

Politecnico di Torino

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea Magistrale



Evoluzione protocollo EuNCAP 2020: sviluppo e validazione di un modello ad elementi finiti della barriera deformabile MPDB

Relatori:

Prof.ssa Cristina BIGNARDI

Prof. Alberto AUDENINO

Candidata:

Francesca MARRA

Supervisore Aziendale:



Ing. Sergio BIANCO

Anno Accademico 2018-2019

Abstract

Nell'ambito del mercato automobilistico, soprattutto negli ultimi dieci anni, si è assistito ad una serie di notevoli cambiamenti: al giorno d'oggi, tra le caratteristiche che contribuiscono a rendere appetibile un autoveicolo rientra, in particolar modo, il grado di sicurezza che offre agli occupanti. Il focus principale è quello di ridurre il numero di morti e feriti causati dagli incidenti stradali: quindi la richiesta di sicurezza in ambito automobilistico si fa sempre più pressante e questo fattore condiziona la progettazione di un autoveicolo. Tutto ciò rende indispensabile lo studio del veicolo, sotto il profilo della sicurezza, fin dalle prime fasi della progettazione secondo le metodologie CAE (Computer Aided Engineering). Tali metodologie sono finalizzate a simulare le prestazioni del prodotto o dei suoi componenti mediante il calcolo numerico, con lo scopo di rendere più rapido, economico ed efficace il processo di progettazione di sistemi, a volte anche molto complessi e di natura diversa. Uno dei principali vantaggi derivanti dall'impiego di tali metodologie è la riduzione della realizzazione dei prototipi fisici che risultano essere costosi, impegnativi e affetti da incertezza legata al processo produttivo.

Nel 2015 EuroNCAP ha pubblicato la sua ultima roadmap in cui è stato concordato che l'attuale procedura di urto frontale, che prevede di utilizzare una barriera deformabile fissa, sarà sostituita, nel 2020, da un test con barriera mobile con un elemento deformabile progressivo (MPDB). Obiettivo di questo lavoro di tesi, svolto presso il Centro Sicurezza Fiat di Orbassano, è quello di realizzare e validare (sia con prove semplificate di caratterizzazione statica e dinamica che con prove full scale) un modello ad elementi finiti della barriera MPDB proprio in vista dell'evoluzione del protocollo EuroNCAP 2020. Il punto di partenza è stato il modello già in dotazione presso la divisione Safety Virtual Analysis del Centro Sicurezza, un modello semplificato e realizzato adottando delle approssimazioni sulle dimensioni delle celle costituenti i vari blocchi della barriera. Il primo passo è stato, quindi, quello di realizzare la geometria e la mesh degli honeycomb dei vari blocchi cercando di rispettare le dimensioni fisiche della barriera. Di ogni blocco, secondo quanto descritto dalle norme, è stata selezionata una porzione che è stata, poi, sottoposta ad uno sforzo di compressione statica:

questa caratterizzazione ha avuto lo scopo di tarare lo spessore delle celle di ogni blocco in modo da far rientrare l'andamento delle forze all'interno dei corridoi statici forniti.

Una volta effettuata la caratterizzazione statica e una volta ottenuta la taratura ottimale dei blocchi della barriera, è stata effettuata la prova di caratterizzazione dinamica: a questo scopo, i tre blocchi sono stati assemblati insieme, sono state realizzate le varie saldature e la barriera è stata fissata saldamente su una parete rigida. Il test dinamico prevede l'urto di un impattore tubolare viaggiante ad una certa velocità contro la barriera.

Infine, si è passati a validare il modello tramite una prova full scale (comprendente l'intero veicolo). È stato, quindi, effettuato un confronto tra i risultati ottenuti dalla stessa prova svolta sia con il nuovo modello di barriera che con il precedente e quelli ottenuti da una prova fisica (crash test) svolta in precedenza nelle stesse configurazioni. Da tale confronto si è ottenuta una buona correlazione numerico-sperimentale tra la prova con il nuovo modello di barriera MPDB e la prova sperimentale effettuata.

INDICE

CAPITOLO 1	7
Introduzione.....	7
1.1. Sicurezza stradale	7
1.1.1. Sicurezza attiva e preventiva.....	9
1.1.2. Sicurezza passiva	11
1.2. Il crash test	14
1.3. MPDB (Mobile Progressive Deformable Barrier)	19
1.3.1. Caratteristiche MPDB	19
1.3.1.1. Fissaggio	22
1.3.1.2. Costruzione.....	22
1.3.1.3. Montaggio dell'impattore	23
1.3.1.4. Configurazione di prova vettura-MPDB	23
 CAPITOLO 2	 25
Analisi numerica	25
2.1. L'analisi numerica	25
2.2. CAE- Computer-Aided Engineering	27
2.2.1. Limitazioni e rischi del CAE.....	28
2.2.2. Classificazione dei codici di calcolo	30
2.2.2.1. Metodo agli elementi al contorno (BEM – Boundary Element Method)	31
2.2.2.2. Metodo ai volumi finiti (FVM – Finite Volume Method)	31
2.2.2.3. Metodo alle differenze finite (FDM – Finite Difference Method)	32
2.2.2.4. Metodo agli elementi finiti (FEM – Finite Element Method)	32
2.2.3. Analisi agli elementi finiti	33
2.2.3.1. Tipologia di elementi finiti.....	34
2.2.3.2. Nodi, elementi e mesh	35
2.2.3.3. Formulazione a spostamenti assegnati	37
2.2.3.4. Serie polinomiali e funzioni di forma	37
2.2.3.5. Metodi di integrazione diretta	39
2.2.4. Metodi di calcolo implicito ed esplicito.....	40
2.2.5. Hourglass	42

CAPITOLO 3	44
Gli strumenti di calcolo: Altair HyperWorks e LS-DYNA	44
3.1. Dal CAD alla soluzione: passaggi principali.....	44
3.2. Pre e Post-Processing	45
3.2.1. Pre-Processing: Altair HyperMesh.....	45
3.2.2. Post-Processing: Altair HyperView	48
3.2.3. Solving: LS-DYNA	48
3.2.4. Descrizione del file di input	49
3.2.5. I contatti in LS-DYNA	51
3.2.5.1. Kinematic Constraint Method	52
3.2.5.2. Penalty Constraint Method	52
3.2.6. Il fenomeno dell'hourglass in LS-DYNA	53
3.2.7. Il bilancio energetico	54
3.2.8. Le unità di misura	55
 CAPITOLO 4	 57
Il modello FEM della barriera.....	57
4.1. Stato dell'arte MPDB-FEM.....	57
4.2. Scopo della tesi.....	57
4.3. Implementazione del modello	58
4.4. Generazione del nuovo modello FEM di barriera MPDB	60
4.4. Ambito di utilizzo del modello FEM di barriera MPDB.....	62
4.5. Alternative possibili	62
 CAPITOLO 5	 63
Caratterizzazione statica dei blocchi costituenti la barriera	63
5.1. Caratterizzazione statica dei blocchi anteriore e posteriore	63
5.1.1. Compressione statica del blocco anteriore (Blocco C).....	64
5.1.2. Compressione statica del blocco posteriore (Blocco A)	70
5.2. Sforzo di taglio sui blocchi anteriore e posteriore	74
5.2.2. Sforzo di taglio sul blocco posteriore (Blocco A)	77
5.3. Compressione statica del blocco centrale (Blocco B).....	80

CAPITOLO 6	88
Caratterizzazione dinamica	88
6.1. Implementazione dei singoli blocchi nel modello complessivo	88
6.2. Modello complessivo.....	92
6.3. Descrizione prova dinamica	96
6.4. Risultati.....	99
 CAPITOLO 7	 104
Simulazioni numeriche e prove sperimentali full scale	104
7.1. Modello FEM full scale	104
7.2. Confronto con il modello di riferimento e correlazione numerico sperimentale	105
7.3 Occupant Load Criterion (OLC).....	107
 CAPITOLO 8	 110
Conclusioni e sviluppi futuri.....	110
8.1. Conclusioni	110
8.2. Sviluppi futuri	111
 BIBLIOGRAFIA.....	 113

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1. Sicurezza stradale

Nei 28 Stati membri dell'UE, gli incidenti stradali rappresentano una delle principali cause di morte, con oltre 25 000 decessi ogni anno e un numero maggiore di feriti gravi. Più del 50% delle persone coinvolte in tali incidenti mortali, che normalmente possono essere singoli o multipli, sono occupanti di auto. Ciò si rivela essere un problema importante in primo luogo per gli aspetti sociali, ma anche per ragioni economiche, dal momento che le vittime di incidenti stradali comportano delle spese significative per i Paesi Europei sia in termini di costi tangibili che di costi umani. Per questi motivi, negli ultimi trent'anni, le istituzioni nazionali e internazionali si sono concentrate sulla creazione di test legislativi al fine di spingere i produttori a migliorare la sicurezza dei loro prodotti, sia per proteggere gli occupanti in caso di incidente, sia per sviluppare e installare sistemi che potrebbero impedire che l'evento si verifichi [1].

Quando si parla di sicurezza stradale si fa riferimento a tutte quelle metodologie e tecniche che hanno lo scopo di ridurre al minimo il numero e le conseguenze degli incidenti stradali e, in particolare, il rischio di lesioni gravi non solo per coloro che utilizzano un autoveicolo ma anche per tutte le persone che si spostano sul suolo stradale, cioè pedoni, ciclisti, motociclisti, ecc [2].

Un incidente stradale è un evento dannoso e risulta essere il prodotto di tre fattori di rischio:

- Ambiente: concorre all'incidente per il 7-10% e include tutti i fattori che riguardano la progettazione delle strade, il livello di illuminazione, lo stato delle carreggiate e le condizioni meteorologiche;
- Veicolo: concorre per il 3-5% e include tutte le caratteristiche costruttive della vettura e i dispositivi di sicurezza implementati.

- Uomo: concorre per l'85-90% e tale fattore fa riferimento allo stato di attenzione e alle condizioni psicofisiche del guidatore nel momento in cui si trova alla guida.



Figura 1: Rappresentazione grafica dei fattori che influenzano un incidente stradale [2].

Il fattore che influisce maggiormente sul verificarsi di un incidente è proprio l'uomo, infatti qualsiasi strumento che abbia lo scopo di prevenire un incidente risulta essere vano se è accompagnato da una guida distratta o da una condotta inadeguata.

Come si può notare dalla Figura 2, nell'ambito della sicurezza stradale relativa al veicolo si possono distinguere tre sottocategorie:

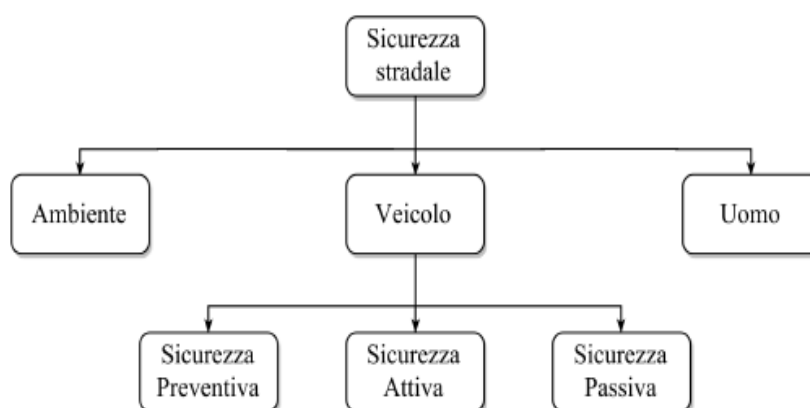


Figura 2: Ambiti relativi alla sicurezza stradale [2].

- Sicurezza attiva e preventiva;
- Sicurezza passiva.

1.1.1. Sicurezza attiva e preventiva

Quando si parla di sicurezza attiva si fa riferimento a tutto l'insieme di dispositivi, sistemi e apparati che hanno il compito di impedire il verificarsi di un incidente, con una funzione, quindi, soprattutto preventiva. Per questo motivo, in base a tale definizione e a quanto precedentemente detto, il sistema di sicurezza attiva più importante risulta essere il conducente stesso, il cui perfetto "funzionamento" rappresenta la miglior garanzia contro il verificarsi di un incidente [3].

Tra i sistemi di sicurezza attiva rientrano i freni, i pneumatici, gli ammortizzatori, le luci, lo sterzo, il tergicristallo, ma anche altri sistemi più complessi, come ad esempio:

- ABS (Anti Brake-locking System): si tratta di una unità di controllo elettronico che consiste nell'evitare l'improvviso bloccaggio di una ruota mentre le altre ancora girano. Anche se l'idea comune è che l'ABS serva a "frenare in meno spazio", non è questo il fine ultimo nonostante in alcune condizioni si raggiunge anche tale risultato. Sulle ruote sterzanti, il bloccaggio di una o di entrambe fa sì che esse perdano la capacità di dirigere il veicolo, che continua quindi a muoversi nella direzione che aveva in quel momento, senza più la possibilità di compiere manovre elusive rispetto ad un ostacolo. Con l'ABS tali manovre sono possibili in quanto, appena anche solo una delle ruote anteriori si blocca, il sistema provvede a far diminuire la pressione sulla pinza del freno di quella ruota quel tanto che basta per farle riprendere la rotazione, consentendo quindi allo sterzo di svolgere la sua funzione direzionale. Anche il bloccaggio delle ruote posteriori deve essere evitato perché, oltre a rendere instabile ed imprecisa la traiettoria del veicolo, diminuisce l'efficienza complessiva della frenata, allungando lo spazio necessario per fermarsi. L'utilità dell'ABS è particolarmente evidente sull'asfalto bagnato: in sua assenza, una brusca frenata non blocca il veicolo, ma lo fa partire "a saponetta" in modo incontrollato. La presenza dell'ABS su un veicolo è rivelata dalla caratteristica vibrazione del pedale del freno in una frenata a fondo con tutta la forza: è un fenomeno normale, indice dell'entrata in funzione del dispositivo [4].

- AEB (Autonomous Emergency Braking): molti incidenti sono causati dall'uso tardivo dei freni o da una forza frenante insufficiente. Il conducente può frenare in ritardo per diversi motivi, ad esempio può essere distratto o affaticato, oppure può trovarsi in condizioni di scarsa visibilità, o potrebbe non avere il tempo necessario per l'improvvisa e inattesa frenata del veicolo che precede. Alcuni costruttori hanno sviluppato delle tecnologie che aiutano il conducente ad evitare incidenti di questo tipo, o almeno a ridurre la gravità. I sistemi messi a punto sono proprio quelli raggruppabili nella categoria AEB (Sistema di frenata d'emergenza automatica). *Autonomous*: il sistema agisce in modo indipendente dal conducente per evitare o mitigare l'impatto. *Emergency*: il sistema interviene solo in una situazione critica. *Braking*: il sistema tenta di evitare l'impatto azionando i freni. I sistemi AEB migliorano la sicurezza in due modi: in primo luogo, aiutano ad evitare l'impatto identificando in tempo situazioni critiche e avvisando il conducente; in secondo luogo, ridimensionano la gravità degli incidenti inevitabili riducendo la velocità di collisione e, in alcune situazioni, predisponendo all'impatto la vettura e le cinture di sicurezza. Quasi tutti i sistemi AEB utilizzano una tecnologia basata su sensori ottici o telecamere per identificare gli ostacoli davanti alla vettura. Se rileva una potenziale collisione, l'AEB prova prima (ma non sempre) ad evitare l'impatto avvisando il conducente sulla necessità di intraprendere un'azione correttiva; se il conducente non interviene e l'impatto è imminente, il sistema applica una frenata. Alcuni sistemi applicano una frenata completa, altri una frenata parziale, ma in ogni caso l'intento è quello di ridurre la velocità di collisione [5].
- ESC (Electronic Stability Control): è una unità di controllo elettronico o sistema integrato di sicurezza attiva per autoveicoli. Si tratta di un sistema per il controllo della stabilità dell'automobile, che agisce in fase di sbandata, regolando la potenza del motore e frenando le singole ruote con differente intensità in modo tale da ristabilizzare l'assetto della vettura. Tale dispositivo è efficace nel correggere sia eventuali situazioni di sovrasterzo o sottosterzo, che si possono verificare in caso di errata impostazione di una curva, sia in caso di una improvvisa deviazione di traiettoria, evitando lo sbandamento del veicolo. La centralina interviene sia

sull'alimentazione del motore (riducendone la coppia) sia sulle singole pinze freno, correggendo la dinamica della vettura. In particolar modo, in caso di sottosterzo i freni intervengono frenando la ruota posteriore interna alla curva, creando un momento meccanico opposto alla sbandata; mentre in caso di sovrasterzo viene frenata la ruota anteriore esterna alla curva, generando sempre un movimento opposto. Questo sistema è generalmente associato all'ABS essendo di fatto complementari nel mantenimento della stabilità del veicolo nelle varie condizioni di marcia [6].

1.1.2. Sicurezza passiva

Si definisce sicurezza passiva l'insieme delle norme e dei comportamenti finalizzati a proteggere i passeggeri e a minimizzare le lesioni o il rischio di lesioni. I dispositivi e i sistemi di sicurezza passiva hanno lo scopo di diminuire le conseguenze negative dell'incidente, una volta che questo si sia verificato. In particolare, hanno lo scopo di assorbire l'energia cinetica posseduta dai corpi che occupano il veicolo in modo tale che essi non urtino – o che urtino con una velocità più bassa – contro le strutture del veicolo o contro il suolo. La gestione dell'energia cinetica posseduta del veicolo e dai suoi occupanti al momento dell'urto rappresenta il campo di applicazione tipico dei dispositivi di sicurezza passiva [7].

Secondo la definizione, rientrano in questa categoria:

- **CINTURE DI SICUREZZA**: sono, in caso di incidente, uno dei più importanti meccanismi di protezione per chi si trova all'interno dell'autovettura. Esse consentono di mantenere gli occupanti vincolati al sedile nel momento in cui avviene l'urto, in questo modo si minimizza la possibilità che essi possano urtare contro l'interno dell'abitacolo o che venga catapultato fuori al momento dell'impatto. I loro corpi infatti, se non trattenuti, continuerebbero a muoversi in avanti per inerzia e, con l'energia cinetica determinata dalla loro velocità, verrebbero proiettati contro il volante, il cruscotto e il parabrezza o potrebbero essere catapultati all'esterno. In Figura 3 è rappresentato un urto frontale con conducente non cinturato, dove si può notare che sono le gambe le prime a toccare la parte inferiore del cruscotto, poi il torace entra in contatto con il volante; successivamente il corpo si solleva e la testa urta contro il parabrezza.

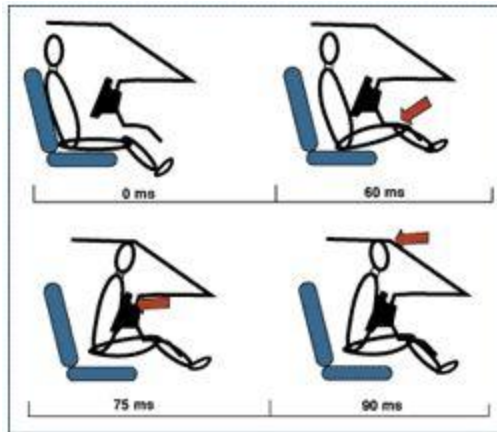


Figura 3: Urto frontale con conducente non cinturato [8].

L'uso della cintura modifica radicalmente questa pericolosa situazione (Figura 4):

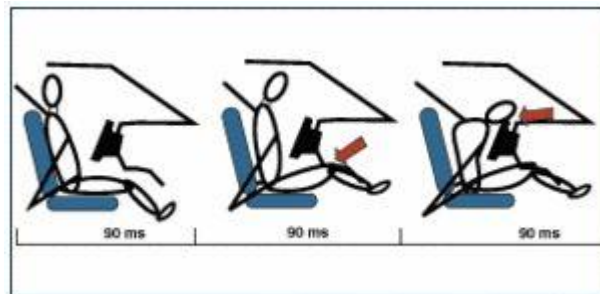


Figura 4: Urto frontale con conducente cinturato [8].

Le statistiche hanno dimostrato che il corretto uso della cintura di sicurezza riduce del 50% le probabilità di decesso in un incidente in quanto l'occupante è adeguatamente trattenuto e si limita il rischio di urtare contro le parti interne del veicolo [8].

- **AIRBAG:** utilizzati in sinergia con le cinture di sicurezza, rappresentano un sistema di ritenuta supplementare che offre una protezione aggiuntiva rispetto a quella offerta dalla cintura di sicurezza. L'airbag è un "pallone" di forma piatta che viene istantaneamente gonfiato appena inizia l'urto, fuoriuscendo da un apposito vano dotato di coperchio, dalla parte centrale dello sterzo (se dal lato guidatore) e dal cruscotto (se dal lato passeggero). La sua funzione principale, soprattutto negli urti a velocità maggiori, è di impedire il contatto della testa o del volto degli occupanti con il volante o il cruscotto. Infatti, anche se il torace, il bacino e le gambe sono trattenuti dalle cinture di sicurezza, la testa rimane libera di muoversi in avanti e verso il basso.

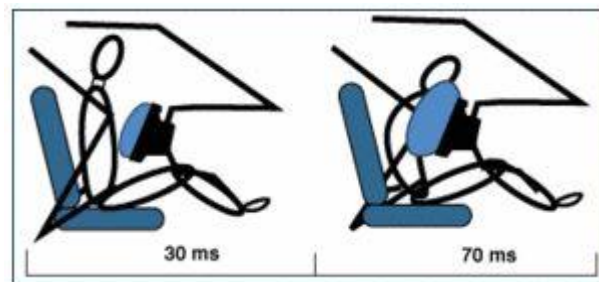


Figura 5: Airbag [9].

L'airbag è costituito da: un sensore che rileva la decelerazione brusca dovuta ad un impatto; una centralina che riceve il segnale, lo elabora e invia il comando di accensione al detonatore; un detonatore o innesco, che accende le sostanze contenute nella capsula esplosiva; una capsula esplosiva, contenente sostanze la cui accensione sviluppa una grande quantità di gas che va a gonfiare il "sacco"; il "sacco", di materiale sintetico robusto, impermeabile ai gas ma dotato di fori nella parte posteriore. Con l'accensione, si realizza un'esplosione che gonfia il "sacco" proprio mentre la testa e, parzialmente, il torace di chi è seduto davanti si stanno avvicinando; subito dopo comincia a sgonfiarsi attraverso i fori di cui è dotato il sacco, attutendo nel frattempo l'impatto di quelle parti sul volante o sul cruscotto [9].

- **POGGIATESTA:** serve a ridurre il rischio di danni ai tessuti del collo nel momento dell'impatto, soprattutto in caso di tamponamento. Il poggiatesta impedisce la flessione all'indietro della testa, causa di lesioni ai tessuti muscolari e alle vertebre cervicali ed è comunque utile anche negli urti frontali, bloccando la testa nel movimento di rimbalzo all'indietro che essa, con tutto il corpo, compie dopo aver terminato l'impatto contro la cintura di sicurezza. Quindi, il poggiatesta sorregge e supporta la testa riducendo il fenomeno del "colpo di frusta" che potrebbe interessare il rachide cervicale. Il poggiatesta va sollevato finché il suo bordo superiore non si trova all'altezza del margine superiore della testa; inoltre la distanza tra la sua superficie anteriore e la testa non dovrebbe essere superiore a 10 cm.

Infine, tra i sistemi di sicurezza passiva, possono rientrarvi anche i guard-rail lungo le strade che, oltre ad avere una funzione di “contenimento”, hanno anche quella di assorbire l’energia cinetica del veicolo attraverso la loro deformabilità [10].

Le prestazioni di sicurezza passiva di numerosi veicoli sono state testate dal programma EuroNCAP attraverso crash test condotti utilizzando barriere deformabili per urti ad alta velocità, nonché prove di urto laterale o urto pedone a bassa velocità.

L’EuroNCAP ha lo scopo di valutare, attraverso opportuni protocolli di prova, le prestazioni delle automobili dal punto di vista della sicurezza.

1.2. Il crash test

L’EuroNCAP (European New Car Assessment Program, ovvero il programma europeo di valutazione delle nuove autovetture) è un programma di crash test stabilito per fornire agli utenti finali una valutazione realistica del livello di sicurezza dei nuovi veicoli sul mercato europeo. Lo scopo di tale organizzazione è quello di diffondere la conoscenza dell’efficacia della sicurezza dei veicoli per spingere i produttori automobilistici a migliorare i sistemi di sicurezza oltre i requisiti di omologazione. A sua volta ciò influenza direttamente la quantità di vite salvate in situazioni di crash del mondo reale. Il metodo per raggiungere questo obiettivo si è basato sin dall’inizio su un sistema di classificazione a stelle a partire da un minimo di zero per arrivare ad un massimo di cinque (che vanno da una scarsa protezione da impatto ad una buona protezione globale in caso di impatto), calcolate dai risultati di una serie di test [11]. Il metodo di valutazione potrebbe, però, variare in base all’ente, infatti oltre all’EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) si sono sviluppati nel mondo altri programmi, ad esempio l’USNCAP negli USA (United States New Car Assessment Programme), l’ANCAP in Australia (Australian New Car Assessment Programme), il JNCAP in Giappone (Japan New Car Assessment Programme).

Un crash test, o prova di impatto, è una forma di collaudo distruttivo che viene normalmente eseguito per verificare la sicurezza delle automobili e dei relativi componenti. La velocità e la modalità con cui vengono effettuati tali test dipende dal test stesso e sono normalmente

condotti basandosi su standard rigorosamente scientifici e sicuri. I crash test sono molto costosi, per cui, da ognuno di essi, deve essere estratto il maggior numero possibile di dati. Solitamente, l'esecuzione dei crash test richiede l'uso di strumenti per acquisire dati ad alta velocità, come ad esempio accelerometri triassiali, telecamere ad alta velocità e manichini da crash test. Tramite tali prove di impatto viene valutata la reazione della vettura a diversi tipi di collisione in base a parametri ben definiti e i risultati dei test vengono espressi mediante un sistema che utilizza delle stelle, a partire da un minimo di zero per arrivare ad un massimo di cinque (che vanno da una scarsa protezione da impatto ad una buona protezione globale in caso di impatto) [12].

È importante fare la distinzione tra due tipologie differenti di crash test: il crash test obbligatorio per legge (omologazione) e le prove di crash test che servono per assegnare le stelle (rating, nel nostro caso EuroNCAP). Il crash test per omologazione non assegna un risultato finale alla vettura, ma serve a verificare che l'auto superi tutti i parametri imposti dalla legge europea e, nel momento in cui si ha un esito favorevole, l'auto diventa vendibile in Europa. I crash test indipendenti sono solitamente più severi di quelli richiesti in fase di omologazione, hanno una velocità di esecuzione più elevata e prevedono limiti biomeccanici più severi per la misurazione delle lesioni e delle prove che non sono previste dai test omologativi. Oltre alle prove di omologazione (necessarie per la messa sul mercato del veicolo) e a quelle di rating (volte ad attribuire un punteggio di sicurezza con il sistema delle stelle), le case costruttrici possono decidere di eseguire ulteriori prove, dette di conformità, dopo che il veicolo è stato immesso sul mercato al fine di garantire che esso sia sempre conforme al progetto iniziale. Nel caso di EuroNCAP la valutazione si estende anche a sistemi di sicurezza preventiva e attiva, oltre alla protezione dei pedoni e a quella dei bambini in caso di impatto [13].

I crash test prevedono diversi tipi di urto che, nel caso dell'EuroNCAP e nel caso degli adulti, risultano essere:

- TEST FRONTALE DISASSATO: gli urti frontali costituiscono la maggior causa di decesso e di traumi gravi; un esempio tipico è quello di una collisione frontale tra due vetture a velocità moderatamente elevate. Il protocollo del test prevede che l'autovettura venga

fatta impattare alla velocità di 64 km/h contro una barriera deformabile disassata del 40% che rappresenta la vettura che sorraggiunge. Il test utilizza due manichini adulto e due manichini bambino collocati negli appositi sistemi di ritenuta posteriori. Il test valuta il modo in cui la struttura del veicolo resiste all'impatto; vengono misurate le decelerazioni massime, le forze e gli schiacciamenti del torace e del bacino [14]. (Figura 6)



Figura 6: Test frontale disassato [14].

- TEST FRONTALE SU TUTTA LA LARGHEZZA: il protocollo prevede di eseguire un impatto contro una barriera rigida sovrapponibile al 100% della larghezza del veicolo con una velocità di impatto pari a 50 km/h. All'interno vengono posizionati due manichini donna rispettivamente sul sedile del conducente e sul sedile posteriore in direzione opposta a quella del conducente. Anche durante questo test vengono misurate le decelerazioni massime, le forze e gli schiacciamenti del torace e del bacino [15]. (Figura 7)



Figura 7: Test frontale su tutta la larghezza [15].

- IMPATTO LATERALE: una barriera mobile deformabile viene proiettata perpendicolarmente contro la fiancata della vettura testata alla velocità di 50 km/h. Un

manichino uomo viene posizionato sul sedile del conducente e due manichini bambino vengono collocati nei rispettivi sistemi di ritenuta sul sedile posteriore. Il test intende garantire che le parti più vulnerabili del corpo siano adeguatamente protette: vengono adottati airbag laterali e vengono sviluppate strutture di assorbimento di energia più sofisticati nei sedili e nei pannelli portiera [16]. (Figura 8)



Figura 8: Impatto laterale [16].

- **TEST DEL PALO:** spesso, la perdita di controllo del veicolo da parte del conducente, dovuta alla velocità, ad una curva presa male o al manto sdruciolevole, causano lo spostamento laterale della vettura che si impatta contro pali o alberi sul bordo della strada. Il test riproduce l'impatto laterale di una vettura contro un palo rigido alla velocità di 32 km/h. La vettura è posizionata perpendicolarmente alla direzione del movimento, oppure ad un piccolo angolo di distanza dalla perpendicolare. Un singolo manichino uomo viene collocato sul sedile conducente. Il test intende valutare la protezione offerta dalla vettura per il capo del conducente: senza una protezione efficace, il palo potrebbe colpire la testa del conducente causando un trauma grave [17]. (Figura 9)



Figura 9: Test del palo [17].

- TEST PER IL COLPO DI FRUSTA: i traumi da colpo di frusta sono associati alla repentina ed eccessiva distorsione della colonna vertebrale e spesso si verificano in collisioni posteriori a bassa velocità. I sedili e i poggiatesta vengono testati su una slitta utilizzando un manichino: si eseguono tre prove dinamiche che rappresentano l'intera gamma delle forze d'urto responsabili delle lesioni e si valuta se il sedile e il poggiatesta funzionano adeguatamente nell'offrire una valida protezione contro il colpo di frusta, in scenari di collisione tipici [18]. (Figura 10)

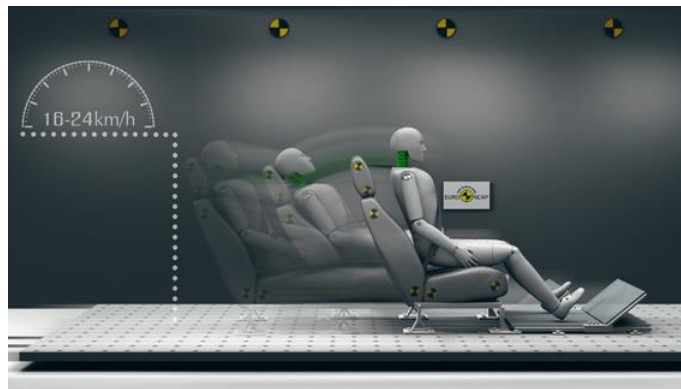


Figura 10: Test del colpo di frusta [18].

1.3. MPDB (Mobile Progressive Deformable Barrier)

Negli ultimi anni, il programma NCAP (New Car Assessment Program) di molti paesi ha spinto le case automobilistiche a migliorare l'affidabilità delle vetture negli incidenti: i veicoli soddisfano la maggior parte dei requisiti delle diverse configurazioni di crash test standard, quindi sono diventati molto più sicuri rispetto al passato. Tuttavia, gli attuali standard NCAP non coprono tutti i tipi di incidenti stradali reali.

L'impatto frontale EuroNCAP valuta il potenziale di autoprotezione del veicolo sotto il presupposto che la struttura portante della vettura sia colpita idealmente in caso di incidente. Poiché gli incidenti automobilistici rappresentano oltre il 50% dei decessi stradali e causano oltre il 40% dei feriti gravi, l'autoprotezione è un aspetto decisivo della sicurezza passiva. Per garantire una protezione ottimale degli incidenti, è essenziale che venga colpita la struttura di supporto del veicolo e che l'energia venga assorbita dalla zona di assorbimento mentre la cabina rimane stabile.

Oggi, per valutare la sicurezza negli scontri frontali, in tutta Europa e in Paesi tra cui gli Stati Uniti e il Giappone, vengono effettuati dei test che prevedono l'uso di barriere rigide piatte e di barriere deformabili. Tuttavia, poiché l'energia iniziale in questi metodi di prova è determinata dalla massa e dalla velocità del veicolo in questione, non sempre tali test forniscono una adeguata valutazione della sicurezza in caso di collisione con un veicolo più pesante.

1.3.1. Caratteristiche MPDB

La barriera deformabile prevede la presenza di un impattore che consiste di tre blocchi a nido d'ape impilati. Il blocco frontale e quello posteriore offrono livelli di forza costanti in funzione della deflessione, il blocco centrale viene realizzato in modo da dare un livello di forza progressivamente crescente all'aumentare della deflessione. Il blocco posteriore è collegato ad un pannello posteriore in alluminio usato anche per montare l'impattore. I tre blocchi sono legati a tre fogli di alluminio e l'intero impattore è coperto da una "pelle" in alluminio rivettata sulla faccia anteriore. (Figura 11)

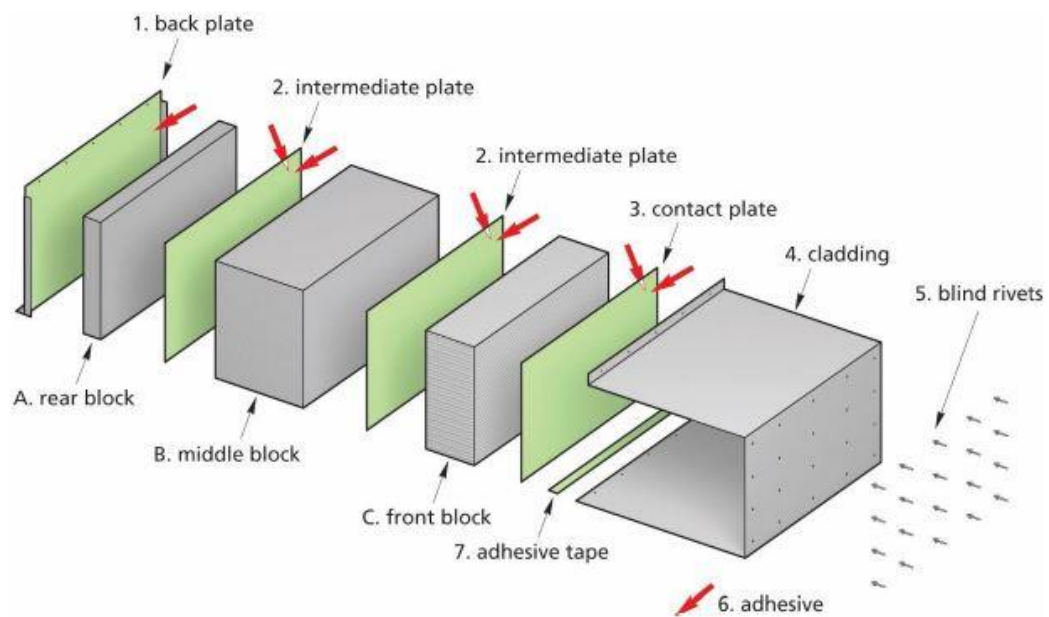


Figura 11: Vista isometrica esplosa di MPDB [19].

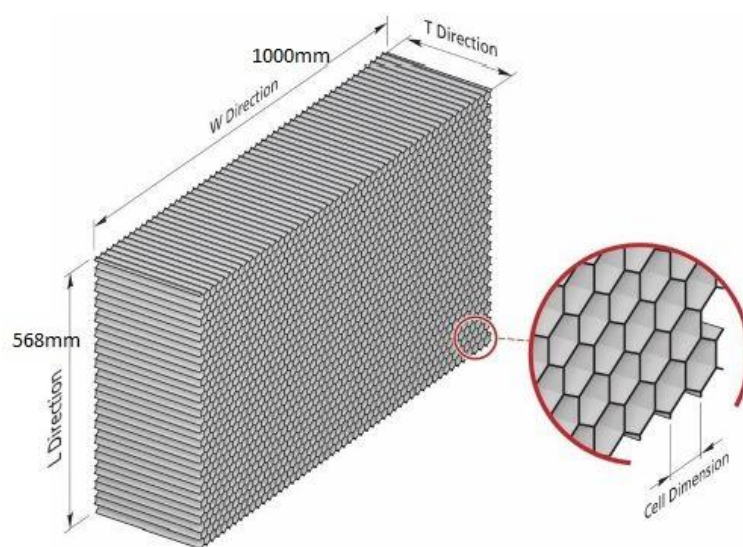


Figura 12: Dimensioni MPDB [19].

Dalla Figura 12 si può notare che le dimensioni dei tre blocchi principali sono le seguenti:

	Larghezza [mm]	Altezza [mm]	Profondità [mm]
Blocco Posteriore (A)	1000±2.5	568±5.0	90±1.0
Blocco Centrale (B)	1000±2.5	568±5.0	450±1.0
Blocco Anteriore (C)	1000±2.5	568±5.0	250±1.0

Tabella 1: Dimensioni blocchi MPDB [19].

I blocchi a nido d'ape devono essere realizzati in alluminio 3003. Il materiale deve essere pulito in modo da rimuovere eventuali residui che possono essere stati prodotti durante la lavorazione del materiale a nido d'ape grezzo.

- **PIASTRA POSTERIORE:** la piastra posteriore è larga 1000 ± 2.5 mm, è alta 570 ± 2.5 mm e ha uno spessore di 3.0 ± 0.2 mm. La flangia superiore deve essere verticale e la flangia inferiore deve essere piegata di 90° verso la parte posteriore. Le due flange laterali di 30 mm devono essere piegate di 90° verso gli honeycomb. La piastra posteriore deve essere realizzata in alluminio della serie AlMg₂ e AlMg₃ con una durezza tra 50 e 67 HBS.
- **PIASTRE INTERMEDIE:** le due piastre intermedie sono larghe 1000 ± 2.5 mm, sono alte 570 ± 2.5 mm e hanno uno spessore di 0.5 ± 0.06 mm. Le piastre intermedie sono realizzate in alluminio 5754 H111.
- **PIASTRA DI CONTATTO:** la piastra di contatto è larga 1000 ± 2.5 mm, è alta 570 ± 2.5 mm e ha uno spessore di 1.5 ± 0.1 mm. Attraverso la piastra di contatto vengono realizzati 20 fori da 6.2 mm per poter accogliere i rivetti ciechi. Il blocco di contatto è realizzato in alluminio 1050A H24.
- **COPERTURA:** la piastra di copertura è larga 1000 ± 2.5 mm, alta 570 ± 2.5 mm con uno spessore di 0.8 ± 0.1 mm. La flangia di montaggio superiore deve essere alta 75 mm, la flangia di montaggio inferiore è alta 53 mm prima della piegatura. La flangia superiore deve essere verticale e quella inferiore deve essere piegata di 90° verso la parte

posteriore. Attraverso la piastra di copertura devono essere realizzati venti fori da 6.2 mm per accogliere i rivetti ciechi.

- Per collegare la piastra di contatto con quella di rivestimento devono essere utilizzati venti rivetti ciechi in alluminio o in acciaio con un diametro di 6 mm [19].

1.3.1.1. Fissaggio

Alle superfici deve essere applicato dell'adesivo che deve essere un poliuretano bicomponente o un equivalente; occorre prestare attenzione per garantire che non entri nelle celle a nido d'ape causandone un aumento della resistenza allo schiacciamento. Inoltre, nei casi in cui gli honeycomb debbano essere incollati su un foglio di alluminio, l'adesivo deve essere applicato solo sul foglio di alluminio.

Il nastro adesivo può essere usato in corrispondenza della flangia piegata di collegamento tra il rivestimento e la piastra posteriore solo per impedire che il materiale di incollaggio goccioli durante la costruzione.

Per questo nastro non è presente alcuna specifica poiché non influenza le prestazioni della barriera.

La forza di adesione del nastro adesivo viene misurata tramite prova di tensione piatta. La porzione che viene testata deve essere 100 mm x 100 mm, profonda 15 mm e deve essere incollata ad un campione di materiale del pannello posteriore [19].

1.3.1.2. Costruzione

I principali blocchi a nido d'ape devono essere attaccati ai fogli con adesivo in modo tale che gli assi delle celle siano perpendicolari ai fogli. Il rivestimento esterno deve essere incollato alla piastra di contatto. Le superfici superiore e inferiore del rivestimento esterno non devono essere attaccate ai blocchi a nido d'ape ma devono essere posizionate vicino ad essi. Il foglio di rivestimento deve essere incollato in modo adesivo alla piastra posteriore sulle flange di montaggio. Nelle flange di montaggio devono essere praticate delle scanalature per facilitare il montaggio della barriera. Inoltre, devono essere praticati cinque fori nella flangia superiore e cinque nella flangia inferiore, tutti aventi diametro 10 mm: i fori nella flangia superiore

possono essere aperti per facilitare il fissaggio purché sia possibile sviluppare una presa sufficiente per evitare il distacco durante l'intera durata del test di impatto [19].

1.3.1.3. Montaggio dell'impattore

L'attacco della barriera al carrello deve essere tale per cui il veicolo non possa toccare alcuna parte della struttura a più di 75 mm dalla superficie superiore della barriera (esclusa la flangia superiore) durante qualsiasi fase dell'impatto. Una volta montata sul carrello, la piastra posteriore della barriera deve essere piana, senza pieghe, in modo che non vi siano spazi superiori a 3 mm tra la piastra posteriore e la superficie di montaggio del carrello.

La barriera deformabile deve essere fissata con 10 bulloni aventi un diametro di almeno 8 mm, 5 nella flangia di montaggio superiore e 5 in quella inferiore.

Delle strisce di fissaggio in acciaio devono essere utilizzate lungo l'intera lunghezza delle flange di montaggio superiore e inferiore; queste strisce devono essere alte 60 mm e larghe 1000 mm con uno spessore di almeno 3 mm. Inoltre, devono avere i bordi arrotondati per evitare di strappare la barriera contro la striscia durante l'impatto. Il bordo della striscia di fissaggio deve trovarsi a non più di 5 mm al di sopra della base della flangia di montaggio superiore della barriera o 5 mm sotto la parte superiore della flangia di montaggio inferiore della barriera. In entrambe le fascette devono essere praticati cinque fori di 9.5 mm di diametro in corrispondenza di quelli presenti nella flangia di montaggio sulla barriera. I fori della striscia di montaggio e quelli della flangia della barriera possono essere allargati da 9.5 mm fino ad un massimo di 25 mm al fine di soddisfare le differenze nelle disposizioni della piastra posteriore.

Per poter alloggiare la flangia di montaggio inferiore, il bordo inferiore della faccia di montaggio del carrello deve essere piegato di 45°.

Nell'impatto nessuna struttura dovrebbe fallire, sia le flange di attacco superiori sia quelle inferiori che devono rimanere attaccate al carrello [19].

1.3.1.4. Configurazione di prova vettura-MPDB

Nella prova vettura-MPDB viene simulato l'urto veicolo-veicolo tramite l'utilizzo di un carrello mobile dotato di una barriera deformabile. Le caratteristiche inerziali, geometriche e strutturali dell'MPDB vogliono riprodurre le caratteristiche medie dei veicoli che vengono presi come riferimento.

La configurazione di crash test di compatibilità simula una collisione frontale con una sovrapposizione del 50% tra il veicolo da valutare e un carrello mobile di circa 1300kg che rappresenta, appunto, una tipica auto familiare di piccole dimensioni ampiamente utilizzata. Il veicolo e il carrello viaggiano alla stessa velocità di 50 km/h. L'angolo di impatto è pari a 0° [20].

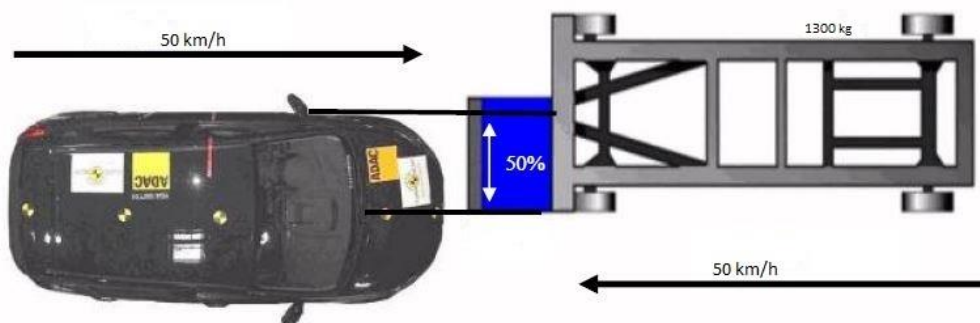


Figura 13: Configurazione di prova auto - MPDB [20].

Per valutare il rischio di lesioni degli occupanti, vengono installati due manichini H3 su ciascuno dei due sedili anteriori e un manichino per bambini Q6 sull'apposito sistema di ritenuta posteriore destro. L'installazione e la strumentazione dei manichini, nonché il carico e la misurazione del veicolo sono conformi al protocollo di test EuroNCAP.

CAPITOLO 2

Analisi numerica

2.1. L'analisi numerica

La matematica svolge un ruolo fondamentale nell'analisi dei problemi del mondo reale: i modelli matematici approssimano l'evoluzione del fenomeno che è oggetto di studio consentendo, quindi, di simularne e prevederne lo sviluppo evitando, in questo modo, di effettuare esperimenti complessi, costosi e a volte anche pericolosi. Il processo che porta alla risoluzione di un problema del mondo reale può essere schematizzato in tre fasi:

- Prima fase: modellizzazione che consiste nell'associare al problema reale un modello matematico che ne approssimi l'evoluzione;
- Seconda fase: il modello matematico viene analizzato e da ciò si ricavano le proprietà qualitative della soluzione, vale a dire, ad esempio, esistenza, unicità, regolarità;
- Terza fase: si individuano i metodi di risoluzione, si analizzano per capire qual è quello più efficace e lo si implementa su un calcolatore mediante un opportuno linguaggio di programmazione.

Un aspetto importante è che, poiché la soluzione del problema, nella maggior parte dei casi, non è esprimibile in forma esplicita, ad esempio mediante funzioni elementari, le sole proprietà qualitative non sono sufficienti per gli scopi richiesti. Si presenta, quindi, la necessità di risolvere il problema matematico utilizzando degli algoritmi, cioè ottenendo, a partire da un insieme finito di numeri e tramite un numero finito di operazioni aritmetiche, un'informazione approssimata della soluzione, ma al contempo adeguata alle richieste.

Nella risoluzione di problemi di analisi matematica che generalmente hanno natura continua questo processo algoritmico, necessariamente discreto perché finito, si inquadra nel settore noto come analisi numerica.

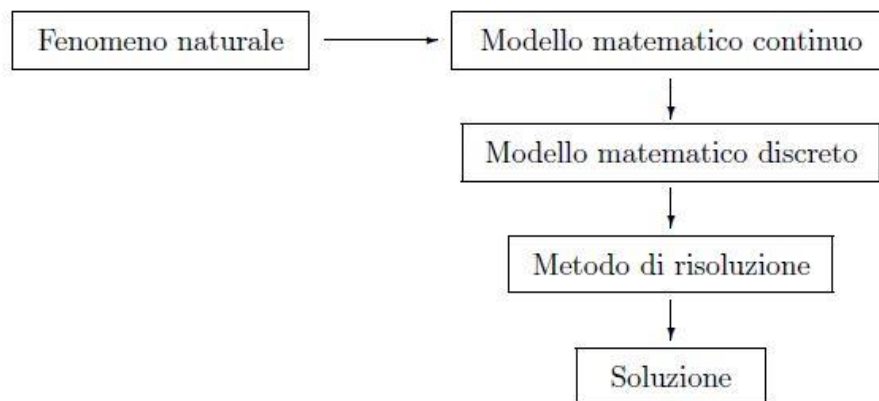


Figura 14: Step del processo di risoluzione di un problema del mondo reale [21].

L'analisi numerica è una branca della matematica applicata che risolve i modelli prodotti dall'analisi matematica alle scomposizioni finite normalmente praticabili, coinvolgendo il concetto di approssimazione. L'analisi numerica ha assunto le caratteristiche di una disciplina autonoma con l'introduzione e l'uso dei calcolatori, in quanto l'elaborazione di grandi quantità di dati ha portato alla luce problemi non emersi nel calcolo manuale e il dover risolvere in modo finito problemi di natura continua ha creato delle nuove problematiche.

Per risolvere un problema numerico conviene far riferimento alle librerie di software che implementano i metodi numerici: i programmi di tali librerie soddisfano specifici criteri di qualità, consentono di scegliere il metodo più adatto e di prevedere, nello stesso tempo, ogni possibile fonte di errore. Fare una stima sull'errore è importante per poter fare affidamento sui valori trovati che rappresentano la soluzione approssimata del problema. Le stime danno un limite superiore all'errore che si commette prendendo per buoni i valori calcolati al posto di quelli esatti che deriverebbero dalla perfetta risoluzione del problema all'origine. Lo studio delle stime dell'errore, parte indispensabile dell'analisi numerica, è di conseguenza un fattore fondamentale nella pratica [21].

2.2. CAE- Computer-Aided Engineering

Con il termine CAE (Computer-Aided Engineering, in italiano Ingegneria Assistita dal Computer) si fa riferimento a tutte le applicazioni software che agevolano la risoluzione di problemi tecnologici tramite algoritmi di calcolo numerico. Lo scopo è quello di migliorare la progettazione e di semplificare la risoluzione di problemi di progettazione relativi ad un'ampia gamma di settori.

Tutti i problemi di ingegneria che possono essere descritti da equazioni si prestano ad essere risolte con l'ausilio di programmi CAE, in particolare le categorie di problemi più frequentemente risolti tramite CAE sono:

- Simulazioni analogiche e simulazioni digitali di circuiti elettronici;
- Calcolo di campi elettromagnetici (sia quelli desiderati, nel caso di progettazione di antenne, che quelli indesiderati, nel caso dello studio dell'interferenza elettromagnetica);
- Calcolo statico o dinamico di strutture (in ingegneria civile o meccanica).

In generale, l'utilizzo di un programma CAE prevede tre fasi:

- Inserimento nel computer di un modello matematico del sistema fisico da studiare (anche detto pre-processing o data-entry): viene modellata la geometria o la rappresentazione del sistema e vengono specificate le proprietà fisiche del sistema;
- Calcolo numerico sul modello (solving): il modello viene risolto usando una formulazione matematica appropriata;
- Visualizzazione ed analisi dei risultati (post-processing o visualization): i risultati vengono resi disponibili per la revisione.

Le grandi software house stanno creando degli ambienti integrati di progettazione contenenti codici CAD (Computer-Aided Design) e CAE, definiti CAD/CAE, in modo da fornire sia complete funzionalità di CAD per la realizzazione della geometria del modello fisico che di calcolo numerico. Il successo di tali codici è anche legato alla capacità di integrarsi facilmente

all'interno del processo di progettazione portando ad un significativo risparmio in termini di tempi e costi.

L'utilizzo di software come supporto alla progettazione offre la possibilità di sviluppare un modello matematico da esaminare e consente di esaminarne e simularne il comportamento con un costo relativamente basso, permettendo di arrivare ai test sperimentali con un prodotto già abbastanza performante poiché testato e ottimizzato in precedenza. La maggiore velocità nella progettazione è principalmente legata ad una diminuzione dei cicli di sviluppo e ad una riduzione della produzione dei prototipi fisici, poiché i sistemi vengono valutati e perfezionati mediante simulazioni informatiche, che consentono di risparmiare tempo e denaro. La tecnologia CAE offre, inoltre, informazioni utili sulle prestazioni all'inizio del processo di sviluppo, quando apportare modifiche al modello costa di meno [22].

2.2.1. Limitazioni e rischi del CAE

I codici di calcolo, in generale, prevedono una interfaccia grafica semplificata che consente all'utente di realizzare il modello in maniera più o meno intuitiva, senza la necessità di scrivere le equazioni che governano il fenomeno fisico dal momento che tali equazioni sono generate successivamente dal codice. Tale aspetto rappresenta da un lato un pregio in quanto i codici, mediante poche operazioni, riescono a scrivere una grande quantità di equazioni che altrimenti sarebbero di difficile gestione; dall'altro lato può essere, però, fonte di errore, in quanto l'utente potrebbe perdere di vista la fisica vera e propria del problema limitandosi ad un uso automatizzato e superficiale del codice numerico e non giudicando in maniera critica la validità dei risultati ottenuti. Infatti, anche fornendo al codice dei dati in disaccordo con la realtà fisica del problema che si vuole analizzare, questo fornisce comunque un risultato, ma non è garantito che sia corretto.

Il modello matematico essendo, appunto, una modellizzazione e non una fedele riproduzione, contiene inevitabilmente delle ipotesi semplificative, delle limitazioni di validità e un certo grado di incertezza sui dati che vengono inseriti. Ci sono delle ipotesi semplificative e limitazioni di validità che sono note all'utente in quanto sono dovute a scelte consapevoli di modellizzazione, ma ci sono altre limitazioni che dipendono dal codice impiegato e sono

introdotte nel problema in modo del tutto inconsapevole e questo può portare a risultati che si discostano dalla realtà. Quindi, è fondamentale una buona conoscenza dei limiti e delle caratteristiche del codice di calcolo utilizzato.

Il codice numerico viene utilizzato per simulare il comportamento del modello matematico ricorrendo agli strumenti messi a disposizione dall'analisi numerica e questo introduce ulteriori errori che non fanno altro che aumentare la differenza tra la soluzione ottenuta e la realtà analizzata. Esistono tre tipi principali di errori: errori numerici, errori chiamati sistemici ed errori che possono essere commessi dall'utente.

Tra gli errori numerici (o semplicemente errori) che bisogna tenere in considerazione rientrano:

- Inadeguatezza o inaccuratezza dei metodi numerici utilizzati;
- Limiti di precisione della macchina;
- Limiti nell'accuratezza dell'approssimazione dei risultati.

Tali errori sono imprescindibili dall'analisi numerica, ma possono essere quantificati e ridotti entro limiti accettabili operando sia sulla scelta del metodo di soluzione sia su quelli che sono i parametri di analisi; spesso, però, la riduzione degli errori porta ad un aumento dei tempi e dei costi di calcolo.

Gli errori sistemici sono quelli che possono portare a risultati troppo scostanti dal fenomeno reale e tra questi rientrano:

- Limitazioni nel modello o nel codice;
- Errori sui dati;
- Errori numerici.

A questi errori si aggiungono quelli che vengono commessi dall'utente in fase di pre e post processing, ovvero errori di interpretazione dei dati di input, errori di modellazione o semplici sviste. Questi risultano essere gli errori più frequenti, sono più difficili da ridurre e, a tal fine, è opportuno procedere con metodo: si verificano più volte i dati immessi, si realizzano modelli intermedi e si comparano tra loro i risultati.

A causa di tutti questi errori, l'unico modo per avere sufficiente confidenza nella bontà dei risultati forniti dal modello resta la validazione sperimentale che consiste nel confronto dei

risultati ottenuti dal modello numerico con quelli derivanti dalle prove sperimentali su un determinato componente in analoghe condizioni di lavoro [23].

Sfortunatamente, però, non sempre è possibile ottenere una validazione sperimentale sufficientemente adeguata, quindi spesso si ricorre a strade alternative di validazione quali:

- Validazione parziale (condotta limitatamente ad alcuni aspetti del modello);
- Validazione prototipale in scala;
- Confronto con modelli numerici di differente complessità.

2.2.2. Classificazione dei codici di calcolo

Esistono differenti tipologie di codici numerici e la scelta del metodo di calcolo più appropriato dipende strettamente dal risultato che si vuole raggiungere. Pertanto, è possibile considerare una prima suddivisione di tali codici sulla base del metodo di risoluzione che viene applicato; in tal senso i codici possono essere classificati in categorie ben distinte in base alla strategia di risoluzione:

- Metodo degli elementi al contorno (BEM – Boundary Element Method);
- Metodo ai volumi finiti (FVM – Finite Volume Method);
- Metodo alle differenze finite (FDM – Finite Difference Method);
- Metodo agli elementi finiti (FEM – Finite Element Method).

Lo scopo di tutti i metodi numerici è la risoluzione di un problema fisico descritto da equazioni differenziali e ognuno di essi si propone di arrivare alla soluzione manipolando le diverse formulazioni di tali equazioni, pertanto i singoli metodi numerici possono essere utilizzati per la risoluzione dello stesso problema.

Quando è richiesto un alto livello di dettaglio interno alla struttura, generalmente i metodi FEM, FDM o FVM sono quelli più appropriati, poiché l'applicazione del metodo BEM condurrebbe a risultati poveri dal momento che verrebbero considerate solo le superfici esterne. Nello specifico, il metodo FVM risulta di gran lunga più prestante in problemi di fluidodinamica computazionale, mentre il metodo FDM presenta delle limitazioni in alcuni casi particolari, per i quali il FEM risulta essere più adeguato. È possibile affermare che il

metodo FEM ricopre una posizione dominante nel panorama delle tecniche numeriche di rappresentazione e approssimazione di problemi fisici descritti da equazioni differenziali. Nei paragrafi seguenti verranno brevemente descritti i vari metodi sopra elencati, dedicando particolare attenzione al Metodo agli Elementi Finiti [23].

2.2.2.1. Metodo agli elementi al contorno (BEM – Boundary Element Method)

Questo metodo richiede la definizione di nodi ed elementi ma ne considera solo il dominio relativo ai lati, riducendo, in questo modo, di una dimensione i termini del problema e velocizzando la risoluzione: quindi, se, ad esempio, un problema richiede che venga discretizzato un volume, saranno considerate solo le superfici esterne; se, invece, un problema richiede che venga discretizzata una superficie, si considera solo la sua periferia. Il metodo agli Elementi al Contorno viene generalmente usato per la risoluzione di equazioni differenziali lineari alle derivate parziali ed è, spesso, molto più efficiente degli altri metodi numerici a disposizione soprattutto per problemi nel campo dell'acustica o problemi NVH (Noise Vibration and Harshness problems). Per altre applicazioni, invece, il metodo BEM è decisamente meno efficiente dei più comuni metodi di discretizzazione dei volumi [23].

2.2.2.2. Metodo ai volumi finiti (FVM – Finite Volume Method)

Il Metodo ai Volumi Finiti è un metodo numerico per la rappresentazione e la risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali come sistema di equazioni algebriche. Nel Finite Volume Method gli integrali di volume definiti nelle equazioni differenziali alle derivate parziali che contengono un termine di divergenza sono trasformati in integrali di superficie, usando il teorema della divergenza. Questi termini sono poi valutati come flussi attraverso le superfici di ciascun volume finito. Poiché il flusso entrante in un volume è uguale a quello uscente dal volume adiacente, questi metodi sono conservativi.

Le equazioni che si ottengono vengono integrate in un volume sui cui confini sono imposte le condizioni al contorno; l'interno del dominio viene ripartito in tanti volumi elementari e, tramite la forma integrale delle equazioni del problema considerato, vengono definite le

relazioni che intercorrono tra i vari volumetti confinanti. L'approssimazione consiste nel fatto che la dimensione dei volumetti non risulterà più infinitesima, ma finita.

Questo metodo è ampiamente utilizzato in molte applicazioni di fluidodinamica computazionale (CFD - Computational Fluid Dynamics) e di elettromagnetismo [23, 24].

2.2.2.3. Metodo alle differenze finite (FDM – Finite Difference Method)

Il Metodo alle Differenze Finite è considerato il procedimento numerico più semplice e intuitivo: si tratta infatti di sostituire alla derivata, definita come il limite di un rapporto incrementale, il rapporto incrementale stesso. Utilizza l'applicazione delle serie di Taylor per convertire le equazioni differenziali in equazioni algebriche e in questo processo di conversione vengono trascurati i termini di ordine superiore.

Questo metodo viene generalmente usato in combinazione con il Metodo agli Elementi al Contorno e il Metodo ai Volumi Finiti per la risoluzione di problemi di fluidodinamica computazionale e di natura termica.

Si tratta, dunque, di un metodo di discretizzazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali mentre i metodi FEM, BEM e FVM discretizzano la forma integrale delle suddette equazioni. Esso presenta delle limitazioni nel momento in cui è applicato a geometrie complesse, assemblate o costituite da componenti di materiale differente e quando è presente una combinazione di diversi tipi di elementi per la discretizzazione (1D, 2D, 3D). Per queste tipologie di applicazioni il Metodo agli Elementi Finiti risulta essere quello più appropriato [23, 25].

2.2.2.4. Metodo agli elementi finiti (FEM – Finite Element Method)

Lo sviluppo del Metodo agli Elementi Finiti è coinciso con lo sviluppo dei calcolatori elettronici anche se le sue basi matematiche si possono far risalire ad anni addietro. Inizialmente, il metodo fu sviluppato per l'analisi dei problemi di meccanica strutturale, ma ben presto si

scoprì che il metodo aveva una validità più generale e ad oggi è applicato per la risoluzione di una grande varietà di problemi.

Questo metodo può essere definito come una tecnica di calcolo numerico che viene utilizzata per determinare la soluzione approssimata di equazioni differenziali alle derivate parziali (PDE) su un dominio definito. Per la risoluzione di tali equazioni la prima sfida è quella di generare una funzione base che possa approssimare al meglio la soluzione; nel Metodo agli Elementi Finiti le funzioni base rappresentano le funzioni di forma nodali. Come noto, sono due i metodi a disposizione per risolvere un problema matematico: la soluzione analitica, che consiste nell'andare a scrivere le equazioni per una formulazione del problema in forma chiusa, e la soluzione numerica, che restituisce una soluzione approssimata di quella analitica. Il FEM mostra delle performance eccezionali nella risoluzione numerica delle PDE, soprattutto per quelle definite su un dominio complesso che può variare nel tempo. 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 della vita reale sono continui, cioè non c'è nessun gap fisico tra due particelle vicine che compongono un determinato oggetto: risolvere un problema fisico reale con l'approccio del continuo risulta essere davvero difficile; per questo motivo si adottano i metodi di risoluzione numerica, per semplificare il problema fisico reale continuo mediante la discretizzazione [23, 26].

2.2.3. Analisi agli elementi finiti

Ogni qualvolta si affronta un problema di natura fisico-ingegneristica mediante il Metodo degli Elementi Finiti, si possono individuare due fasi distinte che portano alla generazione del modello:

- Modellazione: consiste nell'andare a sostituire il problema reale con un modello semplificato che ne rappresenta gli aspetti principali, eliminando tutte le componenti che risultano poco influenti per la soluzione desiderata. L'esempio più emblematico è la trave di de Saint-Venant che consente la risoluzione del problema elastico per un corpo solido (snello), introducendo delle ipotesi semplificative sul materiale, sulla

geometria, sui vincoli e sui carichi che agiscono sul modello. Molti problemi tecnici sono assimilabili a questo tipo di trattazione teorica e pertanto in molti casi è possibile arrivare a definire una soluzione approssimata del problema.

- Discretizzazione: questa fase consiste nel passaggio da un numero infinito ad un numero finito di gradi di libertà. Per fare ciò, il modello non viene più descritto mediante una infinità di punti, ma secondo un numero definito di punti che prendono il nome di punti nodali o semplicemente nodi, i quali andranno a definire i vertici delle tante forme in cui è diviso il modello, gli elementi.

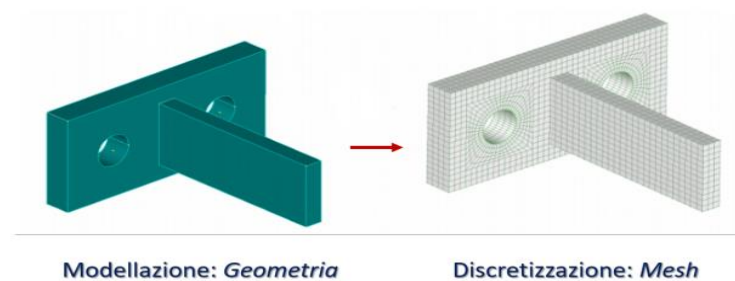


Figura 15: Fasi principali dell'analisi numerica mediante FEM [27].

2.2.3.1. Tipologia di elementi finiti

Tutti i programmi che utilizzano il metodo degli elementi finiti per l'analisi strutturale sono dotati di una libreria di elementi finiti monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali per facilitare la modellazione di una struttura reale.

I più comuni sono i seguenti [28]:

ELEMENTI MONODIMENSIONALI: si sviluppano in una sola direzione dello spazio e vengono definiti 1D. Trovano impiego comune nella costruzione delle connessioni di due o più componenti. I principali elementi 1D sono:

- Asta o truss: elemento rettilineo a 2 nodi che ha rigidezza solo per le traslazioni ed è in grado di trasmettere forze assiali. Normalmente è usato per la modellazione di strutture reticolari.

- Trave o beam: elemento rettilineo a 2 nodi capace di trasferire ai nodi a cui è connesso rigidezze per tutti e 6 i gradi di libertà, quindi trasmette tutte le tipologie di sollecitazioni (forze assiali e taglianti, momenti flettenti e torcenti). Viene usato per la modellazione di strutture intelaiate.
- Molla o spring: elemento rettilineo a 2 nodi dotato di rigidezza assiale e/o rotazionale utilizzato per modellare vari tipi di vincolo elastico (es. gli spostamenti imposti).
- Rigido: elemento rettilineo a 2 nodi infinitamente rigido usato per modellare un legame infinitamente rigido tra due elementi finiti.

ELEMENTI BIDIMENSIONALI: si sviluppano su due dimensioni, vengono chiamati elementi 2D.

In questa categoria rientrano:

- Lastra o stress plane: elemento piano a 3 o 4 nodi per stati di sforzo piano che possiede solo due gradi di libertà per nodo corrispondenti alle traslazioni nel suo piano e quindi in grado di trasmettere solo gli sforzi lungo il suo piano. È usato per la modellazione di strutture caricate nel loro stesso piano.
- Piastra: elemento piano a 3 o 4 nodi che possiede solo tre gradi di libertà per nodo corrispondenti alla traslazione perpendicolare al suo piano e alle rotazioni rispetto ai due assi giacenti nel piano e in grado di trasmettere solo lo sforzo tagliante e i due momenti flettenti. Usato per la modellazione di strutture bidimensionali inflesse.
- Lastra-piastra o guscio o shell: elemento piano a 3 o 4 nodi costituito dalla sovrapposizione dell'elemento piastra e dell'elemento lastra che è dotato sia di rigidezza flessionale che membranale.

ELEMENTI TRIDIMENSIONALI: sono elementi 3D che si sviluppano in tutte e tre le direzioni dello spazio. L'elemento che meglio rappresenta tale categoria è il brick che presenta tre gradi di libertà per nodo che corrispondono alle tre traslazioni. Esso è in grado di interpretare uno stato tensionale tridimensionale. Le variabili di questo elemento dipendono dal numero di nodi che si sceglie per modellizzarlo (che vanno da 4 a 27).

2.2.3.2. Nodi, elementi e mesh

Il dominio continuo di partenza deve essere ridotto ad un dominio discreto, che prende il nome di *mesh*, rappresentato da un numero finito di elementi; gli elementi hanno forma semplice e ciascuno è definito dalla posizione dei suoi vertici, detti nodi.

Un nodo è un punto che definisce il modello dotato, nel caso più generale, di sei gradi di libertà, tre dei quali definiscono la traslazione e i rimanenti tre definiscono la rotazione attorno agli assi di riferimento cartesiano. I gradi di libertà sono variabili indipendenti che determinano in modo univoco la posizione nello spazio e la descrizione del moto. Se si esclude la presenza di vincoli, il modello è definito da $6n$ gradi di libertà, dove n rappresenta il numero di nodi del modello. Su ogni nodo è associato il valore di un campo o gradiente che interessa l'intera struttura e nel caso di elementi meccanici il campo è quello degli spostamenti. Tutte le azioni esterne, quali vincoli e sollecitazioni sono applicate ai nodi. Dal momento che la risoluzione avviene effettuando il calcolo sui nodi di ogni elemento e interpolando poi le soluzioni, la scelta del numero di elementi, di nodi per elemento e del tipo di elementi è fondamentale.

La mesh è costituita non solo dai nodi, ma anche da spigoli e facce. I nodi sono la base per definire gli spigoli, a loro volta gli spigoli definiscono, attraverso la loro connessione e chiusura, le facce. La suddivisione in elementi deve rispettare il vincolo di conformità fra gli elementi contigui: due elementi bidimensionali contigui devono condividere completamente un lato mentre due elementi tridimensionali devono condividere completamente un'intera faccia.

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.

Il modello numerico è più rigido della struttura reale, ciò è dovuto alle funzioni che vengono utilizzate per approssimare il campo degli spostamenti all'interno degli elementi, infatti tali funzioni vincolano la cinematica della struttura e questo comporta il calcolo di spostamenti più piccoli di quelli reali e di tensioni generalmente più elevate.

Tale comportamento è comune alla maggior parte degli elementi strutturali analizzati, in particolare a quelli definiti mediante leggi di spostamento assegnato [26].

2.2.3.3. Formulazione a spostamenti assegnati

A seconda del problema studiato (meccanico, termico, fluidodinamico) si adottano leggi appropriate per esprimere le relazioni tra le sollecitazioni applicate ai nodi e i campi o i gradienti definiti all'interno dell'elemento. Ad esempio, in campo fluidodinamico si adottano le equazioni di Navier-Stokes (descritte da parametri di pressione, portata e velocità), in campo termico si adottano le leggi della conduzione, convezione e irraggiamento.

Per problemi di tipo meccanico si adottano le leggi costitutive elastiche o elasto-plastiche tra forza e spostamento per ogni singolo elemento, definendone così le proprietà e il comportamento meccanico. Nel campo della meccanica strutturale è largamente utilizzata la formulazione a spostamenti assegnati, in cui l'unica variabile del problema è il campo degli spostamenti $\{u\}$, mediante la quale è possibile andare a definire le deformazioni e quindi le tensioni.

2.2.3.4. Serie polinomiali e funzioni di forma

Il campo di spostamenti all'interno dell'elemento è normalmente espresso mediante funzioni di interpolazione di tipo polinomiale o funzioni di forma che permettono di passare da una soluzione di tipo differenziale ad una algebrica facilmente risolvibile dal calcolatore.

L'utilizzo di funzioni per approssimare il modello introduce dei vincoli cinematici che obbligano l'elemento a muoversi e deformarsi secondo leggi imposte.

Poiché, come detto in precedenza il modello discretizzato risulta essere più rigido rispetto alla struttura reale a causa delle funzioni di interpolazione che vincolano gli elementi a deformarsi secondo determinate e prefissate forme, si ottengono risultati approssimati il cui grado dipende dal numero di elementi utilizzati per modellare la struttura e dal grado del polinomio scelto per rappresentare il campo degli spostamenti.

All'aumentare del numero di elementi del modello aumenta il numero di gradi di libertà e, se le funzioni utilizzate rispettano determinate regole espone di seguito, si ha la convergenza

monotona del risultato del modello al risultato reale. La velocità con cui si tende al risultato reale è maggiore o minore a seconda del tipo di elemento utilizzato. La scelta dell'elemento deve ricadere su quello che converge al risultato reale utilizzando un minor numero di gradi di libertà in modo da aver un modello efficiente ma meno complesso, risparmiando quindi tempi e costi computazionali.

Per questo, è fondamentale che la funzione scelta per approssimare il campo degli spostamenti all'interno dell'elemento soddisfi determinati requisiti affinché venga garantita la convergenza dell'analisi al diminuire delle dimensioni dell'elemento:

1. Deve essere continua all'interno dell'elemento e derivabile fino all'ordine n richiesto dal particolare problema (n è il numero di gradi di libertà di moto rigido del problema).
2. Deve essere in grado di rappresentare il moto rigido dell'elemento con una corrispondente energia di deformazione nulla.
3. Deve essere in grado di rappresentare uno stato di deformazione costante. Questa condizione può essere verificata per ogni singolo elemento mediante il *patch test*, che consiste nel verificare numericamente uno stato di deformazione costante quando ad un insieme di elementi, assemblato in qualsiasi modo, viene applicato un campo di spostamenti capace di produrre teoricamente uno stato di deformazione costante.
4. Deve assicurare la continuità tra gli elementi, cioè non devono nascere discontinuità al contorno tra elementi adiacenti se queste non erano già presenti.

A quest'ultima condizione va aggiunta la continuità degli spostamenti ai nodi che prevede che lo spostamento di un nodo è comune a tutti gli elementi che convergono in esso.

Una funzione che soddisfa i primi tre requisiti si dice completa, se a questo si aggiunge anche la condizione di continuità tra gli elementi allora si dice conforme. Si può dimostrare che con una funzione conforme si può ottenere una convergenza monotona della risposta verso il valore esatto e che la convergenza della soluzione si ottiene con elementi la cui funzione è solo completa. Questi sono detti elementi incompatibili e la convergenza si manifesta se e solo se l'incompatibilità diminuisce al diminuire dell'elemento durante lo stato di deformazione della struttura [23, 26].

2.2.3.5. Metodi di integrazione diretta

La differenza sostanziale che esiste tra i metodi strutturali dinamici e quelli statici consiste nel fatto che i primi dipendono dal tempo, ovvero le variabili ricercate (spostamento, velocità, accelerazione) dipendono non solo dalle coordinate spaziali ma variano anche in funzione del tempo. Essi riguardano per lo più il calcolo delle frequenze naturali di vibrazione con i corrispondenti modi di vibrare e l'analisi della risposta di una struttura soggetta a carichi variabili nel tempo. In questo ambito, rientrano i fenomeni di urti. Per la risoluzione di questo tipo di problemi uno dei metodi utilizzati è quello di integrazione diretta. I metodi di integrazione diretta sono caratterizzati dal fatto che non viene eseguita alcuna trasformazione delle coordinate o delle equazioni prima dell'integrazione numerica; prevedono di integrare il sistema di equazioni secondo una procedura numerica step by step. Il campo $\{u\}$ risulta, quindi, essere funzione sia del tempo che dello spazio. Pertanto si introducono il vettore della velocità $\{\dot{S}\}$ e il vettore dell'accelerazione $\{\ddot{S}\}$ che sono legati ad altre proprietà del sistema, ovvero lo smorzamento e la massa. La legge, quindi, sarà:

$$[M]\{\ddot{S}\} + [C]\{\dot{S}\} + [K]\{S\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

dove $\{\ddot{S}\}$, $\{\dot{S}\}$, $\{S\}$ rappresentano rispettivamente il campo delle accelerazioni, il campo delle velocità e il campo degli spostamenti dell'elemento, $[M]$ è la matrice delle masse legata alle caratteristiche inerziali del sistema, $[C]$ è la matrice di smorzamento legata alla dissipazione di energia del sistema e $[K]$ è la matrice di rigidezza legata alle proprietà elastiche del sistema. Lo scopo è quello di calcolare $\{\ddot{S}\}$, $\{\dot{S}\}$, $\{S\}$ nell'intervallo di tempo di interesse (T), partendo dall'istante $t=0$, in cui le variabili assumono i valori iniziali $\{\ddot{S}_0\}$, $\{\dot{S}_0\}$, $\{S_0\}$. L'intervallo T viene suddiviso in n sotto intervalli di lunghezza $\Delta t=T/n$, per ognuno dei quali si calcola una soluzione del sistema, assumendo a priori una legge di variazione degli spostamenti, della velocità e delle accelerazioni all'interno di ogni intervallo Δt .

Il metodo è approssimato con un errore che dipende dalla scelta del passo temporale Δt : risulta, quindi, fondamentale la scelta del time step Δt . Infatti, valori troppo elevati portano raramente ad una buona descrizione del problema, mentre valori troppo piccoli allungano eccessivamente i tempi di calcolo. Da un punto di vista fisico-strutturale, un metodo utile per valutare il time step critico è la condizione di Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), secondo cui il

tempo di integrazione deve essere inferiore del tempo impiegato alla velocità di propagazione della perturbazione di un determinato materiale, per passare da un nodo a quello successivo.

$$t_{crit} \leq \frac{l}{c} \quad (2)$$

dove l è la dimensione caratteristica dell'elemento e c è la velocità di propagazione della perturbazione di pressione che, per elementi 2D, è definita come:

$$c = \sqrt{\frac{E}{(1+\nu^2)\rho}} \quad (3)$$

dove E è il modulo di Young, ν è il coefficiente di Poisson e ρ è la densità del materiale.

Quindi, i fattori che influenzano il time step critico sono la rigidità tramite il modulo di Young e la massa attraverso la densità: in particolare, il time step critico risulta essere inversamente proporzionale al modulo di Young, infatti più il valore di E è alto, più il materiale risulta essere rigido e di conseguenza la velocità di propagazione aumenta causando una riduzione di t_{crit} ; mentre risulta essere direttamente proporzionale alla densità in quanto maggiore è la massa del modello, maggiore sarà la sua inerzia e quindi più lente saranno le oscillazioni della struttura e in questo modo le pulsazioni proprie avranno frequenze più basse e tempi di integrazione più elevati.

Un altro modo per ridurre il time step critico prevede di agire diminuendo la dimensione degli elementi, in quanto il t_{crit} risulta essere direttamente proporzionale alla dimensione l ; un aumento delle dimensioni degli elementi utilizzati per la discretizzazione della geometria reale porta ad un peggioramento della soluzione ottenuta [26].

2.2.4. Metodi di calcolo implicito ed esplicito

Il Metodo agli Elementi Finiti si presta molto bene a risolvere le equazioni alle derivate parziali quando il dominio ha forma complessa, quando il dominio è variabile e quando l'accuratezza richiesta alla soluzione non è omogenea sul dominio. Quest'ultimo caso è di grande interesse per l'industria automobilistica, soprattutto per quanto riguarda la Virtual Safety Analysis: nelle prove di crash su un autoveicolo l'accuratezza è maggiore in prossimità della zona di

impatto. In questo caso, nella realizzazione del modello FEM occorre tener conto delle modalità con cui avviene l'impatto in modo da scegliere accuratamente il tipo di analisi.

In generale, la simulazione numerica dell'impatto tra solidi a medie e alte velocità può essere affrontata mediante due tipologie diverse di algoritmo di calcolo: il metodo implicito e il metodo esplicito.

L'algoritmo di calcolo implicito fa uso di un metodo di calcolo step by step, caratterizzato da un opportuno criterio di convergenza che stabilisce il proseguimento o meno dell'analisi, riducendo eventualmente l'incremento di tempo a seconda del valore dei residui al termine di ogni step di calcolo.

L'algoritmo esplicito fa uso di un incremento di tempo di calcolo che viene definito all'inizio dell'analisi e resta costante durante l'intero calcolo. Con tale metodo non si presentano eventuali problemi di divergenza della soluzione, dato che il metodo non è condizionato da un criterio di convergenza. Spesso, infatti, con solutori impliciti si riscontrano problemi di non convergenza ad una soluzione finita e di tempi di calcolo elevati anche con modelli aventi un basso numero di gradi di libertà, cosa che viene superata usando, appunto, un algoritmo di tipo esplicito. Con il metodo di calcolo esplicito, pur avendo incrementi di tempo molto più piccoli rispetto a quelli del metodo implicito, si ha un elevato risparmio di tempo di calcolo in analisi che prevedono urti ad elevata velocità o comunque problemi in cui si hanno grosse dissipazioni o trasferimenti di energia. I vantaggi principali che derivano dall'utilizzo di un metodo di calcolo esplicito sono essenzialmente:

- maggiore velocità di calcolo, soprattutto con modelli caratterizzati da un elevato numero di gradi di libertà;
- possibilità di superare più agevolmente la non linearità propria dei problemi di contatto e di urto rispetto al metodo implicito;
- assenza di problemi di calcolo legati alla convergenza verso una soluzione corretta in presenza di forti non linearità. È infatti frequente l'arresto del calcolo e l'impossibilità per la soluzione di arrivare a convergenza quando si utilizza un metodo implicito per la risoluzione di applicazioni con elevate non linearità sia geometriche che nel comportamento del materiale.

Tra i vari metodi espliciti il più comune risulta essere il Metodo delle Differenze Centrali, mentre i principali metodi impliciti sono il Metodo di Houbolt, il Metodo di Wilson- θ e il Metodo di Newmark [26].

2.2.5. Hourglass

A volte, specie per elementi di forma complessa, un'integrazione esatta della matrice di rigidezza può portare ad un incremento inaccettabile del costo computazionale. Per questo motivo, spesso, si sceglie una integrazione ridotta (sottointegrazione), ovvero si utilizzano meno punti di integrazione rispetto a quelli necessari. La scelta di sottointegrare implica una sottostima della rigidezza dell'elemento che, nel caso in cui l'errore di integrazione numerica compensi la sovrastima della rigidezza strutturale dovuta al tipo di formulazione, può portare ad ottenere risultati migliori. È importante, però, tenere presente che una sotto integrazione troppo spinta può portare a matrici singolari, quando in tutti i punti di integrazione si rileva un'energia di deformazione nulla. In questo caso si ha l'effetto hourglass (effetto clessidra), ovvero gli elementi possono presentare dei modi di deformarsi a cui corrisponde una energia di deformazione nulla. Si ha una dispersione, se così si può dire, di una "energia numerica" non computata a causa della particolare deformazione subita dall'elemento.

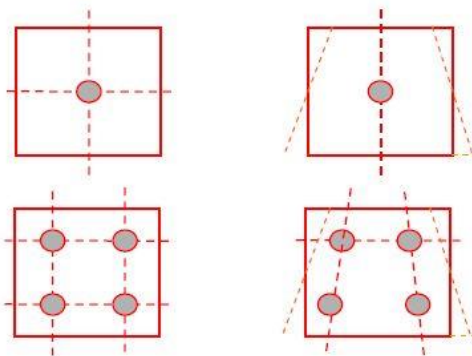


Figura 16: Fenomeno dell'Hourglass.

All'hourglass sono connessi alcuni problemi:

- riduzione del time step dovuta alla riduzione delle dimensioni critiche dell'elemento che avviene quando hanno luogo i fenomeni di hourglass
- possibilità di fallimento dell'analisi, nel caso in cui un lato dell'elemento diventi di lunghezza nulla

- progressiva perdita di precisione nei calcoli all'aumentare dell'importanza assunta dal fenomeno.

Il fenomeno dell'hourglass dipende dal numero dei punti di integrazione. Nella Figura 16, nella parte in alto, si osserva che il punto di Gauss (punto di integrazione) non avverte nessuna variazione anche se l'elemento si è deformato: in pratica è come se si deformasse un corpo senza spendere alcuna energia, il che è un paradosso. Invece, nella Figura 16, in basso, si nota che se si usano più di un punto di integrazione, in fenomeno dell'hourglass non si avverte

Esiste un criterio per definire la presenza di modi ad energia nulla, definito dalla seguente relazione:

$$M = GN - L - rn \quad (4)$$

dove M è il numero di modi ad energia nulla, G è il numero di gradi di libertà per nodo, N è il numero di nodi dell'elemento, L è il numero di gradi di libertà di moto rigido, r è il rango della matrice di elasticità [E], n è il numero di campionamento dell'elemento.

Affinché l'integrazione eviti il fenomeno dell'hourglass, M deve essere minore o uguale a zero. Si consideri, ad esempio, un elemento nel piano a quattro nodi che viene sottointegrato con un solo punto di integrazione posizionato nel suo baricentro: ogni nodo presenta 2 gradi di libertà, il rango della matrice [E] è $r=3$, mentre il numero di gradi di libertà di moto rigido è pari a 3, dalla (4) si ha:

$$M = 2 \cdot 4 - 3 - 3 \cdot 1 = 2 \quad (5)$$

La struttura presenta due modi di deformarsi ad energia nulla.

Affinché non si verifichino modi di deformarsi ad energia nulla, è necessario che il numero dei punti di integrazione sia maggiore del numero di gradi di libertà di deformazione dell'elemento.

CAPITOLO 3

Gli strumenti di calcolo: Altair HyperWorks e LS-DYNA

3.1. Dal CAD alla soluzione: passaggi principali

Quando si decide di affrontare un problema mediante l'uso di un programma CAE, bisogna considerare tre passaggi fondamentali che permettono di ottenere la soluzione finale a partire dal CAD:

- Pre-processing
- Solving
- Post-processing

Nella prima fase il modello realizzato tramite software CAD è importato in un software di pre-processing in cui l'utente costruisce la mesh; una volta realizzata la mesh, si caratterizza il modello con determinate proprietà e materiali e lo si prepara per la simulazione. La fase di solving è quella propriamente svolta dal software CAE e riguarda il calcolo. La terza ed ultima fase è svolta da un particolare software che gestisce la visualizzazione dei risultati mediante animazioni e/o grafici e consente la manipolazione dei risultati numerici ottenuti dal software CAE durante il solving. Affinché tali risultati siano fruibili all'utente, questo deve opportunamente richiederli come output durante la fase di pre-processing. I software adoperati in questo studio vengono illustrati nei paragrafi successivi e sono:

- Pre-processing: HyperMesh-Altair
- Solving: Ls-DYNA-LSTC
- Post-processing: HyperView/HyperGraph-Altair.

3.2. Pre e Post-Processing

I software che vengono utilizzati per la fase di pre-processing e post-processing sono rispettivamente HyperMesh e HyperView (in allegato con HyperGraph), entrambi facenti parte del pacchetto HyperWorks prodotto dalla Altair Engineering.

Uno dei vantaggi della tecnologia CAE offerta da HyperWorks è la capacità di interfacciarsi al meglio con i maggiori solutori presenti sul mercato, garantendo, quindi, la generazione di modelli robusti e l'ottenimento di soluzioni affidabili. Per questo HyperWorks rappresenta uno dei software leader per l'industria.

I software del pacchetto HyperWorks risultano essere completamente indipendenti dal solutore con il quale si interfacciano, infatti permettono la visualizzazione e la gestione dei dati destinati e provenienti da qualsiasi ambiente CAE.

3.2.1. Pre-Processing: Altair HyperMesh

La fase di pre-processing è fondamentale per il processo di modellazione: comprende tutte le azioni di importazione della geometria e realizzazione del modello che precedono la simulazione vera e propria. Per questa fase viene utilizzato il software HyperMesh.

Nel momento in cui si accede all'ambiente HyperMesh, l'utente si trova davanti un'interfaccia grafica semplice, definita user-friendly, che consente di operare in maniera intuitiva sul modello. [23] La fase di pre-processing si compone di una serie di operazioni che hanno lo scopo di trasformare il modello geometrico CAD in un modello ad elementi finiti. Tali operazioni possono essere organizzate in una serie di fasi successive:

1. Importazione del modello matematico CAD. Il primo passo è proprio quello di importare il modello geometrico CAD, la cui geometria risulta essere la base per la costruzione della mesh. Prima di definire il modello numerico, però, viene normalmente effettuata un'azione preliminare di pulizia (cleaning) e semplificazione (defeature) della geometria: vengono rimossi eventuali gap presenti nelle superfici importate e vengono eliminate le linee e le superfici ridondanti o troppo piccole per essere discretizzate in maniera ragionevole; poi si esegue un clean up di tutti i dettagli trascurabili a livello di analisi, come fori di dimensioni ridotte, eventuali loghi presenti, ecc.

2. Costruzione della mesh. Una volta che l'utente ritiene che il CAD sia idoneo, si parte con la discretizzazione delle superfici e con la costruzione della mesh. Le tipologie di mesh a disposizione sono 1D, 2D e 3D: dal momento che bisogna sempre tenere in considerazione dell'influenza del numero di nodi sul tempo di calcolo, è preferibile usare una mesh 2D e 1D rispetto ad una mesh 3D. Molto spesso accade che un modello CAD 3D venga modellizzato con una mesh 2D e in tal caso le informazioni riguardanti la terza dimensione vengono inserite nelle proprietà degli elementi.
3. Controllo della qualità della mesh. Esistono delle linee guida da seguire affinché la qualità della mesh sia accettabile per ottenere risultati affidabili e per evitare l'interruzione del processo di calcolo. Quello che bisogna fare è:
- *controllare la dimensione degli elementi*: in base alla tipologia del componente e in base al valore del time step impostato per il calcolo, gli elementi non possono avere una dimensione caratteristica che sia al di sotto di determinati valori.
 - *controllare la distorsione degli elementi*: gli elementi non possono essere troppo distorti altrimenti si rischia che il solutore non porti a termine i calcoli sul modello.
 - *ridurre il numero di tria*: generalmente le mesh 2D vengono effettuate con elementi shell a quattro nodi; tuttavia risulta inevitabile, soprattutto in presenza di superfici curve o non regolari, l'introduzione di tria (elementi triangolari), in quanto sono ideali per descrivere le geometrie più complesse, ma forniscono risultati meno precisi degli elementi a quattro nodi.
 - *eliminare ogni eventuale free edge*: uno degli aspetti fondamentali nella mesh 2D consiste nella continuità tra gli elementi: dati due elementi 2D contigui non devono esistere discontinuità tra di loro, pertanto il lato e i due nodi in comune devono essere unici.
 - *verificare il valore di aspect ratio*, cioè il rapporto tra le due dimensioni principali dell'elemento e tale valore deve essere dell'ordine di poche unità.
 - eliminare eventuali elementi duplicati che risultano essere sovrapposti tra di loro.

4. Definizione delle proprietà e dei materiali. In questa fase devono essere definite le proprietà caratteristiche degli elementi e le proprietà dei materiali in esame. Per quanto riguarda i materiali, HyperMesh mette a disposizione varie categorie di materiali; una volta scelta la categoria, l'utente può definire manualmente le proprietà meccaniche (densità, modulo di Young, coefficiente di Poisson, tensione di snervamento, ecc.) e altri parametri che dipendono dalla categoria stessa. Per quanto riguarda le proprietà di un componente, nel momento in cui vengono definite, si esplicita la formulazione numerica adoperata, il valore di shear stress, lo spessore della shell, il numero di punti di integrazione scelti lungo tale spessore e altri parametri che caratterizzano la fisica dell'elemento e la natura del calcolo che il solutore dovrà effettuare.
5. Definizione di carichi e vincoli. È una fase fondamentale per andare a rappresentare le condizioni di carico o di vincolo a cui i componenti sono sottoposti nella realtà fisica.
6. Esportazione del modello. Terminata la costruzione del modello, prima di effettuare l'esportazione, l'utente deve prima svolgere due ulteriori operazioni: la prima consiste nella definizione dei valori di output che si desiderano ottenere dal solutore (ad esempio se si vuole conoscere l'accelerazione del centro di massa, bisogna essere sicuri che esista un nodo applicato al centro di massa e che questo nodo venga definito come nodo di output, in modo tale che il solutore possa mostrare il campo di spostamenti, velocità, accelerazione del nodo stesso); la seconda operazione è quella di pulizia finale, ovvero si cancellano tutti i materiali, le proprietà, i componenti che risultano vuoti o inutilizzati. A questo punto, si può esportare il modello in un formato che sia leggibile dal solutore: l'esportazione porta alla creazione di un file di output che viene generato in base al tipo di solutore e nel caso di LS-DYNA i formati tipici sono .k, .key, .dyn.

3.2.2. Post-Processing: Altair HyperView

Il post-processing è la fase finale del processo di modellazione, in cui avviene l'analisi critica dei risultati ottenuti tramite il calcolo numerico. Per questa fase viene utilizzato il software HyperView che combina una funzione di animazione avanzata permettendo così un'analisi comparativa dei risultati.

A partire da uno dei file di output del solutore, *d3plot*, è possibile eseguire una analisi qualitativa di tipo visivo, osservando l'animazione che mostra l'evoluzione del sistema modellato nel tempo in funzione delle condizioni cinematiche o di carico imposte. Inoltre, è possibile anche visualizzare dei *contour plot*, ovvero delle mappe colorimetriche che forniscono una distribuzione di colori in funzione delle grandezze di interesse.

Tramite il software HyperGraph si possono ottenere grafici a partire dai dati di un altro file di input, il *binout*, un file in formato binario che racchiude file in formato ASCII contenenti tutti i valori di output di tutte le grandezze richieste in fase di pre-processing e le informazioni relative alla loro evoluzione nel tempo.

Tra gli altri file di output del solutore, nel processo di post-processing vengono presi in considerazione anche l'*h3d*, che permette di visualizzare l'animazione della dinamica del fenomeno nell'ambiente di post-processing, e il *d3hsp*, che racchiude tutte le informazioni riguardanti il processo di calcolo effettuato dal solutore (tempo di calcolo, memoria utilizzata, ecc.).

3.2.3. Solving: 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 geometria* 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, quindi, deformazioni plastiche; oppure quando si utilizzano dei 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* e 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 è di tipo *Command Line*, ovvero si basa su un'interfaccia caratterizzata da un'interazione di tipo testuale tra utente e calcolatore, quindi il file di input, in cui l'utente va a definire i comandi, è di tipo ASCII e può essere realizzato mediante qualunque editor di testo; generalmente, però, per comodità, si preferisce preparare il file di lancio utilizzando un pre-processore, come ad esempio HyperMesh [29].

3.2.4. Descrizione del file di input

LS-DYNA accetta come file di input due formati: il formato *keyword* e il formato *structured*. Il primo è stato introdotto nel 1993 per superare i limiti del secondo, ormai in disuso a causa della sua impostazione rigida che ne ha comportato una difficoltà di utilizzo. Il formato *keyword* offre, invece, una certa libertà all'utente che non deve badare all'ordine di scrittura dei gruppi di informazioni ma deve solo rispettare la struttura in blocchi delle stesse. Il motivo di questo aggiornamento sta nel fatto che con il formato *keyword* il solutore non effettua solo una lettura ed esecuzione delle informazioni contenute nel file di input, ma procede immagazzinando prima tutti i dati in esso contenuti e successivamente li utilizza per far eseguire l'algoritmo numerico di risoluzione.

La prima linea del file di input deve necessariamente iniziare con *KEYWORD in modo da identificare il formato keyword, altrimenti il solutore considera lo script in formato structured. Il file, poi, è composto da una serie di *card* e ciascuna viene identificata da una keyword preceduta dal simbolo asterisco “*”; all’interno di ogni card sono contenute le informazioni organizzate in 8 campi (colonne) ognuno di 10 caratteri (questa organizzazione non rappresenta la regola assoluta e le eccezioni sono riportate sul manuale). Il file si conclude con una riga di comando che contiene la keyword “*END”.

Inoltre, per agevolare l’utente si possono anche aggiungere delle righe di commento che non vengono computate dal solutore e per far ciò basta inserire il simbolo “\$” nella prima colonna di ciascuna riga. All’interno delle varie keyword, ogni card viene identificata con un unico ID che non è ripetibile e viene utilizzato un sistema di puntatori che sfrutta gli ID delle singole card per collegarle tra di loro [30].

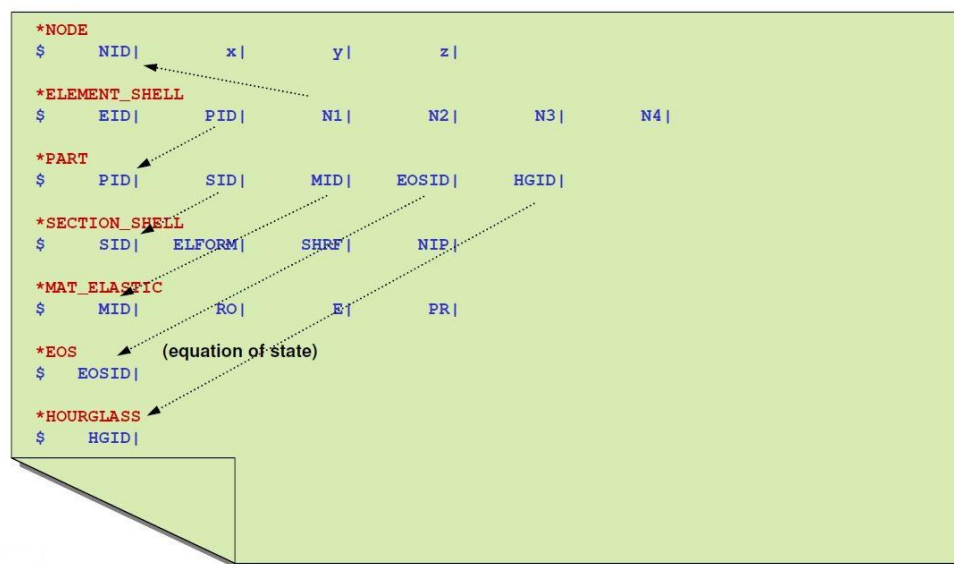


Figura 17: Organizzazione delle keyword nel file di input [30].

Come si può vedere dalla Figura 13, ogni campo delle varie keyword è collegato; ad esempio, il componente descritto in *PART è caratterizzato da:

- una proprietà definita nella keyword *SECTION_SHELL in cui si descrivono il tipo di formulazione (ELFORM), il valore di shear factor (SHFR), il numero di punti di integrazione (NIP);
- un materiale definito nella keyword *MAT in cui si indicano valori quali la densità (RO), il modulo di Young (E), il coefficiente di Poisson (PR), ecc.;
- un’equazione di stato che è indicata nella keyword *EOS;

- una formulazione per gli hourglass che viene indicata nella keyword *HOURGLASS.

All'interno del file di input si possono individuare tre blocchi di dati, ciascuno dei quali contiene un diverso tipo di informazione [30]:

1. FILE DELLE CARD DI CONTROLLO: all'interno di questo file si inseriscono tutte le opzioni disponibili nella sezione *CONTROL in cui si definiscono tutte le condizioni di calcolo, come la finestra temporale entro cui studiare il fenomeno, il valore del time step. Per poter effettuare un *run* è richiesta almeno la card *CONTROL_TERMINATION che specifica il tempo limite di simulazione. Vi sono, inoltre, diverse altre card utilizzate per definire le grandezze di output che si vogliono visualizzare e sono le varie sezioni appartenenti alla keyword *DATABASE.
2. FILE DEL MODELLO: al suo interno sono descritti tutti i nodi, gli elementi, le proprietà, i materiali, i set che descrivono il modello. È fondamentale il file di output del software di pre-processing. Se il modello è particolarmente complesso, può essere strutturato in sotto-modelli sfruttando l'architettura *INCLUDE, che permette di assemblarli nel file di lancio.
3. FILE DI LANCIO: in questo file vengono richiamati quelli precedenti mediante la keyword *INCLUDE, che permette di leggere file di input indipendenti tra loro. Il file di lancio include anche gli output definiti in precedenza.

3.2.5. I contatti in LS-DYNA

Per definire un contatto in LS-DYNA è necessario identificare le zone del modello numerico che devono essere controllate per identificare le possibili compenetrazioni tra nodi (definiti slave) e segmenti (definiti master). Il software mette a disposizione diversi algoritmi di calcolo per la risoluzione delle compenetrazioni e, indipendentemente dal tipo di contatto scelto, il controllo avviene ad ogni time step. Il contatto tra gli elementi del modello viene rappresentato dal codice numerico mediante la definizione di elementi molla di tipo lineare

tra i nodi slave e i vicini segmenti master; la rigidezza delle molle determina la forza che deve essere applicata ai nodi slave e master per evitarne la compenetrazione reciproca.

Il software implementa due metodi di gestione dei contatti:

- Kinematic constraint method;
- Penalty constraint method.

3.2.5.1. Kinematic Constraint Method

Il Kinematic method prevede l'imposizione di vincoli alle equazioni globali mediante una trasformazione degli spostamenti dei nodi slave lungo l'interfaccia di contatto, bloccandone il grado di libertà traslazionale in direzione normale alla superficie master.

È possibile avere dei problemi nell'uso di questo metodo nel momento in cui la mesh della superficie master sia più fitta di quella slave: in tal caso, è possibile che alcuni nodi master possano penetrare all'interno della superficie slave senza incontrare alcuna resistenza, creando una piegatura nella superficie di contatto. Risulta, quindi, chiara la necessità di definire opportunamente la mesh delle superfici a contatto.

A livello numerico, questo metodo risulta più oneroso rispetto al metodo Penalty.

3.2.5.2. Penalty Constraint Method

Il metodo Penalty comporta un'applicazione meno rigorosa dei vincoli di contatto rispetto al metodo precedente, in quanto non prevede l'approccio cinematico. È applicabile a diverse formulazioni di contatto ed è meno oneroso poiché non implica la manipolazione degli spostamenti nodali. Tale metodo prevede l'introduzione di molle di opportuna rigidezza tra tutti i nodi slave e le superfici master. Per ogni nodo, la rigidezza della molla introduce una forza che risulta essere proporzionale alla penetrazione del nodo e che ha l'obiettivo di eliminare l'interferenza causata dalla compenetrazione dei nodi slave rispetto al master. In ogni caso, se l'impatto tra slave e master risultasse troppo violento, si potrebbero verificare delle compenetrazioni non fisiche: questo può essere risolto aumentando la rigidezza delle molle di contatto mediante opportune strategie numeriche.

Nel mondo SVA, l'entità delle deformazioni dei componenti di un modello ad elementi finiti può essere molto elevata, quindi capire dove e quando avrà luogo un contatto può non essere sempre immediato. Per questo motivo, si utilizza largamente una tipologia di contatto che in LS-DYNA prende il nome di AUTOMATIC.

Nel caso in cui si utilizzino elementi 2D (shell) per la mesh, il contatto di tipo AUTOMATIC determina superfici di contatto tra gli elementi coinvolti proiettando queste in direzione normale al piano di ogni singolo elemento; la distanza alla quale proietta è pari alla metà del valore definito per il parametro *contact thickness*. È, quindi, molto importante porre particolare attenzione alle distanze tra i componenti del modello a elementi finiti.

Se si utilizzano, invece, elementi 3D (solid) il parametro *contact thickness* non viene considerato, in quanto le superfici di contatto saranno naturalmente generate dalla geometria e dalla posizione dei componenti. È comunque importante controllare che non vi siano compenetrazioni tra i componenti a contatto incipiente al tempo zero della simulazione. Per gli elementi solidi, inoltre, potrebbe essere utile attivare un particolare tipo di contatto tramite la card **CONTACT_ERODING* che tiene conto anche delle potenziali compenetrazioni di elementi interni che eventualmente diventano superficiali a causa della rottura del componente di cui fanno parte.

3.2.6. Il fenomeno dell'hourglass in LS-DYNA

Come già detto in precedenza, tutti gli elementi strutturali possono avere dei modi di deformarsi a cui corrisponde una energia di deformazione nulla: tale fenomeno prende il nome di hourglass (clessidra) e dipende dal numero dei punti di integrazione.

LS-DYNA implementa diversi algoritmi destinati all'inibizione del fenomeno dell'hourglass: uno dei metodi più efficaci per inibire tale fenomeno è l'utilizzo di elementi del tipo *fully integrated* o *selectivety reduced integration*.

Per valutare l'energia dissipata dalle forze di reazione causate dal fenomeno, in LS-DYNA è possibile settare gli opportuni valori dei parametri contenuti nelle card **CONTROL_ENERGY* ed utilizzare le card di output **DATABASE_GLSTAT* e **DATABASE_MATSUM* in modo da poter visualizzare il contributo in termini di energia relativa, rispettivamente, al sistema nel suo complesso e alle singole parti di cui è costituito. Ciò che conta, è assicurarsi che il contributo

energetico relativo al fenomeno risulti minore del picco massimo relativo all'energia interna del sistema.

In letteratura, come regola generale per l'ammissibilità dei risultati, vengono considerati accettabili i contributi energetici dovuti all'hourglass minori del 10% del valore massimo dell'energia interna [31].

3.2.7. Il bilancio energetico

L'analisi del bilancio energetico può rappresentare un primo strumento con cui valutare la bontà della simulazione, in termini di stabilità:

$$E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg} = E_{kin}^0 + E_{int}^0 + W_{ext} \quad (6)$$

Il bilancio deve essere sempre verificato ad ogni time step durante tutto l'arco della simulazione. Di seguito viene esplicitato il significato dei vari contributi:

- E_{kin} : energia cinetica;
- E_{int} : energia interna;
- E_{si} : energia di interfaccia;
- E_{rw} : energia di corpo rigido;
- E_{damp} : energia di smorzamento;
- E_{hg} : energia associata al fenomeno dell'hourglass;
- E_{kin}^0 : energia cinetica all'istante iniziale;
- E_{int}^0 : energia interna all'istante iniziale;
- W_{ext} : lavoro esterno.

Il termine di energia interna comprende, a sua volta, il contributo dovuto all'energia elastica di deformazione e il contributo dovuto al lavoro svolto dalla deformazione plastica. Il lavoro esterno, invece, è dato dal lavoro compiuto dalle forze esterne applicate al sistema e dalle forze di pressione. Il contributo dato dalla componente di energia associata al fenomeno dell'hourglass non viene calcolato di default ma può essere considerato andando ad attivare l'opzione nella card *CONTROL_ENERGY.

Se il bilancio non risulta soddisfatto, è opportuno eseguire un controllo sui singoli contributi per scoprire la causa di tale disuguaglianza. In generale, se ad eccedere è il contributo a sinistra del simbolo di uguale, vuol dire che un certo contributo di energia è stato introdotto in modo artificioso: questo può accadere se si cerca di compensare una instabilità numerica o un'improvvisa presenza di compenetrazioni di elementi attraverso le rispettive superfici di contatto. Se, invece, ad eccedere è il contributo a destra del simbolo di uguale, significa che una certa quantità di energia è stata rimossa artificialmente: questo è il caso tipico di un incremento del fenomeno dell'hourglass [31].

3.2.8. Le unità di misura

LS-DYNA lavora con un consistente set di unità di misura.

Il solutore richiede che tutti i parametri vengano inseriti con le unità di misura coerenti. Per le grandezze fondamentali generiche si ha:

- Lunghezza [m];
- Massa [kg];
- Temperatura [K];
- Tempo [s];
- Pressione [Pa].

Per quanto riguarda le grandezze meccaniche si ha:

- Densità [kg/m³];
- Modulo di elasticità [Pa];
- Tensione di snervamento [Pa];
- Coefficiente di espansione [m/mK].

Per quanto riguarda le grandezze termiche si ha:

- Capacità termica [J/Kg K];
- Conduttività termica [W/m K];
- Velocità di generazione del calore [W/m³].

Si manifesta, quindi, l'esigenza di utilizzare un Sistema di misura consistente per le grandezze di interesse e che sia in linea con il Sistema Internazionale di Misura. Quello che viene generalmente utilizzato in ambito automobilistico in accordo con le grandezze reali in gioco, in particolar modo per le simulazioni di crash test, è riportato nella tabella seguente [31]:

Massa	Lunghezza	Forza	Tensione	Tempo	Energia
[kg]	[mm]	[kN]	[GPa]	[ms]	[kN·mm]

Tabella 2: Unità di misura in LS-Dyna [31].

CAPITOLO 4

Il modello FEM della barriera

4.1. Stato dell'arte MPDB-FEM

La divisione Safety Virtual Analysis del Centro Sicurezza Fiat dispone di un modello FEM di barriera deformabile MPDB per urto frontale: si tratta di un modello di barriera per urto laterale che è stato adattato per l'utilizzo durante urto frontale.

I blocchi della barriera sono stati realizzati adottando delle semplificazioni sulle dimensioni delle celle interne, le quali hanno tutte la stessa dimensione pari a 32.3 mm (in realtà gli honeycomb dei tre blocchi hanno misure differenti, come verrà descritto successivamente).

Il modello FEM di barriera è stato realizzato con:

- elementi bidimensionali (shell) *triangolari*,
- materiale deformabile (MAT_81) avente le proprietà dell'alluminio ($\rho=2710 \text{ kg/m}^3$, $E=70 \text{ GPa}$).

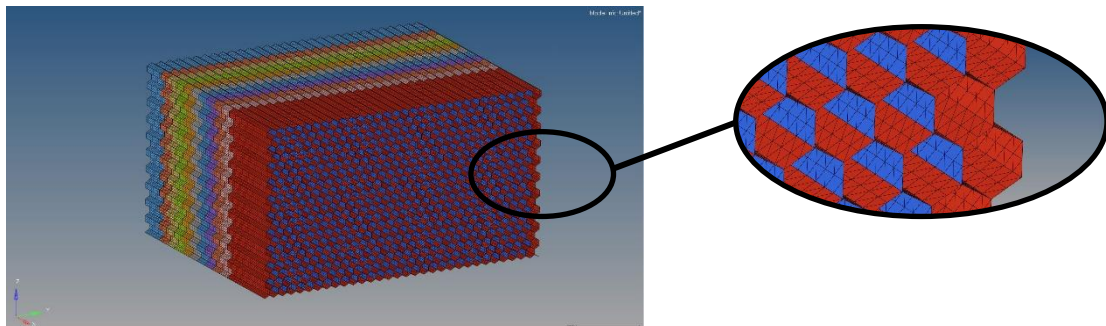


Figura 17: Vecchio modello FEM della barriera MPDB e dettaglio degli honeycomb.

4.2. Scopo della tesi

Questo lavoro si pone l'obiettivo di realizzare un modello FEM che rispetti le dimensioni fisiche della barriera deformabile MPDB e di validarlo con prove sperimentali semplificate (prove di caratterizzazione statica e dinamica) e con prove full scale (ovvero comprendenti l'intero veicolo). Un modello FEM adeguato fornisce l'opportunità di prevedere il

comportamento della barriera nel caso specifico dei crash test, durante i quali si intende valutare le prestazioni di sicurezza passiva dei veicoli.

Il punto di partenza per la realizzazione di questo nuovo modello FEM è proprio il modello che si ha a disposizione, descritto nel paragrafo precedente, il quale deve essere affinato e migliorato, in quanto non è propriamente conforme alla normativa EuNCAP 2020.

4.3. Implementazione del modello

Il modello di barriera deformabile per urto frontale è realizzato in ottemperanza alle normative EuroNCAP: è caratterizzata da una larghezza di 1000 mm e un'altezza di 568 mm. Come detto in precedenza è costituita da 3 blocchi di alluminio 3003 impilati con celle a nido d'ape: il blocco posteriore e il blocco anteriore hanno spessore costante, mentre il blocco centrale ha uno spessore variabile. Per questo motivo, quest'ultimo blocco viene definito *progressive* e può essere pensato come suddiviso in nove sotto-blocchi, ciascuno di profondità pari a 50 mm, i quali si differenziano tra di loro solo per lo spessore: si ha una diminuzione progressiva dello spessore man mano che ci si sposta dal sotto-blocco posteriore fino al sotto-blocco anteriore (questo è dovuto al differente tempo di immersione delle diverse porzioni del blocco centrale in un bagno di agenti chimici che vengono utilizzati proprio con lo scopo di ridurre lo spessore). Al sotto blocco posteriore viene assegnato uno spessore pari a THICK1 che si riduce secondo una progressione geometrica:

$$THICK_n = THICK_{n-1} * REDUC \quad (7)$$

Dove n è il numero della porzione di blocco centrale che si sta prendendo in considerazione ($n=2,3,..,9$) e $REDUC$ è il coefficiente di riduzione dello spessore.

Gli honeycomb dei tre blocchi hanno misure differenti:

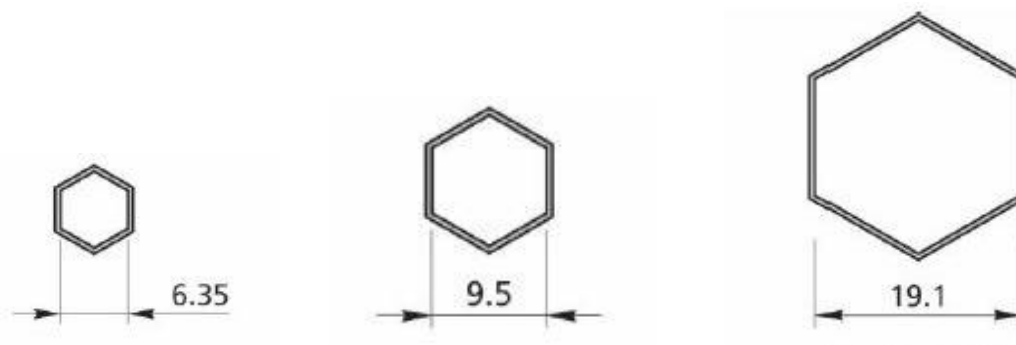


Figura 18: Da sinistra verso destra honeycomb blocco posteriore, honeycomb blocco centrale e honeycomb blocco anteriore [19].

La barriera è interamente coperta da un foglio di alluminio (cladding) dello spessore di 0.8 mm.

Nel modello, la barriera è saldamente fissata su una parete rigida in modo tale che durante la prova non si verifichi alcuno spostamento relativo.

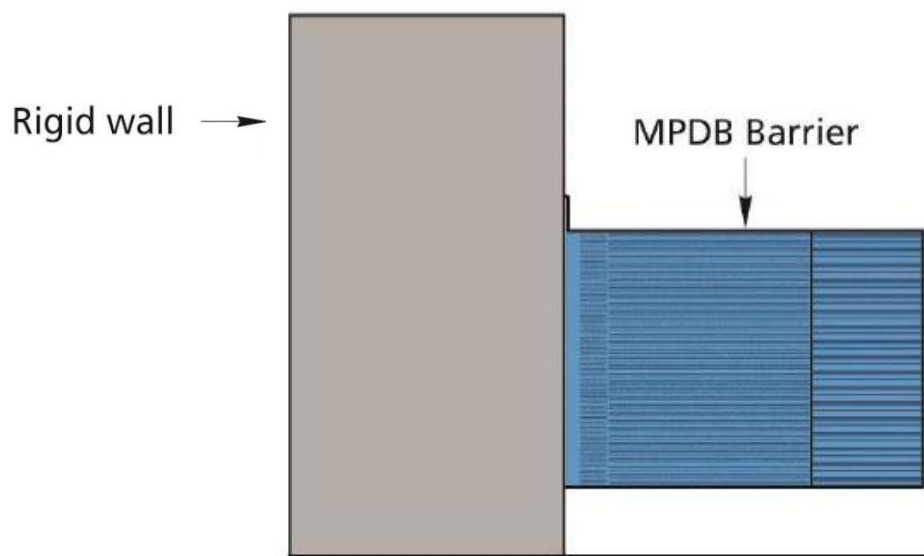


Figura 19: Fissaggio della barriera deformabile alla parete fissa [19].

Il modello prevede anche la presenza di un impattore costituito da una struttura tubolare. Il materiale di cui è costituito tale impattore è un materiale rigido non deformabile con le proprietà dell'acciaio (MAT_20); a tale materiale è stato assegnato un modulo elastico $E=210$ GPa e una densità pari a $\rho=7800$ Kg/ m³.

L'impattore tubolare è saldamente fissato su un trolley in modo che non si verifichino spostamenti relativi durante le prove.

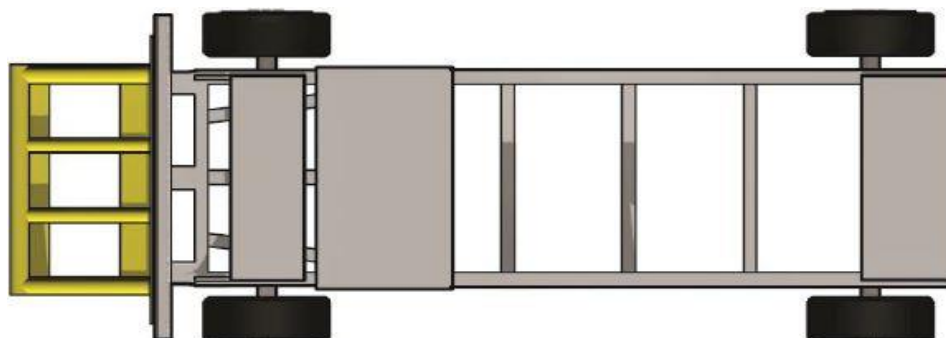


Figura 20: Montaggio impattore - trolley [19].

Il trolley è composto da un telaio montato su 4 ruote, è costituito anch'esso di materiale rigido indeformabile (MAT_20) con le proprietà dell'acciaio in modo tale che non ci siano deformazioni permanenti dopo le prove.

La massa totale del carrello deve essere di 1300 ± 20 kg (data dalla somma della massa del solo trolley e della massa del solo impattore tubolare).

4.4. Generazione del nuovo modello FEM di barriera MPDB

Come già anticipato in precedenza, per la fase di pre-processing è stato adoperato il software HyperMesh, grazie al quale è stato possibile realizzare, per i diversi blocchi, una mesh bidimensionale, nello specifico una mesh *R-tria*, ovvero composta da elementi che sono triangoli rettangoli. La scelta è ricaduta su tale tipo di mesh in quanto dovrebbe essere quella più stabile. Lo svantaggio di questo tipo di elementi è che sono più rigidi rispetto ad altri, ma tale rigidità può essere compensata andando a tarare in maniera opportuna lo spessore. Gli step seguiti per ciascun blocco sono sempre gli stessi: è stata dapprima definita la geometria del singolo honeycomb (avente la forma di un esagono) e poi è stata realizzata la mesh superficiale. Utilizzando i comandi *duplicate* e *translate*, gli elementi costituenti il singolo honeycomb sono stati, appunto, duplicati e traslati un numero di volte tale da poter raggiungere le dimensioni desiderate. Infine, la mesh è stata ottimizzata in modo che non presentasse *free edges* (linee aperte che in genere identificano dei vuoti all'interno del dominio discretizzato o dei bordi ridondanti).

La griglia di ogni blocco è stata definita all'interno di due *Comp*, uno contenente gli elementi esterni della mesh e l'altro contenente gli elementi relativi alle pareti interne della barriera che presentano uno spessore doppio (in quanto sono caratterizzati dalla sovrapposizione delle due facce di due honeycomb adiacenti). I *Comp* sono stati caratterizzati definendo il materiale (attraverso la card dei *Mat*) e le proprietà (attraverso la card delle *Prop*).

Tra i materiali messi a disposizione, la scelta, per tutti e tre i blocchi, è ricaduta su quello che viene definito **MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE_ORTHO*: si tratta di un materiale deformabile (MAT_81) in cui il danno del materiale è considerato prima che avvenga la rottura e può essere basato su una deformazione plastica o su un minimo time step che può essere imposto. Aggiungendo l'opzione ORTHO si include un modello di danno ortotropo e

questa caratteristica è stata aggiunta in prima battuta per modellizzare il fallimento su pannelli di alluminio. In questo materiale la rottura inizia dopo che si è raggiunta la deformazione che è stata impostata e la fase di rottura continua finché si raggiunge la completa rottura del materiale in una delle due direzioni ortogonali. Una volta che la rottura è stata rilevata in tutti i punti di integrazione, l'elemento viene effettivamente cancellato.

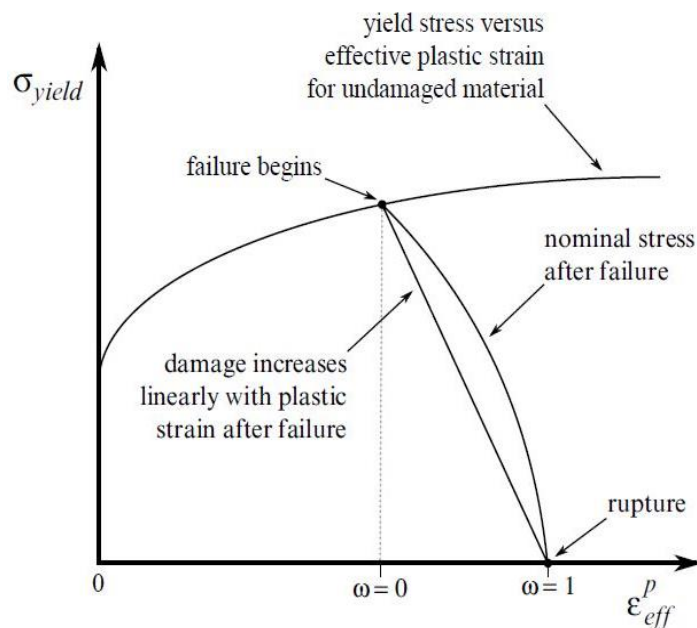


Figura 21: Comportamento sforzo-deformazione del MAT_81 quando è incluso il danno [33].

Per definire il materiale sono state compilate due card in cui sono stati assegnati i valori alle caratteristiche meccaniche del materiale stesso; in particolare nella prima card vengono definiti:

- Densità $\rho = 2710 \text{ kg/m}^3$
- Modulo di Young: $E = 70 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson: $\nu = 0.3$
- Tensione di snervamento: $\text{SIGY} = 0.06 \text{ GPa}$
- Modulo tangente: $\text{ETAN} = 0.007$
- Deformazione plastica effettiva a cui inizia l'“ammorbidimento” del materiale, ε_{eff}^p : $\text{EPPF} = 0.5$
- Minimo time step per la cancellazione automatica dell'elemento: $\text{TDEL} = 1.000\text{e-}05$

Nella seconda card viene definita la deformazione plastica effettiva a cui il materiale si rompe, $\varepsilon_{rupture}^p$: EPPFR = 1.

```
*MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE_ORTHO_TITLE
blocks
      222.7100E-06      70.0      0.3      0.06      0.007      0.51.0000E-05
      0.0      0.0      0      0      1.0      0.0      0      2
```

Figura 22: Definizione delle card riguardanti il materiale in alluminio dei blocchi.

Nelle proprietà sono stati definiti il tipo di elemento e la formulazione utilizzata: essendo l'elemento bidimensionale, si è definita la *Prop *SECTION_SHELL*. La formulazione implementata è indicata con il numero 4: *CO triangular shell*.

4.4. Ambito di utilizzo del modello FEM di barriera MPDB

Il modello FEM della barriera MPDB viene utilizzato nell'ambito delle simulazioni full scale (cioè con l'intero veicolo) che comprendono modelli aventi all'incirca 5-6 milioni di elementi. L'interesse principale è quello di avere delle simulazioni overnight in modo tale che, utilizzando l'infrastruttura di calcolo a disposizione, impostando un time step di 0.5 μ s e utilizzando 56 CPU, si possano ottenere dei risultati dopo un tempo ragionevole di circa 10 ore.

4.5. Alternative possibili

Tipicamente, per la maggior parte degli impattori e delle barriere esistono commercialmente dei modelli, per i quali possono essere acquistate le licenze. Questo, però, non è il caso della barriera MPDB, per la quale non è possibile acquistare una licenza del modello in quanto non ne esiste uno. Da qui deriva l'importanza di realizzare un accurato modello FEM. A tale scopo, è già in corso una collaborazione con un produttore di barriere MPDB per lo sviluppo e la realizzazione di tale modello.

CAPITOLO 5

Caratterizzazione statica dei blocchi costituenti la barriera

5.1. Caratterizzazione statica dei blocchi anteriore e posteriore

La prova di caratterizzazione statica dei blocchi anteriore e posteriore, indicati rispettivamente come blocco C e blocco A, segue la procedura descritta nella norma NHTSA TP-214D e intende verificare la forza di schiacciamento richiesta ad un campione di materiale di alluminio usato per realizzare gli honeycomb della barriera.

I campioni di alluminio utilizzati devono avere le seguenti dimensioni [32]:

- Larghezza (L): 152 ± 6 mm;
- Altezza (W): 152 ± 6 mm;
- Profondità (T): 25 ± 1.6 mm.

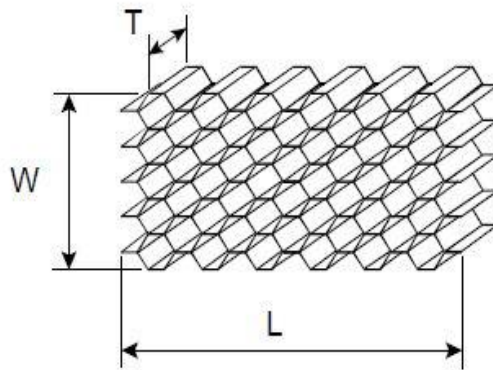


Figura 23: Dimensioni del campione di alluminio.

Per garantire che il carico sia applicato all'intero campione, vengono realizzate due piastre di schiacciamento parallele che non devono essere inferiori a 165 mm x 165 mm. La velocità di schiacciamento deve essere costante e nota e viene impostata pari ad 1 mm/ms: tale valore risulta essere lontano da una condizione tipica di un test statico o quasi statico, ma è il minimo utilizzabile nell'ambito di una simulazione esplicita in modo da avere dei tempi di

calcolo ragionevoli. Per tale motivo, sono stati stimati gli effetti inerziali e, dal momento che la massa di ciascun componente è molto ridotta, tali effetti possono essere trascurati.

5.1.1. Compressione statica del blocco anteriore (Blocco C)

Prendendo in considerazione il blocco anteriore, è stata selezionata una sua porzione avente le dimensioni indicate nel paragrafo precedente e, una volta ottenuto tale blocchetto, sono state realizzate le due piastre di compressione parallele (dimensione 240 mm x 240 mm). Questi componenti sono stati simulati con una mesh 2D a cui è stata associata una proprietà *section shell* di spessore 1 mm. Per la tipologia di materiale, la scelta è ricaduta su un materiale rigido non deformabile (*MAT_20*) a cui sono state assegnate le proprietà meccaniche tipiche dell'acciaio:

- Densità: $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$;
- Modulo di Young: $E = 210 \text{ GPa}$.

A questo punto sono stati definiti i gradi di libertà delle due piastre assegnando determinati valori ai coefficienti preposti nella card del *MAT_20*:

- La piastra inferiore è stata posta a contatto incipiente con il blocchetto ed è stata bloccata in tutti i gradi di libertà:

```
*MAT_RIGID
$HNAME MATERIALS      1Mat_rigid_2
      17.8000E-06      210.0
      1.0              7      7
      0
```

Figura 24: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra inferiore.

il valore 1.0 nel primo campo della seconda card dichiara che i vincoli sono stati applicati nel sistema di riferimento globale; il secondo e il terzo campo esprimono i vincoli alla traslazione e alla rotazione: il 7 nel secondo campo esprime l'impossibilità del corpo di traslare in tutte e tre le direzioni, mentre il 7 nel terzo campo esprime l'impossibilità del corpo di ruotare in tutte e tre le direzioni.

- La piastra superiore è stata posta ad una distanza di 0.5 mm dalla barriera ed è in grado di muoversi solo lungo l'asse x:

```

*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          3Mat_rigid_1
      37.8000E-06          210.0
      1.0              5          7
      0

```

Figura 25: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra superiore.

Anche in questo caso, il valore 1.0 che compare nel primo campo della seconda card dichiara che i vincoli sono applicati nel sistema di riferimento globale; il secondo e il terzo campo esprimono i vincoli rispettivamente alla traslazione e alla rotazione: il 5 nel secondo campo esprime l'impossibilità del corpo di traslare lungo y e z e la possibilità a traslare solo lungo x, il 7 nel terzo campo esprime l'impossibilità del corpo a ruotare in tutte e tre le direzioni.

Successivamente, è stata definita la curva della velocità e, come detto in precedenza, è stata impostata pari ad 1 mm/ms andando a compilare la card **DEFINE_CURVE*:

```

*DEFINE_CURVE
4000000      0      1.0      1.0      0.0      0.0      0
      0.0              0.0
      10.0              1.0
      5000.0           1.0

```

Figura 26: Definizione delle card riguardanti la velocità di compressione.

Nel primo campo della prima card viene indicato il numero della curva (4000000); nel secondo campo lo 0 indica che la curva di carico è utilizzata solo nell'analisi transitoria o per altre applicazioni; il valore 1.0 presente nel terzo e quarto campo rappresenta lo *scale factor* rispettivamente per le ascisse e per le ordinate (viene impostato di default pari a 1.0 ed è utile in quanto rende più semplici le modifiche); il valore 0.0 presente nel quinto e sesto campo rappresenta il valore di offset rispettivamente per ascissa e per ordinata; infine, lo 0 nell'ultimo campo indica il tipo di dati con cui si ha a che fare e, generalmente, tale valore viene utilizzato per le curve in funzione del tempo, o per le curve forza-spostamento oppure per le curve tensione-deformazione.

Nel primo campo della seconda card, invece, viene indicato il valore dell'ascissa e nel secondo campo il rispettivo valore di ordinata.

Infine, per ottenere gli andamenti dello spostamento e della forza di contatto nel tempo, sono stati inseriti il **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* e il **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY_ID*: il primo restituisce in fase di post-processing lo spostamento, la velocità e l'accelerazione di un nodo specifico, nel caso in questione è stato scelto un nodo appartenente alla piastra impattante; il secondo, invece, permette di conoscere la forza di contatto dovuta al contatto tra due componenti ed è utile per riconoscere le forze scambiate tra il blocchetto di barriera e la piastra.

A questo punto è stato possibile far partire la simulazione impostando un *ENDTIM* (tempo di fine simulazione) nella card **CONTROL_TERMINATION* pari a 25 ms.

Lo scopo di questo test di compressione statica è quello di tarare lo spessore del blocco anteriore della barriera, realizzato rispettando le dimensioni fisiche reali, in modo da far rientrare l'andamento della pressione nei corridoi statici che sono definiti a 0.308 MPa e a 0.342 MPa. La pressione è stata calcolata a partire dalla curva forza-spostamento ottenuta come output dalla definizione del **FORCE_TRANSDUCER_PENALTY*, dividendo, poi, tale forza per l'area della porzione di blocco anteriore presa in considerazione 23 409 mm² e moltiplicando per 1000 in modo da convertire i GPa in MPa.

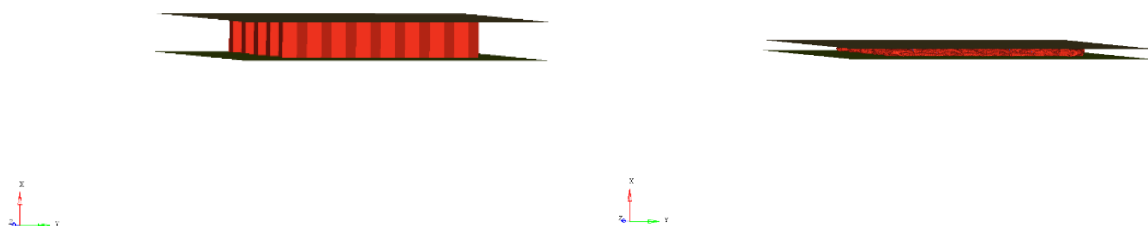


Figura 27: Compressione Statica blocco anteriore (C) all'istante $t=0$ ms (sinistra) e a $t=25$ ms (destra).

Una delle prime azioni da eseguire nella fase di post-processing consiste nel controllare la validità dei risultati forniti dal solutore. Il principale mezzo per effettuare tale verifica consiste nell'analisi del bilancio energetico e della massa aggiunta (tale verifica e le considerazioni

vengono effettuate per tutti e tre i blocchi, ma di seguito si riportano i risultati relativi al blocco anteriore).

Nel bilancio energetico si descrive l'evoluzione di tutti i termini energetici nel tempo.

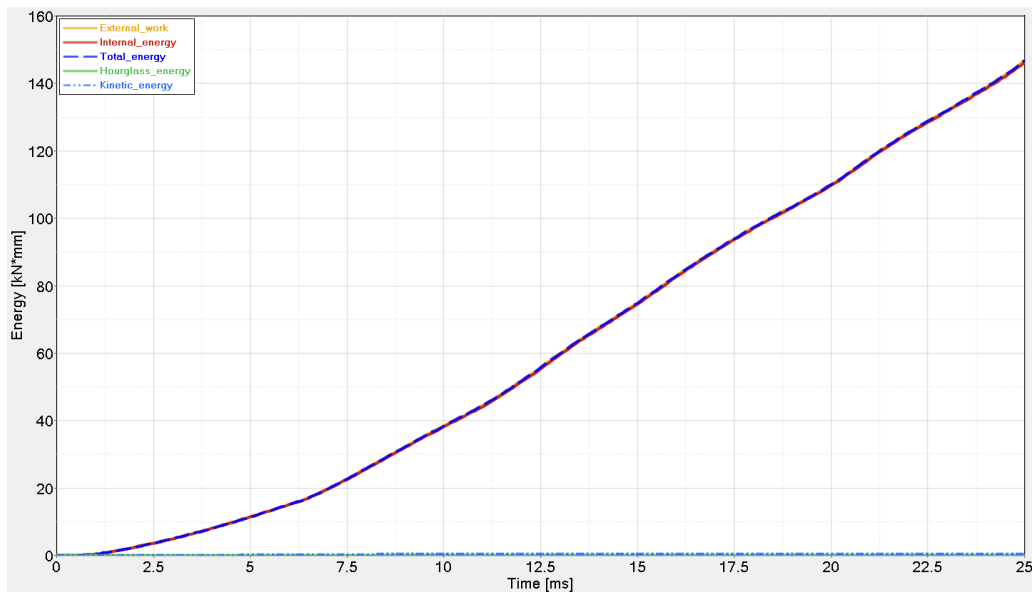


Figura 28: Bilancio energetico del blocco anteriore.

Nella simulazione in esame viene compiuto del lavoro dall'esterno in quanto è stata applicata una velocità alla piastra impattante e da ciò deriva un certo *external_work*. È presente una energia interna dovuta allo schiacciamento e quindi alla deformazione delle celle che sarà pari al lavoro esterno. Inoltre, l'energia di hourglass dovuta alla deformazione degli elementi che vengono poi cancellati e l'energia cinetica hanno dei valori prossimi a zero.

Un'altra valutazione è stata quella sulla massa aggiunta (*added_mass*).

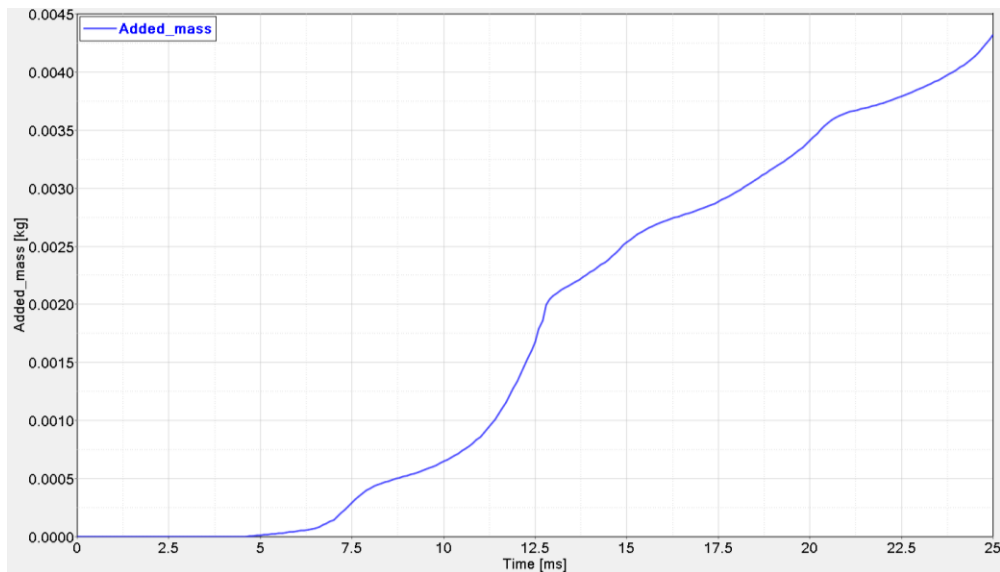


Figura 29: Andamento massa aggiunta per il blocco anteriore.

È importante controllare la massa aggiunta ai componenti dal software poiché, al fine di ottenere risultati attendibili, è preferibile non avere una quantità di massa aggiunta elevata: nel caso in esame, la porzione di blocco anteriore presa in considerazione pesa poco meno di 2 kg e, per avere una sua rappresentazione prossima alla realtà, è necessario che la massa aggiunta sia una percentuale bassa della sua massa reale (in questo caso si ha una massa aggiunta pari a 4.3 grammi).

Dai risultati ottenuti dalla simulazione, la configurazione più idonea prevede di assumere uno spessore delle celle del blocco anteriore della barriera pari a 0.125 mm. Questo risultato è stato ottenuto utilizzando una mesh fine per il blocco anteriore che prevede la presenza di sei elementi per lato, con un totale di 79 632 elementi per il solo blocchetto di dimensioni 152 x 152 x 25 mm³.

La taratura dello spessore è avvenuta partendo con l'assegnare al nuovo modello di blocco anteriore lo spessore che è stato utilizzato per lo stesso blocco nel vecchio modello di barriera, pari a 0.1769 mm e si è visto che la curva è nettamente al di sopra dei corridoi statici previsti dal protocollo.

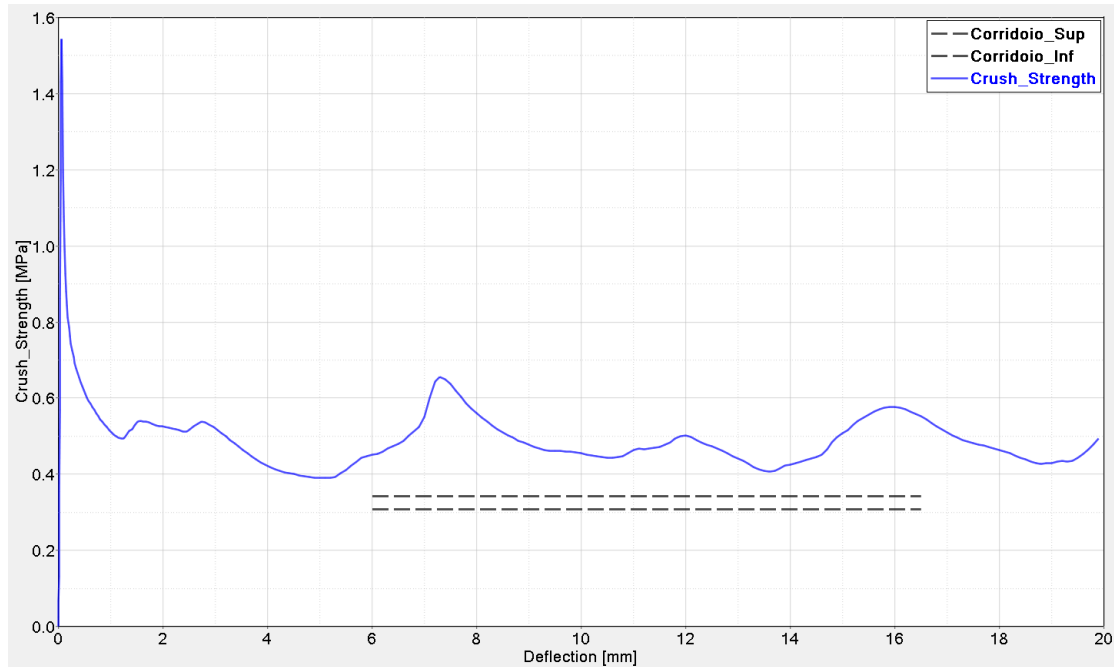


Figura 30: Curva pressione-spostamento per il blocco anteriore con spessore pari a 0.1769.

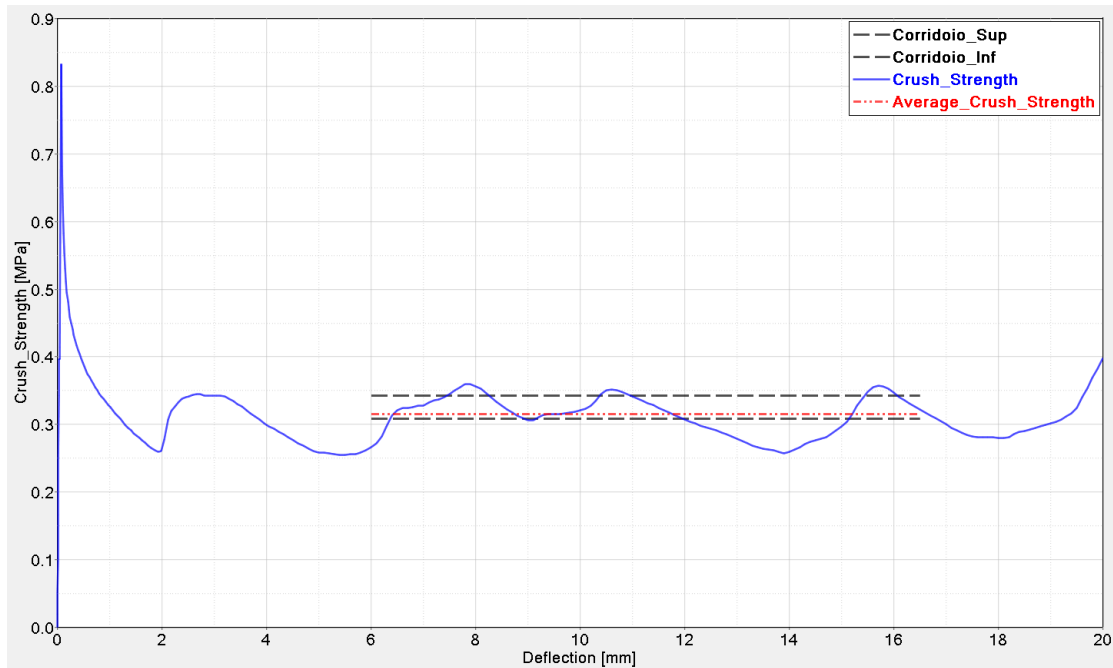


Figura 31: Curva pressione-spostamento per il blocco anteriore con spessore pari a 0.125 mm.

Tutto ciò che succede prima di 6 mm e dopo 16.5 mm viene trascurato e, per giustificare la scelta dello spessore pari a 0.125 mm e per dimostrare che la curva rientra effettivamente all'interno dei corridoi statici, è stata calcolata la pressione media come descritto nella norma:

$$\bar{p} = \frac{\int_6^{16.5} p(s) ds}{(16.5 - 6)}$$

dove $\bar{p}$ rappresenta la pressione media, $p(s)$ rappresenta la pressione in funzione dello spostamento e 16.5 e 6 sono gli estremi dell'intervallo di interesse.

5.1.2. Compressione statica del blocco posteriore (Blocco A)

Prendendo in considerazione il blocco posteriore, è stata selezionata una sua porzione avente le dimensioni riportate in precedenza e, anche in questo caso, sono state realizzate le due piastre di compressione parallele identiche a quelle utilizzate per la prova di compressione eseguita sul blocco anteriore. Quindi, dopo aver scelto il materiale delle piastre (*MAT_20*) e,

dopo aver assegnato le proprietà meccaniche (densità e modulo elastico), sono stati definiti i loro gradi di libertà:

- La piastra inferiore è stata posta a contatto incipiente con il blocchetto ed è stata bloccata in tutti i suoi gradi di libertà. Anche in questo caso, la presenza del valore 7 nel secondo campo della card esprime l'impossibilità del corpo di traslare in tutte e tre le direzioni, mentre il 7 nel terzo campo della card esprime l'impossibilità del corpo di ruotare in tutte e tre le direzioni.

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          2Mat_rigid_2
      27.8000E-06          210.0
      1.0              7          7
      0
```

Figura 32: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra inferiore.

- La piastra superiore è stata posta ad una distanza di 0.5 mm dalla barriera ed è in grado di muoversi lungo l'asse x. Quindi, nella card relativa a tale piastra si ritrova il valore 5 nel secondo campo che indica, appunto, la possibilità che ha il corpo di muoversi lungo l'asse x e il valore 7 nel terzo campo che indica l'impossibilità che ha il corpo di ruotare nelle tre direzioni.

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          3Mat_rigid_1
      37.8000E-06          210.0
      1.0              5          7
      0
```

Figura 33: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra superiore.

Il passo successivo, così come è stato fatto per il blocco C, è stato quello di impostare una velocità di compressione pari ad 1 mm/ms andando a compilare la card **DEFINE_CURVE*

```
*DEFINE_CURVE
4000000      0      1.0      1.0      0.0      0.0      0
           0.0           0.0
          10.0           1.0
          500.0          1.0
```

Figura 34: Definizione delle card riguardanti la velocità di compressione.

Al fine di ottenere gli andamenti dello spostamento e della forza di contatto nel tempo, sono stati inseriti il **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* che restituisce lo spostamento, la velocità e l'accelerazione di un nodo appartenente alla piastra impattante e il **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY_ID* che permette di conoscere la forza di contatto dovuta al contatto tra due componenti ed è utile per riconoscere le forze scambiate tra il blocchetto di barriera e la piastra.

A questo punto è possibile far partire la simulazione impostando un *ENDTIM* (tempo di fine simulazione) pari a 25 ms.



Figura 35: Compressione statica blocco posteriore a t=0 ms (sinistra) e a t=25 ms (destra).

Anche in questo caso nella fase di post-processing sono state fatte le stesse valutazioni e considerazioni effettuate nella prova precedente relative agli andamenti delle energie e della massa aggiunta.

Lo scopo della simulazione è stato quello di tarare in maniera opportuna lo spessore del blocco posteriore in modo da far rientrare l'andamento della pressione all'interno dei corridoi statici che sono definiti a 1.540 MPa e a 1.711 MPa. La pressione è stata calcolata a partire dalla curva forza-spostamento ottenuta come output tramite la definizione del **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY*, dividendo, poi, tale forza per l'area della porzione di blocco presa in considerazione 23 013 mm² e moltiplicando per 1000 in modo da convertire i GPa in MPa.

Dai risultati ottenuti, la configurazione più idonea prevede di assumere uno spessore delle celle costituenti la barriera pari a 0.1 mm. Tale risultato è stato ottenuto utilizzando una mesh fitta che prevede la presenza di tre elementi per lato, con un totale di 113 064 per la porzione di barriera presa in considerazione.

La taratura dello spessore è avvenuta partendo con l'assegnare al nuovo modello di blocco posteriore lo spessore che è stato utilizzato per lo stesso blocco nel vecchio modello di

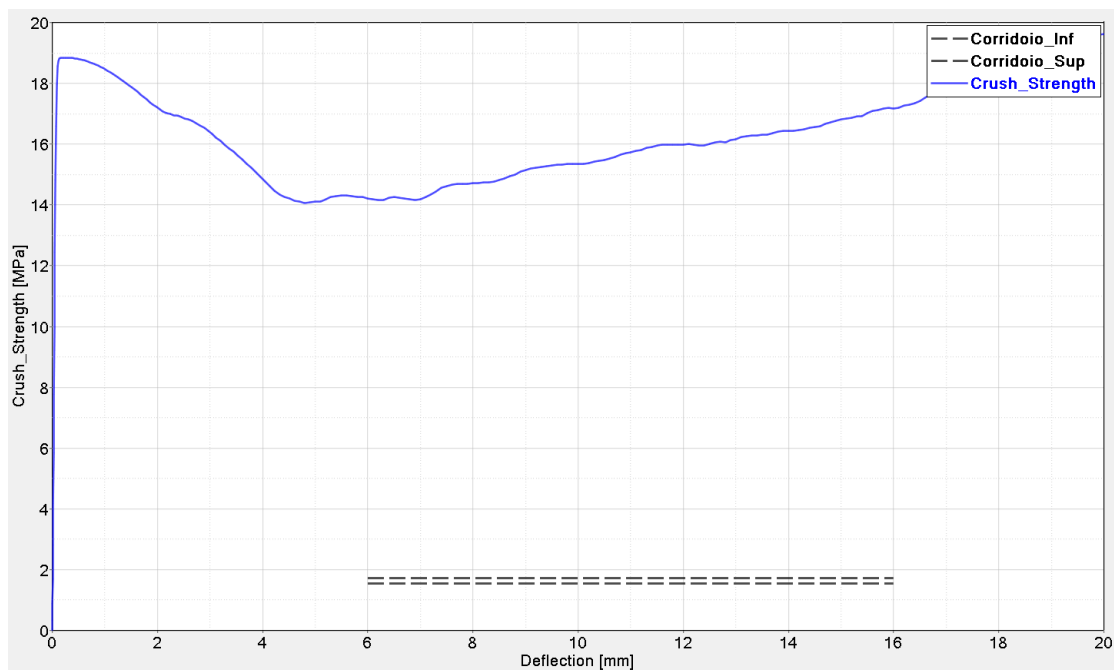


Figura 37: Curva pressione-spostamento per il blocco posteriore con spessore pari a 0.6821 mm.

barriera, pari a 0.6821 mm, e si è visto che la curva è nettamente al di sopra dei corridoi statici previsti dal protocollo.

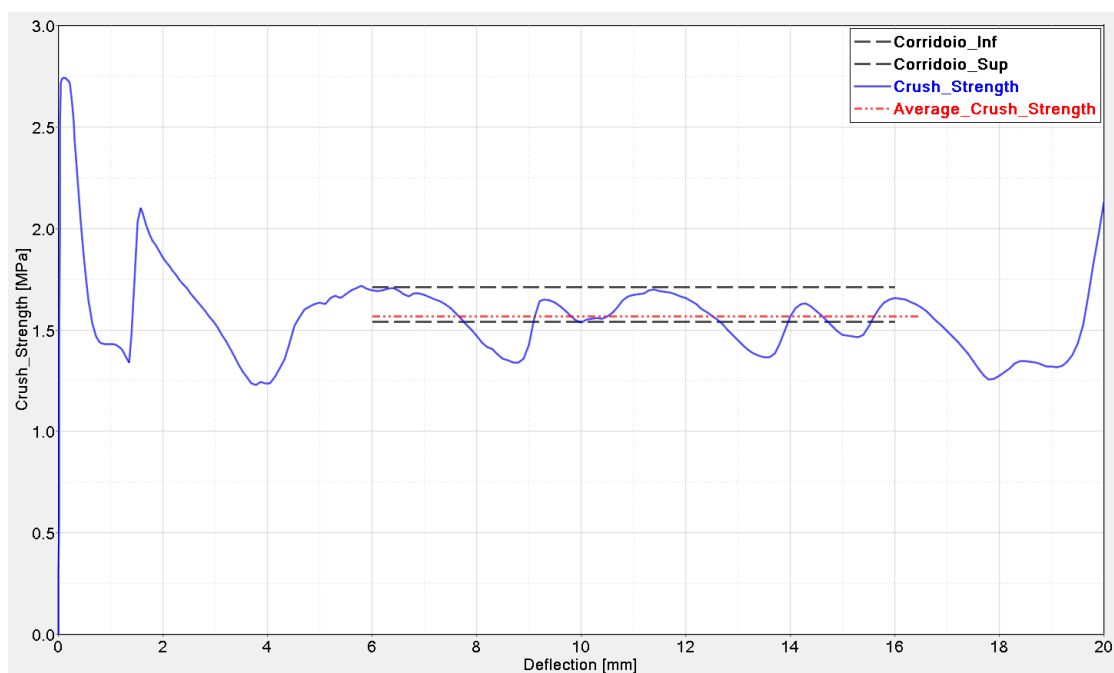


Figura 38: Curva pressione-spostamento per il blocco posteriore con spessore pari a 0.1 mm.

Tutto ciò che succede prima di 6 mm e dopo 16.5 mm viene trascurato e per giustificare la scelta dello spessore pari a 0.1 mm e per dimostrare che la curva rientra effettivamente all'interno dei corridoi statici, è stata calcolata la pressione media come descritto nella norma:

$$\bar{p} = \frac{\int_6^{16.5} p(s)}{(16.5 - 6)}$$

dove $\bar{p}$ rappresenta la pressione media, $p(s)$ rappresenta la pressione in funzione dello spostamento e 16.5 e 6 sono gli estremi dell'intervallo di interesse.

5.2. Sforzo di taglio sui blocchi anteriore e posteriore

Dopo aver eseguito la prova di compressione statica, i due blocchi anteriore e posteriore sono stati sottoposti ad uno sforzo di taglio, in modo da valutarne la rigidità laterale. In questo caso, per ogni blocco, sono state prese in considerazione delle porzioni aventi dimensioni di 250 mm x 250 mm ed è stata mantenuta l'intera profondità di ogni blocco (vale a dire profondità pari a 250 mm per il blocco anteriore e profondità pari a 90 mm per il blocco posteriore). Per lo spessore degli honeycomb e la mesh di ciascun blocco, è stata considerata la configurazione ottimale che è stata descritta nei punti precedenti, cioè:

- Blocco anteriore: mesh costituita da 6 elementi per lato, spessore degli honeycomb pari a 0.125 mm;
- Blocco posteriore: mesh costituita da 3 elementi per lato, spessore degli honeycomb pari a 0.1 mm.

5.2.1. Sforzo di taglio sul blocco anteriore (Blocco C)

La configurazione di prova prevede di realizzare due piastre parallele (come quelle descritte nella prova di compressione) in materiale rigido non deformabile (*MAT_20*) con le proprietà dell'acciaio e per ognuna delle quali vengono definiti i gradi di libertà:

- La piastra inferiore è posta a contatto incipiente con la barriera ed è stata bloccata in tutti i suoi gradi di libertà:

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          1Mat_rigid_2
      17.8000E-06          210.0
      1.0              7          7
      0
```

Figura 36: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra inferiore.

Il valore 7 presente sia nel secondo che terzo campo della card sta ad indicare rispettivamente il fatto che la piastra è impossibilitata a traslare nelle tre direzioni e che è impossibilitata a ruotare nelle tre direzioni.

- La piastra superiore, invece, è posta ad una distanza di 0.5 mm dalla barriera ed è in grado di traslare solo lungo l'asse y:

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          3Mat_rigid_1
      37.8000E-06          210.0
      1.0              6          7
      0
```

Figura 37: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra superiore.

In questo caso, i valori 6 e 7 presenti nel secondo e terzo campo della card stanno ad indicare rispettivamente l'impossibilità del corpo di traslare lungo gli assi x e z e l'impossibilità del corpo di ruotare nelle tre direzioni.

Sono, poi, stati definiti gli *extra nodes*, ovvero nodi facenti parte delle due piastre ma non appartenenti alla loro geometria, tramite la card **CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET*: questo vuol dire che le prime due file a partire dal basso della barriera e le prime due file a partire dall'alto della barriera sono state vincolate rigidamente rispettivamente alla piastra inferiore e della piastra superiore: in questo modo questi nodi si muoveranno in accordo con il corpo rigido a cui sono stati vincolati.

Alla piastra in movimento è stata assegnata una velocità pari ad 1 mm/ms andando a compilare la card **DEFINE_CURVE*.

Anche in questo caso sono stati definiti:

- **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* che permette di visualizzare lo spostamento, la velocità e l'accelerazione di un nodo appartenente alla piastra mobile
- **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY_ID* che permette di conoscere la forza di contatto scambiata tra la piastra e la barriera.
- **DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID* che prevede la creazione di una piano che permette di visualizzare la risultante delle forze su una sezione trasversale.

Per la simulazione è stato impostato un *ENDTIM* (tempo di fine simulazione) 35 ms.

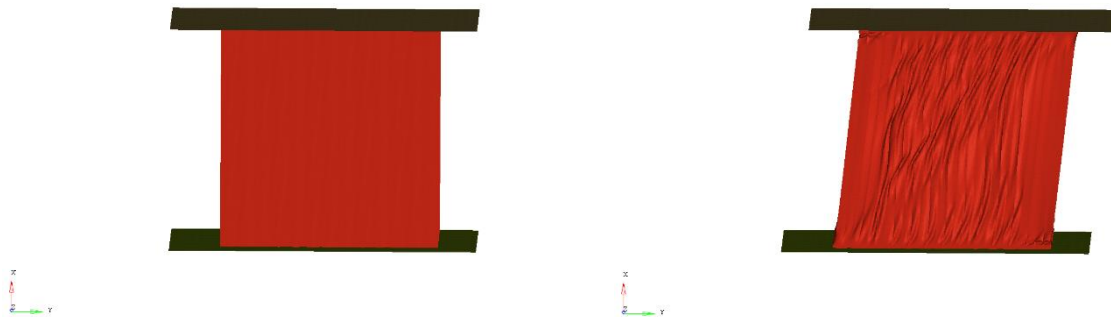


Figura 38: Prova di taglio blocco anteriore all'istante $t=0$ ms (sinistra) e a $t=35$ ms (destra).

È stato visualizzato l'andamento della forza risultante sulla *cross_section* e i risultati ottenuti per questa configurazione di prova sono stati, poi, confrontati con i risultati ottenuti ripetendo la stessa prova nelle stesse condizioni per il blocco anteriore del modello originale di barriera MPDB.

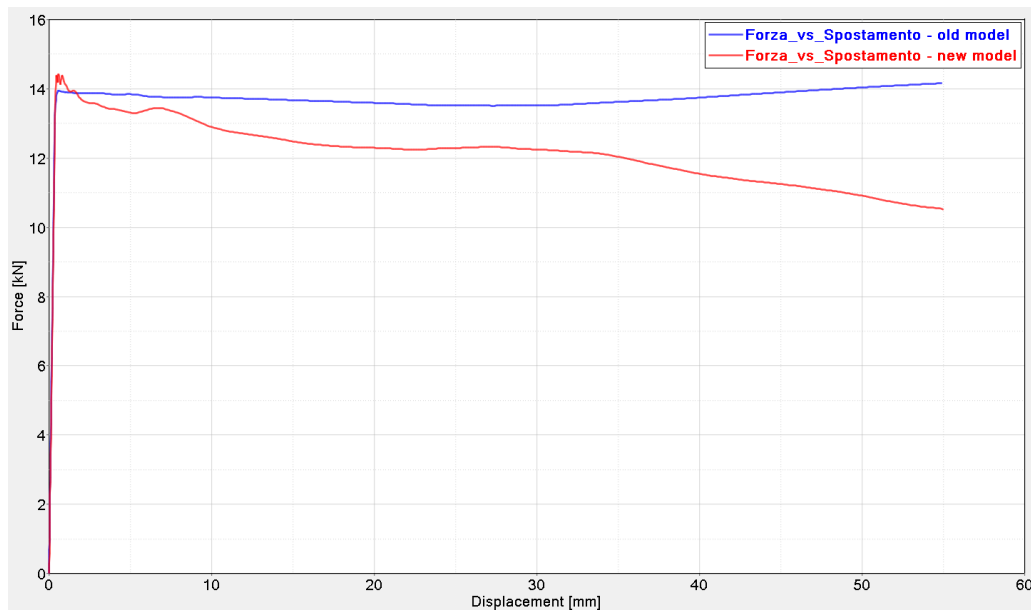


Figura 39: Andamento forza-spostamento per il nuovo modello di blocco anteriore (rosso) e per il vecchio modello (blu).

Come si nota dal grafico precedente, la forza risulta essere inizialmente più elevata nel caso del nuovo modello di blocco anteriore (rosso); dopo un certo spostamento (circa 2 mm) lungo l'asse y tale forza inizia a diminuire e per tutta la durata della prova si mantiene più bassa della forza relativa al vecchio modello di blocco anteriore (blu): in generale, il nuovo modello di blocco centrale è meno rigido rispetto al vecchio e quindi, nel caso in cui siano presenti azioni di taglio, è maggiormente soggetto a quelle deformazioni definite di scorrimento.

5.2.2. Sforzo di taglio sul blocco posteriore (Blocco A)

La prova di sforzo di taglio viene effettuata anche sulla porzione di blocco posteriore: la porzione testata è quella avente uno spessore di 0.1 mm (risultante dalla prova di compressione statica). Gli step da seguire sono gli stessi descritti nella prova precedente, quindi sono state posizionate le due piastre parallele di materiale rigido (MAT_20) con le proprietà dell'alluminio e poi sono stati definiti i loro gradi di libertà:

- La piastra inferiore è stata posta a contatto incipiente con la barriera ed è stata bloccata in tutti i suoi gradi di libertà:

```
*MAT_RIGID
$HNAME MATERIALS      1Mat_rigid_2
      17.8000E-06      210.0
      1.0              7              7
      0
```

Figura 40: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra inferiore.

nel terzo e quarto campo della card è presente il valore 7: tale valore indica rispettivamente che il corpo rigido è impossibilitato a traslare e a ruotare in tutte e tre le direzioni.

- La piastra superiore è stata posta ad una distanza di 0.5 mm dalla barriera ed in grado di muoversi solo lungo l'asse y:

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          3Mat_rigid_1
      37.8000E-06          210.0
      1.0              6      7
      0
```

I valori 6 e 7 pre-*Figura 41: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio* care che il corpo rigido può traslar della piastra superiore. e direzioni.

È stata, poi, utilizzata la card **CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET* per definire gli extra nodes e, anche in questo caso, le prime due file a partire dal basso del blocco e le prime due file a partire dall'alto del blocco sono state vincolate rigidamente rispettivamente alla piastra inferiore e alla piastra superiore. Tali nodi seguiranno il movimento delle piastre a cui appartengono.

Compilando la card **DEFINE_CURVE* è stata impostata la velocità di 1 mm/ms alla piastra in movimento.

È stato scelto un nodo sulla piastra mobile ed è stato definito il **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* in modo da visualizzarne spostamento, velocità e accelerazione; è stato definito il **DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID* che permette di visualizzare la risultante delle forze; infine, è stata compilata la card **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY_ID* che consente di conoscere la forza scambiata tra la piastra e la barriera.

Per la simulazione è stato impostato un *ENDTIM* (tempo di fine simulazione) pari a 30 ms.

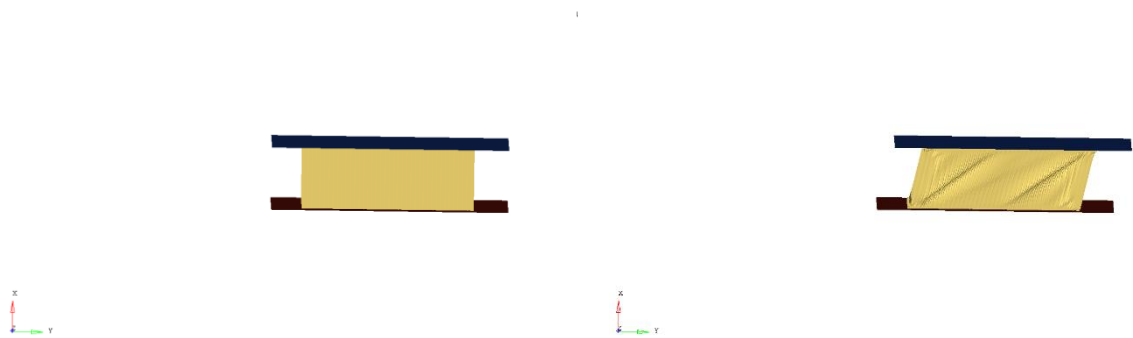


Figura 42: Prova di taglio blocco posteriore all'istante $t=0$ ms (sinistra) e a $t=30$ ms (destra).

È stato visualizzato l'andamento della forza risultante sulla *cross_section* e i risultati ottenuti con questa configurazione di prova sono stati, poi, confrontati con i risultati ottenuti ripetendo la stessa prova nelle stesse condizioni per il blocco posteriore del modello originale di barriera MPDB.

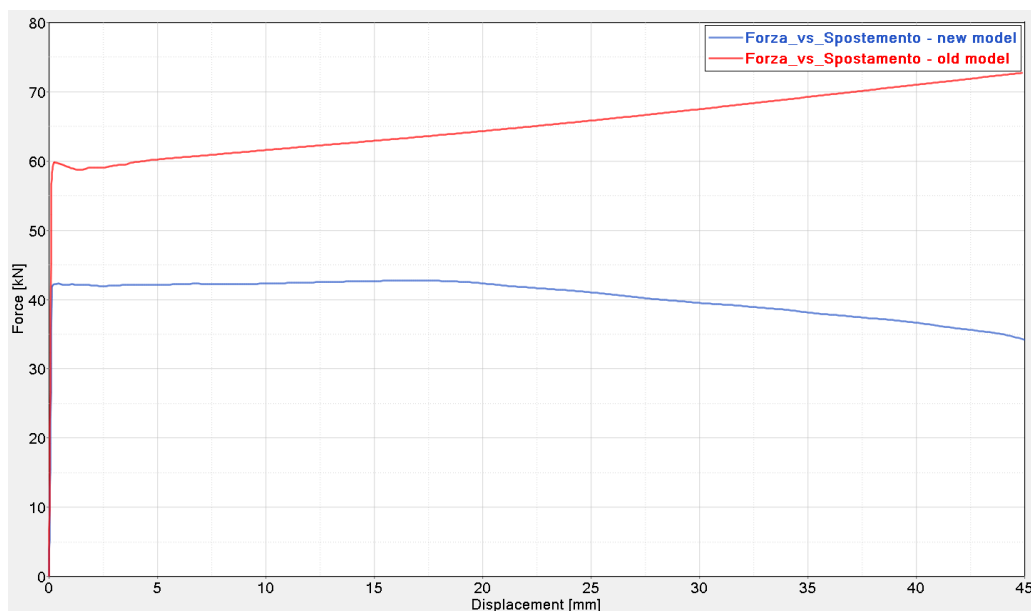


Figura 43: Andamento forza-spostamento per il nuovo modello di blocco posteriore (verde) e per il vecchio modello (blu).

Come si nota dal grafico precedente, la forza risulta essere più bassa nel caso del nuovo modello di blocco posteriore (verde) rispetto a quella che si ha con il vecchio modello (blu):

il nuovo modello di blocco posteriore risulta essere meno rigido rispetto al vecchio, quindi più soggetto a deformazioni di scorrimento.

5.3. Compressione statica del blocco centrale (Blocco B)

La prova di caratterizzazione statica per il blocco centrale segue la procedura descritta da EuroNCAP nel Technical Bulletin ed ha lo scopo di verificare la forza di schiacciamento richiesta ad un campione di alluminio che viene utilizzato per realizzare la barriera deformabile [19].

Vengono selezionati blocchi delle dimensioni di 250 mm x 250 mm x 450 mm che devono essere processati tra due piastre di carico parallele di dimensioni maggiori di 20 mm rispetto alla sezione trasversale del blocco, in modo da garantire che il carico venga applicato all'intero campione (in questo caso le piastre hanno dimensioni 350 mm x 350 mm). Le piastre vengono realizzate con una mesh 2D a cui è associata una proprietà *section shell* di spessore pari a 1 mm e a questi componenti viene assegnato un materiale rigido non deformabile (*MAT_20*) con le proprietà dell'acciaio, a cui sono state assegnate le seguenti proprietà meccaniche:

- Densità: $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$;
- Modulo di Young: $E = 210 \text{ GPa}$.

A questo punto sono stati definiti i gradi di libertà delle due piastre:

- La piastra inferiore è stata posta a contatto incipiente con il blocco ed è stata bloccata in tutti i gradi di libertà:

```
*MAT_RIGID
$HNAME MATERIALS          1Mat_rigid_2
      17.8000E-06      210.0
      1.0      7      7
      0
```

Figura 44: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra inferiore.

il valore 7 nel secondo campo esprime l'impossibilità del corpo rigido di traslare in tutte e tre le direzioni, il 7 nel terzo campo esprime l'impossibilità del corpo di ruotare in tutte e tre le direzioni.

- La piastra superiore è stata posta ad una distanza di 0.5 mm dal blocco di barriera ed è in grado di muoversi solo lungo l'asse x.

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          3Mat_rigid_1
      37.8000E-06      210.0
      1.0          5          7
      0
```

Figura 45: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra superiore.

il 5 nel secondo campo indica l'impossibilità della piastra di traslare lungo gli assi y e z, il 7 nel terzo campo della card esprime l'impossibilità della piastra di ruotare attorno a tutti e tre gli assi.

Come definito in precedenza, alla piastra in movimento viene impostata una velocità di compressione pari ad 1 mm/ms e la prova continua finché il blocco non viene schiacciato di 355 mm. Tale velocità è stata definita mediante la compilazione della card **DEFINE_CURVE*. Infine, per ottenere in fase di post-processing gli andamenti dello spostamento e della forza di contatto nel tempo, sono stati inseriti il **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* che restituisce lo spostamento, la velocità, l'accelerazione di un nodo appartenente alla piastra impattante e il **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY_ID* che permette di conoscere la forza scambiata tra il blocco e la piastra.

A questo punto è possibile far partire la simulazione impostando un *ENDTIM* (tempo di fine simulazione) pari a 400 ms.

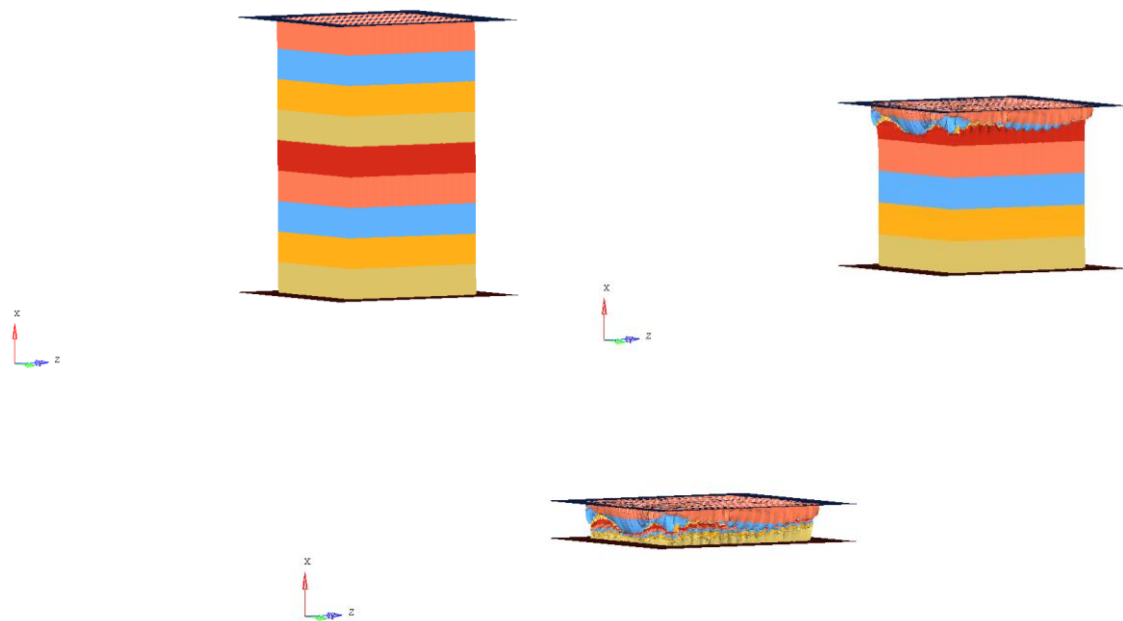


Figura 46: Compressione statica blocco centrale a $t=0$ ms (sinistra), a $t=200$ ms (destra), $t=400$ ms (basso).

Anche in questo caso nella fase di post-processing sono state fatte le stesse valutazioni e considerazioni effettuate nelle due prove di compressione statica precedenti relative agli andamenti delle energie e della massa aggiunta.

Lo scopo della prova è quello di tarare lo spessore del blocco centrale in modo tale che l'andamento della pressione rientri nei corridoi statici definiti in Figura 50.

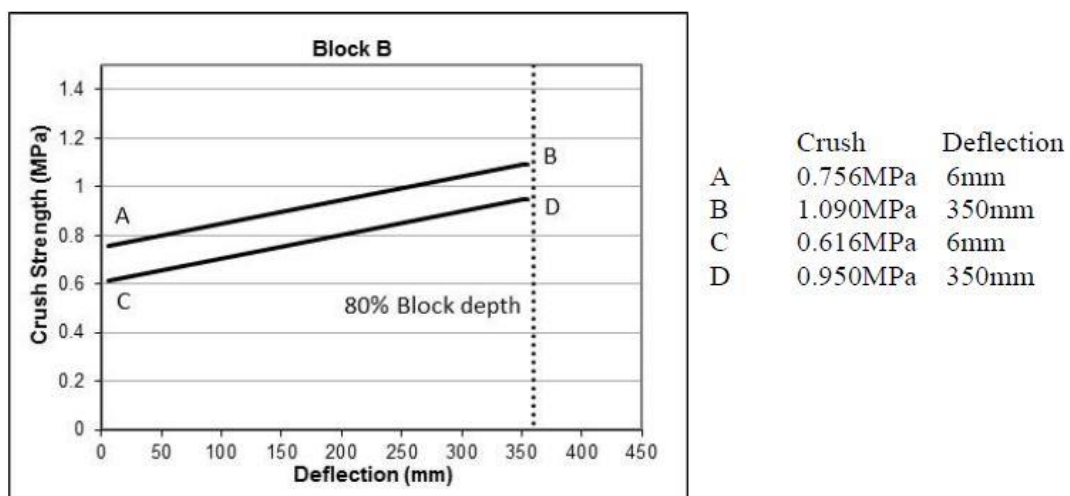


Figura 47: Corridoi statici per il blocco B.

La pressione è stata calcolata a partire dalla curva forza-spostamento ottenuta come output tramite la definizione del **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY*, dividendo, poi, tale forza per l'area della porzione di blocco presa in considerazione pari a 62 600 mm² e moltiplicando per 1000 in modo da convertire i GPa in MPa.

Dai risultati ottenuti dalla simulazione, la configurazione più idonea prevede di prendere uno spessore THICK1 pari a 0.09 mm e un coefficiente REDUC pari a 0.926, dove THICK1 è lo spessore della porzione di blocco centrale più vicina al blocco posteriore e REDUC rappresenta il coefficiente di riduzione dello spessore delle varie porzioni in cui è suddiviso l'intero blocco centrale. Tale risultato è stato ottenuto utilizzando una mesh di un elemento per lato, con un totale di 441 180 elementi per il solo blocchetto di dimensioni 250 mm x 250 mm x 450 mm.

La taratura dello spessore è avvenuta partendo con l'assegnare al nuovo modello di blocco posteriore lo spessore che è stato utilizzato per lo stesso blocco nel vecchio modello di barriera, quindi THICK1 pari a 0.5124 mm e con un coefficiente di riduzione REDUC pari a 0.8475, e si è visto che la curva è nettamente al di sopra dei corridoi statici previsti dal protocollo.

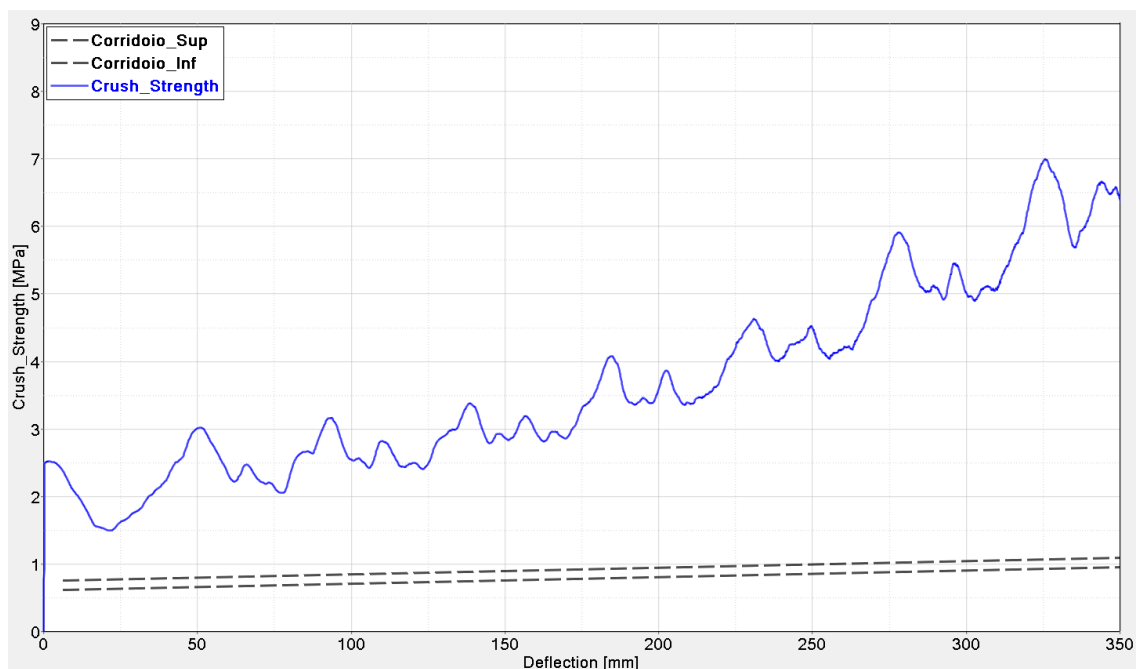


Figura 48: Curva pressione-spostamento per il blocco centrale con spessore THICK1 pari a 0.5124 mm e coefficiente di riduzione REDUC pari a 0.8475.

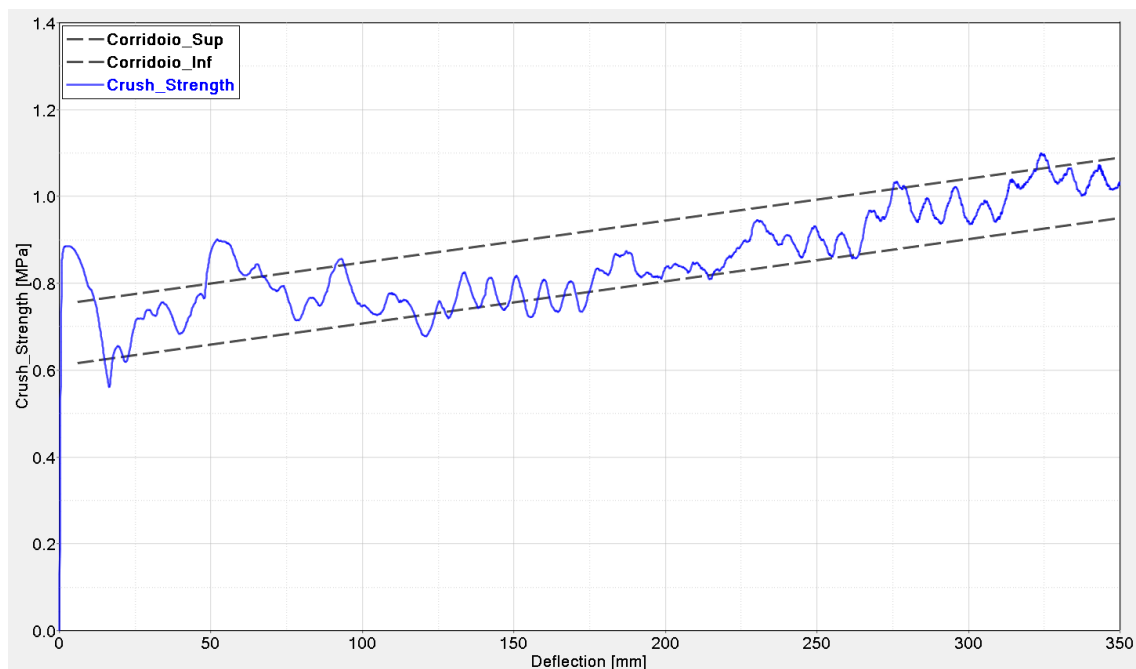


Figura 49: Curva pressione-spostamento per il blocco centrale con spessore THICK1 pari a 0.09 e coefficiente di riduzione REDUC pari a 0.926.

Come si nota dal grafico, dopo la taratura l'andamento della pressione risulta rientrare all'interno dei corridoi statici.

5.4. Sforzo di taglio sul blocco centrale (Blocco B)

Dopo aver eseguito la prova di compressione statica, il blocco è stato sottoposto ad uno sforzo di taglio per valutarne la rigidità laterale. È stata presa una porzione dell'intero blocco avente le dimensioni indicate nel paragrafo precedente ed è stata considerata la configurazione ottimale descritta nel punto precedente, ovvero una mesh caratterizzata dalla presenza di 1 elemento per lato, uno spessore THICK1 pari a 0.09 mm e un coefficiente REDUC pari a 0.926.

La configurazione di prova prevede di posizionare due piastre parallele in materiale rigido non deformabile (MAT_20) aventi le caratteristiche che sono state descritte nel paragrafo relativo alla compressione statica. Per tali componenti sono stati definiti i gradi di libertà:

- La piastra inferiore è stata posta a contatto incipiente con la barriera ed è stata bloccata in tutti i suoi gradi di libertà:

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          1Mat_rigid_2
      17.8000E-06      210.0
      1.0          7          7
      0
```

Figura 53: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra inferiore.

il valore 7 nel secondo e terzo campo indica rispettivamente l'impossibilità della piastra inferiore di traslare e di ruotare in tutte e tre le direzioni.

- La piastra superiore, invece, è stata posta ad una distanza di 0.5 mm dalla barriera ed è in grado di traslare solo lungo l'asse y:

```
*MAT_RIGID
$HMNAME MATERIALS          3Mat_rigid_1
      37.8000E-06      210.0
      1.0          6          7
      0
```

Figura 54: Definizione delle card riguardanti il materiale in acciaio della piastra superiore.

in tal caso, i valori 6 e 7 presenti nel secondo e terzo campo della card stanno ad indicare rispettivamente l'impossibilità della piastra di traslare lungo gli assi x e z e l'impossibilità di ruotare nelle tre direzioni.

Sono, poi, stati definiti gli extra nodes tramite la card **CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET* e in questo modo le prime due file a partire dal basso del blocco e le prime due file a partire dall'alto del blocco sono state vincolate rigidamente rispettivamente alla piastra inferiore e alla piastra superiore.

Compilando la card **DEFINE_CURVE* è stata impostata una velocità di traslazione pari ad 1 mm/ms alla piastra in movimento.

È stato definito il **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* che, in fase di post-processing, restituisce l'andamento dello spostamento, della velocità e dell'accelerazione di un nodo scelto sulla piastra in movimento; è stato anche definito il **DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID*, che permette creare un piano su cui visualizzare la risultante delle forze; mentre, compilando la

card `*CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY_ID` è possibile conoscere la forza scambiata tra la piastra e la barriera.

Per la simulazione è stato impostato un ENDTIM (tempo di fine simulazione) pari a 40 ms.

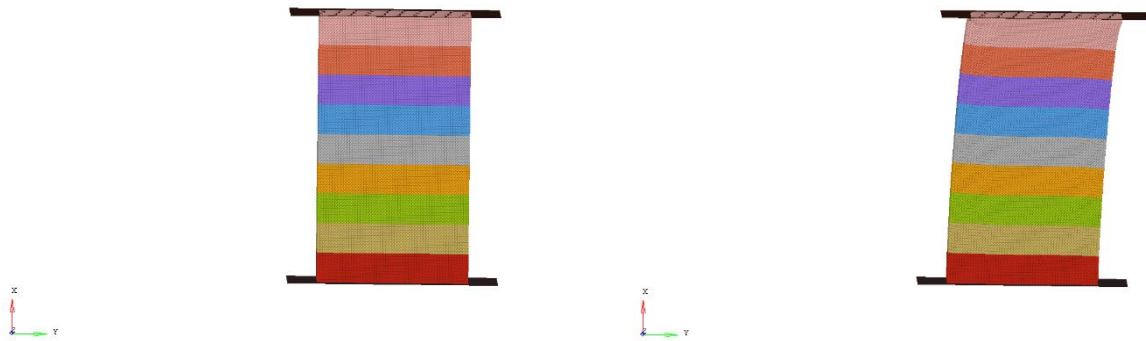


Figura 55: Prova di taglio blocco centrale all'istante $t=0$ ms (sinistra) e a $t=40$ ms (destra).

È stato visualizzato l'andamento della forza risultante sulla `cross_section` e i risultati ottenuti per questa configurazione di prova sono stati, poi, confrontati con i risultati ottenuti ripetendo la stessa prova nelle stesse condizioni per il blocco centrale del modello originale di barriera MPDB.

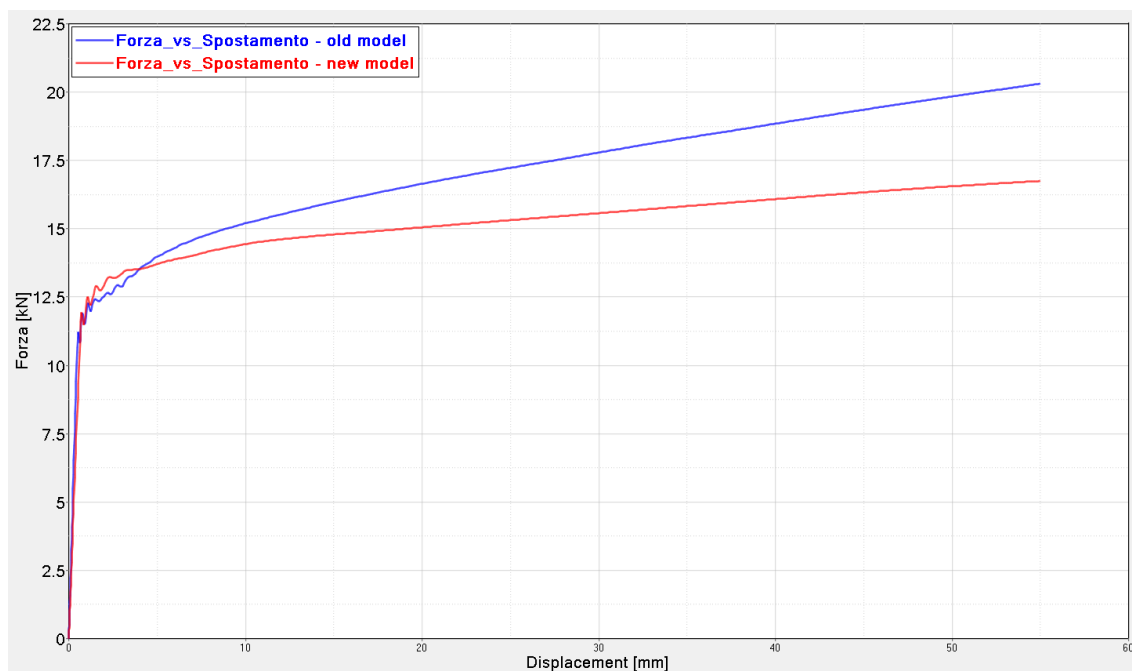


Figura 56: Andamento forza-spostamento per il nuovo modello di blocco centrale (rosso) e per il vecchio modello (blu).

Come si nota dal grafico precedente, la forza risulta essere inizialmente più elevata nel caso del nuovo modello di blocco posteriore (rossa) solo per un breve tratto, poi ritorna ad essere più bassa rispetto a quella del vecchio modello di blocco centrale (blu): questo vuol dire che in generale il nuovo modello di blocco centrale è meno rigido rispetto al vecchio e che quindi, nel caso in cui siano presenti azioni di taglio, è maggiormente soggetto a quelle deformazioni definite di scorrimento.

CAPITOLO 6

Caratterizzazione dinamica

6.1. Implementazione dei singoli blocchi nel modello complessivo

Il test dinamico prevede di testare l'intera barriera, quindi prima di procedere è stato necessario assemblare insieme i diversi blocchi. Al fine di ridurre i tempi e i costi computazionali, non è stato possibile utilizzare i blocchi così come erano stati realizzati in precedenza perché questo avrebbe significato ritrovarsi con un modello avente una quantità di elementi molto più alta rispetto allo standard e gli strumenti di calcolo a disposizione non sarebbero stati in grado di sostenere simulazioni del genere. Quindi, sono state fatte delle scelte che hanno portato a realizzare delle mesh differenti per i diversi blocchi in modo da poter avere in totale un numero di elementi ragionevole per far partire la simulazione.

A questo scopo, per il blocco anteriore (blocco C) è stata realizzata una mesh con due elementi per ogni lato degli honeycomb e sono stati ottenuti, in questo modo, 418 600 elementi.

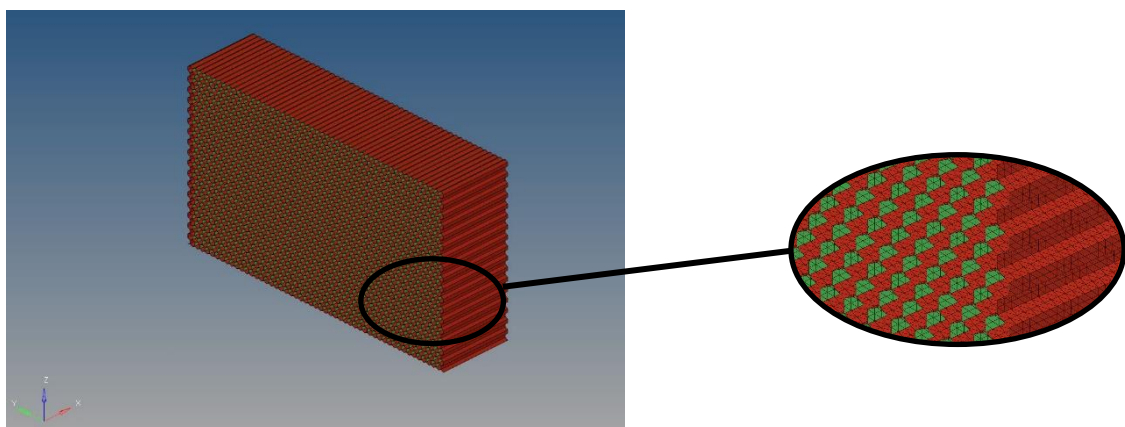


Figura 57: Nuova mesh del blocco anteriore (sinistra) e dettaglio degli honeycom (destra).

Dal momento che la densità della mesh influenza la rigidità del materiale, è stato ritardato lo spessore eseguendo nuovamente la prova di caratterizzazione statica ed è risultato che la configurazione ottimale è quella avente uno spessore pari a 0.058 mm. È stato, quindi,

verificato che anche in questo caso l'andamento della pressione rientrasse all'interno dei corridoi statici definiti in precedenza per il blocco anteriore.

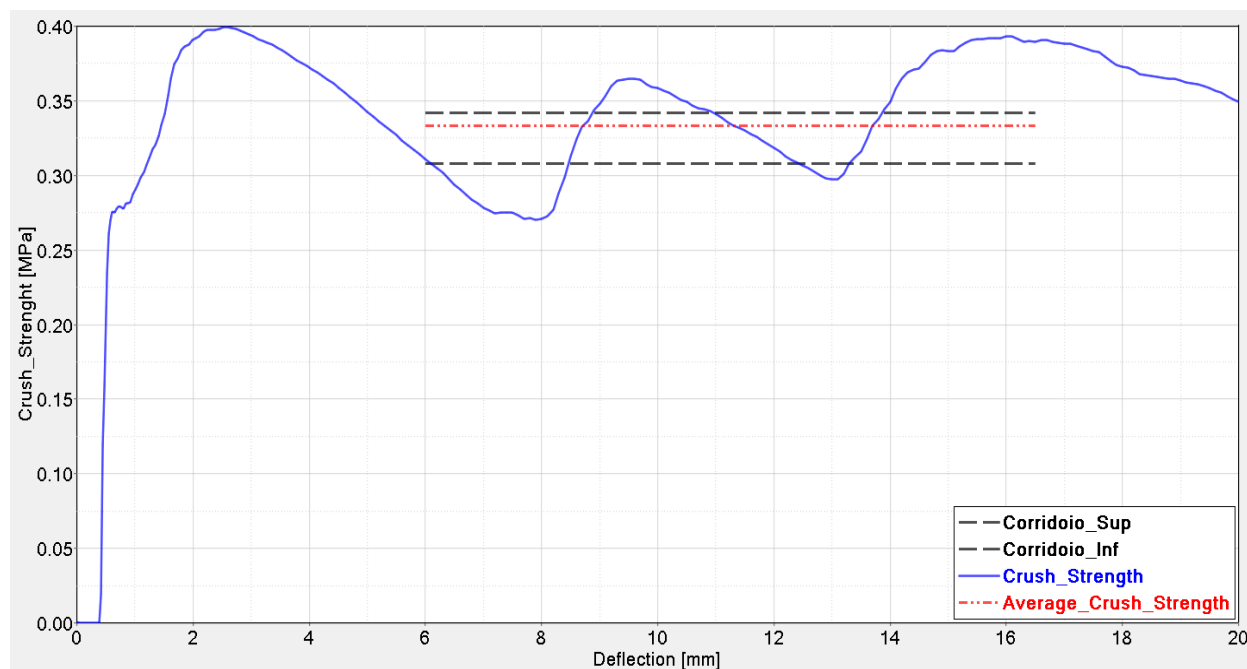


Figura 58: Curva pressione-spostamento per il blocco anteriore con spessore pari a 0.058 mm.

Tutto ciò che succede prima di 6 mm e dopo 16.5 mm viene trascurato e, anche in questo caso, per giustificare la scelta dello spessore pari a 0.058 mm e per dimostrare che la curva rientra effettivamente all'interno dei corridoi statici, è stata calcolata la pressione media come descritto nella norma:

$$\bar{p} = \frac{\int_6^{16.5} p(s) ds}{(16.5 - 6)}$$

dove $\bar{p}$ rappresenta la pressione media, $p(s)$ rappresenta la pressione in funzione dello spostamento e 16.5 e 6 sono gli estremi dell'intervallo di interesse.

Per quanto riguarda il blocco centrale (blocco B), dal momento che la mesh descritta in precedenza era già abbastanza rada, poiché caratterizzata dalla presenza di un elemento per lato, nell'assemblaggio del modello di barriera completa, è stata mantenuta la configurazione utilizzata per realizzare la prova di compressione statica: è stato, quindi, mantenuto uno spessore THICK1 pari a 0.09 mm e un coefficiente di riduzione dello spessore pari a 0.926.

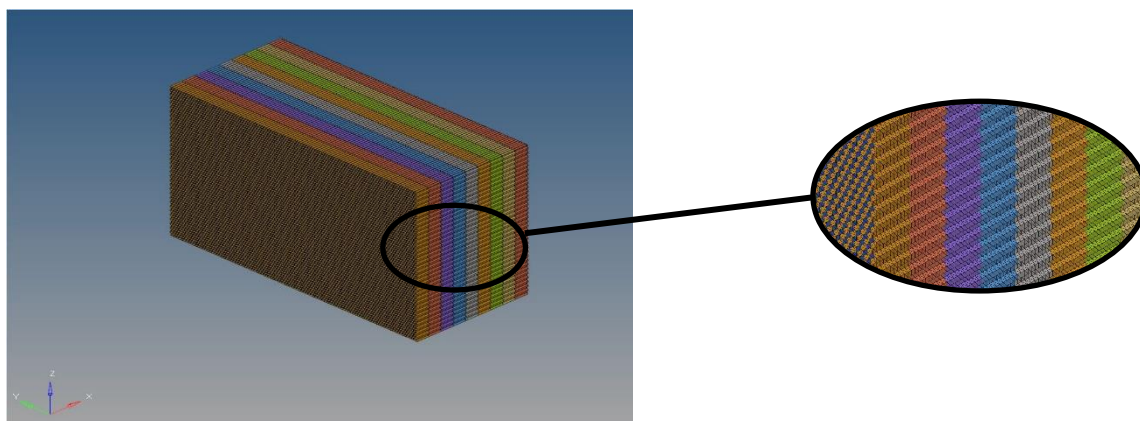


Figura 59: Mesh del blocco centrale (sinistra) e dettaglio degli honeycomb (destra).

Infine, per il blocco posteriore (blocco A) sono state fatte delle scelte diverse. È stato notato che, poiché la mesh che consentiva di rientrare all'interno dei corridoi statici era caratterizzata dalla presenza di due elementi per lato e che il blocco posteriore è quello che ha le celle delle dimensioni più piccole, andando a ricostruire l'intero blocco C, questo avrebbe presentato circa 9 milioni di elementi e ciò sarebbe stato insostenibile dal punto di vista computazionale. Quindi, considerando che il blocco posteriore è quello che influisce di meno in quanto in nessun test, teoricamente, si dovrebbe arrivare a schiacciarlo, si è preferito utilizzare delle celle con delle dimensioni maggiori rispetto a quelle effettive. Per questo motivo, è stata utilizzata una cella con le stesse dimensioni e la stessa mesh di quelle che caratterizzano il blocco B: quindi una dimensione delle celle pari a 9.5 mm ed una mesh con un elementi per lato.

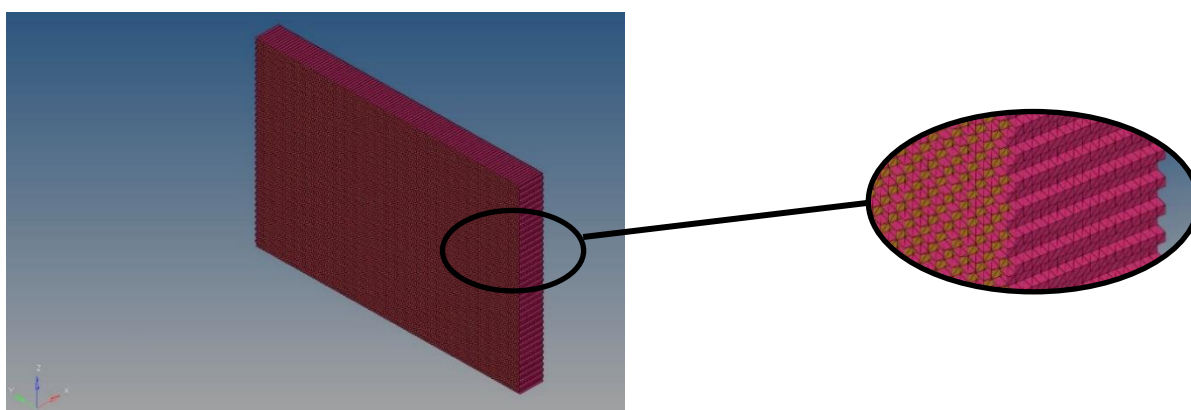


Figura 60: Nuova mesh del blocco posteriore (sinistra) e dettaglio degli honeycomb (destra).

A questo punto, il passo successivo è stato quello di ritardare il blocco A in modo da far rientrare l'andamento della pressione nei corridoi statici. Anche in questo caso è stata calcolata la pressione media

$$\bar{p} = \frac{\int_6^{16.5} p(s)}{(16.5 - 6)}$$

dove $\bar{p}$ rappresenta la pressione media, $p(s)$ rappresenta la pressione in funzione dello spostamento e 16.5 e 6 sono gli estremi dell'intervallo di interesse.

Come si può notare dai grafici seguenti, la soluzione migliore si è ottenuta con uno spessore pari a 0.13 mm, infatti in tal caso la curva media rientra perfettamente all'interno dei corridoi statici; dal momento, però, che, come detto in precedenza, tale blocco è quello che non dovrebbe mai essere schiacciato durante una prova di crash test, si è preferito realizzare il blocco leggermente più rigido e, per mettersi in sicurezza, si è scelto uno spessore leggermente più alto rispetto a quello ottimale, quindi la scelta è ricaduta su uno spessore di 0.15 mm.

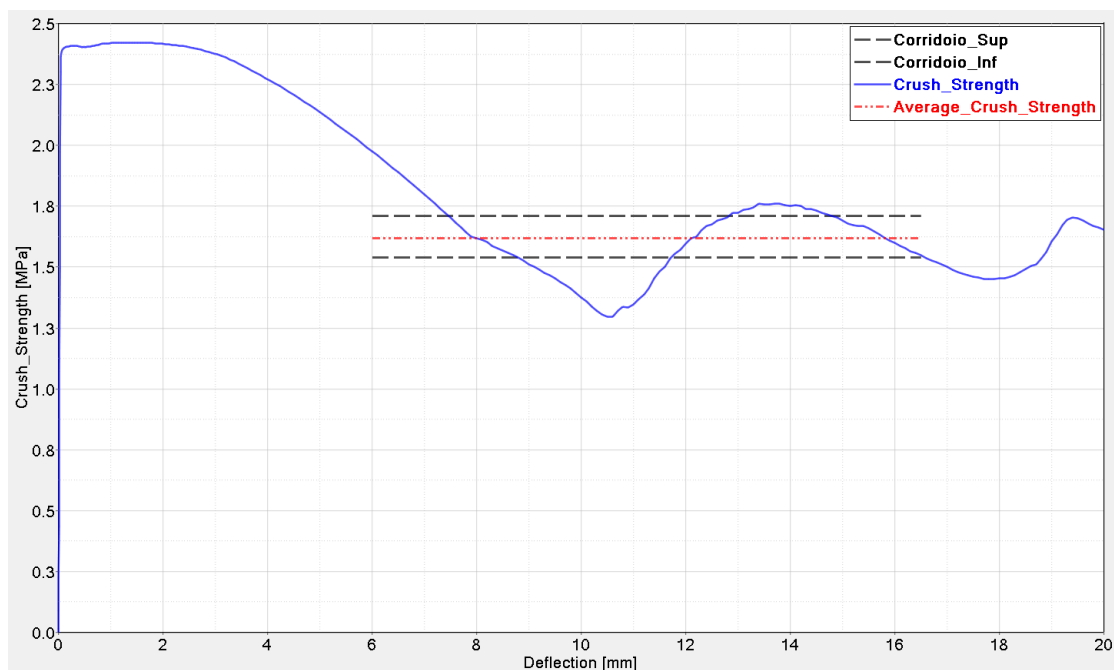


Figura 61: Andamento forza-spostamento con uno spessore del blocco posteriore pari a 0.13 mm.

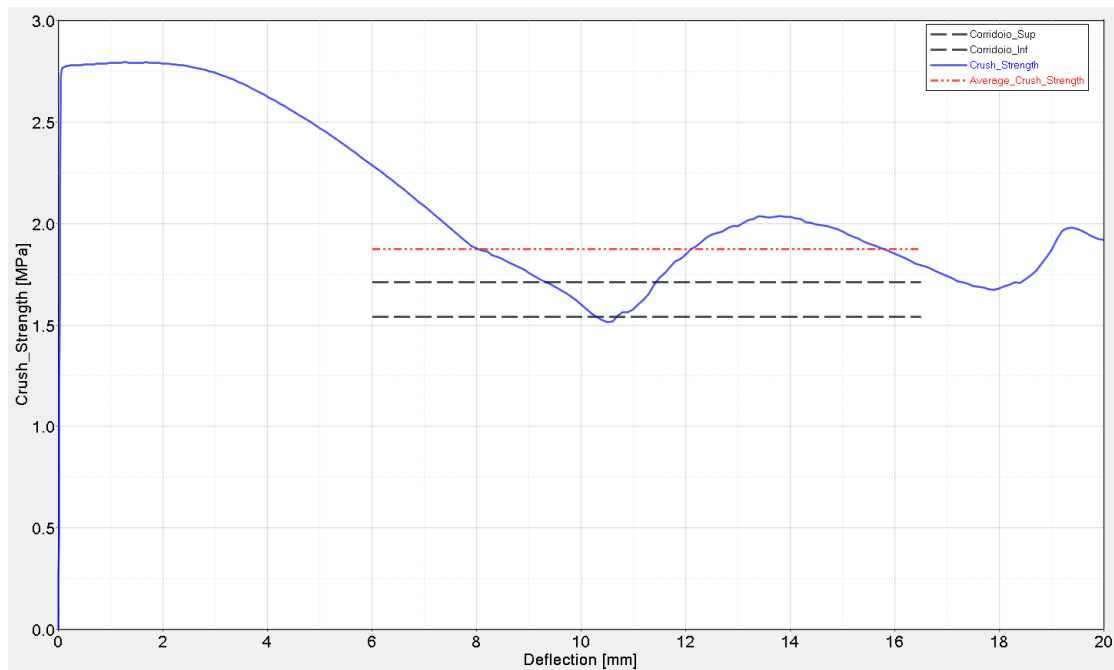


Figura 62: Andamento forza-spostamento con uno spessore del blocco posteriore pari a 0.15 mm.

In questo modo, è stata ottenuta la configurazione finale dei singoli blocchi, i quali sono ora pronti per essere assemblati in modo tale da ottenere il modello completo della barriera.

6.2. Modello complessivo

Una volta ottenute le configurazioni finali dei singoli blocchi, è stato possibile assemblare l'intera barriera. Per quanto riguarda, invece, il modello FEM dell'impattore tubolare e del trolley è stato utilizzato quello già in dotazione presso la divisione Safety Virtual Analysis.

Il primo passo è stato quello di importare i tre blocchi, blocco anteriore, blocco centrale e blocco posteriore, nel modello contenente il trolley e l'impattore tubolare già fissato sul trolley stesso.

Dopo aver importato i blocchi, sono state realizzate le due piastre intermedie poste all'inizio e alla fine del blocco centrale, la piastra di contatto posta prima del blocco anteriore, la piastra posteriore posta dopo il blocco posteriore e la copertura che ricopre l'intera barriera. Alla piastra posteriore viene associato un materiale deformabile, **MAT_24*, con le proprietà dell'alluminio, mentre ai restanti componenti viene associato un altro materiale anch'esso

deformabile e con le proprietà dell'alluminio, **MAT_81*. Per entrambi questi materiali vengono definite le proprietà meccaniche, vale a dire densità ρ , modulo elastico E e coefficiente di Poisson ν . Una volta compilate la card *Mat*, è stata compilata la card delle *Prop* (vengono assegnate le stesse proprietà a tutti e quattro i componenti sopra citati) in cui sono stati definiti il tipo di elemento e la formulazione utilizzata: essendo l'elemento bidimensionale viene definita la *Prop *SECTION_SHELL*. La formulazione implementata è la *fully integrated* che limita il fenomeno dell'hourglass (legato alle deformazioni ad energia nulla) e viene indicata con il numero 2.

A questo punto è necessario ottenere le seguenti saldature:

- Faccia anteriore della copertura – piastra di contatto
- Blocco anteriore – piastra di contatto
- Blocco anteriore – prima piastra intermedia
- Blocco centrale – prima piastra intermedia
- Blocco centrale – seconda piastra intermedia
- Blocco posteriore – seconda piastra intermedia
- Blocco posteriore – piastra posteriore

A tale scopo è stata utilizzata la card **CONTACT_TIED_SHELL_EDGE_TO_SURFACE* che permette di simulare una saldatura in maniera complessa in modo da avvicinarsi il più possibile alla realtà fisica. Tale card richiede di definire un set di nodi e un set di parti contenenti nello specifico rispettivamente:

- Set di nodi: nodi della faccia anteriore della copertura, prima e ultima fila di nodi del blocco anteriore, prima e ultima fila di nodi del blocco centrale e prima e ultima fila di nodi del blocco posteriore
- Set di parti: piastra di contatto, piastre intermedie e piastra posteriore.

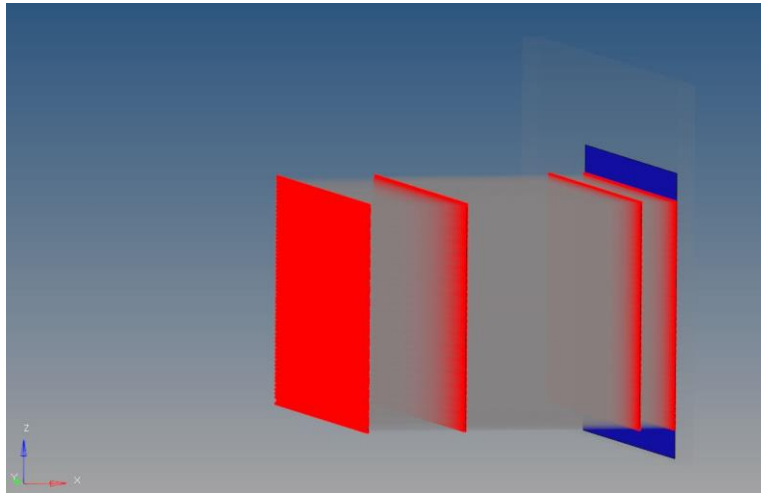


Figura 63: Contact tied in HyperMesh.

A questo punto, è stato necessario fissare la barriera alla parete rigida: a tal fine i nodi della flangia superiore e inferiore della copertura sono stati vincolati alla parete fissa attraverso la definizione degli extra nodes. Sono stati, quindi, definiti i gradi di libertà della parete rigida: al corpo rigido è stata impedita la traslazione lungo i tre assi e la rotazione attorno ai tre assi.

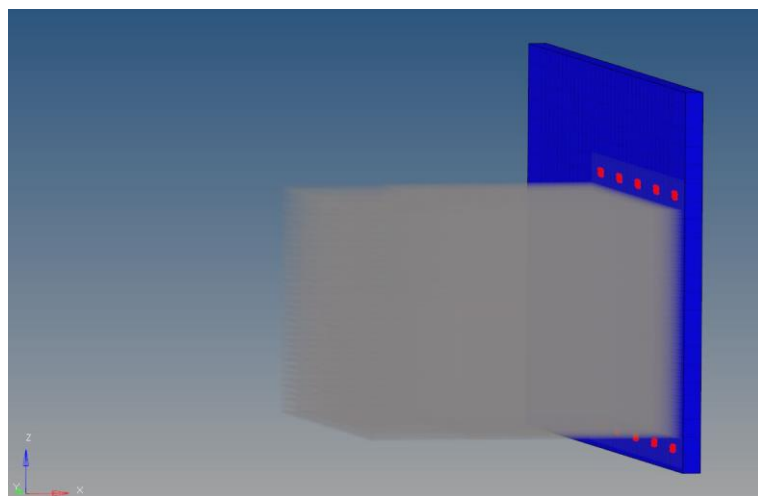


Figura 64: Extra nodes barriera-parete rigida.

Per conoscere la forza scambiata tra la barriera e l'impattore tubolare è stata utilizzata la card **CONTACT_FORCE_TRANSDUCER_PENALTY* e sono state realizzate delle sezioni trasversali in modo da poter visualizzare la risultante delle forze prodotte durante lo schiacciamento della barriera. Tali *cross section* sono state posizionate una a 3 mm dalla fine del blocco anteriore, una a 3 mm dalla fine del blocco centrale e l'ultima a 3 mm dalla fine del blocco posteriore.

Infine, è stato definito il baricentro del trolley: deve essere situato nel piano verticale longitudinale mediano entro 10 mm, 1000 ± 30 mm dietro l'asse frontale e a 500 ± 30 mm dal suolo. Inoltre, la distanza tra la faccia anteriore dell'impattore e il centro di gravità deve essere pari a 2290 ± 30 mm.

Essendo il trolley un corpo rigido ed essendo il baricentro esterno ad esso, è necessario vincolarlo rigidamente al trolley stesso: a tale scopo si definisce un ulteriore **CONSTRAINED_EXTRA_NODES* con cui si associa il nodo in questione (il nodo del baricentro) alla parte che in questo caso è definita dal *Comp* del trolley. Per visualizzare in fase di post-processing l'andamento dello spostamento, della velocità e dell'accelerazione è stato definito il **DATABASE_HISTORY_NODE_ID* prendendo, appunto, in considerazione il nodo del baricentro del trolley.

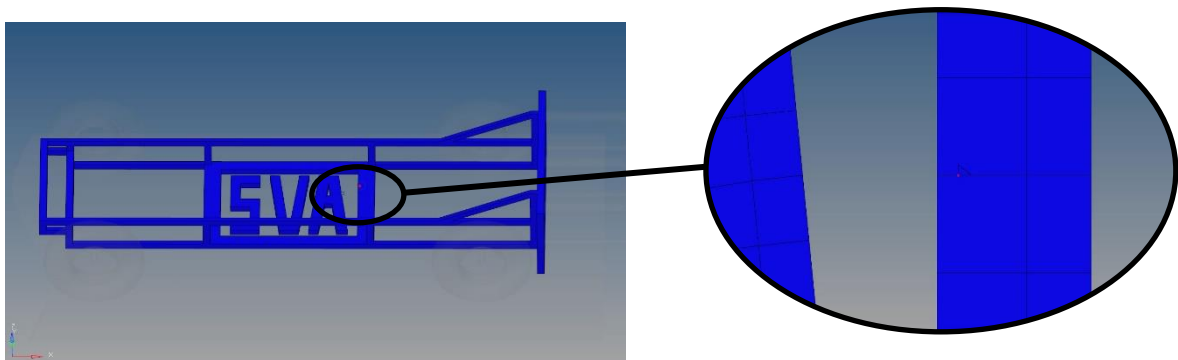


Figura 505: Constrained Extra Nodes per il baricentro del trolley.

In questo modo si è ottenuto il modello completo della barriera MPDB costituito da un numero totale di elementi pari a 5 807 093 e un numero totale di nodi pari a 2 130 708.

Prima di effettuare la prova dinamica, è stato necessario assegnare una velocità iniziale sia al trolley che all'impattore. Volendo assegnare le proprietà inerziali iniziali al trolley è stato definito il pacchetto di card **PART_INERTIA*:

```
*PART_INERTIA
$HWCOLOR COMPS 5000001 56
carriage
5000001 5000001 5000001 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 1192.42 1 5000546
2.2630E+09-82.125046 0.0508000000. 0.02.5720E+09
16.666668 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 5000000
```

Figura 66: Definizione della keyword **PART_INERTIA*.

- Nella prima card si associa il *Comp* (con id 5000001) al materiale e alla proprietà corrispondenti (entrambe con id 5000001);
- Nella seconda card viene definita, al quarto campo, la massa del trolley pari a 1192.42 kg. Nell'ultimo campo viene definito il centro di massa (nodo 5000546).
- Nella quarta card al primo campo viene definito il valore di velocità iniziale lungo x.
- Nella quinta card HyperMesh crea un sistema di riferimento solidale con il componente 5000000, ovvero il pavimento).

La stessa velocità iniziale deve essere impostata anche per il componente contenente l'impatto tubolare e per far ciò è stata definita la card **INITIAL_VELOCITY*:

```
*INITIAL_VELOCITY
$HMNAME LOADCOLS      1InitialVel_1
$HWCOLOR LOADCOLS      1      3
      5000000          0          0          0          0
      16.666668        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
```

Figura 67: Definizione della keyword **INITIAL_VELOCITY*.

- Nella prima card viene definito il set a cui viene impostata la velocità iniziale: si tratta di un set di nodi che contiene i nodi del trolley e dell'impatto
- Nella seconda card viene definito il valore di velocità iniziale pari a 16.67 m/s.

6.3. Descrizione prova dinamica

Il test dinamico viene eseguito concordemente a quanto descritto dal protocollo EuNCAP che prevede un impatto frontale tra l'impatto viaggiante ad una velocità di 60 ± 1 km/h (16.67 m/s) e la barriera deformabile MPDB che, come descritto in precedenza, è stata montata su una parete fissa. Tra l'impatto tubolare e la parte destra della barriera deve esserci un overlap pari all'80% della lunghezza dell'intera barriera, vale a dire 800 mm, lungo l'asse y. L'impatto tubolare viene posto ad una distanza dalla barriera, lungo l'asse x, pari a 4 mm. Inoltre, l'angolo tra l'asse longitudinale della parete rigida e la direzione del moto del trolley deve essere pari a $0^\circ \pm 2^\circ$.

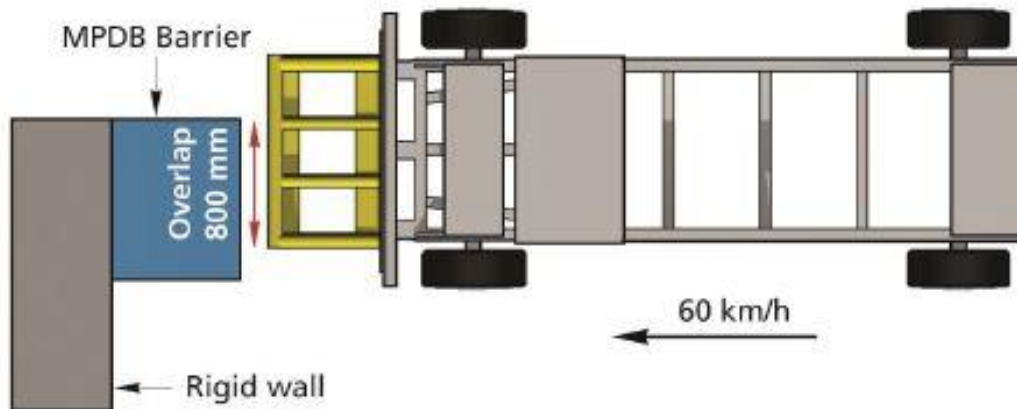


Figura 68: Configurazione finale per la prova dinamica [19].

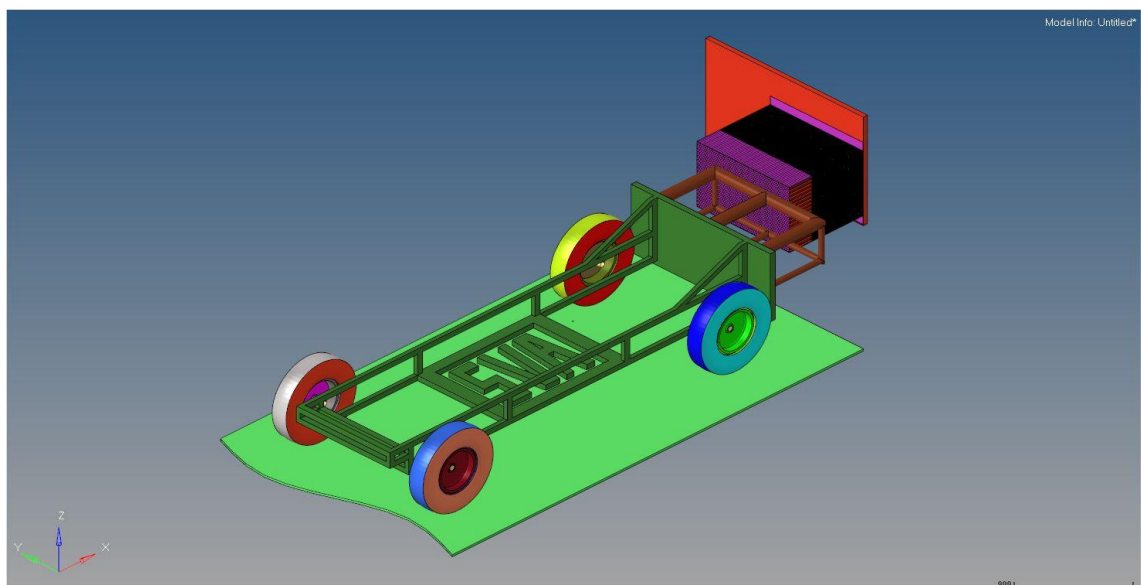


Figura 69: Modello FEM della configurazione finale per la prova dinamica.

A questo punto è stato possibile avviare la simulazione ed è stato impostato un *ENDTIM* (ovvero un tempo di fine simulazione) pari ad 80 ms. Nella Figura 70 vengono riportati i fotogrammi della prova dinamica ad istanti differenti, ovvero ad intervalli regolari di 20 ms a partire da 0 ms fino ad 80 ms.

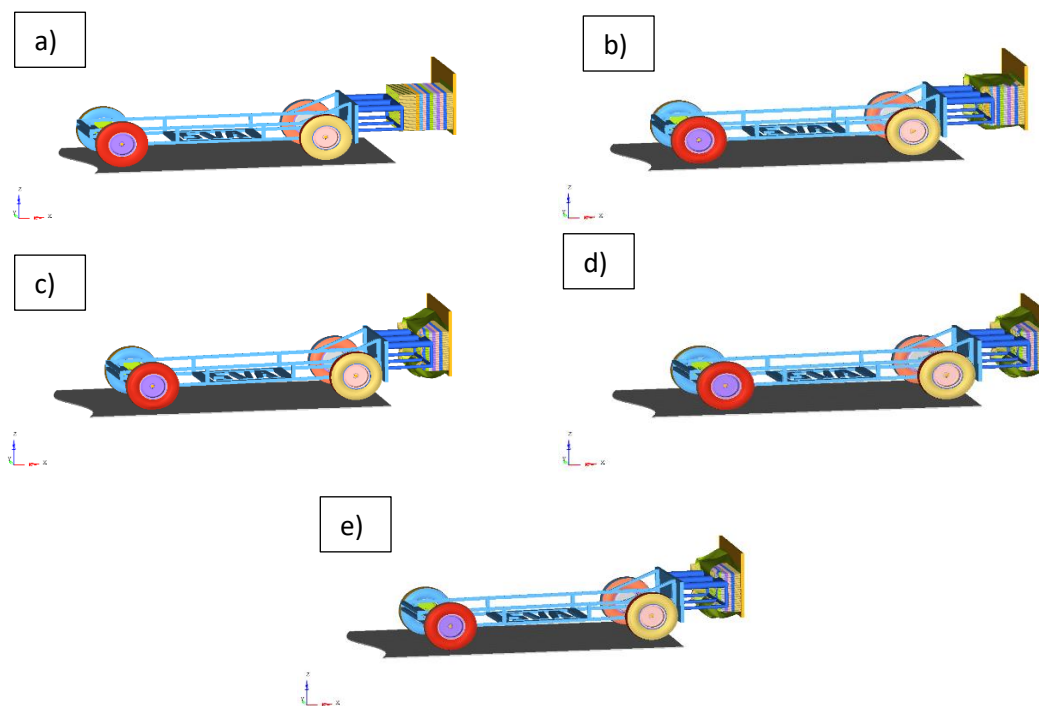


Figura 70: Prova dinamica all'istante $t = 0 \text{ ms}$ (a), $t = 20 \text{ ms}$ (b), $t = 40 \text{ ms}$ (c), $t = 60 \text{ ms}$ (d), $t = 80 \text{ ms}$ (e).

In figura 71 viene riportato in dettaglio la vista laterale con la sola barriera l'impattore tubolare; i fotogrammi sono stati acquisiti agli stessi istanti di tempo dei precedenti.

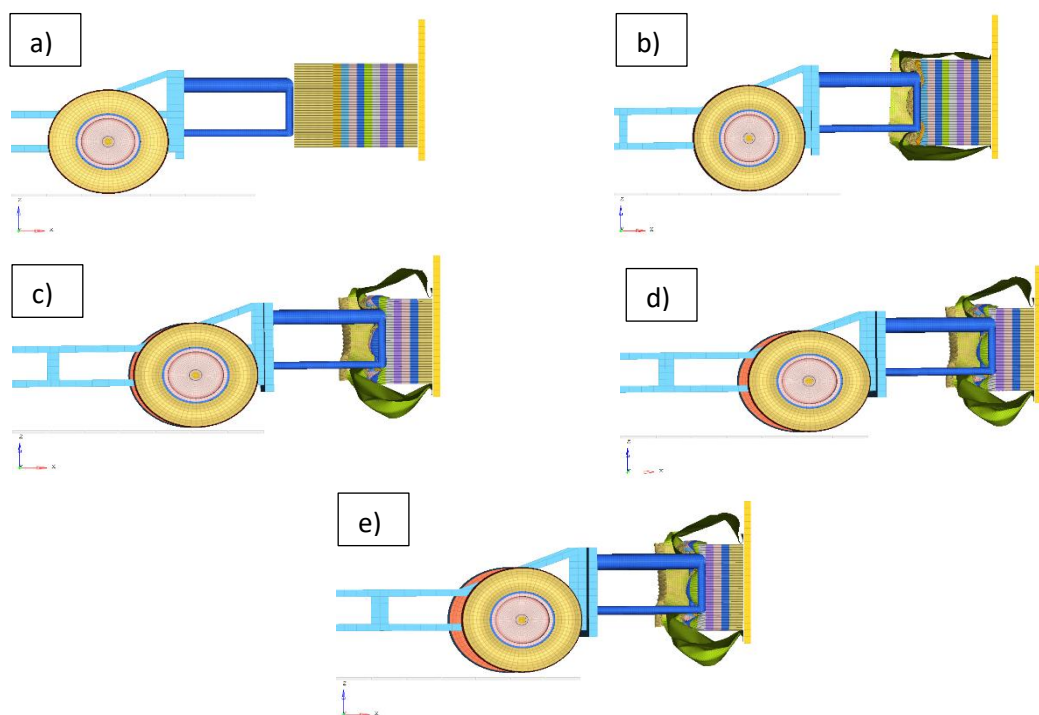


Figura 71: Dettaglio della vista laterale della prova dinamica all'istante $t=0 \text{ ms}$ (a), $t=20 \text{ ms}$ (b), $t=40 \text{ ms}$ (c), $t=60 \text{ ms}$ (d), $t=80 \text{ ms}$ (e).

Affinché la validazione abbia esito positivo, è necessario che la curva forza-spostamento della barriera testata rientri all'interno dei corridoi di forza mostrati in Figura 68:

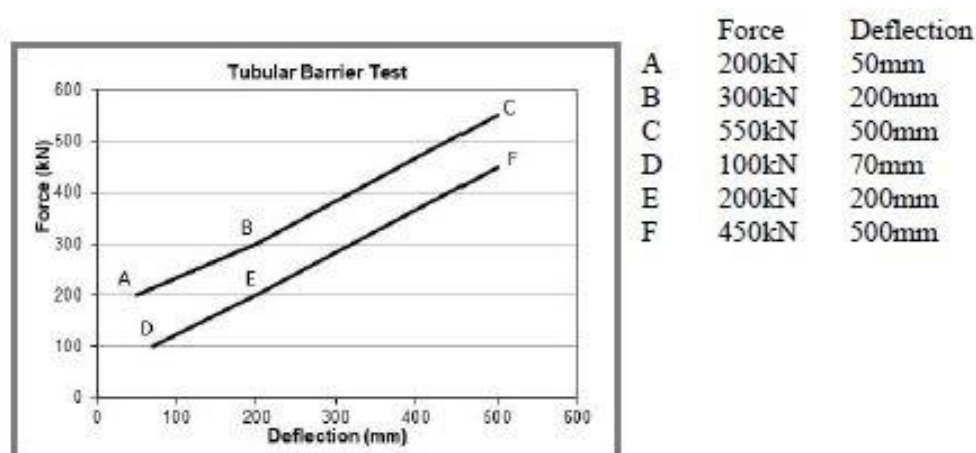


Figura 72: Corridoi dinamici [19].

6.4. Risultati

Una delle prime operazioni da eseguire nel momento in cui viene effettuato il post-processing, proprio come è stato fatto nella fase di caratterizzazione statica, consiste nel controllare la validità dei risultati forniti dal solutore. La verifica consiste nell'andare ad analizzare il bilancio energetico che descrive l'evoluzione temporale dei diversi termini energetici. Di tutti i termini che possono essere rappresentati, quelli su cui bisogna focalizzare maggiormente l'attenzione sono tre:

- Energia cinetica,
- Energia interna,
- Energia totale.

Affinché i risultati siano compatibili con la fisica del sistema, deve essere rispettato il principio della conservazione dell'energia: l'energia può trasformarsi in forme differenti ma il suo apporto totale in un sistema isolato non deve mutare nel tempo. Effettivamente, questo lo si nota nel grafico in Figura 73: l'energia totale rimane, infatti, costante per tutta la durata temporale entro la quale si sviluppa il fenomeno (le piccole oscillazioni iniziali sono dovute al contributo di altri termini energetici che sono secondari al fine dell'analisi). All'interno di tale intervallo, però, cambiano le singole componenti: in particolare si nota un decremento dell'energia cinetica in seguito all'urto con la barriera che frena l'impattore e la maggior parte

di energia cinetica dissipata viene trasferita all'impattore il quale aumenta la sua energia interna. Nel punto di massimo affondamento (che si verifica a 55 ms) l'impattore porta al minimo la sua componente di energia cinetica.

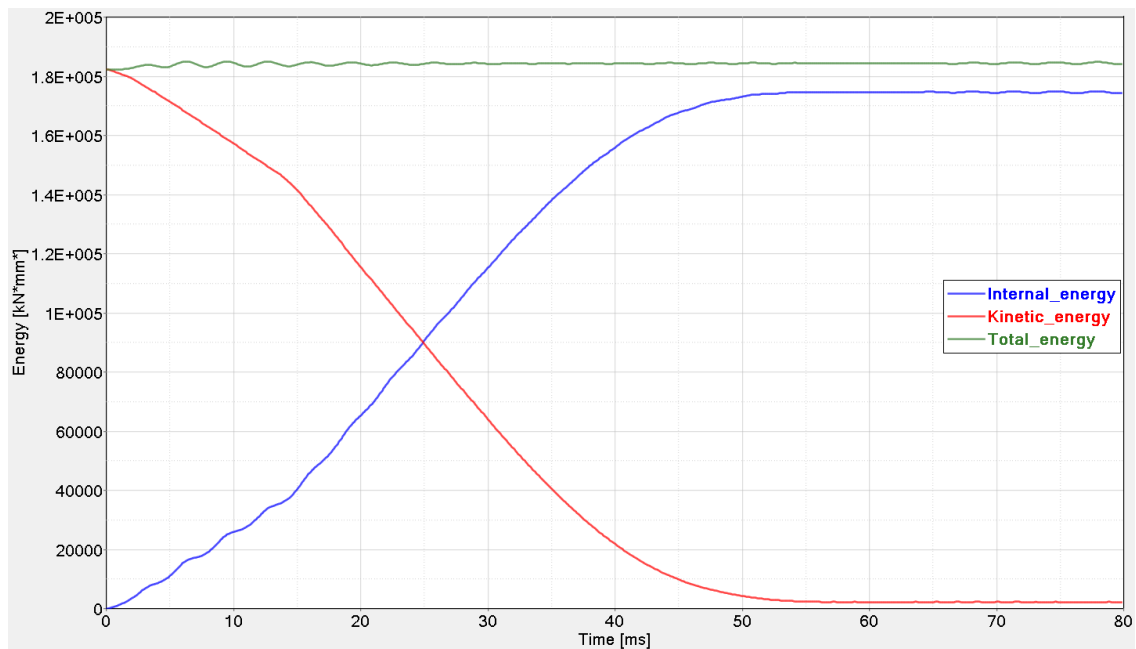


Figura 73: Bilancio energetico del modello con impattore.

In una fase successiva del post-processing è stato visualizzato l'andamento di velocità, accelerazione e spostamento del centro di massa del trolley.

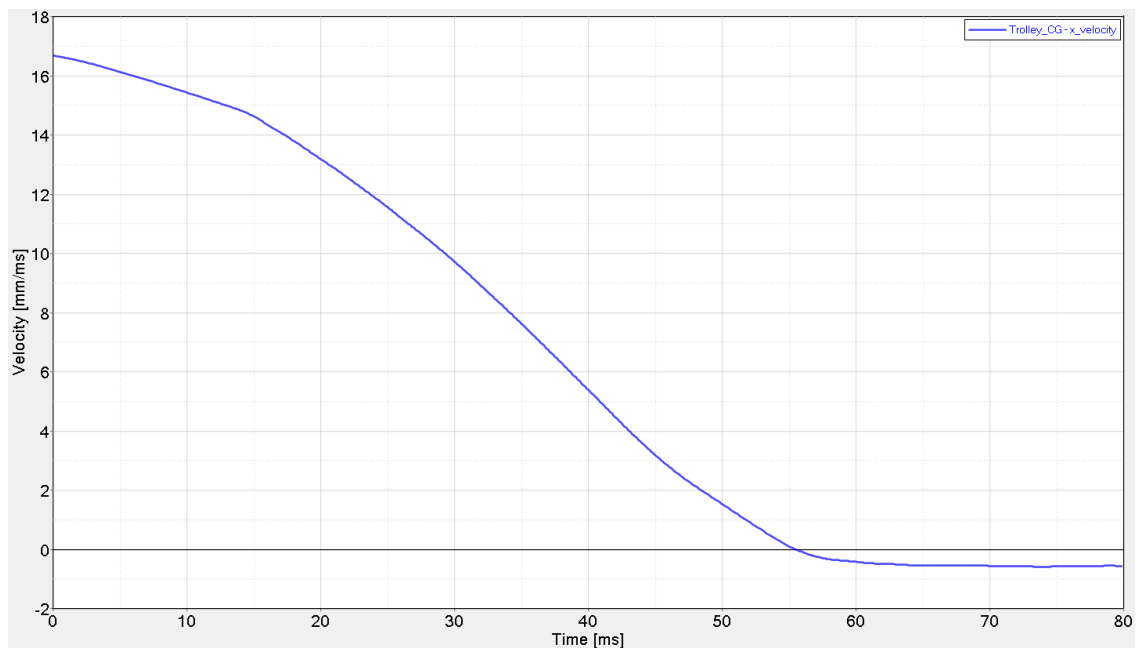


Figura 74: Andamento della velocità del COG del trolley.

Dalla velocità è stata calcolata, per derivazione, l'accelerazione del centro di massa del carrello ed è stata filtrata con un filtro passa-basso con CFC (Channel Frequency Class) di 60. Bisogna specificare che, al momento dell'impatto, la velocità inizia a decrescere pertanto i valori di accelerazione sono negativi, quindi, ad onor del vero, ciò che viene descritto è una decelerazione.

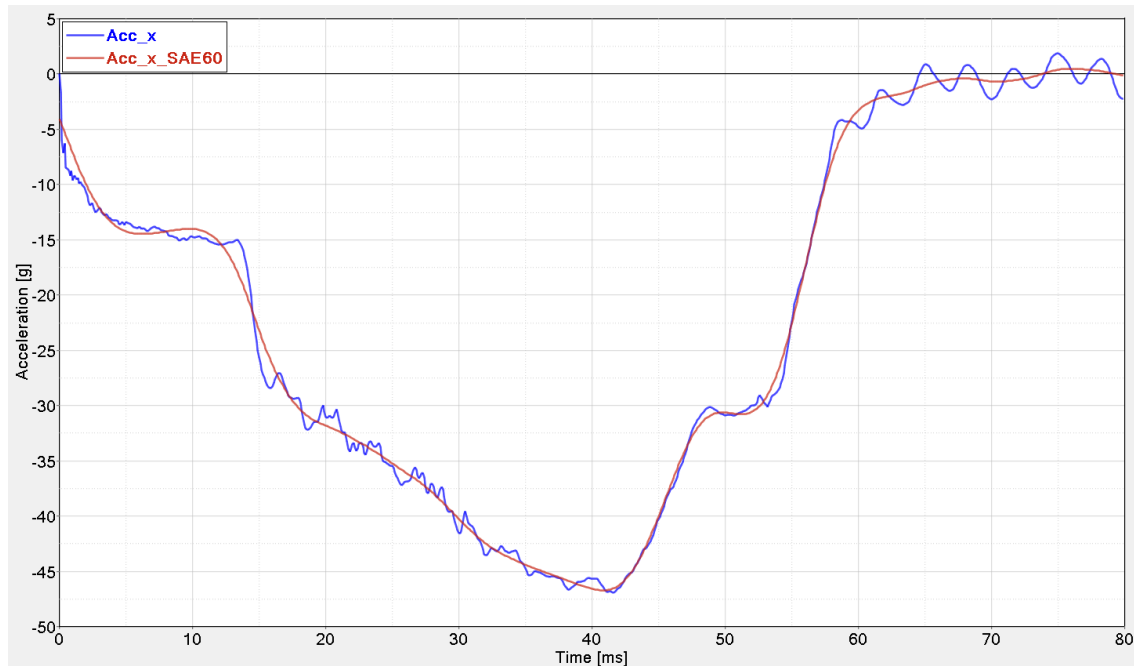


Figura 75: Accelerazione reale dell'impattore tubolare (blu) e filtrata (rossa).

Secondo quanto indicato nel protocollo, dalla curva della decelerazione, per integrazione, è stato, poi, calcolato l'andamento dello spostamento del COG del carrello.

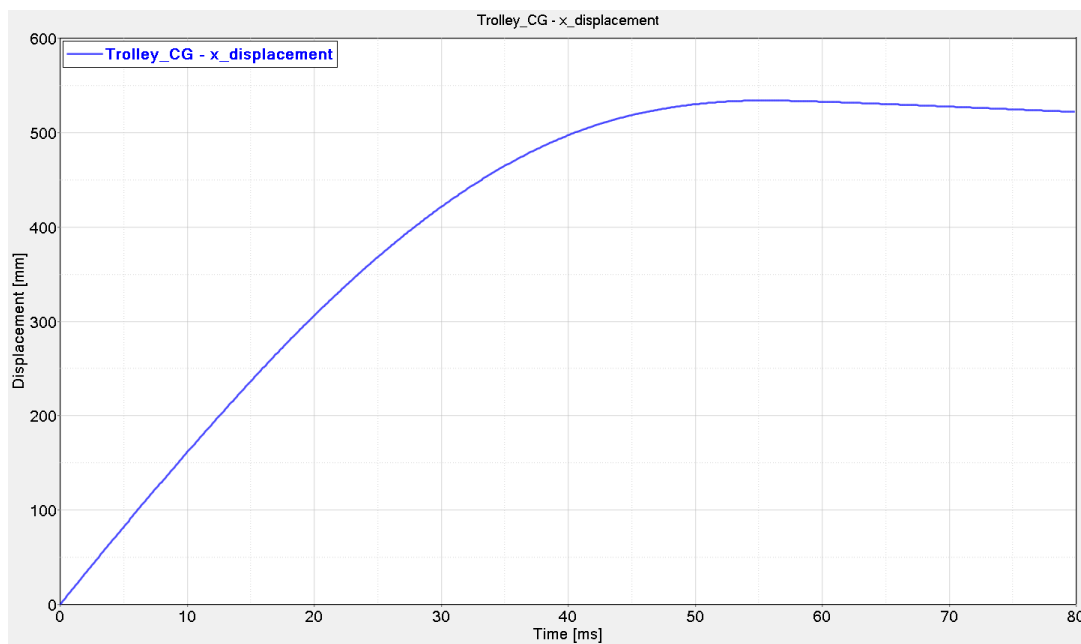


Figura 76: Andamento dello spostamento del COG del trolley.

Confrontando i tre grafici precedenti si nota che il massimo affondamento dell'impattore tubolare nella barriera deformabile MPDB avviene dopo uno tempo di 55 ms ed è pari a 533.97 mm; a tali coordinate corrisponde una velocità nulla e, dopo, tale istante si hanno dei valori di velocità negativi in quanto si verifica una fase di rilascio, ovvero vi è un leggero distacco dell'impattore tubolare dalla barriera.

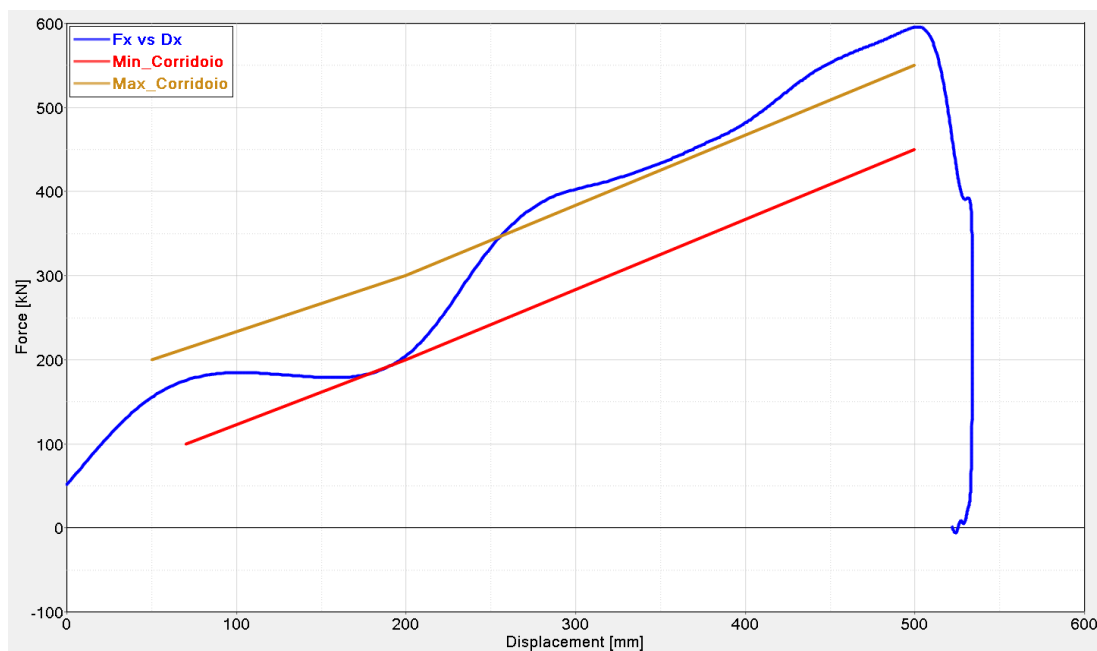


Figura 77: Andamento forza-spostamento test-dinamico.

Come si vede dal grafico in figura precedente, il profilo della forza rientra in modo soddisfacente all'interno dei corridoi nella prima parte della prova dinamica, mentre a partire da uno spostamento pari a 300 mm è leggermente al di sopra di essi: questo rappresenta comunque un buon risultato, in quanto la prima parte è quella di maggior interesse, mentre quello che succede nella seconda parte lascia spazio a possibili future e differenti implementazioni di criteri di rottura sugli honeycomb più interni della barriera.

CAPITOLO 7

Simulazioni numeriche e prove sperimentali full scale

7.1. Modello FEM full scale

Per simulare la prova full scale è stato necessario inserire il modello FEM completo della barriera, descritto nei capitoli precedenti, in un modello del veicolo intero (si tratta di un modello di veicolo in via di sviluppo in dotazione presso la divisione Safety Virtual Analysis). A tale scopo è stato indispensabile rinumerare tutte le parti che lo costituiscono in modo da avere ID differenti rispetto a tutte le altre già presenti nel modello del veicolo.

Inoltre, in questo caso, la barriera è stata fissata saldamente non su una parete rigida, ma su un trolley che in movimento.

La tipologia di prova simula un urto frontale tra il veicolo e la barriera mobile deformabile con un overlap tra i due pari al 50% della larghezza del veicolo (lato sinistro). Il veicolo e il carrello viaggiano alla stessa velocità di 50 km/h (13.89 m/s): il carrello si muove lungo la direzione x positiva, mentre il veicolo viaggia lungo la direzione x negativa.

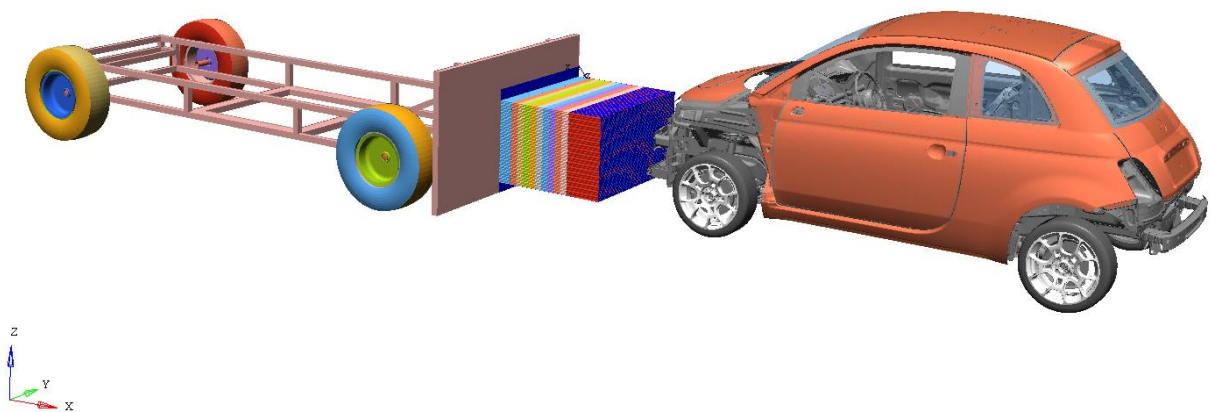


Figura 78: Modello full scale.

7.2. Confronto con il modello di riferimento e correlazione numerico sperimentale

Nel grafico seguente viene riportato un confronto tra i risultati ottenuti con il nuovo modello di barriera MPDB, quelli ottenuti con il modello di riferimento e quelli ottenuti in una prova sperimentale, tutte effettuate nelle stesse condizioni. Per eseguire tale analisi, vengono riportate le accelerazioni ottenute nei tre diversi casi relative sia al veicolo sia al trolley.

Per quanto riguarda le accelerazioni delle prove numeriche, queste vengono ottenute nella fase di post-processing utilizzando il software HyperWorks e derivando nel tempo l'andamento della velocità: l'accelerazione così ottenuta viene, poi, filtrata attraverso un filtro passa basso con CFC (Channel Frequency Class) di 60.

Per quanto riguarda, invece, l'accelerazione relativa alla prova sperimentale, è necessario specificare che, durante i crash test, le vetture sono allestite con diversi sensori e strumenti in grado di acquisire dati ad alta velocità e tra questi vi sono vari accelerometri. Grazie all'accelerometro posizionato sul longherone laterale dal lato dell'urto, è possibile conoscere l'andamento dell'accelerazione relativa al veicolo; grazie, invece, all'accelerometro posizionato al centro del trolley è possibile conoscere la sua accelerazione. Anche in questo caso, le accelerazioni in uscita dagli accelerometri vengono filtrate attraverso un filtro passa basso con CFC di 60.

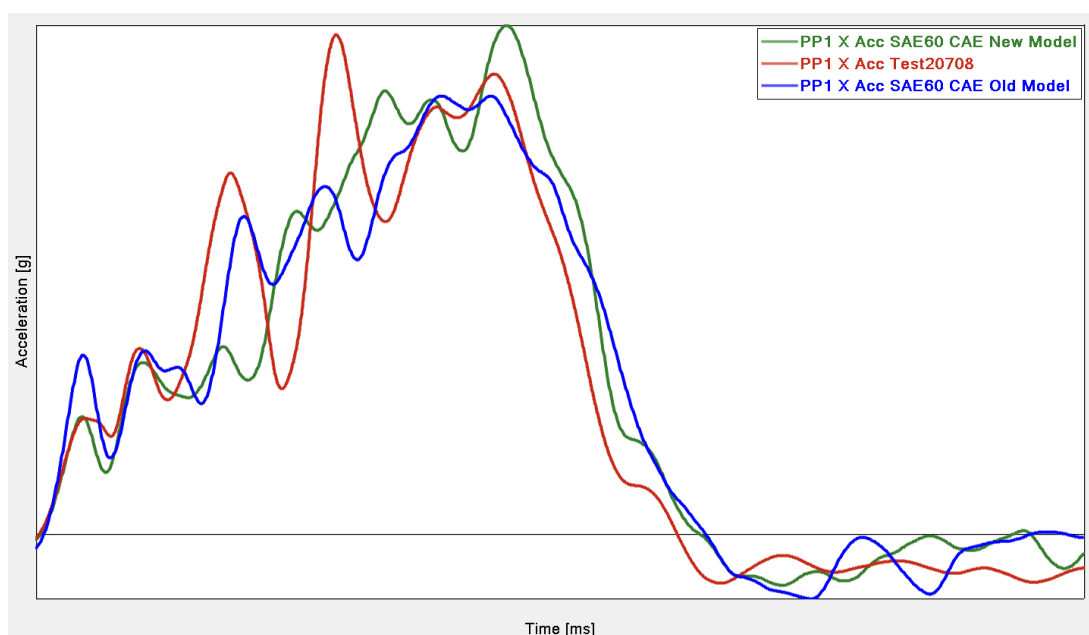


Figura 51: Andamento accelerazione del veicolo nella prova numerica con il vecchio modello (blu), con il nuovo modello (verde) e nella prova sperimentale (rosso).

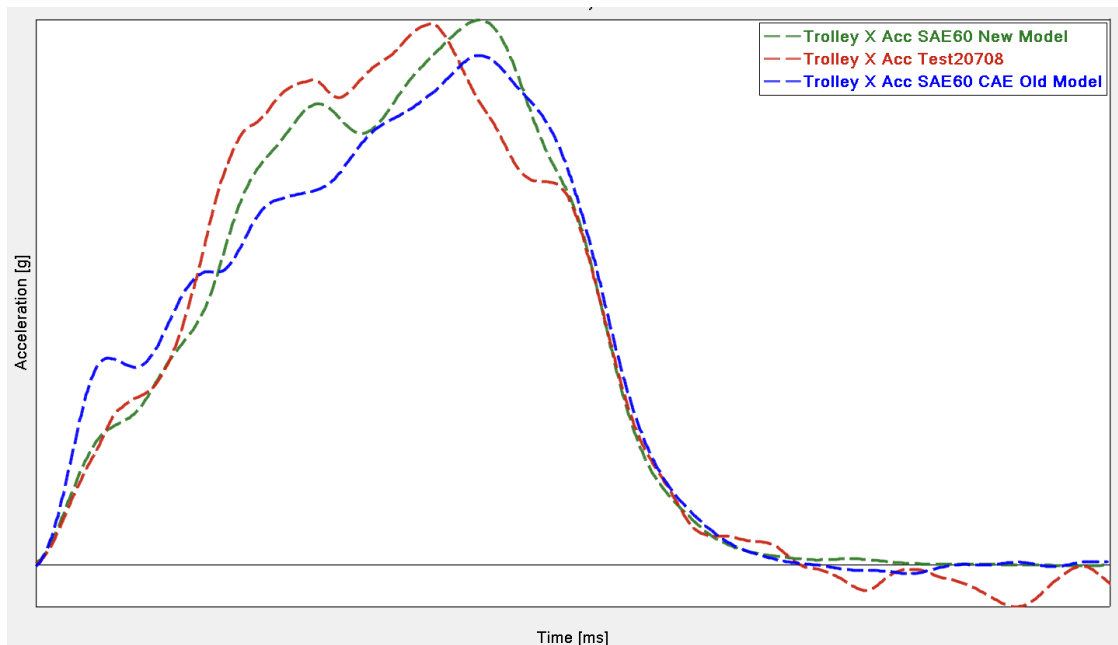


Figura 52: Andamento accelerazione del trolley nella prova numerica con il vecchio modello (blu), con il nuovo modello (verde) e nella prova sperimentale (rosso).

Nel caso del veicolo non si hanno dei miglioramenti apprezzabili, ma come si nota dal grafico in Figura 79 il primo picco di accelerazione nel caso della prova sperimentale (curva rossa) è meglio approssimato dalla curva relativa alla prova effettuata con il nuovo modello di barriera MPDB (curva verde); i picchi nell'intervallo di tempo tra 55 ms e 60 ms vengono meglio approssimati dalla curva relativa alla prova effettuata con il vecchio modello di barriera MPDB. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che, nella seconda parte del test dinamico, come si è già visto, la curva si manteneva leggermente al di sopra dei corridoi e che quindi potrebbero esserci delle implementazioni differenti dei criteri di rottura delle celle interne della barriera.

Nel caso del trolley (Figura 80) è evidente un netto miglioramento nell'andamento dell'accelerazione e la curva relativa alla prova numerica effettuata con il nuovo modello di barriera approssima meglio la curva relativa alla prova sperimentale rispetto a quanto accade con il vecchio modello di barriera.

7.3 Occupant Load Criterion (OLC)

La caratterizzazione della gravità del crash test può essere valutata con diversi criteri, uno di questi è l'OLC (Occupant Load Criterion) che si basa sulla misurazione della forza di ritenuta che viene applicata al torace dell'occupante. Questo criterio si basa su una singola massa che rappresenta l'occupante ed è collegata alla vettura da una molla con una rigidità che dipende dalla distanza relativa tra l'occupante e l'interno della vettura. L'OLC prevede il movimento relativo del manichino e del veicolo e calcola l'accelerazione media del manichino quando la sua posizione (relativa al veicolo) si trova tra 65 mm e 235mm; indica, quindi, l'accelerazione minima sull'occupante, indotta da un dato impulso di arresto sotto la protezione del sistema di ritenuta ideale. Fornisce, inoltre, un'indicazione delle forze di ritenuta sottoposte all'occupante dall'evento di arresto, basato unicamente su una decelerazione.

Si presume che il sistema di ritenuta abbia due parametri di lunghezza:

- L0 che indica la distanza relativa prima del trattenimento ed è pari a 65 mm;
- L1 indica la distanza relativa per decelerare l'occupante alla velocità del veicolo ed è pari a 300mm.

A causa della distanza della cintura di sicurezza, la forza sull'occupante nella prima fase della collisione è molto bassa. L'occupante sperimenta una fase di volo libero fino a quando non viene raggiunta la distanza relativa di 65 mm dall'auto. Quando l'occupante raggiunge la distanza di 65 mm, si presume che sia trattenuto in maniera ottimale.

L'OLC è valutato utilizzando una scala oscillante tra 25g e 40g.

Una volta misurata l'accelerazione lungo x del centro di gravità del carrello, questa viene filtrata usando CFC180. Per calcolare l'OLC per prima cosa si integra l'accelerazione filtrata come segue, in modo da poter risalire al decorso di decelerazione della barriera:

$$V_t = \int A_x(t)dt + V_0$$

dove V_0 è la velocità iniziale della barriera al tempo $t=0$ s.

$OLC_{SI-unit}$, t_1 e t_2 possono essere calcolati risolvendo il seguente sistema di equazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t=0}^{t=t_1} V_0 dt - \int_{t=0}^{t=t_1} V(t)dt = 0.065 \\ \int_{t=t_1}^{t=t_2} V_0 - OLC_{SI-unit} \times (t - t_1)dt - \int_{t=t_1}^{t=t_2} V(t)dt = 0.233 \\ V_0 - OLC_{SI-unit} \times (t_2 - t_1) = V(t_2) \end{array} \right.$$

Dove:

- t_1 è la fine della fase di volo libero di un manichino virtuale sulla barriera lungo uno spostamento di 0.065 m
- t_2 è la fine della fase di trattenimento di un manichino virtuale sulla barriera lungo uno spostamento di 0.235 m dopo la fase di volo libero (cioè in totale 0.3 m di dislocamento per il manichino virtuale).

Per la valutazione della compatibilità l'OLC deve essere dalle unità di misura del SI in g (gravità standard) con il fattore di conversione $1 g = 9.81 m/s^2$ [34].

La Figura 70 rappresenta il movimento del manichino virtuale e la forza di ritenuta. Finché l'occupante non raggiunge i 65 mm, questo compie una prima fase di volo libero durante la quale si muove con velocità costante; quando la curva raggiunge i 65 mm (che è la distanza relativa prima che l'occupante venga trattenuto) si presume che l'occupante sia idealmente trattenuto e viene decelerato per 235 mm in modo da fargli raggiungere la stessa velocità della vettura. L'OLC può quindi essere identificato dall'area tra i movimenti del passeggero tra 65 mm e 300 mm.

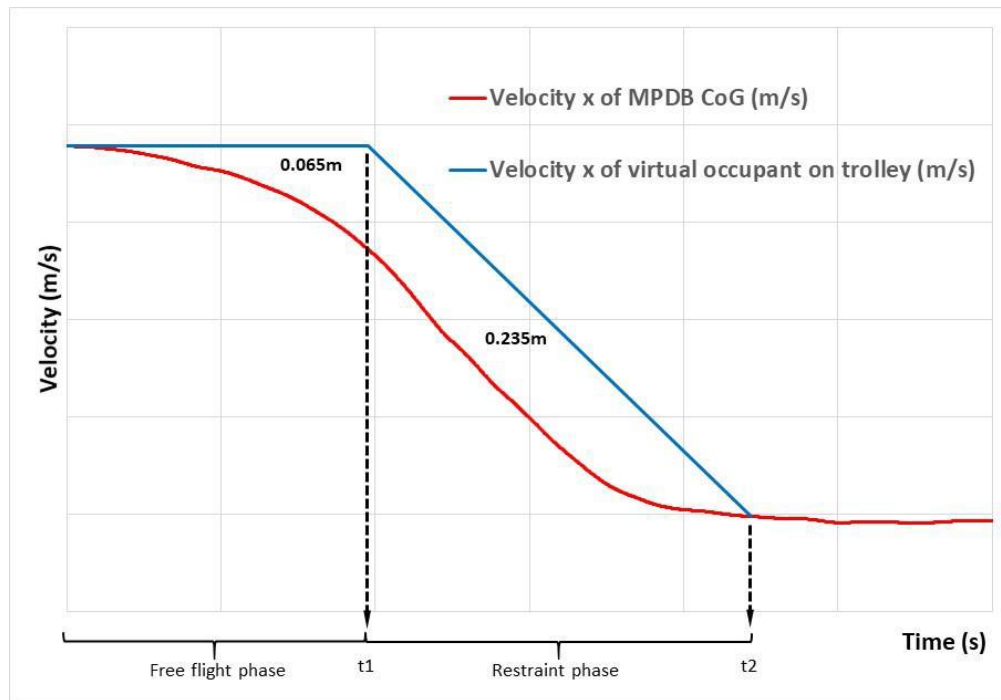


Figura 81: Calcolo di OLC con la velocità [34].

Utilizzando il software HyperView, è stato calcolato l'OLC del trolley sia per la prova sperimentale che per le prove numeriche eseguite con il vecchio modello di barriera e con il nuovo modello e i valori sono stati, poi, normalizzati a 1. Per motivi di riservatezza industriale, nella tabella vengono riportati solo i valori di OLC del trolley normalizzati rispetto a quelli della prova sperimentale (che assume valore pari a 1).

	<u>OLC trolley normalizzato a 1</u>
<u>Prova sperimentale</u>	1.00
<u>Nuovo modello</u>	0.96
<u>Vecchio modello</u>	0.90

Tabella 3: Valori Occupant Load Criterion (OLC).

Come si può notare dai dati riportati, con il nuovo modello di barriera si ottiene un valore di OLC maggiore rispetto a quello che si ha nel caso del vecchio modello di barriera e più vicino al valore normalizzato 1.00, ovvero è il valore ideale attribuito alla prova sperimentale.

CAPITOLO 8

Conclusioni e sviluppi futuri

8.1. Conclusioni

Con il presente lavoro di tesi è stato conseguito quello che era l'obiettivo prefissato, ovvero il miglioramento di un modello FEM della barriera MPDB deformabile in vista dell'evoluzione del protocollo EuNCAP 2020. Infatti, a partire da un modello di riferimento, ne è stato realizzato uno più vicino a quello reale descritto dal protocollo. Il modello realizzato si discosta da quello reale soprattutto per la diversa dimensione delle celle del blocco posteriore, realizzate in modo da risultare più grandi rispetto alla dimensione effettiva (scelta dovuta dal fatto che altrimenti ci sarebbero stati troppi elementi per poter lanciare una simulazione).

I vari blocchi sono stati inizialmente validati singolarmente con prove di caratterizzazione statica: sono state, infatti, eseguite prove di compressione e di sforzo di taglio e, grazie a questo, è stato possibile tarare lo spessore dei singoli blocchi cercando di far rientrare, al meglio possibile, gli andamenti delle forze all'interno dei corridoi statici forniti dal protocollo EuNCAP.

La successiva validazione ha previsto l'esecuzione di una prova di caratterizzazione dinamica: si tratta di una prova d'urto di un impattore tubolare contro la barriera saldamente fissata su una parete rigida. La validazione ha avuto successo in quanto si è notato che l'andamento della forza rientra in maniera soddisfacente all'interno dei corridoi dinamici soprattutto nella prima parte del test dinamico (è la parte di maggior interesse, perché in nessun test, teoricamente, si dovrebbe arrivare a schiacciare gli ultimi blocchi posti sul fondo).

Le prove di caratterizzazione statica e dinamica hanno portato, quindi, ad una buona correlazione riscontrabile soprattutto da un punto di vista quantitativo (attraverso le curve forza-spostamento).

Una volta validato il modello con le prove semplificate, è stato inserito in quello dell'intero veicolo in modo da essere validato anche nelle prove full scale. In questo caso, si è visto un

miglioramento significativo nell'andamento dell'accelerazione nel caso del trolley, infatti la curva della prova effettuata con il nuovo modello di barriera approssima meglio la curva che si ricava dalla prova sperimentale; non si ha, invece, un miglioramento significativo nel caso del veicolo e questo potrebbe essere dovuto proprio al fatto che nel test dinamico l'andamento della forza risulta essere leggermente più alto dei corridoi dinamici.

Infine, l'ultimo passaggio, è stato quello di calcolare l'OLC (Occupant Load Criterion) del trolley che, nel caso della prova eseguita con il nuovo modello di barriera, risulta essere più vicino al valore unitario assegnato alla prova sperimentale.

Quindi, a fronte dei risultati e delle considerazioni effettuate, è possibile affermare che il nuovo modello di barriera MPDB risulta migliorato rispetto a quello già esistente.

8.2. Sviluppi futuri

Al fine di apportare ulteriori miglioramenti al modello FEM e alla correlazione del modello, andrebbero prese in considerazione differenti soluzioni di modellazione:

- Implementazione di un modello di rottura migliorato;
- Implementazione di un modello che tenga conto dell'effetto della pressione dell'aria intrappolata nelle celle: l'aria aggiunge rigidità alle celle, ma il suo effetto principale è visibile soprattutto nella zona dell'impatto ad elevate compressioni, in quanto aumenta la pressione sulle piastre di copertura;
- Implementazione di un modello di rottura sugli incollaggi delle varie sotto parti costituenti la barriera.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ERSO, “*Annual Accident Report 2017*,” tech. rep., 2017
- [2] Bignardi C., *Biomeccanica del crash test*, Appunti del corso Bioingegneria Meccanica, Politecnico di Torino, 2015.
- [3] ACI- Automobile Club d'Italia, *Cosa si intende per sicurezza attiva*
<http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-attiva-e-preventiva/cosa-si-intende-per-sicurezza-attiva.html>.
- [4] ACI, Automobile Club d'Italia, “ABS”, <http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-attiva-e-preventiva/abs.html>
- [5] EuroNCAP, “*Frenata d’Emergenza Autonoma*”.
- [6] Wikipedia, *Controllo elettronico della stabilità*,
[https://it.wikipedia.org/wiki/Controllo elettronico della stabilità](https://it.wikipedia.org/wiki/Controllo_elettronico_della_stabilit%C3%A0).
- [7] ACI- Automobile Club d'Italia, *Cosa si intende per sicurezza passiva*, li 16/12/2018
<http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-passiva/cosa-si-intende-per-sicurezza-passiva.html>
- [8] ACI, Automobile Club d’Italia “*Cinture di sicurezza*”, <http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-passiva/cinture-di-sicurezza.html>.
- [9] ACI, Automobile Club d’Italia, “*Airbag*”, <http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-passiva/airbag.html>.
- [10] ACI, Automobile Club d’Italia, “*Poggiatesta*”, <http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-passiva/poggiatesta.html>.
- [11] “*About EuroNCAP*”, <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/>.
- [12] Wikipedia, “*Crash Test*”, https://it.wikipedia.org/wiki/Crash_test.
- [13] Sicurauto, *I crash test dicono davvero tutto sulla sicurezza dell’auto?*,
<https://www.sicurauto.it/news/i-crash-test-dicono-davvero-tutto-sulla-sicurezza-dellauto.html>.

- [14] EuroNCAP, *Test frontale disassato*, <https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-degli-adulti/test-frontale-disassato/>.
- [15] EuroNCAP, *Test frontale su tutta la larghezza*, <https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-degli-adulti/test-frontale-su-tutta-la-larghezza/>.
- [16] EuroNCAP, *Impatto laterale*, <https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-degli-adulti/impatto-laterale/>.
- [17] EuroNCAP, *Test del palo*, <https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-degli-adulti/test-del-palo/>.
- [18] EuroNCAP, *Test del colpo di frusta*, <https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-degli-adulti/colpo-di-frusta/>.
- [19] EuroNCAP, *Technical Bulletin, EuroNCAP Mobile Progressive Deformable Barrier Face Specification*, Novembre 2018.
- [20] Volker, Sandner, Andreas, Ratzek, *MPDB – Mobile offset progressive deformable barrier, A new approach to cover compatibility and offset testing*.
- [21] R. Bevilacqua, O. Menchi, *Appunti di calcolo numerico*.
- [22] Wikipedia, *Computer-aided engineering*, https://it.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_engineering.
- [23] Altair Uninvestity eBook, *Practical Aspects of Finite Element Simulation - a Study Guide*, 3rd Edition.
- [24] Wikipedia, *Metodo dei volumi Finiti*, <https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo-dei-volumi-finiti>.
- [25] Prof. E.Sacco, *“Tecniche di approssimazione: Differenze Finite”*, Corso di Meccanica Computazionale delle Strutture, Unicas.
- [26] Gugliotta a., *Elementi Finiti*, Otto Editore, Torino, 2002.
- [27] Metaingegneria, *Cos'è una simulazione FEM-FEA*, <https://www.metaingegneria.com/cos'è-una-simulazione-fea>.

- [28] Wikipedia, *Metodo degli Elementi Finiti*, https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_degli_elementi_finiti.
- [29] Livermore Software Technology Corporation-LSTC, <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>.
- [30] Livermore Software Technology Corporation-LSTC, *LS-DYNA keyword user's manual-Volume I*.
- [31] Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA THEORY MANUAL*, Livermore, California, 2006.
- [32] NHTSA- National Highway Traffic Safety Administration, Moving Deformable Barrier Test Requirements, Appendix C, Aluminium Honeycomb Barrier Strength Test.
- [33] Livermore Software Technology Corporation-LSTC, *LS-DYNA keyword user's manual-Volume II*.
- [34] EuroNCAP, *Technical Bulletin, Compatibility Assessment*, Novembre 2017.

