2 H2	N2 H1 H2	H2 H2 H3
Strade urbane di quartiere (E) e Strade locali (F)	I II III	N2 H1 H1	N1 N2 H1	H2 H2 H2

(1) La scelta tra le due classi sarà determinata dal progettista.

(2) Per ponti o viadotti si intendono opere di luce superiore a 10 metri; per luci minori sono equiparate al bordo laterale.

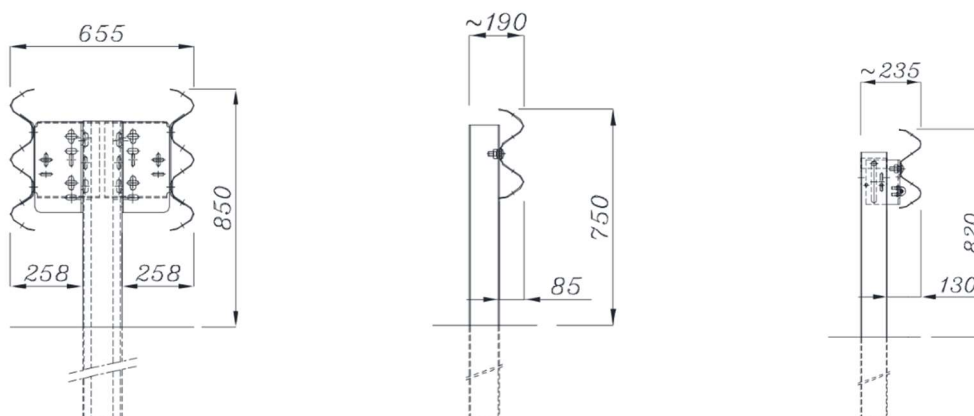


Figura 5.1 – Da sinistra verso destra:

Barriera di sicurezza bilaterale spartitraffico a tripla onda, LdC H2,

Barriera di sicurezza monolaterale a doppia onda, bordo laterale, LdC N2

Barriera di sicurezza monolaterale a doppia onda con distanziatore, bordo laterale, LdC H2
fonte "TUBOSIDER"

6. Specifiche tecniche e prestazioni dei dispositivi di ritenuta stradale

Le varie classi riportate nel capitolo precedente rispondono ciascuna di caratteristiche particolari, facendo sì che si differenzino in funzione di geometria, ingombri, destinazione d'uso e prestazioni

In particolar modo, si vogliono approfondire le capacità meccaniche di risposta all'urto delle barriere secondo opportuni parametri chiave. Questi sono:

- **Livello di contenimento, L_c**
- **Indice di severità di accelerazione, ASI**
- **Velocità teorica d'urto della testa, THIV**
- **Larghezza operativa normalizzata e classe, W_N**
- **Deflessione dinamica normalizzata, D_N**
- **Intrusione veicolo normalizzata, V_N**
- **Indice deformazione abitacolo veicolo, VCDI**
- **Lunghezza di barriera del tratto deformato.**

6.1. Livello di contenimento, L_c

Le diverse tipologie di barriere vengono classificate dalla norma UNI EN 1317 – 2 in relazione al livello di contenimento. Esso definisce la capacità del guardrail di contenere un veicolo di un certo peso, in modo che questo non la oltrepassi. Tale classificazione necessita della realizzazione di simulazioni fisiche distruttive (crash test) secondo specifiche velocità e angoli d'impatto, θ , sempre rispettando le condizioni dettate dalla normativa sopracitata. Il livello di contenimento viene rappresentato attraverso l'espressione dell'energia cinetica posseduta dal mezzo all'atto dell'impatto, calcolata con riferimento alla componente della velocità ortogonale alla barriera; la relazione è la seguente:

$$L_c = \frac{1}{2} M (V \sin\theta)^2$$

Il livello di contenimento L_c risulta essere espresso in $[kJ]$, in quanto gli altri termini rispettano le seguenti caratteristiche:

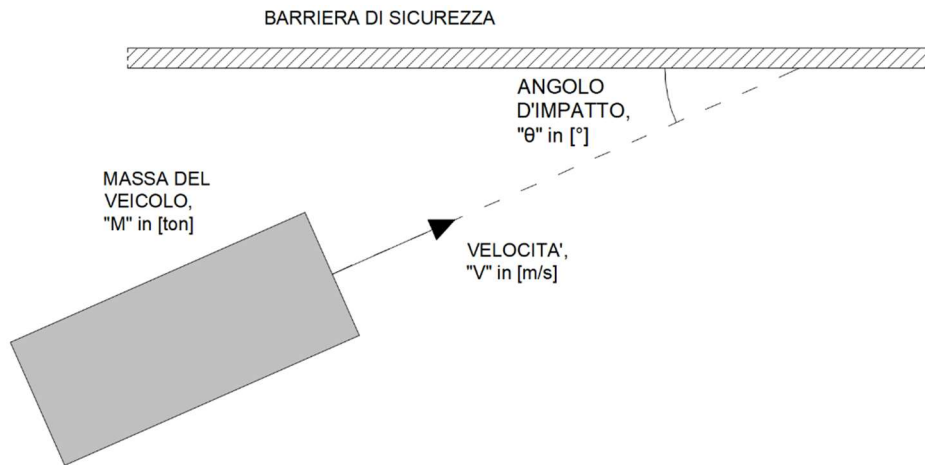


Figura 6.1.1 – Schematizzazione urto veicolo – barriera di ritenuta stradale

Si riporta quindi poi la tabella di L_c , in cui si esplicitano le prove di accettazione previste dai crash test:

Containment levels			Acceptance test
Low angle containment	T1		TB 21
	T2		TB 22
	T3		TB 41 and TB 21
Normal containment	N1		TB 31
	N2		TB 32 and TB 11
Higher containment	H1		TB 42 and TB 11
	L1		TB 42 and TB32 and TB 11
	H2		TB 51 and TB 11
	L2		TB 51 and TB32 and TB 11
	H3		TB 61 and TB 11
	L3		TB 61 and TB32 and TB 11
Very high containment	H4a H4b		TB 71 and TB 11 TB 81 and TB 11
	L4a L4b		TB 71 and TB32 and TB 11 TB 81 and TB32 and TB 11

Figura 6.1.2 - Tabella definente il livello di contenimento, prove di accettazione secondo UNI EN 1317 - 2

A sua volta viene riportata la descrizione delle prove d'urto a supporto della tabella in figura 6.1.2, le quali si diversificano per velocità d'impatto, angolo di scontro con la barriera, massa in *kg* del veicolo modello e tipologia di veicolo utilizzato. Per quest'ultima voce si identificano principalmente quattro mezzi:

- Automobile (car), con massa variabile da 900 a 1500 kg;
- Autocarro (rigid HGV – Heavy Goods Vehicle), con massa variabile da 10 a 30 tonnellate;
- Autocarro articolato (articulated HGV), con massa pari a 38 tonnellate;
- Autobus (bus), con massa pari a 13 tonnellate.



Figura 6.1.3 - Car



Figura 6.1.4 - Rigid HGV



Figura 6.1.5 - Articulated HGV



Figura 6.1.6 - Bus

Test	Impact speed km/h	Impact angle °	Total mass kg	Type of vehicle
TB 11	100	20	900	Car
TB 21	80	8	1 300	Car
TB 22	80	15	1 300	Car
TB 31	80	20	1 500	Car
TB 32	110	20	1 500	Car
TB 41	70	8	10 000	Rigid HGV
TB 42	70	15	10 000	Rigid HGV
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Rigid HGV
TB 71	65	20	30 000	Rigid HGV
TB 81	65	20	38 000	Articulated HGV

Figura 6.1.7 – Tabella riportante le caratteristiche dei test

All'articolo 6 del documento “*Istruzioni Tecniche sulla Progettazione, Omologazione ed Impiego delle Barriere di Sicurezza Stradale*” vengono definiti i valori minimi da garantire per ciascuna classe di contenimento sopra citata:

- CLASSE N1: Contenimento minimo $L_c = 44$ kJ
- CLASSE N2: Contenimento medio $L_c = 82$ kJ

- CLASSE H1: Contenimento normale $L_c = 127$ kJ
- CLASSE H2: Contenimento elevato $L_c = 288$ kJ
- CLASSE H3: Contenimento elevatissimo $L_c = 463$ kJ
- CLASSE H4: Contenimento per tratti ad altissimo rischio $L_c = 572$ kJ

6.2. Indice di severità di accelerazione, ASI

L'ASI (Acceleration Severity Index) rappresenta una misura convenzionale delle conseguenze sugli occupanti della vettura. Tale indice viene determinato mediante la relazione:

$$A.S.I. = \sqrt{\left(\frac{\overline{a_x}}{12g}\right)^2 + \left(\frac{\overline{a_y}}{9g}\right)^2 + \left(\frac{\overline{a_z}}{10g}\right)^2}$$

Dove i termini $\overline{a_x}$, $\overline{a_y}$, $\overline{a_z}$ rappresentano i valori medi calcolati su un intervallo di 0,05 secondi delle componenti longitudinale, trasversale e verticale dell'accelerazione, da misurare in corrispondenza di un punto P significativamente vicino al baricentro del mezzo.

I valori massimi di riferimento per quanto riguarda le accelerazioni tollerabili dagli occupanti sono:

$$\widehat{a_x} = 12g; \widehat{a_y} = 9g; \widehat{a_z} = 10g; \text{ con } g = 9.81 \text{ m/s}^2.$$

Secondo quanto espresso dalle “*Istruzioni Tecniche sulla Progettazione, Omologazione ed Impiego delle Barriere di Sicurezza Stradale*” all'Articolo 6, tutte le barriere e i dispositivi di ritenuta e attenuazione di tutte le classi devono corrispondere ad un indice ASI minore o uguale ad 1 ottenuto con un'autovettura, secondo le prescrizioni tecniche che seguono. E' ammesso un indice ASI fino a 1,4 per le barriere ed i dispositivi destinati a punti particolarmente pericolosi nei quali il contenimento del veicolo in svio diviene un fattore essenziale ai fini della sicurezza.

6.3. Velocità teorica d'urto della testa, THIV

Trattasi di un indice che valuta la velocità con la quale una massa libera di muoversi impatta su di una superficie interna del veicolo. L'obiettivo del THIV è quello di indicare il rischio d'infortunio

per un occupante del veicolo che non ha allacciato la cintura di sicurezza. Si cerca infatti di ricreare la dinamica del movimento della testa dell'occupante all'interno del mezzo soggetto ad urto.

Tale fattore viene determinato secondo la relazione seguente, che considera le velocità relative della massa interna al veicolo sul piano x - y :

$$T.H.I.V. = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Associando l'indice di velocità teorica della testa con l'indice di severità di accelerazione, si ottiene il parametro ISL (Impact Severity Levels), il quale definisce due livelli di severità di impatto, come espresso nella qui presente tabella:

Impact Severity Levels	Index Values		
A	ASI ≤ 1,0	and	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI ≤ 1,4		PHD ≤ 20 g ⁽³⁾

⁽³⁾ PHD, Post-Impact Head Deceleration, definisce appunto il valore di decelerazione della testa dell'occupante in seguito al suo impatto contro una superficie all'interno del veicolo. Dagli ultimi aggiornamenti della normativa non si tiene più conto di tale parametro nella determinazione dell'ISL ma solo del parametro THIV.

7. Introduzione ai Metodi agli Elementi Finiti

Dato un qualsivoglia problema di natura dinamica o statica, che preveda la presenza di sistemi solidi piuttosto che liquidi, in cui si osservi un eventuale contatto forzato tra due elementi anziché un singolo elemento soggetto a forze o accelerazioni, come quella gravitazionale, l'idea di approcciarsi alla sua risoluzione senza apportare semplificazioni, risulta impossibile.

I Metodi agli Elementi Finiti (FEM) permettono di determinare soluzioni approssimate di equazioni differenziali alle derivate parziali (Partial Differential Equations, PDE). L'utilizzo di tale metodo si afferma come uno dei migliori strumenti per l'indagine di quei sistemi complessi, per i quali le sperimentazioni e le prove fisico-distruttive in laboratorio comporterebbero spese eccessive, difficoltà logistiche e criticità legate alla misurazione delle varie grandezze. Nei problemi ingegneristici, infatti, la realtà risulta essere sempre troppo complessa da studiare, per questo motivo si fa riferimento ai modelli che derivano dall'introduzione di ipotesi semplificative e che, quindi, permettono di utilizzare le tecniche di calcolo a disposizione. Inoltre, gli oggetti reali sono degli elementi fisicamente continui, intesi proprio dal punto di vista compositivo, cioè non c'è nessun gap fisico tra due particelle vicine che fanno parte di un determinato oggetto: risolvere un problema fisico reale con l'approccio del continuo risulta essere impossibile dal punto di vista modellistico e computazionale per le nostre tecnologie.

Per la risoluzione delle PDE, la prima sfida è quella di generare una funzione base, rappresentante le funzioni di forma, che possa quanto più avvicinarsi alla soluzione. Le funzioni approssimate vengono individuate mediante i valori che la variabile dipendente assume in punti specifici, detti "nodi". I nodi sono solitamente posti sul contorno degli elementi, in punti comuni a due o più elementi. Oltre ai nodi sul contorno un elemento può presentare dei nodi al suo interno.

Risulta essere perciò evidente che una soluzione numerica approssimata mediante FEM è tanto più corretta e precisa tanto più viene resa fitta la maglia di elementi che compongono un determinato

oggetto: l'errore si riduce nella misura in cui vengono ravvicinati i nodi e quindi di quanto vengono ridotti gli intervalli.

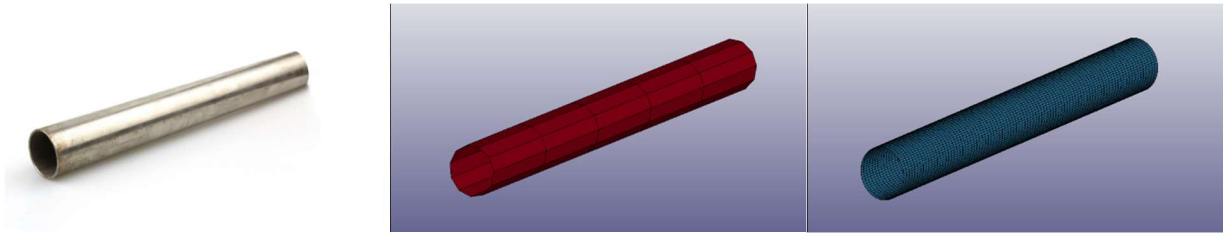


Figura 7.1: in questo confronto è possibile osservare come sia più fedele alla realtà (tubo in acciaio rappresentato a sx) un oggetto caratterizzato da un elevato numero di nodi ed elementi (immagine a dx). In particolar modo, quest'ultima è costituita da n. 3600 elementi e da n. 3670 nodi, mentre la discretizzazione centrale presenta n. 55 elementi e n. 66 nodi.

Il FEM mostra delle performance eccezionali nella risoluzione numerica delle PDE, soprattutto per quelle definite su un dominio complesso che può variare nel tempo. Per questo motivo si adottano i metodi di risoluzione numerica per semplificare il problema fisico reale continuo mediante la discretizzazione.

Al fine di riordinare i concetti legati all'analisi agli elementi finiti, si possono identificare principalmente due fasi essenziali alla generazione dei modelli; trattasi della:

- *Modellazione*: rappresentazione delle proprietà intrinseche del modello dal punto di vista geometrico, meccanico, dei vincoli, dei carichi, eccetera, apportando eventuali semplificazioni rispetto all'entità reale che si vuole studiare, e rimuovendo componenti ininfluenti o superficiali al problema;
- *Discretizzazione*: definizione del numero di elementi finiti che andranno a caratterizzare il modello. Ciascun elemento fondamentale sarà connesso agli altri elementi limitrofi mediante cerniere lineari e nodi in corrispondenza dei vertici, rappresentando così un sistema con un numero finito di gradi di libertà (sistema detto anche “*mesh*”), a differenza di quello reale.

La *mesh* è quindi costituita da facce, nodi e spigoli. All'aumentare del numero di elementi e di nodi della mesh e al diminuire delle dimensioni degli elementi, aumenta il livello di precisione del risultato, ma anche il costo computazionale. Per questo motivo, è necessario trovare un compromesso per ottenere un modello che sia il più vicino possibile alla geometria reale evitando, però, un eccessivo aumento del costo computazionale.

7.1. Software LS-DYNA

LS-DYNA è un codice di calcolo agli elementi finiti, utilizzato soprattutto per la risoluzione di complessi problemi dinamici non lineari, che evolvono molto velocemente nel tempo, tipici dei fenomeni fisici reali. Si tratta di un software sviluppato dalla Livermore Software Technology Corporation (LSTC) e, seppur in continua evoluzione per dare la possibilità di affrontare problemi del mondo reale sempre più complessi, le sue origini risalgono all'analisi agli elementi finiti non lineare, utilizzando l'integrazione temporale esplicita.

Quando si parla di “non linearità” si fa riferimento ad almeno uno di questi fattori:

- Non linearità geometrica dovuta al verificarsi di grandi deformazioni;
- Non linearità nei materiali che si riscontra quando le tensioni nei materiali duttili raggiungono e superano la tensione di snervamento e nascono deformazioni plastiche. Oppure quando si utilizzano delle componenti che hanno caratteristiche che si discostano dal comportamento elastico ideale; o ancora in presenza di fenomeni di creep, in cui si ha una continua deformazione del materiale essendo, ad esempio, sottoposto a carichi ciclici nel tempo.
- Cambiamento delle condizioni al contorno. Ciò è definito principalmente dai contatti tra le varie parti che possono mostrare una variabilità nel tempo non trascurabile.

Studiare problemi dinamici che evolvono nel tempo in maniera rapida significa analizzare eventi molto veloci, di breve durata dove le forze inerziali hanno un ruolo molto importante: esempi di tali eventi si ritrovano senza dubbio negli incidenti automobilistici (deformazioni del telaio, scoppio

dell'airbag o del tensionamento delle cinture di sicurezza), nelle esplosioni e nella produzione manifatturiera (stampaggio e lavorazione dei materiali).

Il software *LS-Dyna* è costituito principalmente da due applicazioni che permettono, rispettivamente di modellare gli elementi *beam*, *shell* e *solid*, caratterizzandoli nella loro natura meccanica, geometrica, dinamica e di interazione eventualmente reciproca, e di computare quanto eseguito nella prima interfaccia. Tali applicazioni sono *LS-PrePost* e *LS-Run*. Quest'ultima permette di caricare il file espresso in formato *.k* (*k-file*) e di computarlo, restituendone poi i file di output preventivamente impostati nella fase di modellazione. L'interfaccia *LS-PrePost* invece è mirata a caricare o disegnare la mesh, attribuendole caratteristiche meccaniche, materiali, spessori, interazioni specifiche, dinamismi specifici, legami e molto altro ancora.

Gli output osservabili sono essenzialmente di due tipologie:

- **Visiva:** il modellista ha la possibilità di apprezzare il comportamento di quanto implementato mediante animazione, con la possibilità di valutare a vista i risultati della prova lanciata. La selezione dell'impostazione "*Binary_D3plot*" risulta fondamentale per questa analisi, che permette, regolando il "*DT*" (ovvero l'intervallo di tempo di restituzione dei risultati, espresso in *ms*, millisecondi), di ottenere un'animazione più o meno ricca di *frame*, in base anche all'onere computazionale richiesto: maggiore risulta essere la densità degli output, tanto più fluida sarà la sequenza digitale e maggiore sarà quindi l'ingombro e il tempo richiesto per la sua restituzione.
- **Numerica:** mirando principalmente alla definizione dei parametri racchiusi nella libreria *ASCII*, è possibile esplicitare svariate combinazioni di differenti parametri rappresentabili in grafici, diagrammi e valori numerici univocamente interpretabili.

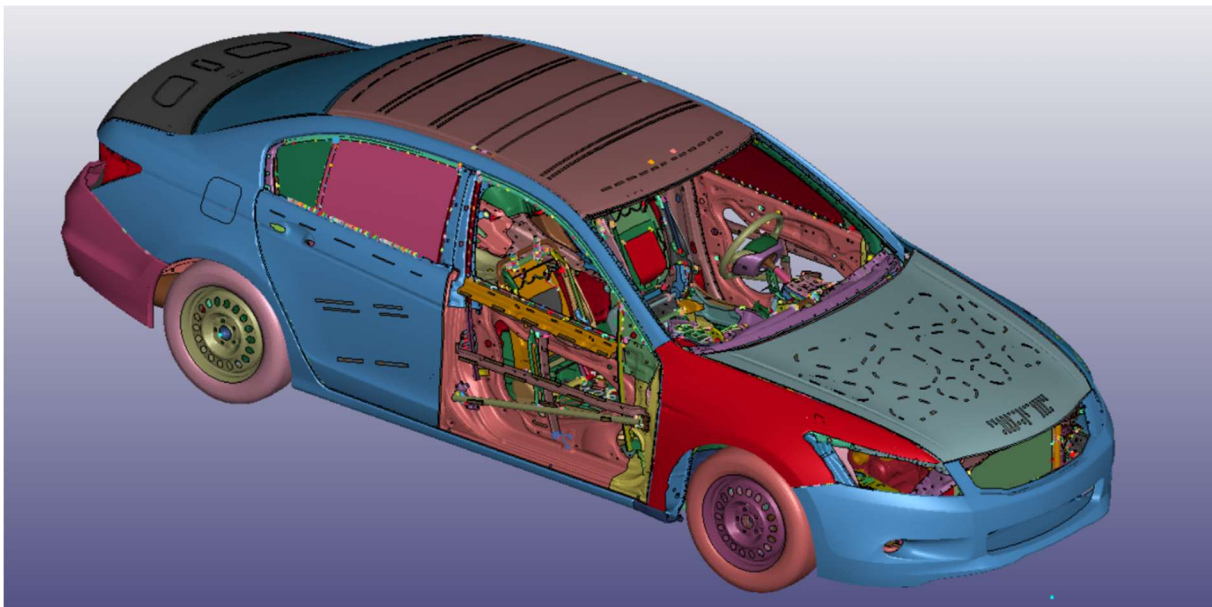
7.2. Modellazione al FEM

7.2.1. Sistema veicolo

Nella rapida fase dell'urto, la quale, in base alla velocità, inclinazione e caratteristiche della barriera e del veicolo, può avere una durata di pochi decimi di secondo, le componenti che subiscono danno e che vengono chiamate in causa risultano essere molto numerose.

Approcciarsi a un FEM con capacità grafiche permette di osservare le notevoli quantità di elementi e parti che caratterizzano e costituiscono un'autovettura.

Come si può osservare nelle figure sottostanti, il grado di dettaglio raggiungibile è molto elevato ed estremamente fedele alla realtà. Ciò comporta analisi precise e accurate, capaci di avanzare su di esse valutazioni riguardanti gli output di diverso genere, senza richiedere la necessità di prove distruttive, ma semplicemente apportando le dovute modifiche e quindi rilanciare le simulazioni nelle loro diverse impostazioni.



*Figura 7.2.1.1: rappresentazione modellistica di un veicolo
caratterizzato da n. 1'053 parti, 1'914'819 elementi, 1'969'588 nodi*

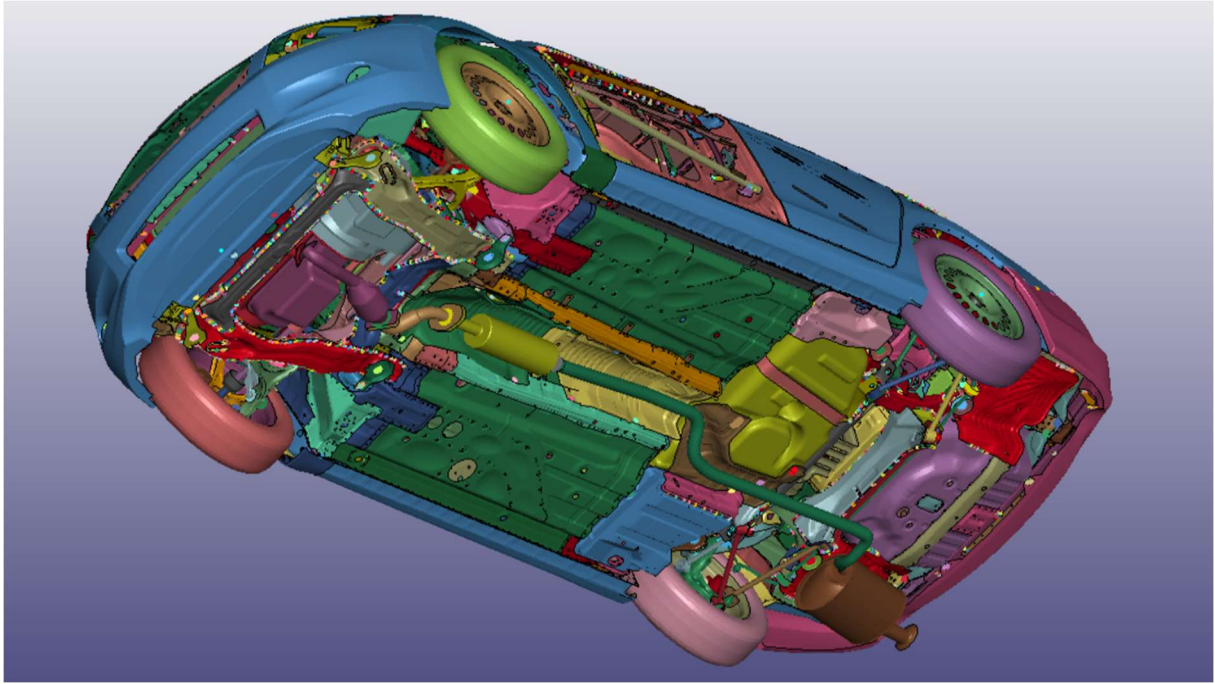


Figura 7.2.1.2

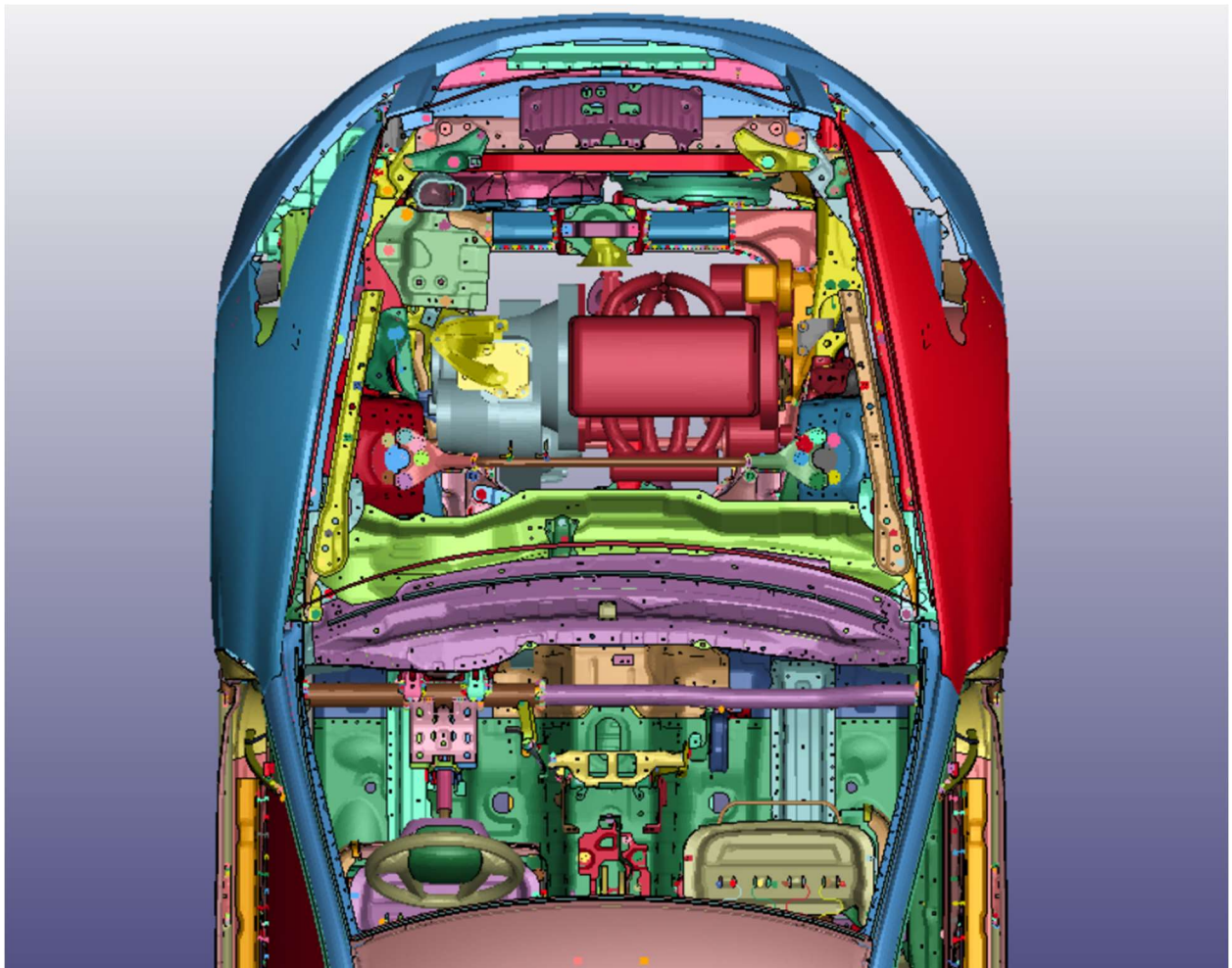


Figura 7.2.1.3

Come riportato nella descrizione della Figura 7.2.1.1, suddetto singolo modello è caratterizzato da quasi due milioni di componenti elementari.

L'approccio alla modellazione basata prevalentemente sulle due parti di veicolo e sistema di ritenuta stradale, è stata altamente comandata dai limiti di accesso e fruizione alle varie funzioni a causa della versione non integrale installata per fini accademici.

Ciò ha dunque portato ad eseguire delle semplificazioni in termini di scelta e realizzazione digitale delle varie componentistiche del sistema d'urto, riducendo il numero di elementi e conseguentemente nodi del sistema stesso, cercando di portarlo a una quantità totale inferiore o uguale al limite massimo consentito per tale versione "demo": 128'000 nodi dell'intera *mesh*.

La sfida è stata di riprodurre una versione snellita delle parti in gioco, eliminando o non considerando il superfluo, ad esempio sedili (plancia interna, consolle centrale, poltrona posteriore, rivestimenti, eccetera) ma conservando le parti strutturali e portanti del mezzo, le quali hanno chiaramente un'interazione diretta e fondamentale con la barriera.

Per soddisfare tali limiti si è adottata una carrozzeria a *mesh* continua al fine di rappresentare comunque l'ingombro esterno e le forme di un veicolo, Figura 7.2.1.4. Tuttavia la privazione delle varie parti racchiuse all'interno di tale "guscio" esterno ha portato ad un indebolimento strutturale (avendo ora infatti assenza di elementi che, se anche non appartenenti al telaio portante e resistente, apporterebbero resistenza indotta dai loro ingombri e volumi) e ad un alleggerimento, in effettivi termini di masse, del mezzo. Quest'ultimo aspetto avrebbe in particolar modo portato ad energie cinetiche ed inerzie non fedeli alla realtà, restituendo risultati poco veritieri e falsando la risposta deformativa del guardrail.

Per risolvere o comunque per tamponare e mitigare queste problematiche, si è intervenuto in principalmente due aspetti:

- Essendo la carrozzeria esterna una parte realizzata come forma *shell*, si è potuto intervenire sul suo spessore e, conseguentemente, avendola associata ad uno specifico materiale (con densità nota) e conoscendone il volume, si è potuto aggiustarne il peso.
- Lo spessore sopracitato non si è potuto rendere troppo elevato per motivi di rigidità e innalzamento eccessivo del centro di massa (CM), il quale avrebbe generato, soprattutto nella fase post-urto, e quindi nella fase di reindirizzamento del veicolo verso l'interno della carreggiata, una traiettoria e un comportamento del mezzo poco stabile, tendente al ribaltamento.

Per tali motivi si è quindi deciso di integrare la carrozzeria esterna con una scocca elementare posta nella parte anteriore mezzo (parte di contatto diretto con il guard-rail) che permettesse di contribuire all'assorbimento dell'urto, simulando la risposta di un telaio reale, abbassando il CM del veicolo ed assicurandone l'altezza da terra mediante l'implementazione di ruote saldate alla struttura mediante braccetti in acciaio.

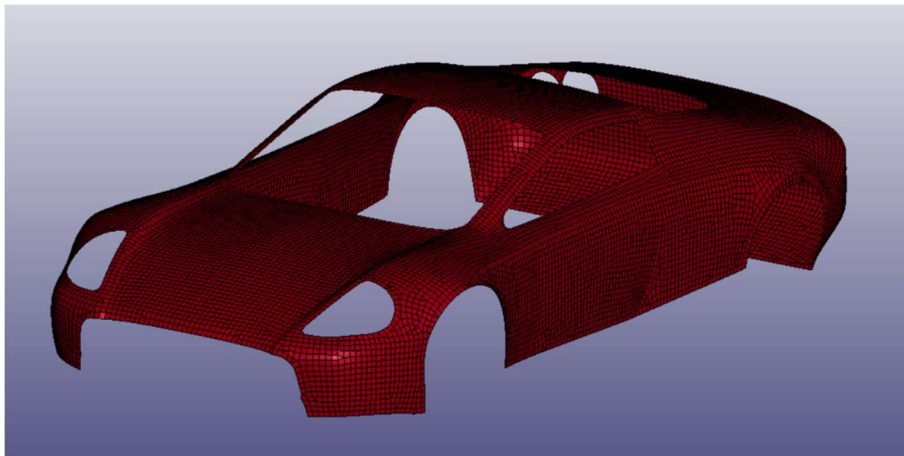


Figura 7.2.1.4

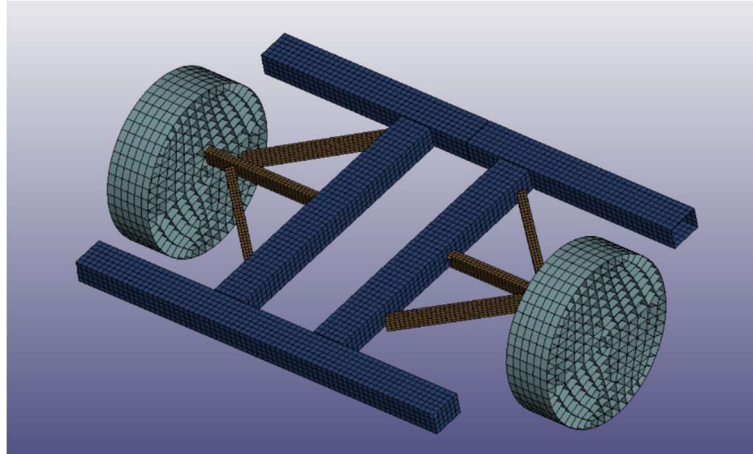


Figura 7.2.1.5

Il matrimonio tra il telaio (Figura 7.2.1.5) e la carrozzeria (Figura 7.2.1.4) ha portato a generare un veicolo discretizzato dotato delle seguenti caratteristiche fisico-geometriche:

- Lunghezza: 4060 mm
- Larghezza: 1862 mm
- Altezza: 1300 mm
- Massa: 1590 kg
- Spessore Shell carrozzeria: 12 mm
- Spessore Shell telaio: 4 mm

Per quanto riguarda le proprietà dei materiali utilizzati, per tutte le componenti facenti parte del mezzo, si è optato per il materiale “PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY”, adatto per rappresentare il comportamento dell'acciaio, il quale considera un andamento di questo sotto sforzi di tensione nella sua fase plastica di tipo lineare, come riportato in Figura 7.2.1.6.

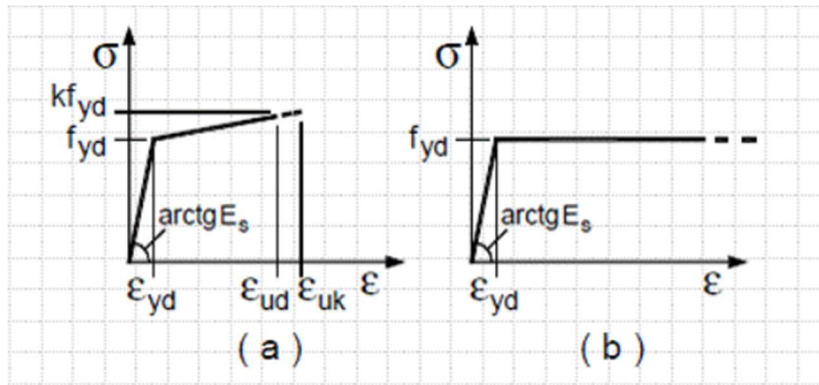


Figura 7.2.1.6 – Diagrammi tensioni – deformazioni acciaio

Si sono dunque inseriti i valori rispettivamente di densità, modulo di elasticità e coefficiente di Poisson:

- RO: $7,83e-06 \text{ kg/mm}^3$ ($7'830 \text{ kg/m}^3$)
- E: 210 kN/mm^2
- PR: 0.30

Ricordando che le unità di misura scelte nella suddetta relazione e quindi adottate nell'elaborazione sul software LS-Dyna sono quelle riquadrate nell'immagine 7.2.1.8.

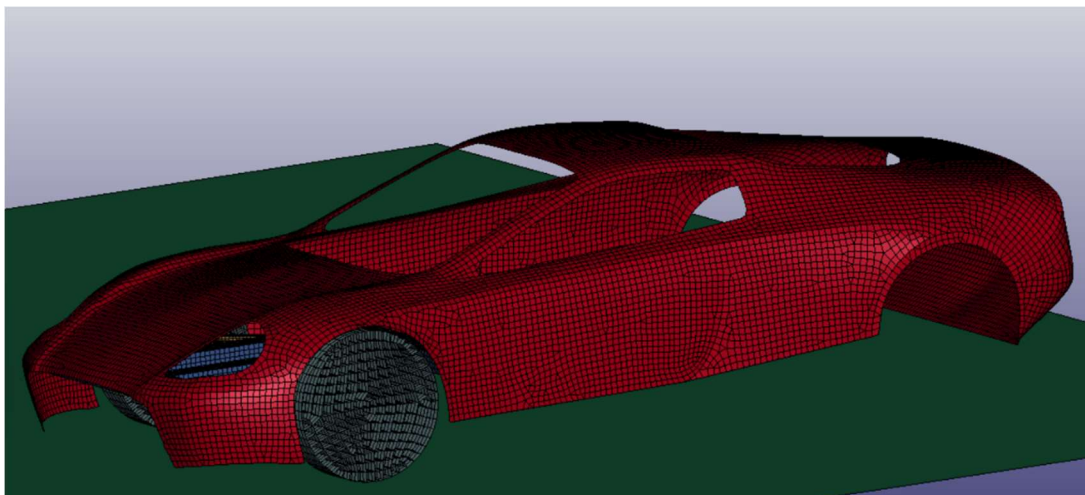


Figura 7.2.1.7

The following notes have been formatted nicely in www.lstc.com/sdb/327

Definition of a consistent system of units (required for LS-DYNA):

1 force unit = 1 mass unit * 1 acceleration unit
 1 acceleration unit = 1 length unit / (1 time unit)^2

The following table provides examples of consistent systems of units. As points of reference, the mass density and Young's Modulus of steel are provided in each system of units. "GRAVITY" is gravitational acceleration.

MASS	LENGTH	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY	DENSITY	YOUNG's	35 mph 56.33 kph	GRAVITY
kg	m	s	N	Pa	Joule	7.83e+3	2.07e+11	15.65	9.806
kg	m	ms	MN	MPa		7.83e+3	2.07e+05	0.01565	9.806e-06
kg	cm	s	1.e-02N			7.83e-3	2.07e+09	1.56e+03	9.806e+02
kg	cm	ms	1.e+04N			7.83e-3	2.07e+03	1.56	9.806e-04
kg	cm	us	1.e+10N			7.83e-3	2.07e-03	1.56e-03	9.806e-10
kg	mm	ms	kN	GPa	kN-mm	7.83e-6	2.07e+02	15.65	9.806e-03
g	cm	s	dyne	dy/cm2	erg	7.83e+0	2.07e+12	1.56e+03	9.806e+02
g	cm	us	1.e+07N	Mbar	1.e7Ncm	7.83e+0	2.07e+00	1.56e-03	9.806e-10
g	mm	s	1.e-06N	Pa		7.83e-3	2.07e+11	1.56e+04	9.806e+03
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	7.83e-3	2.07e+05	15.65	9.806e-03
tonne	mm	s	N	MPa	N-mm	7.83e-9	2.07e+05	1.56e+04	9.806e+03
kg	mm	s	mN	kPa		7.83e-6	2.07e+08		9.806e+03
g	cm	ms		1e5 Pa		7.83e+0	2.07e+06		9.806e-04
mg	mm	us	kN	GPa		7.83	2.07e+02	1.56e-02	9.806e-09
ng	um	us	uN	MPa			2.07e+05		
ng	nm	us	nN	GPa			2.07e+02		
kgfs2/mm	mm	s	kgf	kgf/mm2	kgf-mm	7.98e-10	2.11e+04	1.56e+04	9.806e+03

lbfs2/in	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33e-4	3.00e+07	6.16e+02	386
slug	ft	s	lbf	psf	lbf-ft	1.52e+1	4.32e+09	51.33	32.17
1 slug = 1 lbf*s^2/ft 1 kgf = 1 kg * 9.806 N/kg = 9.806 N 1 kgf*s^2/mm = 9806 kg Prefixes: k = kilo 10E3 M = mega 10E6 G = giga 10E9 m = milli 10E-3 u = micro 10E-6 n = nano 10E-9									

Figura 7.2.1.8 – Impostazioni unità di misura del software FEM, LS-DYNA

7.2.2. Sistema guard-rail

In maniera non dissimile rispetto ai ragionamenti avanzati per il veicolo, anche l'elemento discretizzato guard-rail è stato modificato al fine di ottenere un sistema rispettoso dei limiti legati al metodo numerico offerto dall'Ansys.

La barriera in acciaio discretizzata è stata rappresentata nella maniera più fedele possibile alla realtà, assegnando il tipico andamento ondulato del mancorrente longitudinale, che risulta essere l'elemento di primo contatto con il veicolo.

Il sistema di ritenuta stradale è stato infine completato prevedendo dei distanziatori, ovvero delle parti aggiuntive interposte tra l'elemento orizzontale di primo contatto col veicolo e i pali verticali che sorreggono la barriera. Tali elementi hanno la funzione di aumentare la corsa deformativa della barriera, rendendola più profonda e quindi migliorando il livello di contenimento del sistema. Inoltre, risultano essere degli elementi intermedi di ancoraggio tra paletti verticali ed elemento rettilineo che, in questa trattazione, è per l'appunto a "doppia onda".

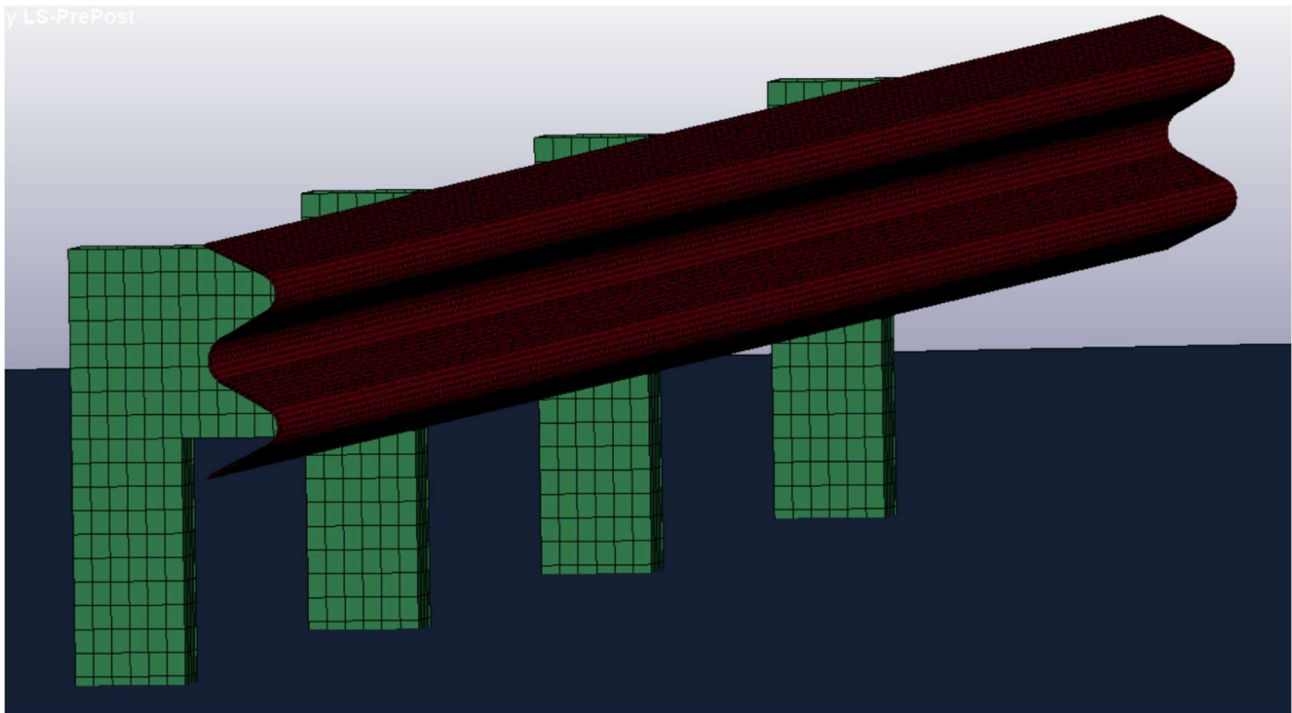


Figura 7.2.2.1: Guardrail a doppia onda discretizzato

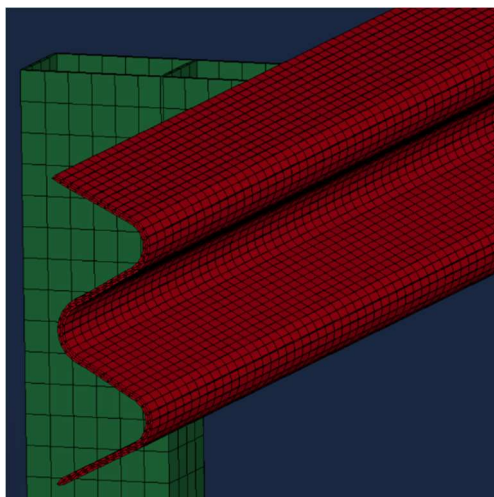


Figura 7.2.2.2: Particolare evidenziante il palo, il distanziatore e l'elemento orizzontale discretizzati e dotati di spessori

Anche per il guard-rail si è scelto lo stesso materiale che ha caratterizzato il veicolo, e quindi un acciaio con densità pari a 7830 kg/m^3 , coefficiente di Poisson uguale a 0,30 e modulo elastico pari a 210 kN/mm^2 .

Una volta discretizzato il modello guard-rail, si è proseguito a caratterizzare l'ancoraggio al suolo dei sistemi di sostegno e l'unione delle tre componenti principali della barriera. Per quanto concerne i primi, si sono considerati i pali immersi in un piccolo pozzetto in calcestruzzo armato; ciò si è tradotto in un incastro degli stessi utilizzando il comando "*Boundary, spc*", ovvero vincolando i punti dell'elemento a qualsivoglia grado di libertà (Single Point Constraints). Vista la descrizione appena presentata, si è scelto di impedire ogni grado di libertà (3 gdl per gli spostamenti e 3 gdl per le rotazioni). Conseguentemente i paletti potranno variare la loro posizione ed orientamento nello spazio solo grazie alla deformazione che subiranno in seguito all'urto.

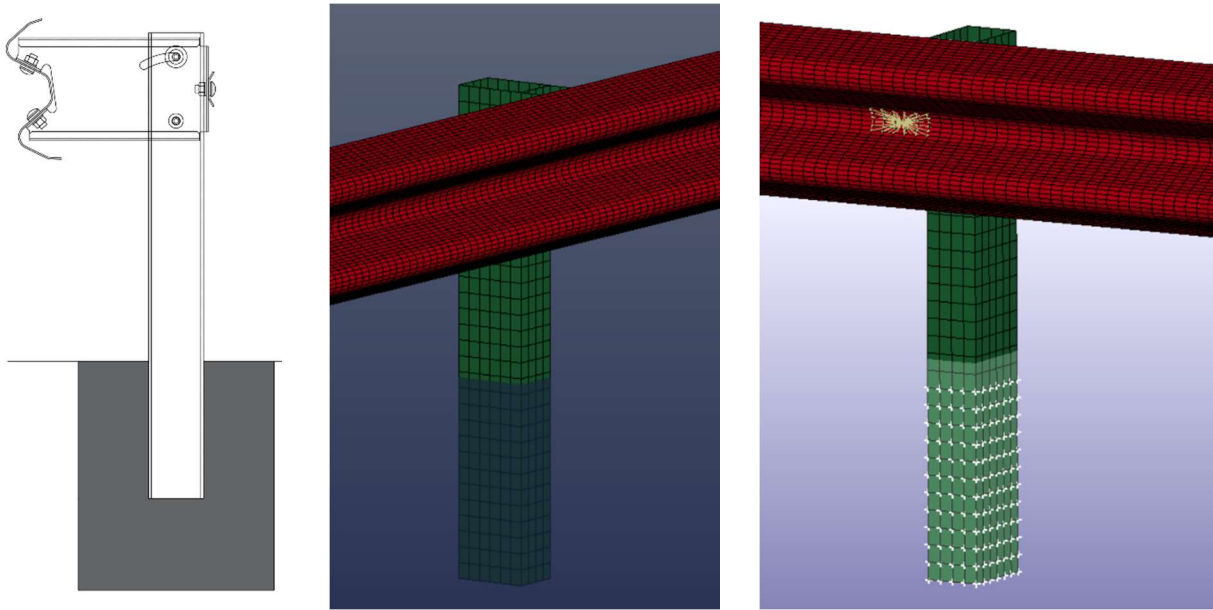


Figura 7.2.2.3

Si è deciso inoltre di prolungare il piano di appoggio oltre la barriera in quanto, durante l'urto, il mezzo ha deformato la barriera, rotto eventualmente alcuni paletti e viaggiato con parte della carrozzeria oltre il filo esterno di questi. Per alcune frazioni di secondo non si può quindi escludere che le ruote esterne del mezzo abbiano viaggiato appoggiate sul terreno oltre i paletti. Di conseguenza è bene prevedere un pianerottolo a tergo della barriera (questo in particolar modo per le sedi stradali in rilevato, ove infatti è presente la scarpata).

Le varie componenti che formano un guard-rail in acciaio sono generalmente assicurate tra loro mediante bulloni e rivetti. Trattasi di un sistema di giunzione complesso e oneroso per la sua fedele rappresentazione sul FEM trattato. Nell'intorno di tali zone di connessione, la struttura reale risulta essere particolarmente rigida vista la presenza di elementi tozzi e pieni (per l'appunto bulloni e rondelle in lega). Per questo motivo l'unione è stata garantita sfruttando l'opzione "*Constrained Nodal Rigid Body (CNRB)*", permettendo la saldatura dei nodi selezionati nell'interfaccia d'interazione col modello.

L'unione è stata dunque semplificata andando a collegare le facce sull'intera loro superficie di contatto reciproco, come raffigurato nell'immagine corrispondente:

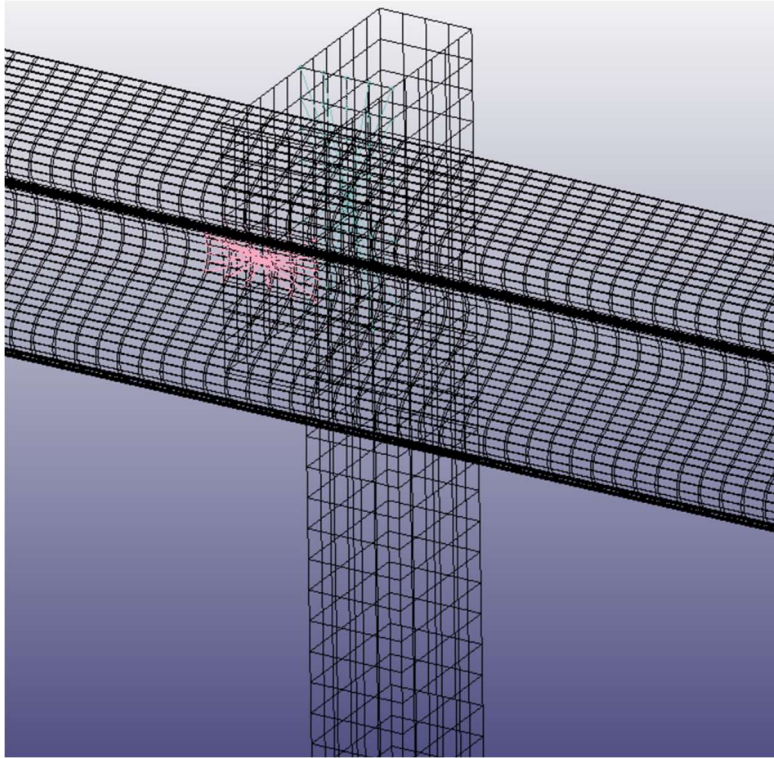


Figura 7.2.2.4

8. Introduzione alle simulazioni

Si procede ora ad introdurre le varie prove e simulazioni che si sono studiate e analizzate per un totale di dodici combinazioni totali. Il tema fondamentale della trattazione si ricorda essere incentrato sugli urti eccedenti le tradizionali angolazioni estese fino ai 20° tra veicolo e sistema di ritenuta.

Si è quindi impostato il problema analizzando principalmente tre angoli d'impatto, e per ognuna di queste condizioni si è osservato il comportamento del sistema attraverso quattro velocità diverse applicate all'autovettura:

- 25° [1]
 - **Caso Studio 1.a.** - velocità pari a 8,33 m/s (30 km/h)
 - **Caso Studio 1.b.** - velocità pari a 13.89 m/s (50 km/h)
 - **Caso Studio 1.c.** - velocità pari a 16,67 m/s (60 km/h)
 - **Caso Studio 1.d.** - velocità pari a 19.44 m/s (70 km/h)
- 30° [2]
 - **Caso Studio 2.a.** - velocità pari a 8,33 m/s
 - **Caso Studio 2.b.** - velocità pari a 13.89 m/s
 - **Caso Studio 2.c.** - velocità pari a 16,67 m/s
 - **Caso Studio 2.d.** - velocità pari a 19.44 m/s
- 35° [3]
 - **Caso Studio 3.a.** - velocità pari a 8,33 m/s
 - **Caso Studio 3.b.** - velocità pari a 13.89 m/s
 - **Caso Studio 3.c.** - velocità pari a 16,67 m/s
 - **Caso Studio 3.d.** - velocità pari a 19.44 m/s

La seguente trattazione è stata in realtà estesa all'analisi di altre quattro angolazioni d'impatto, due inferiori a quelle sopra esplicitate (15° e 20°), rientranti quindi nella categoria di urti convenzionali, e due superiori: 40° e 45° .

Le prime sono state sviluppate al fine di poter osservare le differenze comportamentali del sistema e per estendere lo studio al fine di ottenere dei dati complessivi finali più completi; le seconde non verranno esplicitate nella loro rappresentazione grafica per non appesantire eccessivamente la seguente tesi, ma comunque i loro output verranno riportati nelle considerazioni finali per l'elaborazione dei dati.

8.1. Caso Studio 1.a.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 8,33 m/s, ovvero 30 km/h, con un'inclinazione pari a 25° rispetto alla longitudinale del guardrail.

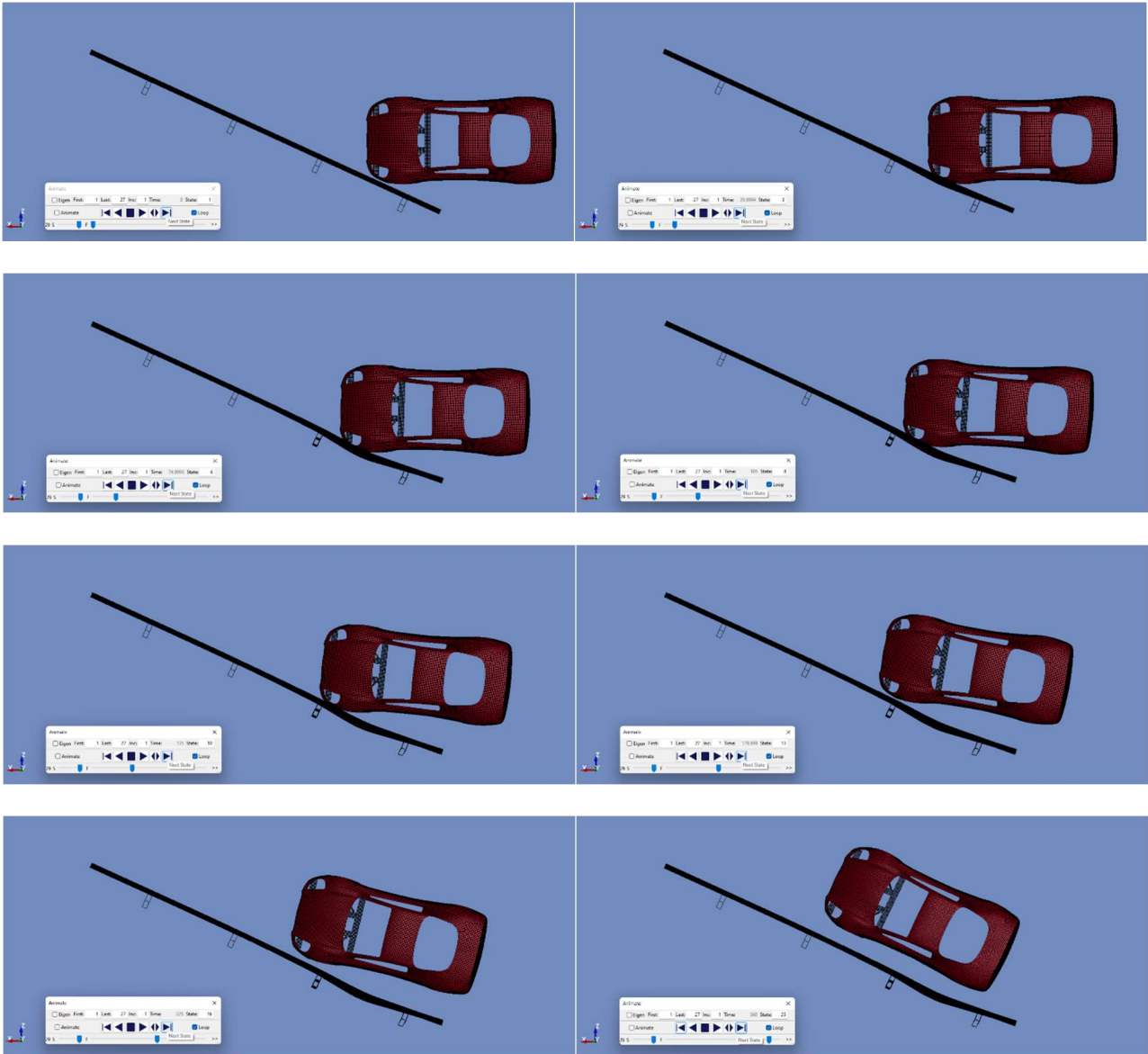


Figura 8.1.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,360 secondi

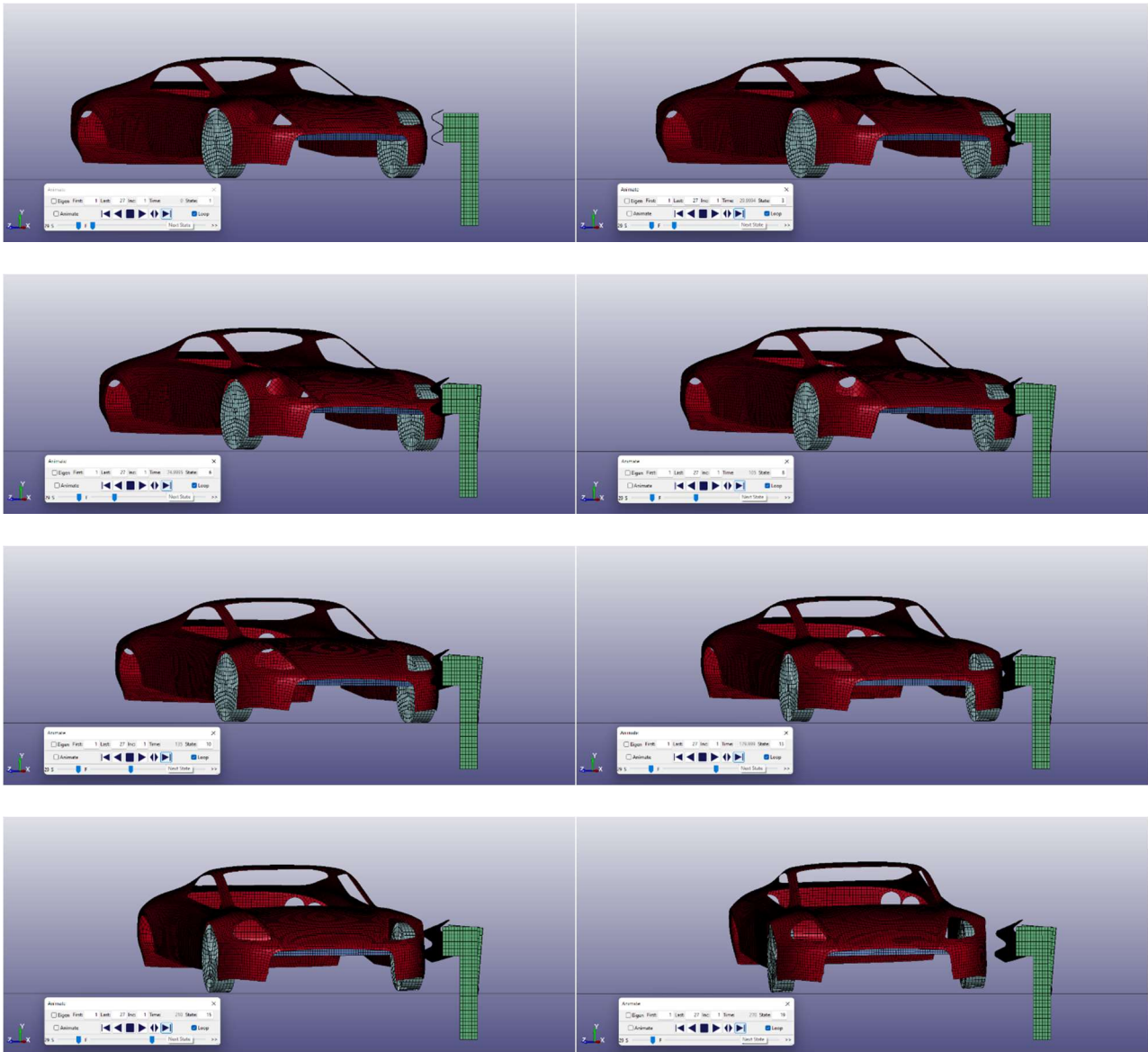


Figura 8.1.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,270 secondi

La prima prova condotta secondo un angolo di collisione non convenzionale ha generato una modesta deformazione del sistema di ritenuta, il quale è stato in grado di ridirezionare il veicolo verso l'interno della carreggiata. Quest'ultimo, inoltre, non è risultato essere soggetto ad un momento ribaltante particolarmente elevato grazie alle capacità dissipative del guardrail, oltre che alle caratteristiche dinamiche della simulazione (ovvero le più contenute di tutte le prove analizzate esplicitate).

Si riportano di seguito poi i diagrammi relativi rispettivamente all'intrusione del mezzo nel sistema di contenimento secondo le due componenti del piano X – Z, alle forze generate tra i due sistemi, alle accelerazioni ed alle velocità proprie del veicolo che subisce nell'arco dell'intero tempo della simulazione.

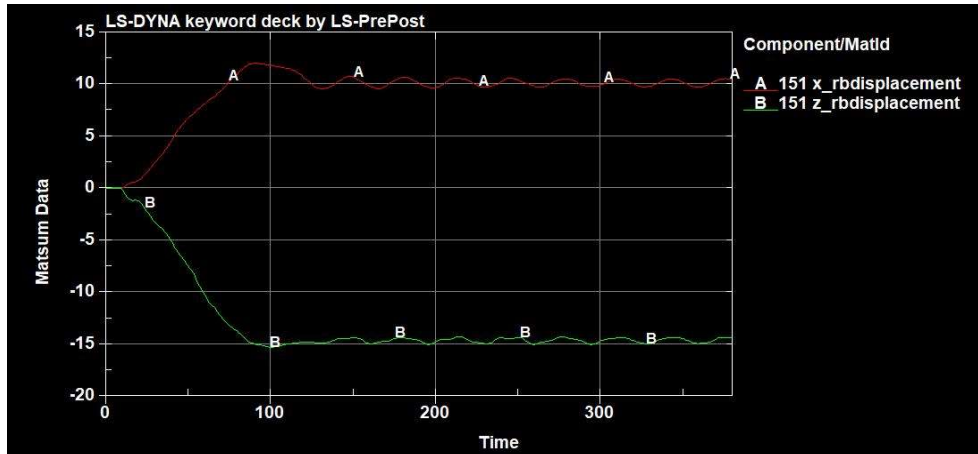


Diagramma 8.1.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo

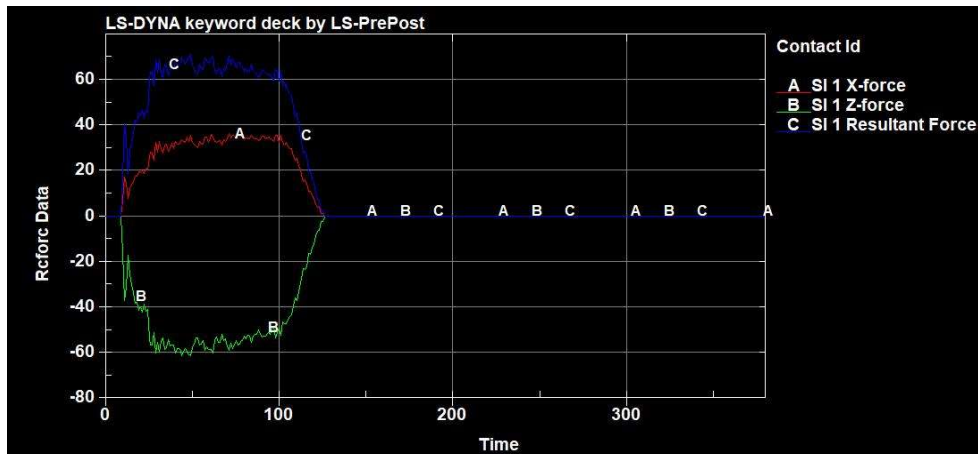


Diagramma 8.1.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 65 kN, circa 6'628 kgf.

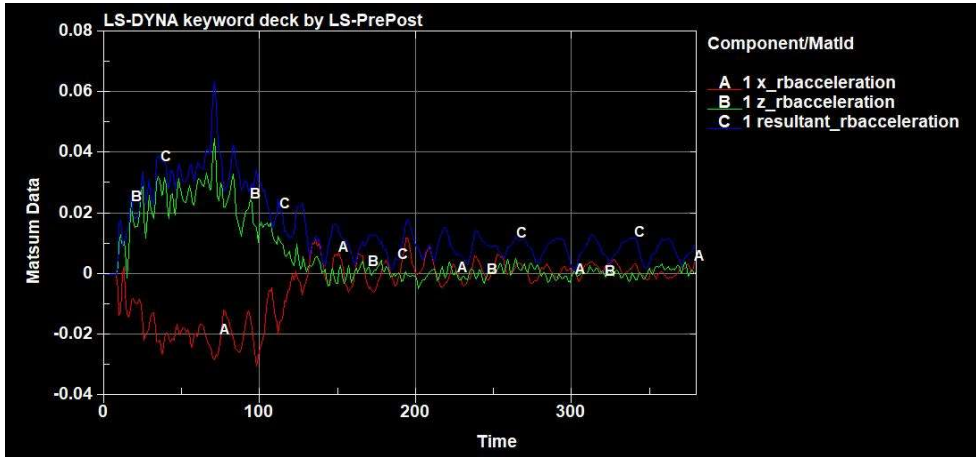


Diagramma 8.1.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante con valore massimo pari a $0,062 \text{ mm/ms}^2$, ovvero 62 m/s^2 , circa 6,32 g.

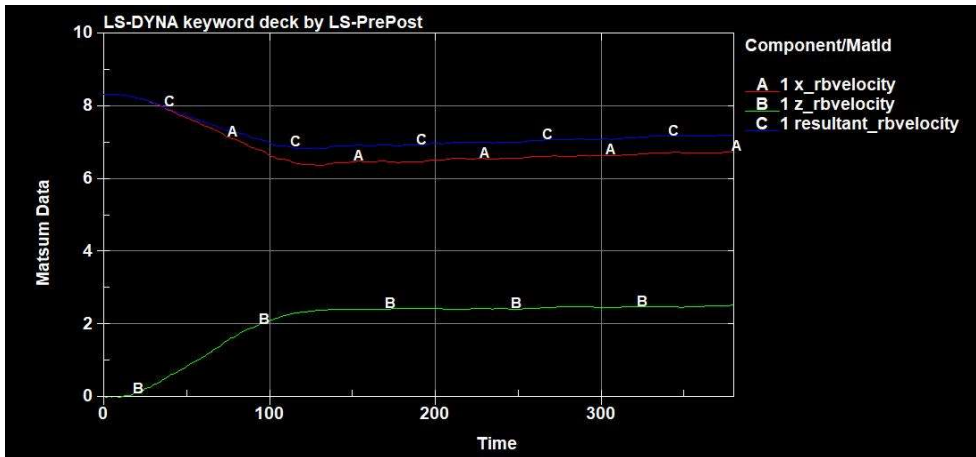


Diagramma 8.1.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.2. Caso Studio 1.b.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 13,89 m/s, ovvero 50 km/h, con un'inclinazione pari a 25° rispetto alla longitudinale del guardrail.

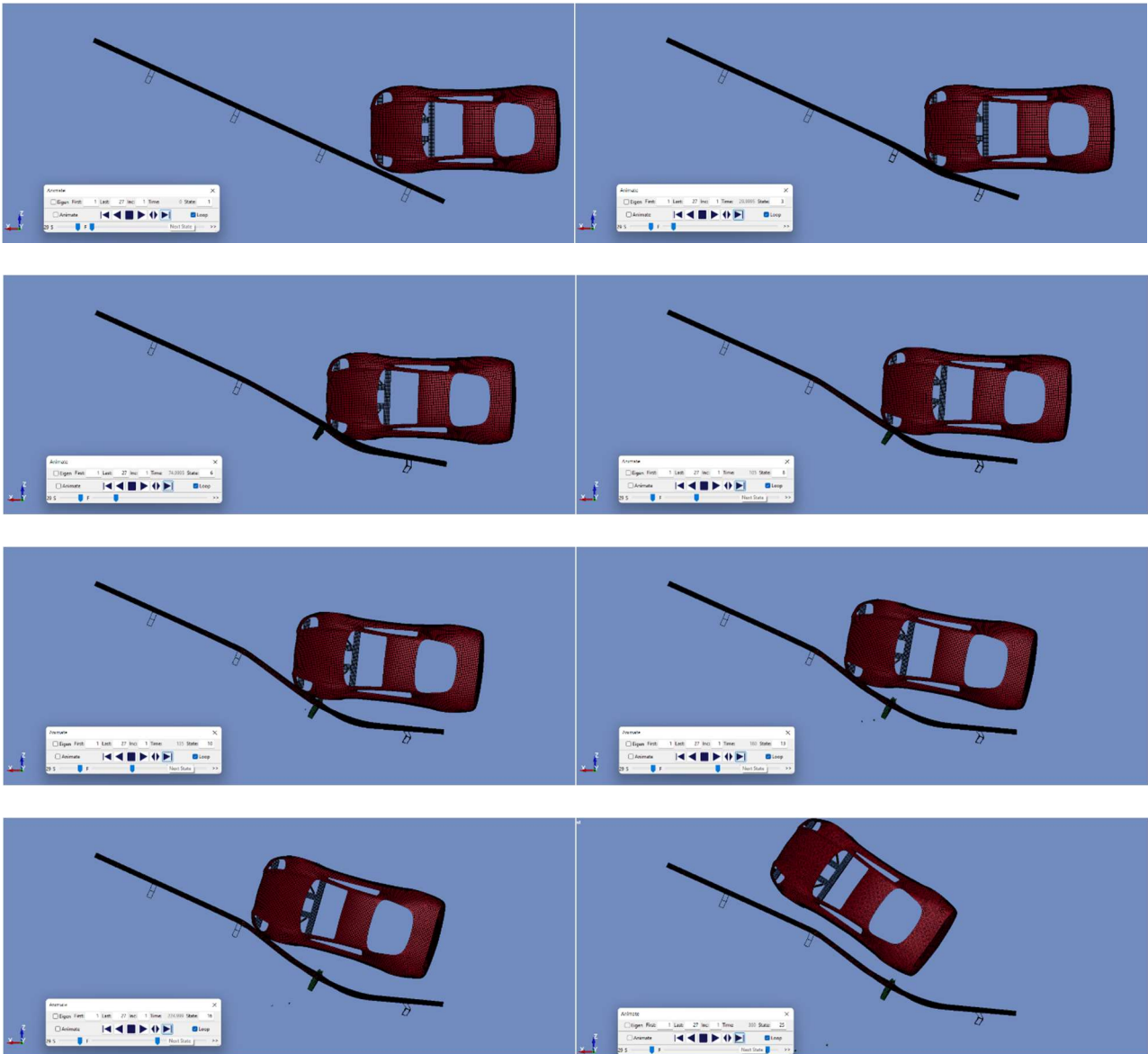


Figura 8.2.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,360 secondi

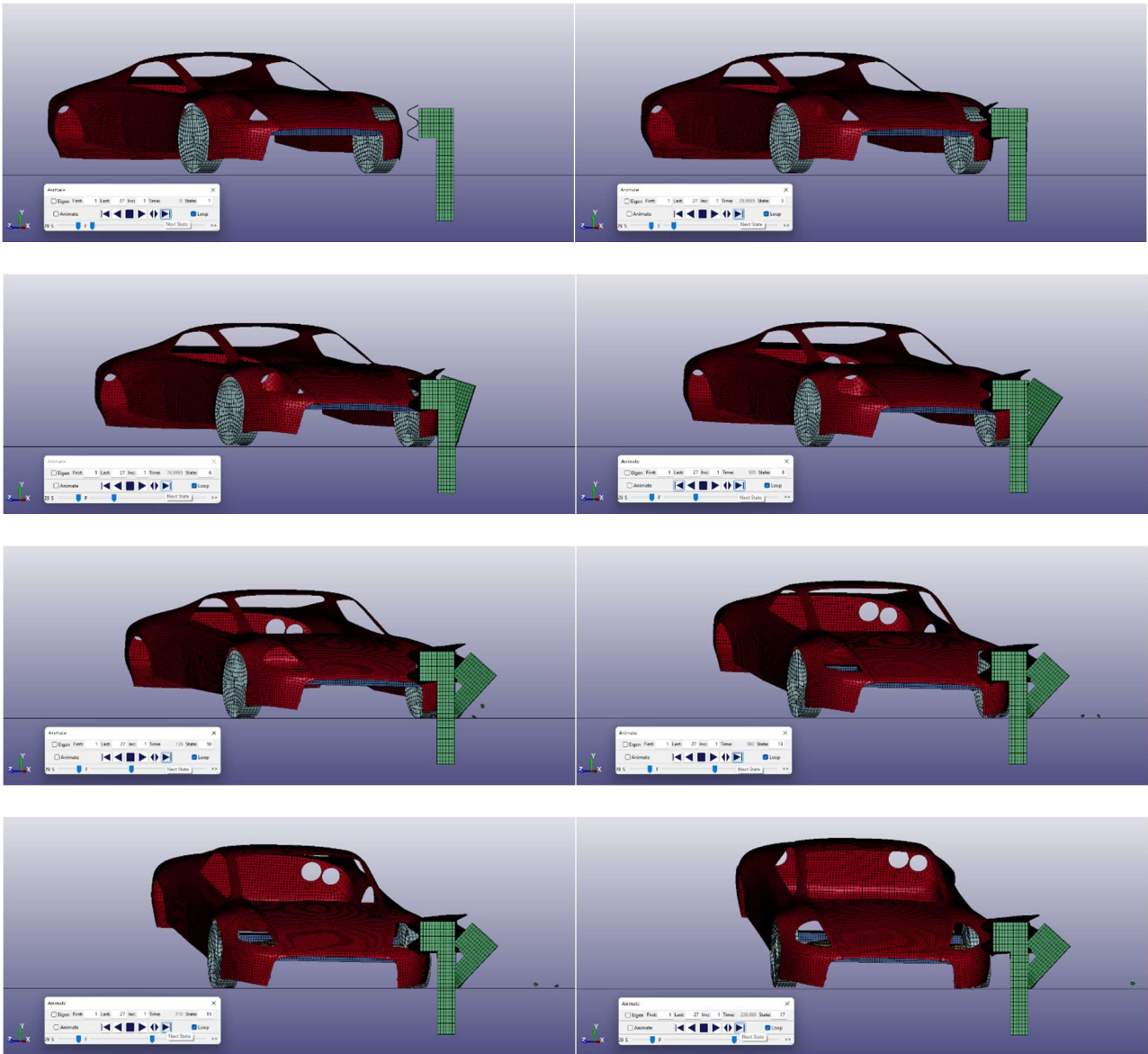


Figura 8.2.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,240 secondi

Analogamente a quanto eseguito nel caso studio precedente, si riportano di seguito poi i diagrammi relativi rispettivamente all'intrusione del mezzo nel sistema di contenimento secondo le due componenti del piano X – Z, alle forze generate tra i due sistemi, alle accelerazioni ed alle velocità proprie del veicolo che subisce nell'arco dell'intero tempo della simulazione.

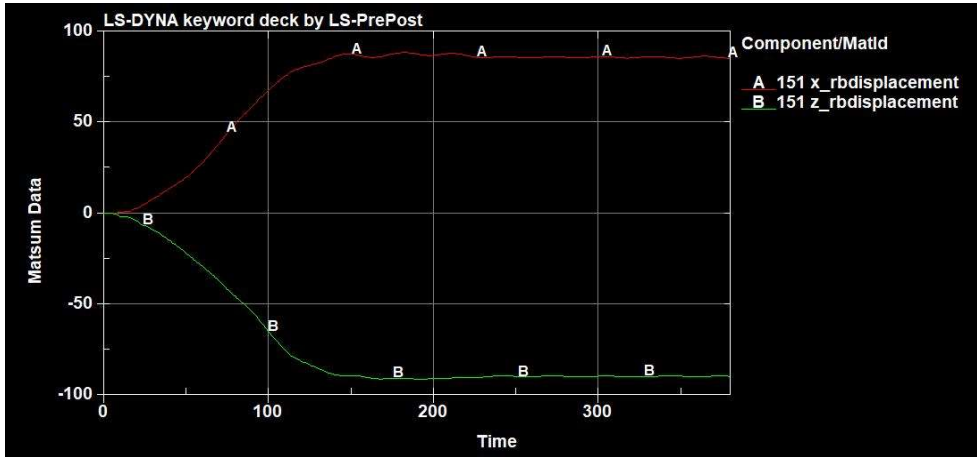


Diagramma 8.2.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo

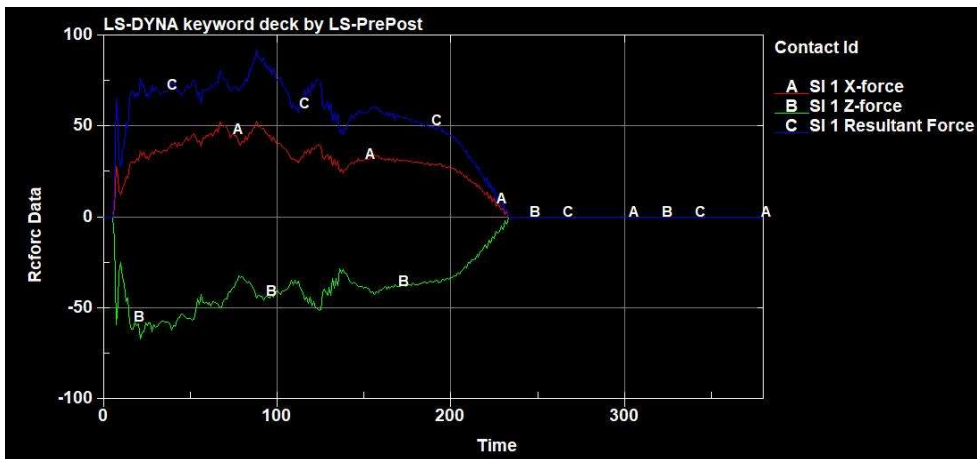


Diagramma 8.2.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 87 kN, circa 8'871 kgf.

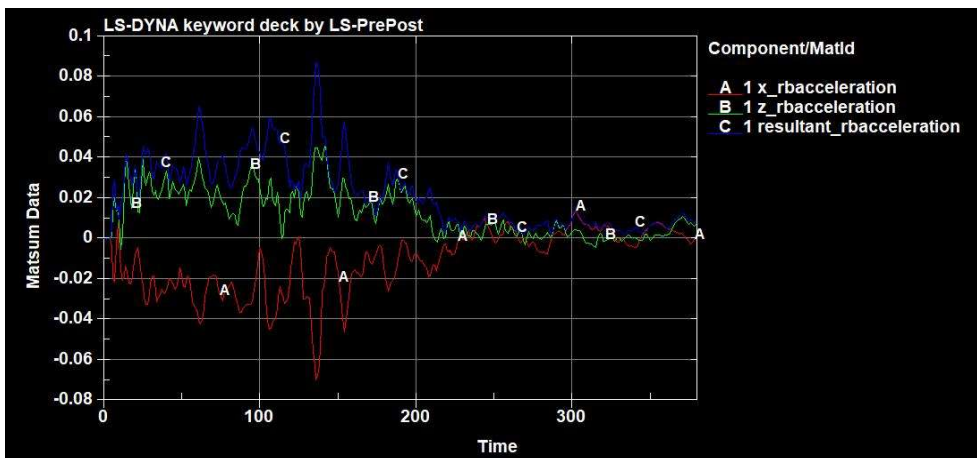


Diagramma 8.2.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante con valore massimo pari a $0,087 \text{ mm/ms}^2$, ovvero 87 m/s^2 , circa $8,87 \text{ g}$.

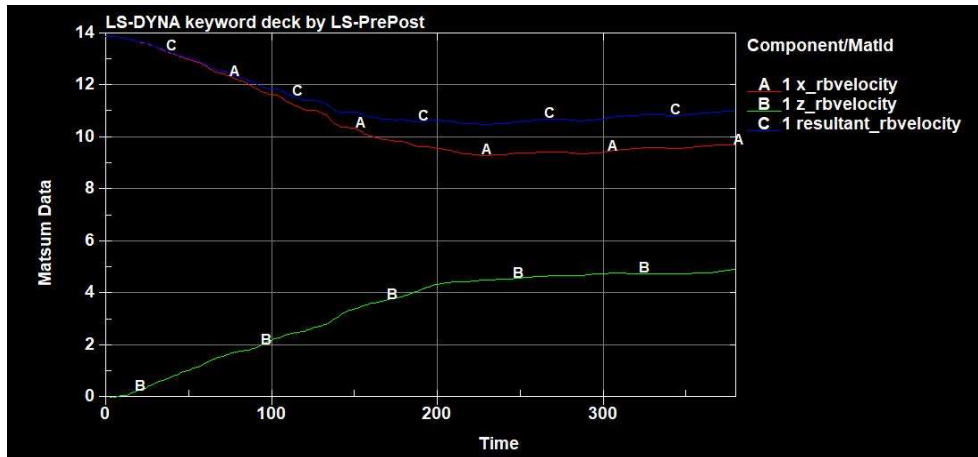


Diagramma 8.2.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.3. Caso Studio 1.c.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 16,67 m/s, ovvero 60 km/h, con un'inclinazione pari a 25° rispetto alla longitudinale del guardrail.

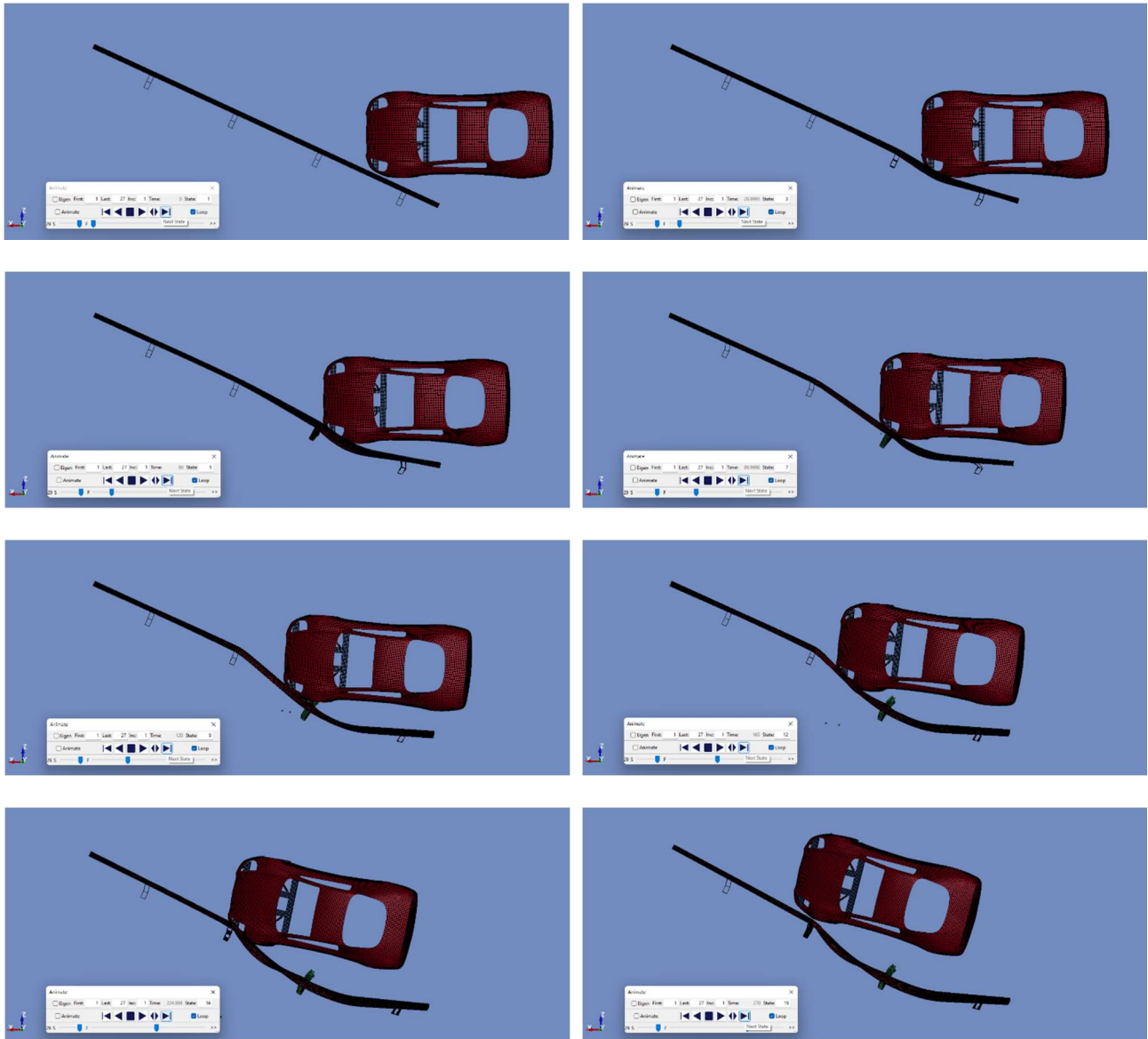


Figura 8.3.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0270 secondi

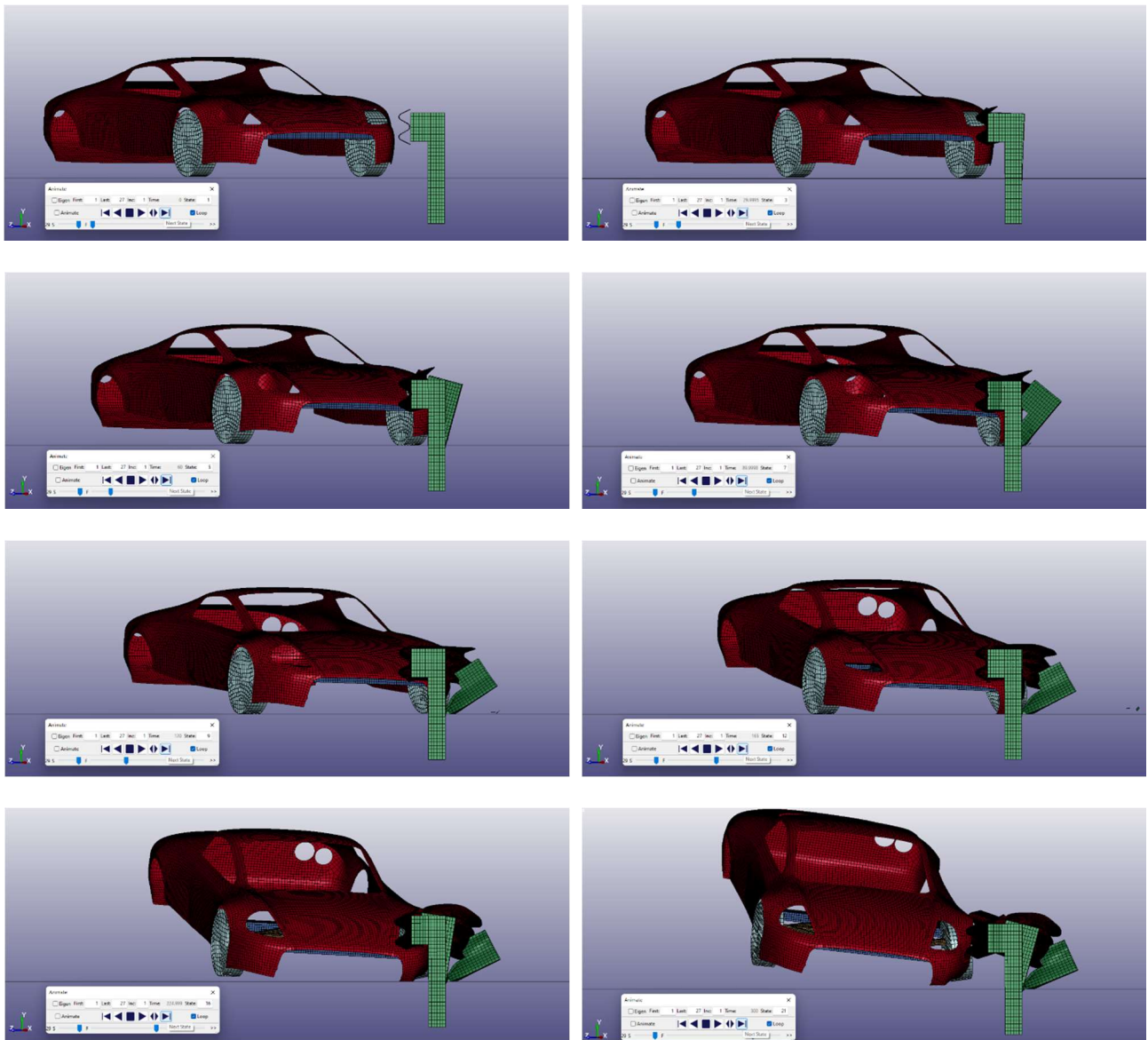


Figura 8.3.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,300 secondi

In questa terza simulazione in cui l'angolo d'impatto è rimasto fisso ma si è incrementata la velocità del mezzo si può osservare come il veicolo abbia mantenuto un contatto più prolungato con la barriera, fatto giustificato dalla maggiore quantità d'energia che quest'ultima è chiamata a soddisfare. Il veicolo è stato comunque reindirizzato verso l'interno della carreggiata anche se con un rollio più importante conseguente ad un momento maggiore generatosi successivamente all'urto che ha portato ad una minore stabilità della parte dinamica della suddetta prova.

Passando all'esposizione dei diagrammi e grafici relativa a suddetta simulazione:

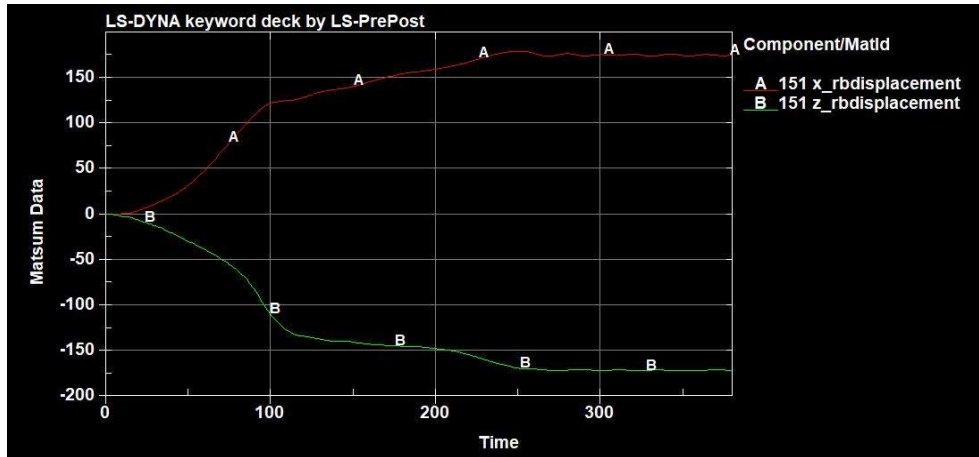


Diagramma 8.3.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo

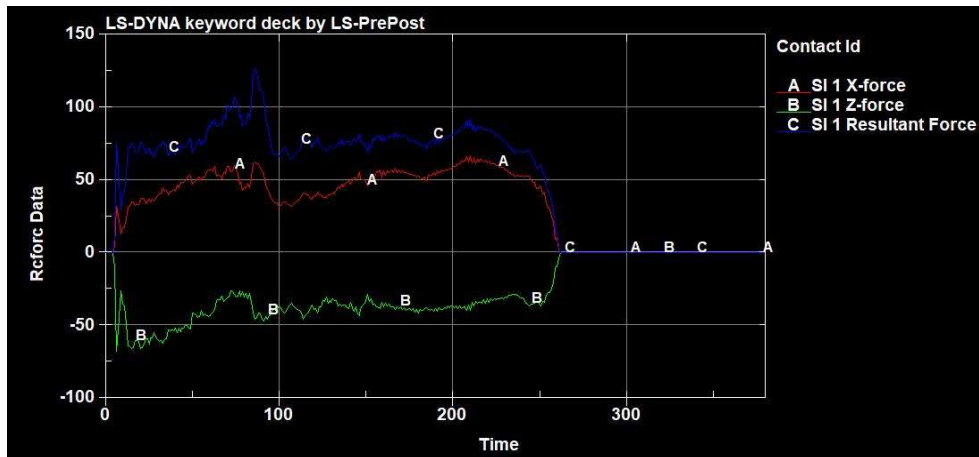


Diagramma 8.3.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 125 kN, circa 12'746 kgf.

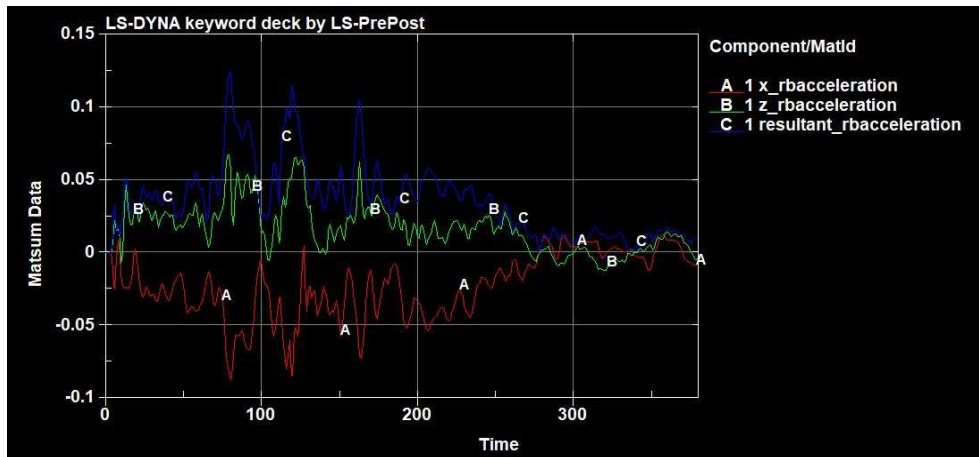


Diagramma 8.3.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante con valore massimo pari a $0,125 \text{ mm/ms}^2$, ovvero 125 m/s^2 , circa $12,75 \text{ g}$.

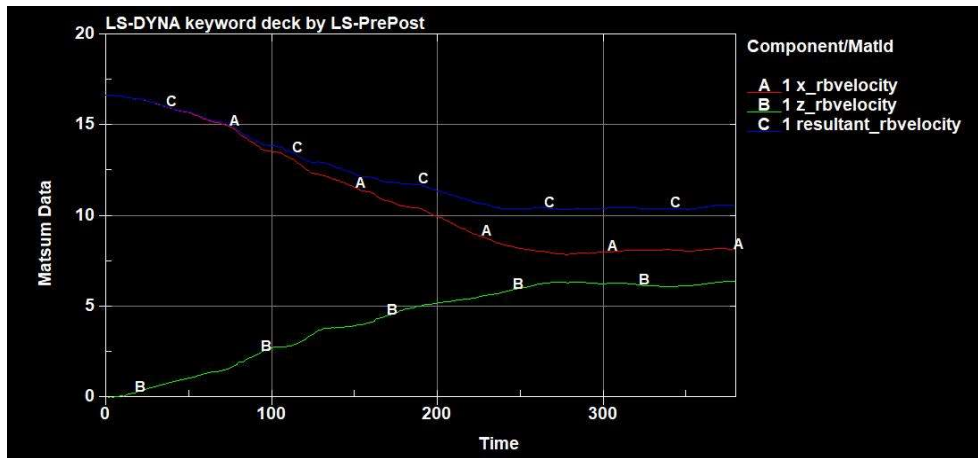


Diagramma 8.3.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.4. Caso Studio 1.d.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 19,44 m/s, ovvero 70 km/h, con un'inclinazione pari a 25° rispetto alla longitudinale del guardrail.

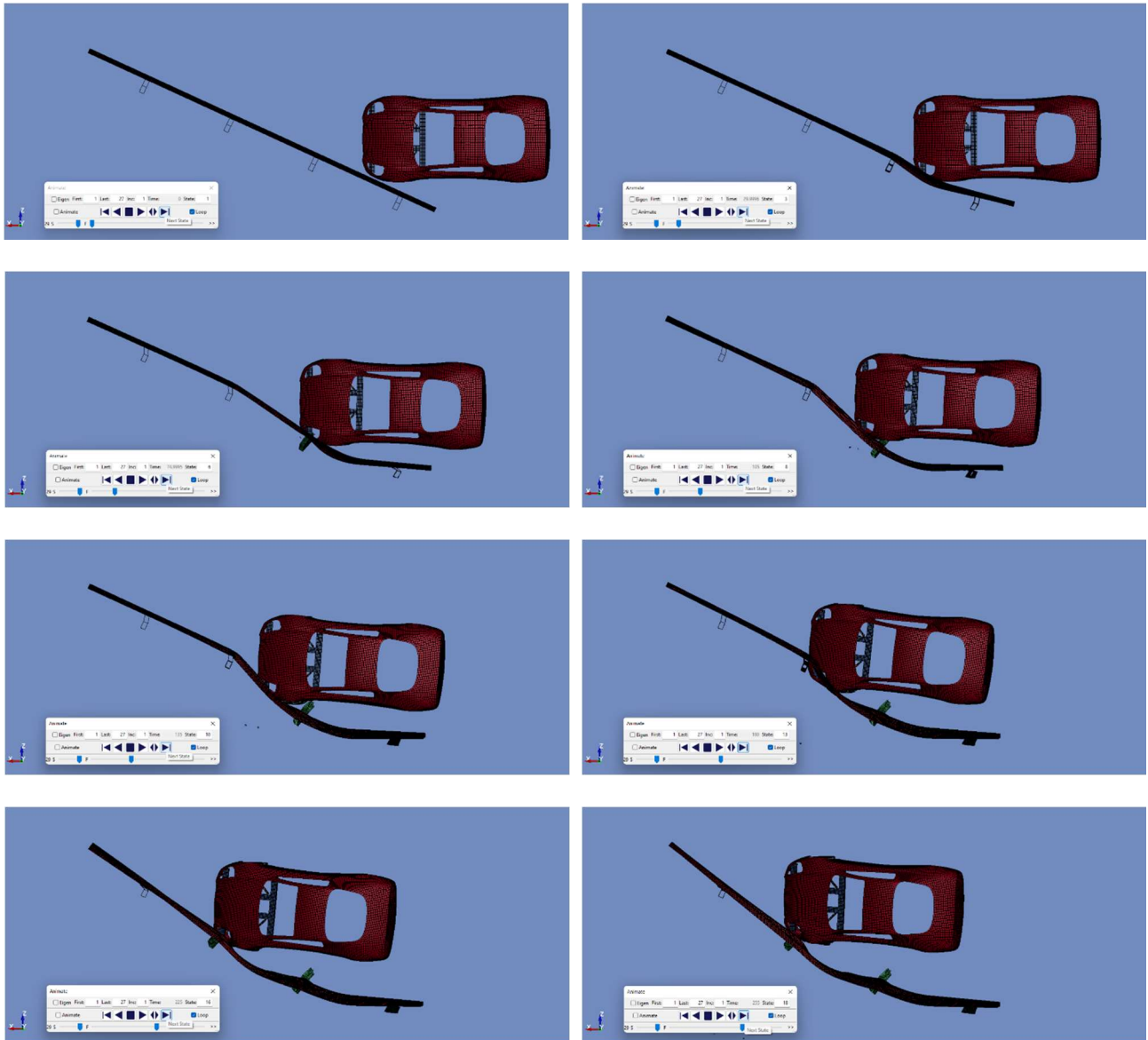


Figura 8.4.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,255 secondi

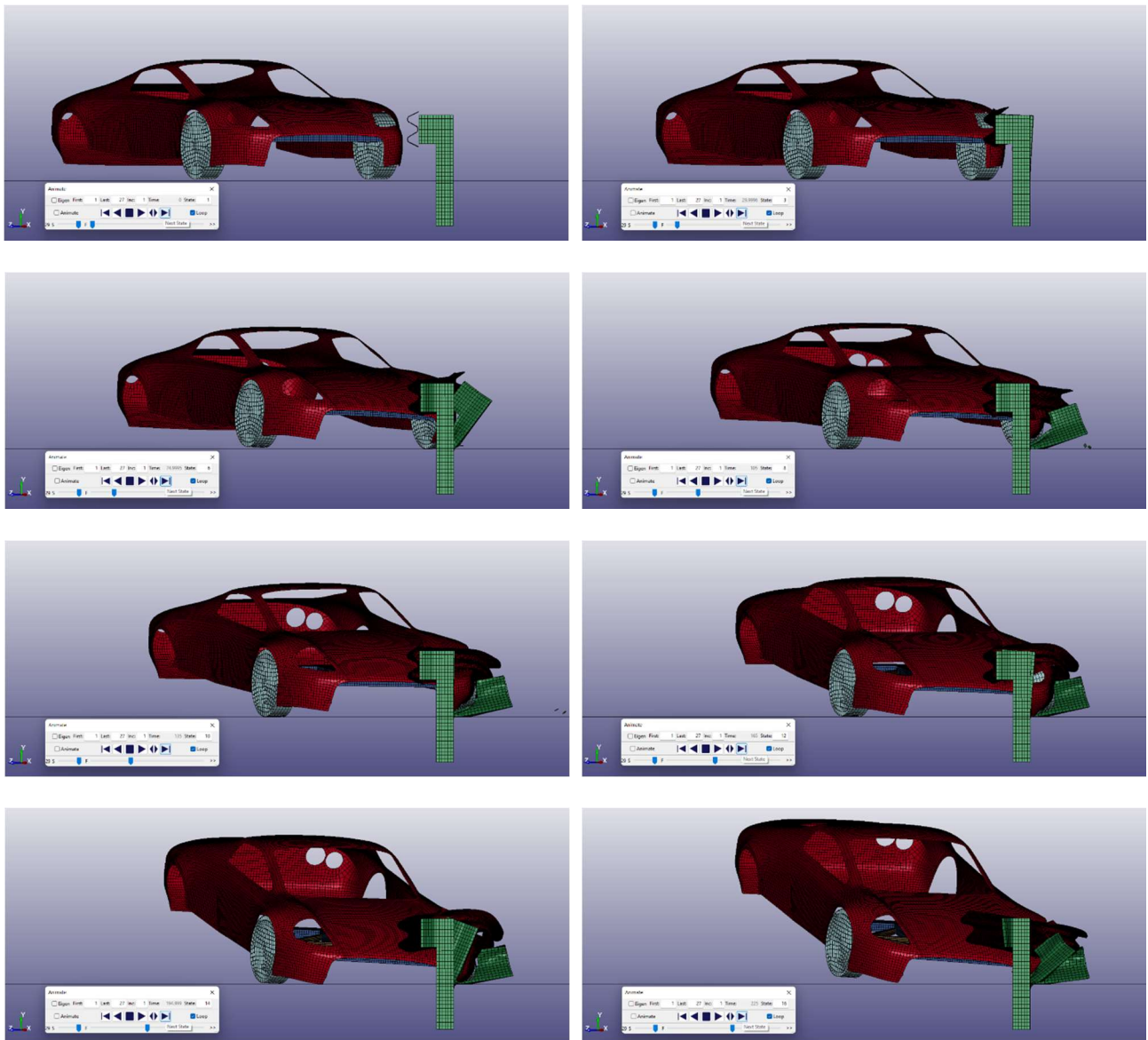


Figura 8.4.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,225 secondi

L'aumento della velocità del veicolo e l'incremento dell'angolazione di quest'ultimo con il guardrail ha generato, in tale simulazione, una deformazione del sistema di ritenuta più severa rispetto alle analisi precedenti.

Al termine della simulazione, osservando anche solo il danneggiamento della barriera (riferimento a Fig. 8.4.1), è possibile notare come essa presenti l'arresto della sua deformata in corrispondenza del terzo paletto di sostegno modellato. In corrispondenza di tale punto d'appoggio viene dunque a

generarsi un incremento della resistenza offerta dalla barriera in quanto quest'altro elemento verticale contribuisce ad arrestare la corsa del veicolo.

Trattasi di un aspetto delicato in quanto i pali di sostegno devono risultare gradualmente cedevoli senza portare all'arresto improvviso del mezzo che li dovesse urtare direttamente, in quanto si genererebbero delle decelerazioni sugli occupanti eccessive. L'obiettivo della trattazione risulta difatti essere rivolto ad uno studio di attenuazione e mitigazione delle forze in gioco durante un impatto con i sistemi di ritenuta stradali.

In questo caso studio specifico, tuttavia, anche dai diagrammi di accelerazione non si sono registrati valori anomali o eccessivi legati a tale aspetto, ma è possibile apprezzare un secondo picco delle accelerazioni nel diagramma dedicato (figura 8.4.3) caratterizzato da un valore addirittura maggiore di quello di primo contatto con la barriera; ciò è dovuto al fatto che quest'ultimo è mirato proprio a reindirizzare il veicolo secondo una componente d'impatto inclinata, comportando dei valori di accelerazioni relativamente dolci, mentre l'urto con il palo di sostegno, essendo quest'ultimo verticale e trovandosi su una traiettoria più diretta col veicolo, il quale per inerzia ha già deformato la doppia onda, genera un impatto più diretto, con conseguente maggiore rilascio energetico ed arrestando la corsa del veicolo in maniera più istantanea.

Analogamente a quanto eseguito nei casi studio precedenti, si riportano di seguito poi i diagrammi relativi rispettivamente all'intrusione del mezzo nel sistema di contenimento secondo le due componenti del piano X – Z, alle forze generate tra i due sistemi, alle accelerazioni ed alle velocità proprie del veicolo che subisce nell'arco dell'intero tempo della simulazione.

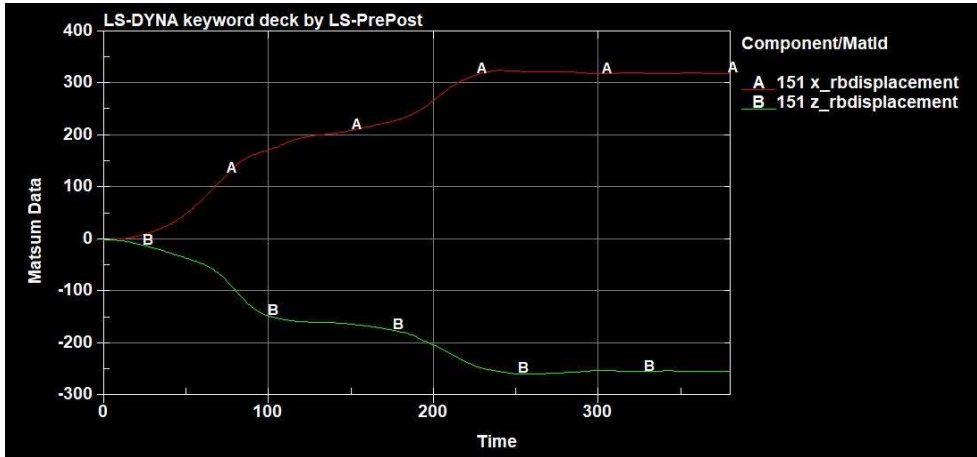


Diagramma 8.4.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo

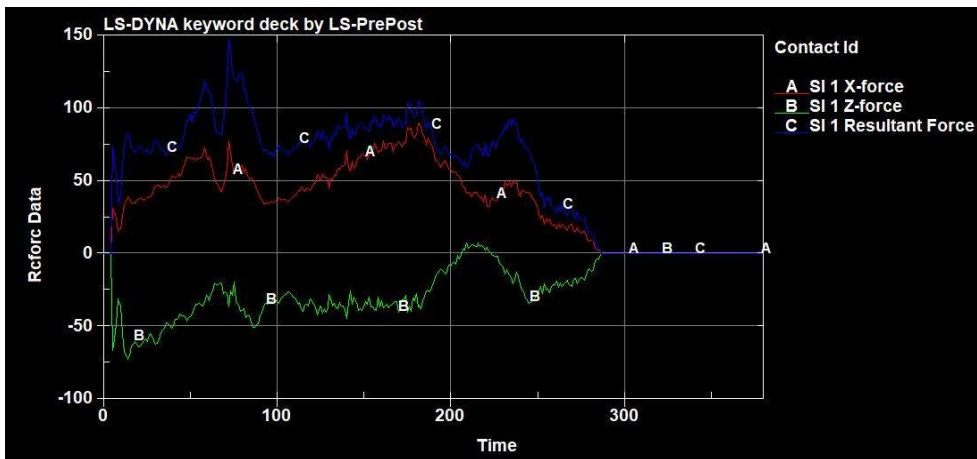


Diagramma 8.4.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X-Z e la loro risultante con valore massimo pari a 150 kN, circa 15'295 kgf.

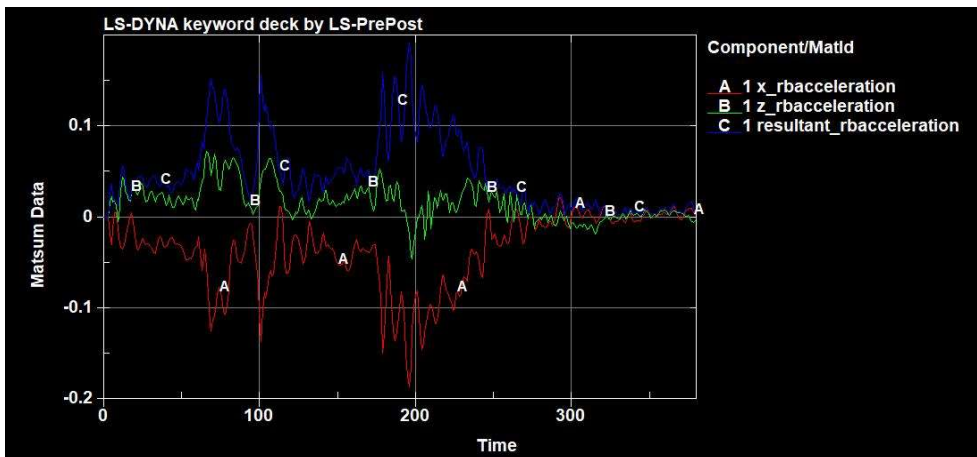


Diagramma 8.4.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante con valore medio massimo pari a 0,15 mm/ms², ovvero 150 m/s², circa 15,30 g.

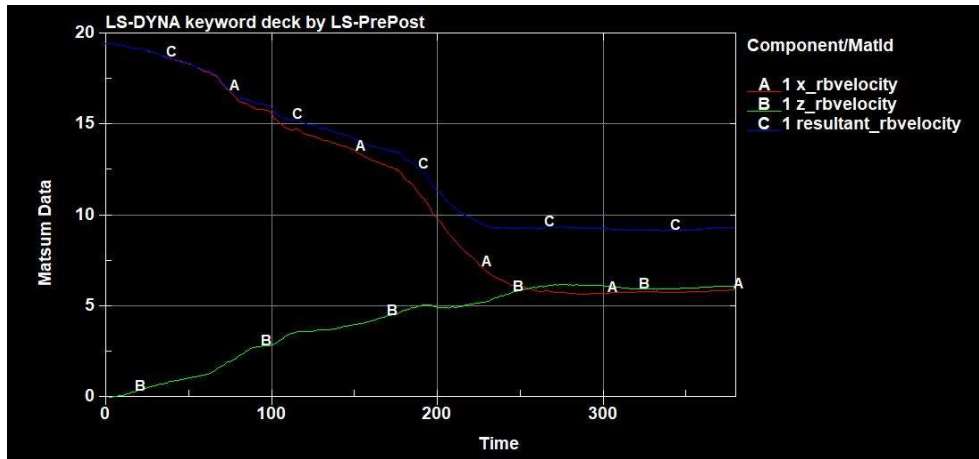


Diagramma 8.4.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.5. Caso Studio 2.a.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 8,33 m/s, ovvero 30 km/h, con un'inclinazione pari a 30° rispetto alla longitudinale del guardrail.

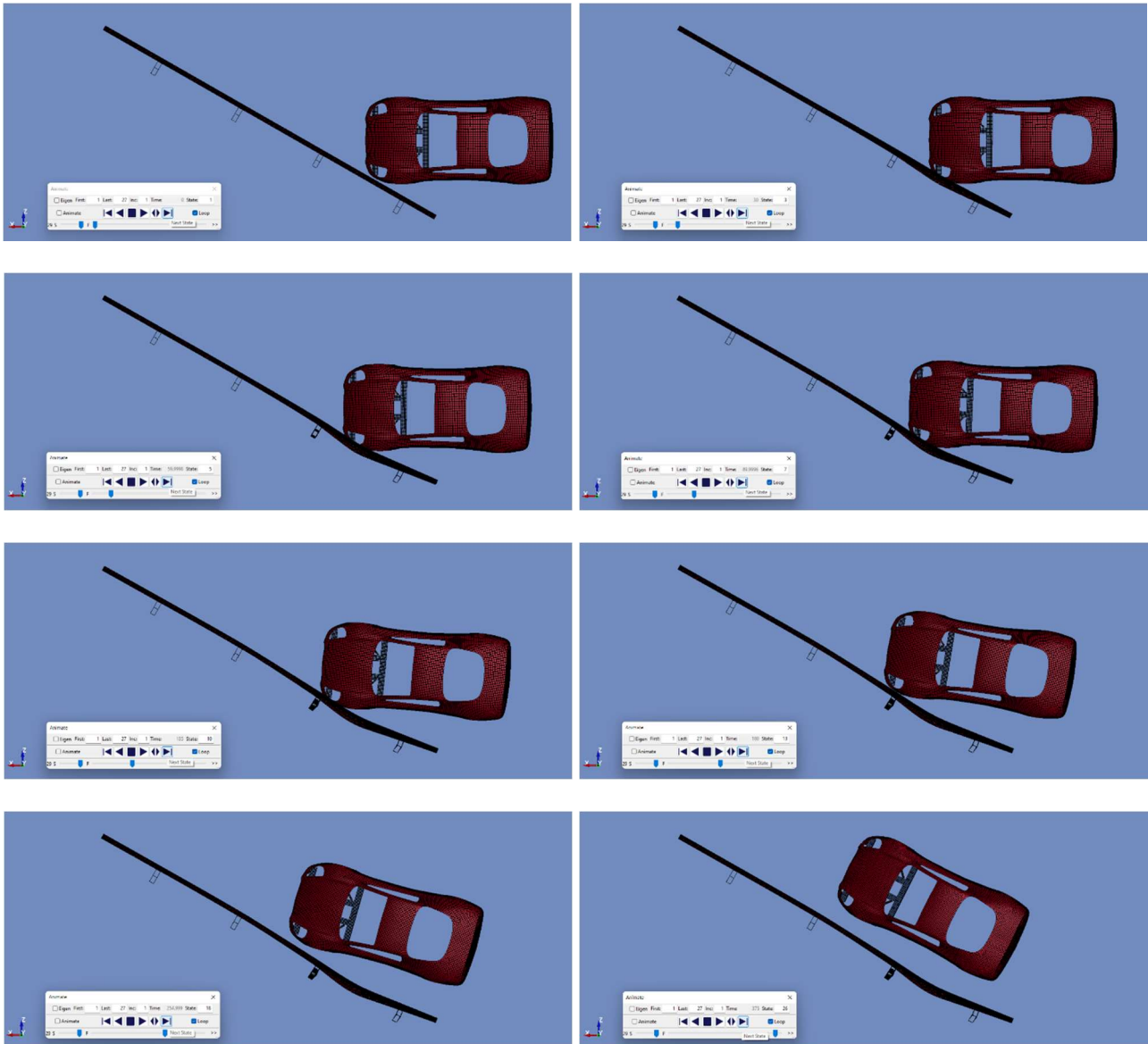
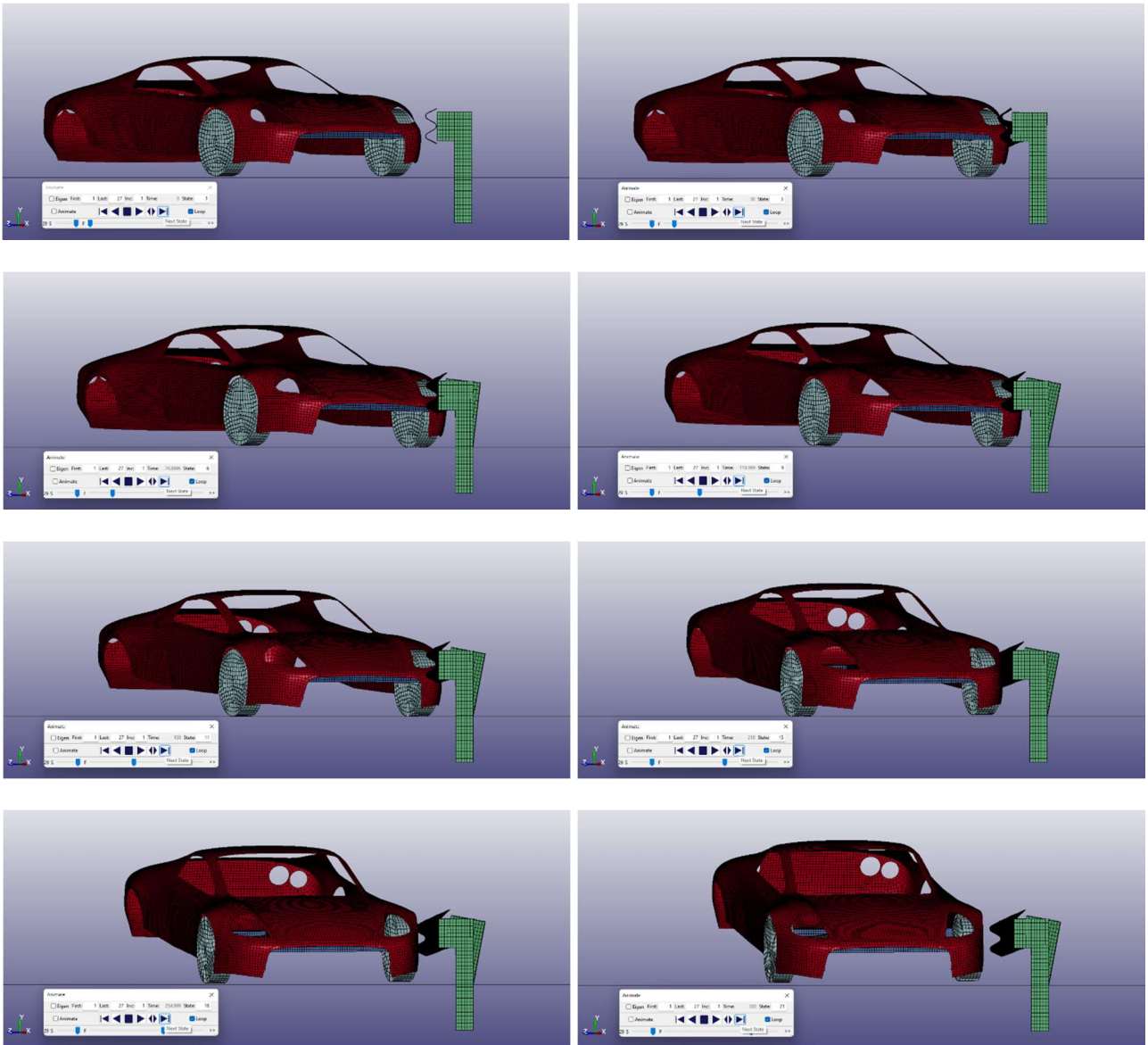


Figura 8.5.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,375 secondi



*Figura 8.5.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal
frame 0,000 secondi al frame 0,300 secondi*

Passando all'esposizione dei diagrammi e grafici relativa a suddetta simulazione:

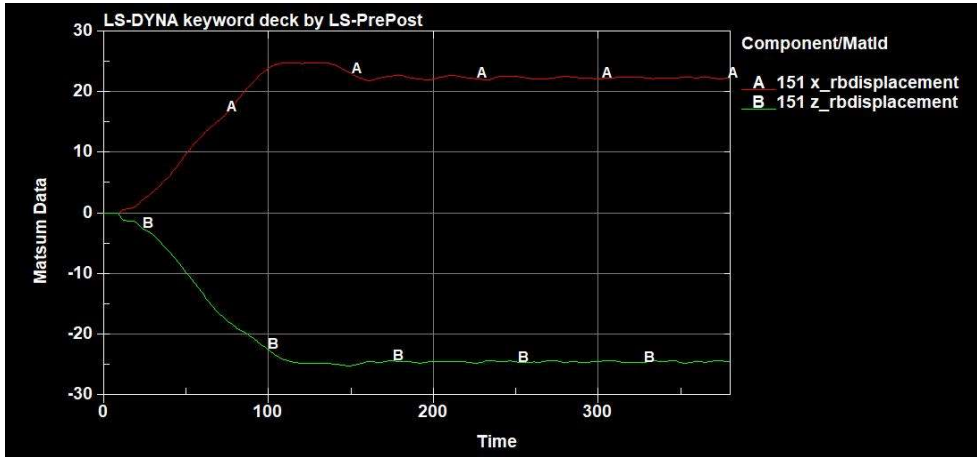


Diagramma 8.5.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo

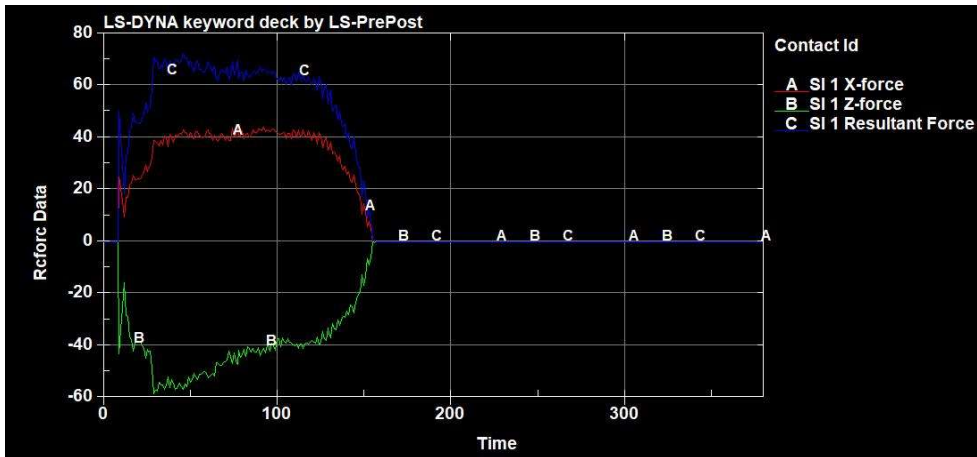


Diagramma 8.5.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 70 kN, circa 7'138 kgf.

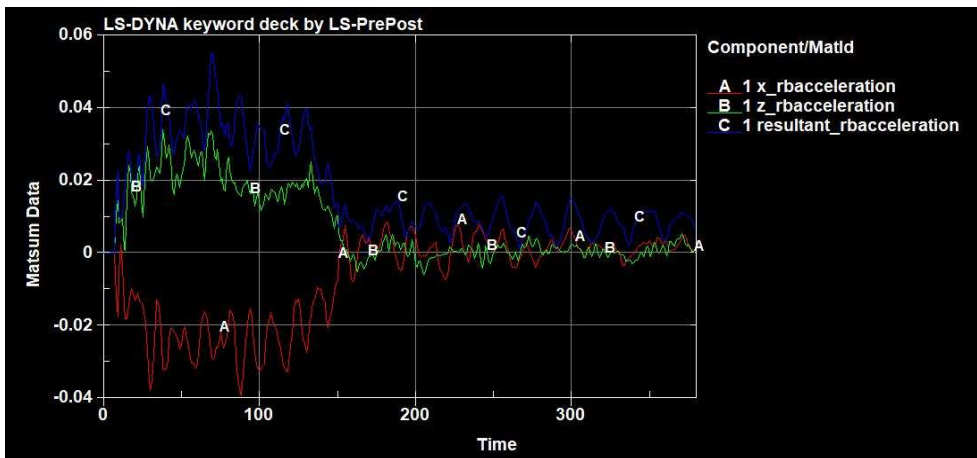


Diagramma 8.5.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,055 mm/ms², ovvero 55 m/s², circa 5,61 g.

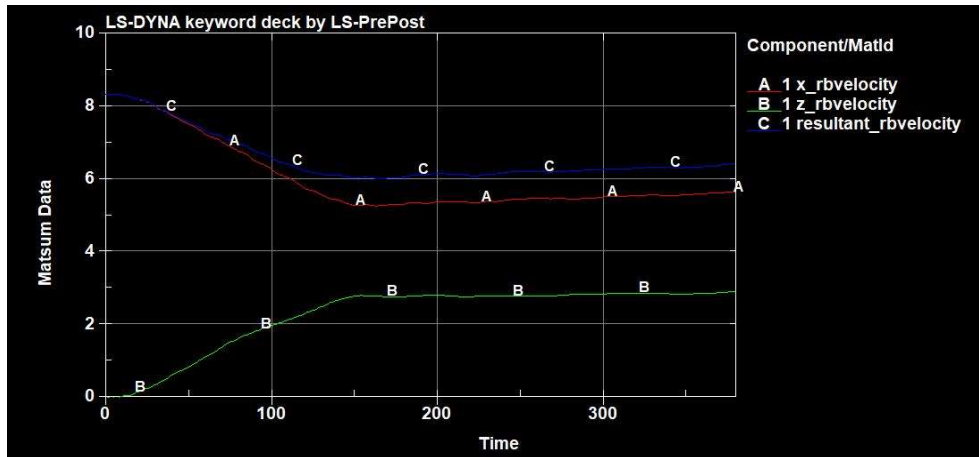


Diagramma 8.5.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.6. Caso Studio 2.b.

In questa simulazione si è adottata una velocità del mezzo pari a 13,89 m/s, ovvero 50 km/h, ed un'inclinazione pari a 30° rispetto alla longitudinale del guardrail.

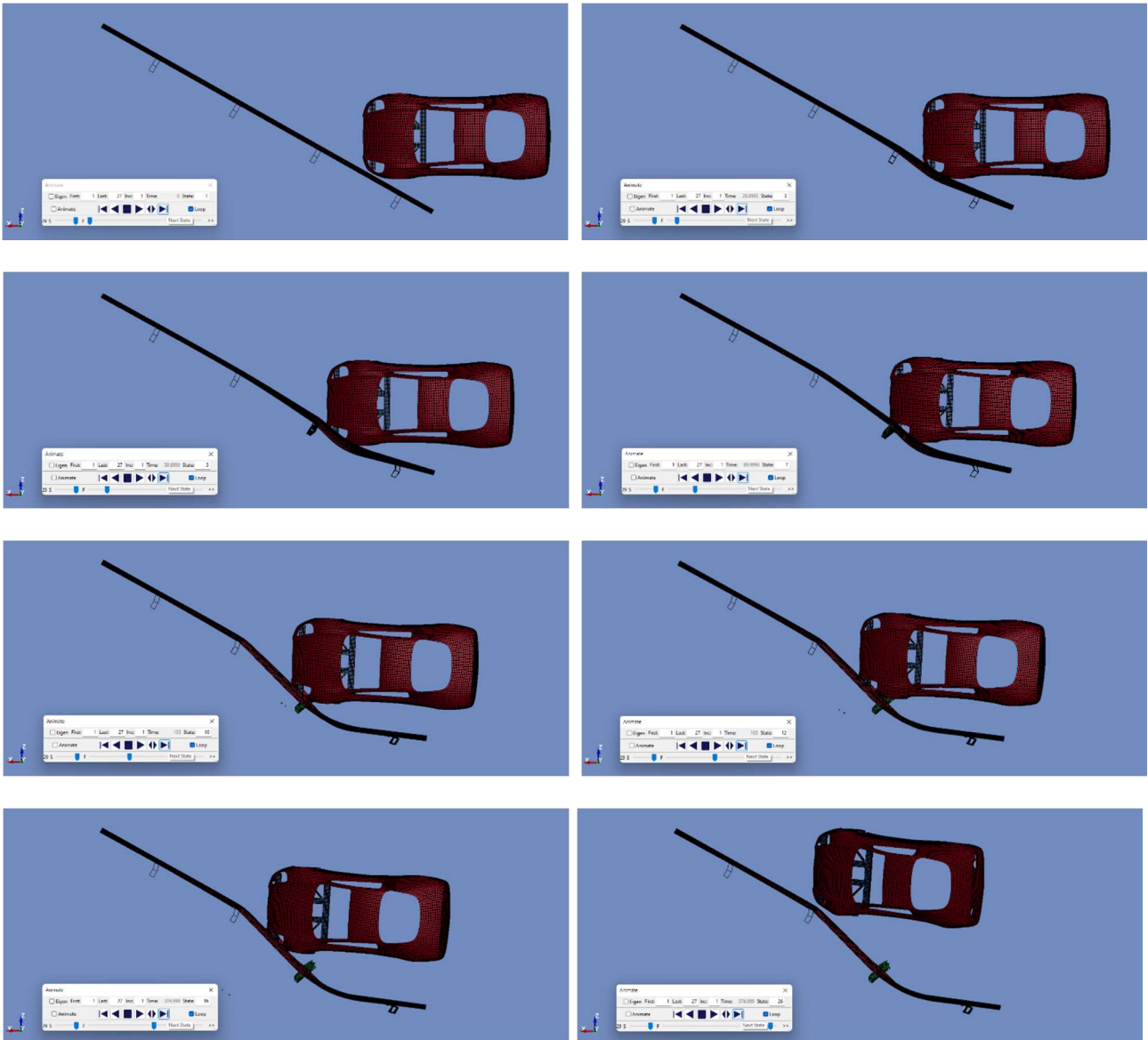
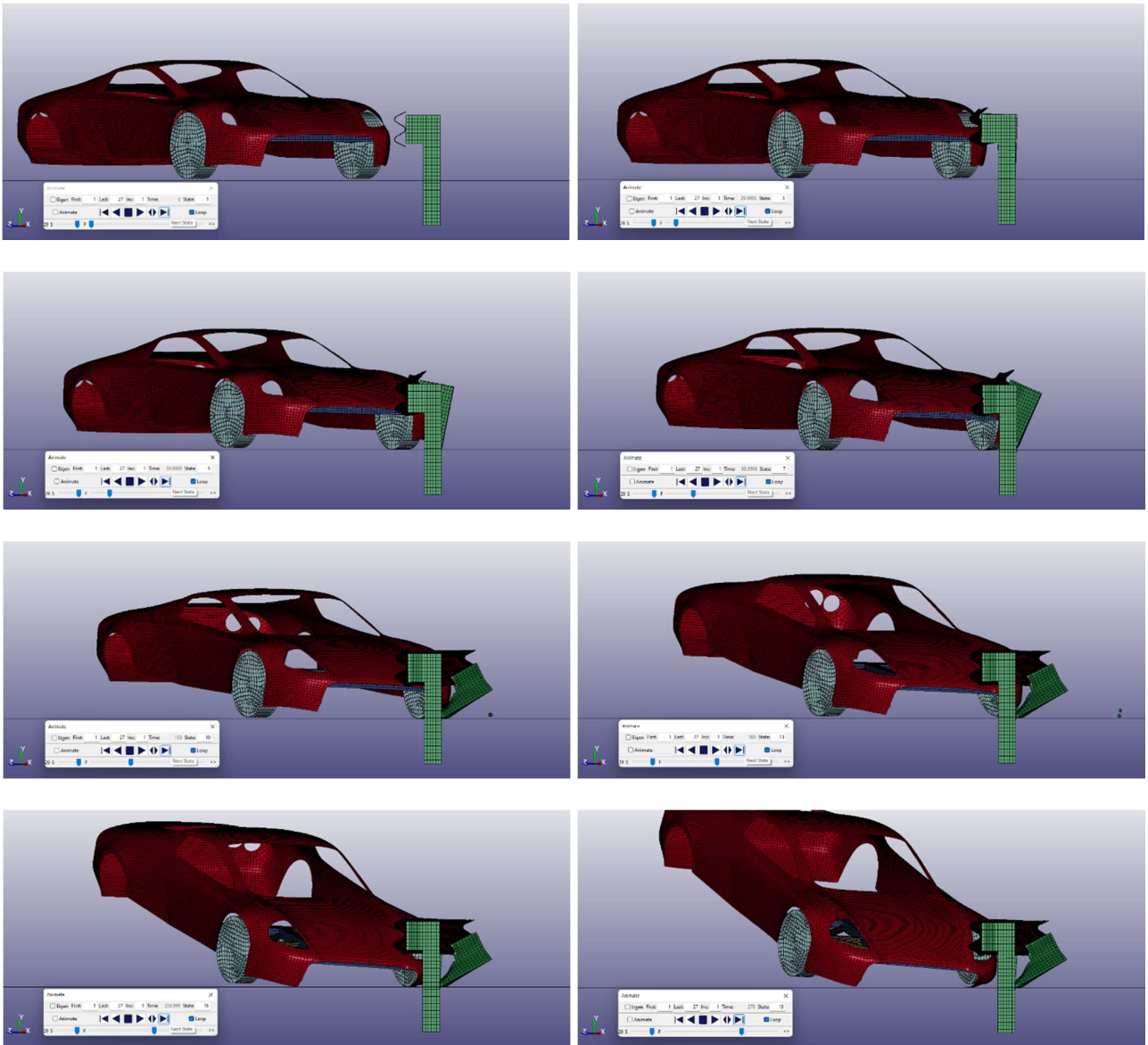


Figura 8.6.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,375 secondi



*Figura 8.6.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal
frame 0,000 secondi al frame 0,270 secondi*

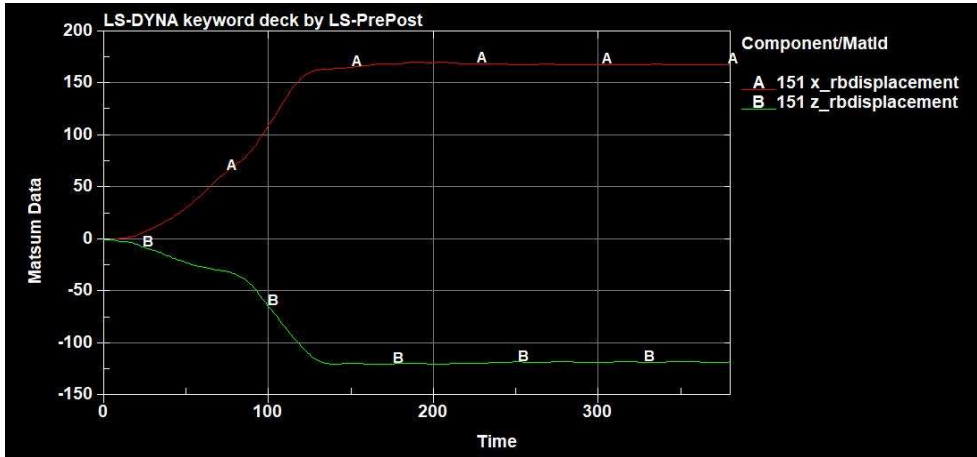


Diagramma 8.6.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

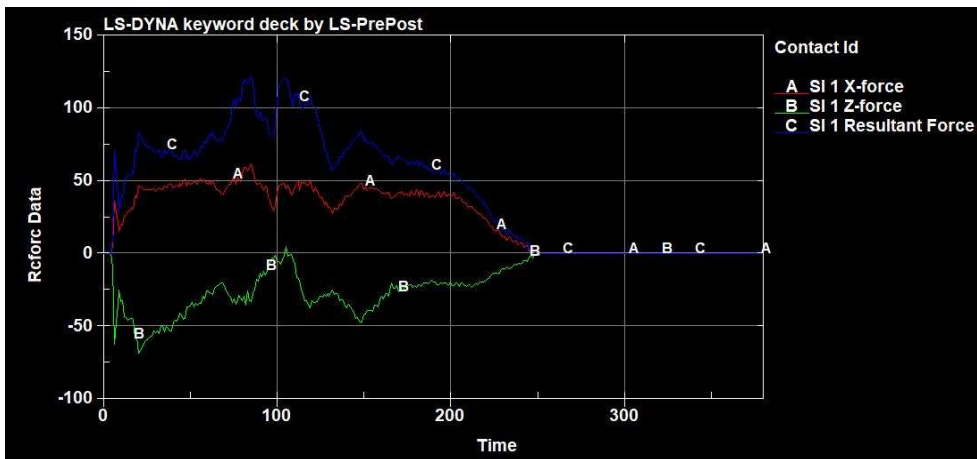


Diagramma 8.6.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 115 kN, circa 11'726 kgf.

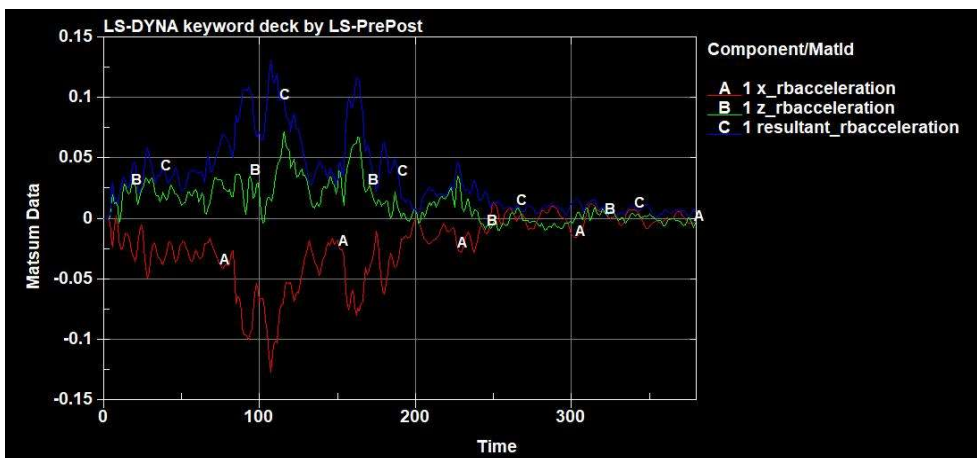


Diagramma 8.6.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore medio massimo pari a 0,092 mm/ms², ovvero 92 m/s², circa 9,38 g.

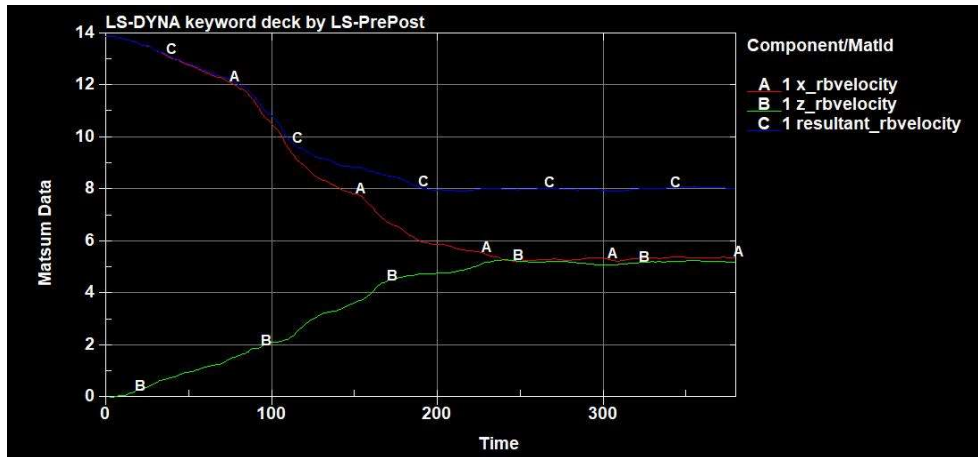


Diagramma 8.6.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.7. Caso Studio 2.c.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 16,67 m/s, ovvero 60 km/h, con un'inclinazione pari a 30° rispetto alla longitudinale del guardrail.

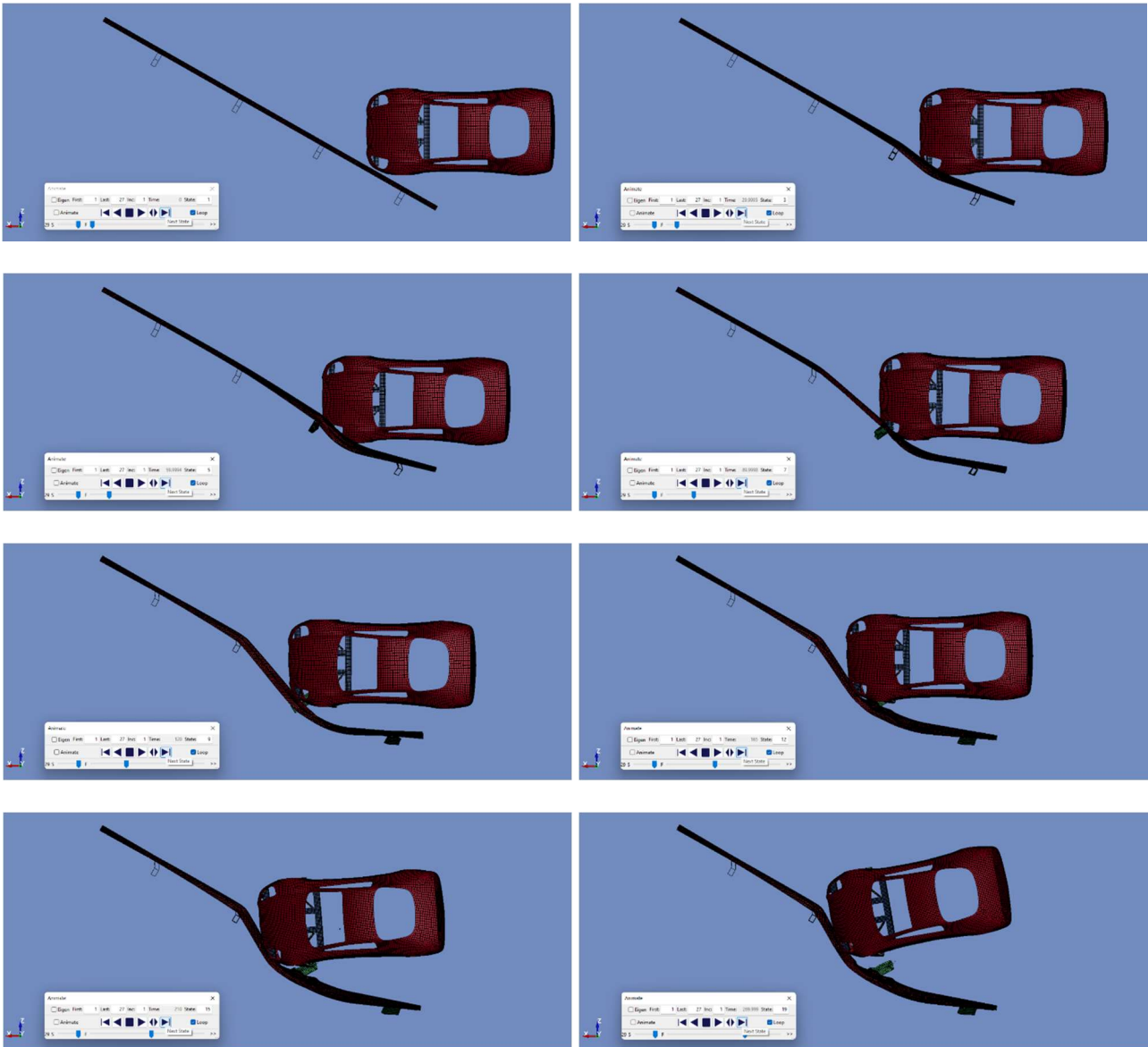
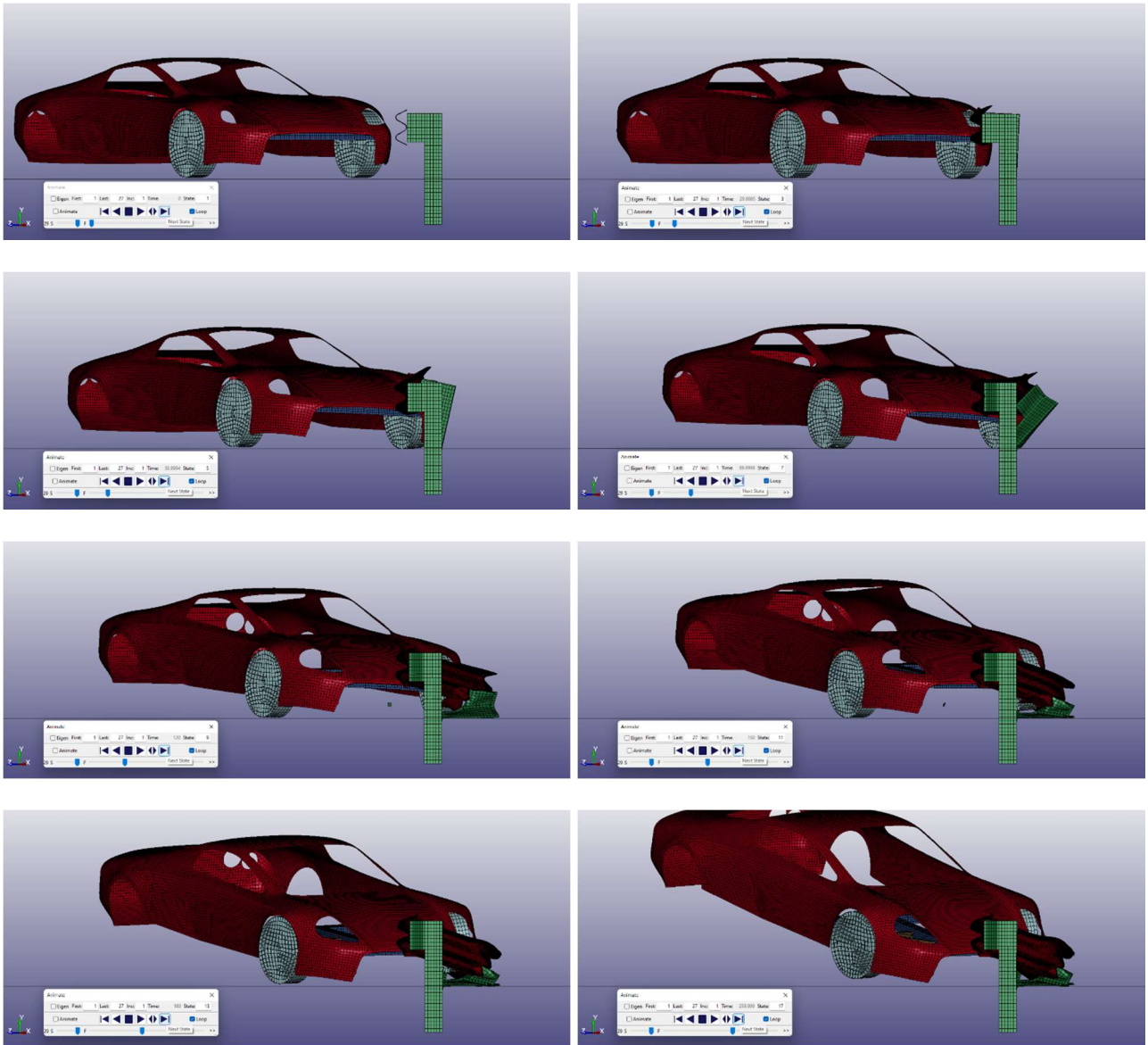


Figura 8.7.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,270 secondi



*Figura 8.7.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal
frame 0,000 secondi al frame 0,240 secondi*

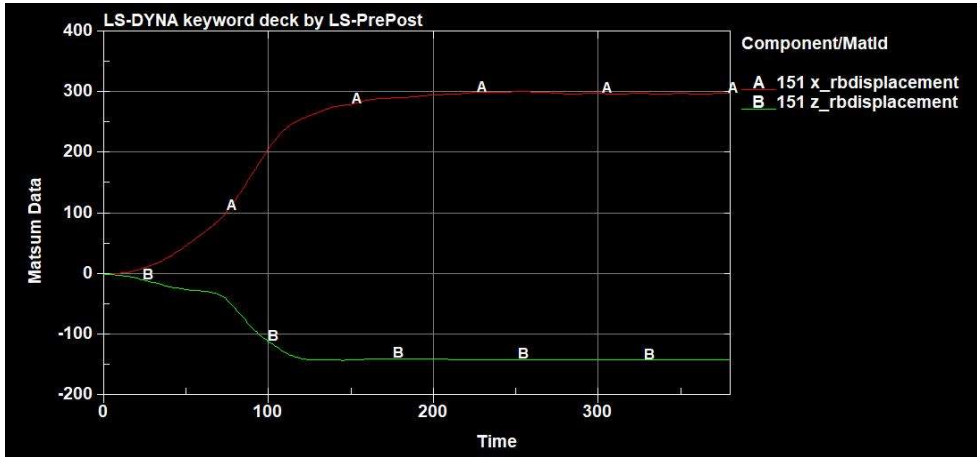


Diagramma 21: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

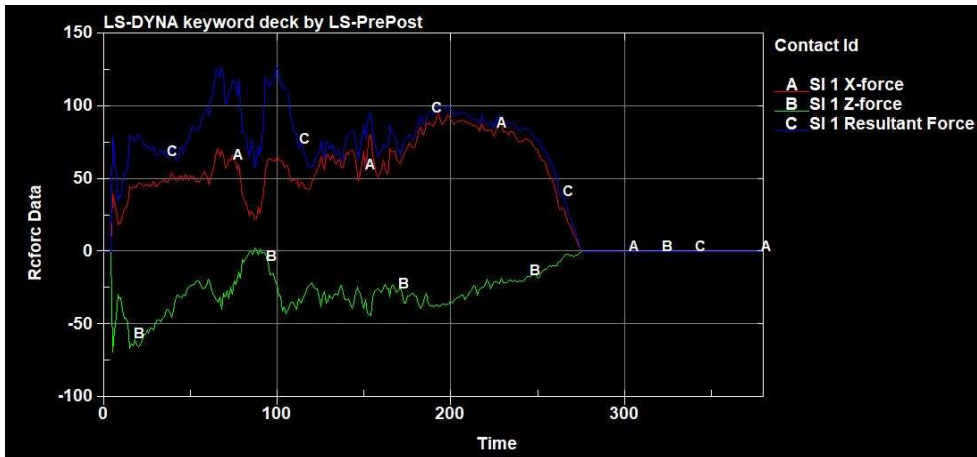


Diagramma 22: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 125 kN, circa 12'746 kgf.

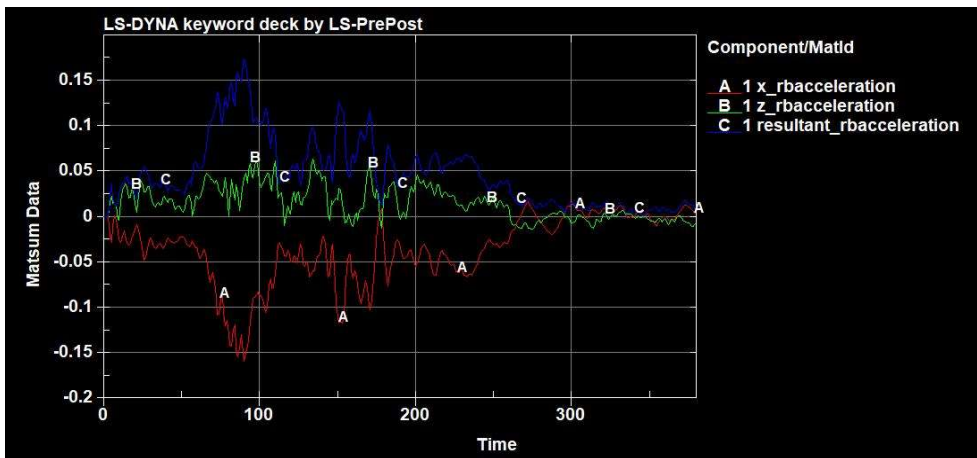


Diagramma 23: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,170 mm/ms², ovvero 170 m/s², circa 17,34 g.

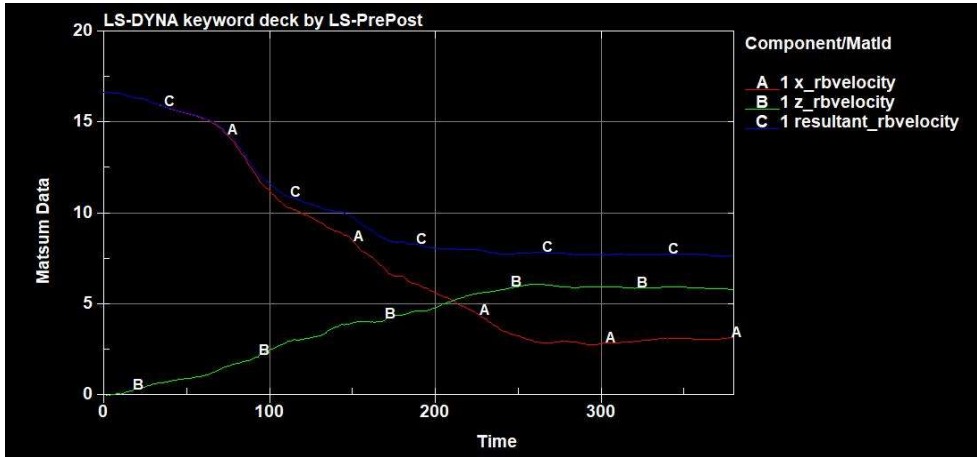


Diagramma 24: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X-Z e la loro risultante.

8.8. Caso Studio 2.d.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 19,44 m/s, ovvero 70 km/h, con un'inclinazione pari a 30° rispetto alla longitudinale del guardrail.

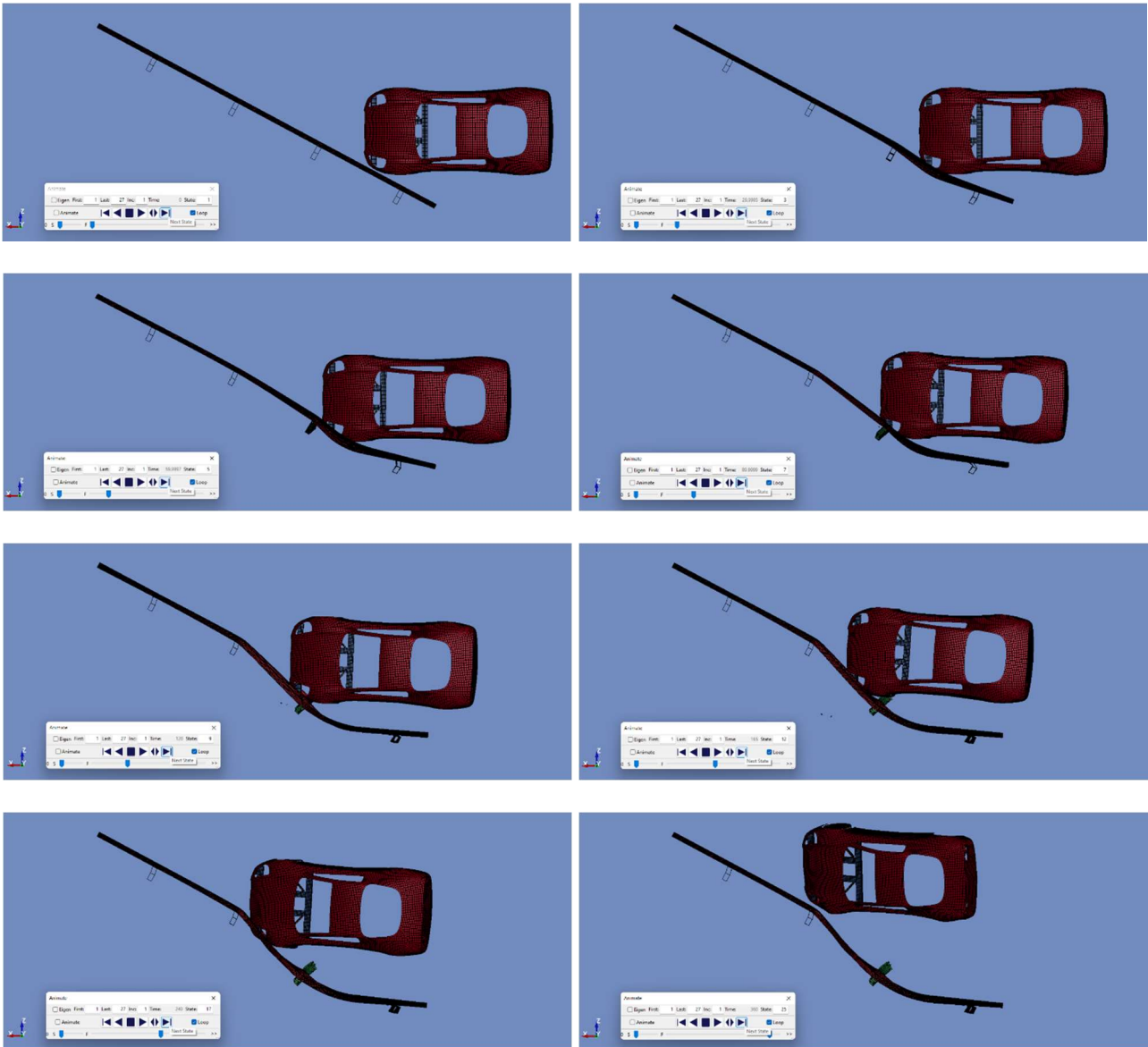


Figura 8.8.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,300 secondi

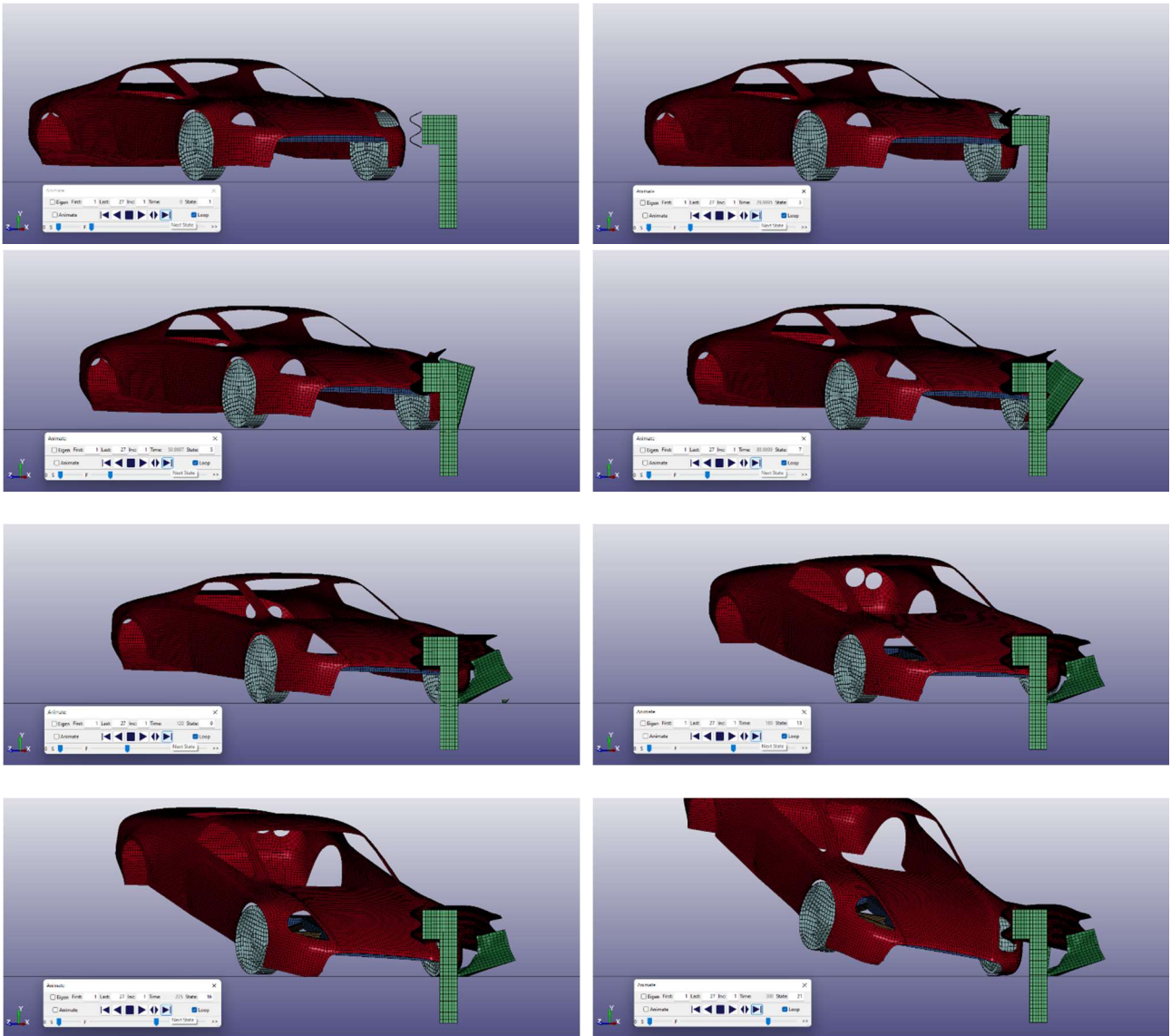


Figura 8.8.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,300 secondi

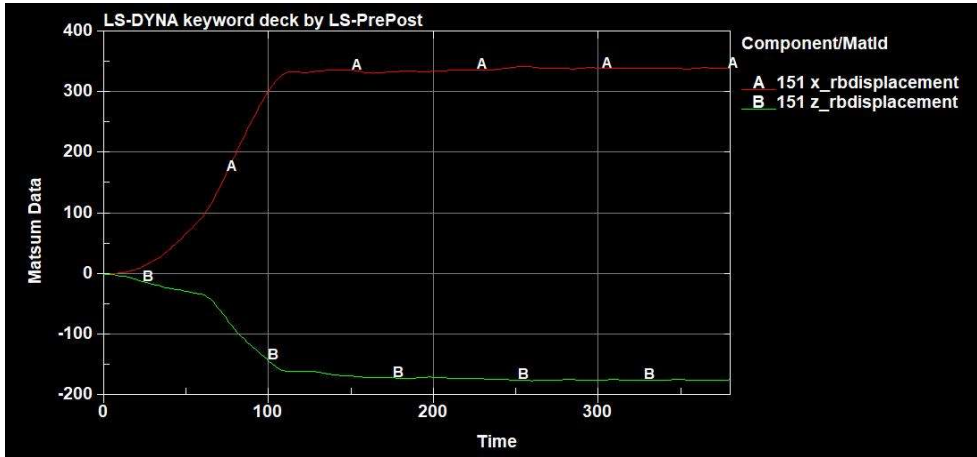


Diagramma 8.8.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

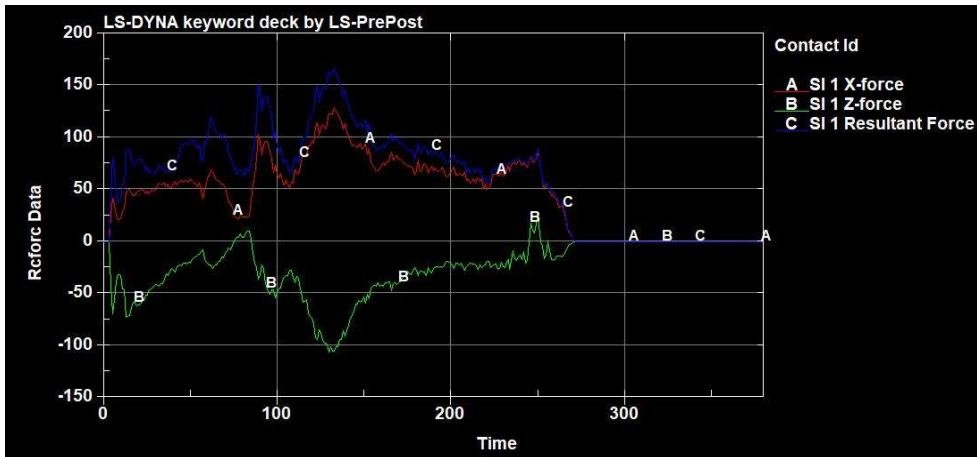


Diagramma 8.8.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 160 kN, circa 16'315 kgf.

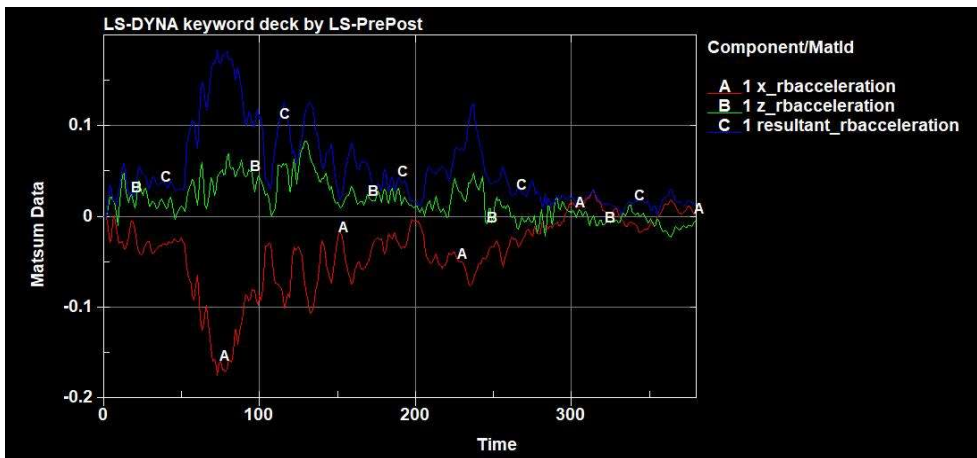


Diagramma 8.8.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,180 mm/ms², ovvero 180 m/s², circa 18,35 g.

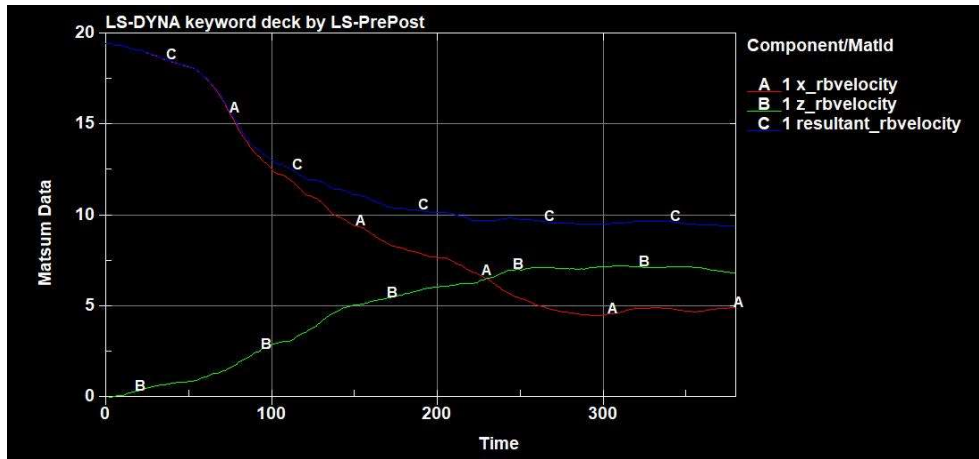


Diagramma 8.8.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X – Z e la loro risultante.

8.9. Caso Studio 3.a.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 8,33 m/s, ovvero 30 km/h, con un'inclinazione pari a 35° rispetto alla longitudinale del guardrail.

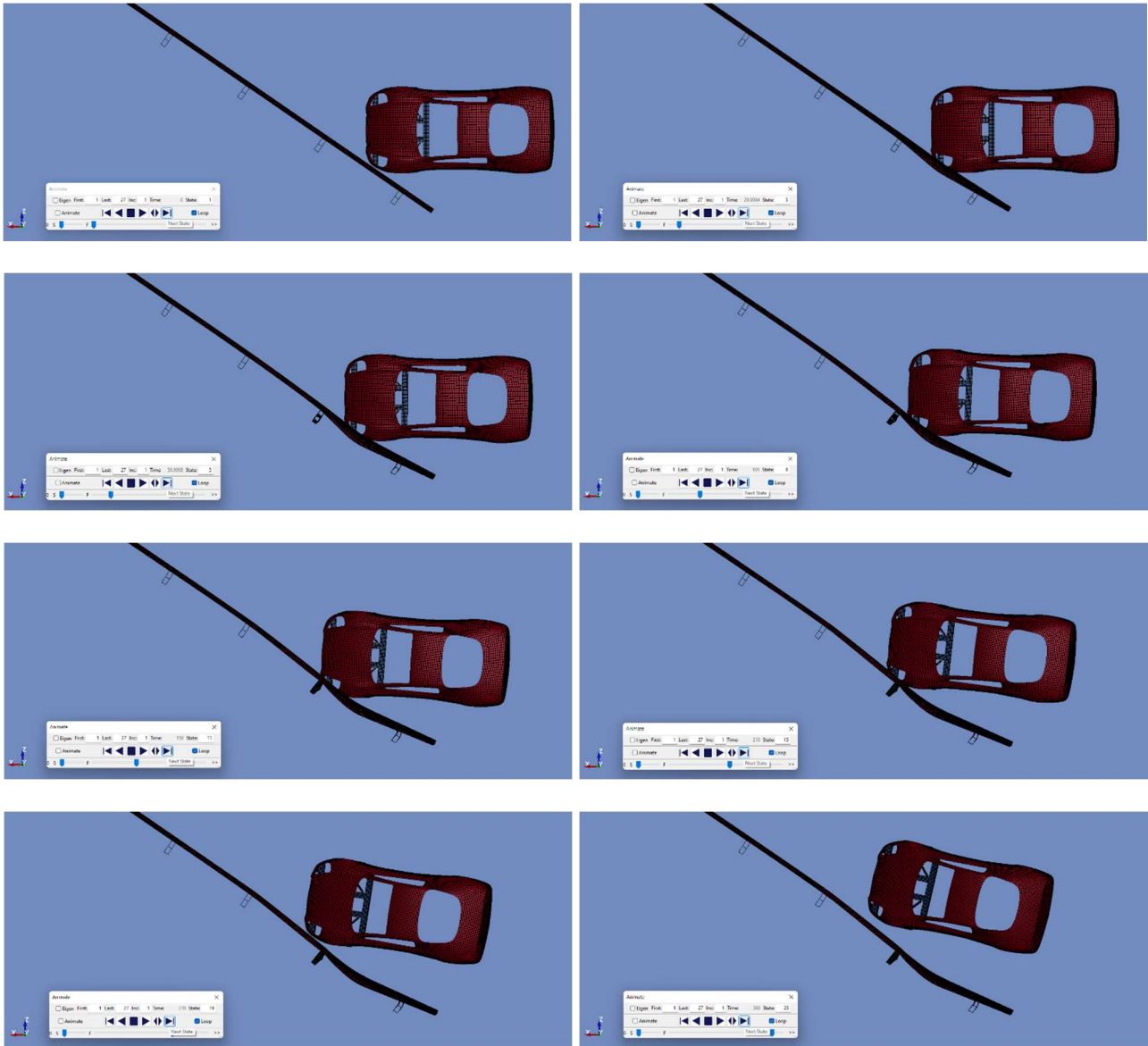


Figura 8.9.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,360 secondi

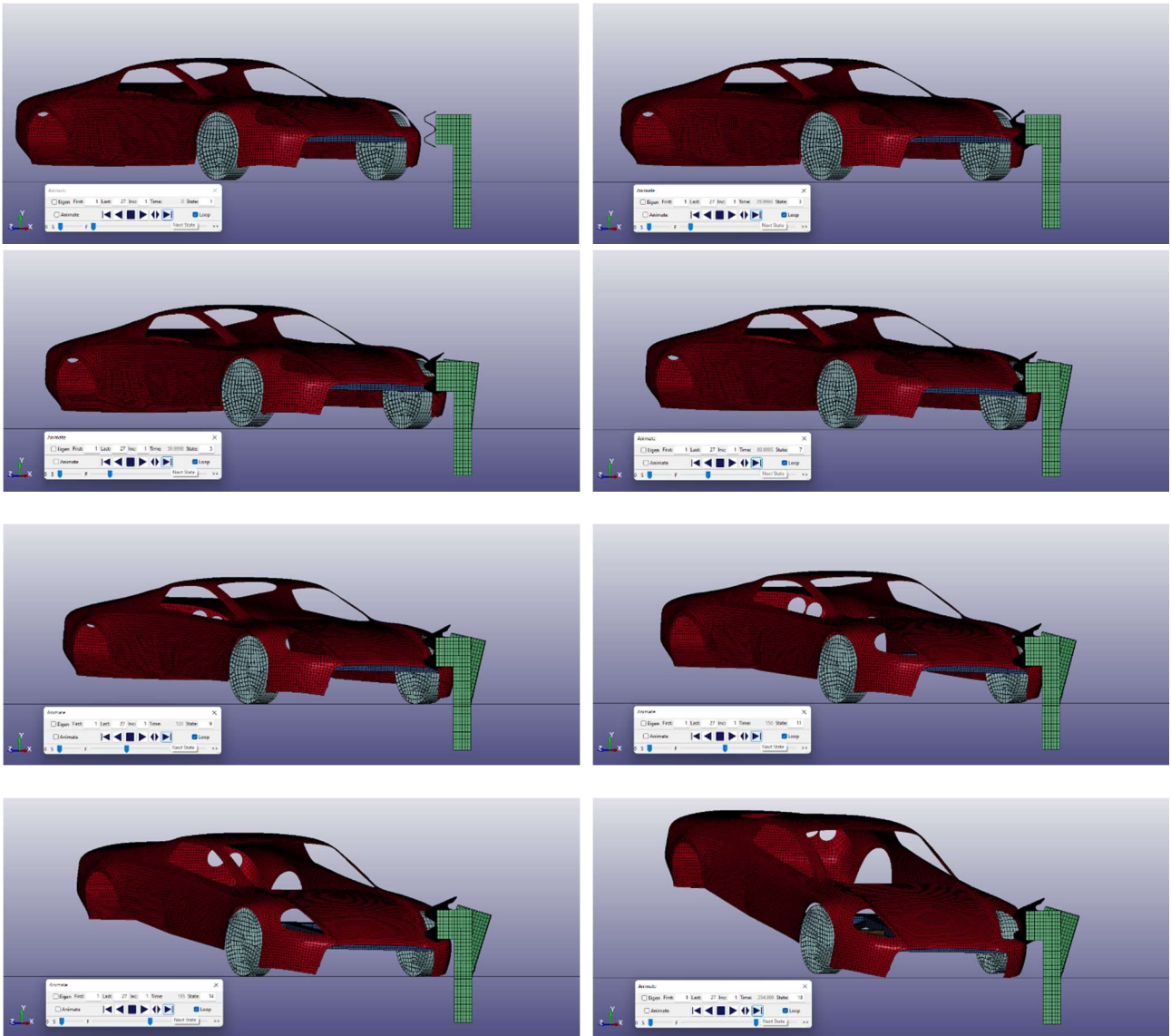


Figura 8.9.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,255 secondi

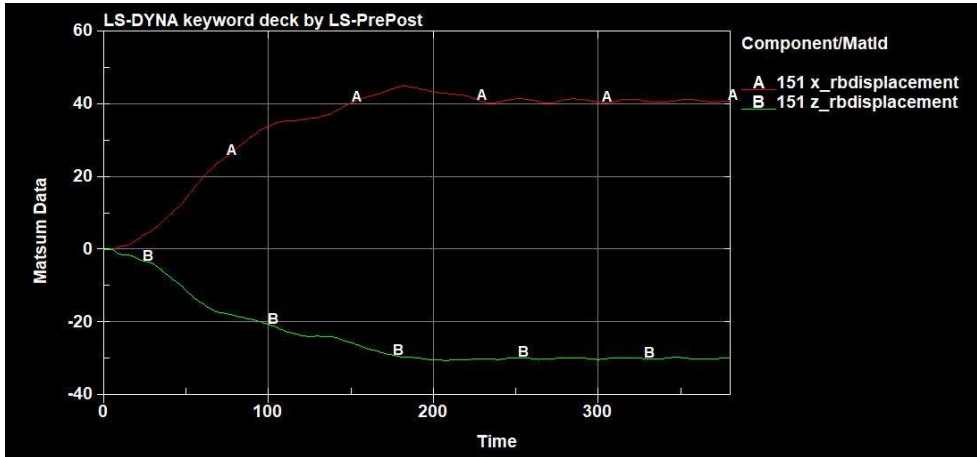


Diagramma 8.9.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

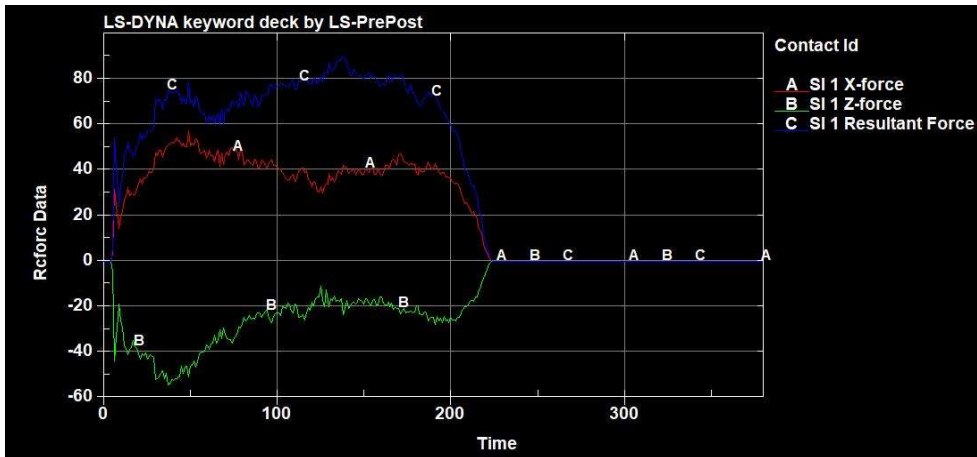


Diagramma 8.9.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 86 kN, circa 8'769 kgf.

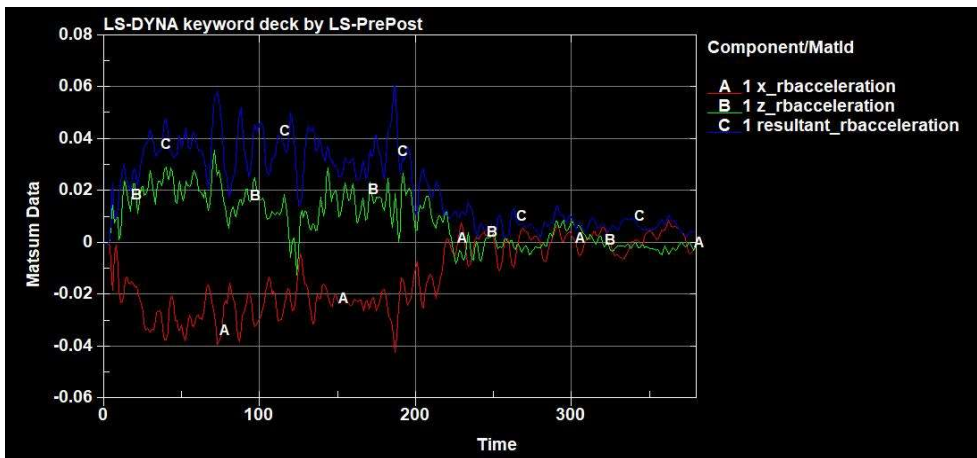


Diagramma 8.9.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,06 mm/ms², ovvero 60 m/s², circa 6,12 g.

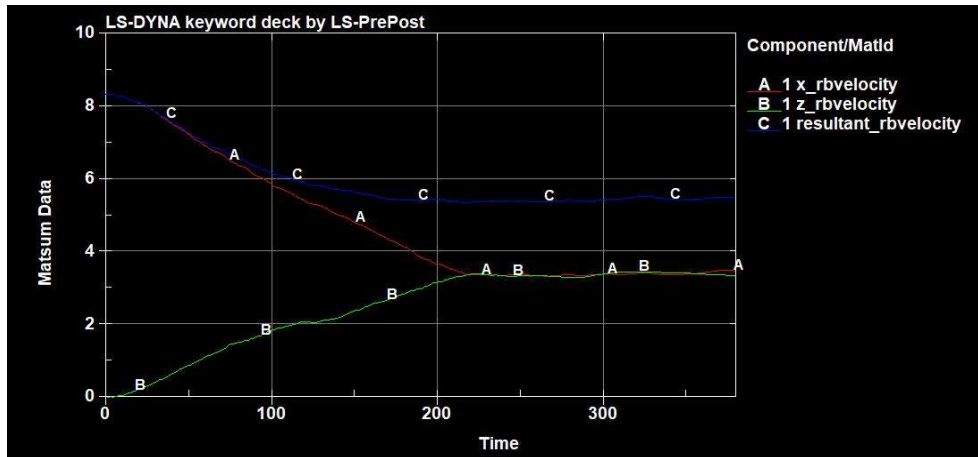


Diagramma 8.9.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X – Z e la loro risultante.

8.10. Caso Studio 3.b.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 13,89 m/s, ovvero 50 km/h, con un'inclinazione pari a 35° rispetto alla longitudinale del guardrail.

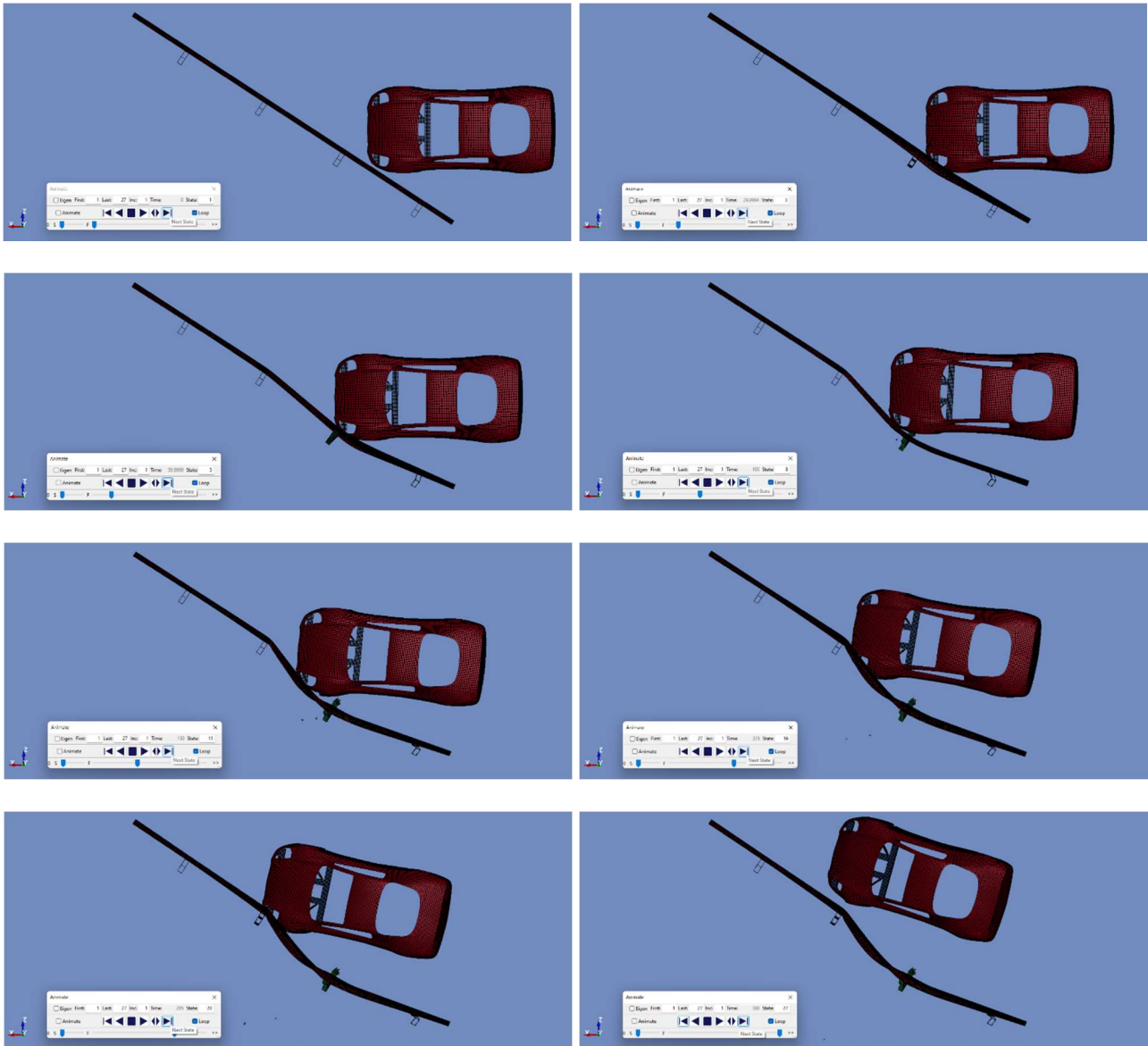


Figura 8.10.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,300 secondi

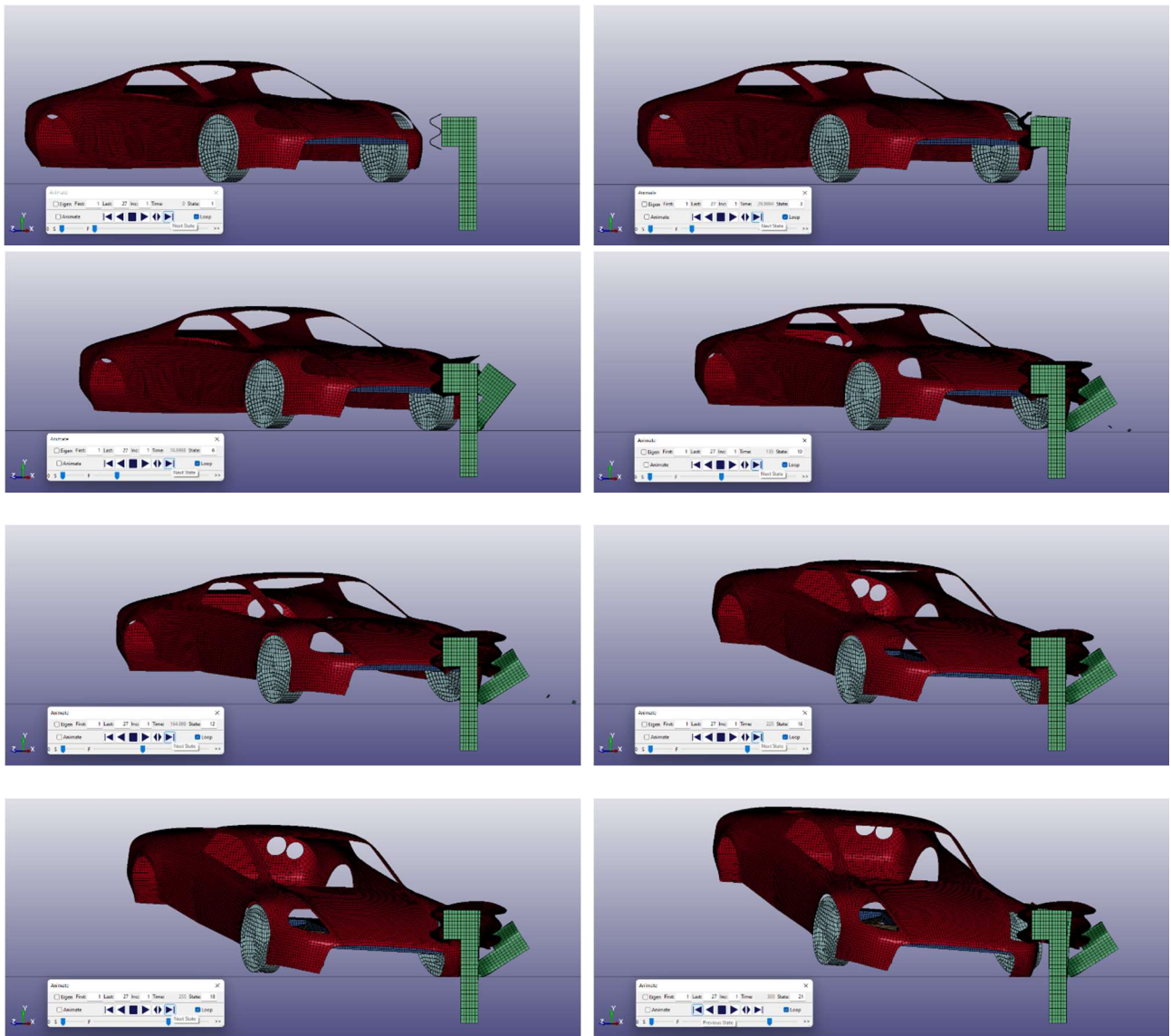


Figura 8.10.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,300 secondi

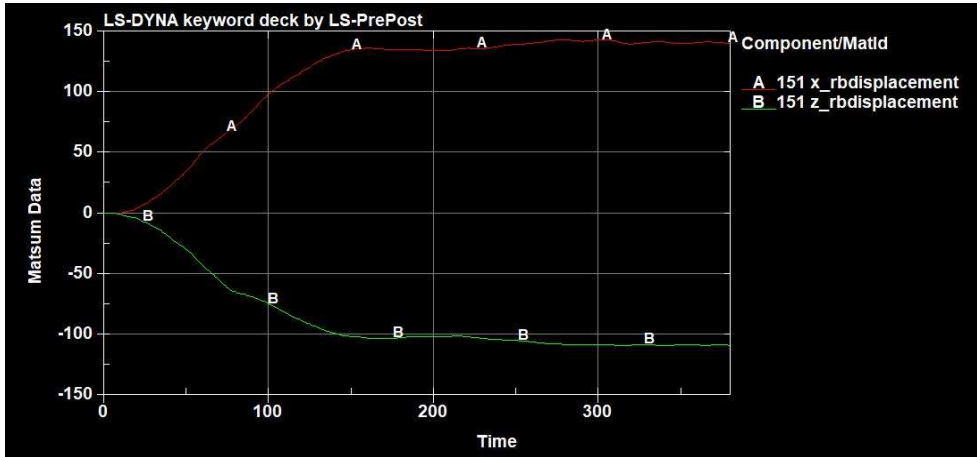


Diagramma 8.10.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

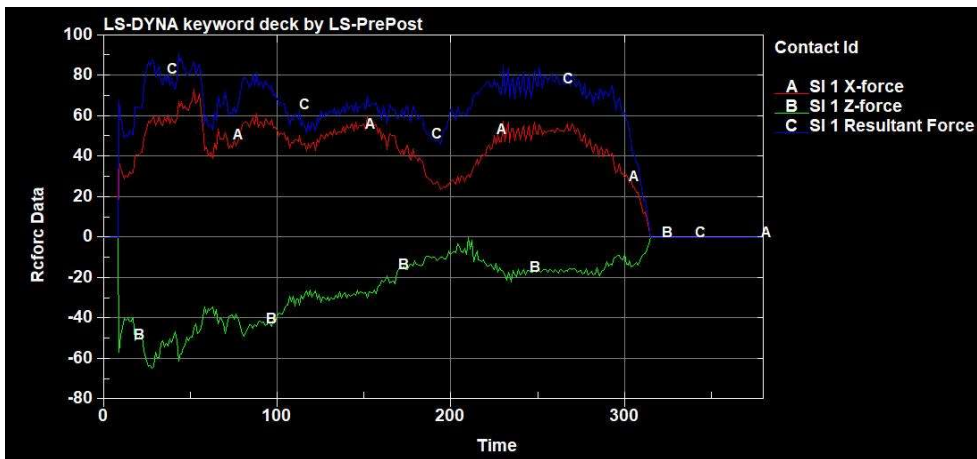


Diagramma 8.10.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 90 kN, circa 9'177 kgf.

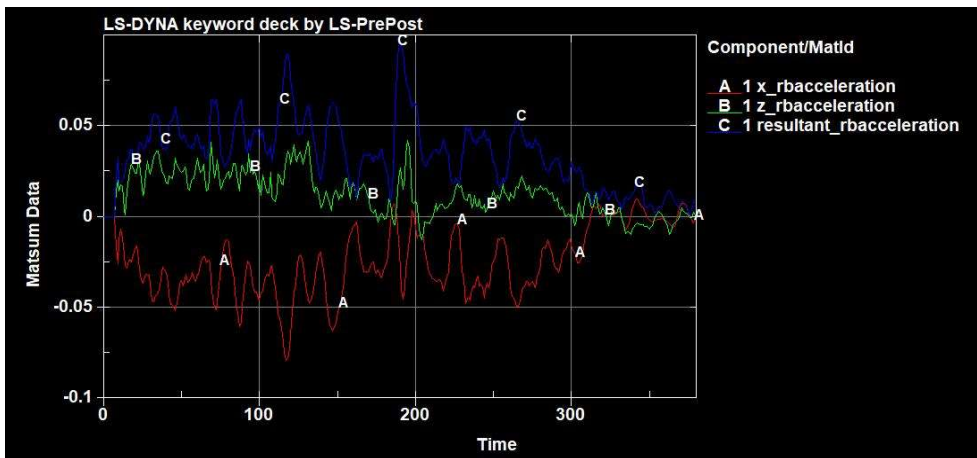


Diagramma 8.10.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,100 mm/ms², ovvero 100 m/s², circa 10,20 g.

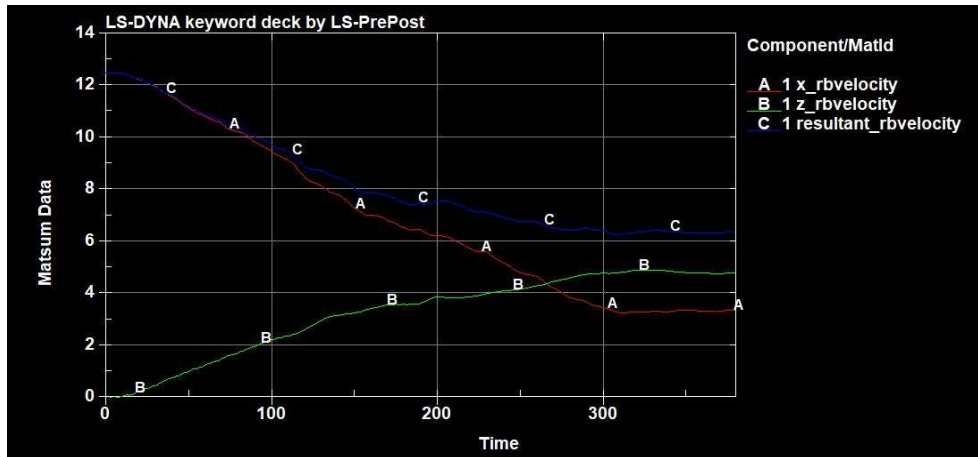


Diagramma 8.10.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X–Z e la loro risultante.

8.11. Caso Studio 3.c.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 16,67 m/s, ovvero 60 km/h, con un'inclinazione pari a 35° rispetto alla longitudinale del guardrail.

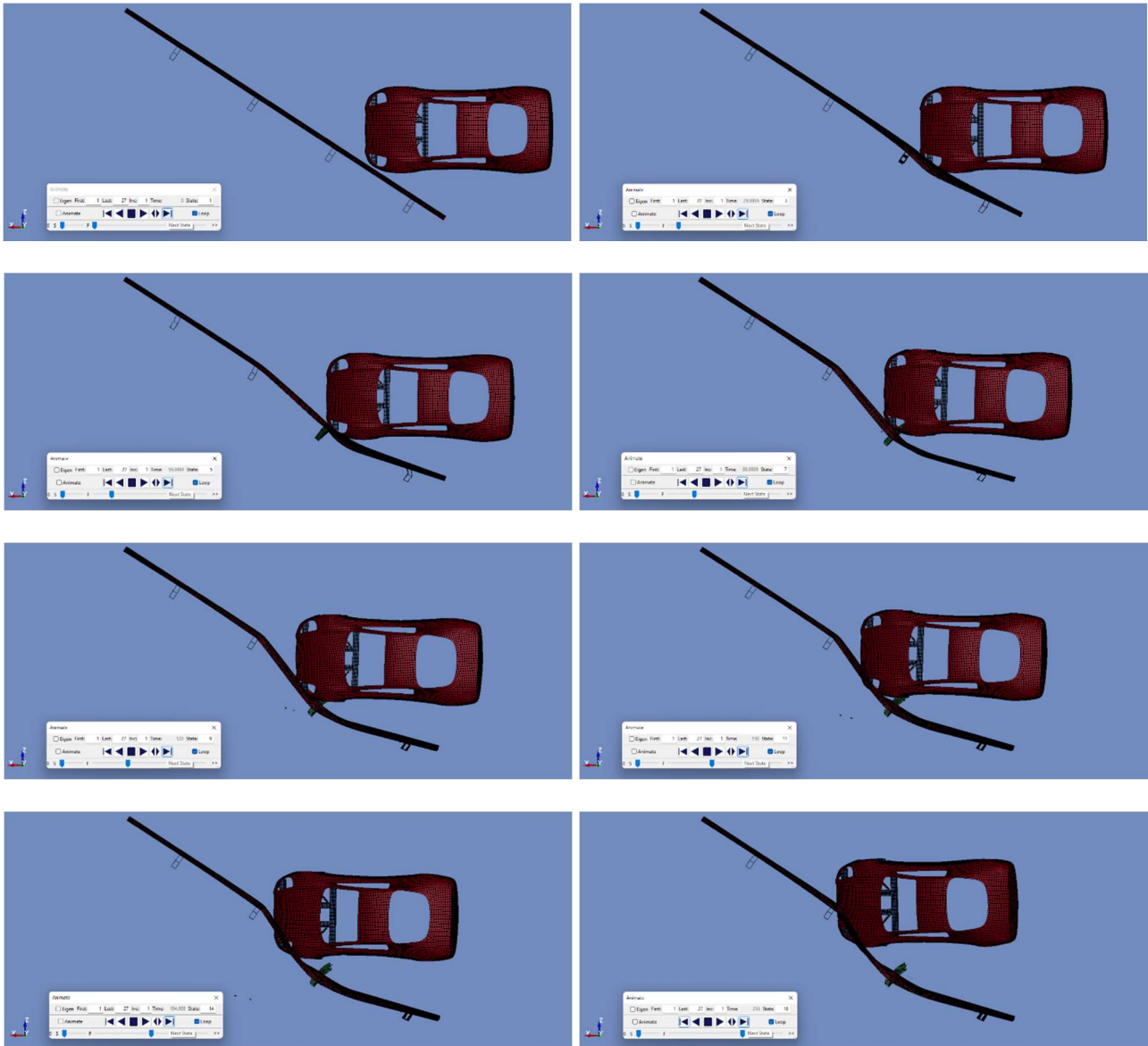


Figura 8.11.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,255 secondi

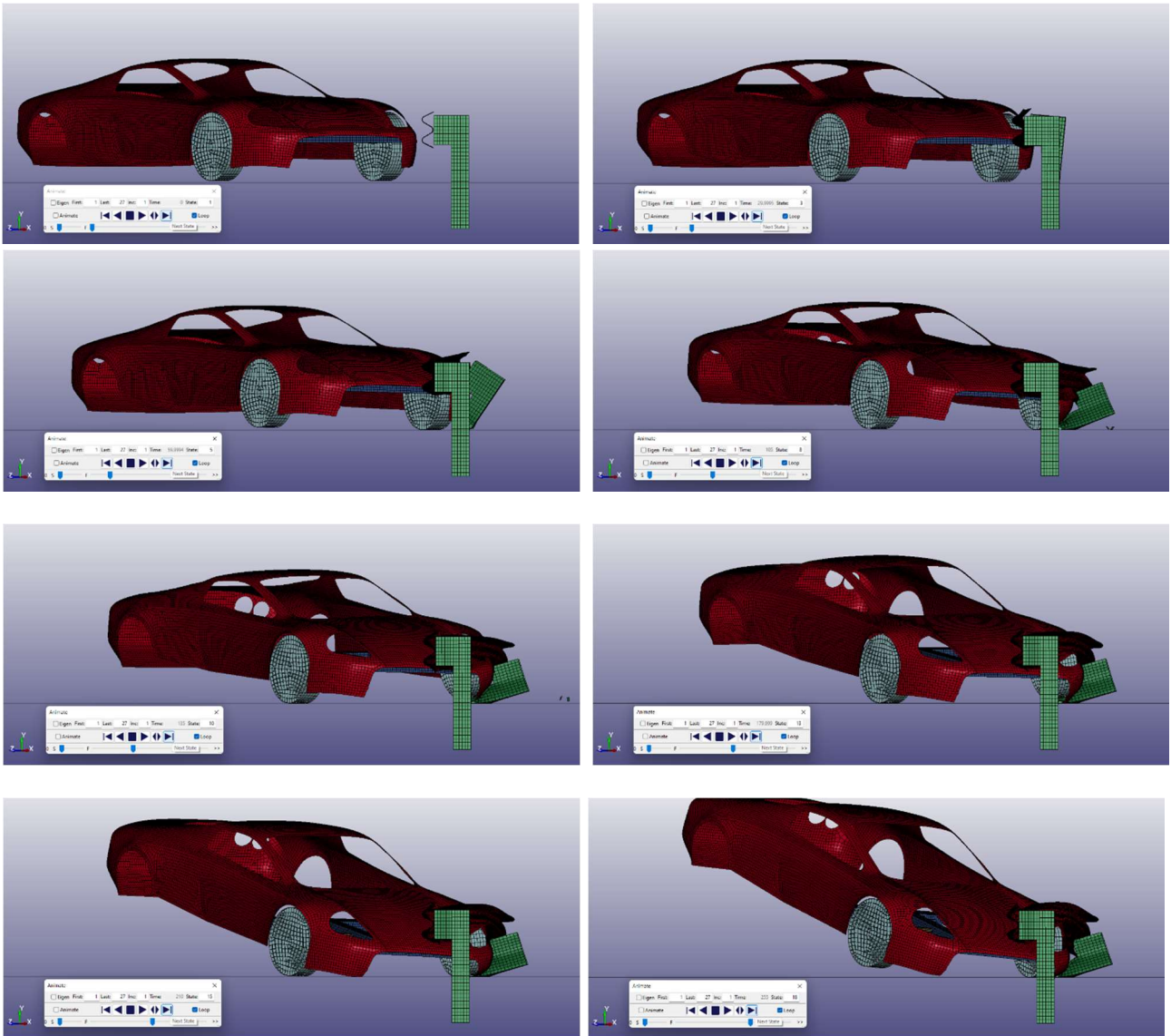


Figura 8.11.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,255 secondi

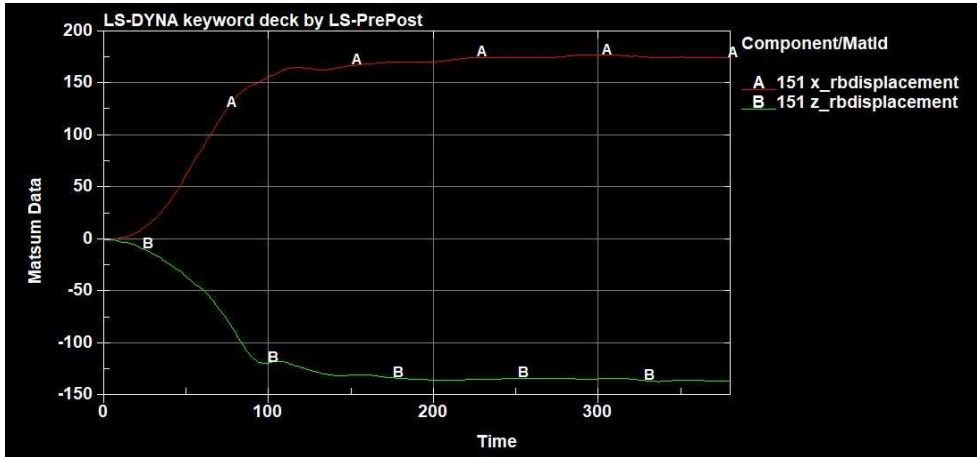


Diagramma 8.11.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

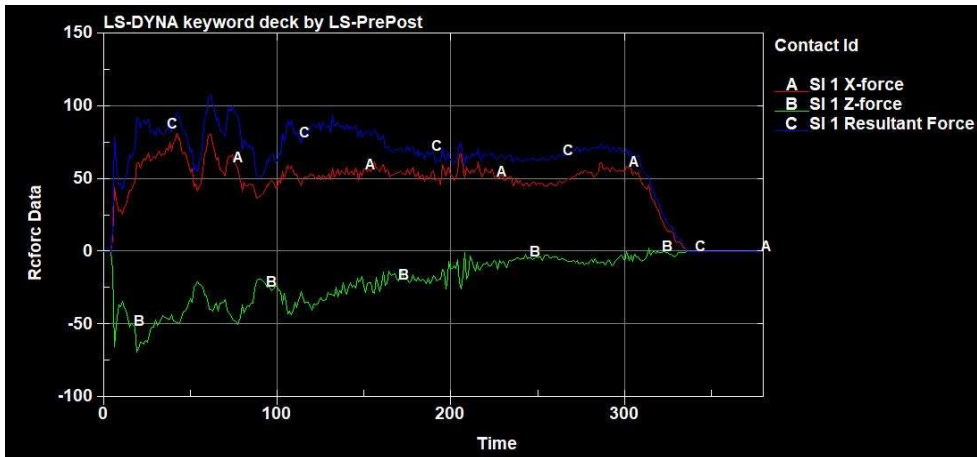


Diagramma 8.11.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 108 kN, circa 11'012 kgf.

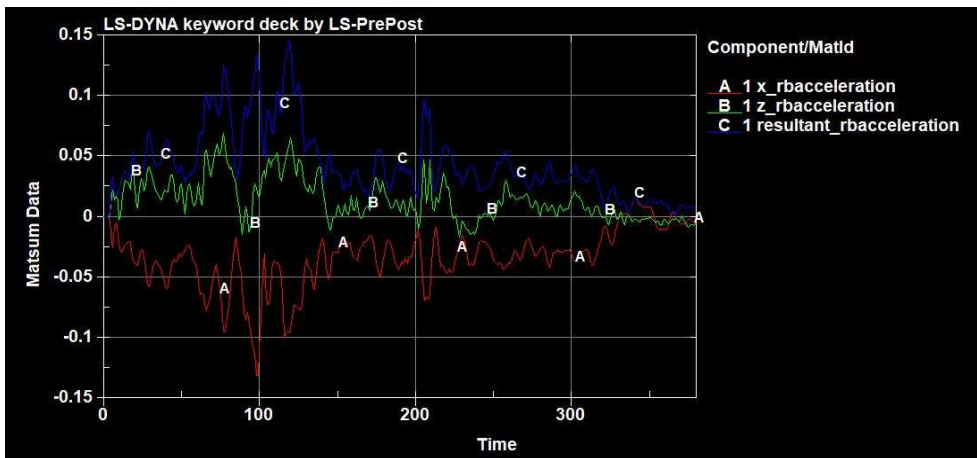


Diagramma 8.11.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,145 mm/ms², ovvero 145 m/s², circa 14,79 g.

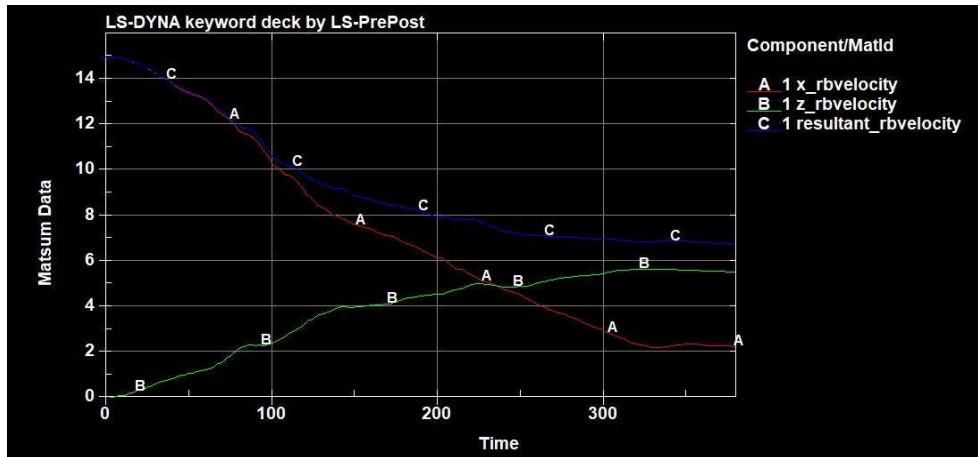


Diagramma 8.11.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X–Z e la loro risultante.

8.12. Caso Studio 3.d.

La velocità del veicolo al momento dell'urto è pari a 19,44 m/s, ovvero 70 km/h, con un'inclinazione pari a 35° rispetto alla longitudinale del guardrail.

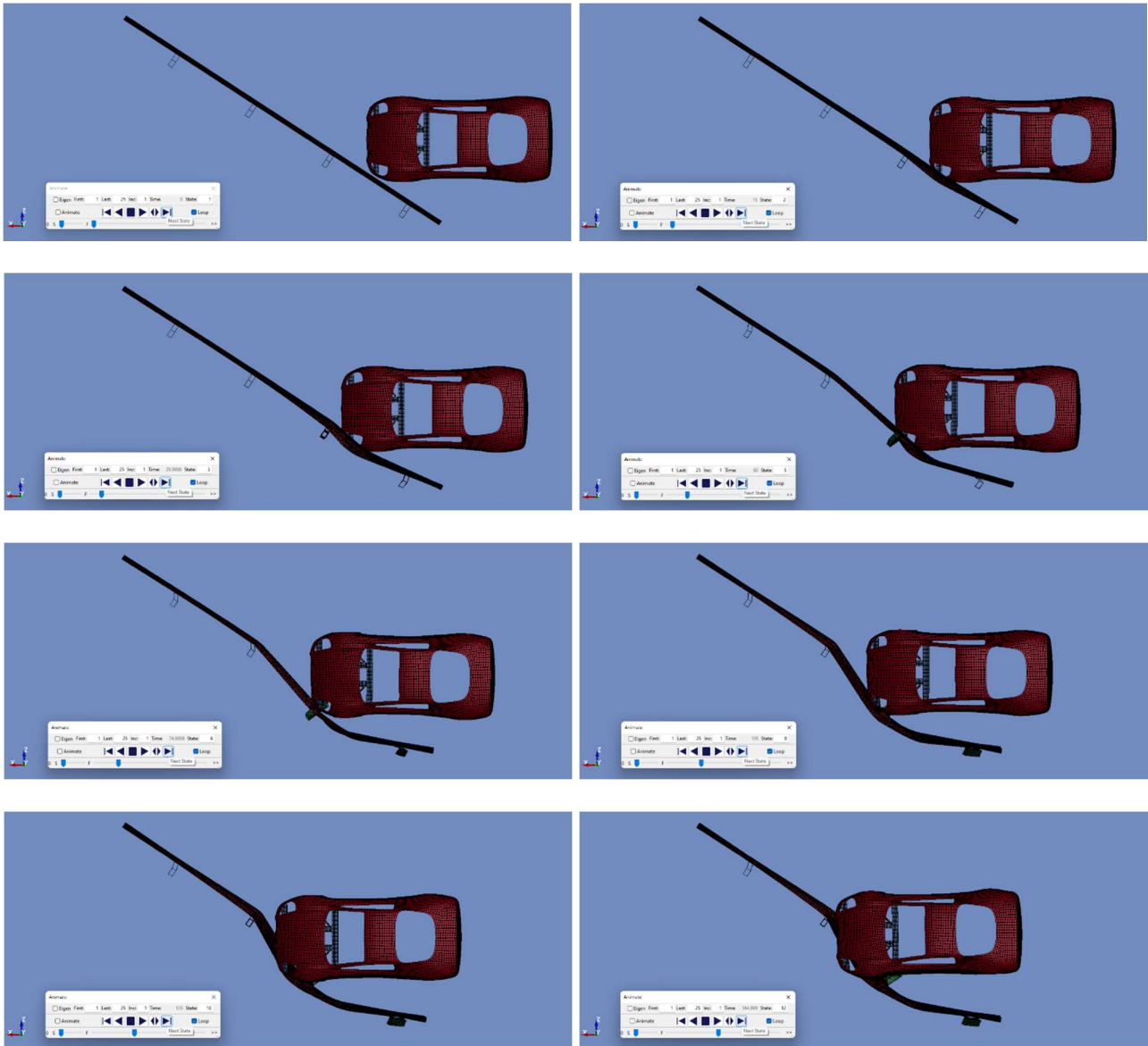


Figura 8.12.1: Vista planimetrica sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,165 secondi

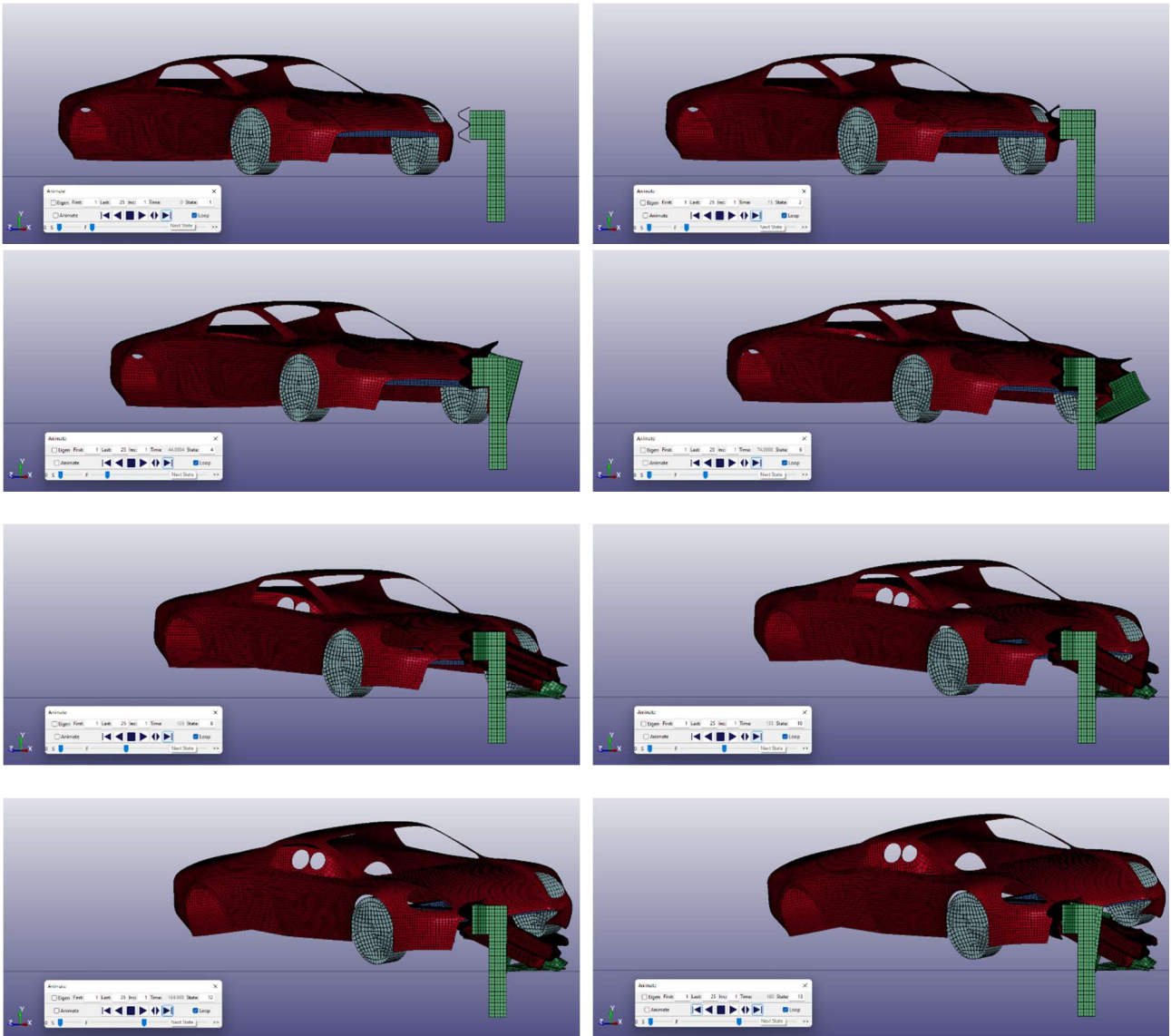


Figura 8.12.2: Vista frontale sequenziale dell'analisi agli EF, dal frame 0,000 secondi al frame 0,180 secondi

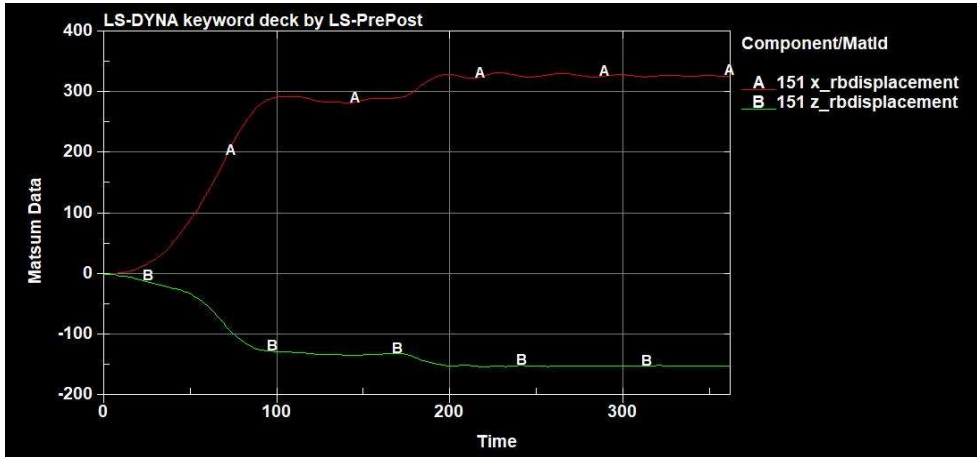


Diagramma 8.12.1: Raggiungimento deformazione massima lungo le componenti X e Z del guardrail in funzione del tempo.

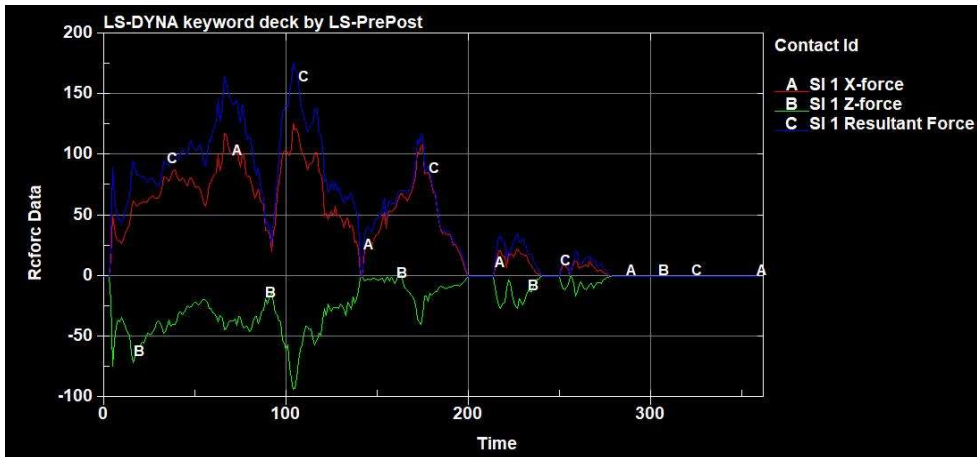


Diagramma 8.12.2: Andamento delle forze generate dall'urto secondo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 173 kN, circa 17'641 kgf.

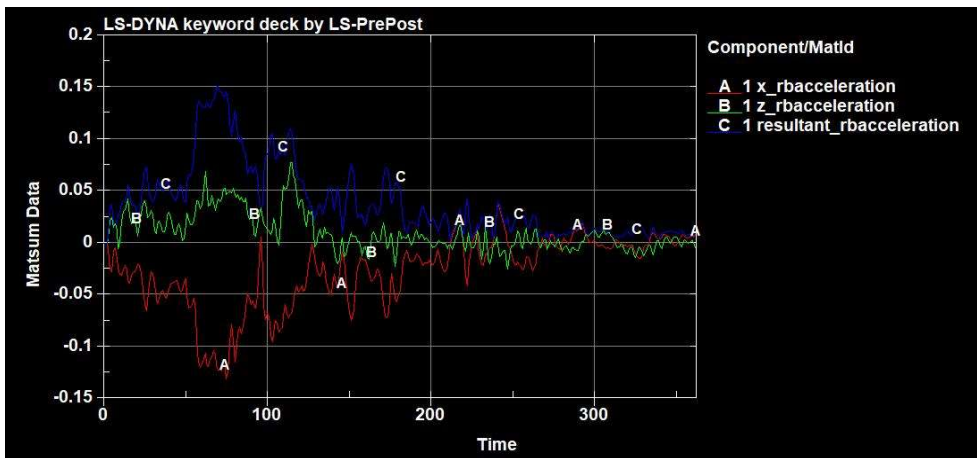


Diagramma 8.12.3: Andamento delle accelerazioni percepite dal veicolo in corrispondenza del suo CM (centro di massa) lungo le due direzioni X - Z e la loro risultante con valore massimo pari a 0,15 mm/ms², ovvero 150 m/s², circa 15,30 g.

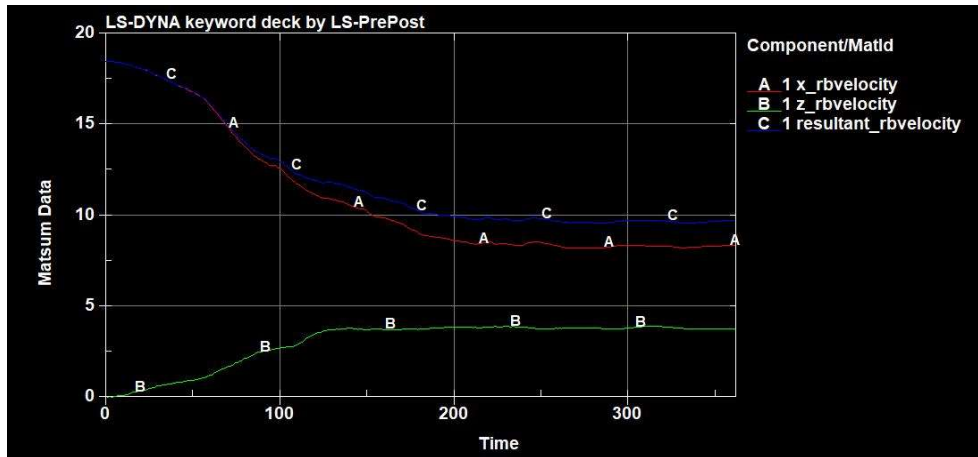


Diagramma 8.12.4: Andamento delle velocità del veicolo lungo le due direzioni X–Z e la loro risultante.

9. Considerazioni relative alle simulazioni lanciate

Osservando anche solo visivamente le sequenze riportate nei vari casi studio, è facile notare come il comportamento del veicolo durante la fase post-impatto abbia una condotta dinamica tale per cui il suo sollevamento dal suolo, nonostante la natura dell'urto che ne destabilizza il moto, risulti essere particolarmente accentuato. Ciò è dovuto, come precedentemente sottolineato, alle caratteristiche del modello-veicolo stesso in cui è assente l'assale posteriore, il quale avrebbe contribuito a una maggiore stabilità del mezzo, e soprattutto, nonostante le masse siano state modificate al fine di ottenere dei valori di peso appropriati, a causa della distribuzione dei corpi facenti parte del veicolo (carrozzeria e assale anteriore) che hanno portato ad un dislocamento del suo baricentro: la sua quota è risultata considerevolmente più elevata rispetto ad una situazione realistica. Tale altezza del baricentro ha comportato una maggiore instabilità della macchina, la quale in seguito a un improvviso svio del moto (come un urto), tenderà ad assumere dinamismi più importanti.

Per quanto riguarda il sistema barriera, esso non sempre è stato in grado di assolvere al suo compito di contenimento e reindirizzamento del veicolo.

Il guard-rail che si è scelto di implementare è una semplice barriera monolaterale a doppia onda con distanziatore. E' comprensibile che, vista l'ampiezza dei casi analizzati, partendo da una velocità contenuta, 30 km/h, a 15° di angolazione tra i due sistemi, fino ad arrivare a velocità di 70 km/h a 45° di inclinazione, l'impiego di un unico sistema di contenimento avrebbe restituito dei comportamenti molto differenti tra le varie prove. In particolare, esso ha visivamente fallito nei seguenti casi analizzati e riportati:

- *Caso studio 2.c.* e *Caso studio 2.d.*: rispettivamente con velocità di 60 km/h e 70 km/h a 30° di inclinazione del veicolo rispetto alla barriera; in entrambe le analisi è possibile notare un'insufficiente rotazione del veicolo verso l'interno della carreggiata. Conseguentemente il guard-rail non ha adempito in maniera opportuna alla caratteristica di *reindirizzamento*.

- *Caso studio 3.c.* e *Caso studio 3.d.*: rispettivamente con velocità di 60 km/h e 70 km/h a 35° di inclinazione del veicolo rispetto alla barriera. Oltre ad un'insufficiente rotazione del veicolo verso l'interno della carreggiata, l'eccessivo cedimento della barriera ha comportato, in particolar modo per il *caso studio 3.d.*, ad un suo scavalco, venendo meno al suo compito di *contenimento*.

Per quanto riguarda i casi studio non riportati esplicitamente in questa trattazione – ovvero quelli incentrati su angolazioni inferiori, quindi quelli convenzionali, (15° e 20°) e quelli basati su inclinazioni maggiori (40° e 45°) – si è osservato che: i primi hanno dimostrato una totale affidabilità della barriera implementata anche alle velocità più sostenute, mentre i secondi casi studio hanno rilevato una scarsa o insufficiente resistenza della barriera anche agli impatti caratterizzati dalle velocità più basse (quali 30 e 50 km/h) visto l'aumento della componente ortogonale del moto del veicolo.

9.1. Analisi dei dati delle forze d'urto

Il problema appena studiato ed affrontato, altro non può che ricondursi alla teoria della meccanica, trattante il moto dei corpi in generale e più nello specifico nei “Fenomeni d'urto”.

Durante l'urto si possono sviluppare forze molto intense che modificano la quantità di moto dei corpi rigidi in gioco. Queste forze agiscono per un tempo breve rispetto al tempo di osservazione del fenomeno, e sono chiamate forze impulsive. Esse hanno un andamento del loro modulo in funzione del tempo, di forma analoga al seguente grafico:

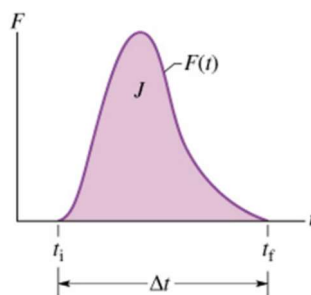


Figura 9.1.1: Impulso di una forza

L'azione della forza si esplica nell'intervallo $\Delta t = \tau = t_f - t_i$.

L'impulso della forza è definito quindi come:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = F_m \tau$$

dove F_m è il valore medio della forza impulsiva nell'intervallo τ . Dato che J assume un valore finito e τ è molto breve, F_m può assumere valori estremamente grandi, rispetto ai quali le forze esterne $F_m^{(E)}$ presenti nel sistema studiato, come la forza gravitazionale oppure le forze di attrito derivanti dal rotolamento, dal contatto tra i due corpi rigidi o dalla resistenza con l'aria a cui è soggetto il mezzo in movimento, sono certamente trascurabili. E' conseguentemente valida la conservazione della quantità di moto totale.

$$J = \Delta P = P_{fin} - P_{in} = 2mv \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

Definita quindi la variazione di moto che determina l'impulso nella formulazione soprastante, è possibile definire la forza media esplicitata dall'urto generato dall'interazione tra i due elementi:

$$F_m = \frac{J}{\tau}$$

Per dare forza ai risultati pratici ottenuti dalle simulazioni eseguite e riportate nei capitoli precedenti, è possibile definire la quantità impulso J conoscendo i seguenti dati (e considerando, ad esempio, il caso studio 4, caratterizzato da un angolo di impatto pari a 30° e con una velocità del mezzo pari a 72 km/h o 20 m/s):

- $m = 1590 \text{ kg}$
- $v = 20 \text{ m/s}$
- $\theta = 30^\circ$
- $\tau = 0,200 \text{ s}$

$$J = 31'800 \text{ Ns}$$

$$F_m = 159'000 \text{ N} = 159 \text{ kN}$$

Risultato in linea con i valori ottenuti dai diagrammi riportati del suddetto caso studio.

9.2. Analisi e considerazioni sui dati di decelerazione

L'arresto o il rallentamento rapido possono generare danni fisici agli occupanti del veicolo. In particolar modo tale valore di decelerazione, o accelerazione negativa, viene studiato dall'*ASI*, L'Acceleration Severity Index, una formulazione già affrontata in un capitolo introduttivo.

Gli effetti di forti e improvvise accelerazioni sul corpo umano sono uno dei fattori principali oggetto di studio negli urti tra veicoli, tra veicolo e barriera o tra veicolo e corpo estraneo. Essendo stato possibile ottenere dalle simulazioni lanciate i valori di accelerazione in gioco, si è ritenuto interessante introdurre tale paragrafo incentrato sullo studio dei potenziali effetti degli impatti trattati sul fisico degli occupanti del veicolo.

Grazie infatti al report individuato in rete del Professor Dario Vangi dell'Università di Firenze, "Valutazione del nesso casuale: Prospettive offerte dalla scatola nera", si è trascritta la seguente tabella relativa alla stima della lesività. Essa, come di facile intuizione nella sua lettura, suddivide alcune caratteristiche di conseguenze ed effetti in funzione della velocità e di 4 principali intervalli di accelerazione.

Accelerazione (G)	Accel. < 4	Accel. tra 4 - 15	15 < Accel. < 40	Accel. > 40
Velocità media contro barriera (E.E.S.)	V < 5 km/h	8 < V < 30 km/h	30 < V > 80 km/h	V > 80 km/h
Velocità media contro un altro veicolo	V < 10 km/h	15 < V < 45 km/h	45 < V < 105 km/h	V > 105 km/h
Effetti	Nessuno	Lieve colpo di frusta	Forte colpo di frusta	Colpo di frusta mortale
Durata	/	Meno di 3 settimane	Mesi o permanente	Morte istantanea
Conseguenze	Nessuna	Dolori al collo, alla testa, alla spalla e al braccio; limitazione dei movimenti, disturbi della deglutazione, disturbi temporanei alla vista, all'udito. Ipoestesia, iperestesia, indurimento dei muscoli	Degenza, insufficienza muscolare, stato depressivo, compromissione dell'equilibrio, nessun intervallo asintomatico, forti dolori durante la deambulazione, disturbi iniziali dello stato di coscienza	Paralisi centrale della funzione respiratoria e circolatoria, tetraplegia

Figura 9.2.1 - Tabella stima lesività

Si sono dunque riportati gli output di accelerazione individuati nelle varie simulazioni analizzate al fine di determinare la veridicità dei risultati contestualizzandoli in un ambito di natura biomeccanica. Si tenga presente che i valori di variazione di velocità nel tempo sono riferiti al centro di massa del sistema veicolo.

Inoltre, le celle dell'ultima colonna sono state riempite col colore corrispondente riportato nella tabella 9.2.1 soprastante. In seguito si sono plottati i risultati in un diagramma, anch'esso evidenziante le diverse aree in funzione del grado di lesività ottenuto.

E' possibile notare l'assenza di alcuni dati di accelerazione o l'incongruenza di altri valori i quali, nonostante siano definiti da velocità del mezzo e/o angolazioni d'urto maggiori, risultano essere inferiori rispetto ad altri dati derivanti da situazioni d'impatto più lievi. Questi ultimi sono giustificati dal fatto che il guard-rail sta lavorando in condizioni limite per i suoi livelli di contenimento e reindirizzamento, generando talvolta situazioni di incastro pericoloso tra veicolo e sistema di ritenuta stesso in seguito ad un eccessivo abbassamento dell'avantreno del mezzo e talvolta andando incontro a situazioni di scavalco (altrettanto pericolose) della barriera. Questi fenomeni si sono presentati nei casi studio 2.c., 2.d., 3.c. e 3.d., come spiegato nel paragrafo introduttivo di questo capitolo. Gli elementi non presenti, invece, sono stati omessi in quanto le caratteristiche dinamiche

del mezzo erano ben oltre le capacità contenitive del guard-rail e i dati di decelerazione relativi sarebbero stati poco significativi per questa specifica trattazione.

Velocità [m/s]	Velocità [km/h]	Angolo d'impatto [°]	Decelerazioni [mm/ms ²]	Decelerazioni [g]
8,33	30	15	0,035	3,57
		20	0,048	4,89
		25	0,062	6,32
		30	0,055	5,61
		35	0,060	6,12
		40	0,087	8,87
		45	0,106	10,81
13,89	50	15	0,042	4,28
		20	0,061	6,22
		25	0,087	8,87
		30	0,092	9,38
		35	0,100	10,20
		40	0,128	13,05
		45	/	/
16,67	60	15	0,050	5,10
		20	0,092	9,38
		25	0,125	12,75
		30	0,170	17,34
		35	0,145	14,79
		40	/	/
		45	/	/
19,44	70	15	0,055	5,61
		20	0,116	11,83
		25	0,150	15,30
		30	0,180	18,35
		35	0,150	15,30
		40	/	/
		45	/	/

Figura 9.2.2 - Tabella dati di decelerazione ottenuti dagli output delle simulazioni lanciate col software FEM

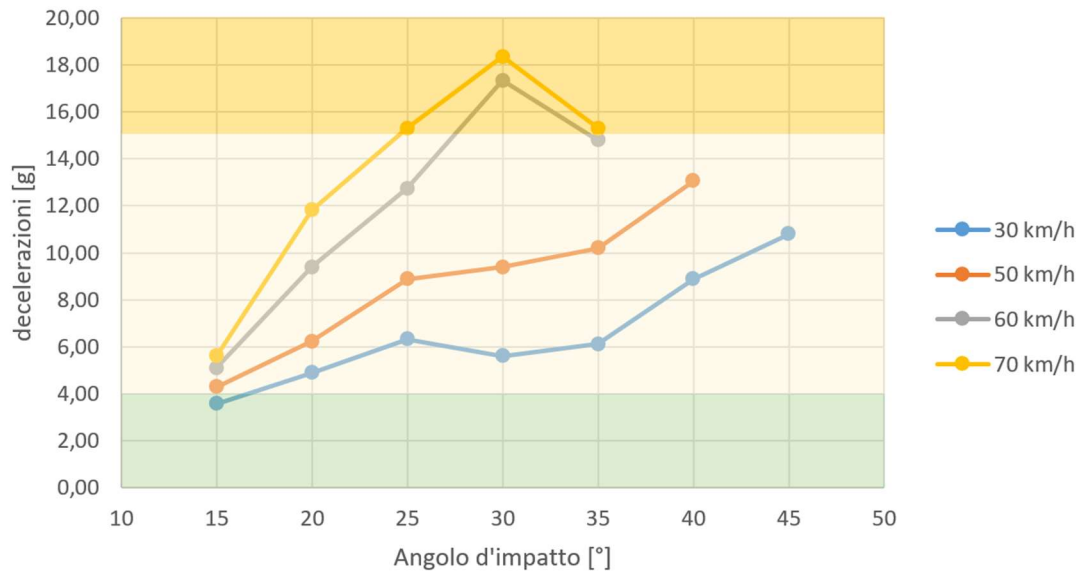


Figura 9.2.3 - Diagramma di plottaggio dei dati di decelerazione

9.3. Analisi dei dati delle energie d'urto

La flessibilità del software utilizzato ha reso possibile definire e osservare l'energia cinetica di ogni simulazione studiata. Ciascuna di esse si basa su funzioni con andamenti reciprocamente molto simili tra loro, essendo il principio fisico costante:

- Inizialmente, per ciascuna velocità analizzata, si ha una stessa energia potenziale del mezzo costante nella massa e nelle sue caratteristiche fisiche;
- All'impatto con la barriera si osserva un calo importante del livello energetico del veicolo in quanto esso viene in parte trasferito al guard-rail, il quale risponde deformandosi (anche la carrozzeria stessa si deforma dissipando energia attraverso la sua struttura);
- La funzione termina col valore di energia che il mezzo ancora possiede, non essendo stato arrestato completamente nel suo moto, ma reindirizzato con una traiettoria differente rispetto alla situazione iniziale.

Di seguito si riporta un esempio di diagramma dell'energia cinetica presente nel caso studio di velocità del veicolo pari a 60 km/h e impatto con la barriera ad un'inclinazione pari a 30°:

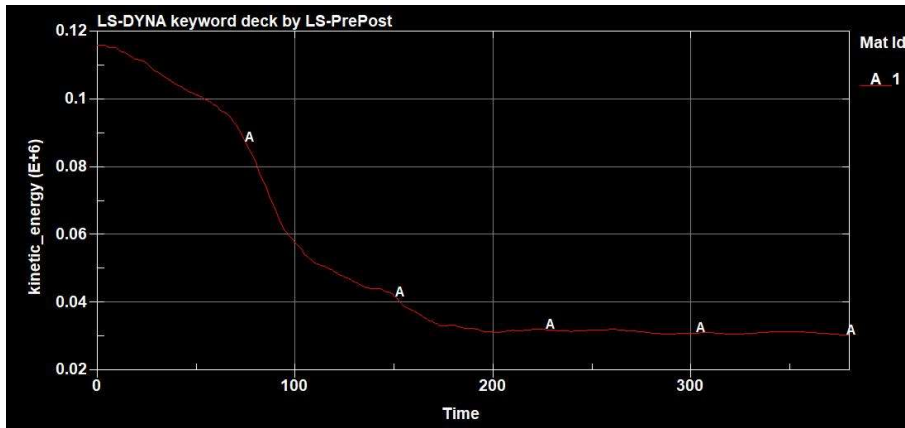


Figura 2.3.1 - Diagramma-tipo energia cinetica

Velocità [km/h]	Angolo d'impatto [°]	Ec,i [kJ]	Ec,f [kJ]	Eu [kJ]
30	15	29,0	27,3	1,7
	20	29,0	26,5	2,5
	25	29,0	23,6	5,4
	30	29,0	19,4	9,6
	35	29,0	14,0	15,0
	40	29,0	9,5	19,5
50	45	29,0	3,1	25,9
	15	80,6	70,0	10,6
	20	80,6	65,7	14,9
	25	80,6	56,0	24,6
	30	80,6	34,6	46,0
	35	80,6	23,4	57,2
60	40	80,6	18,2	62,4
	45	80,6	8,0	72,6
	15	116,0	98,0	18,0
	20	116,0	92,5	23,5
	25	116,0	71,0	45,0
	30	116,0	58,2	57,8
70	35	116,0	29,8	86,2
	40	116,0	20,1	95,9
	45	116,0	11,7	104,3
	15	158,0	132,2	25,8
	20	158,0	105,0	53,0
	25	158,0	72,3	85,7
	30	158,0	60,6	97,4
	35	158,0	37,1	120,9
40	158,0	30,0	128,0	
45	158,0	21,5	136,5	

Figura 9.3.2 - Tabella riportante le energie d'urto ottenute dalle simulazioni lanciate

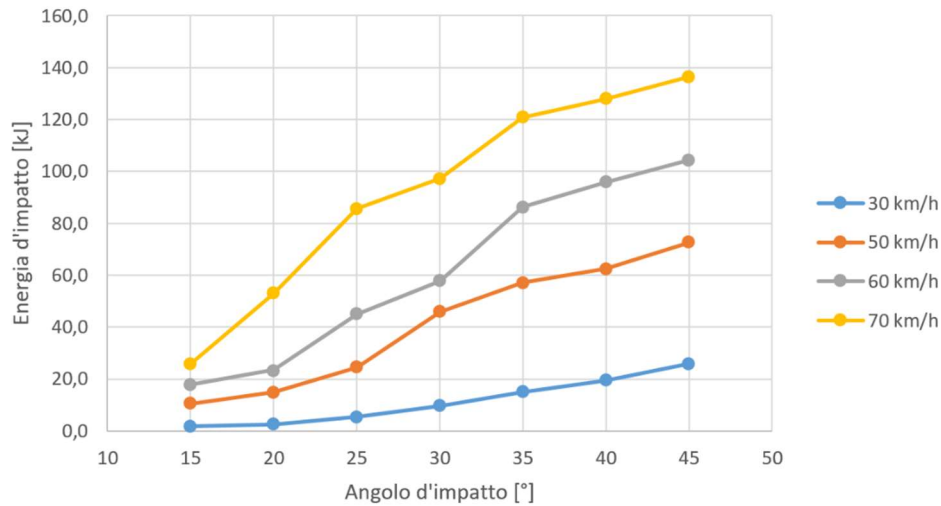


Figura 9.3.3 - Diagramma rappresentante le energie d'urto in funzione di velocità e inclinazione

Al fine di stabilire un confronto utile ad una eventuale calibrazione del modello, o comunque al fine di osservare la veridicità degli output ottenuti ed il loro possibile errore rispetto a formulazioni matematiche descrittive del modello o parte di esso, si applica l'espressione per il calcolo del livello di contenimento L_c : un parametro che rappresenta la capacità di una barriera di resistere agli urti:

$$L_c = \frac{1}{2} M_v [v \cdot \sin(\alpha)]^2$$

Dove:

- M_v è la massa del veicolo espresso in *kg* (costante e pari a 1590)
- v è la velocità del veicolo espressa in *m/s*
- α è l'angolo d'impatto tra il sistema veicolo e sistema di ritenuta espresso in *RAD*

Riportando la tabella dei dati relativi a tale funzione e definendo successivamente il diagramma ad essi esplicativo con tanto degli andamenti sperimentali delle energie d'urto già esposte in figura 9.3.5 al fine di compararne i valori, si ha:

Velocità [m/s]	Velocità [km/h]	Angolo d'impatto [°]	Angolo d'impatto [RAD]	Eu [kJ]
8,33	30	15	0,2618	3,7
		20	0,3491	6,5
		25	0,4363	9,9
		30	0,5236	13,8
		35	0,6109	18,1
		40	0,6981	22,8
		45	0,7854	27,6
13,89	50	15	0,2618	10,3
		20	0,3491	17,9
		25	0,4363	27,4
		30	0,5236	38,3
		35	0,6109	50,5
		40	0,6981	63,4
		45	0,7854	76,7
16,67	60	15	0,2618	14,8
		20	0,3491	25,8
		25	0,4363	39,5
		30	0,5236	55,2
		35	0,6109	72,7
		40	0,6981	91,3
		45	0,7854	110,5
19,44	70	15	0,2618	20,1
		20	0,3491	35,1
		25	0,4363	53,7
		30	0,5236	75,1
		35	0,6109	98,8
		40	0,6981	124,1
		45	0,7854	150,2

Figura 9.3.4 – Tabella riportante le energie d'urto calcolate mediante formula

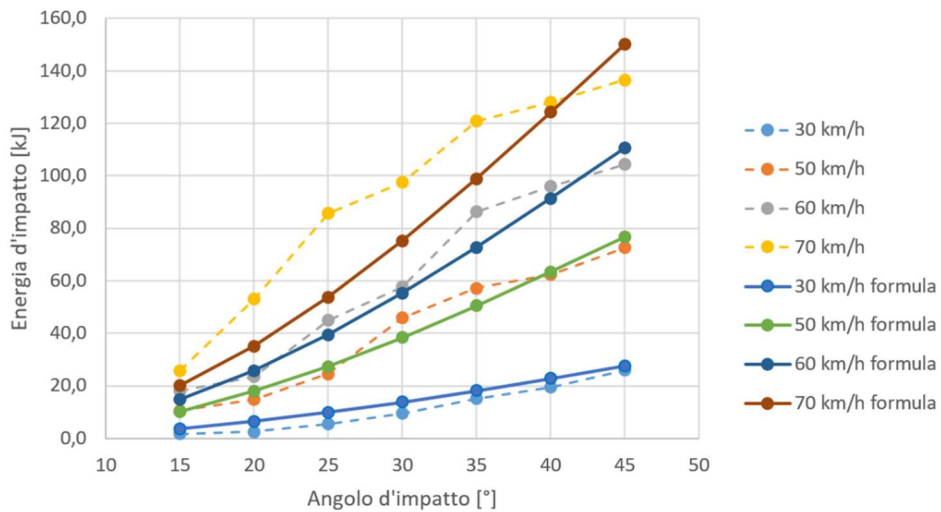


Figura 9.3.5 – Diagramma di confronto tra energie d'urto ottenute tramite simulazione (tratteggiate) ed energie d'urto calcolate

Come si può osservare da quest'ultimo grafico, gli andamenti energetici secondo le differenti velocità riportate in legenda (in particolar modo quelli calcolati secondo l'espressione L_c), hanno un andamento monotono crescente. In realtà, ciò si osserva in quanto gli angoli osservati non superano i 45° d'inclinazione, ma se si proseguisse nell'analisi degli urti secondo componenti d'impatto ancora più ripide e plottando successivamente tali risultati, si osserverebbe un punto di flesso, e quindi un'inversione della curva, fino a raggiungere un punto di massimo in corrispondenza dell'impatto a 90° con la barriera da parte del veicolo, per poi eventualmente decrescere all'aumentare dell'inclinazione. In questo caso si avrebbe però un'inversione della direzione del veicolo rispetto alle analisi studiate e conseguentemente verrebbero restituiti i medesimi valori e risultati già ottenuti in maniera per l'appunto speculare: ai 95° equivarrebbero gli 85° , ai 100° gli 80° , ai 105° i 75° , e così discorrendo. Si intende che si osserverebbe un andamento a campana della funzione (curva gaussiana) per un'analisi estesa dai 5° ai 175° (considerando un intervallo tra le analisi di 5° e quindi escludendo gli estremi di 0° e 180° per ovvi motivi di parallelismo tra i due sistemi in quanto non colliderebbero mai).

Considerando infatti una velocità di 60 km/h ed estendendo l'analisi d'urto secondo il solo calcolo analitico si ottiene il seguente diagramma:

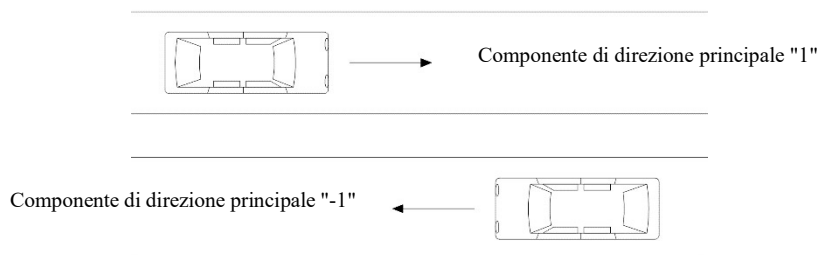
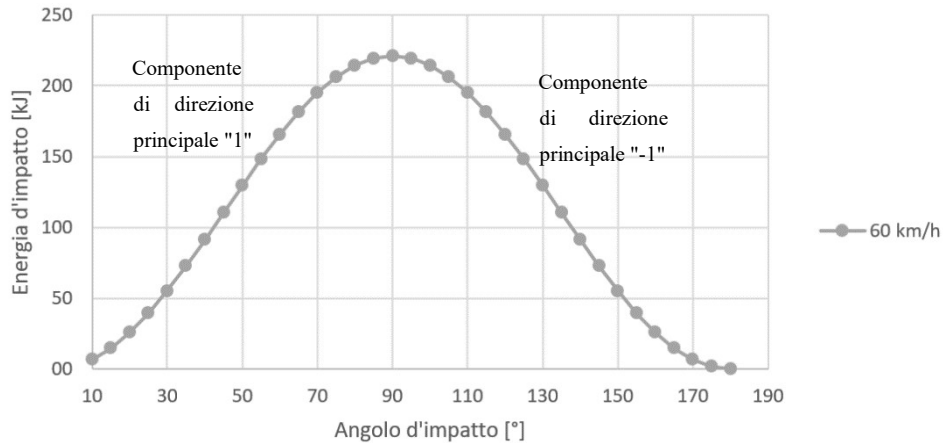


Figura 9.3.6 – Diagramma urti estesi all'angolo giro con intervallo di 5° d'inclinazione

Tornando ai valori di contenimento ottenuti e basandosi su quanto espresso al paragrafo 6.1, si può notare che il valore discriminante della classe di contenimento H1 (contenimento normale) risulta essere pari a 127 kJ. Tale valore viene superato nelle simulazioni lanciate due volte, entrambe relative alla velocità di 70 km/h e con inclinazione del veicolo pari rispettivamente a 40° e 45°. Nel calcolo diretto del parametro L_c , invece, si osserva che solo urtando il guard-rail alla velocità di 70 km/h ad un'angolazione di 45° si oltrepassa il dato limite che caratterizza la classe normale di contenimento.

Evidentemente se ne deduce che, seppur rimanendo per quasi l'intera totalità delle simulazioni lanciate all'interno della classe di contenimento H1, la barriera di contenimento implementata nel software e già descritta nel dedicato paragrafo introduttivo non è comunque sempre in grado di adempiere alle sue caratteristiche di sicurezza stradale, come nel caso di scavalcamento ottenuto nel caso studio 3.d. In tale simulazione, ad esempio, sarà necessario prevedere un dispositivo di protezione più contenitivo e performante.

10. Sviluppi futuri

Come è stato frequentemente riportato, gli importanti limiti del software utilizzato, dettati dalla versione resa disponibile dall'ente gestore delle licenze, non ha permesso di compiere un'analisi più completa delle simulazioni osservate. In particolar modo ciò ha frenato la possibilità di spaziare nello studio di importanti fattori legati alle dinamiche degli urti tra veicolo e sistema di ritenuta stradale, come ad esempio il T.H.I.V., ovvero l'Indice di Velocità Teorica della Testa.

Difatti, al fine di ottenere questo parametro, si sarebbe dovuto implementare un sistema discretizzato capace di rappresentare un occupante del veicolo. Più precisamente, sarebbe stato necessario far sì che tale sistema fosse stato assicurato all'abitacolo mediante i sistemi di sicurezza che oggi giorno trovano spazio nelle autovetture moderne, a partire dalla struttura dei sedili, presenza di un adeguato poggiatesta, meccanismo di pretensionamento, tiraggio e aggancio della cintura di sicurezza, airbag frontali e laterali, presenza e conformazione della pedaliera, e molti altri ancora.

Trattando in particolar modo il parametro T.H.I.V., il movimento della testa è altamente condizionato dalla maggior parte di queste componenti nella fase di urto e di post urto; tale indice infatti risulta essere in funzione delle velocità che la testa degli occupanti acquista secondo le direzioni parallele al piano del moto del veicolo pre urto (dunque v_x e v_y).

Tale limitazione di implementazione, dettata dal limite massimo di mesh tracciabili, ha conseguentemente impedito la determinazione del Livello di Severità dell'Impatto, essendo esso in funzione del T.H.I.V. e dell'ASI, l'Acceleration Severity Index.

Tra i possibili sviluppi futuri sarebbe interessante poter avviare le simulazioni lanciate in questa trattazione utilizzando veicoli completi nelle loro componentistiche e, come è possibile intuire dalle citazioni di cui sopra, dotati di occupanti digitali per delle analisi biomeccaniche associando magari un effettivo crash test reale, con caratteristiche coincidenti a quelle presenti nel software al fine di

sovrapporre gli output e studiarne le differenze per una eventuale calibrazione o messa a punto del programma.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- “Computational 3D models of vehicle’s crash on road safety systems”, G. Bonin, G. Cantisani, G. Loprencipe
- Strade&Autostrade. L’utilizzo della meccanica computazionale nell’ambito dei sistemi di ritenuta stradali, Marco Anghileri
- Guidelines for Roadside infrastructure on new and existing roads. Project RISER
- “Valutazione del nesso casuale: Prospettive offerte dalla scatola nera”, Prof. Ing. Dario Vangi
- Strade & Autostrade. I sistemi di ritenuta stradale: le caratteristiche e le Normative di riferimento
- Archivio ISTAT, Istituto Nazionale di Statistica. Incidenti stradali nell’anno 2020
- “Analysis of Laboratory Data from Crash Test on Road Safety Barriers”, G. Bonin, G. Cantisani, G. Loprencipe
- “Assessment of the impact speed and angle conditions for the EN1317 barrier tests”, Abraham, Ghosh, Simms, Thomson, Amato
- “The Effect of ASI (Acceleration Severity Index) to Different Crash Velocities”, Rahmad Nasution, Rakhmad Siregar, Khairul Faud, Abdul Adom
- “Roadside Infrastructure for Safer European Roads”, Chalmers University of Technology on behalf of the RISER Consortium
- “Development of an NCHRP Report 350 TL-3 New Jersey Shape 50-inch Portable Concrete Barrier”, Chuck Plaxico, James Kennedy, Charles Miele
- “Modelli di simulazione a supporto della tecnologia delle barriere stradali”, S, Leonardi, G. Pappagallo.
- <https://www.ansys.com>

*A mamma e papà,
che hanno sempre creduto in me e che mi hanno
appoggiato e sostenuto nei momenti più difficili.*

*Se ho portato a termine questo percorso
è anche per merito vostro, grazie.*

*Ad Anna,
che con il suo affetto ha saputo incoraggiarmi e
spronarmi, e che pazientemente ha contribuito alla
revisione ortografica di tale elaborato.
Grazie per aver condiviso insieme a me questo lungo
viaggio, senza mai abbandonarmi, dall'inizio alla fine,
e di essere qui presente per il capitolo successivo.*

*Un pensiero e una carezza la dedico infine a Brioche,
la quale è sempre stata capace di strapparmi un sorriso
e di farmi sentire più leggero.*

