



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Facoltà di Ingegneria

Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Ottimizzazione delle prestazioni ad urto
frontale di un cofano automobilistico
mediante simulazioni agli elementi finiti
espliciti e mesh morphing**

Candidato: Manuel Volponi

Relatore: Marco Evangelos Biancolini

Co-Relatore: Leonardo Geronzi

Anno accademico [2020-2021]

INDICE

Abstract.....	4
Introduzione	5
1. STATO DELL'ARTE.....	9
1.1. Cofano	9
Scocca portante - unibody.....	9
Space-frame	10
Leghe leggere nel settore automobilistico	17
1.2. Crash test.....	19
Sicurezza stradale	19
Euro NCAP	20
Impatto frontale.....	21
Impatto laterale	23
Colpo di frusta	25
Impatto della testa.....	28
1.3. Metodi CAE nei crash test	29
1.4. Qualità della mesh.....	35
2. MATERIALI E METODI	37
2.1. Strumenti CAE	37
LS-DYNA in ANSYS Workbench	37
RBF Morph.....	39
2.2. Materiali utilizzati	41
2.3. Studio cofano della Chevrolet Silverado.....	43
Importazione Mesh	43
Analisi Dinamica	47

2.4.	Studio Honda Accord 2011	50
	Sovrapposizione mesh Honda al nuovo design	53
	Ottimizzazione della struttura di rinforzo interna.....	60
3.	RISULTATI.....	73
3.1.	Scelta dell'ottimizzazione	73
3.2.	Osservazioni preliminari	76
	Osservazioni Successive alla simulazione	78
3.3.	Mesh ottenuta	79
	Siverado originale	80
	Mesh Honda.....	81
	Silverato morphato.....	82
	Cofano Honda Morphato e ottimizzato	83
3.4.	Energia	84
3.5.	Accelerazione	88
3.6.	Stress	90
4.	CONCLUSIONI	92
5.	RINGRAZIAMENTI.....	93
6.	INDICE DELLE FIGURE.....	96
7.	RIFERIMENTI	100

Abstract

La prima fase della progettazione di un veicolo avviene all'interno di centri stile, dove architetti e designer, attraverso disegni tecnici e studi di bellezza, danno una prima idea del prototipo automobilistico, che dovrà essere costruito. Successivamente gli ingegneri vanno a valutare la funzionalità e la fattibilità costruttiva del prodotto, per tale motivo può essere utile condividere e conservare gli studi effettuati già su modelli precedenti, senza riprogettare il tutto, ma concentrandosi principalmente sul cambiamento di forma e sulla ottimizzazione.

Lo scopo di questo progetto è risolvere tale problema attraverso l'utilizzo del Mesh Morphing. Ci siamo concentrati soltanto su un singolo componente della carrozzeria, ovvero il cofano dell'automobile. Si è reperito una Mesh, che produceva risultati accettabili (in termini di sforzi e deformazioni in particolari punti e comportamento dinamico) e si è importata su una geometria di un pick-up. Più precisamente si è fatta mutare la mesh nativa del modello vecchio, in modo da "inseguire" il profilo nuovo di design ideato, mantenendo però la bontà della mesh precedente, ottimizzata e "funzionante", senza trascurare inevitabili vincoli di montaggio che dovranno essere rispettati.

Passo successivo è stato eseguire l'analisi FEM del crash, contro un muro shell, così da confrontare i risultati del cofano avente mesh aggiornata, con i risultati ottenuti dal cofano originale ed esistente del pick-up (Chevrolet Silverado).

Infine, si è ottimizzato il tutto agendo in modo parametrico con le funzioni di morphing, raggiungendo un punto in cui i risultati in termini di decelerazione, stress ed energia cinetica dissipata tra i 2 cofani diventassero prossimi.

I software utilizzati per quest'attività sono stati Ansys Workbench con solutore esplicito LS-DYNA, l'estensione RBF Morph per Mechanical ed LS-PrePost.

Introduzione

Da molti anni ormai la sicurezza sui veicoli ha assunto un'enorme importanza sia per le case automobilistiche, obbligate a far fronte a normative sempre più restringenti per far circolare i loro nuovi veicoli, ma soprattutto per gli acquirenti che vogliono auto sempre più sicure.

Che valore ha assunto il concetto di sicurezza oggi? Un'auto viene definita sicura quando è in grado di proteggere in caso di collisione sia gli occupanti e sia i pedoni. Uno strumento per studiare la sicurezza è rappresentato dai crash test.

I crash test, chiamati anche prove d'impatto, sono delle prove alle quali vengono sottoposti i veicoli per poter essere omologati e autorizzati alla circolazione stradale. Il crash test è un collaudo distruttivo mirato a verificare la sicurezza passiva di un veicolo nella sua totalità oppure nei singoli componenti. I crash test vengono effettuati dai costruttori nelle fasi di progettazione propedeutiche al lancio di un nuovo modello e in secondo luogo da istituti privati spesso su delega di istituzioni nazionali o internazionali. In Europa i crash test sui veicoli di nuova immisione sul mercato vengono effettuati dall'Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) che al termine delle prove assegna una valutazione complessiva da una a cinque stelle, in Giappone invece opera l'OSA (National Organization for Automotive & Victims' Aid) mentre Negli Stati Uniti operano la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration)

Esistono diverse prove di crash test. L'Euro NCAP, ad esempio, prevede l'urto frontale pieno, l'urto frontale disassato, l'urto laterale, il test del palo e il test del pedone. L'urto frontale pieno viene effettuato lanciando il veicolo ad una velocità prestabilita contro un muro di cemento rivestito di alluminio o contro un altro veicolo. Il veicolo oggetto della prova è allineato alla barriera e la forza dell'urto viene scaricata su tutta la parte frontale. Euro NCAP effettua questo tipo di test ad una velocità di 50 km/h.

Tali prove forniscono risultati molto affidabili ma richiedono un costo molto elevato dovuto alla distruzione del campione testato. Per questo motivo nella progettazione e nella produzione industriale si ha necessità di calcolare a priori della realizzazione il comportamento statico e dinamico del sistema meccanico, tale proprietà viene soddisfatta dall'analisi agli elementi finiti del sistema stesso (Analisi FEM).

L'Analisi FEM mette a disposizione dell'ingegnere un laboratorio virtuale dove calcolare il comportamento di un prodotto in tutte le sue sfaccettature. Tutto ciò prima ancora della produzione di un oggetto fisico e con la possibilità di analizzare il comportamento di ogni componente nel suo interagire con il resto del sistema. Un altro vantaggio è dato dal fatto che si può studiare non solo cosa succede ai stradi più superficiali dell'oggetto ma anche cosa succede nei punti più interni, studiando come carichi e deformazioni si distribuiscono al loro interno, ottenendo fondamentali informazioni un tempo impossibili da reperire. Tuttavia il contributo maggiore del calcolo FEM risiede nella sua capacità di indirizzare il progettista verso il miglioramento del prodotto senza dover ricorrere a innumerevoli prototipi. L'Ingegnere può verificare direttamente nell'ambiente virtuale la bontà dei cambiamenti applicati. Sono proprio tutti questi vantaggi che fanno dell'applicazione dei Metodi agli Elementi Finiti, una pratica destinata a diventare centrale nel nuovo modo di concepire il progetto.

Il primo passo per effettuare un'analisi FEM consiste nella discretizzazione del continuo meccanico che conduce ad una rappresentazione matematica fine che successivamente verrà processata dal calcolatore, rendendo così possibile un'analisi qualitativa e quantitativa delle caratteristiche del sistema in condizioni reali di impiego. Più semplicemente si va a suddividere un solido in tanti solidi più piccoli di forma poliedrica chiamati elementi, ad ogni elemento corrisponde un certo numero di nodi, ovvero punti dello spazio che vengono individuati e contraddistinti da un numero. L'insieme di tutti i nodi e di tutti gli elementi di un modello agli elementi finiti, con le loro connessioni ed i loro vincoli viene chiamata mesh.

Esistono vari tipi di analisi FEM e la scelta dipende da cosa si deve studiare. Le analisi FEM si possono dividere in: analisi statica, analisi cinematiche o dinamiche, analisi termiche, analisi di verifica a fatica e infine analisi di buckling.

Questo elaborato tratta principalmente l'analisi statica che serve per calcolare lo stress e la deformazione delle strutture sotto l'applicazione di un sistema di forze costanti nel tempo e di analisi dinamiche con l'obiettivo di determinare e calcolare il comportamento in frequenza della struttura, ovvero calcolare le frequenze di vibrazione e le corrispondenti forme modali (analisi di frequenza) oppure di determinare come la struttura si comporta durante l'applicazione di un carico che varia nel tempo (analisi transitoria). Nell'analisi transitoria le forze variano in funzione del tempo con una legge qualsiasi, non necessariamente con una legge di tipo sinusoidale come nelle analisi di frequenza. I carichi possono essere sia forze ma anche spostamenti imposti con una legge temporale qualsiasi.

Esistono due categorie di solutori per risolvere tale problema, che prendono il nome dal tipo di tecnica numerica utilizzata.

- I metodi Impliciti, che sono quelli utilizzati con maggiore frequenza per gestire storie temporali lunghe, con fenomeni non lineari limitati o nulli. Si utilizza un metodo di calcolo step by step in cui un opportuno criterio di convergenza permette di proseguire o meno l'analisi, eventualmente riducendo l'incremento di tempo, a seconda dell'accuratezza dei risultati al termine di ogni step.
- I metodi Espliciti, che sono stati sviluppati per risolvere brevi storie temporali con forti non linearità, come ad esempio vedere cosa succede ad una struttura nel corso di un'esplosione, oppure la simulazione di un crash automobilistico, oppure una prova di impatto balistico. Con l'utilizzo del metodo esplicito si presentano meno problemi di non convergenza ad una soluzione finita.

Un altro strumento che verrà trattato e utilizzato nell'elaborato sarà il mesh morphing. Il mesh morphing consiste nell'adattamento di una griglia computazionale, adottata per l'ingegneria assistita da computer (CAE). Presa ad esempio la mesh solida o shell di una parte strutturale pronta per essere elaborata da un risolutore FEA, o la mesh volumetrica completa di condizioni al contorno per un solutore CFD, è possibile far assumere una nuova forma semplicemente aggiornando le posizioni nodali. Lasciando inalterata la topologia della mesh (conteggio nodi, conteggio celle, connettività). Il mesh morphing può essere utilizzato per diversi scopi: creare parametri di forma (ovvero modificare una lunghezza, un angolo e uno spessore), passare ad una nuova forma e infine per ottimizzazione in modo facile e veloce oggetti già analizzati (ovvero spostare la mesh conoscendo già dei risultati). I benefici portati dal mesh morphing sono la riduzione del tempo di update del modello e la possibilità di evitare di creare la mesh da zero per ogni modifica geometrica fatta.

1. STATO DELL'ARTE

1.1. Cofano

Con il termine cofano si va ad indicare il portellone apribile delle carrozzerie automobilistiche. Si possono distinguere in un'automobile due tipologie di cofano:

- Il cofano anteriore con il compito di coprire e proteggere il vano motore;
- il cofano posteriore con il compito di chiudere il vano bagagli.

Entrambi gli elementi fanno parte di un insieme più grande detto telaio. Il telaio è quell'insieme di elementi che ha il compito di sostenere i carichi statici e dinamici, conferire rigidità al veicolo, proteggere i passeggeri in caso di urto e fornire supporto a tutti gli elementi della vettura: motore, organi meccanici, sistemi ausiliari, passeggeri e merce trasportata. La carrozzeria può essere più o meno integrata con il telaio, a seconda delle diverse tipologie costruttive. Le tipologie più diffuse di telaio automobilistico sono principalmente 2. In entrambi i casi, il cofano ha la stessa funzione: fornire contributo alla rigidità del veicolo e di protezione per i pedoni e gli occupanti del veicolo in caso di urto.

Scocca portante - unibody

La scocca portante in lamiera stampata, o monoscocca, è da decenni la soluzione più adottata per le vetture di serie, ed attualmente viene scelta dal 95% delle vetture prodotte a livello mondiale. Telaio e carrozzeria costituiscono un'unica struttura "a guscio" composta da pannelli stampati (solitamente 300) uniti tra loro con saldature a punti (mediamente da 3000 a 5000) eseguite in automatico da robot. I vantaggi principali sono la grande adattabilità a volumi produttivi molto elevati e le ottime prestazioni in termini di rigidità, comportamento a crash test e sfruttamento dei volumi. I pannelli fissi della carrozzeria (montanti, tetto, parafanghi) costituiscono la parte integrante della struttura portante, mentre quelli mobili (cofano motore, portellone del bagagliaio e sportelli laterali), pur chiamati convenzionalmente strutturali, in realtà danno un contributo secondario. Il principale limite di questa

architettura costruttiva è dato, oltre che dagli elevati volumi produttivi necessari ad ammortizzare gli imponenti investimenti richiesti per la realizzazione delle linee produttive, dall'intrinseca pesantezza dell'insieme.

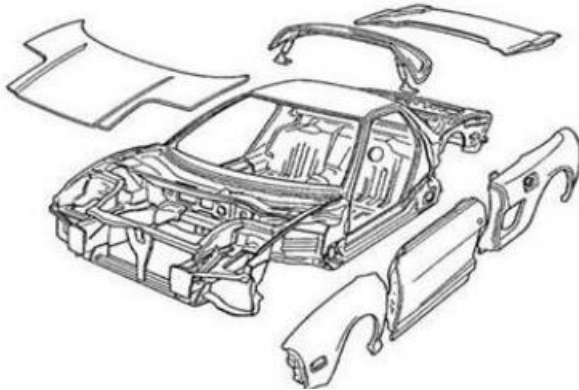


Figura 1- Esempio Scocca automobilistica unibody

Figura 2 – Esempio di auto con scocca Space-frame
Figura 3- Esempio Scocca automobilistica unibody

Space-frame

Per space-frame si intende un'architettura costruttiva costituita da una gabbia di profilati connessi fra di loro mediante nodi rigidi. A livello funzionale, rispetto alla scocca portante, tutti i pannelli esterni (fissi e mobili) danno un contributo strutturale secondario, anche se l'integrazione fra telaio e carrozzeria può differire a seconda delle specifiche applicazioni. Lo space-frame si presta molto bene ad essere realizzato con leghe leggere. I vari elementi che compongono il telaio sono tra di loro indipendenti, ognuno di essi può essere progettato e costruito in modo differente per materiale e tecnologia di produzione: ciò consente un'elevata specializzazione dei componenti in relazione alla loro funzione e permette un notevole livello di ottimizzazione, con una drastica riduzione del numero dei componenti ed un aumento della flessibilità. A fronte di alcuni svantaggi in termine di automazione dei processi, lo space-frame presenta buone caratteristiche di

rigidezza e comportamento all'urto, che lo rendono una valida alternativa alla scocca portante per la produzione di veicoli caratterizzati da regimi produttivi di medio livello.

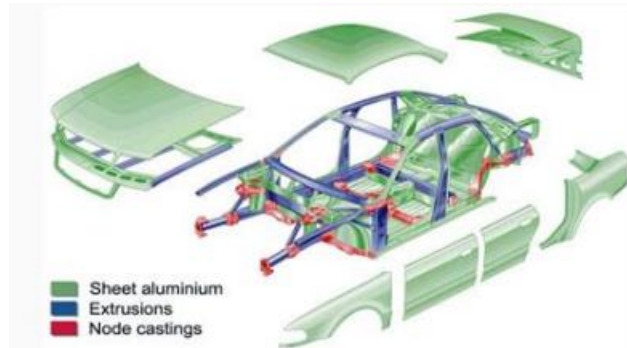


Figura 4 – Esempio di auto con scocca Space-frame

Figura 5 -Punti di impatto del pedone con il Fronte dell'auto
Figura 6 – Esempio di auto con scocca Space-frame

Il cofano è un componente importante della parte anteriore dell'auto. Ha una forma aerodinamica per ridurre l'effetto dell'aria. Generalmente viene utilizzato per coprire il motore dell'auto, il radiatore e molte altre parti, pertanto questo deve essere progettato in modo tale che tutte le parti di manutenzione siano di facile accesso e diano un minimo impatto di disturbi esterni sul motore. Quando l'auto subisce un incidente nella parte anteriore, la maggior parte delle volte il sistema del cofano viene danneggiato e assorbe parte dell'energia d'urto derivante dall'urto. L'apertura del cofano è prevalentemente del tipo “a bocca di coccodrillo” ovvero incernierata al cruscotto con apertura contro il senso di marcia, sia per economia costruttiva, sia per ragioni di migliore fruibilità operativa o di carico. Nel caso di cofano con apertura a bocca di coccodrillo l'apertura si ha con una leva posta all'interno dell'abitacolo: attraverso di essa si libera un gancio che lo tiene saldamente attaccato alla scocca anteriore dell'auto, tale da evitarne l'apertura in corsa. L'apertura viene mantenuta con un'asticella laterale in grado di sostenere

l'intera massa agganciandosi in una scanalatura entro cui si inserisce la sua estremità. Spesso il fissaggio può avvenire in due punti diversi, di cui uno è più ravvicinato per consentire una maggiore apertura, funzionale in operazioni di manutenzione del motore.

Da un punto di vista estetico, il cofano ha spesso rappresentato il “muso” caratteristico di un modello e di uno “stile di guida”. La forma del cofano anteriore può essere più o meno convessa, in grado cioè di coprire parti del motore sporgenti o che non devono essere a stretto contatto con esso per non rovinarlo. In alcuni casi sono visibili delle “bombature” della lamiera che giocano un ruolo funzionale, oltre che estetico come, ad esempio, migliorare l'aerodinamicità del veicolo. In alcuni modelli si possono riscontrare delle feritoie per l'aria: si tratta di aperture atte a far fuoriuscire l'aria calda dal cofano, oppure migliorare l'ingresso dell'aria nella scatola filtro la quale serve ad aumentare il flusso di aria nel motore durante la combustione.

Per quando riguarda la sua progettazione devono essere rispettati alcuni requisiti tecnici:

- Materiale capace di assorbire un'elevata energia d'urto.
- Materiale leggero
- Spessore pannello esterno = 0,75 mm
- Spessore pannello interno = 0,75 mm
- Spessore rinforzo = 1,5 mm
- Fornire un adeguato rilievo tra il pannello esterno e interno (circa 10mm)
- Nessun angolo acuto all'interno del pannello.
- Nessuna bozza negativa.

Gli ultimi due requisiti sono necessari per mantenere un'adeguata distanza tra il cofano e il blocco motore, questo per proteggere i pedoni in caso di urto. Tali requisiti sono indispensabili per il programma Europeo di valutazione di sicurezza per le nuove auto (Euro NCAP), necessari per limitare le lesioni dei pedoni durante gli impatti con la parte anteriore del veicolo. Oltre ai requisiti precedentemente

illustrati, possiamo trovare in [1] e [2] ulteriori accuratezze da tenere bene in mente per una buona riuscita del progetto di un cofano, come:

- l'area con alta probabilità di impatto del cofano con il pedone (sia adulti che bambino) deve avere uno spessore inferiore per evitare gravi lesioni alla testa.

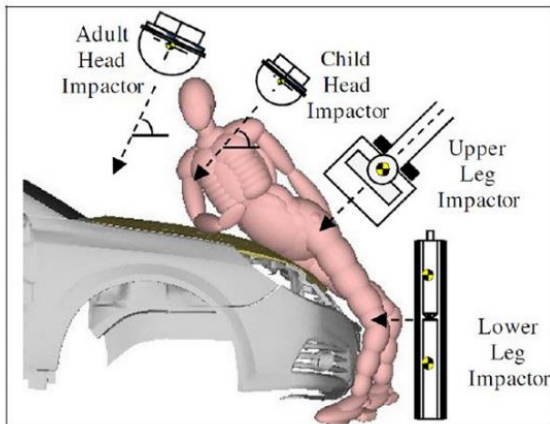


Figura 7 -Punti di impatto del pedone con il Fronte dell'auto

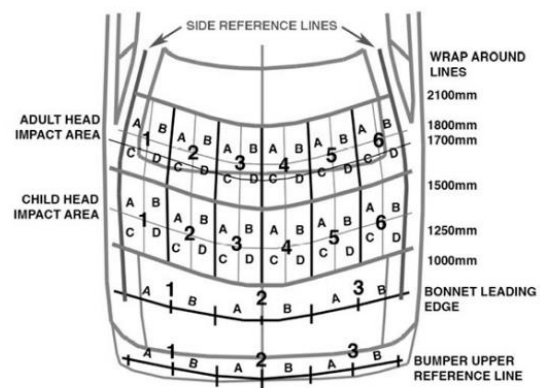


Figura 10 -Zona con alta probabilità di impatto della testa del pedone con il cofano

- Nessun rinforzo deve essere posizionato nella zona con elevata probabilità di urto.
- Il cofano deve assorbire l'energia dell'impatto, soprattutto se con pedoni.
- Le lesioni alla testa più gravi si verificano quando non c'è spazio sufficiente tra il cofano e i componenti rigidi del motore sottostanti. Normalmente è sufficiente uno spazio di circa 10 cm per consentire alla testa del pedone di avere una decelerazione controllata e un rischio di morte notevolmente ridotto. (Creare spazio sotto il cofano non è sempre facile perché di solito ci sono altri vincoli progettuali, come l'aerodinamica e lo stile.)
- In caso di urto pedone, evitare un carico concentrato troppo elevato.

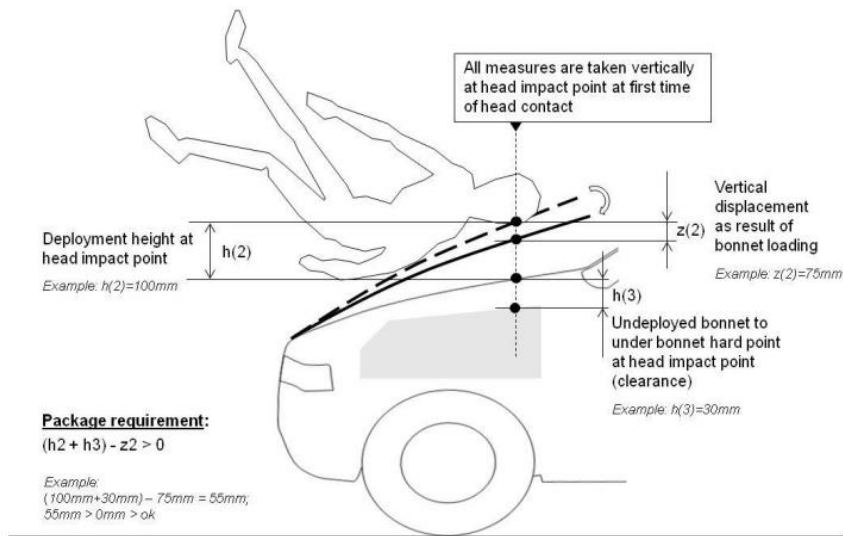


Figura 13 -spazio da rispettare in progettazione per evitare gravi lesioni al pedone

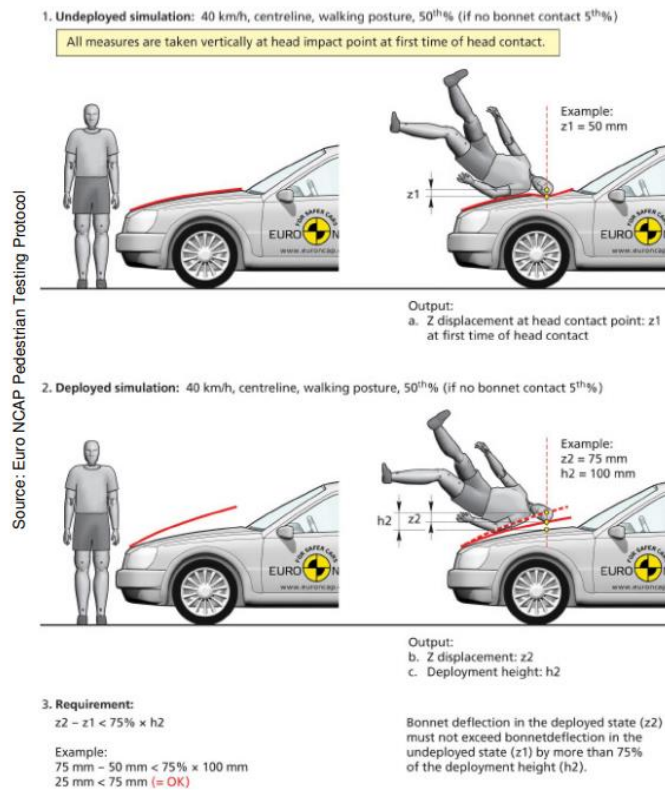


Figura 14 -valutazione Euroncap del cofano in caso di urti con pedoni

- Il cofano deve deformarsi in modo tale da evitare carichi troppo elevati alle cerniere, poiché la rottura di esse può portare danni agli occupanti.



Figura 15 -Possibile soluzione per evitare di caricare troppo le cerniere, con applicazione di bugne

Ci sono infine requisiti di rigidità statica e dinamica:

- Studio della rigidità statica: deve resistere alla pressione sulla superficie, che può essere dovuta a qualcuno che si appoggia o alla pressione delle mani per chiudere il cofano. Deve resistere al carico di torsione sul bordo per verificare la deformazione in caso qualcuno si appenda al cofano tenuto su dall'asticella
- Studio della rigidità dinamica: impatto a chiusura (normale, sbattimento anomalo), overopening (in caso il cofano non sia stato chiuso e si apra in autostrada), verifiche di fatica a pressione e vibrazioni aerodinamiche, verifica di fatica a vibrazioni indotte dallo scuotimento del veicolo

Tutti questi requisiti devono essere soddisfatti con materiali che permettono di ridurre al minimo il peso della vettura, senza influire sulla funzionalità, sulla sicurezza e sulla vita in esercizio. La riduzione del peso della vettura consentirebbe un ridimensionamento del motore con ulteriore diminuzione dei consumi a parità di prestazioni. Infatti, uno dei più importanti obiettivi dei produttori di automobili

è quello di realizzare una significativa riduzione del consumo di combustibile del veicolo, necessità che deriva dalle problematiche legate al crescente inquinamento ambientale. Per questo l'industria automobilistica mostra un forte interesse per le lamiere di alluminio nella produzione delle carrozzerie. Il requisito base di tali lamiere è una buona formabilità, in modo tale che le lamiere possano venir stampate, per poi restaurare o aumentare la loro resistenza quando il componente formato viene verniciato e dunque ricotto. Tuttavia, solo negli ultimi anni si sta sviluppando l'uso dell'alluminio, poiché oltre all'elevato costo del materiale stesso, tali leghe siano spesso associate ad una limitata formabilità, con la conseguenza che la produzione di grandi componenti di forma complessa mediante stampaggio della lamiera (il caso, dunque, della carrozzeria) risulta impossibile o possibile solo ad elevati costi.

Leghe leggere nel settore automobilistico

Nell'industria automobilistica uno dei fattori più discussi nella costruzione di una nuova auto, ed in continuo sviluppo, riguarda l'utilizzo delle leghe leggere, un'idea sui materiali che vengono usati e come vengono trattati è stata possibile grazie all'elaborato [12]. L'applicazione dell'alluminio e delle sue leghe alle costruzioni automobilistiche ed in particolare a telai e carrozzerie è stata praticata sin dall'inizio del XX Secolo. Tuttavia, fino a venti anni fa si è trattato di applicazioni specifiche, di nicchia, per prodotti con vincoli economici poco stringenti. Nella costruzione di scocche automobilistiche si adottava principalmente acciaio. Gli svantaggi relativi all'impiego di questo materiale nella produzione di strutture automobilistiche però erano principalmente:

- Bassa formabilità: essa diminuisce con l'aumentare della resistenza e porta a problemi di frattura (cracking) e splitting durante lo stampaggio
- Degrado delle proprietà meccaniche nella zona termicamente alterata durante la saldatura;
- Maggior ritorno elastico
- Elevato peso
- Necessario utilizzo di presse con tonnellaggio maggiore

A partire dagli anni '80 si è operato un progressivo aumento dell'utilizzo delle leghe leggere: il contenuto medio è da allora in costante crescita, con un complessivo raddoppio negli ultimi venti anni. Questo è stato reso possibile principalmente dai seguenti fattori:

- Miglioramento dei processi di lavorazione;
- Riduzione dei costi dell'alluminio primario;
- Sviluppo di leghe avanzate;
- Aumento della conoscenza delle proprietà di lavorabilità;
- Maggiore conoscenza dei criteri di progettazione e delle previsioni di durata per componenti sotto sollecitazione;

- Estensione dell'utilizzo a nuove applicazioni.

Attualmente nelle costruzioni automobilistiche vi sono dei settori ben precisi in cui l'uso dell'alluminio è radicato e consolidato:

- nei gruppi operativi: testata motore, collettori aspirazione, scatola cambio, carcassa alternatore e calotte del motorino di avviamento, parte per l'aspirazione di turbocompressori, coppa dell'olio ed in qualche caso monoblocchi
- nell'autotelaio: cerchi ruote, scatola dello sterzo, barre di protezione laterali
- nel sistema di raffreddamento: radiatore, pompa acqua e raccordi per manicotti
- nei componenti del climatizzatore: condensatore, evaporatore, carcassa del compressore

Per il prossimo futuro si prevede un utilizzo sempre maggiore delle leghe di alluminio, sia per consentire l'alleggerimento dei veicoli, sia per incrementare la riciclabilità delle vetture.

1.2. Crash test

Sicurezza stradale

La sicurezza stradale è uno dei temi maggiormente discussi nell'ultimo decennio con lo scopo di minimizzare il numero di vittime e feriti che si verificano a causa degli incidenti stradali. Il miglioramento della sicurezza dei veicoli è stato reso estremamente efficace sfruttando la richiesta dei consumatori per veicoli robusti e sicuri, ed è proprio la continua ricerca ed innovazione ad aver promosso l'introduzione di ulteriori sistemi di sicurezza, alcuni dei quali sono diventati obbligatori. È possibile distinguere tra sistemi di sicurezza preventiva, attiva e passiva. La sicurezza preventiva cerca di evitare e prevenire un incidente in condizioni di guida normali. Rientrano in questa categoria tutti i sistemi che favoriscono il benessere, la concentrazione di guida, una buona visuale ed altri. La sicurezza attiva sfrutta i sistemi all'avanguardia come l'ABS (Antilock Braking System), l'EBD (Electronic Brakeforce Distribution) e l'ESC (Electronic Stability Control) per ridurre la possibilità che si verifichi un incidente in condizioni di emergenza. La sicurezza passiva ha l'obiettivo di ridurre il rischio e la severità delle lesioni. Per ottenere questo risultato è necessario lavorare sull'energia trasferita agli occupanti: la struttura dei veicoli è progettata in maniera tale da assorbire la maggior parte dell'energia cinetica dell'impatto, cercando di minimizzare la quota trasferita agli occupanti; i sistemi di ritenuta, invece, sono progettati in modo tale da garantire il minor danno possibile agli occupanti. I dispositivi di sicurezza passivi sono, ad esempio, le cinture di sicurezza, i poggiatesta, gli airbag e il sistema di ritenuta. Tra i diversi test e norme da rispettare per la sicurezza passiva dei veicoli le più importanti sono: le norme omologative, necessarie per introdurre sul mercato un nuovo veicolo, e i test opzionali, differenti per ogni paese. In Europa per i test opzionali, si fa riferimento al programma europeo (EURO NCAP) di valutazione dei nuovi modelli di automobili, che consentono di assegnare una valutazione della

sicurezza espressa in stelle per assistere i consumatori ad effettuare un confronto tra i veicoli.



Figura 16 -Enti di valutazione della sicurezza nel mondo

Euro NCAP

Il programma europeo di valutazione delle nuove auto (Euro NCAP), fondato nel 1997 e sostenuto dall'Unione Europea, ha l'obiettivo di definire la modalità di valutazione della sicurezza dei veicoli omologati mediante l'introduzione di specifici protocolli di prova. Il protocollo di valutazione originale dell'Euro NCAP è stato sviluppato dal TRL e dal Vehicle Safety Consultants Ltd; successive versioni del protocollo sono state redatte dall'Euro NCAP Secretariat introducendo dei cambiamenti che hanno portato allo schema di valutazione complessivo. Euro NCAP ha introdotto la valutazione complessiva della sicurezza nel 2009, in base ai risultati in 3 aree, sicurezza per adulti, bambini e utenti vulnerabili della strada. Di seguito si propone un riassunto di quando reperibile in [5] e [6].

I protocolli e i criteri di valutazione forniti dall'Euro NCAP devono riflettere lo stato dell'arte e quindi sono in una continua fase di sviluppo. Nella valutazione possono essere inclusi nuovi test e, se necessario, quelli più vecchi possono essere aggiornati.

Il punteggio Sicurezza degli adulti viene ricavato dai test:

- impatto frontale

- impatto laterale
- colpo di frusta

Il punteggio della Sicurezza dei bambini viene ricavato dai test:

- Prestazioni del seggiolino
- Predisposizioni veicolo
- Controllo installazione del seggiolino

Il punteggio Sicurezza per la protezione degli utenti vulnerabili della strada viene ricavato dai test:

- Impatto della testa
- Impatto polpacci
- Impatto cosce
- AEB per pedoni
- AEB per i ciclisti

Impatto frontale

Gli incidenti frontali sono la causa di un numero di decessi e traumi gravi maggiore rispetto ad altri tipi di sinistro. Un esempio tipico è quello di una collisione frontale tra due vetture a velocità moderatamente elevate. In quasi tutti gli incidenti di questo tipo, solo una parte della larghezza del frontale veicolo viene coinvolta, poiché le due vetture sono disassate. I dati sugli incidenti suggeriscono che disassamenti moderati sono i più comuni in Europa. Si dividono in 2 test, il test con barriera rigida a tutta larghezza (FW) e il test a Barriera mobile con elemento deformabile progressivo (MPDB).

Nel test MPDB in scala reale, l'auto utilizzata per la prova viaggia a 50 km/h e con una sovrapposizione del 50% contro una barriera deformabile montata su un carrello da 1.400 kg, anch'esso in movimento a 50 km/h. La barriera rappresenta l'estremità anteriore di un altro veicolo. Il test replica un incidente tra l'auto utilizzata per la prova e una classica auto familiare di medie dimensioni. Per questo test, due manichini "uomo adulto" sono seduti sui sedili anteriori, mentre i manichini "bambino" sono posizionati nei rispettivi sistemi di ritenuta sul sedile

posteriore. I manichini, il veicolo e il carrello sono dotati di sensori che rilevano le forze e le decelerazioni a cui sarebbero sottoposti gli occupanti. La zona di assorbimento di un impatto frontale deve collassare in modo controllato, contenendo quanto più possibile il processo di deformazione dell'abitacolo; al contempo, non deve esporre gli occupanti a livelli di decelerazione pericolosamente elevati.



Figura 17 - Test a Barriera mobile con elemento deformabile progressivo

Il test FW intende valutare la sicurezza dei sistemi di ritenuta anteriore e posteriore. Le decelerazioni del torace e il grado di deflessione del torace sono soggetti a limiti severi e questo incoraggia i produttori ad adottare sistemi di ritenuta più sofisticati. Euro NCAP testa le vetture facendole impattare contro una barriera rigida sovrapponibile a una velocità di 50km/h. Due piccoli manichini Donna vengono collocati rispettivamente sul sedile del conducente e sul sedile posteriore. Questo test affianca il test frontale disassato al fine di individuare un equilibrio tra un sistema di ritenuta che sia rigido abbastanza da assicurare un manichino Uomo nel test a 64km/h test e un sistema di ritenuta adatto a ridurre le forze di decelerazione su un manichino Donna.



Figura 18 - Test con barriera rigida a tutta larghezza

Impatto laterale

In ordine di importanza, gli impatti laterali sono al secondo posto tra le cause di decessi e lesioni gravi. Rispetto all'impatto frontale, lo spazio utile ad assorbire energia all'interno dell'abitacolo è molto ridotto, per cui sono comuni le lesioni al capo e al torace. I test si dividono in:

- Barriera mobile laterale-MB
- Test del palo -PO
- Impatto laterale per l'attivazione di un airbag centale

Nel caso di barriera mobile laterale, Euro NCAP proietta perpendicolarmente una barriera mobile deformabile contro la fiancata della vettura testata alla velocità di 60 km/h. Un manichino Uomo viene posizionato sul sedile del conducente e dei manichini Bambini vengono collocati nei rispettivi sistemi di ritenuta sul sedile posteriore. Il test intende garantire che le parti più vulnerabili del corpo siano adeguatamente protette. Valutare se si sono rafforzate le strutture intorno al montante scocca (tra le portiere), l'adozione di airbag laterali o a tendina e lo

sviluppo di strutture di assorbimento energia più sofisticate nei sedili e nei pannelli portiera. I tempi e l'intervento degli airbag devono essere attentamente controllati per garantire la migliore protezione possibile.



Figura 19 – Test barriera mobile laterale

Nel caso del test del palo, Il test Euro NCAP 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, a partire dal 2015, ad un piccolo angolo di distanza dalla perpendicolare. Se un veicolo è dotato di airbag centrale che protegge gli occupanti dei posti anteriori dagli urti reciproci, nei posti anteriori sono collocati due manichini maschi di corporatura media per impatto laterale. Il test intende valutare la protezione offerta dalla vettura per il capo del conducente. Essendo il carico sulla vettura così localizzato, la deformazione potrebbe essere elevata e il palo potrebbe penetrare molto nell'abitacolo.



Figura 20 - Test del palo

Colpo di frusta

Traumi da colpo di frusta sono comuni e spesso si verificano in collisioni posteriori a basse velocità. Per evitare ciò i sedili e i poggiatesta vengono testati su una slitta utilizzando un manichino. Si eseguono due prove dinamiche che intendono rappresentare la gamma delle forze d'urto responsabili di lesioni, e si valutano le proporzioni geometriche dei poggiatesta anteriori e posteriori. La valutazione delle proporzioni geometriche intende stabilire se il poggiatesta è posizionabile in modo da proteggere efficacemente il capo impedendone il movimento eccessivo.

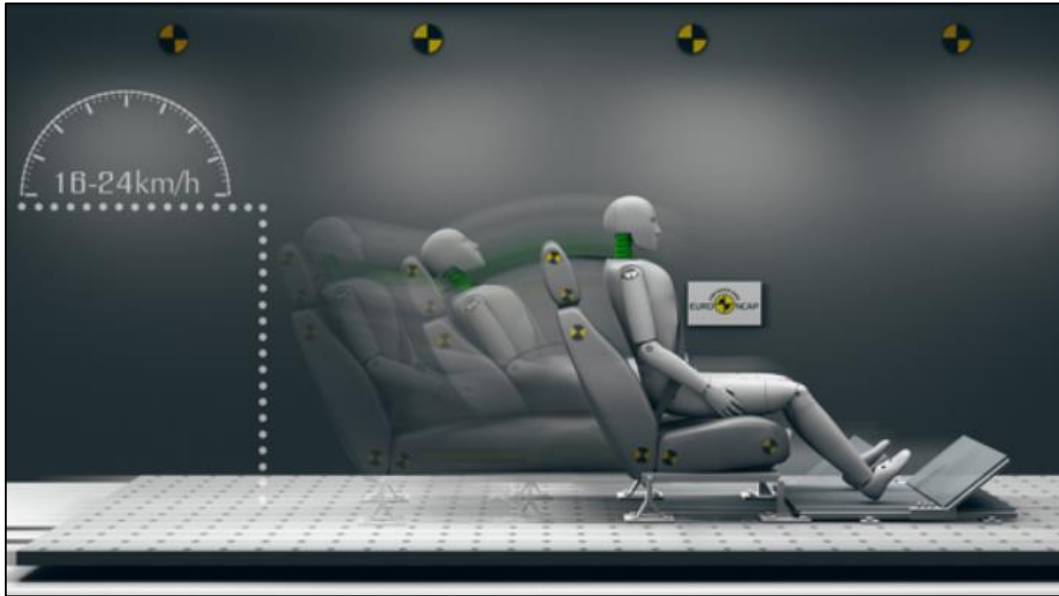


Figura 21 - Test del colpo di frusta del passeggero

Un test molto importante da conoscere ma non più attualmente in uso è il test della Barriera deformabile disassata. Il test della barriera deformabile disassata è stato introdotto nel 1997 e successivamente sostituito nel 2020 da quello della barriera mobile con elemento deformabile progressivo. L'autovettura testata viene fatta impattare alla velocità di 64km/h contro una barriera deformabile disassata del 40%, rappresentante la vettura che sorraggiunge. Il test simula la collisione tra due vetture dello stesso peso, che viaggiano entrambe alla velocità di 50km/h. Il test utilizza due manichini Uomo seduti sui sedili anteriori e dei manichini Bambino collocati nei rispettivi sistemi di ritenuta sul sedile posteriore. Il test valuta il modo in cui la struttura del veicolo resiste all'impatto.



Figura 22 – Test Barriera deformabile disassata

Impatto della testa

Circa il 14% degli incidenti stradali che si verificano sulle strade europee coinvolge i pedoni, con un rischio maggiore per bambini e anziani. La maggior parte degli incidenti che coinvolgono i pedoni si verificano in aree urbane dove le velocità sono moderate. Il capo, il bacino e le gambe sono le parti del corpo più esposte al rischio di lesioni. La stima del rischio di lesioni alla testa per impatto del veicolo con un adulto o un bambino si basa su una serie di test a 40 km/h utilizzando un dispositivo di simulazione della testa di un adulto o un bambino e si valutano la protezione offerta dai vari punti d'impatto sul frontale dell'auto giudicandola buona, mediocre o scarsa. La prova promuove l'adozione di sistemi in grado di assorbire l'energia d'impatto, la progettazione di spazi tampone tra cofano e monoblocco, sistemi di protezione a scatto, ad esempio cofani "pop-up" e airbag esterni.



Figura 23 - Test per valutare la sicurezza dell'auto nei confronti dei pedoni e ciclisti

1.3. Metodi CAE nei crash test

Il metodo degli elementi finiti trova origini nella necessità di risolvere problemi complessi di analisi elastica e strutturale nel campo dell'ingegneria civile ed aeronautica. Come riportato in [7], le basi del metodo possono essere fatte risalire agli anni 1930-35 con i lavori di A. R. Collar e W. J. Duncan, che introducono una forma primitiva di elemento strutturale nella risoluzione di un problema di aeroelasticità, e agli anni 1940-41 con i lavori di Alexander Hrennikoff e Richard Courant, dove entrambi, benché in differenti approcci, condividevano l'idea di suddividere il dominio del problema in sottodomini di forma semplice (gli elementi finiti). Tuttavia, la nascita vera e propria e lo sviluppo del metodo degli elementi finiti si colloca nella seconda metà degli anni '50 con il contributo fondamentale di M. J. (Jon) Turner della Boeing, che formulò e perfezionò il Direct Stiffness Method, il primo approccio agli elementi finiti nel campo del continuo. Il lavoro di Turner trovò diffusione fuori dagli stretti ambiti dell'ingegneria aerospaziale, ed in particolare nell'ingegneria civile, tramite il lavoro di John Argyris presso l'Università di Stoccarda e di Ray W. Clough presso l'Università di Berkeley. Oggi la simulazione degli elementi finiti la possiamo trovare su una varietà di discipline ingegneristiche, per esempio elettromagnetismo, fluidodinamica, calcolo strutturale sia dinamico che statico e geotecnica. Il metodo degli elementi finiti viene impiegato in molti programmi che fanno parte del Computer-aided engineering (spesso abbreviato come CAE, in italiano "ingegneria assistita dal computer"). La progettazione automobilistica fa largo uso della simulazione CAE per tenere conto di tutti i requisiti di sicurezza, comfort, affidabilità e prestazioni richiesti dal mercato. Questo settore, infatti, non si limita soltanto nell'applicazione delle tecnologie "consolidate", ma è anche alla continua ricerca di maggiori prestazioni di calcolo e di strumenti complementari che possano garantire una riduzione dei tempi di sviluppo del prodotto.

Le principali applicazioni sono:

- nel campo dei materiali, per testare velocemente come si comportano sotto sforzo, valutando il loro stress e la loro deformazione. Un uso molto intenso

vi è nel campo dei compositi, l'utilizzo dei materiali compositi nel settore automobilistico è storicamente associato alle competizioni o alle vetture supersportive costruite in piccola serie. Grazie al favorevole rapporto tra rigidità e peso dei materiali compositi, al giorno d'oggi si sta apprezzando un utilizzo sempre maggiore dei laminati anche nello sviluppo di vetture di serie, non solo nel segmento delle auto di lusso ma anche in quello delle vetture a basso consumo, ibride ed elettriche.

- Per l'ottimizzazione di forma, poiché durante lo sviluppo ingegneristico di un nuovo veicolo vengono eseguite numerose iterazioni di calcolo per perfezionare la risposta del modello e raggiungere le prestazioni desiderate in termini di sicurezza e comfort. Queste iterazioni richiedono una completa ridefinizione del modello analitico, attraverso un grosso lavoro manuale di modellazione (meshing). Grazie al Mesh Morphing è possibile rendere parametrico il modello ad elementi finiti e ottimizzarne le prestazioni i tempi di sviluppo del prodotto.
- Per lo sviluppo di nuovi modelli, senza perdere i studi fatti in precedenza. Lo sviluppo di un nuovo veicolo comincia spesso da un modello analitico, molto semplificato e approssimato, il quale viene perfezionato a mano a mano che il progetto prende forma e sono disponibili le matematiche 3D dei componenti. Grazie ai programmi CAE è possibile trasformare il modello analitico preesistente di un veicolo con la medesima architettura, adattandolo alla geometria di stile della nuova vettura molto rapidamente, anticipando quindi le analisi preliminari all'effettiva disponibilità della geometria costruttiva.
- Per valutare i modelli prima della realizzazione, consentendo al costruttore di identificare i parametri maggiormente problematici del prodotto, che possono dare problemi in costruzione o nella sua normale funzionalità e soprattutto confrontare le prestazioni tra il proprio prodotto e i competitors (analisi della concorrenza).
- Nella simulazione di collisioni di auto con altri veicoli, pedoni o barriere.

L'applicazione dei metodi CAE nei crash test è recente, in quanto solo negli ultimi anni si è riscontrato come questi modelli virtuali si distaccano in modo

infinitesimale dalla realtà. Per accertare ciò sono stati svolti vari studi. Tra i più significativi possiamo trovare i test condotti dal NHTSA [8] e LS-DYNA [9].

In [9] si è studiato l'urto laterale di 2 veicoli di piccole e medie dimensioni (1100 kg e 2250kg) contro una barriera New Jersey in cemento. L'obiettivo principale era dimostrare la fattibilità dei modelli FEM per la valutazione dei crash e dare una linea guida sulle procedure da effettuare per arrivare a risultati attendibili e confrontabili con i test tradizionali. Il problema è stato schematizzato e studiato in modo da soddisfare i requisiti tecnici contenuti nel "Manual for Assessing Safety Hardware".

Evolution of Crash Procedures



Figura 24 -Edizioni del Manual for Assessing Safety Hardware

Le conclusioni dell'elaborato si possono riassumere nel seguente modo:

- I modelli FEM, studiati in modo dettagliato, non mostrano alcun comportamento insolito nelle simulazioni di impatto della barriera.
- Dal confronto visivo del test reale e della simulazione si è osservato un comportamento molto simile in tutte le fasi temporali del crash.
- Buone correlazioni tra i dati del crash test e i risultati della simulazione per quando riguarda il rollio, beccheggio e imbardata.
- Risultati ottimi dei veicoli studiati per quando riguarda la soddisfazione dei requisiti richiesti dal manuale.

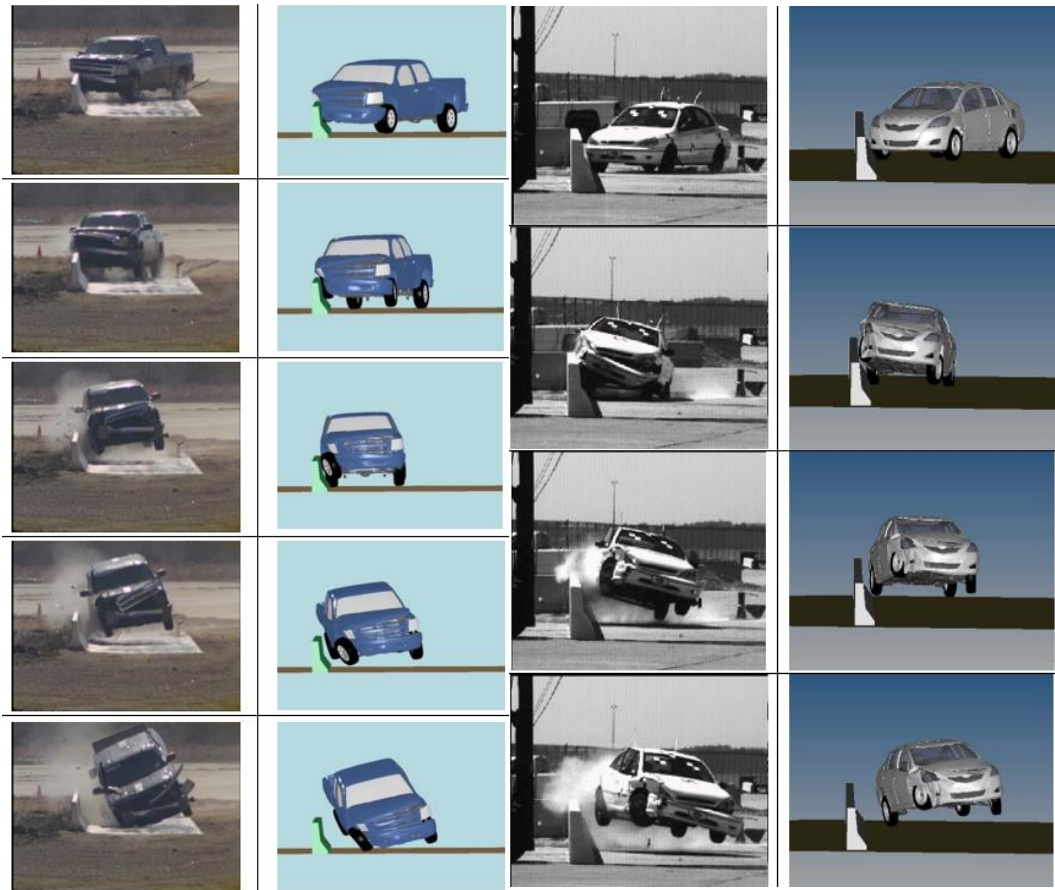


Figura 25 -Risultati dei test discussi nella 13th conferenza su ls-dyna,

Conclusioni molto simili sono sorte dallo studio fatto nell'elaborato [10].

Gli obiettivi principali prefissati dalla NHTSA erano:

- identificare e convalidare, un modello agli elementi finiti, di veicolo necessario per effettuare studi e analisi sulle diverse prove dei crash.
- confrontare il modello con i risultati dei crash test già disponibili.
- Configurare attraverso la simulazione un miglior modo per effettuare il test frontale con offset obliquo nella realtà.
- Confrontare i risultati della simulazione con i dati del test con offset obliquo reale, ove disponibile.
- raccogliere risultati che devono essere utilizzati per stabilire gli obiettivi di progettazione, in modo tale da ridurre al minimo la deformazione dell'abitacolo negli incidenti frontali con offset obliquo sul lato sinistro e destro.

Altri progetti, che si avvicinano al nostro elaborato, sono presentati in [10].

Questo progetto si concentra sull'interazione tra auto e pedoni. L'obiettivo principale dell'elaborato è ridurre le lesioni ai pedoni in caso di incidente (trauma cranico, lesione alla gamba, ecc.). Si è eseguita la simulazione dell'impatto della testa successivamente calcolato il valore HIC (criteri di lesione alla testa) grazie a LS-PrePost. In questo studio viene inizialmente studiato il semplice impatto della testa sulla parete rigida. Infine, sono stati ricavati risultati importanti come stress, deformazione, energia del sistema, valori HIC sono derivati in post-elaborazione.

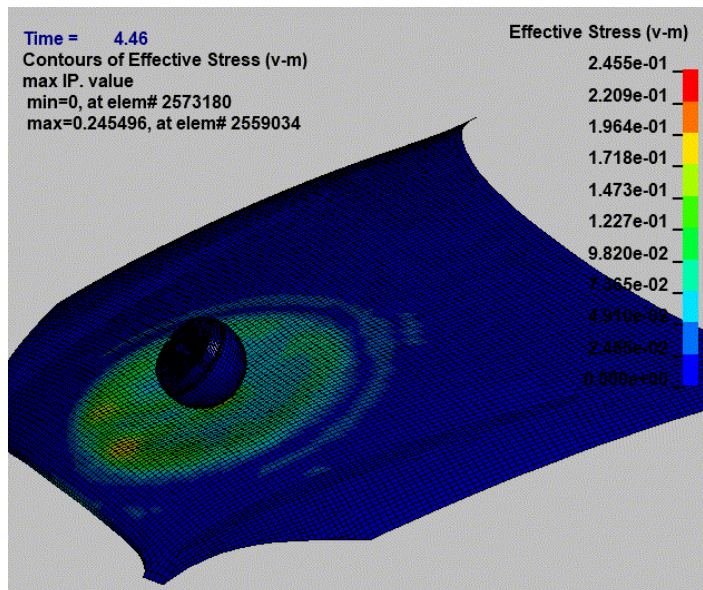


Figura 26 -Modello studiato nel test

Un secondo elaborato di spunto per la tesi è stato il progetto [11] , di Ajinkya Bhonge, che grazie al software Catia è stato capace di modellare un cofano del automobile da zero, rispettando tutti i requisiti di progettazione. Successivamente per mezzo di ANSYS in particolare con l'analisi esplicita (Explicit Dynamics), è stato in grado di studiato il comportamento del crash del cofano contro un muro.

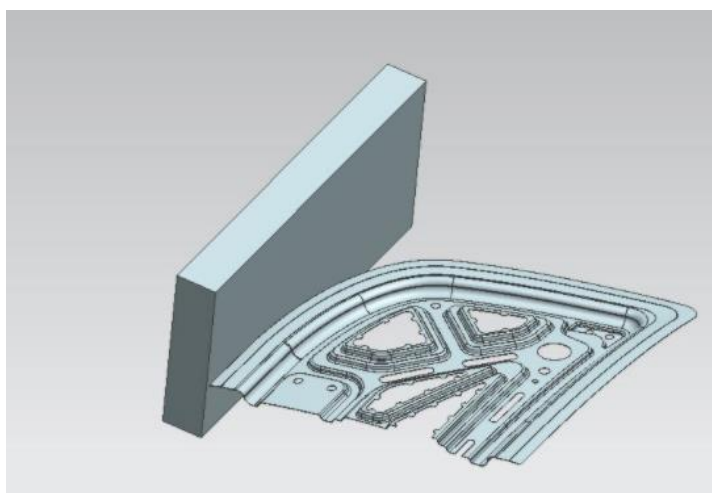


Figura 27 -Modello progettato e studiato da Ajinkya Bhonge per lo studio del crash frontale

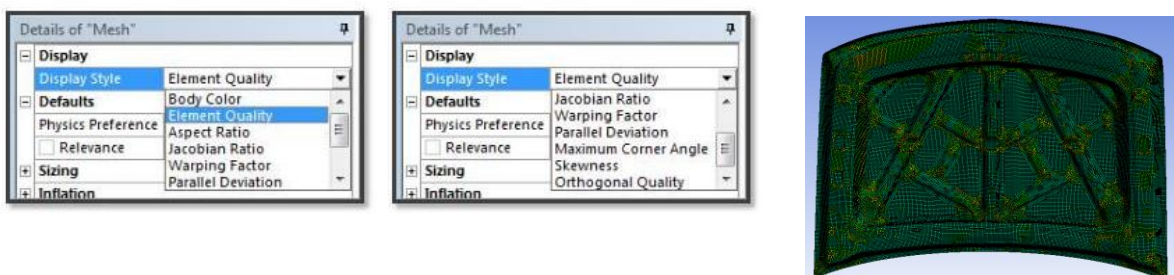
1.4. Qualità della mesh

La qualità della mesh gioca un ruolo significativo nell'accuratezza e stabilità del calcolo numerico. Tuttavia, il valore limite e il tipo di elemento da utilizzare dipendono principalmente dall'applicazione. Indipendentemente dal tipo di mesh utilizzato nel dominio, il controllo della qualità della mesh è essenziale. A seconda del tipo di celle nella maglia (tetraedrica, esaedrica, poliedrica, ecc.) vengono valutati diversi criteri di qualità. La valutazione della mesh all'interno di Mechanical può essere fatta in 3 modi, che forniscono i seguenti risultati.

- **Creazione di metriche mesh**, impostazione accessibile dall'albero presente in Mechanical nella voce Mesh. Permette la generazione di grafici a barre che mostra quanti elementi rientrano nelle dieci zone di Metriche di elemento.



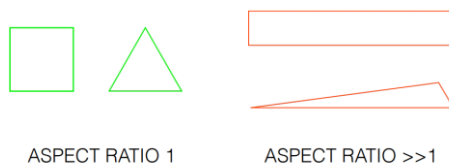
- **Creare grafici a colori** anche questa impostazione è accessibile dall'albero presente in Mechanical nella voce Mesh e va a creare delle differenti colorazioni alla mesh in base al valore dell'elemento.



- **Prospecting Element Shape Quality con risultati definiti dall'utente:** in questo caso avviene una valutazione della qualità degli elementi nel postprocessing. Gli elementi nella loro forma deformata vengono valutati, in un tempo di soluzione impostabile dall'utente.

Principalmente 3 parametri sono molto importanti, ovvero:

- **Element quality** indice compreso tra 0 e 1 che indica quanto l'elemento si distacca dal cubo o quadrato perfetto, se 1 ho un quadrato perfetto se ho 0 ho elementi con volume nullo.
- **Skewness** è definita come la differenza tra la forma della cella e la forma di una cella equilatera di volume equivalente. Le celle molto inclinate possono diminuire la precisione e destabilizzare la soluzione. Ad esempio, le mesh quadrilatere ottimali avranno angoli dei vertici prossimi a 90 gradi, mentre le mesh triangolari dovrebbero preferibilmente avere angoli prossimi a 60 gradi e tutti gli angoli inferiori a 90 gradi. Una regola generale è che la massima asimmetria per una maglia deve essere mantenuta al di sotto di 0,95, con un valore medio inferiore a 0,33. Un valore massimo superiore a 0,95 può portare a difficoltà di convergenza e può richiedere la modifica dei controlli del solutore, come la riduzione dei fattori di sotto-rilassamento e / o il passaggio al solutore accoppiato basato sulla pressione.
- **Aspect ratio** è una misura dell'allungamento della elemento. È definita come il rapporto tra la lunghezza del lato più lungo e quella dello lato più corto. Varia da 1 a valori maggiori di 1. Una mesh è tanto più buona tanto quando il valore è vicino a 1.



2. MATERIALI E METODI

Questo paragrafo ha lo scopo di presentare gli strumenti necessari per ottimizzare la forma del cofano e riprodurre il crash test.

2.1. Strumenti CAE

LS-DYNA in ANSYS Workbench

Per la simulazione dell'impatto del cofano contro il muro è stata predisposta un'analisi dinamica con solutore esplicito. Il solutore utilizzato è LS-DYNA, in grado di risolvere problemi altamente non lineari e simulare la risposta dei materiali a sollecitazioni forti di breve durata. I file leggibili e risolvibili dal solutore ls-dyna sono dei file di estensione .k (Key-file) (Figura 28). I k-files sono dei file di input ovvero file costituiti da parole chiave, che definiscono il problema; possono contenere varie informazioni ad esempio la geometria, il materiale, la posizione dell'elemento o del nodo, i carichi applicati ed infine anche informazioni più complesse come contatti o smorzamenti. Per semplificare la preparazione di tali file e elaborare i risultati sono necessari dei software di Pre e Post-processing. I software utilizzabili per fare tali operazioni sono LS-PrePost oppure ANSYS. Nel nostro caso si è utilizzato LS-DYNA all'interno del Workbench di ANSYS. Con ANSYS LS-DYNA si può gestire facilmente modelli che contengono quantità elevate di parti o superfici che interagiscono reciprocamente e prendere in esame in che modo il danneggiamento di un singolo componente agisca sul sistema di cui fa parte.

```

*PART
aluminum block
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      PID      SECID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
          1          1          1
*SECTION_SOLID
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      SECID      ELFORM      AET
          1
*MAT_ELASTIC
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      MID      RO      E      PR      DA      DB      K
          1      2700.      70.e+09      .3
*ELEMENT_SOLID
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      EID      PID      N1      N2      N3      N4      N5      N6      N7      N8
          1          1          1          2          3          4          5          6          7          8
*NODE
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      NID      X      Y      Z      TC      RC
          1          0.          0.          0.          7          7
          2          1.          0.          0.          5          0
          3          1.          1.          0.          3          0
          4          0.          1.          0.          6          0
          5          0.          0.          1.          4          0
          6          1.          0.          1.          2          0
          7          1.          1.          1.          0          0
          8          0.          1.          1.          1          0
*LOAD_SEGMENT
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      LCID      SF      AT      N1      N2      N3      N4
          1          1.          0.          5          6          7          8
*DEFINE_CURVE
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      LCID      SIDR      SFA      SFO      OFFA      OFFO      DATTYP
          1
$-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$      A1      O1
          0.          0.
          1.          70.e+05
*END

```

Figura 28 - Esempio di un Key-file della deformazione di un blocco di alluminio adagiato sul pavimento con una pressione applicata sulla superficie superiore

RBF Morph

Nel elaborato si è studiato prima la collisione del cofano della Honda Accord, dove la geometria con mesh è stata scaricata dal sito NHTSA. Successivamente, per un'applicazione di impiego più vasto è stato interessante applicare la strategia del morphing per una modifica sostanziale della geometria in esame. Con questa metodologia le maggiori industrie nell'Automotive attraverso fusioni e coalizioni di marketing avrebbero la possibilità di condividere gli studi effettuati su diversi modelli per poi applicarli ai nuovi, con un evidente risparmio in termini di tempo lavoro, quindi economico. L'obiettivo, quindi è quello di ottenere una modifica senza variazioni compromettenti della qualità della mesh originale, partendo dal modello in esame e cercando di sovrapporlo ad un cofano appartenente ad un'altra auto, la Chevrolet Silverado. Questa procedura è stata realizzata mediante gli strumenti di mesh morphing

Una delle aziende pioniere e fornitore leader a livello mondiale di tecniche e soluzioni di morphing numerico concepite per gestire in modo efficiente studi di ottimizzazione della forma riguardanti le applicazioni industriali più impegnative è RBF Morph. Lo sviluppo di RBF Morph è iniziato alla fine del 2007 come strumento custom nell'ambito di una consulenza industriale per un top team di Formula 1 con l'obiettivo di parametrizzare la forma di modelli CFD di grandi dimensioni. Nel 2009 è stata rilasciata la prima versione commerciale di RBF Morph, subito premiata in occasione della European Automotive Simulation (EASC) come Most Advanced Approach using integrated and combined simulation methods. Ad oggi ha avuto svariati aggiornamenti e miglioramenti, questo ha fatto sì che una Mesh da 100 milioni di celle può essere spostata usando 500.000 punti sorgente in circa 15 minuti (tempo totale per fit + morphing). Anche i criteri per la definizione dei punti sorgente si sono arricchiti nel tempo per dare risposta ad applicazioni sempre più complesse. Le prime versioni consentivano di definire i punti solo sulle superfici della Mesh; oggi RBF Morph consente di estrarre i punti su set di superfici e bordi, di posizionare punti su entità geometriche notevoli (box, cilindri, sfere), di assegnare vari tipi di movimenti per ognuno di questi insiemi di punti e di definire un numero arbitrario di punti individuali, ognuno controllato individualmente. Questi tre criteri possono essere combinati rendendo lo strumento

molto flessibile. La parametrizzazione di forma si ottiene sovrapponendo e modulando un numero arbitrario di soluzioni RBF. L'effetto della singola soluzione o di una soluzione multipla può essere visualizzato come anteprima direttamente sulle superfici di interesse in fase di set-up. RBF Morph è disponibile in tre diverse versioni: un add-on del software commerciale CFD ANSYS © Fluent ©, una versione stand alone in grado di supportare molti formati di mesh CAE e un'estensione ACT per ANSYS Workbench Mechanical e LS-DYNA. Nel nostro caso useremo un'estensione ACT.

2.2. Materiali utilizzati

Per il rivestimento esterno e i rinforzi interni del cofano è stata scelta una lega di alluminio lavorabile per deformazione plastica così da rendere il pezzo più leggero ma allo stesso tempo avere delle ottime proprietà, necessarie per la lavorazione come elevata saldabilità, deformabilità e tenacità mentre un acciaio con maggiore resistenza meccanica ed a usura per le parti che andranno in contatto con il telaio dell'auto, come ad esempio le cerniere e i piedi di appoggio.

Le leghe di alluminio da lavorazione plastica vengono classificate in funzione della composizione chimica all'interno di otto famiglie (serie) che si distinguono fra loro per i principali costituenti di lega; infatti, sono gli alliganti che fanno variare le proprietà fondamentali che contraddistinguono le serie stesse. Nella serie 6000, i principali alliganti sono magnesio e silicio, che conferiscono buone proprietà meccaniche e saldabilità. Sono leghe sottoponibili a trattamento termico, infatti non alterano le proprie caratteristiche se sottoposte a ciclo di verniciatura e cottura. Nell'ambito automobilistico i particolari esterni delle carrozzerie impongono qualità superficiali di prima classe. In Europa, a tal scopo vengono utilizzate unicamente leghe sottoponibili a trattamento termico che allo stesso tempo possiedono proprietà come formabilità e orlatura. Per i componenti interni, possono essere utilizzate sia leghe sottoponibili che non sottoponibili a trattamento termico, in questo caso si opta principalmente per le leghe 5000 che sono più economiche ma con proprietà molto simili alle 6000.

Per questa tesi si è usata la lega 6016, è un materiale con buona resistenza alla corrosione, ed usato per stampaggio a freddo. La lega è fornita allo stato T4, ovvero dopo trattamento di solubilizzazione, tempra ed invecchiamento naturale fino ad una condizione di stabilità. La percentuale in peso degli elementi alliganti è mostrata nella tabella:

Designazione	Composizione chimica					
	Si, %wt	Fe, %wt	Cu, %wt	Mn, %wt	Mg, %wt	Al
AA6016	1,10	0,28	0,069	0,058	0,39	rimanente

Figura 29 -Proprietà chimiche lega AA6016

Come acciaio si è scelto la lega AerMet, un tipo di acciaio legato martensitico ad altissima resistenza. I principali elementi di lega sono cobalto e nichel, ma vengono aggiunti anche cromo, molibdeno e carbonio. Le sue eccezionali proprietà sono durezza, resistenza alla trazione, resistenza alla frattura e duttilità. Aermet è saldabile senza necessità di preriscaldamento. Tuttavia, non è resistente alla corrosione per questo richiede trattamenti superficiali come la verniciatura.

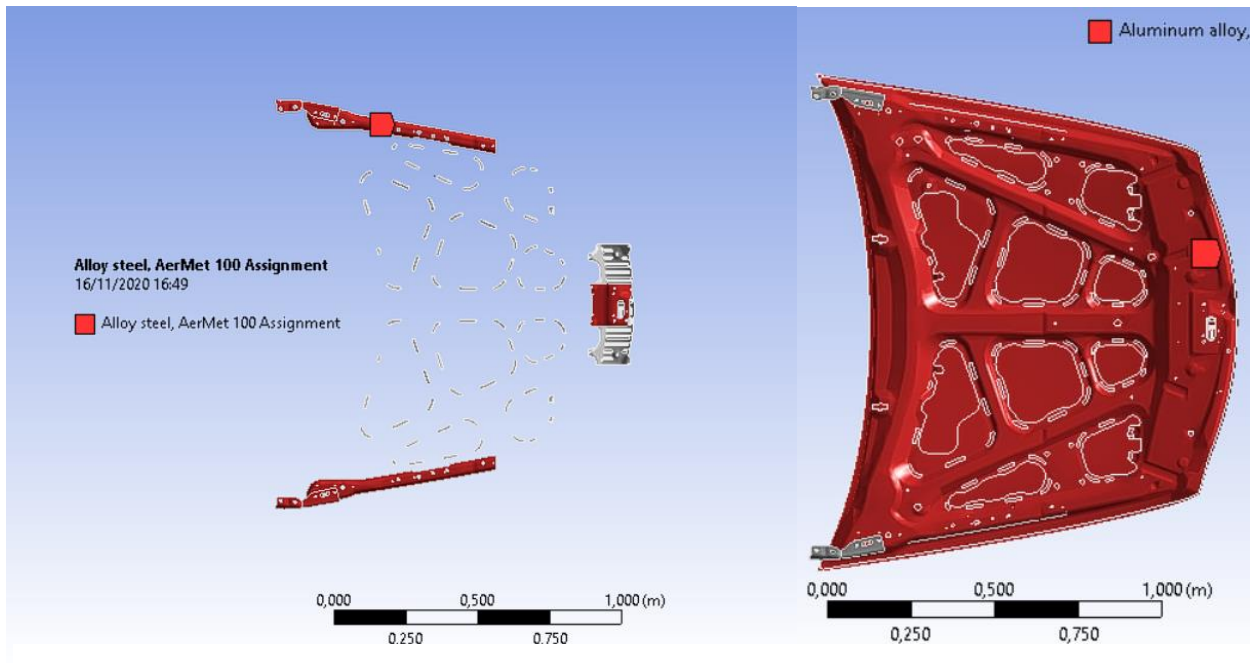


Figura 30 -Materiali usati per il test nel presente elaborato

2.3. Studio cofano della Chevrolet Silverado

Nei capitoli successivi viene mostrato l'iter progettuale per arrivare ai risultati desiderati ovvero confrontare i risultati dati da uno studio a crash del cofano originale di un pick-up (Chevrolet Silverado) con i risultati ottenuti simulando il cofano di una berlina (Honda Accord) morphato in modo tale da avere una griglia computazionale simile a quella del Silverado. Il primo studio è stato fatto sul Pick-up.



Figura 31 – Chevrolet Silverado

Importazione Mesh

La Mesh del solo cofano è stata reperita online, dal gruppo NHTSA statunitense, appartenente ad un modello integrale della vettura Silverado prodotta dalla Chevrolet. Il file utilizzato è (estensione .k), descritto già nei capitoli precedenti. Per isolare il cofano dall'intera auto e creare la shell che andrà a formare il muro si è usato LS-PrePost. Per avere una buona attendibilità dei risultati e la riuscita della simulazione è stato necessario creare la shell del muro con dimensione degli elementi simile a quella del cofano.

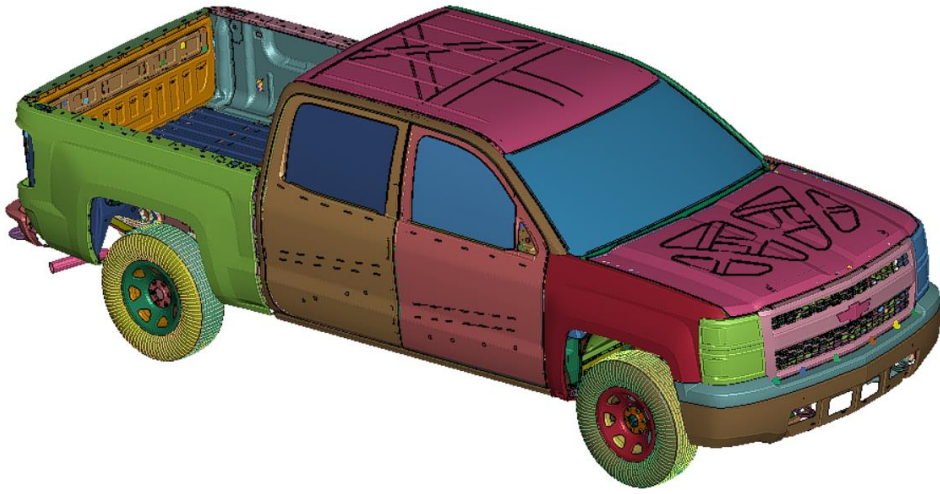


Figura 33 -Modello con mesh del Chevrolet Silverado reperita da NHTSA

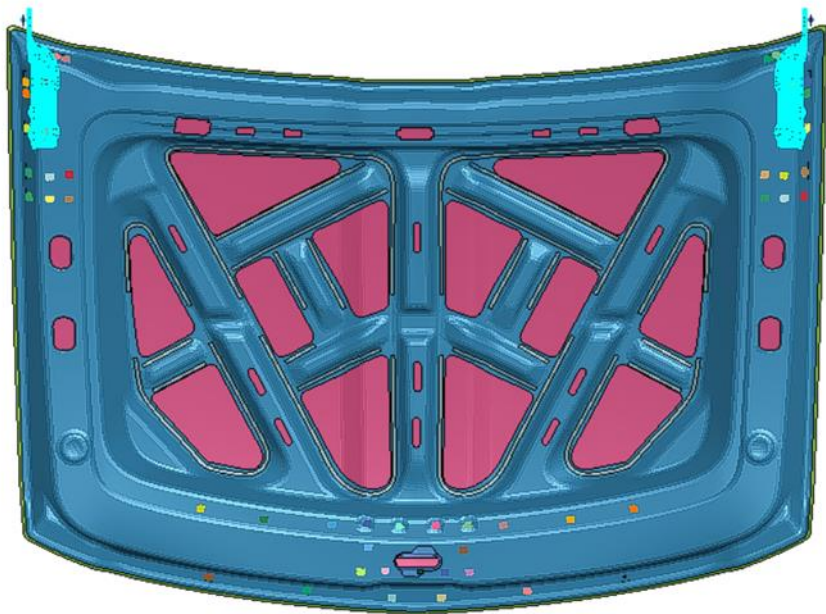


Figura 32 Parte inferiore del cofano del Silverado

Per lo studio all'interno dell'ambiente ANSYS è stato necessario importare la mesh del cofano compreso di muro attraverso un componente External model, per poi lavorare su una dead mesh. Questo primo componente è stato collegato ad un secondo blocco denominato Mechanical model.

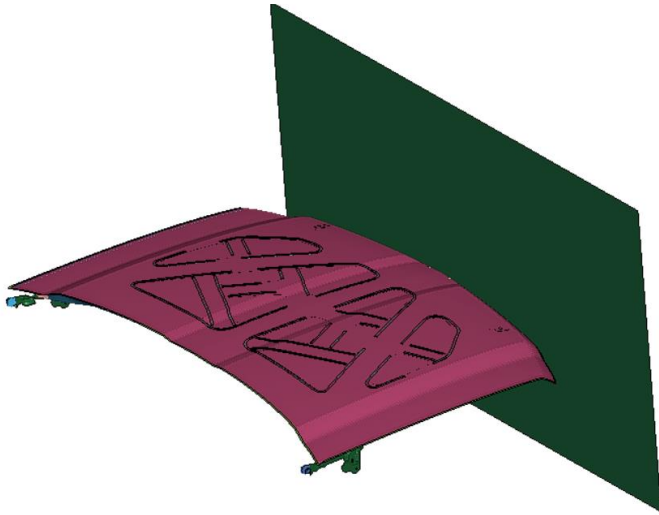


Figura 34 -Cofano e muro preparati con ls-prepost e pronti ad essere esportati in Mechanical

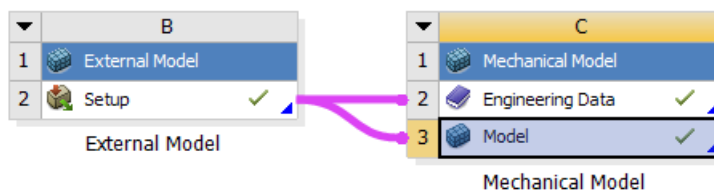


Figura 35 -Importare file .k in ANSYS

Dopo l'importazione del file .k sono state inserite manualmente tutte le caratteristiche mancanti come le informazioni riguardanti gli spessori degli elementi shell ed il materiale utilizzato.

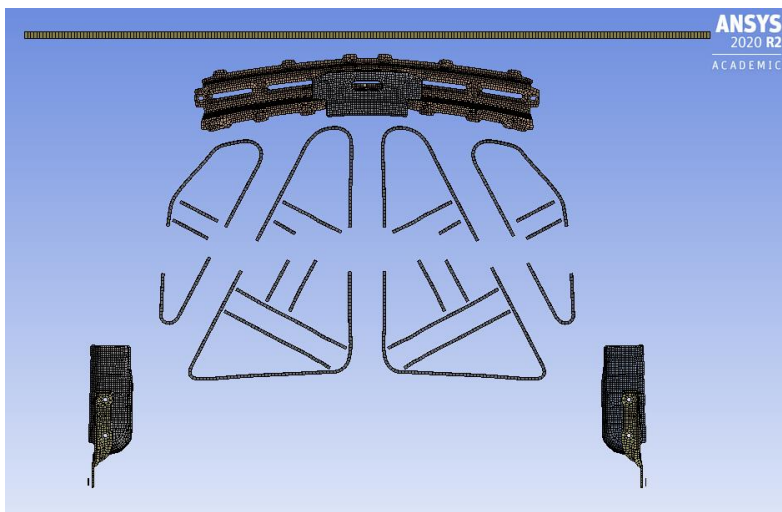
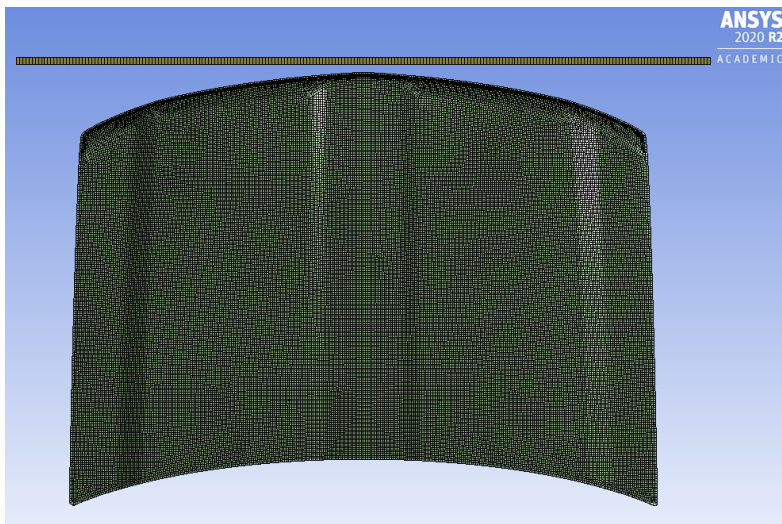
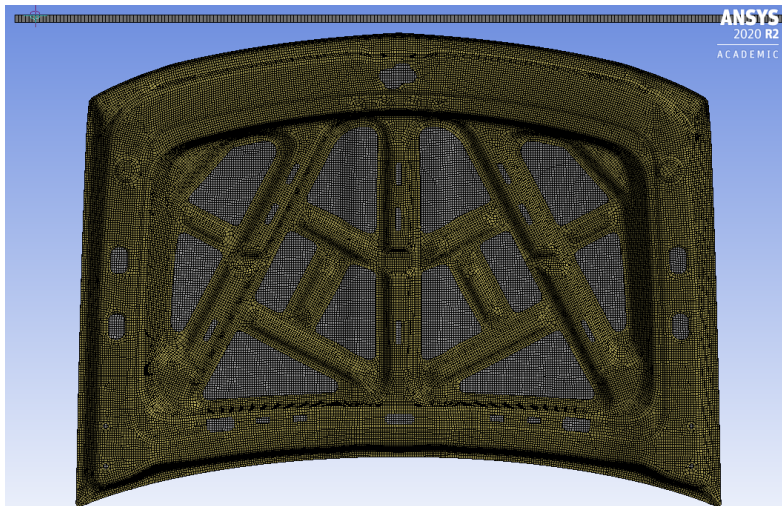


Figura 36 -Modello del cofano con mesh importato in Meccanical

Analisi Dinamica

Una volta importata la mesh e impostate le caratteristiche mancanti dovute alla diversa estensione del file di provenienza, si procede con l'analisi dinamica mediante LS-Dyna.

Creata all'interno del Workbench di ANSYS il componente LS-DYNA si importa il lavoro compiuto con la mesh.

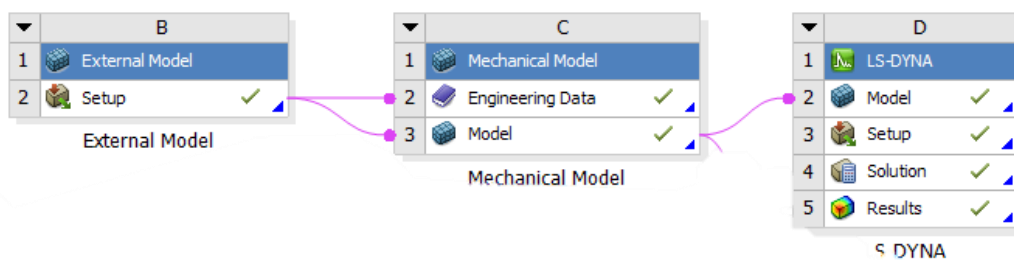


Figura 37 -Blocco LS-DYNA

Successivamente si forniscono le condizioni al contorno necessarie per svolgere la simulazione:

- velocità del cofano di 50 km/h
- corpi rigidi con la funzione “Explicit Rigid Bodies”
- traslazione e rotazione del muro vincolata
- massa battente da rallentare durante l’impatto uguale al 10 % del peso dell’auto

Come impostazioni di analisi per il solutore esplicito invece si imposta:

- End time di 0,05 s
- Max Number of cycles 10000000

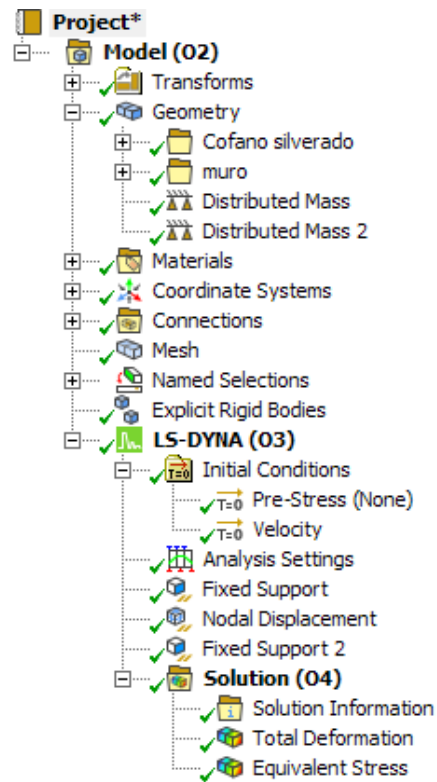


Figura 39 -Albero del progetto per la simulazione dell'urto frontale della Honda Accord

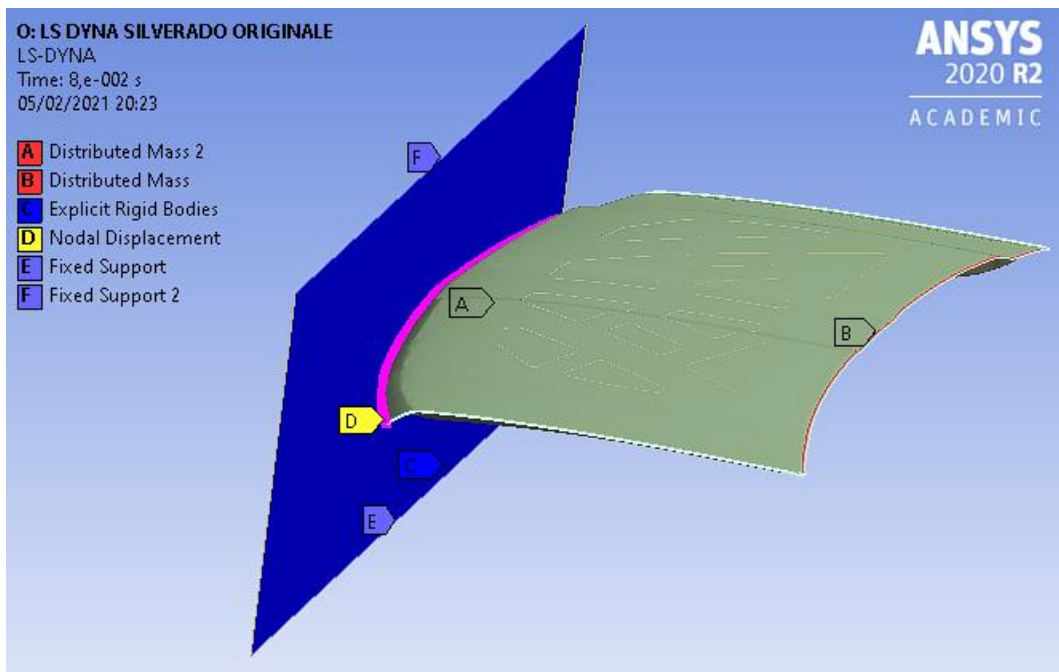


Figura 38 -Modello della simulazione LS_DYNA

Fatta girare la simulazione e assicurandosi che i risultati sono attendibili, si salva il tutto.

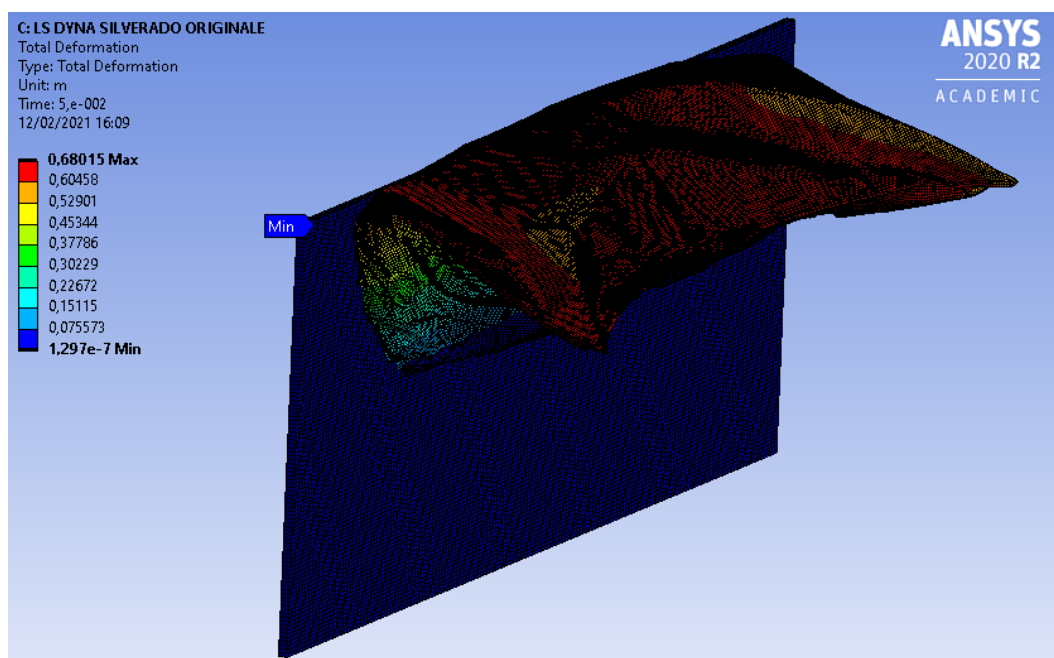


Figura 40 Risultati dell' analisi dopo la simulazione di 0,05s per il cofano del Silverado originale

2.4. Studio Honda Accord 2011

Dopo lo studio del cofano del Silverado si procede con lo studio del cofano di un'auto completamente differente, ovvero quello di una Honda Accord. Tale studio viene effettuato non per studiare il comportamento a crash, poiché si può già reperire dal sito della NHTSA, ma perché si vuole sfruttare il morphing applicabile sul cofano della Berlina per effettuare una modifica di design in modo di adattare tutti i rinforzi interni, le saldature, le cerniere e le superfici di contatto delle guarnizioni sulla nuova auto. Fare tale procedimento è un gran vantaggio per gli ingegneri che devono progettare una nuova auto, poiché possono condividere e conservare gli studi effettuati già su modelli precedenti, senza riprogettare tutto, ma concentrandosi principalmente sull'ottimizzazione. Nel nostro caso conoscendo i risultati della simulazione del cofano Silverado originale ci concentriamo sulla ottimizzazione del cofano della Honda aggiornato, in modo tale i 2 cofani abbiano una risposta simili in caso di urto.



Figura 41 Honda Accord

Il primo passo è quello di reperire il cofano già con la mesh online, come la geometria della Chevrolet anche la geometria del cofano della Honda è stata reperita nel sito dal gruppo NHTSA.

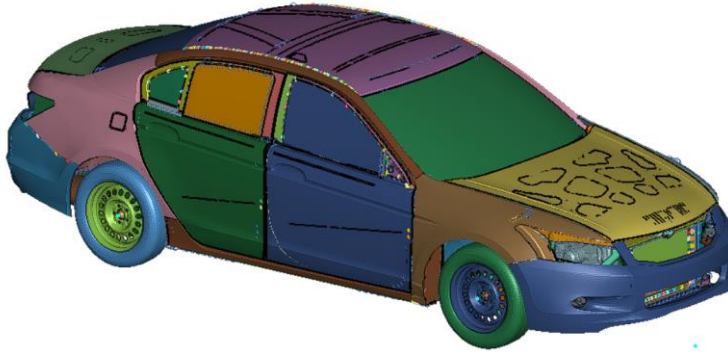


Figura 42 Modello della Honda Accord

Procedendo come già fatto per il Silverado, si isola il singolo cofano e si crea il Muro con elementi shell in LS-PrePost

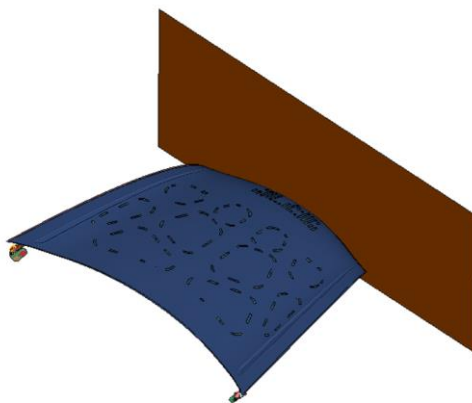


Figura 43 Cofano e muro preparati con LS-PrePost e Pronti per essere impostati in Mechanical

Si è importato successivamente il modello in Mechanical e si sono aggiunte le informazioni Mancanti.

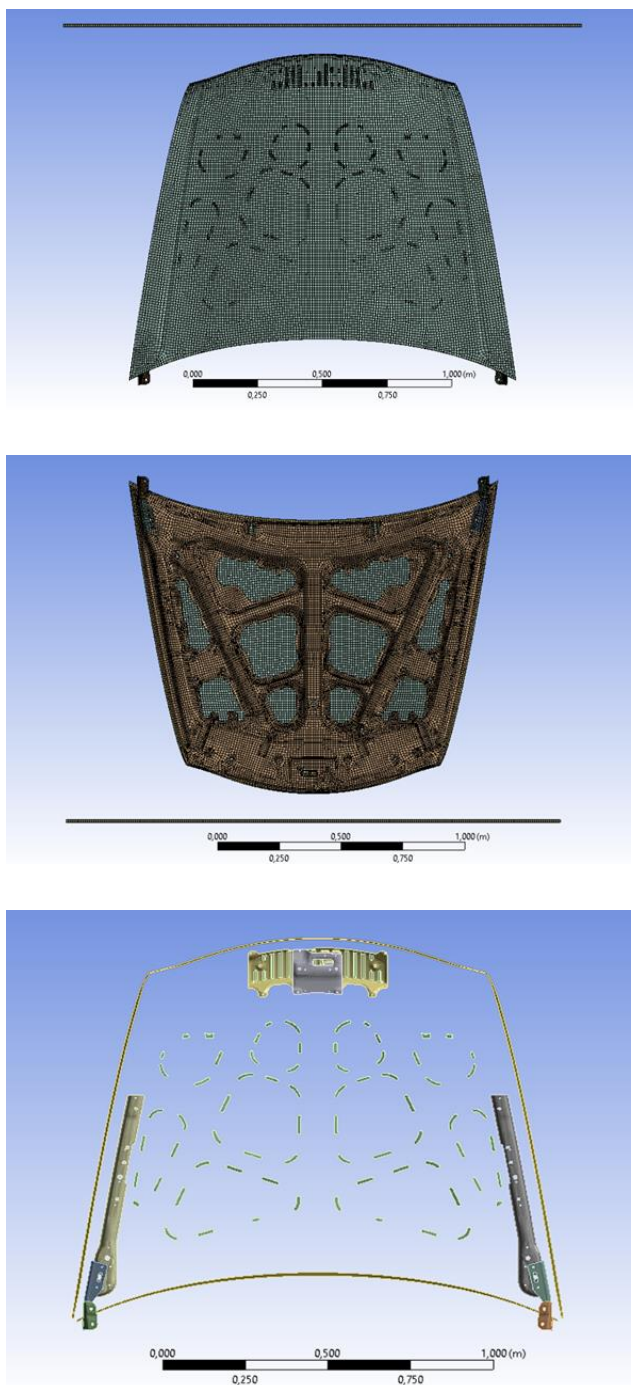


Figura 44 Modello del cofano con mesh importato in Mechanical

Il modello importato si compone di 119 solid body (punti e cordoni di saldatura) e 10 superfici rispettivamente discretizzati attraverso elementi solidi Hex8 (esaedrico a 8 nodi) e Wed6 (parallelepipedo a base triangolare a 6 nodi), Quad 4 (shell a 4 nodi) e Tri3 (shell a 3 nodi). In totale sono 41979 nodi e 38952 elementi.

Sovrapposizione mesh Honda al nuovo design

Per morphare il cofano della Honda su quello del Silverado è necessario avere una superficie guida che mi permetta di definire un campo di spostamento per il cofano della Honda di partenza. Per fare ciò si fa uso di un programma di modellazione CAD 3D incorporato in ANSYS ovvero SpaceClaim.

Si importa il cofano del Silverado su SpaceClaim e attraverso la modellazione di una superficie si ottiene la forma superiore del cofano del Silverado.



Figura 45 – Superficie cofano Chevrolet Silverado

A questo punto è possibile utilizzare l'estensione RBF Morph. Per utilizzarla correttamente e generare il morphing, esistono dei principi di funzionamento di base che sono di fondamentale importanza:

- La posizione nell'Albero dell'oggetto RBF Morph riflette la sua posizione nel flusso di lavoro CAE, vale a dire dopo la generazione del mesh ma prima dell'analisi FEM sulle configurazioni del modello che ha subito il morphing;

- Consente di modificare la mesh spostando i nodi ma preservandone la consistenza, ovvero lo stesso numero originale di nodi e la tipologia delle celle;
- Per definire i punti RBF fa uso di entità geometriche (facce, bordi e vertici), mesh (nodi)
- Stare attenti al fatto che le azioni di morphing non tengono conto dei vincoli strutturali (supporti) e dei carichi;
- Possono essere studiate nuove forme anche se manca una geometria CAD sottostante;
- Deve essere creato almeno un target;
- Per gestire un morphing complesso, l'estensione consente di costruire la soluzione RBF con molti target RBF, catene di source RBF collegate in cascata per generare soluzioni multi-step.

Per il nostro caso specifico è stato inoltre necessario rispettare dei requisiti fondamentali:

- La geometria della parte superiore del Silverado deve combaciare perfettamente con la geometria Morphata
- Le ossature interne devono mantenere all'incirca le stesse proporzioni per i due cofani, così da non alterare troppo le proprietà di assorbimento dell'impatto.
- Mantenimento dei vincoli geometrici e di produzione: le mesh delle lamiere a contatto devono rispettare gli spessori e non avere mai penetrazioni, le orlature devono rimanere uguali, i punti ed i cordoni di mastice non possono essere deformati, gli elementi solidi delle saldature e dei bulloni devono rimanere perpendicolari alla superficie.
- Si può accettare che alcune sezioni siano deformate, ma non sono accettabili deformazioni discontinue (le lamiere avranno sempre dei minimi raggi di raccordo).

IL morph si è fatto all'interno del Component "LS-DYNA Silverato", dove si inserisce l'applicativo per il morphing e si è impostato il setup.

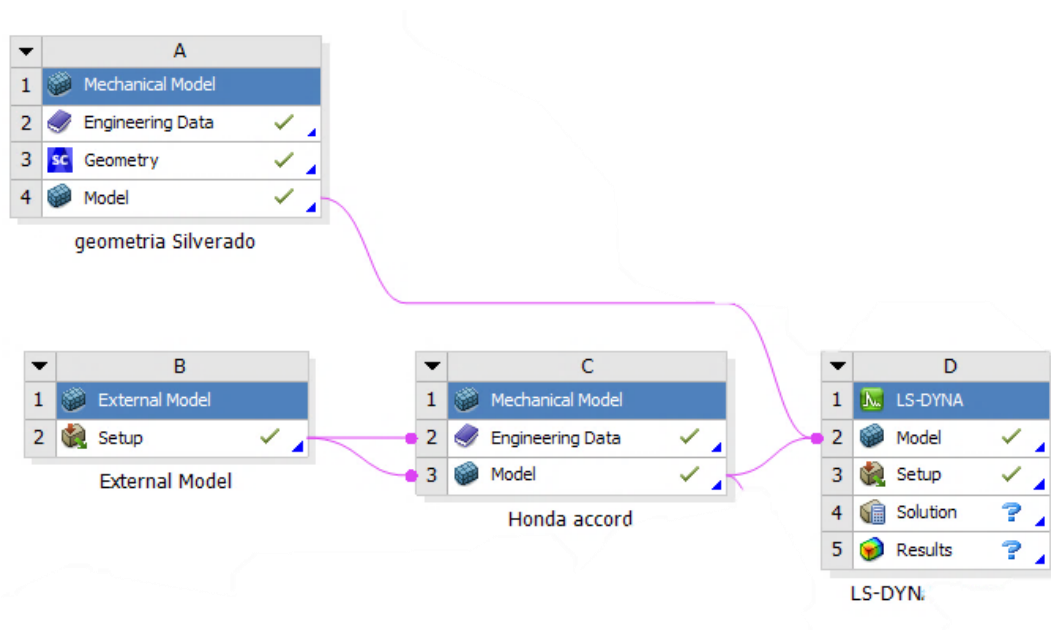


Figura 46 -Collegamenti effettuati con il component LS-DYNA Silverado

RBF Morph ACT Extension, nel suo insieme, agisce come un operatore matematico che gestisce due nuvole di punti RBF: da una parte la nuvola “target” dei cui punti vogliamo determinare lo spostamento e, dall’altra parte, la nuvola “source” in cui il campo di spostamento è noto e le RBF sono calcolate. Per una buona riuscita del Morph è utile impostare i giusti Target e Source. Dato l’alto livello di flessibilità fornito da RBF Morph per la messa a punto di complesse configurazioni di soluzioni di morphing, la struttura finale dell’albero RBF, può essere molto complessa. Qualunque sia la complessità, alcuni aspetti di tale struttura aiutano l’utente a progettare o riconoscere il suo intero funzionamento:

Nel seguito verranno utilizzati i termini “genitori” e “figli” e “target” e “source”, in riferimento agli elementi presenti nell’Albero di lavoro. In particolare, si impiegano i primi due quando ci si riferisce agli elementi dell’Albero RBF, mentre “RBF

target” e “RBF source” sono principalmente usati quando ci si riferisce agli stessi elementi ma in relazione al ruolo che hanno nel set-up della soluzione RBF)

- RBF targets, che vengono generati mediante l'oggetto RBF Morph (chiamato “root” dell’albero RBF). Tali elementi sono i “genitori” che identificano la nuvola di destinazione della nuvola di origine, che viene passata a ciascun genitore tramite il solo “figlio” di livello 1
- RBF sources di primo livello (“figlio” di livello 1) sono generate dagli RBF targets. Essi, a loro volta, consentono la generazione di RBF source di livello 2 (“figlio più giovane”) e così via. In questo modo, si possono creare catene di “figli” e la soluzione RBF di ogni “figlio” viene alimentata da quella del “figlio” più giovane ad essa collegato.

Nel rispetto del paradigma gerarchico del “figlio” RBF, la soluzione RBF di una singola sottostruttura viene costruita prendendo in considerazione la trasformazione definita dal “padre” e la soluzione RBF, compreso il contributo di tutti i suoi “figli”. Quest'ultima viene ottenuta a partire dal campo di spostamento definito per i figli più piccoli della sottostruttura, combinandolo con quello dei figli più piccoli collegati e eseguendo questa operazione per ogni livello fino a raggiungere il genitore. L'intera soluzione RBF dell'albero RBF viene infine determinata accoppiando la soluzione di tutti i sotto strati RBF.

Nel nostro caso i target sono tutti i corpi appartenenti alla mesh della Honda (918 superfici); le sorgenti invece sono le superfici e le curve che determinano il cambiamento, ovvero quelle appartenenti al Silverado (figura 39).

Le trasformazioni usate come source sono il curve targeting e surface targeting. Nel curve targeting sono stati selezionati come node selection gli edge guida che contengono la superficie del Silverado e come geometry selection gli edge del Honda. In questa fase è stata necessaria la funzione di modifica geometrica, Virtual Topology, per dividere edge da impostare come source. Nel surface targeting invece si è selezionata come node selection la superficie superiore del Silverado e come geometry selection la superficie superiore del Honda.

Target

Details of "RBF Target"	
Node Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	918 Faces
Definition	
Transformation	Translation
Translation Definition	Manual
<input type="checkbox"/> Delta x	0 m
<input type="checkbox"/> Delta y	0 m
<input type="checkbox"/> Delta z	0 m
RBF Function	
Degree	1
Combine Select	
Acting On	Undeformed
If Selected Nodes Overlap	Override
Coord Filtering	No
RBF Problem	
<input type="checkbox"/> Source	15416
<input type="checkbox"/> Target	46854

Source Curve Targeting

Details of "RBF Source"	
Node Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
Definition	
Transformation	Curve targeting
<input type="checkbox"/> Percentage	1
Invert	No
Method	Parametric
Vertex refinement	Yes
Geometry Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
RBF Function	
Degree	1
Combine Select	
Acting On	Undeformed
If Selected Nodes Overlap	Override
Coord Filtering	No
RBF Problem	
<input type="checkbox"/> Source	0
<input type="checkbox"/> Target	157

Source Surface Targeting

Details of "RBF Source"	
Node Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Transformation	Surface Targeting
<input type="checkbox"/> Percentage	1
Targeting behaviour	Along Target Normal
Geometry Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
RBF Function	
Degree	1
Combine Select	
Acting On	Deformed
If Selected Nodes Overlap	Override
Coord Filtering	No
RBF Problem	
<input type="checkbox"/> Source	521
<input type="checkbox"/> Target	15416

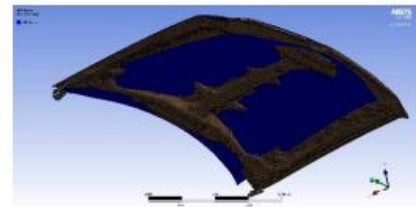
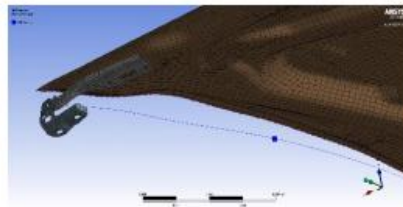
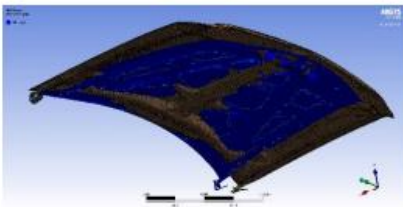


Figura 47 -Target e Source necessari per il Morphing

E' stato ottenuto il seguente risultato:



Figura 48 -Cofano Morphato

Il morphing ha permesso di ottenere risultati di qualità ma è ovvio che l'adattamento di un cofano berlina su un pick-up, porta a delle ossature interne con dimensioni non idonee e numero ridotti di rinforzi.

Tuttavia prima di agire con le ottimizzazioni si è provato a svolgere un test a crash. Per questo sono state fornite le condizioni a contorno già descritte per la simulazione precedente.

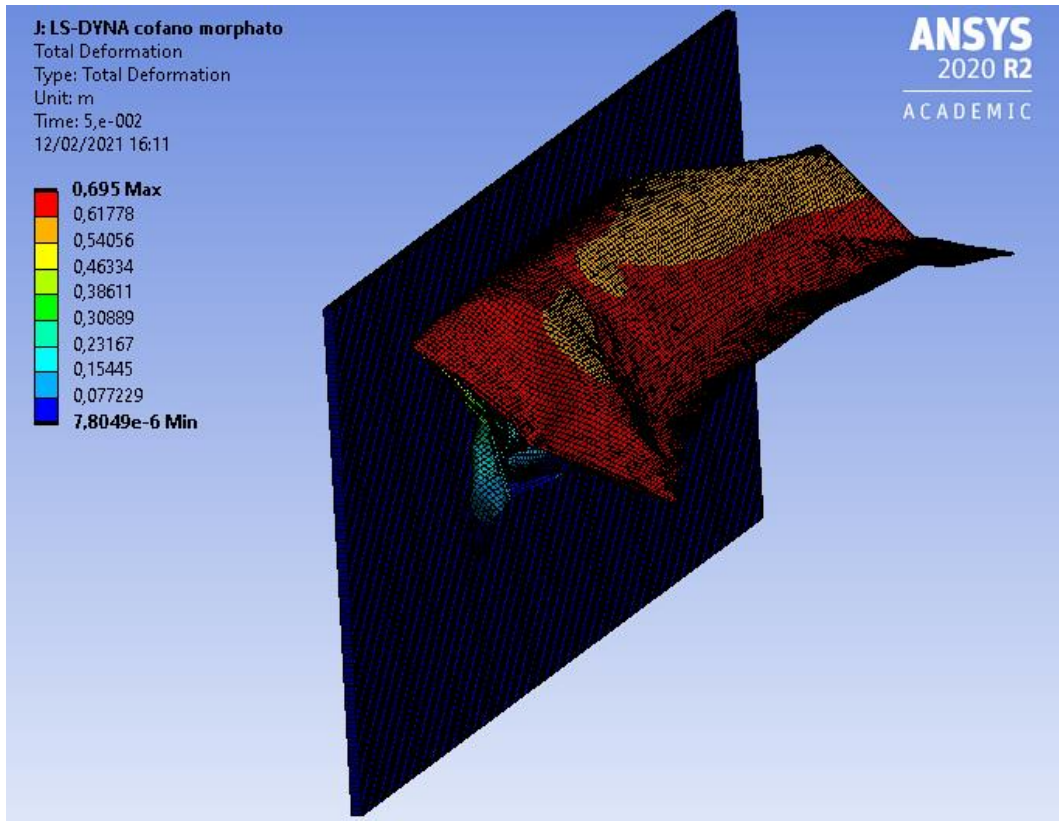


Figura 49 Simulazione fatta del cofano morphato prima dell'ottimizzazione

Ottimizzazione della struttura di rinforzo interna

Il passo successivo è stato quello di ottimizzare il tutto con lo scopo di avere un cofano morphato con un comportamento in termini di stress, deformazione ed energia dissipata durante l'urto simile a quella del Silverado originale.

Per fare ciò si è sfruttato di nuovo il morphing, ma in modo completamente differente da quella precedente. Infatti, non si è più usato il curve targeting o surface targeting ma curve offset e traslazioni. Per arrivare al risultato voluto si è agito in modo parametrico, si è partiti da un valore di curve offset negativo, che portava a una riduzione dei rinforzi interni, e si è fatto aumentare gradualmente.

Importante per ottenere una buona ottimizzazione è stato creare la superficie guida in 2D attraverso SpaceClaim con le dimensioni perfettamente coincidenti con il cofano della Honda morphato.

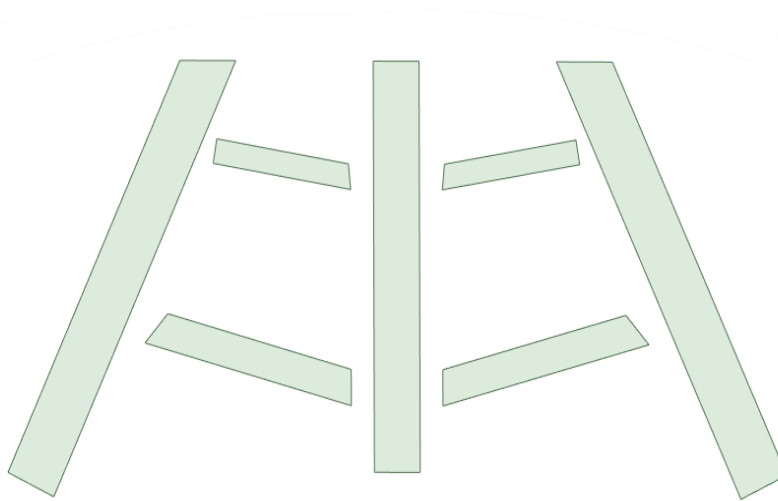


Figura 50 Superficie guida creata con SpaceClaim partendo dal cofano del Silverado ottenuto attraverso il Morphing

Oltre alle dimensioni, fondamentale è stato far coincidere con stesso angolo la superficie guida e il cofano del Silverado, questo è stato possibile con la funzione Transforms in ANSYS Mechanical.

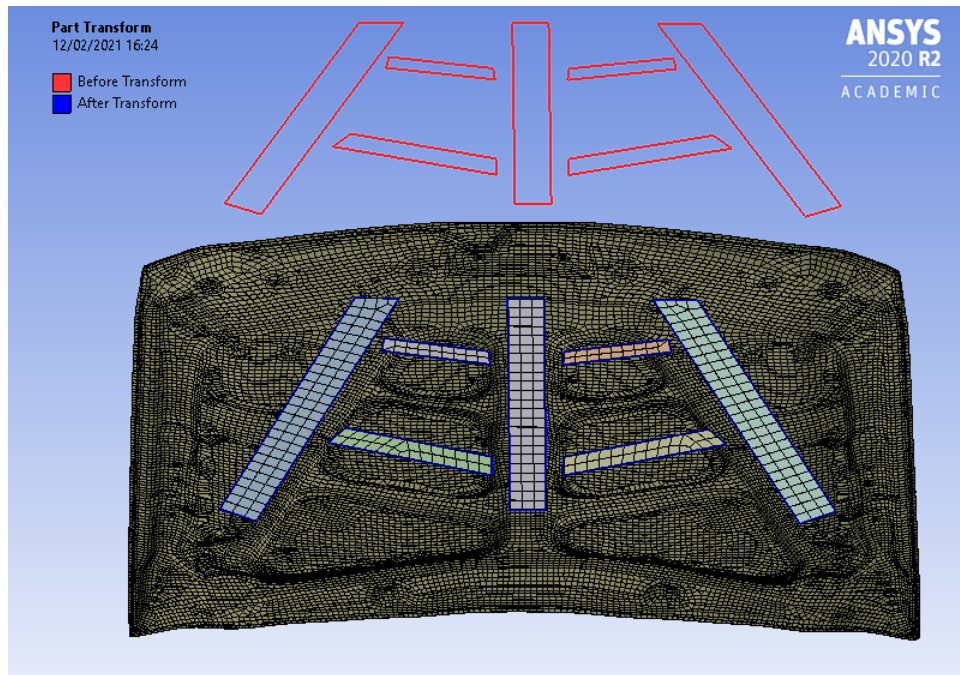


Figura 51 Applicazione del comando Trasforms in Mechanical

Il passo successivo è stato impostare i Target e i Source per ottenere il morphing. L'idea è stata quella di selezionare come Source gli edge dalla mesh di appoggio e fare in modo che questi ultimi fanno morphing sulla mesh del cofano.

In dettaglio:

- **Target** si è selezionata la superficie della Honda.
- **Source** si è impostata come trasformazione di morphing il curve offset, si sono selezionati gli angoli delle superficie guida da spostare e successivamente il valore di offset desiderato e la geometria su cui si voleva avvenisse lo spostamento. Facendo molta attenzione ad impostare tutti i Source in modo simmetrico per non creare asimmetrie all'interno del cofano.

Details of "4"	
Node Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges
General	
Transformation	Curve Offset
<input type="checkbox"/> Curve Offset	0,035 m
Geometry Selection	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
RBF Function	
Degree	1
Combine Select	
Acting On	Undeformed
If Selected Nodes Overlap	Override
Coord Filtering	No
RBF Problem	
<input type="checkbox"/> Source	0
<input type="checkbox"/> Target	55

Figura 52 Dettaglio del curve offset applicato

Necessario è stato anche impostare che alcuni elementi non si deformattero. Per fare ciò si sono impostate le traslazioni nulle sulle superfici e angoli desiderati ovvero i lati che delimitano il perimetro del cofano e la superficie superiore.

Per mantenere inalterata la superficie superiore si è provato a non inserirla nei Target ma questo comportava molti problemi, dopo qualche prova si è scelto di aggiungerla e dargli una traslazione nulla. Questo ha comportato grandi limiti nel morphing, poiché non ha permesso di eseguire grandi deformazioni, ma solo piccoli spostamenti di edge, elementi e nodi.

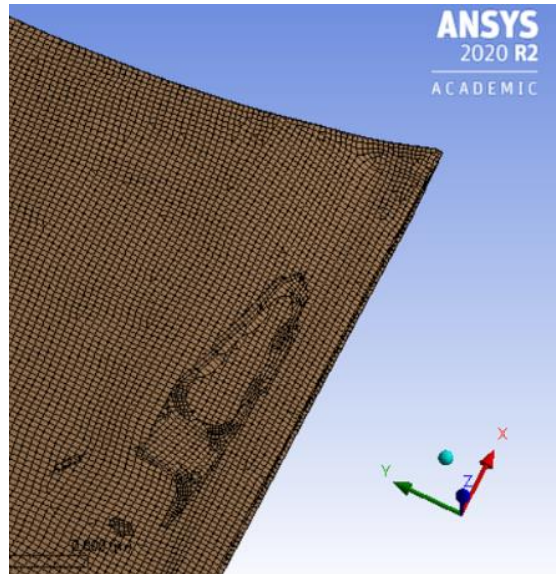
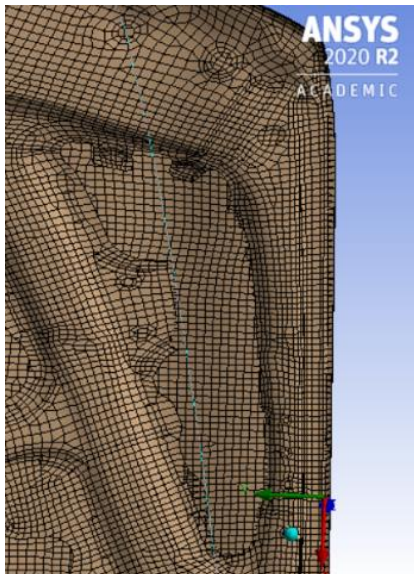


Figura 53 Esempi di problemi che si hanno se non si include nel Targhet la superficie superiore

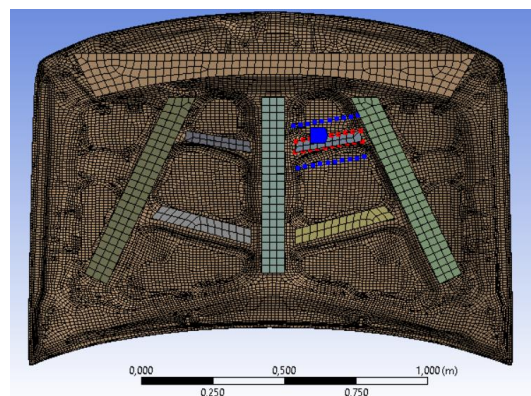
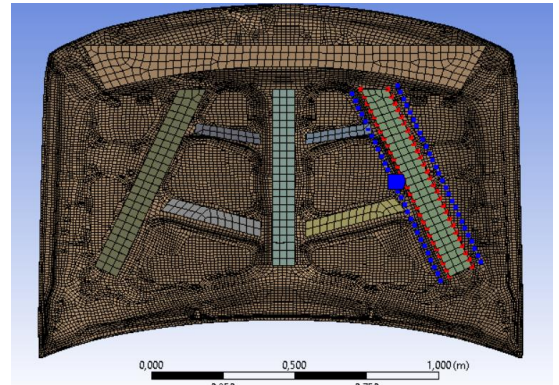
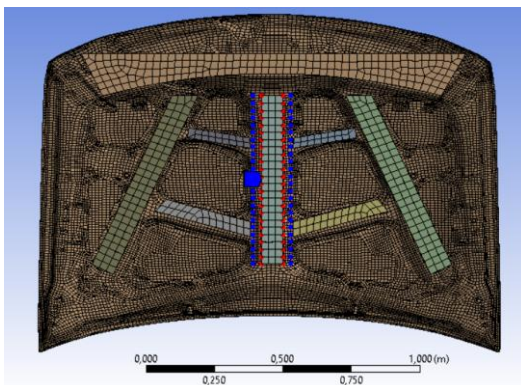


Figura 54 Preview dei Source applicati

Il primo risultato è di seguito mostrato: si può evincere come sia deformata in modo non idoneo la mesh nelle zone dei rinforzi.

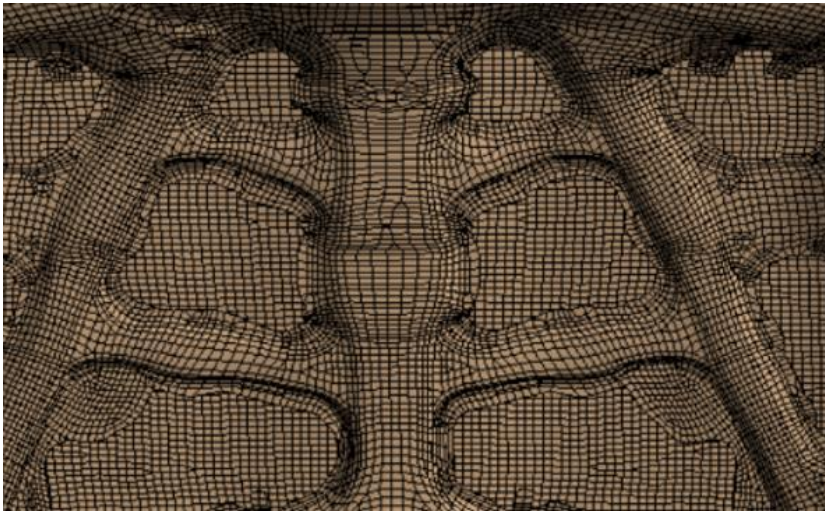


Figura 55 Deformazioni dovute al fatto che i rinforzi si devono adattare ai fori

Per risolvere in parte il problema è stato necessario adattare e fissare le dimensioni di alcuni edge della superficie inferiore del cofano. Anche questa volta facendo uso del curve offset.

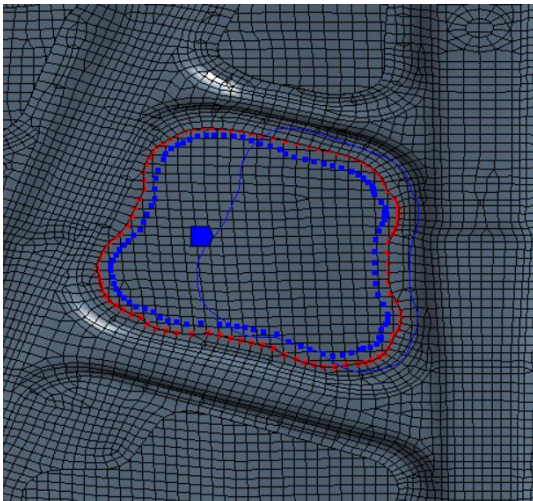


Figura 56 Curve offset mirato nella diminuzione dei spazi vuoti

Risolti tutti i problemi dati dall'applicazione dei source si è aumentato gradualmente il valore di offset ottenendo diverse griglie computazionali.

Tra le più significative, le seguenti:

Ottimizzazione 1

Nella presente ottimizzazione si è agito in modo tale di diminuire la grandezza dei supporti e si è visto cosa succedeva se si andava a simulare un corpo meno rigido. Come risultato si è avuto un peggioramento dell'energia dissipata nell'urto che ha comportato una minore riduzione di velocità della massa battente contro il muro.

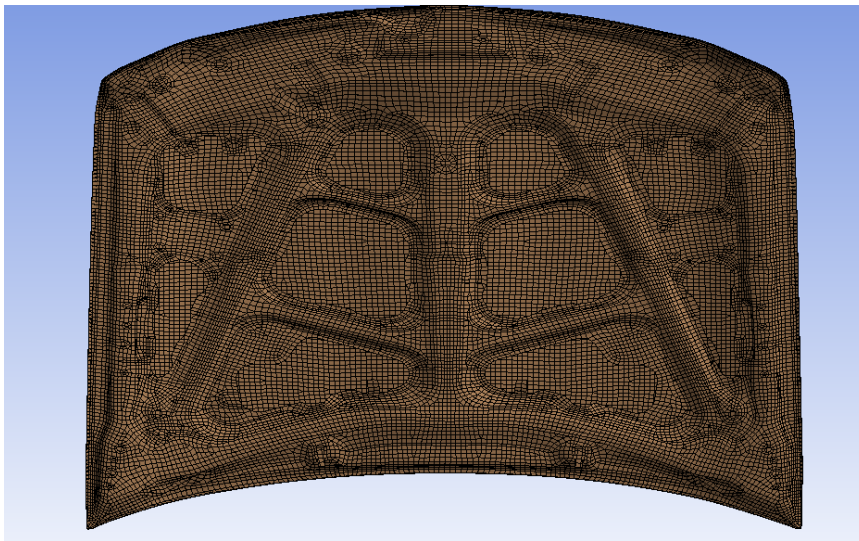


Figura 58 Prima ottimizzazione provata con lo scopo di ridurre la grandezza dei rinforzi

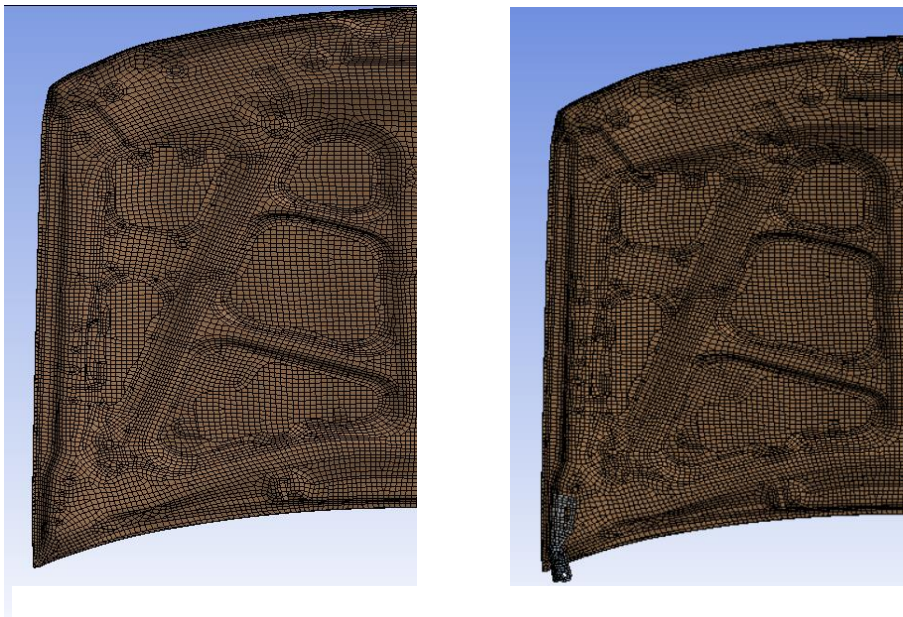


Figura 57 Prima e dopo l'ottimizzazione 1

Ottimizzazione 2

Nella seguente ottimizzazione si è aumentata la grandezza dei rinforzi. I risultati saranno presentati nell'apposito capitolo.



Figura 59 Ottimizzazione 2

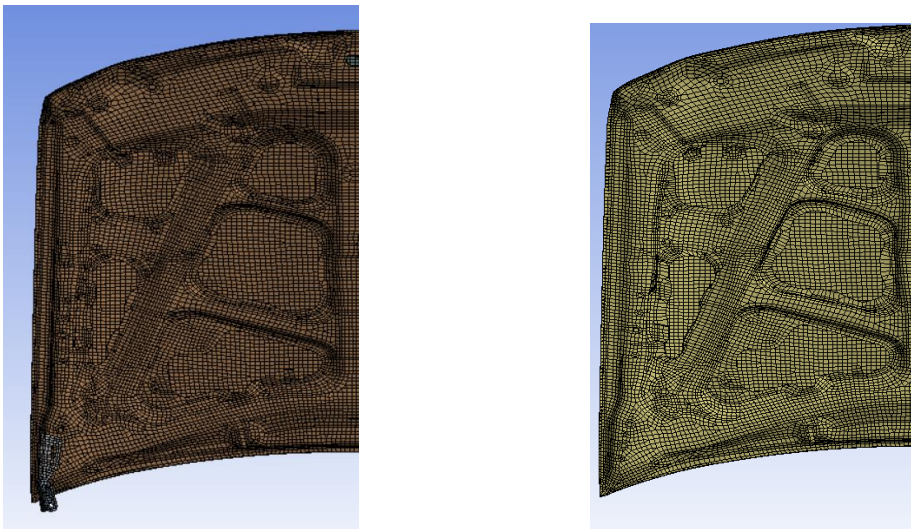


Figura 60 Prima e dopo il Morphing

Ottimizzazione 3

Quest'ultima ottimizzazione rappresenta il limite che può essere simulato tramite gli strumenti di mesh morphing senza ottenere distorsioni eccessive della mesh. Infatti, con questo morphing si è raggiunto un punto dove la soluzione non converge per l'eccessiva degradazione della griglia computazionale. Le trasformazioni eseguite per ottenere tale ottimizzazione sono le seguenti: curve offset, come per ottimizzazione 2, ma con valori maggiori e l'applicazione di traslazioni necessarie per la creazione di bugne.



Figura 61 Curve offset applicato per ottimizzazione 3

L'eccessivo valore di offset tuttavia porta ad irrigidire troppo il corpo e per evitare ciò sono state create delle bugne con la funzione traslazione di RBF Morph.

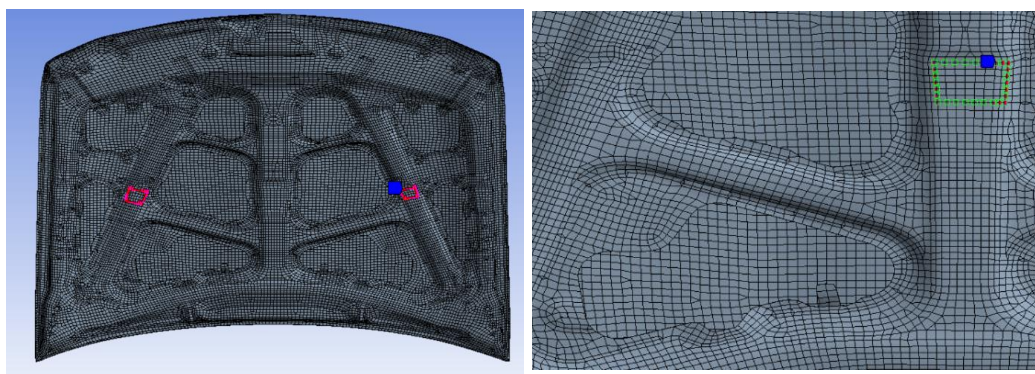


Figura 62 Creazione bugne

La mesh risultante è riportata in figura 55.

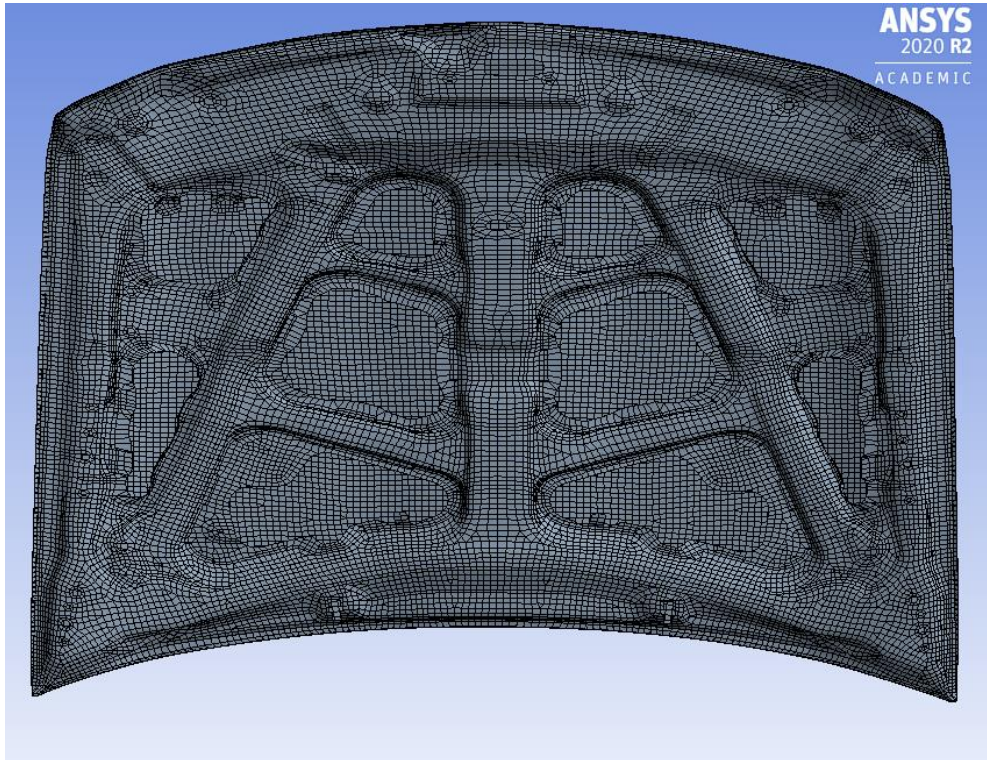


Figura 63 ottimizzazione 3 del cofano Morphato

In seguito all'analisi dei risultati, come presentato nel successivo capitolo, l'ottimizzazione 2 si è rivelata più prossima tra tutte al cofano della Silverado originale. Allora è stato provato a fare delle piccole modifiche con lo scopo di migliorare ulteriormente il cofano da un punto di vista energetico e della deformazione.

Si è continuato a seguire l'idea di rinforzare più possibile il corpo ma questa volta agendo sulle parti più esterne del cofano, sia in larghezza ma anche in altezza.

Per far ciò, è stata creata una nuova superficie guida che verrà collegata al blocco del cofano ottimizzato 2.

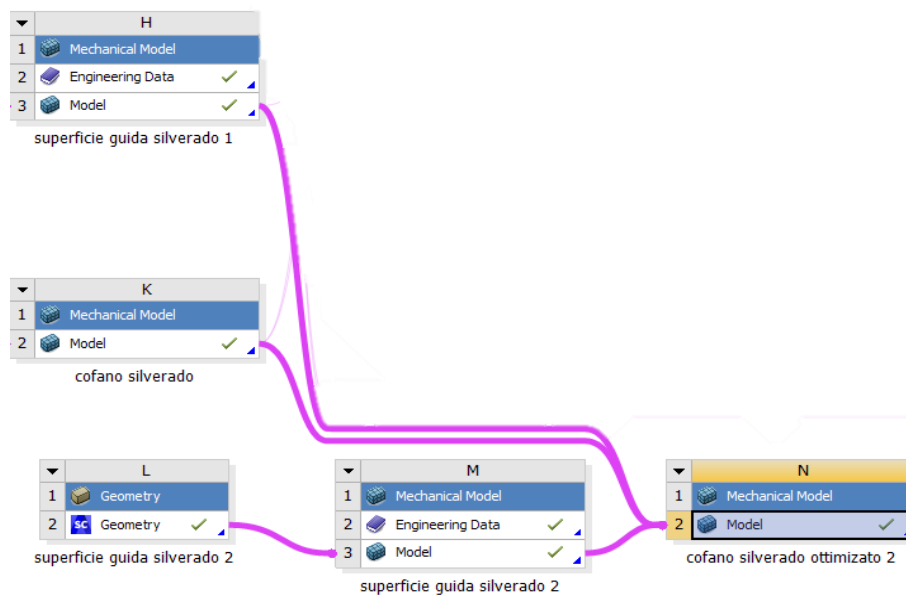


Figura 64 Blocchi in Workbench necessari per l'ottimizzazione.

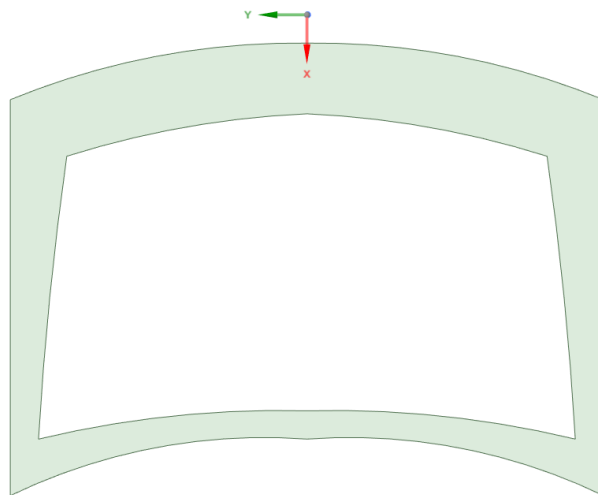


Figura 65 Superficie guida necessaria per la seconda ottimizzazione

Sulla superficie guida creata è stata applicata di nuovo la trasformazione curve offset nello stesso modo fatto per la precedente ottimizzazione.

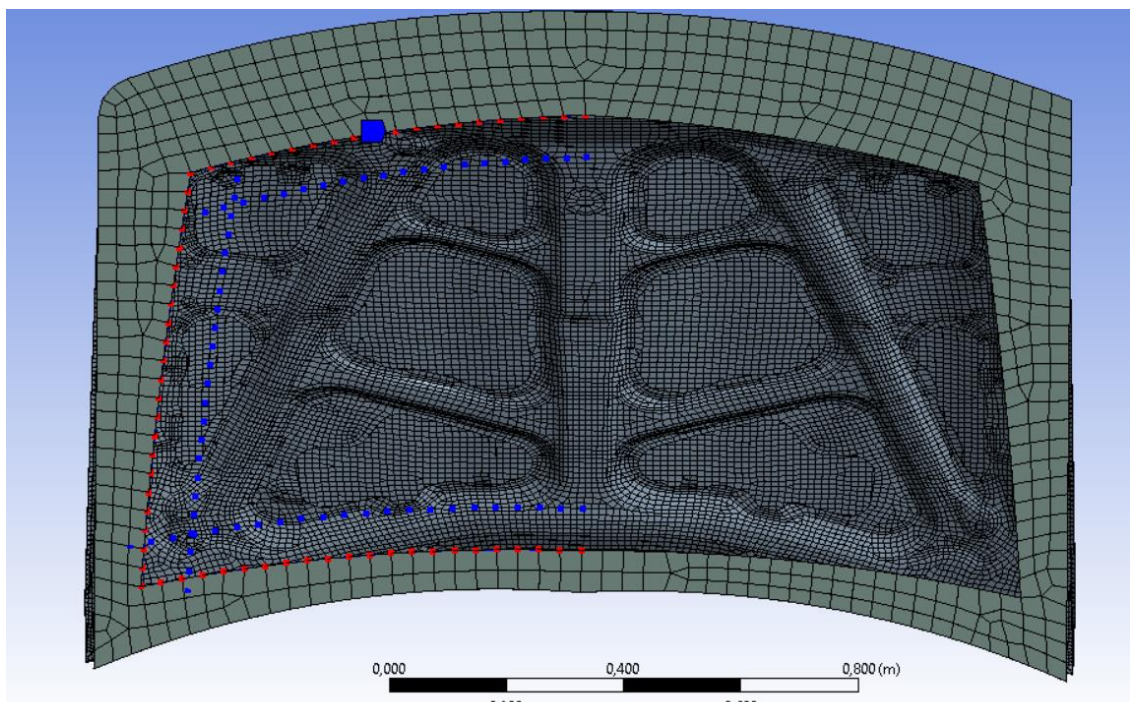


Figura 66 Preview dei Source per aumentare la larghezza delle superfici più esterne

E' stata necessaria la creazione di una nuova superficie perpendicolare al cofano, utilizzata per muovere la curva in direzione z.

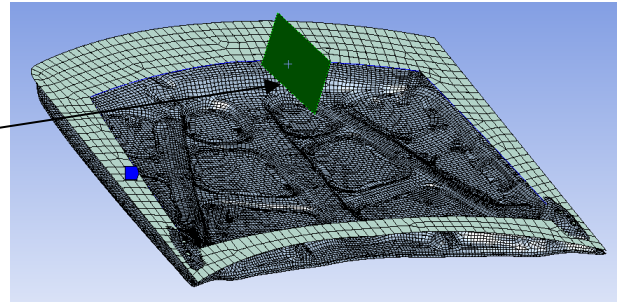
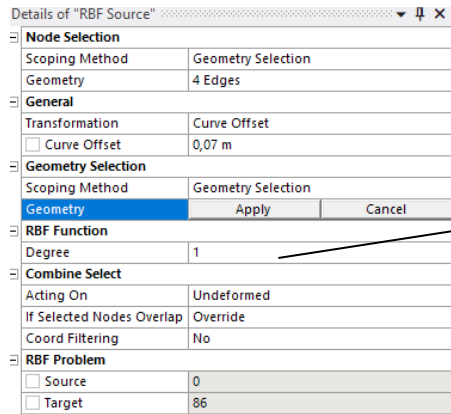


Figura 67 Details del source usato per muovere l'edge in direzione Z

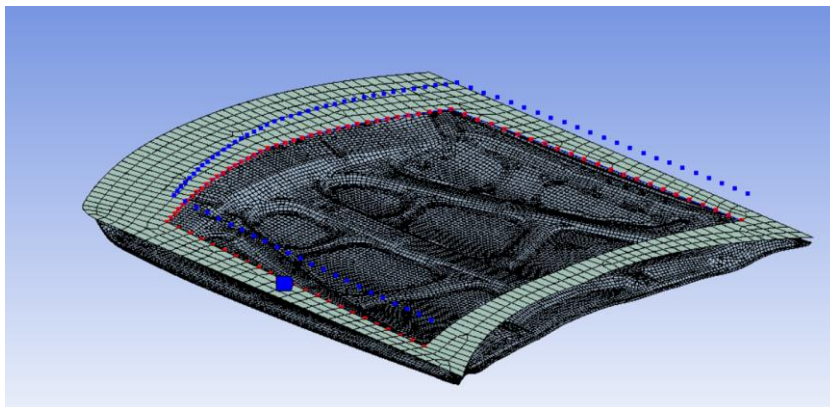
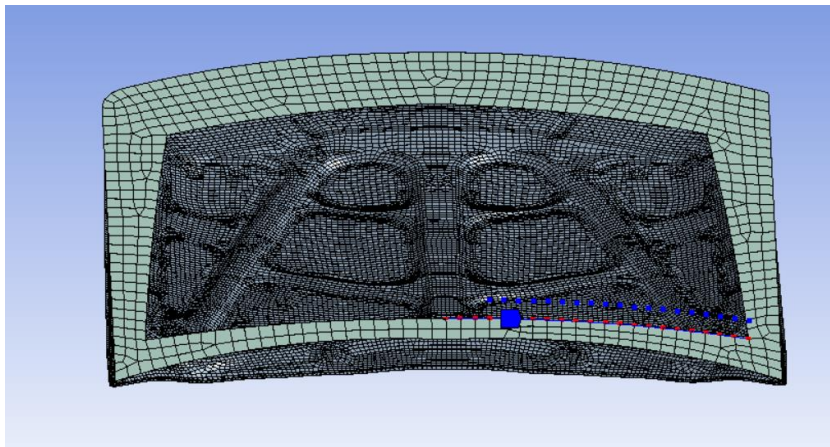


Figura 68 Preview dei source usati per aumentare i rinforzi in direzione Z

È stato così ottenuto il seguente risultato:

Ottimizzazione 4



Figura 70 Cofano ottenuto con la seconda ottimizzazione

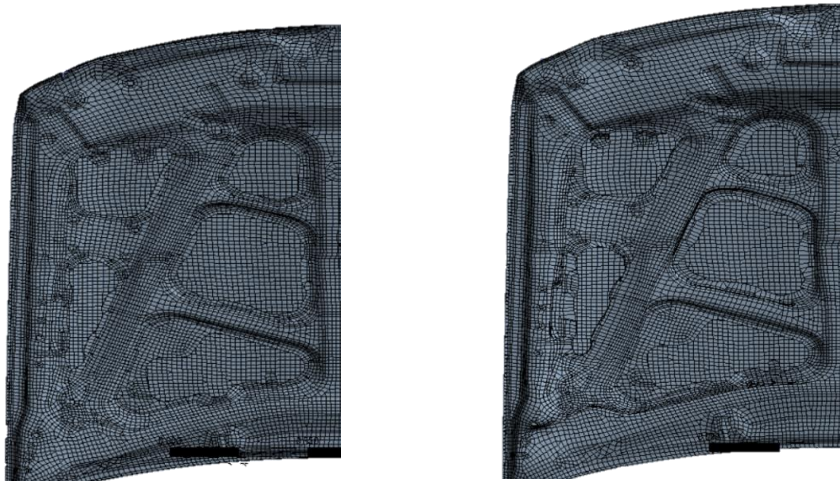


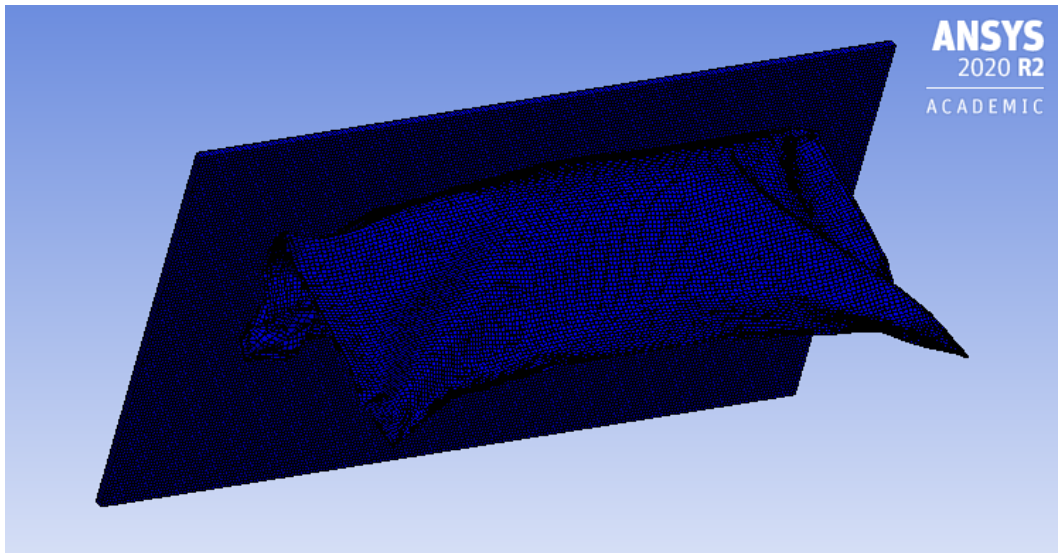
Figura 69 Prima e dopo l'ottimizzazione

3. RISULTATI

3.1. Scelta dell'ottimizzazione

Per la scelta dell'ottimizzazione si è fatto riferimento principalmente all'energia cinetica dissipata dal corpo durante il crash.

Si esclude da subito l'ottimizzazione 3 poiché a causa della non convergenza della soluzione data dal fatto che il solutore si trova a risolvere matrici con jacobiano negativo non può fornire risultati attendibili.



Per quanto riguarda l'energia cinetica si possono ottenere dei grafici da Mechanical che forniscono il bilancio energetico per ogni urto.

Si può osservare da subito una correlazione positiva tra l'aumento di rigidità del corpo e l'energia dissipata; infatti l'energia dissipata del corpo morphato non ottimizzato dopo 0,05 secondi era di 5250J. Diminuendo la grandezza dei supporti come accade nell'ottimizzazione 1 l'energia dissipata scende a 5200J ma se viene aumentata la grandezza dei supporti il valore sale fino ad arrivare a 7355J.

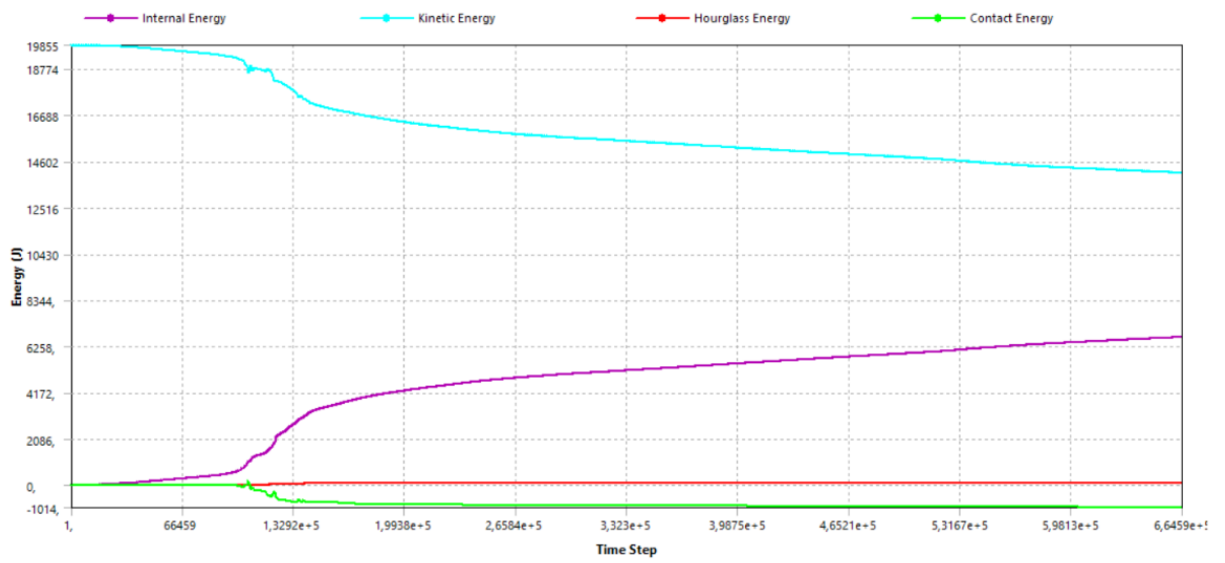


Figura 71 Grafico energia cofano morphato

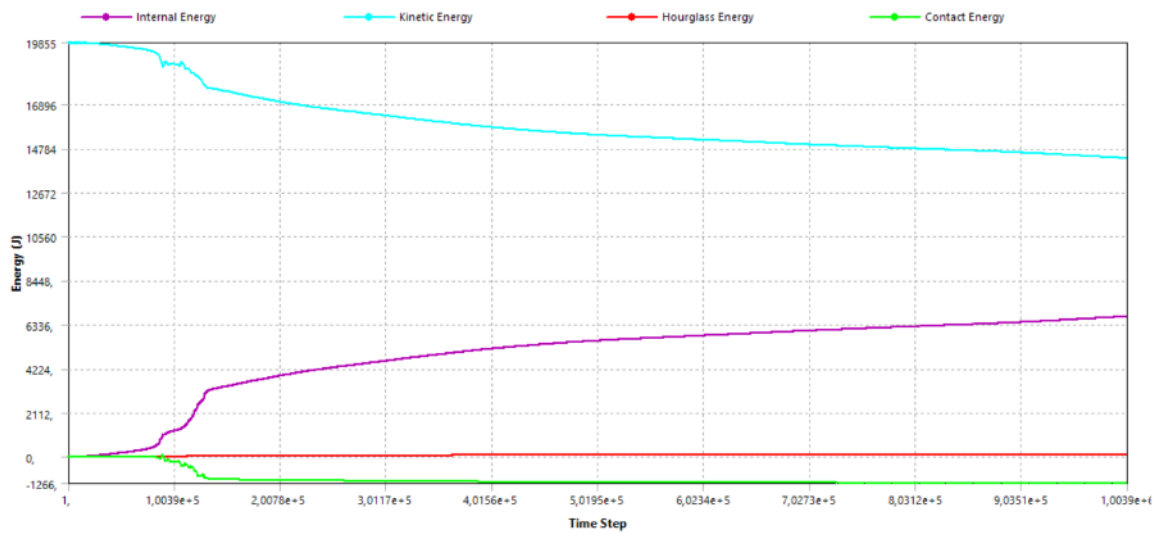


Figura 72 Grafico energia cofano con ottimizzazione 1

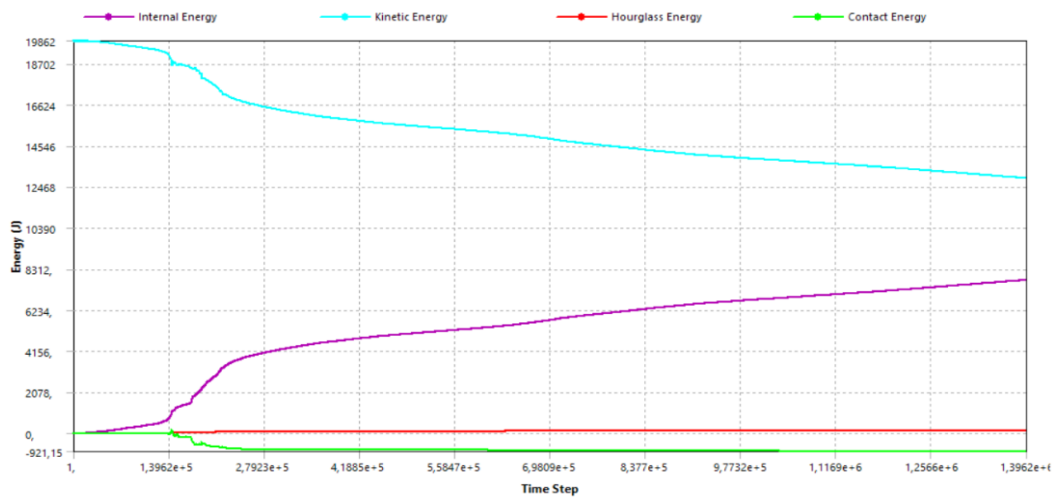


Figura 73 Grafico energia cofano con ottimizzazione 2

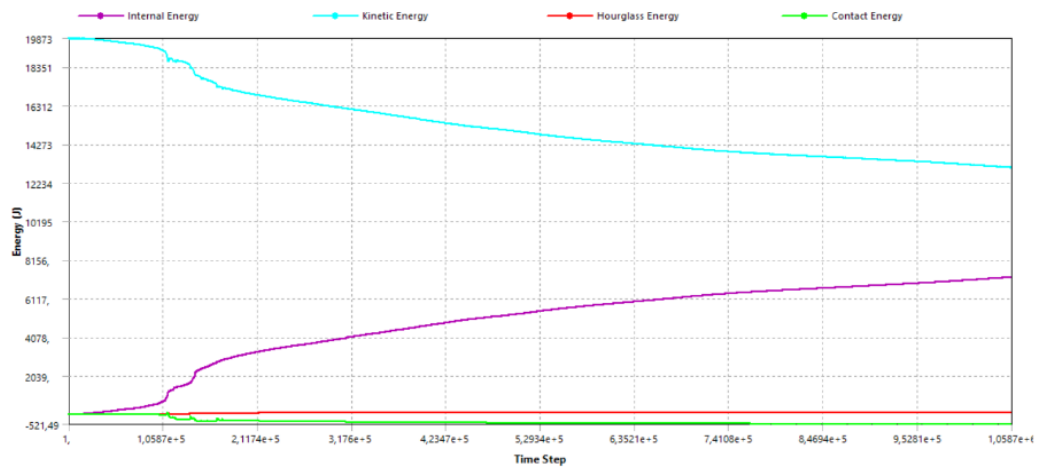


Figura 74 Grafico energia cofano con ottimizzazione 4

Si è osservato anche che un aumento di rigidità porta ad una drastica riduzione dell'energia dissipata durante l'urto e per tale motivo l'ottimizzazione 4 (ovvero l'aumento delle cornici dell'ottimizzazione 2) è stata scartata come possibile ottimizzazione. La soluzione che mostra i risultati migliori è la 2.

3.2. Osservazioni preliminari

Prima di osservare i grafici e i valori forniti dalle diverse simulazioni si è fatta una analisi preliminare principalmente grafica tra la geometria del Silverado originale e quello ottenuto per morphing. Esse mostrano un aspetto completamente differente, e questo rende comprensibile come sia necessario realizzare delle modifiche per montare il cofano ottenuto per morphing su un Silverado.

Altre differenze che sono risaltate fin da subito sono state la mancanza di rinforzi nel cofano morphato e le diverse dimensioni della cornice più esterna del cofano.

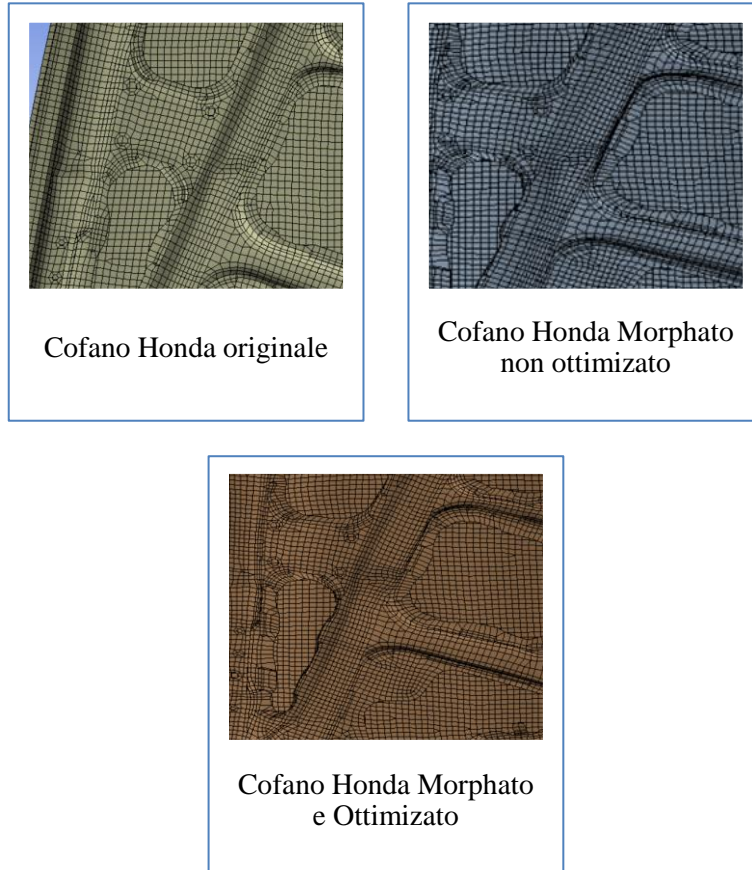


Figura 76 Cofano Silverado originale



Figura 75 Cofano Silverado ottenuto per morphing

Nel cofano morphato si possono osservare nei rinforzi longitudinali obliqui le bugne presenti nel cofano originale del Honda che successivamente al morphing si sono accentuate e deformate.



Un altro esempio è stato osservato nel rinforzo centrale. Tuttavia, questo particolare è stato migliorato drasticamente con l'ottimizzazione ottenendo il seguente risultato:

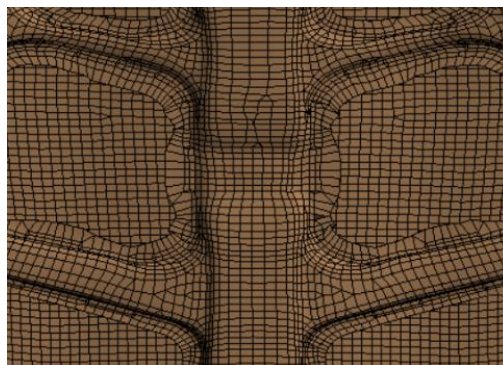


Figura 77 Bugna centrale cofano morphato

Osservazioni Successive alla simulazione

Simulando il tutto per 0,05 secondi si è osservato che il cofano del Silverado è molto più rigido rispetto a quello della Honda morphato ma tale differenza è stata annullata completamente e addirittura migliorata con l'ottimizzazione.

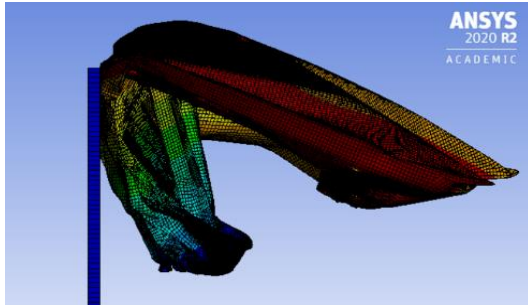


Figura 78 Silverado originale

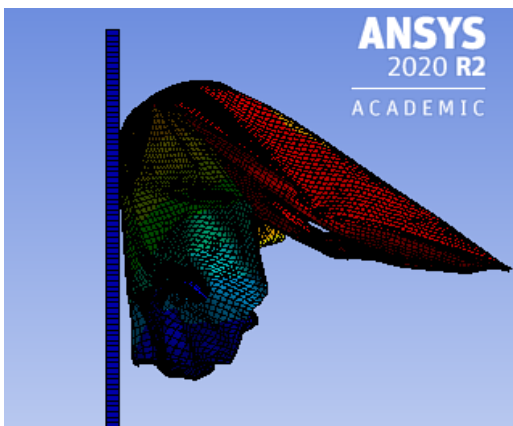


Figura 79 Silverado morphato

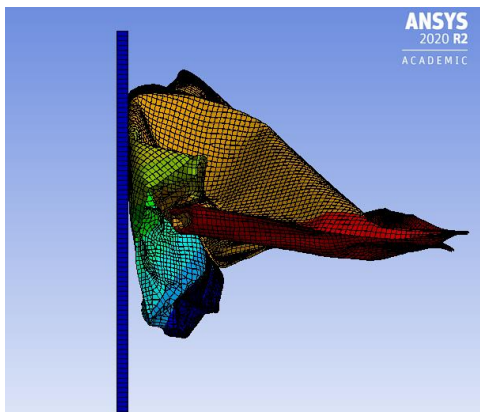


Figura 80 Silverado Morphato e ottimizzato

3.3. Mesh ottenuta

In questo paragrafo viene studiata la qualità della mesh della Honda e della Silverado reperita dal sito della NHTSA e viene confrontata con le griglie computazionale ottenuta attraverso il morphing del cofano della Honda aggiornato.

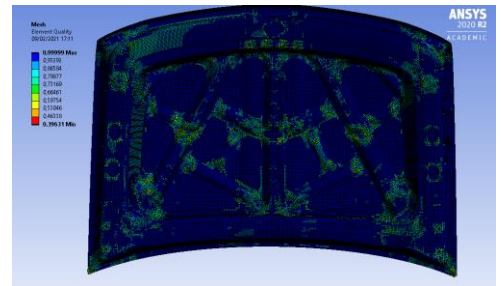
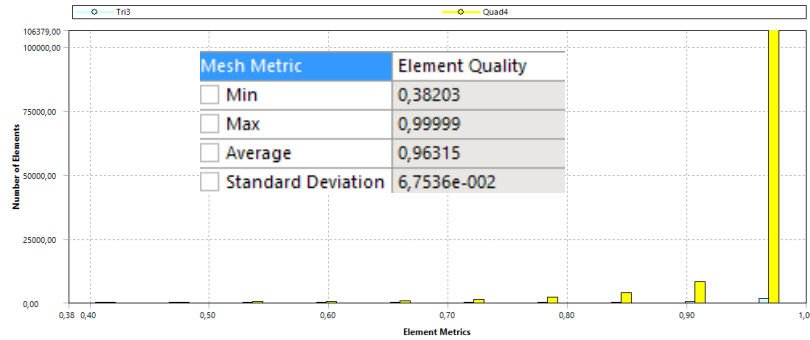
Nel nostro caso per valutare la mesh si sono analizzati principalmente 3 indici, riportati nello stato del arte, ovvero:

- **Element quality**
- **Skewness**
- **Aspect ratio**

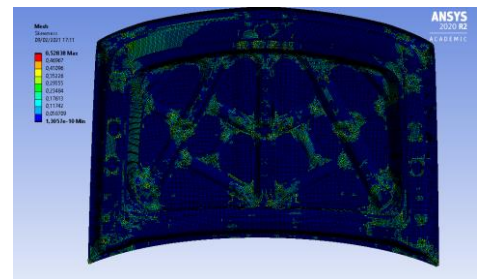
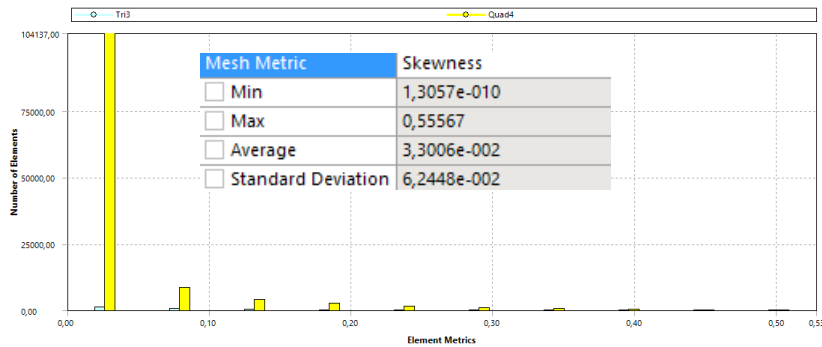
La prima griglia computazionale che si è analizzata è quelle del cofano del Silverado originale.

Siverado originale

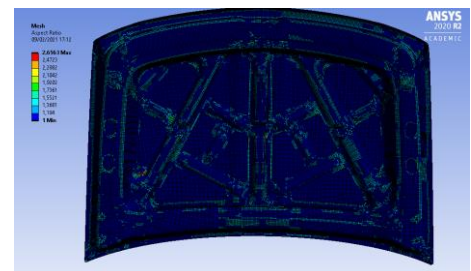
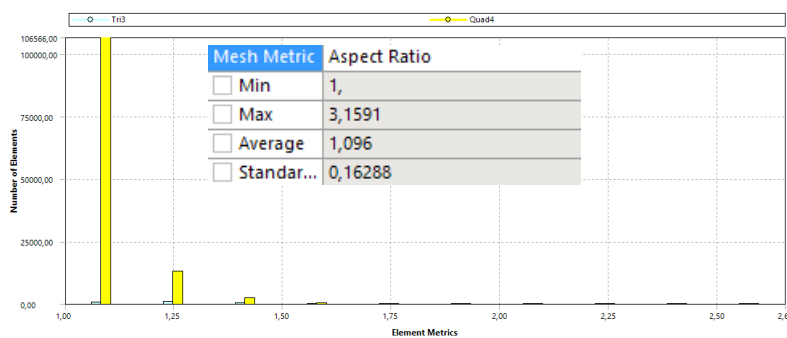
- **Element quality**



- **Skewness**



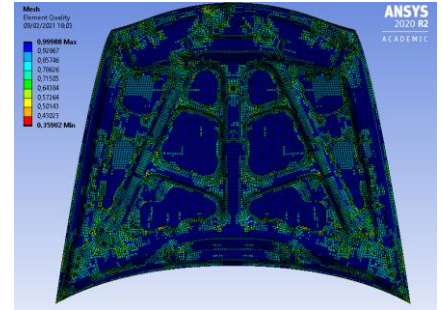
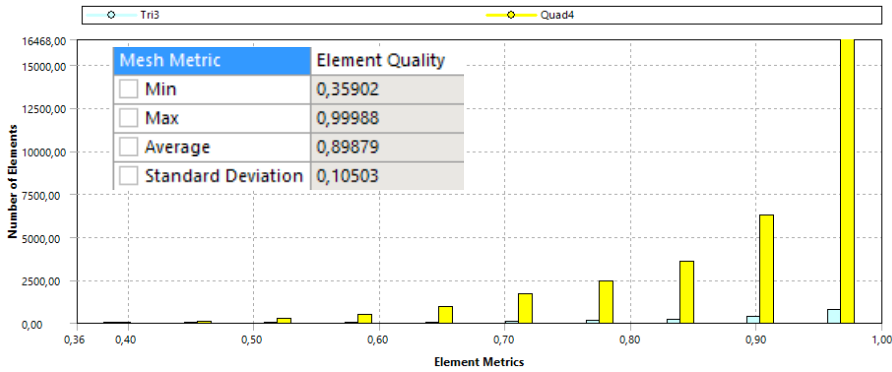
- **Aspect ratio**



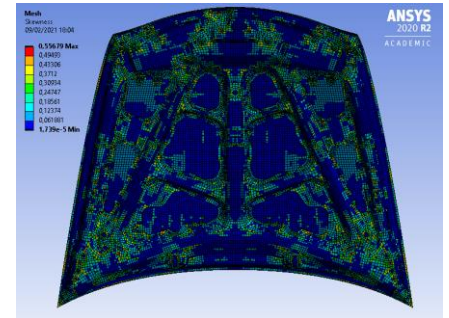
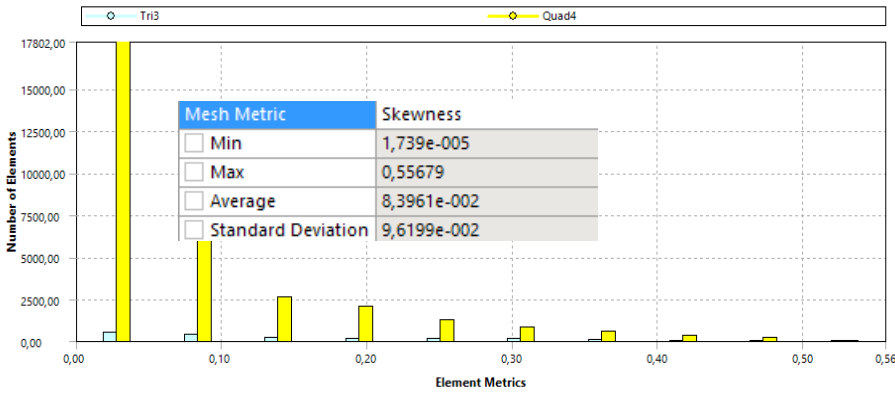
Si può concludere che la mesh per il cofano del Silverado originale è di elevata qualità.

Mesh Honda

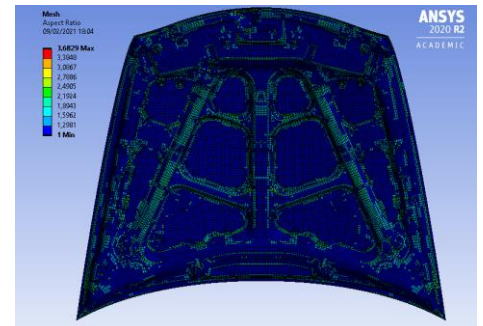
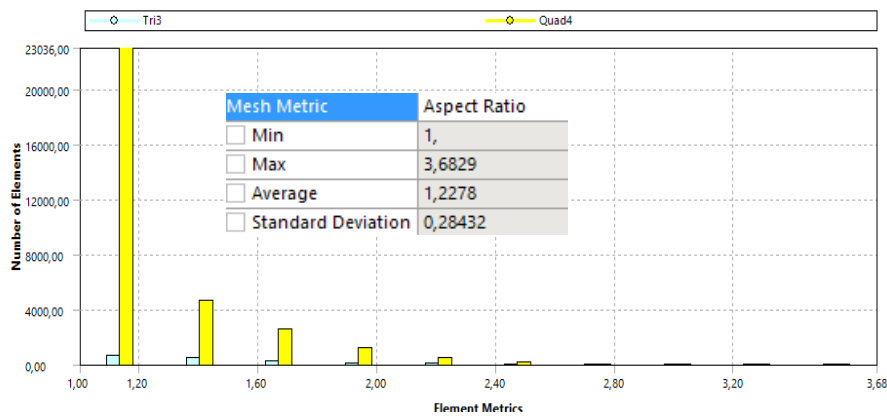
- **Element quality**



- **Skewness**



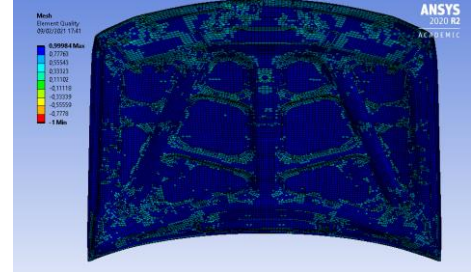
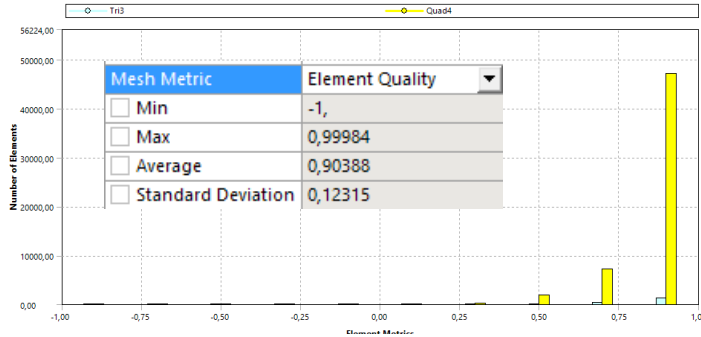
- **Asperct ratio**



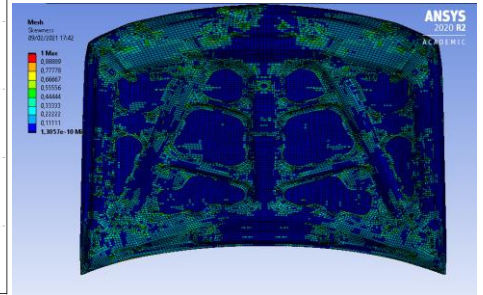
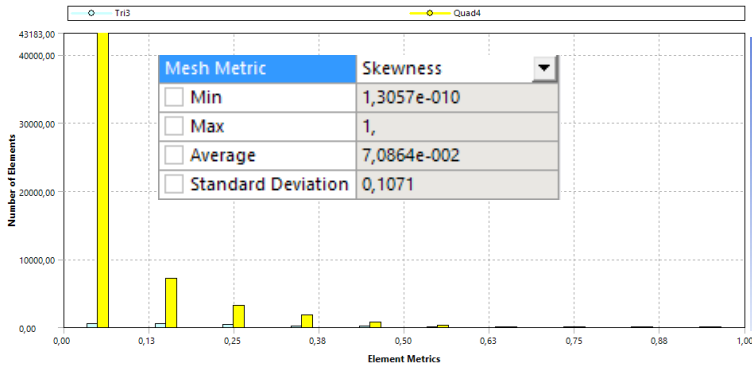
Nella mesh del Honda originale si osserva un peggioramene rispetto alla mesh del Silverado e questo fatto si ripercuote anche sul cofano del Silverado Morphato.

Silverato morphato

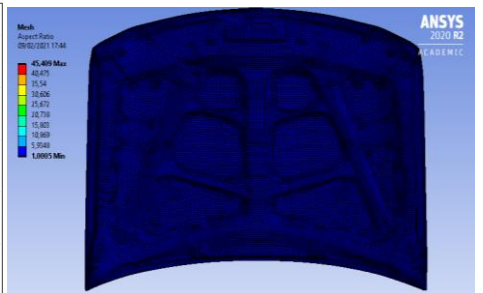
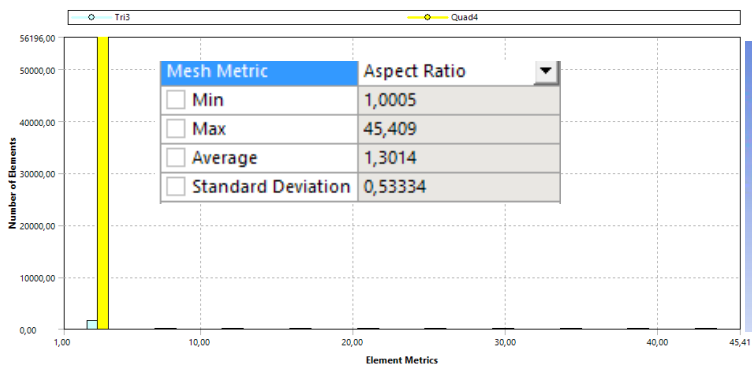
- **Element quality**



- **Skewness**



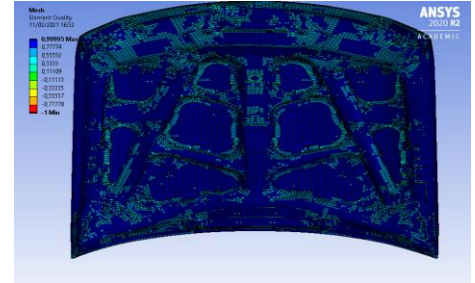
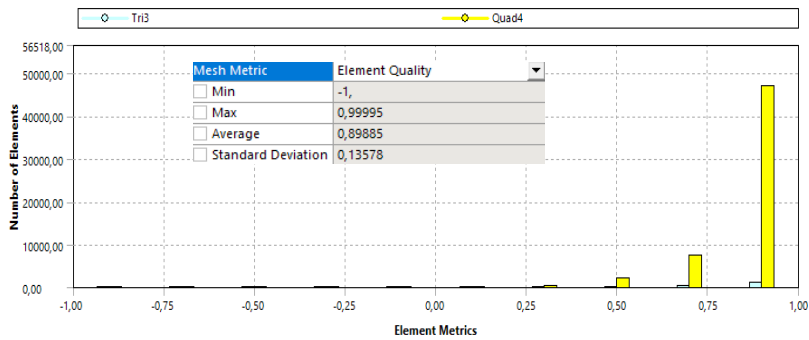
- **Aspect ratio**



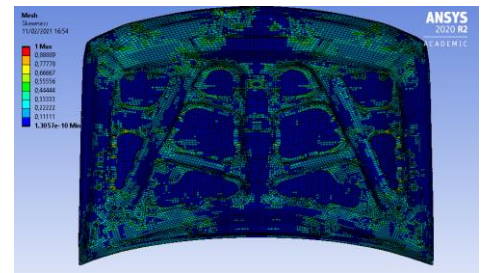
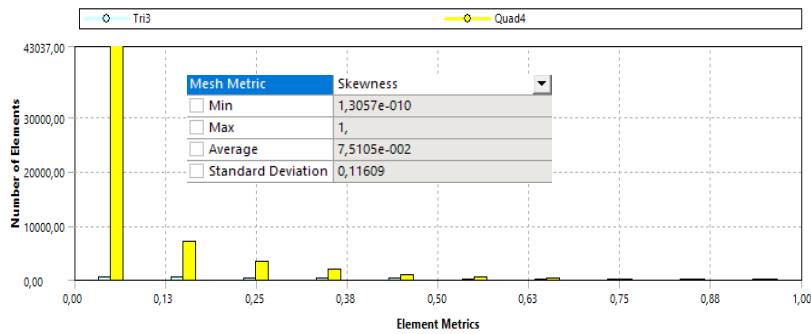
Si osserva che con il morphing c'è stato un miglioramento del parametro Element quality rispetto al cofano della Honda originale. Tuttavia, la mesh è di poco peggiore di quella presente sul cofano originale del Silverado, ciò si può vedere specialmente nel parametro skewness.

Cofano Honda Morphato e ottimizzato

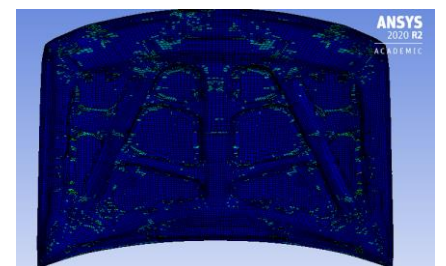
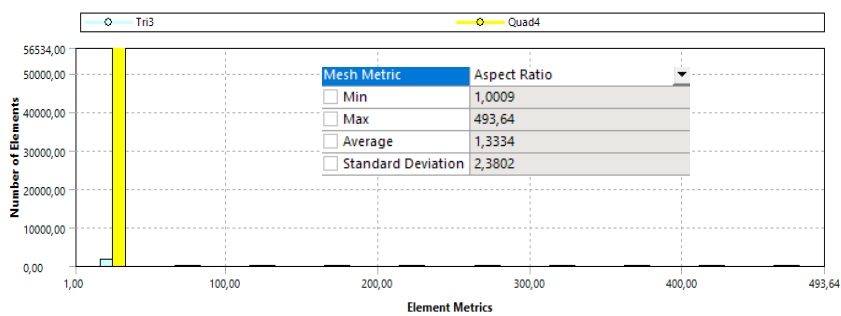
- **Element quality**



- **Skewness**



- **Aspect ratio**



Si può quindi concludere osservando i vari grafici che il morphing di ottimizzazione ha ridotto la qualità della mesh. Comunque, la qualità è elevata e i risultati che si hanno con la simulazione per tale motivo risultano accettabili.

3.4. Energia

Uno degli scopi principali del cofano in un urto è far rallentare più possibile una parte della massa dell'auto con una decelerazione non troppo elevata. In questa tesi si è assegnato al solo cofano una massa battente del 10% del peso dell'auto. Per valutare ciò si è presa in considerazione la quantità di energia cinetica che veniva dissipata durante l'urto e veniva trasformata in energia interna del cofano.

Nel cofano originale energia cinetica passa da un valore di 19890J in 0,05 secondi ad un valore di 12500J.

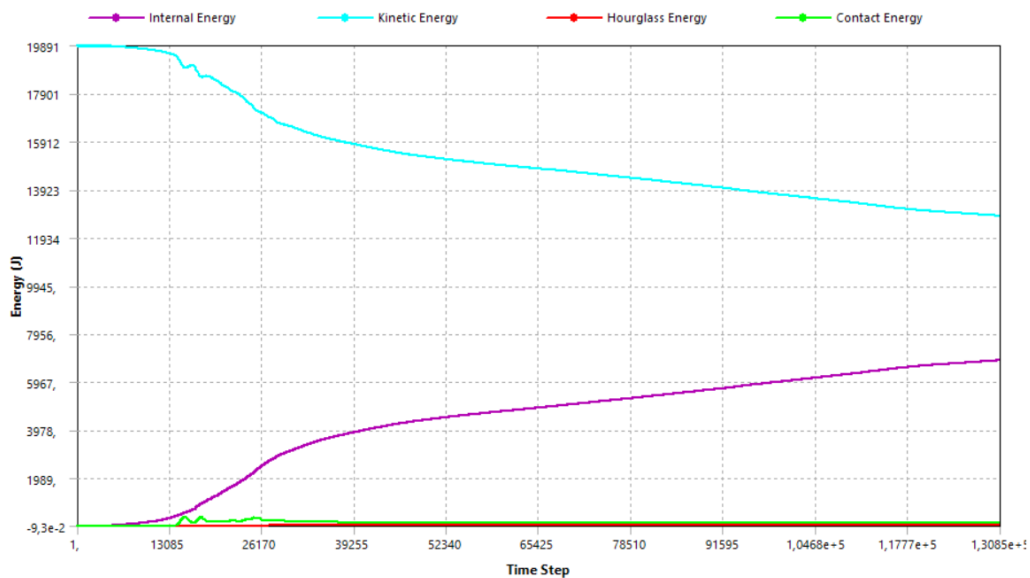


Figura 81 Grafico energia cofano originale

Il cofano morphato in quanto meno rigido rende l'energia cinetica dissipata durante l'urto minore. Tale risultato si può riscontrare con il seguente grafico.

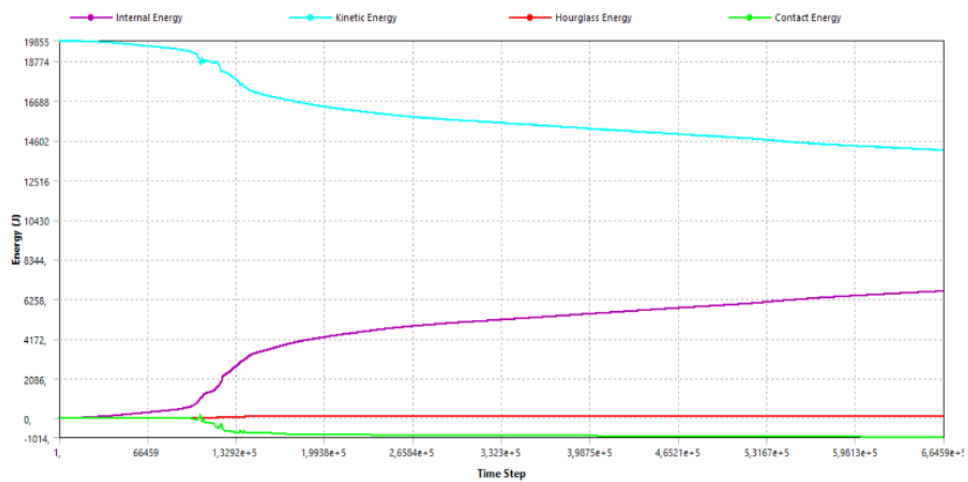


Figura 82 Grafico energia cofano morphato ma non ottimizzato

Solo dopo la serie di ottimizzazioni già descritte si è arrivato a un risultato molto simile a quello del Silverado originale. Passando da 19860J in 0,05 sec a 12500J

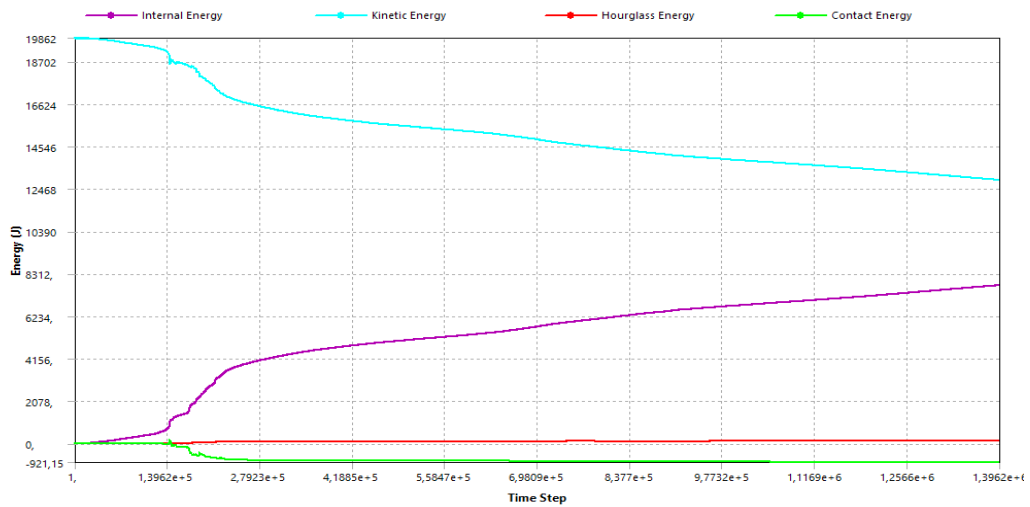


Figura 83 Grafico energia cofano ottimizzato

Si può osservare che non tutta energia cinetica viene dissipata ma solo una piccola parte, questo è dovuto principalmente a 2 motivi:

- La massa battente è eccessiva, in un crash automobilistico gli elementi che entrano in gioco sono molti e la massa che deve rallentare il singolo cofano è minore del 10 % dell'intera auto.
- Il tempo di simulazione è basso, limite dato dalla potenza di calcolo a disposizione non elevata.

Quando detto fin ad ora è stato riscontrato anche attraverso i grafici della velocità che fornisce Mechanical:

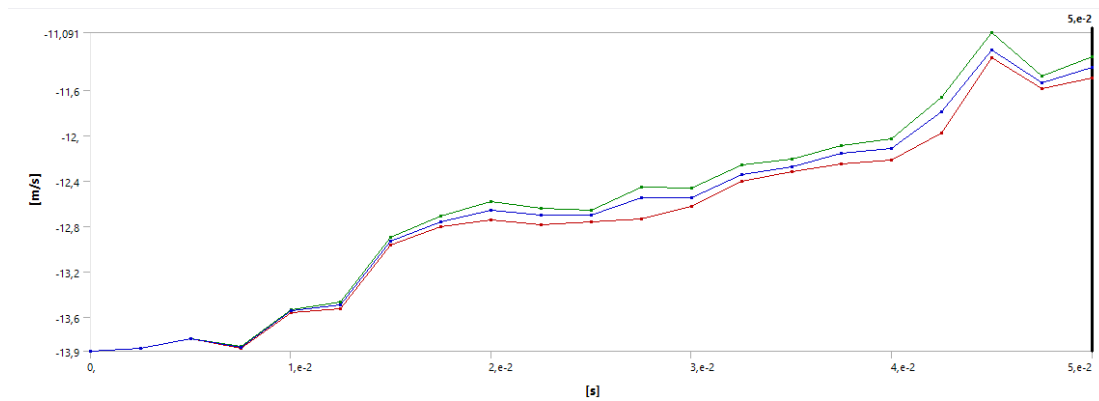


Figura 84 Grafico velocità cofano originale

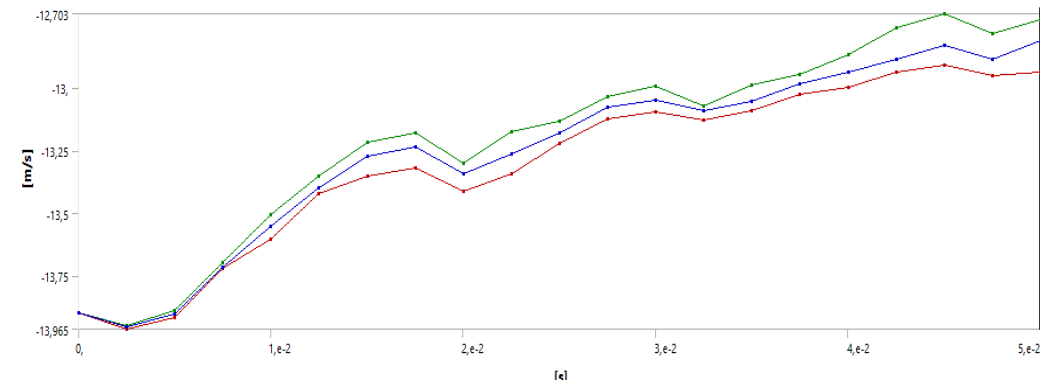


Figura 85 grafico velocità cofano morphato ma non ottimizzato

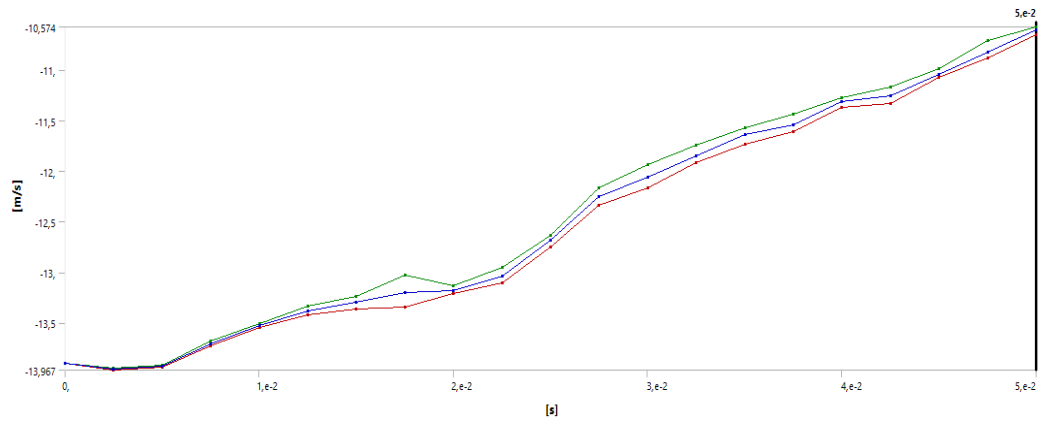


Figura 86 Grafico velocità cofano ottimizzato

Tali grafici rappresentano la decelerazione della parte posteriore del cofano, precisamente dove sono presenti le cerniere, che a loro volta sono vincolate al telaio dell'auto. Tale punto è perciò il più significativo per valutare la decelerazione.

Il cofano originale del Silverado dopo 0,05 sec passa da 13,9 m/s ad una velocità di 11,1 m/s mentre il cofano Morphato non ottimizzato decelera fino a una velocità di 12,7 m/s. Il tutto è migliorato con l'ottimizzazione che porta la decelerazione a 10,5 m/s in quanto il cofano ottimizzato riesce a dissipare meglio l'energia cinetica e libera più energia nel contatto.

3.5. Accelerazione

Parametro fondamentale da confrontare è la decelerazione del cofano. Infatti, una decelerazione eccessiva durante l'urto può comportare un urto eccessivo ai passeggeri dell'auto. In questo caso, è ovvio che non sarà possibile avere decelerazioni confrontabili con quelle dell'abitacolo di un'automobile ovvero inferiore a 15G ma si avranno decelerazioni più grandi date dal fatto che si è considerato solo il cofano.

Si osserva dai grafici che il cofano ottimizzato oltre ad assorbire più energia e rallentare di più la massa battente ha anche una decelerazione minore. Infatti, la massima decelerazione che si ha nelle cerniere è di 840 m/s² per il Silverado ottimizzato contro i 1030 m/s² del Silverado originale.

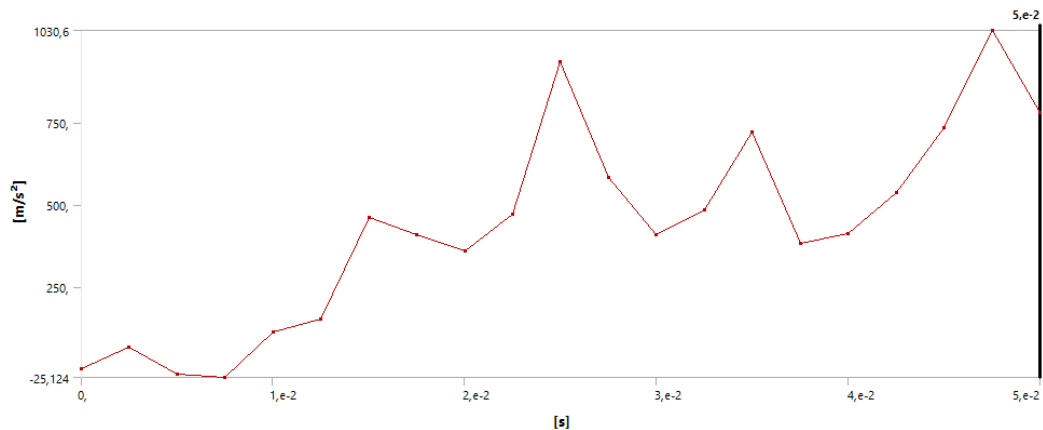


Figura 87 decelerazione Silverado Originale

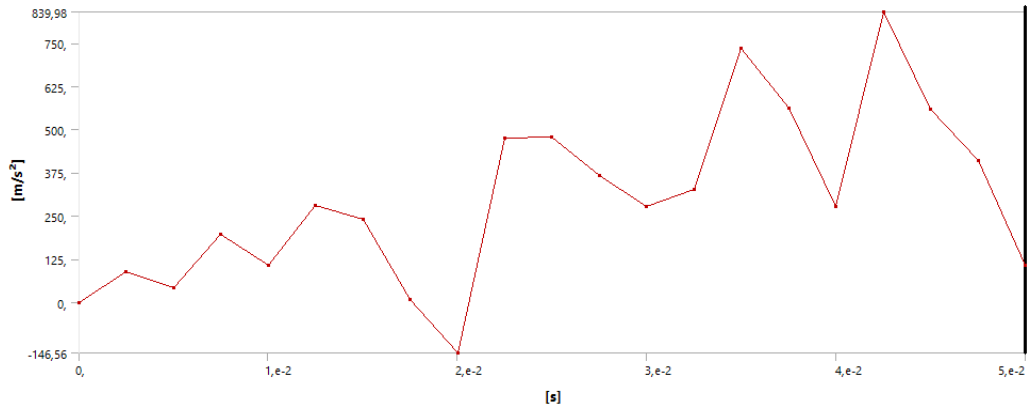


Figura 88 Decelerazione Silverado Morphato e ottimizzato

3.6. Stress

Durante un urto oltre ai requisiti sopra elencati è molto importante che il cofano rimanga collegato al telaio dell'auto. Per riscontare la bontà a questo requisito si va a valutare lo stress nei punti di collegamento del cofano con il telaio, ovvero nelle cerniere.

Per tutte le simulazioni la parte che presenta più stress è nel punto di contatto del cofano, mentre la parte che presenta meno stress si trova nella porzione posteriore.

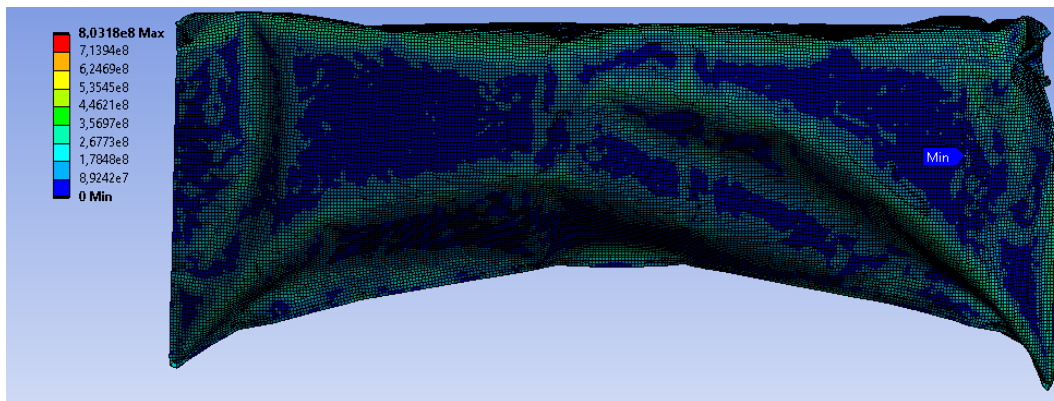


Figura 89 cofano originale

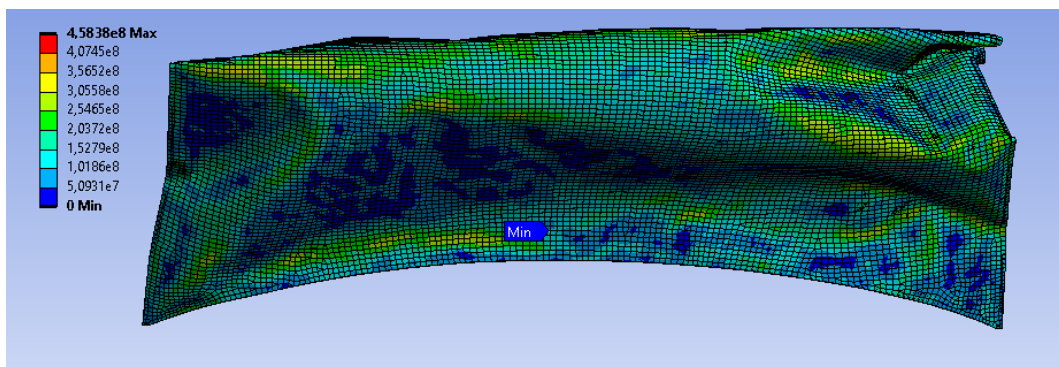


Figura 90 cofano Morphato

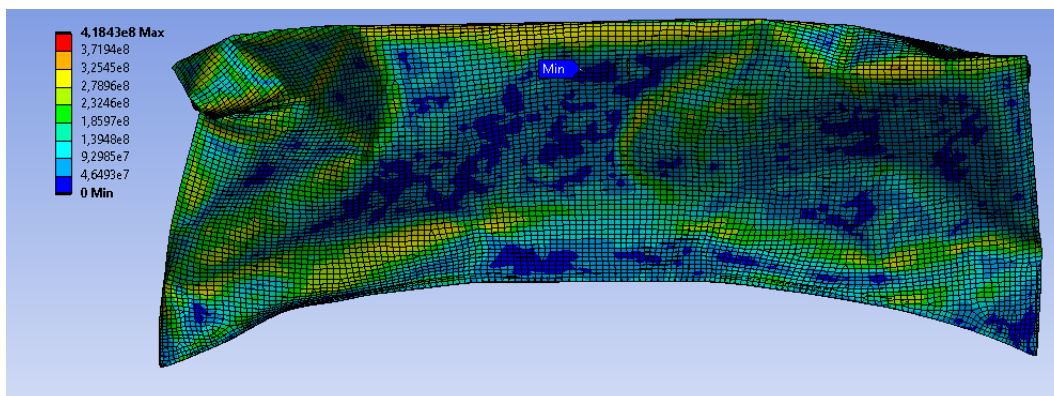


Figura 91 cofano ottimizzato

Occorre anche valutare lo stress nei punti dove andranno collegate le cerniere.

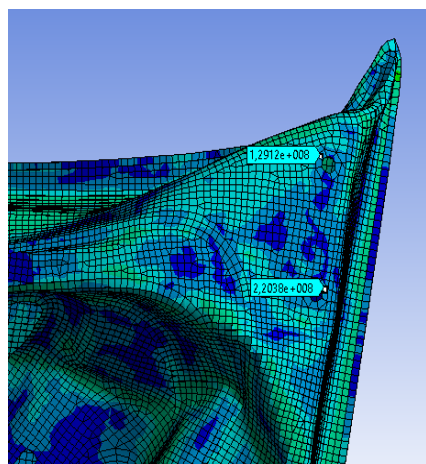


Figura 94 Stress cofano originale

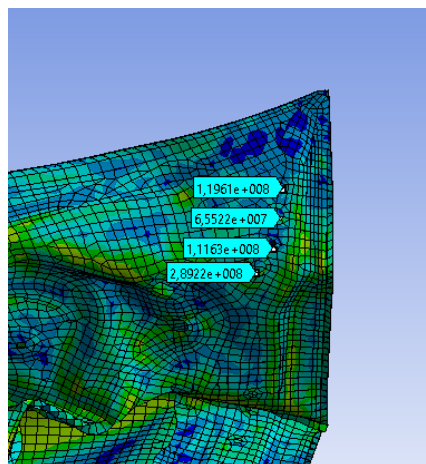


Figura 93 Stress cofano morphato

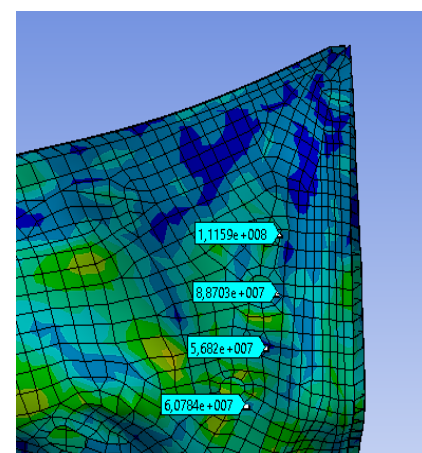


Figura 92 Stress cofano ottimizzato

Dai valori si può affermare che lo stress nel cofano ottimizzato è diminuito rispetto al cofano soltanto morphato e si osserva che i valori non risultano molto distanti dal cofano originale.

4. CONCLUSIONI

Dalle analisi effettuate nell'elaborato sono stati evidenziati i grandi pregi portati dall'uso degli elementi finiti con il solutore esplicito, per risolvere problemi di breve durata e soprattutto è stata evidenziata la malleabilità e utilità dell'estensione RBF-Morph, in Ansys. Grazie ad essa i tempi di progettazione del cofano della Silverado sono diminuiti drasticamente, conseguenza del fatto che non c'è stato il bisogno di progettare tutto, ma solo di ottimizzare ciò che era già esistente. L'ottimizzazione è stata fondamentale, infatti, tale tecnica ci permette di aggiornare la geometria della griglie computazionali, ma può portare a delle variazioni di stress e deformazioni rispetto al componente di partenza.

L'importanza dell'ottimizzazione, si può osservare in particolar modo in questo elaborato, poiché avendo come finalità il confronto dei risultati ottenuti a crash tra il cofano originale ed esistente del pick-up (Chevrolet Silverado) con i risultati ottenuti simulando il cofano della Honda Accord con la griglia computazionale aggiornata attraverso il morphing, ha permesso di analizzare i risultati e osservare la differenze in termini di stress, deformazione, energia e decelerazione tra i due corpi prima e dopo l'ottimizzazione. I 2 cofani, molto differenti, solo in seguito a delle piccole ottimizzazioni hanno mostrato risultati affini.

Da evidenziare, è anche il fatto, che il morphing non ha portato a grandi variazioni della qualità della mesh, e non c'è stato il bisogno di applicare refinement locali, come si è visto nell'apposito capitolo.

Concludendo si può affermare che la tecnica di morphing, ancora poco usata nell'ambiente automotive, sia una tecnica molto valida per condividere e conservare gli studi effettuati già su alti modelli precedenti, ed avere rapidi risultati, di come si comporta il componente.

Per estendere tale progetto, è consigliato un aumento del end time della simulazione, e analizzare cosa accade dopo 0,05s. Inoltre un ulteriore sviluppo futuro può essere l'analisi a crash del cofano con un pedone.

5. RINGRAZIAMENTI

Il primo ringraziamento va al Prof Biancolini che mi ha concesso l'opportunità di approfondire tematiche per me interessanti, di estrema importanza e spero utili nel futuro, come la modellazione FEM e l'analisi strutturale in campo non lineare.

Un ringraziamento speciale (poiché chiesto) va anche all'Ing. Geronzi, per il suo aiuto e i suoi preziosi consigli, senza il quale non avrei mai potuto completare questo lavoro. Ma soprattutto per la sua infinita pazienza, quando rispondeva a decine di messaggi, inviati nei momenti in cui la tesi sembrava essere impossibile. Molti sono gli errori che ha corretto, ma in compenso ha trovato un amico.

Adesso vorrei ringraziare in maniera un po' meno formale le persone a me più care e che mi sono state vicino in questi 4 lunghi anni; non sono solito scrivere cose di questo tipo, ma vedrò di fare del mio meglio.

Vorrei ringraziare la mia famiglia che mi è sempre stata vicino, sempre spronato, e sostenuto. E continua a darmi sani consigli. In particolare:

Mio padre, che si è sempre fatto a mille per me e mi ha sempre dato il buon esempio. Grazie a lui so che nella vita le cose belle non vengono da sé, ma si ottengono con fatica e costanza. Anche se non lo ammetto mai, penso che sei un **GRANDE papà**.

Mia madre, che in questi anni è **stata FONDAMENTALE in tutto**. Sempre pronta a sentirmi e darmi consigli anche nei momenti più impegnativi. Grazie che mi hai seguito in modo attivo in tutta la mia carriera scolastica, correggendo le prime parole scritte e continuando a leggere relazione ed e-mail.

Grazie a mio fratello Alex, che nonostante gli infiniti litigi, so che mi vuoi bene e posso contare su di te. Sicuramente in un futuro mi mancherà anche la tua fisarmonica.

Un bacino va a mia sorella Noemi, che molte volte in questi anni ha esclamato "uffa, stai sempre a studia! quando giochi mpò con me?!". Adesso spero di avere più tempo per giocare con te.

Grazie ai miei nonni, che mi hanno cresciuto sin da piccolo, amandomi, coccolandomi e perché no, anche viziandomi un pochino...

Un grazie particolare va ai miei amici **SAITTONI** sempre pronti a far casino e farsi riconoscere tra migliaia di persone. **Fondamentali** per i momenti di svago. Le ore saltate di studio per star con voi sono migliaia ma nemmeno 1 secondo è rimpianto. Ma non bastano queste poche frasi, vi voglio ringraziare uno alla volta:

LUCA VONA Eterno amico, con il quale ho condiviso anni e anni di spensierato divertimento ed interminabili serate in giro per il paese. Grazie per aver appoggiato ogni mia pazzia. Ma soprattutto grazie per i mille consigli e le mille risate fatte insieme.

ALTERI MATTEO Sei una persona che io stimo moltissimo, molto più di un semplice amico. Grazie di esserci sempre nei momenti di bisogno e grazie per i numerosi suggerimenti che solo tu sai dare. Grazie Fratè.

PIETRAVIVA ANDREA Grade amico dentro e fuori l'università. Ti dico grazie per le numerose giornate di studio matto e disperato, ma anche per le molte serate passate insieme(forse per te unica).

EDOARDO MAROCCO Ti ringrazio, perché solo un amico come te può sopportare le mie cretinate nei momenti di noia, ma soprattutto perché in qualsiasi momento so che tu ci sei. Sei un super Amico.

NICOLAS GIULIANI Amico dai mille segreti. Ti chiedo grazie per i momenti passati in compagnia e per i pomeriggi passati ad elaborare strategie per diventare ricchi.

Un grazie Speciale va al mio più vecchio e fedele amico, compagno di mille avventure sia tra i banchi scolastici ma anche fuori **CRISTIAN ROBERT BIRA**. Anche se sono passati mpò di anni ti voglio dire grazie per gli infiniti aiuti dati al liceo e per essermi stato vicino negli anni più deboli. Grazie Bì

Infine, voglio ringraziare 2 amici con cui ho iniziato questa super avventura:

Grazie GIUSEPPE TRILLICOSO per le numerose giornate passate al campus a studiare. Non scorderò mai le risate che ci facevamo durante le lezioni. Con te anche le materie più difficili sembravano facili. Grazie fratelli!

Grazie ALESSIO ZANGRILLI per le lunghe giornate passate all'università, i lunghi discorsi sulle auto, ma soprattutto per i numerosi viaggi fatti insieme in Cotral. Forse perché avevamo i stessi hobby o forse perché ci divertivamo con poco, ma solo quando c'eri te quell'ora volava.

Grazie a tutti voi, perché è buona parte merito vostro se i miei **“No, non ce la faccio”** oggi sono diventati un **“daiii, ce l'ho fatta..”**

Un ultimo grazie va a me stesso, poiché contro ogni aspettativa e con mille lacune, per mezzo della tenacia e perseveranza, è stato in grado di arrivare fin qui.

6. INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Esempio Scocca automobilistica unibody.....	10
Figura 2 – Esempio di auto con scocca Space-frame	
Figura 1- Esempio Scocca automobilistica unibody.....	10
Figura 2 – Esempio di auto con scocca Space-frame	11
Figura 3 -Punti di impatto del pedone con il Fronte dell'auto	
Figura 2 – Esempio di auto con scocca Space-frame	11
Figura 3 -Punti di impatto del pedone con il Fronte dell'auto.....	13
Figura 4 -Zona con alta probabilità di impatto della testa del pedone con il cofano	
Figura 3 -Punti di impatto del pedone con il Fronte dell'auto	13
Figura 4 -Zona con alta probabilità di impatto della testa del pedone con il cofano	13
Figura 8 -Enti di valutazione della sicurezza nel mondo	
Figura 4 -Zona con alta probabilità di impatto della testa del pedone con il cofano	13
Figura 5 -spazio da rispettare in progettazione per evitare gravi lezioni al pedone	14
Figura 6 -valutazione Euroncap del cofano in caso di urti con pedoni.....	14
Figura 7 -Possibile soluzione per evitare di caricare troppo le cerniere, con applicazione di bugne	15
Figura 8 -Enti di valutazione della sicurezza nel mondo.....	20
Figura 9 - Test a Barriera mobile con elemento deformabile progressivo	22
Figura 10 - Test con barriera rigida a tutta larghezza	23
Figura 11 – Test barriera mobile laterale.....	24
Figura 12 - Test del palo	25
Figura 13 - Test del colpo di frusta del passeggero	26
Figura 14 – Test Barriera deformabile disassata	27
Figura 15 -Test per valutare la sicurezza dell'auto nei confronti dei pedoni e ciclisti	28
Figura 16 -Edizioni del Manual for Assessing Safety Hardware	31
Figura 17 -Risultati dei test discussi nella 13th conferenza su ls-dyna,	32

Figura 18 -Modello studiato nel test	34
Figura 19 -Modello progettato e studiato da Ajinkya Bhonge per lo studio del crash frontale	34
Figura 20 - Esempio di un Key-file della deformazione di un blocco di alluminio adagiato sul pavimento con una pressione applicata sulla superficie superiore	38
Figura 21 -Proprietà chimiche lega AA6016	42
Figura 22 -Materiali usati per il test nel presente elaborato	42
Figura 23 – Chevrolet Silverado	43
Figura 24 Parte inferiore del cofano del Silverado	44
Figura 25 -Modello con mesh del Chevrolet Silverado reperita da NHTSA.....	44
Figura 26 -Cofano e muro preparati con ls-prepost e pronti ad essere esportati in Mechanical.....	45
Figura 27 -Importare file .k in ANSYS	45
Figura 28 -Modello del cofano con mesh importato in Meccanical	46
Figura 29 -Blocco LS-DYNA.....	47
Figura 30 -Modello della simulazione LS_DYNA.....	48
Figura 31 -Albero del progetto per la simulazione dell’urto frontale della Honda Accord.....	48
Figura 32 Risultati dell’ analisi dopo la simulazione di 0,05s per il cofano del Silverado originale	49
Figura 33 Honda Accord.....	50
Figura 34 Modello della Honda Accord	51
Figura 35 Cofano e muro preparati con LS-PrePost e Pronti per essere impostati in Mechanical.....	51
Figura 36 Modello del cofano con mesh importato in Mechanical	52
Figura 37 – Superficie cofano Chevrolet Silverado.....	53
Figura 38 -Collegamenti effettuati con il component LS-DYNA Silverado	55
Figura 39 -Target e Source necessari per il Morphing	57
Figura 40 -Cofano Morphato	58
Figura 41 Simulazione fatta del cofano morphato prima dell’ottimizzazione.....	59
Figura 42 Superficie guida creata con SpaceClaim partendo dal cofano del Silverado ottenuto attraverso il Morphing	60

Figura 43 Applicazione del comando Trasforms in Mechanical.....	61
Figura 44 Dettaglio del curve offset applicato.....	62
Figura 45 Esempi di problemi che si hanno se non si include nel Targhet la superficie superiore.....	63
Figura 46 Preview dei Source applicati	63
Figura 47 Deformazioni dovute al fatto che i rinforzi si devono adattare ai fori ..	64
Figura 48 Curve offset mirato nella diminuzione dei spazi vuoti.....	64
Figura 49 Prima e dopo l'ottimizzazione 1	65
Figura 50 Prima ottimizzazione provata con lo scopo di ridurre la grandezza dei rinforzi	65
Figura 51 Ottimizzazione 2.....	66
Figura 52 Prima e dopo il Morphing	66
Figura 53 Curve offset applicato per ottimizzazione 3.....	67
Figura 54 Creazione bugne	67
Figura 55 ottimizzazione 3 del cofano Morphato	68
Figura 56 Blocchi in Workbench necessari per l'ottimizzazione.....	69
Figura 57 Superficie guida necessaria per la seconda ottimizzazione.....	70
Figura 58 Preview dei Source per aumentare la larghezza delle superfici più esterne	70
Figura 59 Details del source usato per muovere l'edge in direzione Z.....	71
Figura 60 Preview dei source usati per aumentare i rinforzi in direzione Z.....	71
Figura 62 Cofano ottenuto con la seconda ottimizzazione	72
Figura 61 Prima e dopo l'ottimizzazione	72
Figura 63 Grafico energia cofano morphato.....	74
Figura 64 Grafico energia cofano con ottimizzazione 1	74
Figura 65 Grafico energia cofano con ottimizzazione 2.....	75
Figura 66 Grafico energia cofano con ottimizzazione 4.....	75
Figura 67 Cofano Silverado ottenuto per morphing	76
Figura 68 Cofano Silverado originale.....	76
Figura 69 Bugna centrale cofano morphato.....	77
Figura 70 Silverado originale	78
Figura 71 Silverado morphato	78

Figura 72 Silverado Morphato e ottimizzato	78
Figura 73 Grafico energia cofano originale	84
Figura 74 Grafico energia cofano morphato ma non ottimizzato	85
Figura 75 Grafico energia cofano ottimizzato	85
Figura 76 Grafico velocità cofano originale	86
Figura 77 grafico velocità cofano morphato ma non ottimizzato	86
Figura 78 Grafico velocità cofano ottimizzato	87
Figura 79 decelerazione Silverado Originale.....	88
Figura 80 Decelerazione Silverado Morphato e ottimizzato	89
Figura 81 cofano originale	90
Figura 82 cofano Morphato	90
Figura 83 cofano ottimizzato	91
Figura 84 Stress cofano ottimizzato.....	91
Figura 86 Stress cofano morphato	91
Figura 85 Stress cofano originale	91

7. RIFERIMENTI

- [1] EURONCAP, «EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME,» Novembre 2017. [Online]. Available: <https://cdn.euroncap.com/media/32288/euro-ncap-pedestrian-testing-protocol-v84.pdf>.
- [2] Bundesanstalt_für_Strassenwesen, «1st Meeting of Task Force Deployable Bonnet Systems (TF-DBS),» Febbraio 2017. [Online]. Available: <https://wiki.unece.org/download/attachments/46006287/DPPS-1-09e.pdf?api=v2>.
- [3] R. Neugebauer; T. Altan; M. Geiger Kleiner «Sheet metal forming at elevated temperature,» 07/02/2006.
- [4] Liu Hong, Zhao Gang, Liu Chun-mingm, Zuo Liang «Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys,» 2006.
- [5] «EURO NCAP FOR SAFER CARS,» [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/>.
- [6] C. Cremato, «Protezione dell'occupante nell'impatto Far Side: sviluppo della procedura del test e valutazione della prova,» [Online]. Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/8515/>.
- [7] Wikipedia. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_degli_elementi_finiti.
- [8] NHTSA, «Mass and Cost Increase Due to Oblique Offset Moving Deformable Barrier Impact Test,» Aprile 2018. [Online]. Available:

https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13377-edag_crashdeformation_040418_v3_tag.pdf.

[9] «Dr. Marzougui, Dr. Kenneth Opiela and Mr. Reichert «Automotive Crash Test & Simulation Comparisons of a Pickup Truck & a Small Car Oblique Impacts Into a Concrete Barrier».

[10] skill-lync, «Project-Head impact using LS-DYNA,» [Online]. Available: <https://skill-lync.com/projects/week-7-head-impact-12>.

[11] A. Bhonge. [Online]. Available: <https://ajinkyabhongeprojects.myportfolio.com/ansys>.

[12] C. Albrizio, «CARATTERIZZAZIONE DELLA LEGA AA6016 PER IMPIEGO NELLO STAMPAGGIO A CALDO DI COMPONENTI AUTOMOTIVE,» 2013. [Online].