POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi

Analisi strutturale di un sistema di scarico per autoveicoli mediante metodo numerico meshless

Candidato:
Valerio Giannelli

Relatore:
Prof.ssa Francesca Maria Curà

Tutor aziendale:
Alessio Mazzarini

Anno Accademico 2019-2020

Sommario

Il presente lavoro si propone di analizzare e descrivere in maniera dettagliata le potenzialità del software *SimSolid* ^{TM} della compagnia *Altair Engineering Inc.,* strumento innovativo e "rivoluzionario" di simulazione meccanica strutturale e termica basato su complessi algoritmi di calcolo che gli consentono di superare il concetto di mesh normalmente utilizzato nei tradizionali codici FEM. È stato infatti effettuato un confronto tra il metodo numerico tradizionale degli elementi finiti e il metodo numerico meshless durante una serie di simulazioni del comportamento meccanico di sistemi di scarico per autoveicoli.

Questo studio è stato sviluppato presso l'azienda *Marelli Europe S.p.A*. nel dipartimento *R&D - Green Technology Systems* di *Venaria Reale (TO)*.

Marelli Europe – Green Technology Systems sviluppa e produce sistemi di scarico per autoveicoli con tecnologie avanzate in termini di prestazioni e qualità. L'obiettivo principale è quello di progettare linee di scarico che soddisfino i requisiti imposti dal cliente. Successivamente alla disegnazione CAD del progetto vengono infatti eseguite una serie di analisi virtuali con lo scopo di verificare, prima della produzione, il rispetto dei target richiesti, evitando così uno spreco di risorse e riducendo il *time to market* attraverso una minor produzione di prototipi.

Nei capitoli seguenti verrà presentata una panoramica sui componenti che costituiscono un sistema di scarico. Successivamente verrà effettuato un confronto da un punto di vista funzionale tra il metodo FEM tradizionale utilizzato in azienda ed il metodo meshless utilizzato dal software *SimSolid* ^{TM}, andando ad evidenziare le principali differenze. Infine verranno presentati e confrontati i risultati ottenuti da analisi strutturali di diversa tipologia (modale, statica, dinamica, termica) utilizzando le due metodologie citate precedentemente.

Indice

Sommario .....

Introduzione **1**

1 I sistemi di scarico **5**

1.1 Hot End 6

1.1.1 Collettore 7

1.1.2 Catalizzatore 8

1.1.3 Sonda Lambda 9

1.2 Cold End 10

1.2.1 Elemento disaccoppiante 11

1.2.2 Staffe 12

1.2.3 Tasselli 12

1.2.4 Silenziatore 13

1.2.5 Codino finale 13

2 Metodi numerici di simulazione **14**

2.1 Metodo FEM tradizionale 17

2.1.1 Pre-Processing 17

2.1.2 Solving 25

2.1.3 Post-Processing 26

2.2 Metodo numerico meshless - *(SimSolid ™)* 27

2.2.1 Pre-Processing 27

2.2.2 Solving 34

2.2.3 Post-Processing 35

2.3 Confronto tra metodo FEM tradizionale e metodo numerico meshless *(SimSolid ™)* 36

3 Sistemi di scarico analizzati ed analisi effettuate 39

3.1 Modelli analizzati 40

3.1.1 *Model 520* 40

3.1.2 *Model W* 43

3.2 Correlazione modale a temperatura ambiente 44

3.2.1 Analisi modale *Model 520* 45

3.2.2 Analisi modale *Model W* 48

3.3 Risposta in frequenza *Model 520* 50

3.3.1 Inertanza staffe 50

3.4 Correlazione statica lineare *Model 520* 54

3.4.1 Validazione tasselli e spostamento flessibile 55

3.4.2 Spostamento linea 57

3.4.3 Validazione staffe 59

3.5 Correlazione statica non lineare *Model 520* 68

3.5.1 Spostamento linea 69

3.6 Analisi termica in regime stazionario *Model 520* 71

3.6.1 Mappa di temperatura 72

4 Conclusioni 76

Bibliografia 80

Introduzione

Per Computer-Aided Engineering (CAE) si intende l'utilizzo di software informatici che consentono la risoluzione di problemi tecnologici di diversa tipologia tramite algoritmi di calcolo numerico, sfruttando le avanzate capacità computazionali dei computer.

Gli strumenti CAE sono utilizzati per numerose applicazioni ingegneristiche, tra le quali ad esempio:

- Analisi strutturale statica e dinamica di componenti e assiemi mediante l'analisi ad elementi finiti (FEM);
- Analisi fluidodinamica e termica mediante la fluidodinamica computazionale (CFD);
- Simulazioni analogiche e digitali di circuiti elettronici;
- Calcolo di campi elettromagnetici;
- Simulazione dei processi di produzione ed ottimizzazione del prodotto o del processo;
- Analisi degli aspetti dinamici e cinematici dei meccanismi (dinamica multi-body).

Al giorno d'oggi, in campo industriale, qualsiasi prodotto fabbricato viene precedentemente progettato e simulato tramite metodologie CAE. I software di analisi consentono infatti di sviluppare un modello matematico del prodotto da realizzare ed effettuare una serie di analisi virtuali per valutarne le proprietà ed il comportamento prima della produzione.

L'obiettivo principale è quello di migliorare le attività di progettazione e di produzione riducendone sia i tempi che i costi. Infatti la maggiore velocità ed il maggior risparmio di denaro sono legati ad una riduzione dei tempi di sviluppo e del numero di prototipi, avendoli perfezionati e testati precedentemente in campo virtuale. La tecnologia CAE offre quindi informazioni importanti sulle prestazioni di un componente, che possono risultare essenziali soprattutto all'inizio del

processo di sviluppo, quando è meno costoso apportare modifiche al modello (processo di ottimizzazione del prodotto).

Generalmente i software di calcolo prevedono una interfaccia grafica abbastanza semplice che permette all'operatore di realizzare un modello virtuale rapidamente, senza la necessità di dover scrivere e risolvere equazioni matematiche. Ciò risulta essere un grandissimo pregio poiché, mediante semplici operazioni, è possibile risolvere equazioni complesse. Bisogna però fare attenzione ad eventuali errori. Tale semplicità potrebbe portare ad un utilizzo superficiale del codice numerico, facendo perdere di vista la fisica reale del problema. Infatti, introducendo nel codice dei dati in disaccordo con la realtà fisica del problema analizzato, il software mostrerà comunque dei risultati, seppur errati, che solo con un'analisi critica ed approfondita possono essere evitati o scartati. Quindi è fondamentale una buona conoscenza del problema analizzato e delle caratteristiche del codice di calcolo utilizzato, ed è necessaria una successiva validazione sperimentale per avere certezza della bontà dei risultati forniti dal modello.

Un processo CAE è generalmente costituito da tre fasi:

- *Pre-Processing*: modellazione della geometria del componente da analizzare e definizione delle proprietà fisiche, dei vincoli e dei carichi applicati;
- *Solving*: risoluzione del modello tramite una formulazione matematica appropriata;
- *Post-Processing*: visualizzazione ed analisi dei risultati.

Esistono diverse tipologie di metodi numerici a seconda dal tipo di analisi e dal risultato che si vuole ottenere. Il metodo più utilizzato per la risoluzione di problemi ingegneristici di grandi dimensioni descritti da equazioni differenziali risulta essere il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) il quale, grazie ad operazioni di discretizzazione, determina la soluzione approssimata di equazioni differenziali alle derivate parziali su un dominio definito.

Ogni qualvolta si effettua una analisi virtuale mediante il Metodo degli Elementi Finiti, durante il Pre-Processing si possono individuare due fasi distinte che portano alla generazione del modello:

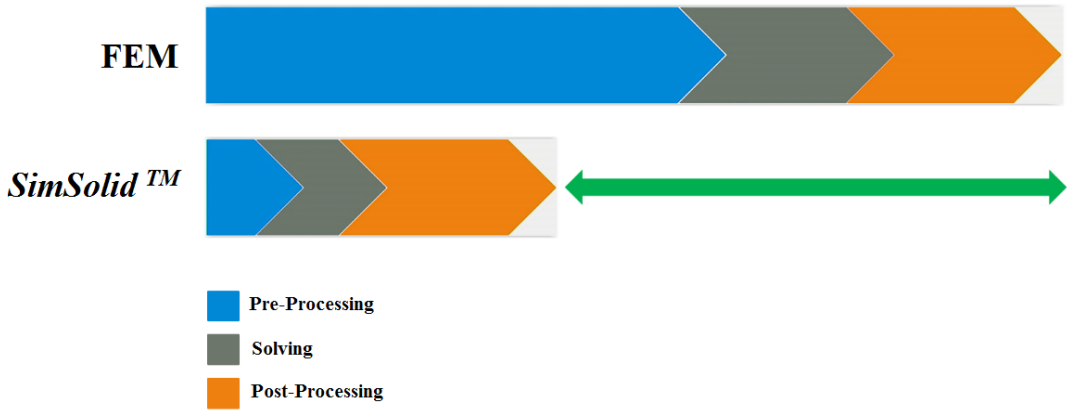
- *Semplificazione geometrica*: sostituzione del modello reale con un modello semplificato, eliminando tutti gli aspetti che possono risultare poco rilevanti per la soluzione desiderata. Inoltre tale fase di semplificazione è necessaria per migliorare la qualità della fase successiva, ovvero il processo di meshing. Infatti lasciare ad esempio superfici e bordi di dimensioni ridotte o addirittura parti tra loro disconnesse, potrebbe causare errori durante l'analisi, ottenendo risultati poco realistici ed aumentando la durata delle simulazioni;
- *Discretizzazione*: passaggio da un modello continuo (numero infinito di gradi di libertà) ad un modello discreto (numero finito di gradi di libertà). La discretizzazione avviene attraverso la creazione di un dominio di calcolo (mesh) composto da elementi di geometria semplice, ciascuno dei quali è definito dalla posizione dei suoi vertici, detti nodi. All'aumentare del numero ed al diminuire delle dimensioni degli elementi della mesh, aumenta sia la precisione del risultato, sia il tempo di calcolo.

Tali attività sono essenziali per svolgere una analisi FEM, ma nello stesso tempo risultano abbastanza critiche. La semplificazione geometrica infatti è un passaggio non banale che richiede uno specialista altamente qualificato nelle tecnologie FEM e CAD, ed il processo di meshing in genere fallirebbe se eseguito sulla geometria originale. Inoltre sono le fasi più dispendiose in termini di tempo durante una intera analisi agli elementi finiti.

Per questi motivi è stato sviluppato il software *SimSolid* ^{TM} della compagnia *Altair Engineering Inc.* , che si differenzia dalla metodologia tradizionale. Esso infatti si presenta come uno strumento altamente innovativo e "rivoluzionario" di simulazione meccanica strutturale e termica basato su complessi algoritmi di calcolo che gli consentono di superare il concetto di mesh normalmente utilizzato nei tradizionali codici FEM. Le attività di semplificazione geometrica e di discretizzazione del modello da parte dell'operatore vengono eliminate,

semplificando di conseguenza l'esecuzione delle analisi, e riducendo drasticamente le tempistiche di calcolo.

È da precisare, però, che il software *SimSolid* ™ non nasce con lo scopo di sostituire i solutori agli elementi finiti già esistenti, ma con l'obiettivo di migliorare la progettazione nelle prime fasi, ove può risultare utile ottenere un feedback rapido sul progetto in questione. Esso infatti non è destinato a studi dettagliati, per i quali invece vengono ancora utilizzati i tradizionali metodi di simulazione FEM.



1 I sistemi di scarico

L'impianto di scarico è un sistema complesso ad alta tecnologia che parte dalla camera di combustione del motore e prosegue sino all'estremità posteriore dell'automobile. Inizialmente, un sistema di scarico aveva solamente lo scopo di massimizzare l'efficienza del motore, di abbattere il rumore emesso dal propulsore utilizzando i silenziatori e di convogliare i gas combusti all'esterno del vano motore. Da quasi un quarto di secolo, invece, si è aggiunto al sistema di scarico anche il compito del post-trattamento dei gas combusti utilizzando i catalizzatori, al fine di ridurre le emissioni inquinanti.

Per quanto riguarda l'architettura di una linea di scarico, è possibile suddividere la linea in due parti distinte a seconda della funzione svolta:

- *Parte calda (Hot End):* situata a ridosso del compartimento motore, è destinata ad ospitare i dispositivi per l'abbattimento delle emissioni inquinanti (catalizzatore). Essa infatti sfrutta le alte temperature dei gas combusti al fine di ottimizzare le reazioni chimiche presenti nel convertitore catalitico.
- *Parte fredda (Cold End):* situata successivamente alla Hot End, è destinata ad ospitare i dispositivi silenzianti per la riduzione dei livelli di rumorosità emessi all'esterno del veicolo.

Figura 1.1: Il sistema di scarico

1.1 Hot End

La parte calda di un sistema di scarico è il tratto di linea compreso tra l'uscita del compartimento motore e l'elemento disaccoppiante che la separa dalla parte fredda. In essa sono presenti i dispositivi per l'abbattimento delle emissioni inquinanti (catalizzatore) e sfrutta le alte temperature dei gas combusti al fine di ottimizzare le reazioni chimiche presenti nel convertitore catalitico.

In una Hot End sono generalmente presenti i seguenti componenti:

- Collettore (manifold) se motore aspirato;
- "Cono" se motore sovralimentato;
- Catalizzatore;
- Sonda lambda.

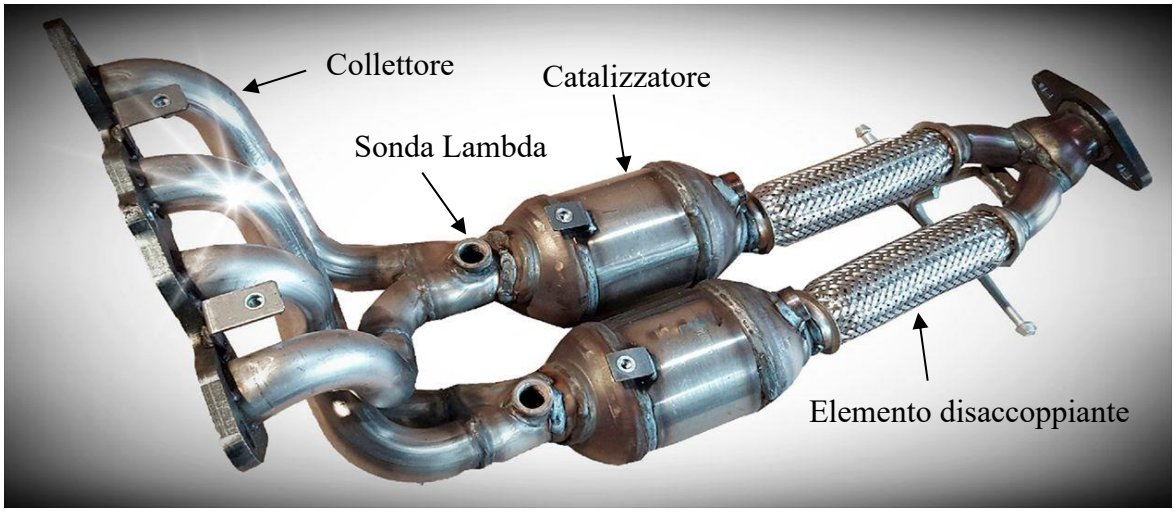


Figura 1.2: Hot End

1.1.1 Collettore

Il collettore (o manifold), è costituito da un insieme di tubazioni che si uniscono in un unico raccordo, e connette il motore con la linea di scarico. Inoltre la sua geometria è influenzata dal numero di cilindri e dal tipo di applicazione del motore. Infine, essendo a diretto contatto con il motore, il collettore risulta essere uno dei componenti più critici dal punto di vista delle dilatazioni, degli stress termici e delle sollecitazioni vibrazionali.

Il materiale normalmente utilizzato per il manifold è la ghisa per la sua elevata resistenza alle alte temperature, ma negli ultimi anni l'acciaio è stato ritenuto un ottimo sostituto, ottenendo una riduzione del peso ed un miglioramento delle prestazioni ed emissioni. In particolare sono utilizzati gli acciai ferritici in AISI 441 per via dell'elevata resistenza alle alte temperature e per la loro facile lavorazione nella realizzazione di componenti stampati.

Figura 1.3: Collettore

1.1.2 Catalizzatore

Il catalizzatore è un dispositivo in grado di ridurre le quantità di sostanze inquinanti come l'ossido di carbonio CO, gli ossidi di azoto NO_x , gli idrocarburi HC e il particolato. I catalizzatori più utilizzati e più efficienti sono i trivalenti, i quali svolgono contemporaneamente sia una funzione ossidante (ossidano gli HC e i CO in CO_2 e H_2O), sia una funzione riducente (riducono gli NO_x in N_2).

Un tipico convertitore catalitico è costituito da un involucro in acciaio inox all'interno del quale è posizionato un monolite ceramico a celle passanti. I canali di passaggio sono rivestiti da uno strato poroso di allumina impregnato di catalizzatori, ovvero metalli nobili come platino, palladio o rodio che creano un ambiente riducente. Tale struttura porosa ha il vantaggio di esporre un'ampia superficie di contatto con i gas mantenendo una buona resistenza meccanica e fluidodinamica.

L'intervallo di temperatura ottimale per il quale si raggiunge un buon rendimento del dispositivo è di circa 300÷800 °C. Ciò induce a posizionare il catalizzatore subito dopo il collettore e a monte dei silenziatori. Inoltre si può ricorrere all'uso di ripari calore o soluzioni con Hot End full incapsulate, al fine di mantenere caldo il catalizzatore ed evitando così il più possibile dispersioni di calore verso l'ambiente.

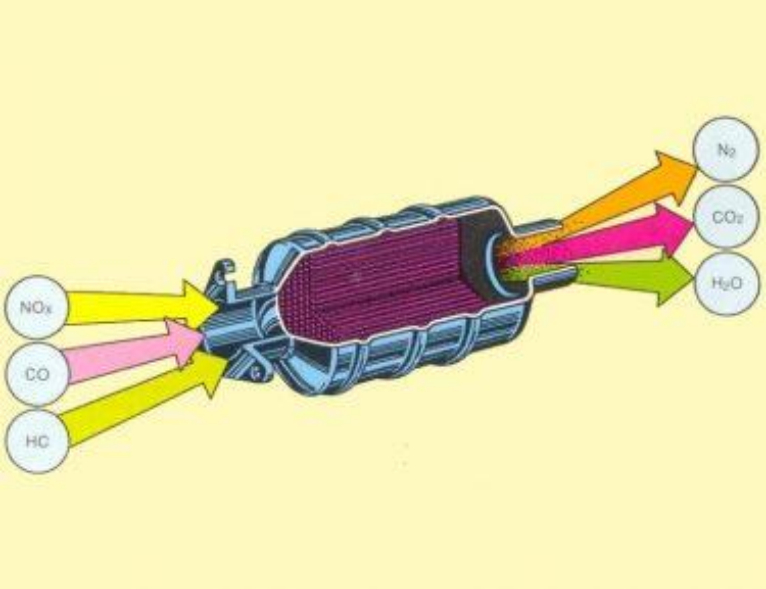


Figura 1.4: Catalizzatore

1.1.3 Sonda Lambda

Affinché il catalizzatore abbia un elevato rendimento, è necessario raggiungere una miscela aria-combustibile avente titolo controllato con la massima accuratezza. Il rapporto aria-combustibile ottimale in un motore a benzina, ad esempio, è pari a 14,7 kg di aria per 1 kg di carburante (miscela stechiometrica). Per questo motivo si impiega una sonda Lambda che, posizionata a monte del catalizzatore, rileva il contenuto di ossigeno residuo nel gas di scarico e comunica con la centralina elettronica che gestisce la regolazione della composizione della miscela.

La sonda è costituita da materiale ceramico ricoperto all'interno e all'esterno da platino (elettrodi), così da poter misurare la differenza tra il contenuto di ossigeno residuo del gas di scarico e il contenuto di ossigeno dell'aria ambiente.

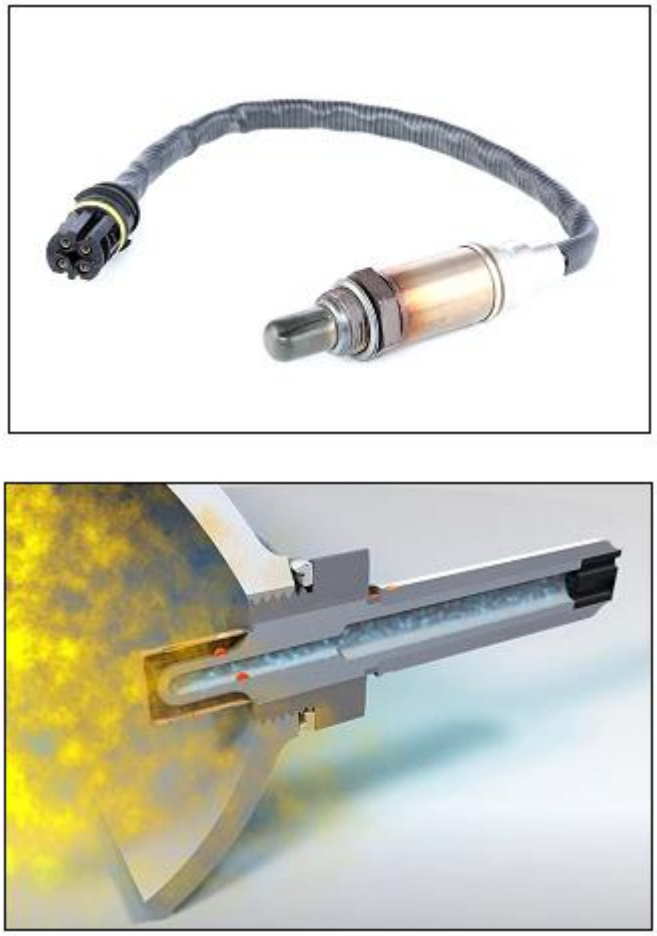


Figura 1.5: Sonda Lambda

1.2 Cold End

La parte fredda di un sistema di scarico è il tratto di linea compreso tra l'elemento disaccoppiante, situato al termine della Hot End, ed il condotto finale calibrato, chiamato anche codino. In essa sono presenti principalmente i dispositivi silenzianti per la riduzione dei livelli di rumorosità emessi all'esterno del veicolo e, a differenza dei catalizzatori, per un funzionamento ottimale non necessitano di alte temperature dei gas combusti.

In una Cold End sono generalmente presenti i seguenti componenti:

- Elemento disaccoppiante;
- Tubazioni;
- Staffe;
- Tasselli;
- Silenziatore;
- Codino finale.

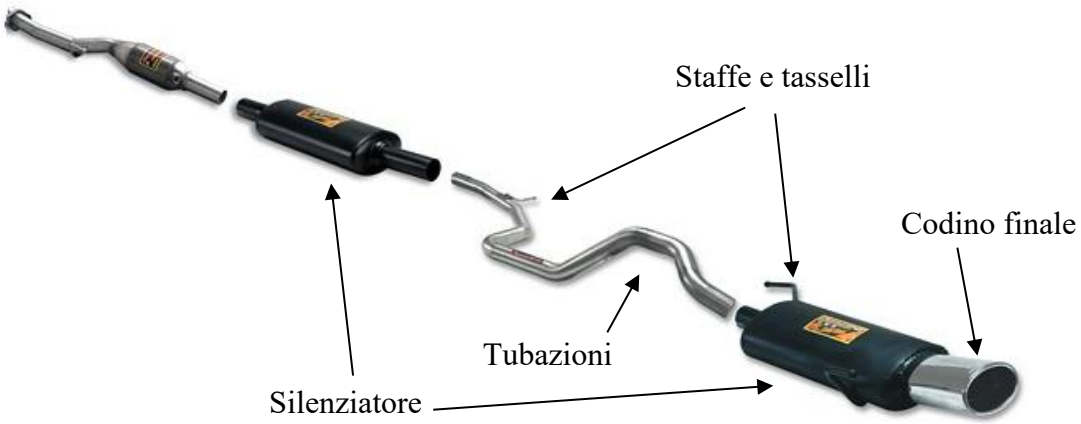


Figura 1.6: Cold End

1.2.1 Elemento disaccoppiante

L'elemento disaccoppiante è il componente situato tra la Hot End e la Cold End. Esso infatti ha lo scopo di disaccoppiare strutturalmente i due tratti di linea per limitare la trasmissione delle vibrazioni prodotte dal motore durante la combustione. Inizialmente veniva utilizzato principalmente un giunto sferico, ma con il passare del tempo nella maggior parte delle applicazioni è stato sostituito da un giunto flessibile. Infatti, oltre alla funzione di collegamento, tale giunto presenta delle connessioni ermetiche che evitano qualsiasi possibile perdita di gas verso l'esterno.

Il flessibile è costituito internamente da due soffietti (sottili fogli in metallo) aventi lo scopo di assorbire le vibrazioni provenienti dalla Hot End e di far fluire i gas di scarico evitando perdite. Esternamente, invece, è presente una maglia che protegge i soffietti da eventuali danneggiamenti.

In base all'impiego, il flessibile può essere di tre tipologie:

- Flessibile standard;
- Flessibile standard con treccia interna (per motori diesel turbocompressi);
- Flessibili rinforzati (per autoveicoli di grossa cilindrata);

Figura 1.7: Giunto sferico (sinistra) - Giunto flessibile (destra)

1.2.2 Staffe

Le staffe sono i componenti che sorreggono strutturalmente l'intera linea di scarico garantendone quindi il corretto posizionamento nel sottoscocca dell'autoveicolo. Ogni staffa viene saldata lungo le tubazioni della linea o sui fondelli dei silenziatori, e su ognuna di esse viene montato un tassello in gomma, a sua volta connesso con il sottoscocca dell'automobile. Le staffe quindi risultano essere i componenti maggiormente sollecitati, dovendo sorreggere il peso totale del sistema di scarico, ed anche la rottura di una singola staffa può risultare estremamente dannosa. Ad esempio, una eventuale rottura di una staffa provoca di conseguenza un aumento delle sollecitazioni sulle restanti staffe e lo spostamento dell'intero sistema di scarico.

Figura 1.8: Staffa

1.2.3 Tasselli

I tasselli sono componenti in materiale polimerico che permettono il collegamento della Cold End con il pianale dell'autoveicolo. In particolare da una estremità sono ancorate le staffe saldate al sistema di scarico e dall'estremità opposta le controstaffe saldate al telaio. Essi sono quindi dei vincoli elastici che permettono una adeguata liberà di movimento della linea, smorzandone le vibrazioni.

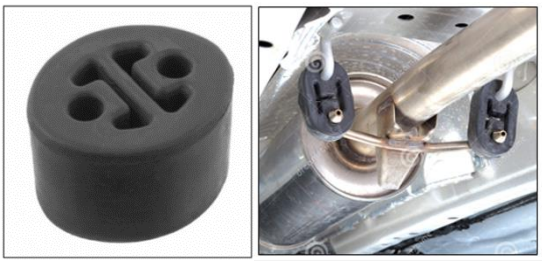


Figura 1.9: Tasselli

1.2.4 Silenziatore

Il silenziatore è un dispositivo in grado di ridurre il livello di rumorosità causato dalla combustione nel motore e dal passaggio dei gas di scarico. Esso è di solito costituito da una candela di ingresso, una di uscita ed in alcuni casi una "di travaso", le quali possono presentare dei tratti di superficie forata per permettere alle onde sonore di pressione di disperdersi in diverse direzioni. Il volume del corpo è suddiviso in più camere da diaframmi generalmente forati e progettati in modo da ridurre il livello di rumorosità a determinate frequenze, ed in tali camere è presente del materiale fonoassorbente (solitamente fibra di vetro).

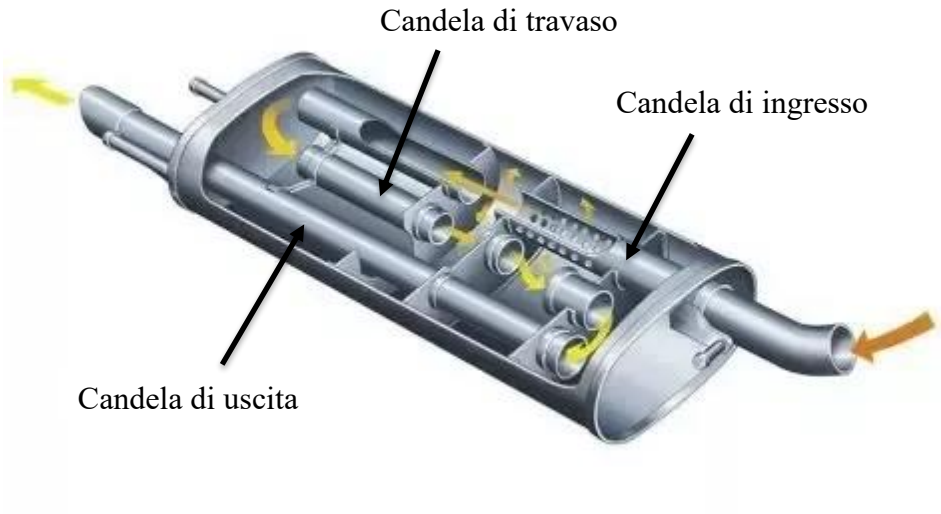


Figura 1.10: Silenziatore

1.2.5 Codino finale

Il codino costituisce il tratto terminale del sistema di scarico, ed è quindi l'ultimo elemento attraversato dai gas di scarico prima della dispersione in ambiente. Esso è rappresentato da un tratto di tubazione abbastanza corto che fuoriesce dal silenziatore posteriore, ma, in alcuni casi, si tende ad inglobarlo all'interno della carrozzeria per limitarne la visibilità. Inoltre, raramente, tale tubo presenta uno sviluppo di lunghezza maggiore per esigenze di ottimizzazione delle prestazioni acustiche dell'intera linea di scarico. Infine, per puri fini estetici, il codino può essere rivestito con layer in acciaio cromato.

2 Metodi numerici di simulazione

Da quando negli anni ’70 ha iniziato ad avere un ruolo importante nelle industrie automobilistiche ed aerospaziali, la simulazione si è evoluta con il tempo e con la tecnologia sempre più all’avanguardia, diventando uno strumento del tutto essenziale durante le fasi di progettazione. Essa infatti, al giorno d’oggi, è stata adottata in diversi altri settori come ad esempio quello biomedicale, elettronico, dei beni di consumo, della difesa e dell’energia.

Le analisi virtuali consentono di risparmiare tempo e denaro rafforzando la competitività delle aziende e la loro posizione sul mercato. Durante la progettazione, infatti, si possono ottenere con più facilità prodotti di maggior qualità e con design innovativi, riducendo così al minimo il numero di prototipi da realizzare prima della produzione vera e propria.

È possibile distinguere tre metodi differenti per poter risolvere un qualsiasi problema di tipo ingegneristico:

- *Metodo Analitico*: si basa su un approccio classico formulando il problema sotto forma di equazioni matematiche. Non vi sono approssimazioni durante la risoluzione delle equazioni, e quindi la precisione del risultato finale è del 100%.
- *Metodo Numerico*: il problema matematico viene risolto tramite degli algoritmi che approssimano la soluzione finale. La precisione del risultato è quindi inferiore al 100% e, per tale motivo, alcuni risultati devono essere verificati tramite il metodo analitico o quello sperimentale. Tale metodo, però, risulta essere più veloce rispetto al metodo analitico.
- *Metodo Sperimentale*: applicabile solo su un prototipo fisico, richiede tempo e costi maggiori rispetto ai metodi precedenti. Inoltre per validare un risultato è necessario effettuare gli stessi test su più prototipi differenti.

Il metodo analitico si è rivelato essere uno strumento utile principalmente nella risoluzione di problemi semplici in campo discreto, mentre per i sistemi continui complessi è maggiormente utilizzato il metodo numerico, poiché ottenere delle

soluzioni in poco tempo e con una precisione accettabile è molto più importante rispetto ad avere una precisione assoluta ma con poca rapidità. Esistono diverse tipologie di metodi numerici a seconda dal tipo di analisi e dal risultato che si vuole ricavare, ma il più utilizzato per la risoluzione di problemi ingegneristici di grandi dimensioni descritti da equazioni differenziali risulta essere il Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

Per svolgere una qualsiasi analisi agli elementi finiti, generalmente, vengono eseguite tre fasi differenti. Durante la prima fase di *Pre-Processing* viene modellata la geometria del componente da simulare, vengono stabiliti i vincoli e i carichi applicati e vengono definite le proprietà fisiche del sistema. Durante la seconda fase di *Solving* avviene la risoluzione del modello tramite una formulazione matematica appropriata. Infine durante l'ultima fase di Post-Processing avviene la visualizzazione e l'analisi dei risultati ottenuti.

La progettazione di un componente o di un sistema punta sempre all'ottimizzazione, ovvero vengono effettuate iterativamente una serie di operazioni sino al raggiungimento del risultato desiderato. Ciò che fa la differenza, però, sono gli strumenti e i metodi utilizzati durante le fasi di analisi per ottenere un progetto ottimale. Secondo la metodologia tradizionale, ad esempio, partendo dalla disegnazione CAD del componente da progettare, si passa alla fase di Pre-Processing, ove avviene la semplificazione geometrica e la discretizzazione (meshing) del modello da analizzare, e successivamente si effettuano le fasi di Solving e Post-Processing. Una volta raccolti i risultati si ritorna alla prima fase di disegnazione CAD, durante la quale vengono apportate tutte le modifiche di ottimizzazione necessarie, per poi rianalizzare il modello aggiornato. Se però non si raggiunge immediatamente il risultato desiderato, tale ciclo iterativo può essere ripetuto anche per un numero elevato di volte, risultando quindi estremamente dispendioso in termini di tempo.

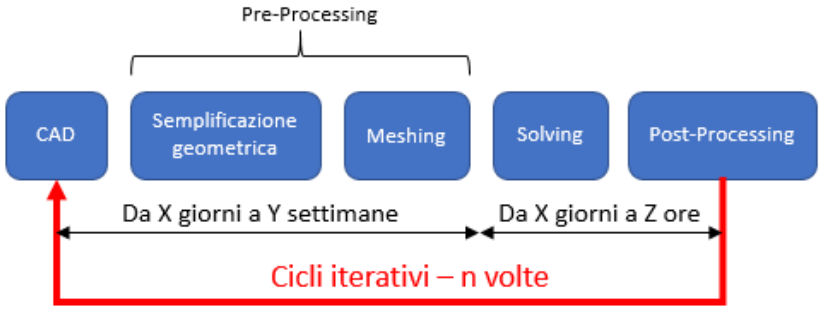


Figura 2.1: Ciclo di ottimizzazione utilizzando la metodologia FEM tradizionale

Esistono però metodi che si differenziano dalla metodologia tradizionale. Infatti il software *SimSolid* ^{TM} della compagnia *Altair Engineering Inc.* , si basa su complessi algoritmi di calcolo che non richiedono la semplificazione geometrica e la discretizzazione del modello da parte dell'operatore, semplificando di conseguenza l'esecuzione delle analisi e riducendo drasticamente le tempistiche di calcolo. Tale software, però, non nasce con lo scopo di sostituire i solutori agli elementi finiti già esistenti, ma si pone l'obiettivo di migliorare la progettazione nelle prime fasi di ottimizzazione ove può risultare utile ottenere un feedback rapido sul progetto in questione. In questo caso, infatti, i cicli iterativi di ottimizzazione possono essere effettuati solamente tra la disegnazione CAD e le analisi svolte con *SimSolid* ^{TM}, e solo successivamente si possono effettuare le tradizionali analisi agli elementi finiti per ottenere i risultati finali di maggior dettaglio.

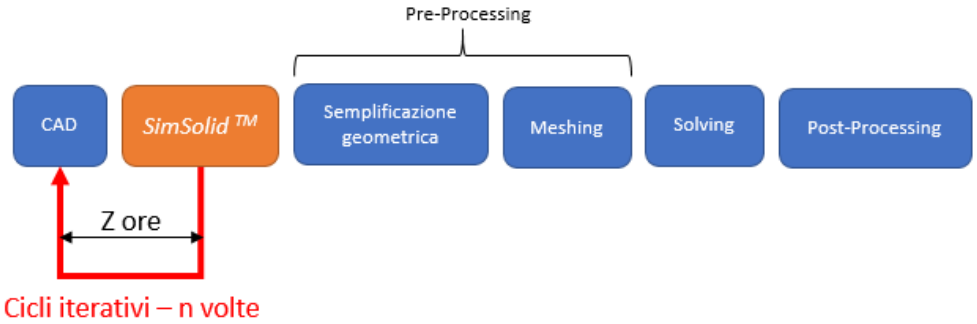


Figura 2.2: Ciclo di ottimizzazione utilizzando SimSolid ^{TM}

2.1 Metodo FEM tradizionale

Quando si effettua un'analisi agli elementi finiti con il metodo tradizionale, è necessario eseguire una serie di passaggi ben precisi durante le fasi di Pre-Processing, Solving e Post-Processing. I software utilizzati durante il lavoro di tesi per svolgere una simulazione su un sistema di scarico sono stati i seguenti:

- Pre-Processing: *HyperMesh* ™ di *Altair Engineering Inc.* ;
- Solving: *MSC Nastran*;
- Post-Processing: *HyperView* ™ / *HyperGraph* ™ di *Altair Engineering Inc.*

2.1.1 Pre-Processing

Durante la fase di Pre-Processing avviene l'importazione della geometria e la realizzazione del modello matematico, trasformando il modello geometrico CAD in un modello ad elementi finiti. *HyperMesh* ™ possiede un'interfaccia grafica user friendly che consente all'operatore di preparare il modello in maniera quasi intuitiva.

2.1.1.1 Importazione del modello CAD

Il primo step consiste nell'importazione del modello geometrico CAD, ovvero la base sulla quale avviene la realizzazione della mesh. Possono essere importati diversi formati come ad esempio STEP, UG, IGES, ecc. Successivamente è importante creare un *collector* per ogni componente, all'interno del quale verrà allocata la geometria e la mesh corrispondente.

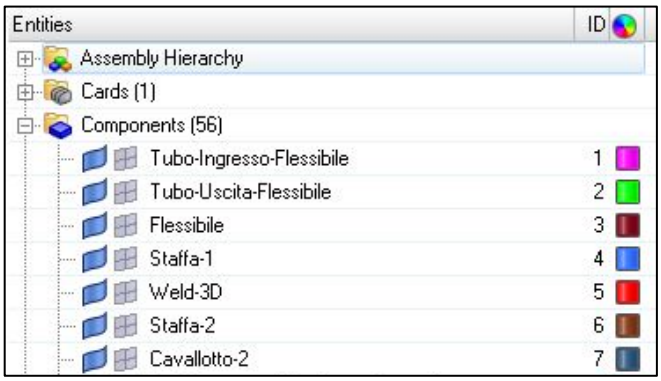
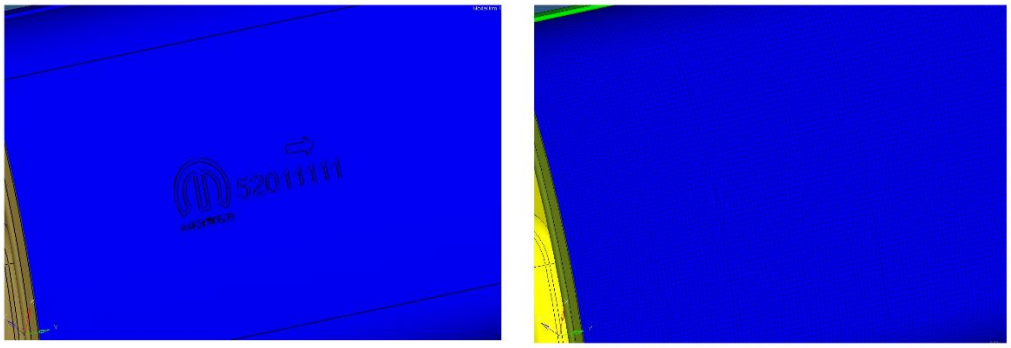


Figura 2.3: Creazione collectors HyperMesh ™

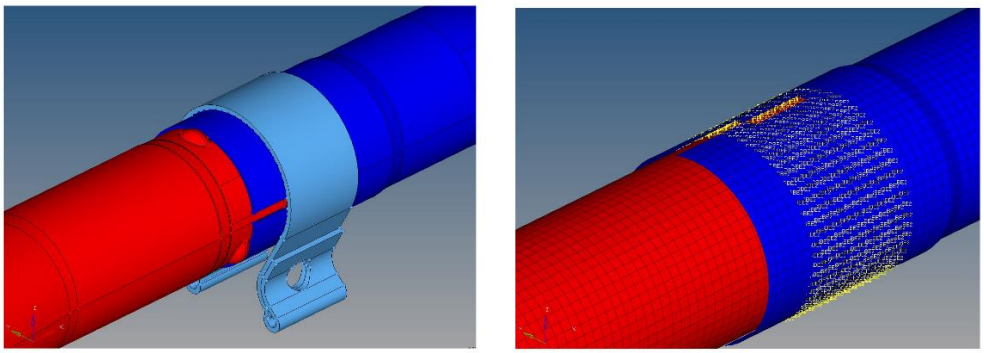
2.1.1.2 Semplificazione geometrica

In tale fase avviene la sostituzione del modello reale importato precedentemente con un modello semplificato, andando ad eliminare tutti quegli aspetti che possono risultare poco rilevanti per la soluzione desiderata, o che possono creare problematiche durante le fasi successive. Vengono ad esempio rimossi eventuali spazi vuoti presenti, linee, superfici e componenti troppo piccoli o complessi per essere discretizzati correttamente (fori di dimensioni ridotte, eventuali loghi presenti, ecc.). La loro presenza infatti porterebbe ad una successiva mesh di bassa qualità, estremamente complicata, che potrebbe generare errori durante l'analisi ed aumentare inutilmente la durata delle simulazioni. La semplificazione geometrica quindi è un passaggio non banale che richiede uno specialista altamente qualificato nelle tecnologie FEM e CAD.



Geometria CAD originale - Si logo Mesh su geometria semplificata - No logo

Figura 2.4: Semplificazione geometrica - Eliminazione logo – Metodo FEM tradizionale



Geometria CAD originale - Si collare Mesh su geometria semplificata - No collare

Figura 2.5: Semplificazione geometrica - Eliminazione di un componente – Metodo FEM tradizionale

2.1.1.3 Costruzione della mesh

Tutti i metodi numerici incluso il metodo degli elementi finiti necessitano del passaggio da un modello continuo (numero infinito di gradi di libertà) ad un modello discreto (numero finito di gradi di libertà). La discretizzazione avviene attraverso la creazione di un dominio di calcolo (mesh) composta da elementi di geometria semplice, ciascuno dei quali è definito dalla posizione dei suoi vertici, detti nodi.

Una volta terminata la fase di semplificazione geometrica si passa alla discretizzazione delle superfici con la costruzione della mesh. Le tipologie di mesh disponibili sono 1D, 2D e 3D. Poiché all'aumentare del numero dei nodi aumenta di conseguenza il tempo di calcolo, è consigliabile utilizzare una mesh 1D e 2D piuttosto che una mesh 3D. Ciò però non è sempre possibile. In generale è preferibile generare una mesh 2D per tutti quei componenti che possiedono uno spessore trascurabile rispetto alla superficie totale, mentre l'utilizzo dei solidi 3D avviene per la discretizzazione di corpi tozzi, solo se strettamente necessario. In tale caso è consigliabile l'inserimento di almeno un doppio strato di elementi lungo lo spessore per poter effettuare successivamente un'attendibile ed accurata lettura di strain/stress.

Per generare la mesh di componenti che costituiscono un sistema di scarico, normalmente vengono considerate le seguenti linee guida:

- *Tubazioni, involucri, fondelli, diaframmi, candele, codino*: modellazione shell 2D. Le informazioni riguardanti lo spessore sono inserite nelle proprietà dei componenti;

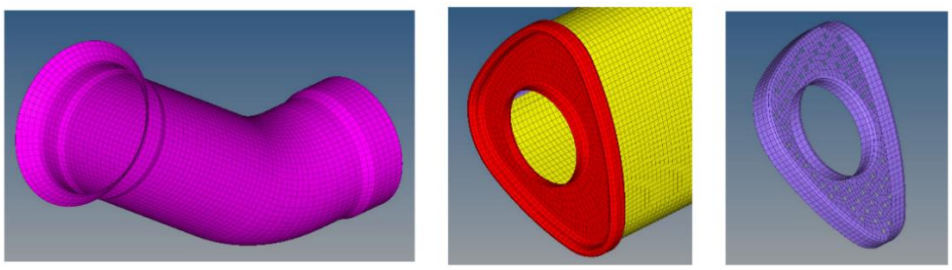


Figura 2.6: Mesh shell 2D – Metodo FEM tradizionale

- *Staffe, cavallotti*: modellazione solid 3D.

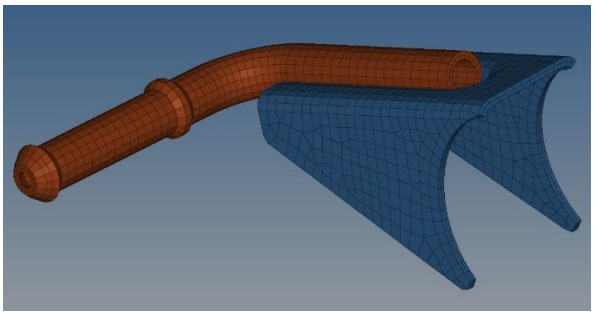


Figura 2.7: Mesh solid 3D – Metodo FEM tradizionale

- *Saldatura shell-shell*: la saldatura tra due componenti shell viene realizzata utilizzando un elemento shell opportunamente inclinato (indicato in rosso) e una fila di elementi rigidi (RBE2) verticali (indicati in giallo).

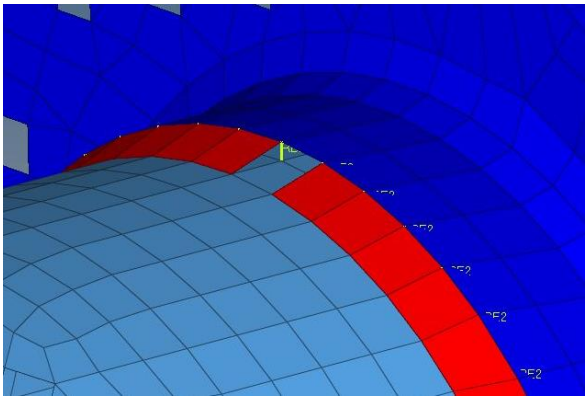


Figura 2.8: Saldatura shell-shell – Metodo FEM tradizionale

- *Saldatura shell-solid o solid-solid*: la saldatura viene realizzata utilizzando uno o due elementi 3D-Penta (indicati in rosso).

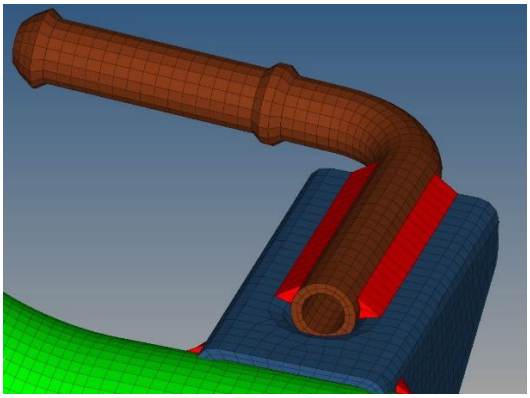


Figura 2.9: Saldatura solid-solid – Metodo FEM tradizionale

- *Connessione di rigidezza infinita tra due nodi*: la connessione viene realizzata utilizzando elementi rigidi RBE2 che uniscono rigidamente due nodi.

- *Connessione con tassello*: la connessione viene realizzata utilizzando un elemento elastico CBUSH definito tra due nodi indipendenti ma coincidenti geometricamente. Il primo nodo è collegato alla staffa con una "stella" di elementi rigidi RBE2, il secondo può essere collegato ad una ulteriore "stella" di RBE2 agganciata alla controstaffa, oppure, se non è presente la controstaffa, può essere vincolato con un SPC *constrain* (6 gradi di liberà vincolati). L'elemento CBUSH possiede lo stesso comportamento di una molla, e le informazioni riguardanti la rigidezza elastica lungo gli assi vengono inserite nelle proprietà del componente. Se i tasselli non sono orientati secondo il sistema di riferimento globale è necessario creare un sistema di riferimento locale secondo il quale definire correttamente le proprietà di rigidezza.

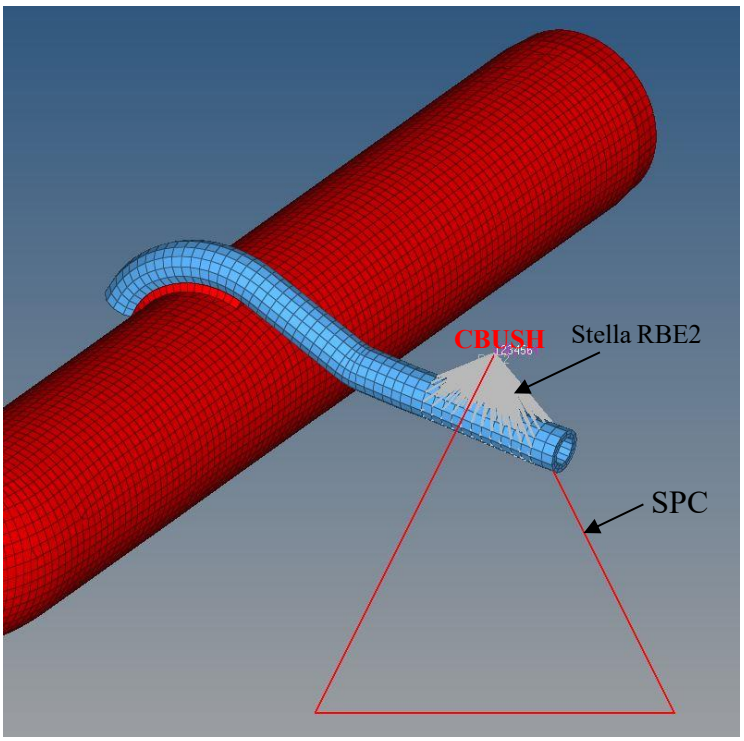


Figura 2.10: Connessione con tassello – Metodo FEM tradizionale

- *Connessione con flessibile*: il flessibile viene rappresentato mediante due "stelle" di elementi RBE2, i cui nodi indipendenti sono collegati tramite un elemento elastico CBUSH. Per inserire la massa del flessibile si utilizzano delle masse concentrate CONM2 divise equamente tra i due nodi che definiscono l'elemento elastico e le due estremità delle tubazioni unite dal flessibile.

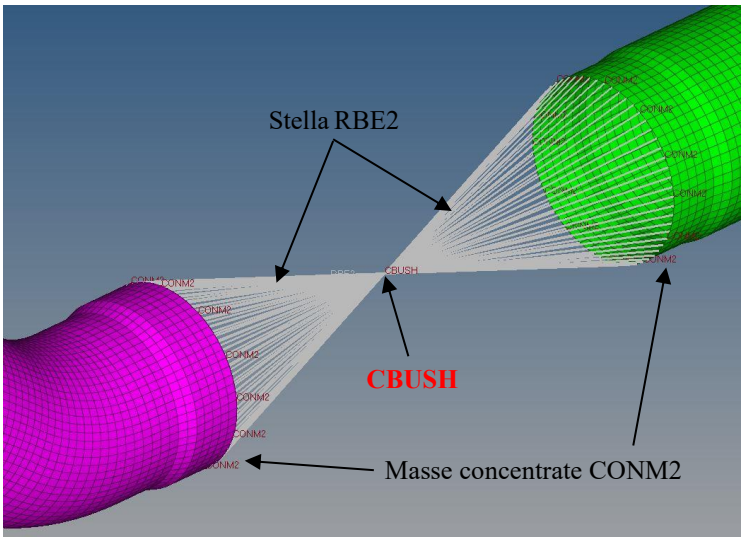


Figura 2.11: Connessione con flessibile – Metodo FEM tradizionale

2.1.1.4 Controllo della qualità della mesh

Dopo aver generato la mesh di un componente, è necessario effettuarne un controllo della qualità, al fine di ottenere risultati affidabili ed evitare quindi eventuali errori durante il processo di calcolo. I controlli da eseguire sono i seguenti:

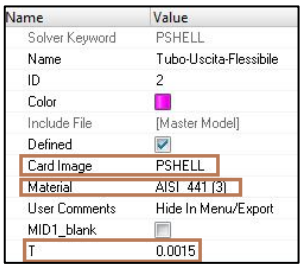
- *Ridurre al minimo il numero di elementi triangolari:* nonostante gli elementi triangolari siano necessari per discretizzare superfici con geometrie complesse, essi forniscono risultati meno precisi rispetto agli elementi a quattro nodi;
- *Eliminare eventuali free-edges:* il lato e i due nodi in comune di due elementi 2D contigui devono essere unici, quindi non vi deve essere presente alcuna discontinuità;

- *Verificare i valori di Aspect Ratio, Skew e Jacobian*: l'Aspect Ratio fornisce informazioni sulla distorsione dell'elemento in termini di proporzioni tra i lati, lo Skew rappresenta la deviazione degli angoli dell'elemento rispetto a quelli di un elemento ideale e lo Jacobian descrive la distorsione dell'elemento rispetto ad uno ideale in termini di curvatura dei bordi;
- *Controllare le normali*: tutti gli elementi di ogni componente devono presentare la stessa normale al piano.

2.1.1.5 Definizione delle proprietà e dei materiali

In tale fase vengono associate le proprietà che caratterizzano i vari componenti. É necessario quindi creare una proprietà per ogni componente dell'assieme. Inoltre nel software vengono caricate le card dei materiali utilizzati, nelle quali sono definite proprietà meccaniche come densità, modulo di Young, coefficiente di Poisson, tensione di snervamento, ecc.

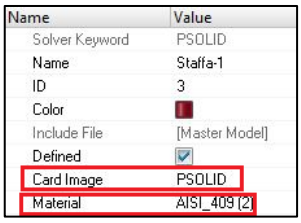
Per un componente di tipo shell, all'interno della proprietà corrispondente è necessario selezionare PSHELL come *Card Image,* scegliere il materiale da associare e definire lo spessore.



Name	Value
Solver Keyword	PSHELL
Name	Tubo-Uscita-Flessibile
ID	2
Color	
Include File	[Master Model]
Defined	☑
Card Image	PSHELL
Material	AISI_441 [3]
User Comments	Hide In Menu/Export
MID1_blank	☐
T	0.0015

Figura 2.12: Proprietà PSHELL – Metodo FEM tradizionale

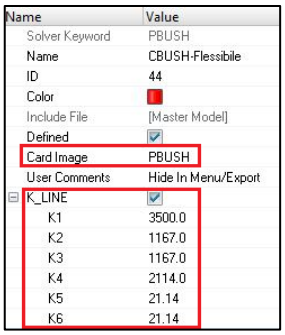
Per un componente di tipo solid è necessario selezionare PSOLID come *Card Image* e scegliere il materiale da associare.



Name	Value
Solver Keyword	PSOLID
Name	Staffa-1
ID	3
Color	
Include File	[Master Model]
Defined	☑
Card Image	PSOLID
Material	AISI_409 [2]

Figura 2.13: Proprietà PSOLID – Metodo FEM tradizionale

Per un elemento CBUSH è necessario selezionare PBUSH come *Card Image* ed inserire i vari parametri di rigidezza elastica lineare e torsionale.



Name	Value
Solver Keyword	PBUSH
Name	CBUSH-Flessibile
ID	44
Color	
Include File	[Master Model]
Defined	✓
Card Image	PBUSH
User Comments	Hide In Menu/Export
K_LINE	✓
K1	3500.0
K2	1167.0
K3	1167.0
K4	2114.0
K5	21.14
K6	21.14

Figura 2.14: Proprietà PBUSH – Metodo FEM tradizionale

2.1.1.6 Definizione dei vincoli

In tale fase sono impostate le condizioni di vincolo a cui sono sottoposti i componenti. I nodi da vincolare sono associati ad un SPC *constrain* (6 gradi di libertà vincolati) tramite una stella di RBE2.

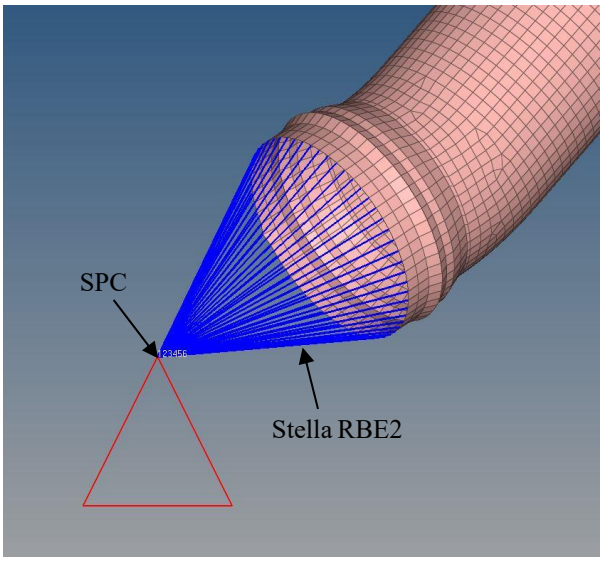


Figura 2.15: Definizione dei vincoli – Metodo FEM tradizionale

2.1.1.7 Esportazione del modello

Terminata la creazione del modello matematico, si effettua l'esportazione in un formato leggibile dal solutore.

2.1.2 Solving

La fase di Solving consiste nella risoluzione del modello strutturale con un software di calcolo opportuno. Durante il lavoro di tesi il software utilizzato è stato *MSC Nastran*. Si tratta di uno strumento sfruttato principalmente per condurre analisi statiche, dinamiche e termiche in domini lineari e non-lineari. Esso si basa infatti su metodi numerici altamente sofisticati, ed i problemi non-lineari vengono risolti con tecniche numeriche implicite integrate, permettendo così di svolgere velocemente qualsiasi tipo di analisi. Inoltre il programma non possiede funzionalità che consentono di creare graficamente un modello, una mesh o di visualizzare i risultati ottenuti. Infatti, per eseguire una analisi con *MSC Nastran,* è necessario creare un file di testo di lancio nel quale specificare i seguenti elementi:

- Modello matematico su cui svolgere l'analisi (esportato precedentemente in formato "*.txt*");
- Tipologia di analisi da svolgere;
- Eventuali carichi applicati al modello;
- Output da ricavare.

Se il processo di soluzione dovesse arrestarsi improvvisamente e mostrare un messaggio di "*fatal*", la causa principale potrebbe essere la presenza di una serie di errori commessi durante la fase di costruzione del modello, come ad esempio la presenza di una scarsa qualità degli elementi della mesh, delle proprietà non valide o assenti, oppure componenti non sufficientemente vincolati.

2.1.3 Post-Processing

Per il lavoro di tesi, durante la fase di Post-Processing, sono stati utilizzati i software *HyperView* ^{TM} e *HyperGraph* ^{TM}. Tramite *HyperView* ^{TM} è possibile eseguire delle analisi qualitative per via grafica, mostrando l'animazione nel tempo del sistema modellato o tramite mappe colorimetriche che forniscono una distribuzione di colori a seconda delle grandezze di interesse. Per valutazioni più accurate è inoltre possibile ricavare i valori puntuali in ogni nodo della grandezza fisica di output richiesta. Possono essere valutati ad esempio stress, deformazioni, spostamenti e reazioni vincolari del modello.

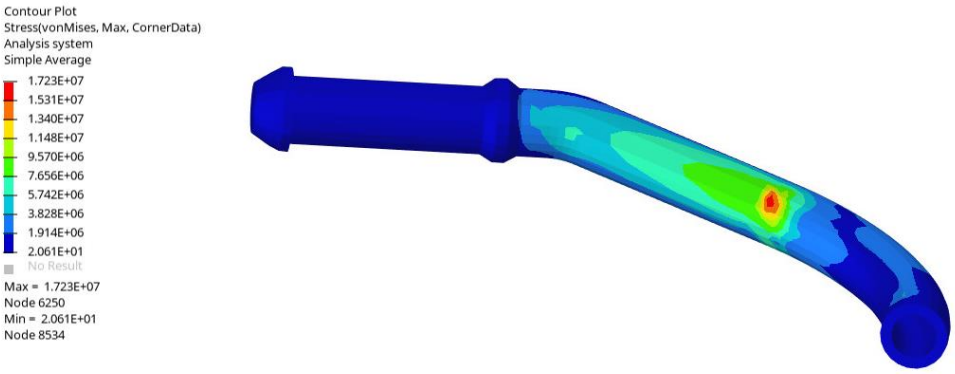


Figura 2.16: Post-Processing HyperView ^{TM} *– Metodo FEM tradizionale*

Tramite HyperGraph ^{TM}, invece, si possono ottenere grafici 2D e 3D.

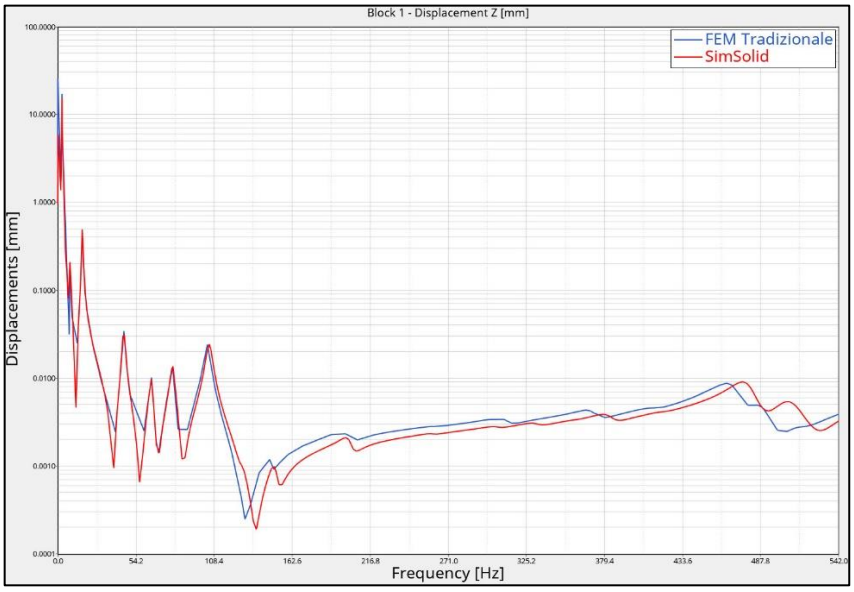


Figura 2.17: Post-Processing HyperGraph – Metodo FEM tradizionale

2.2 Metodo numerico meshless - *(SimSolid ™)*

Come per il metodo FEM tradizionale, anche quando si effettua un'analisi strutturale utilizzando *SimSolid ™*, è necessario seguire una serie di passaggi ben precisi durante le fasi di Pre-Processing, Solving e Post-Processing. A differenza però del metodo tradizionale, non vi è la necessità di utilizzare tre software differenti per ognuna delle tre fasi. Inoltre tale software possiede un'interfaccia grafica molto semplice e schematica, consentendo così all'operatore di condurre un'analisi in maniera quasi intuitiva.

2.2.1 Pre-Processing

Durante la fase di Pre-Processing avviene l'importazione della geometria, la creazione delle connessioni tra i vari componenti di un assieme e l'attribuzione dei materiali utilizzati.

2.2.1.1 Importazione del modello CAD

Il primo step consiste nell'importazione del modello geometrico CAD. Possono essere importati diversi file provenienti dai più comuni software di disegnazione CAD 3D come ad esempio *Catia, NX, Creo, SOLIDWORKS, Inventor, SolidEdge, e Onshape,* nonché i formati di file neutri come JT, STEP, Parasolid, STL e ACIS. *SimSolid ™* non si limita però soltanto ad importare la superficie CAD o la geometria solida, ma utilizza un approccio geometrico più efficiente che consente di:

- Importare la struttura gerarchica ad albero di un assieme presente nel file CAD originario;
- Individuare in maniera dettagliata le singole facce che costituiscono un componente;
- Identificare automaticamente la presenza di pareti sottili, raccordi e fori passanti;
- Riconoscere automaticamente la natura di alcuni componenti come viti, dadi, rondelle.

Inoltre, tramite l'impostazione *Geometry Import Settings,* è possibile scegliere il livello di dettaglio della geometria da importare. Si possono infatti selezionare quattro diversi livelli di risoluzione (Standard (default) – Enhanced – Fine – Custom). Scegliendo una risoluzione più fine, la geometria risulta essere più dettagliata ma contemporaneamente diminuisce la velocità di calcolo delle analisi. È consigliabile quindi aumentare la risoluzione solamente se si dovessero notare superfici inesistenti, non regolari, o se una determinata analisi dovesse arrestarsi improvvisamente.

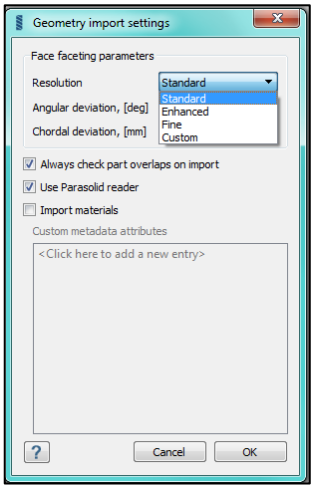


Figura 2.18: Geometry import settings - SimSolid ™

2.2.1.2 Controllo di sovrapposizione dei componenti

Una volta importata la geometria, può comparire un messaggio di *warning* in cui vengono elencati eventuali componenti sovrapposti. Infatti, durante la fase di importazione del modello, il software effettua automaticamente un controllo di sovrapposizione dei componenti. Si tratta di un buon feedback sulla qualità del modello, e nonostante tali componenti possono essere comunque successivamente connessi tra loro, è buona norma non avere sovrapposizioni tra superfici nelle regioni maggiormente sollecitate.

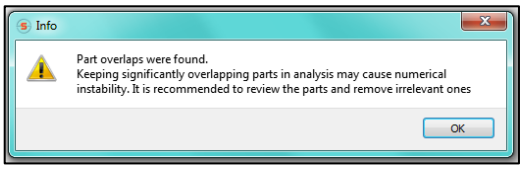


Figura 2.19: Controllo di sovrapposizione dei componenti - SimSolid ™

2.2.1.3 Controllo di eventuali difetti geometrici

Il software permette di effettuare automaticamente un rapido controllo sulla presenza di eventuali difetti geometrici che potrebbero successivamente generare errori durante le analisi.

2.2.1.4 Creazione delle connessioni

Per svolgere una qualsiasi analisi strutturale è necessario che tutti i componenti che costituiscono un assieme siano connessi tra loro. *SimSolid* ™ consente di creare diverse tipologie di connessioni, per replicare al meglio i collegamenti presenti nella realtà. Ad esempio è possibile ricreare connessioni di vincolo (bonded), scorrevoli (sliding), bullonate, saldature a punti o a filo e connessioni elastiche. Inoltre il software, oltre alla modalità manuale da parte dell'operatore, permette di creare automaticamente le connessioni scegliendo semplicemente un valore generale per le tolleranze di connessione (*gap* e *penetration*).

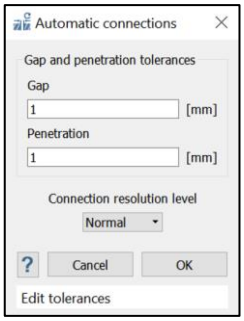


Figura 2.20: Automatic connections - SimSolid ™

Durante l'attività di tesi, è stato effettuato un lavoro preliminare per cercare di replicare il più fedelmente possibile i collegamenti tra i vari componenti di un sistema di scarico e creare quindi una metodologia sulle connessioni in *SimSolid* ™ da poter utilizzare successivamente in azienda. Sono state infatti scelte quelle tipologie di connessioni con le quali si sono ottenuti, durante numerose prove, risultati simili a quelli ricavati tramite il metodo FEM tradizionale (metodo consolidato). Di seguito sono descritte le principali connessioni utilizzate per modellare una linea di scarico.

- *Connessione di saldatura tubo-tubo, tubo-fondello, tubo-diaframma:* tale connessione è l'equivalente della saldatura tra due componenti shell effettuata con il metodo FEM tradizionale. Per creare la connessione è necessario utilizzare l'impostazione *Add/edit part connections,* selezionare il bordo a contatto tra i due componenti e scegliere il valore di *gap/penetration* ed il livello di risoluzione più opportuno a seconda della geometria delle parti.

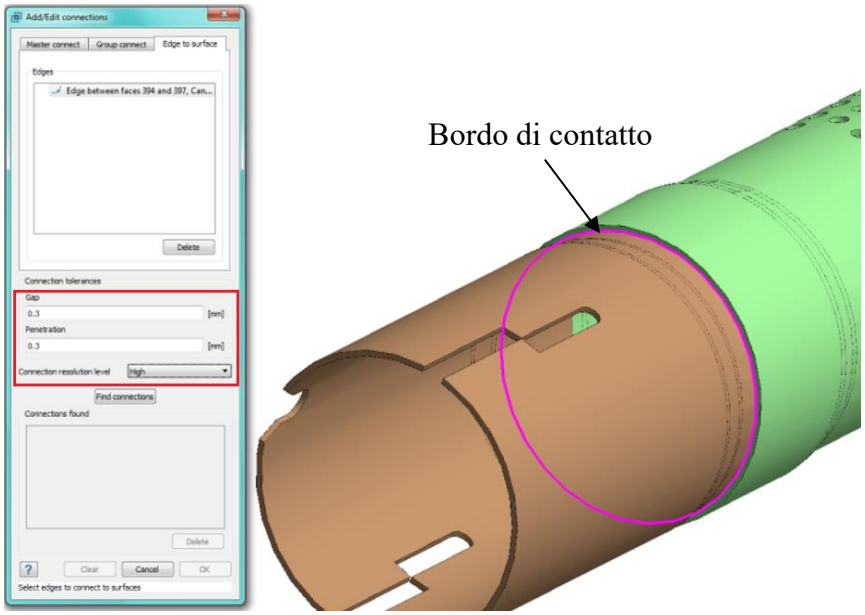


Figura 2.21: Connessione tubo-tubo - SimSolid ™

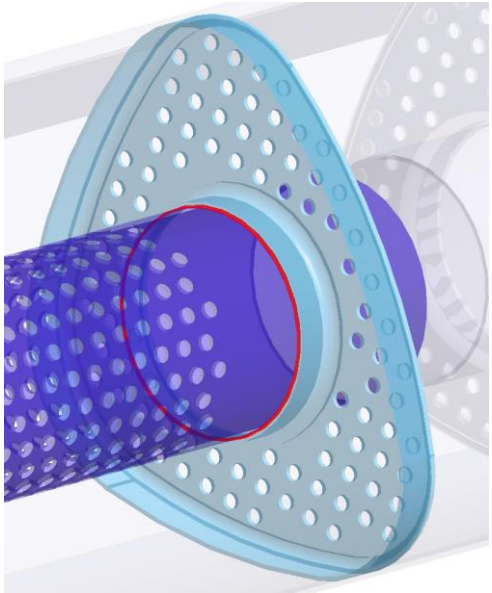


Figura 2.22: Connessione tubo-diaframma - SimSolid ™

- *Connessioni di saldatura tubo-staffa, staffa-cavallotto:* tale connessione è l'equivalente della saldatura 3D tra un componente shell e uno solid, o tra due componenti solid, effettuata con il metodo FEM tradizionale. Per ottenere un buon livello di affidabilità dei risultati è necessario possedere già nel modello CAD importato le superfici delle saldature 3D. Esse vengono quindi riconosciute dal software come componenti. Spesso, però, la geometria di un sistema si scarico che deve essere analizzato è sprovvista di saldature 3D. È quindi necessario creare le superfici delle saldature tramite un secondo software e successivamente importarle in *SimSolid* ™ come file CAD separato dall'intera linea di scarico. Per creare la connessione bisogna utilizzare l'impostazione *Add/edit part connections*, selezionare i componenti da connettere (compresa la saldatura 3D), e scegliere il valore di *gap/penetration* ed il livello di risoluzione più opportuno a seconda della geometria delle parti.

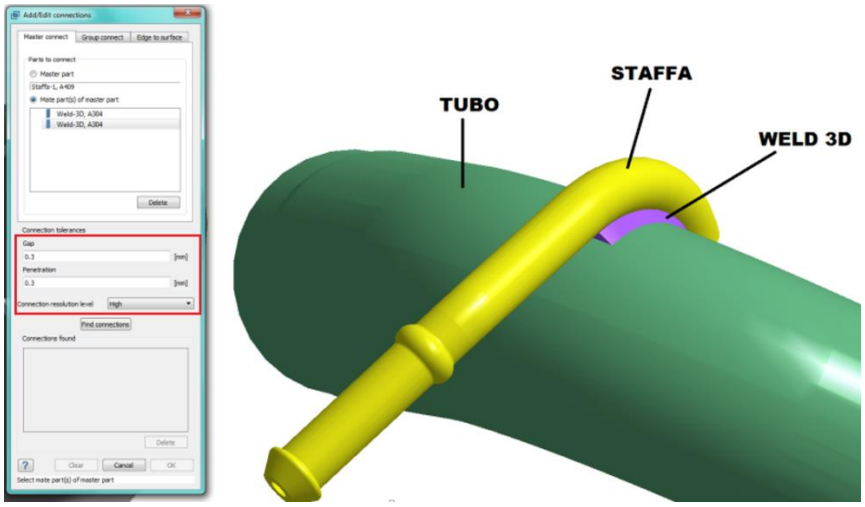


Figura 2.23: Connessione tubo-staffa - SimSolid ™

- *Connessione rigida tra due componenti:* tale connessione è l'equivalente della connessione di rigidezza infinita realizzata tramite elementi rigidi RBE2 utilizzando il metodo FEM tradizionale. Anche in questo caso per creare la connessione bisogna utilizzare l'impostazione *Add/edit part connections*, selezionare i componenti da connettere e scegliere il valore di *gap/penetration* ed il livello di risoluzione più opportuno a seconda della geometria delle parti.

- *Connessione con tassello:* per creare la connessione bisogna utilizzare l'impostazione *Bushing* presente in *Virtual Connections.* Si tratta di una connessione elastica che simula il comportamento di una molla. È necessario quindi selezionare la superficie della staffa connessa al tassello ed inserire i valori la rigidezza lungo gli assi. Se i tasselli non sono orientati secondo il sistema di riferimento globale, basta solamente orientare correttamente il sistema di riferimento locale della connessione *Bushing.*

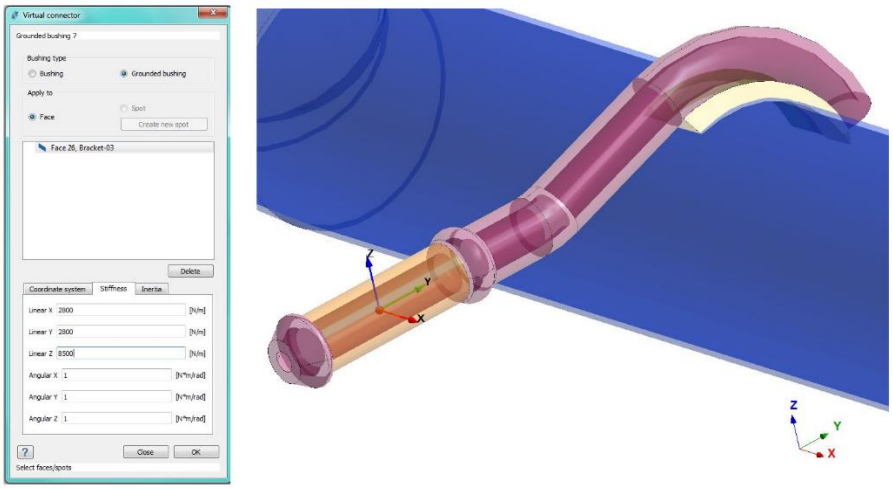


Figura 2.24: Connessione Bushing Tassello - SimSolid ™

- *Connessione con flessibile:* per creare la connessione bisogna utilizzare l'impostazione *Bushing* presente in *Virtual Connector.* È necessario quindi selezionare le facce trasversali dei due tubi connessi tramite flessibile, ed inserire i valori la rigidezza lineare e torsionale.

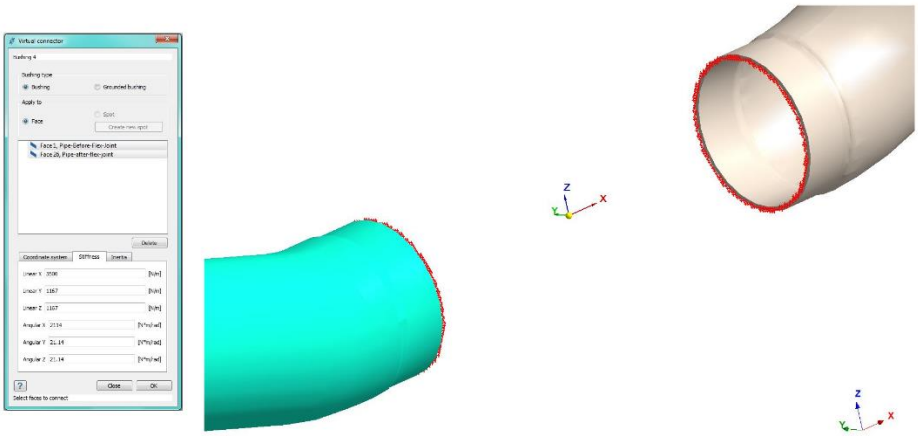


Figura 2.25: Connessione Bushing Flessibile - SimSolid ™

Per inserire la massa del flessibile, bisogna utilizzare l'impostazione *Remote Mass* presente in *Virtual Connectors* andando a ripartirla sui due tubi connessi. È necessario quindi selezionare prima la faccia trasversale di uno dei due tubi ed inserire metà del peso del flessibile e successivamente ripetere la procedura selezionando la superficie della seconda tubazione.

2.2.1.5 Attribuzione dei materiali

Terminata la fase di creazione delle connessioni, prima di svolgere una qualsiasi analisi, bisogna assegnare ad ogni componente il rispettivo materiale. *SimSolid* ™ supporta varie tipologie di modelli di materiali tra cui isotropico, elastoplastico e rigido. Di default, nel database interno del software, sono presenti i materiali più comunemente utilizzati, ma per una maggior personalizzazione è possibile crearne dei nuovi, sia importandoli dall'esterno, sia compilando manualmente le varie proprietà (ad esempio modulo elastico, densità, coefficiente di Poisson, conducibilità termica, ecc.). Inoltre il software consente di inserire manualmente le caratteristiche non lineari di ciascun materiale descritte dalla curva σ-ε.

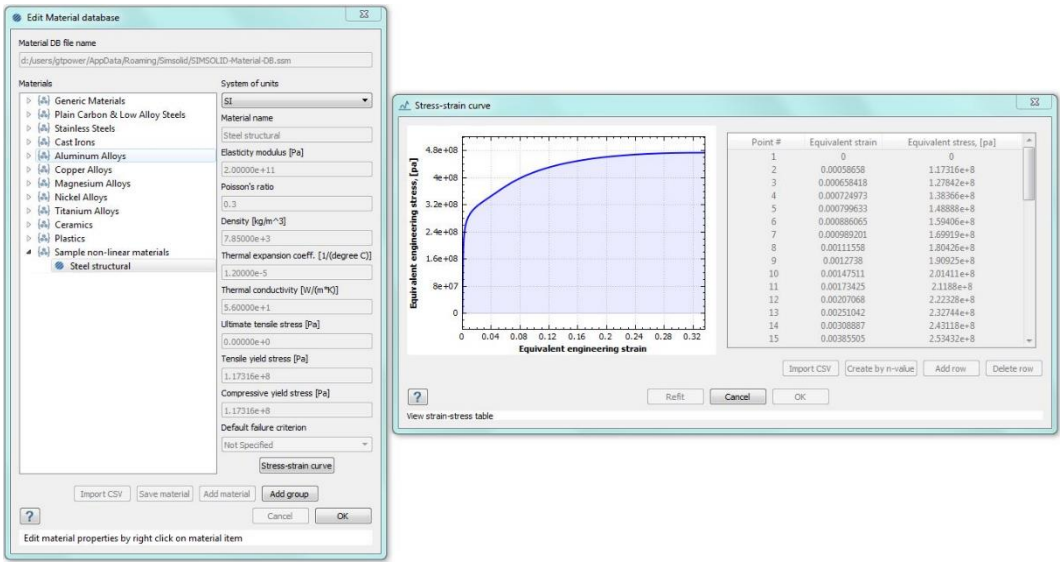


Figura 2.26: Database dei materiali - SimSolid ™

2.2.2 Solving

Dal punto di vista teorico, il metodo di calcolo utilizzato da *SimSolid* ^{TM} si basa sulla teoria delle approssimazioni esterne, ovvero una generalizzazione del metodo degli elementi finiti. Tale teoria si fonda principalmente sui seguenti concetti:

- Qualsiasi forma geometrica assolutamente arbitraria può essere considerata un "elemento finito" del FEM;
- Le funzioni di forma di approssimazione all'interno dell'elemento finito possono essere arbitrarie e indipendenti dalla forma dell'elemento. Esse non devono quindi essere necessariamente dei polinomi;
- I gradi di libertà (DOF) non sono nodali, ma possono essere associati a superfici, volumi o linee. Ciò permette di gestire al meglio le imperfezioni geometriche, la presenza di spazi vacanti, penetrazioni e contatti irregolari tra componenti.

La precisione della soluzione viene garantita da *SimSolid* ^{TM} tramite una *"multi-pass adaptive analysis"*. Essa permette di perfezionare automaticamente, tramite un processo iterativo, la soluzione nelle aree in cui è necessario ottenere la massima precisione, basandosi sulle variazioni di densità di energia locale e sugli errori assoluti ai confini della regione analizzata. L'utente inoltre ha la possibilità scegliere il numero di passaggi iterativi che devono essere eseguiti durante il processo di risoluzione.

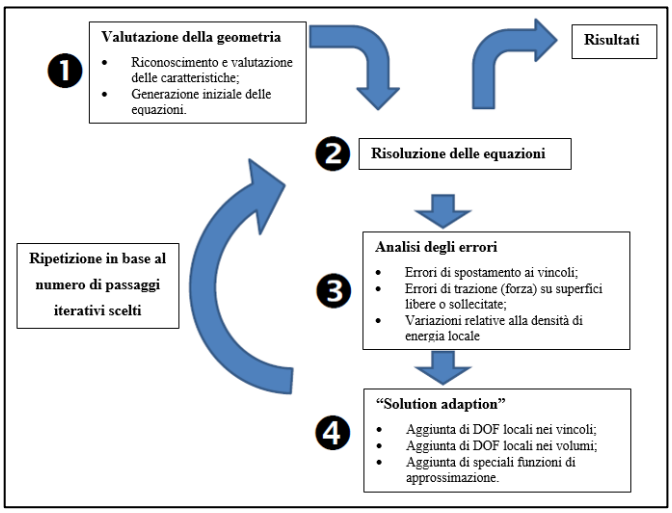


Figura 2.27: Metodo di risoluzione - SimSolid ^{TM}

Durante la fase di Solving, dopo aver scelto ed impostato la tipologia di analisi da voler effettuare, avviene la risoluzione del modello strutturale. Con alcune limitazioni *SimSolid* ™ permette di eseguire le seguenti tipologie di analisi:

- Analisi modale;
- Analisi statica lineare e non lineare;
- Analisi dinamica di risposta nel tempo e in frequenza;
- Analisi termica;

Infine, prima di lanciare un'analisi, è necessario selezionare le facce o i bordi dei componenti ai quali si vuole applicare una condizione di vincolo.

2.2.3 Post-Processing

Anche con *SimSolid* ™ è possibile eseguire delle analisi qualitative per via grafica, grazie ad un'animazione nel tempo del sistema modellato o tramite mappe colorimetriche che forniscono una distribuzione di colori a seconda delle grandezze di interesse. Inoltre, per valutazioni più accurate, è possibile ricavare i valori puntuali di qualsiasi zona di un componente della grandezza fisica di output richiesta. Possono essere valutati ad esempio forme modali, stress, deformazioni, spostamenti e reazioni vincolari del modello.

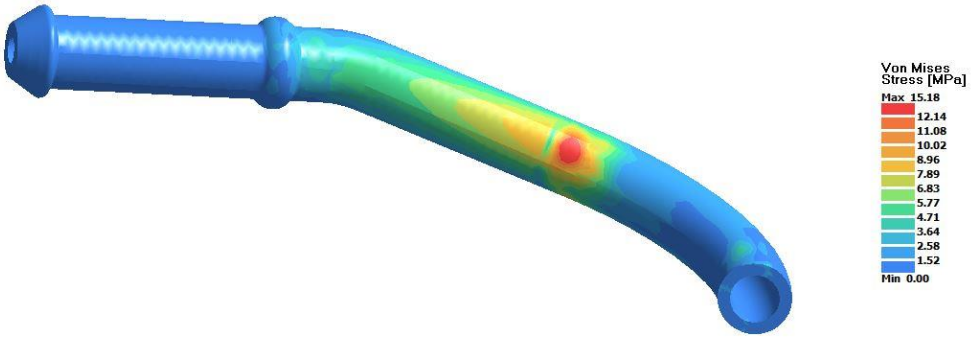


Figura 2.28: Post-Processing - SimSolid ™

Inoltre, a seconda della tipologia di analisi effettuata, è possibile visualizzare ed esportare grafici 2D.

2.3 Confronto tra metodo FEM tradizionale e metodo numerico meshless *(SimSolid ™)*

Come è stato possibile notare dai paragrafi 2.1 e 2.2, il metodo FEM tradizionale ed il software *SimSolid ™* operano in maniera completamente differente. In particolare le principali differenze sono presenti durante le fasi di Pre-Processing e di Solving.

L'obiettivo principale di una qualsiasi analisi virtuale è senza dubbio quello di fornire risultati finali con la massima precisione. Ciò, però, risulta essere un aspetto piuttosto critico, poiché tutti i metodi numerici si basano su algoritmi che approssimano la soluzione finale e vi possono essere diverse fonti di errore che portano ad una precisione del risultato al di sotto del 100%.

Utilizzando la metodologia FEM tradizionale i principali errori vengono commessi durante la preparazione del modello nelle fasi di semplificazione geometrica e di meshing, trattandosi di operazioni piuttosto complesse che richiedono uno specialista altamente qualificato nelle tecnologie FEM e CAD. Ad esempio, con la semplificazione geometrica vengono rimossi eventuali spazi vacanti presenti, linee, superfici e componenti troppo piccoli o complessi, poiché la loro presenza porterebbe ad una successiva mesh di bassa qualità ed estremamente complicata. Tale processo di semplificazione è influenzato anche dalla tipologia di analisi effettuata. Infatti, durante un'analisi statica piccoli componenti possono essere semplicemente rimossi, mentre per svolgere un'analisi dinamica bisogna che siano sostituiti da masse concentrate, per non modificare la distribuzione di massa dell'intera struttura. Inoltre, durante l'attività di discretizzazione, è necessario effettuare un controllo continuo della qualità della mesh, al fine di ottenere risultati affidabili ed evitare quindi eventuali errori durante il processo di calcolo.

Con *SimSolid ™*, invece, si semplifica in modo netto la fase di Pre-Processing, essendo state rimosse totalmente le fasi di semplificazione e discretizzazione. Infatti il software utilizza un approccio geometrico più efficiente che consente di svolgere una analisi direttamente sulla geometria CAD originaria importata. Viene ad esempio individuata automaticamente la presenza di pareti sottili, raccordi o fori

passanti, e persino la natura di alcuni componenti come viti, dadi, rondelle. Inoltre è in grado di gestire al meglio la presenza di imperfezioni geometriche, di spazi vacanti o di compenetrazioni e contatti irregolari tra componenti, grazie ad un processo di creazione delle connessioni automatico, robusto e semplice da regolare manualmente. Quindi, utilizzando *SimSolid* ^{TM}, si ottiene una riduzione netta dei passaggi da eseguire durante la fase di Pre-Processing, e ciò implica una minor possibilità di riscontrare errori durante le simulazioni.

Un secondo obiettivo di una qualsiasi analisi virtuale è quello di fornire risultati finali nel minor tempo possibile. Utilizzando la metodologia FEM tradizionale, le fasi di semplificazione geometrica e discretizzazione, durante una intera analisi agli elementi finiti, risultano essere le fasi più dispendiose in termini di tempo. Generalmente infatti, a seconda della complessità della geometria, si potrebbe impiegare qualche giorno o persino una settimana per la preparazione di un modello completamente nuovo.

Tramite *SimSolid* ^{TM}, invece, il tempo necessario per impostare il modello di simulazione viene notevolmente ridotto. Infatti la fase di Pre-Processing può durare al massimo qualche ora. Ad esempio, per creare una saldatura tra due tubazioni, con la metodologia FEM tradizionale è necessario qualche minuto per creare la fila di elementi rigidi RBE2 e di elementi shell inclinati. Utilizzando *SimSolid* ^{TM} basta invece solamente selezionare il bordo a contatto tra i due componenti e scegliere il valore di *gap/penetration* ed il livello di risoluzione, richiedendo così qualche secondo.

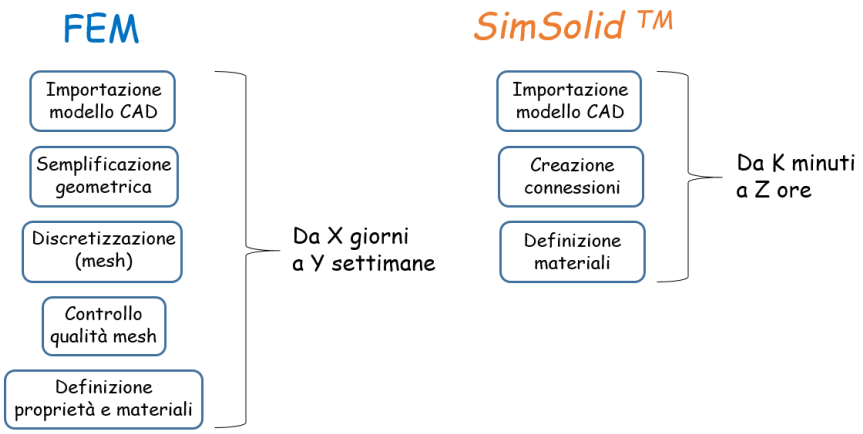


Figura 2.29: Differenze nella fase di Pre-Processing

Infine, per quanto riguarda il metodo di calcolo, nella seguente tabella sono mostrate le principali differenze.

FEM	***SimSolid ™***
I gradi di libertà sono associati ai nodi.	I gradi di libertà non sono nodali, ma possono essere associati a superfici, volumi o linee.
Ogni nodo può avere 3 gradi di libertà.	È possibile avere molti gradi di libertà per ogni singola geometria, a seconda dall'adattamento della soluzione.
Le funzioni di forma sono semplici polinomi di interpolazione di basso grado.	Le funzioni di forma possono essere di classe arbitraria e sono derivate durante la fase di soluzione. Esse non devono quindi essere necessariamente dei polinomi.
L'adattamento della soluzione si basa principalmente sul cambiamento della densità di energia locale ed è raramente utilizzato per gli assiemi.	La precisione della soluzione viene garantita da *SimSolid ™* tramite una *"multi-pass adaptive analysis"*. L'adattamento della soluzione è sempre attivo, e permette di perfezionare automaticamente la soluzione tramite un processo iterativo, basandosi sulle variazioni di densità di energia locale e sugli errori assoluti ai confini della regione analizzata.

3 Sistemi di scarico analizzati ed analisi effettuate

L'obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di studiare il funzionamento del software *SimSolid* ^{TM} e di verificare se fosse possibile sfruttare le sue interessanti potenzialità per eseguire una serie di analisi strutturali su sistemi di scarico per autoveicoli.
È stato quindi effettuato un confronto tra il metodo numerico tradizionale degli elementi finiti, ritenuto il metodo di riferimento, e il metodo numerico meshless. In primo luogo è stata creata una metodologia sulle connessioni in *SimSolid* ^{TM} da poter seguire durante le analisi di una qualsiasi linea di scarico. Successivamente sono stati confrontati i risultati ottenuti con entrambe le metodologie, e l'accuratezza dei risultati ricavati tramite *SimSolid* ^{TM} è stata calcolata in relazione ai risultati ottenuti con il FEM tradizionale, essendo il metodo ufficialmente utilizzato in azienda.

È stato deciso di studiare il comportamento di una Cold End (*Model 520*) e di una Hot End (*Model W*).

Per il *Model 520* sono state effettuate le seguenti analisi:

- Correlazione modale a temperatura ambiente;
- Risposta in frequenza: inertanza staffe;
- Correlazione statica lineare: validazione tasselli e spostamento flessibile, spostamento linea, validazione staffe;
- Correlazione statica non lineare: spostamento linea;
- Analisi termica: mappa di temperatura;

Per il *Model W* è stata invece effettuata solamente un'analisi modale, poiché tutte le altre possibili analisi di solito eseguibili su una Hot End tramite la metodologia tradizionale non sono state ancora implementate correttamente su *SimSolid* ^{TM}.

È da precisare che il presente lavoro non è stato finalizzato alla verifica dei target nelle varie analisi effettuate, quanto più al confronto tra i risultati ottenuti con le due metodologie.

3.1 Modelli analizzati

3.1.1 *Model 520*

La Cold End analizzata presenta un giunto flessibile, quattro staffe, un silenziatore anteriore e un silenziatore posteriore.

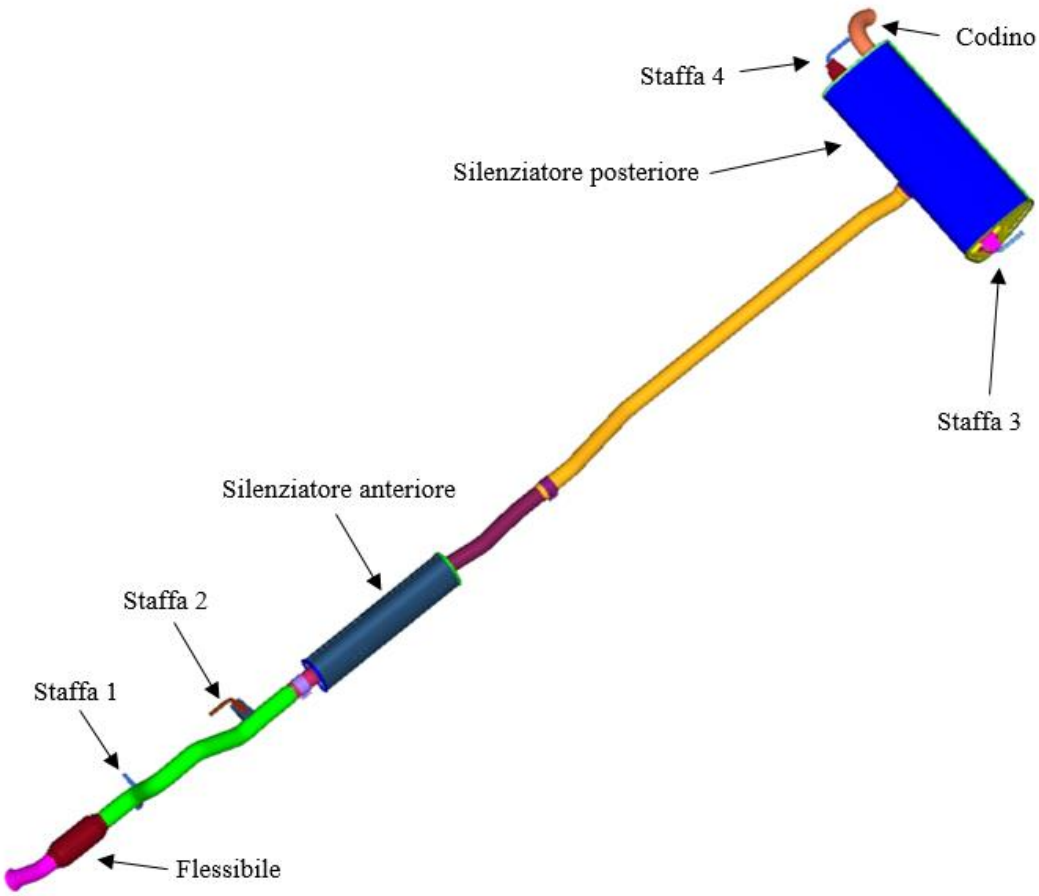


Figura 3.1: Cold End Model 520

La prima staffa è saldata direttamente alla tubazione successiva al flessibile, la seconda è saldata ad un cavallotto a sua volta saldato sempre alla stessa tubazione, mentre la terza e la quarta staffa sono saldate a dei cavallotti a loro volta saldati ai fondelli del silenziatore posteriore.

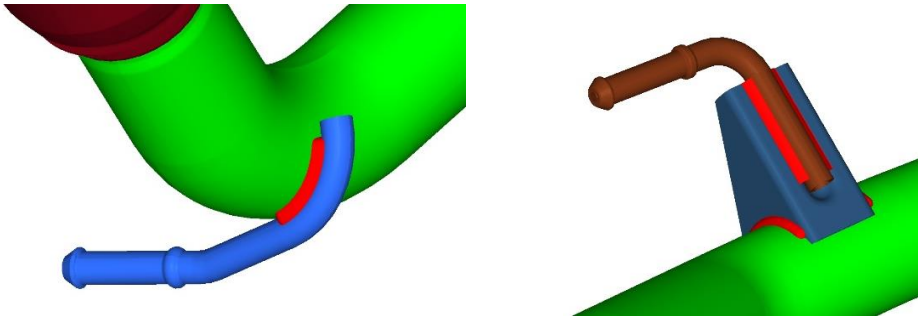


Figura 3.2: Staffa 1(sinistra) / Staffa 2 (destra) - Model 520

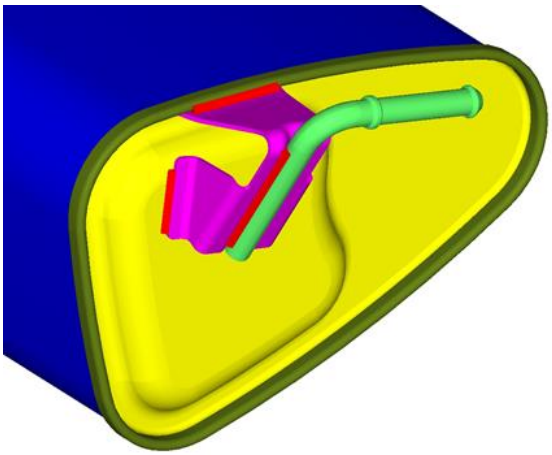


Figura 3.3: Staffa 3 / Staffa 4 - Model 520

I tasselli utilizzati per ancorare le quattro staffe sono tutti della stessa tipologia, e quindi presentano la stessa rigidezza elastica. Essi possiedono un solo foro in cui è calettata la staffa, mentre dalla parte opposta vengono collegati ad una controstaffa tramite due ganci.

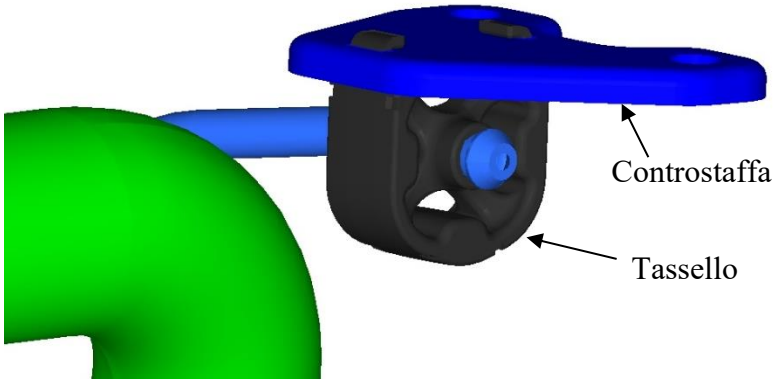


Figura 3.4: Tassello e controstaffa

Il silenziatore anteriore è costituito da due candele forate (di ingresso e di uscita), due diaframmi forati e nelle due camere è presente del materiale fonoassorbente. Il silenziatore posteriore invece presenta tre candele (di ingresso, di travaso, di uscita), tre diaframmi forati, un diaframma trasversale e in una delle quattro camere è inserito del materiale fonoassorbente e un risonatore sulla candela di uscita.

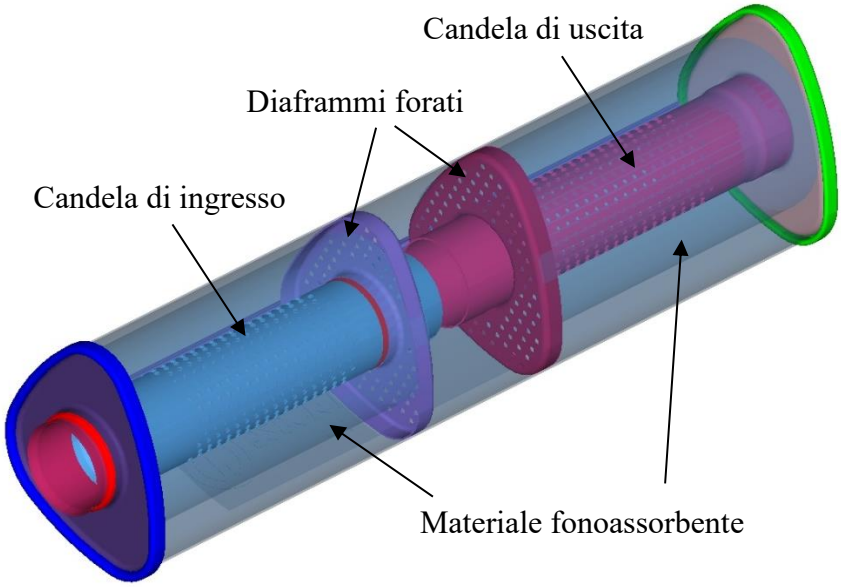


Figura 3.5: Silenziatore anteriore - Model 520

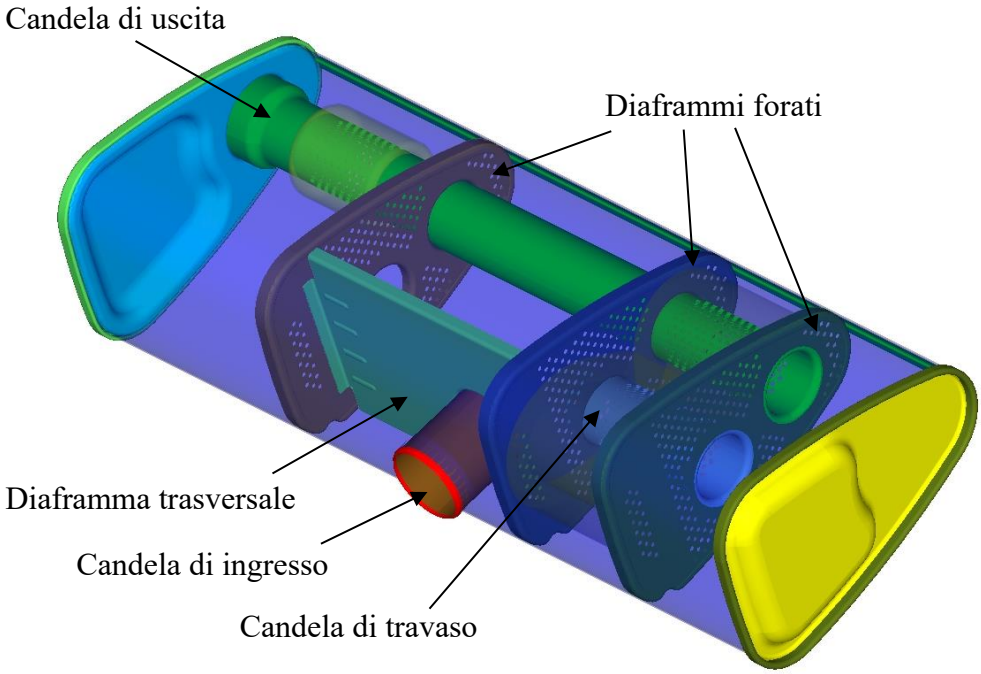


Figura 3.6: Silenziatore posteriore - Model 520

3.1.2 *Model W*

La Hot End analizzata presenta una flangia iniziale collegata al compartimento motore, un collettore suddiviso in due semigusci, un catalizzatore, ed una staffa ancorata al sottoscocca. Poiché è stata solamente effettuata un'analisi modale, si tratta di un modello semplificato, e non vi sono quindi presenti altri componenti come ad esempio i riparo calore.

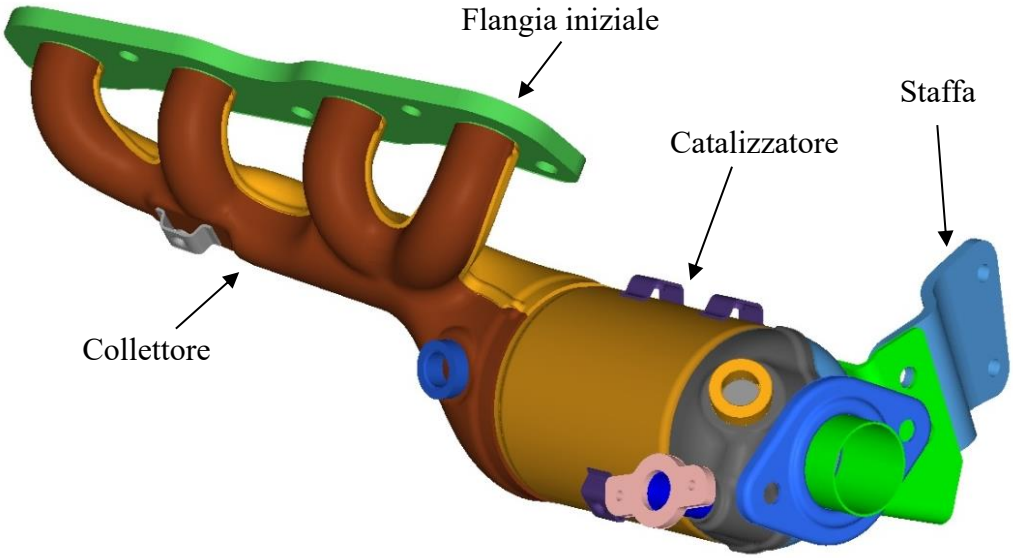


Figura 3.7: Hot End Model W

3.2 Correlazione modale a temperatura ambiente

La maggior parte delle strutture, durante il normale funzionamento, sono sottoposte a forze dinamiche che causano la nascita di vibrazioni. Tali vibrazioni inducono frequenze risonanti che esaltano il fenomeno vibratorio generando di conseguenza rumore. Infatti l'interazione delle proprietà di massa e di rigidezza (inerzia ed elasticità) determina delle frequenze a cui l'energia non riesce ad abbandonare la struttura.

Nei sistemi di scarico, il funzionamento del motore e le condizioni del fondo stradale generano vibrazioni che si trasmettono lungo l'intera linea. Infatti viene utilizzato un elemento disaccoppiante che limita la trasmissione delle vibrazioni prodotte dal motore durante la combustione dalla Hot End alla Cold End. Inoltre vengono montati dei tasselli elastici che riducono le vibrazioni trasferite dal sistema di scarico al pianale dell'autoveicolo, essendo loro una delle principali fonti di rumore nell'abitacolo dell'autovettura.

Per tale motivo viene effettuata un'analisi modale a temperatura ambiente del sistema di scarico. Per analisi modale si intende quel procedimento che si applica nell'analisi delle vibrazioni per descrivere il comportamento dinamico di strutture meccaniche lineari. Lo scopo è quello di ottenere le forme modali ("*mode shapes*") dalla struttura quando è eccitata alle sue frequenze naturali ed i parametri modali, tra cui le frequenze di risonanza. Per forma modale si intende il modello del movimento di tutti i punti della struttura ad una determinata frequenza modale. Dal punto di vista teorico, il numero di "*mode shapes*" risulta uguale al numero di gradi di liberà della sistema e l'insieme delle equazioni del moto che regolano la dinamica della struttura in esame genera una equazione matriciale i cui autovalori corrispondono alle frequenze naturali, mentre gli autovettori alle forme modali.

Quindi tramite un'analisi modale dell'intera linea di scarico, vengono valutate le frequenze proprie del sistema. In particolare si effettua una verifica controllando che le prime frequenze naturali di risonanza di alcuni punti critici siano superiori ad un certo target, di solito coincidente con la frequenza di eccitazione del motore.

3.2.1 Analisi modale *Model 520*

Una Cold End, essendo il tratto di linea di scarico connessa con il pianale dell'autovettura tramite le staffe, è senza dubbio la principale fonte di vibrazioni che possono essere trasferite al veicolo. Come già descritto precedentemente, sono presenti un giunto flessibile e dei tasselli elastici per limitare il più possibile la trasmissione di onde vibrazionali. Tuttavia, tramite un'analisi modale, è necessario comunque effettuare un controllo delle frequenze di risonanza di alcuni punti critici. In particolare, i componenti che generalmente vengono sottoposti a tale verifica sono le staffe di ancoraggio della linea.

Sia con la metodo FEM tradizionale sia con il metodo meshless, è stata eseguita un'analisi modale della Cold End fino a 700 *Hz*. Nella tabella seguente sono stati riportati, a titolo di esempio, i primi 15 modi individuati. Inoltre non sono stati inseriti i primi 3 modi, i quali rappresentano le tre traslazioni rigide del sistema.

Modo	**Frequenza [Hz] FEM**	**Frequenza [Hz] *SimSolid* ™**	**Differenza [%]**
4	2.9	3.0	3,4
5	3.0	3.1	1,0
6	8.5	8.6	0,5
7	14.5	14.3	1,3
8	17.1	17.0	0,6
9	26.0	26.1	0,1
10	46.1	45.8	0,7
11	65.3	65.0	0,5
12	79.8	79.9	0,0
13	104.5	105.1	0,6
14	114.2	113.2	0,8
15	127.7	127.8	0,0

Tabella 3.1: Analisi modale Model 520 - Primi 15 modi

Di seguito, invece, sono riportate le prime frequenze naturali di risonanza delle quattro staffe e le rispettive forme modali.

	Modo	Frequenza [Hz] FEM	Frequenza [Hz] *SimSolid ™*	Differenza [%]
Staffa 3 - 4	25	383.7	402.6	4.9
Staffa 1	30	469.6	479.3	2.1
Staffa 2	34	515.9	551.5	6.9

Tabella 3.2: Analisi modale Model 520 - Frequenze modali staffe

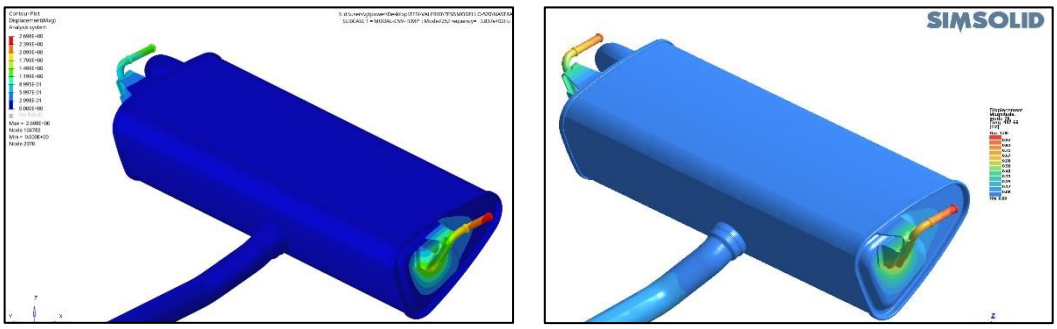


Figura 3.8: Analisi modale Model 520 - Forme modali staffa 3 e staffa 4 – FEM (sinistra) e SimSolid ™ *(destra)*

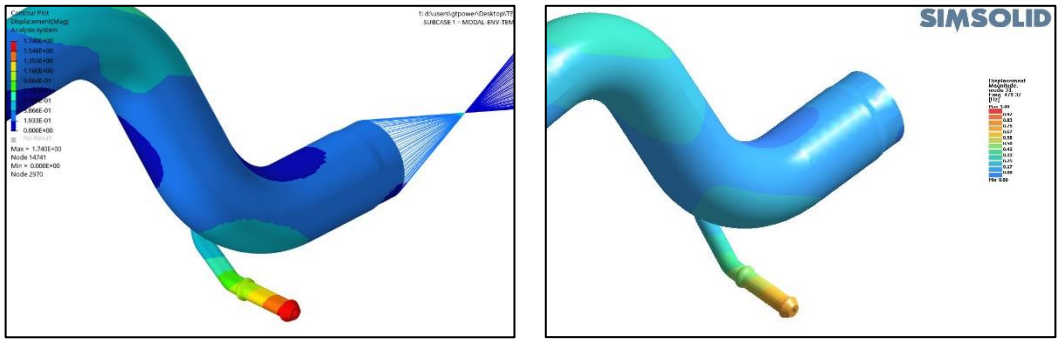


Figura 3.9: Analisi modale Model 520 - Forme modali staffa 1 - FEM (sinistra) e SimSolid ™ *(destra)*

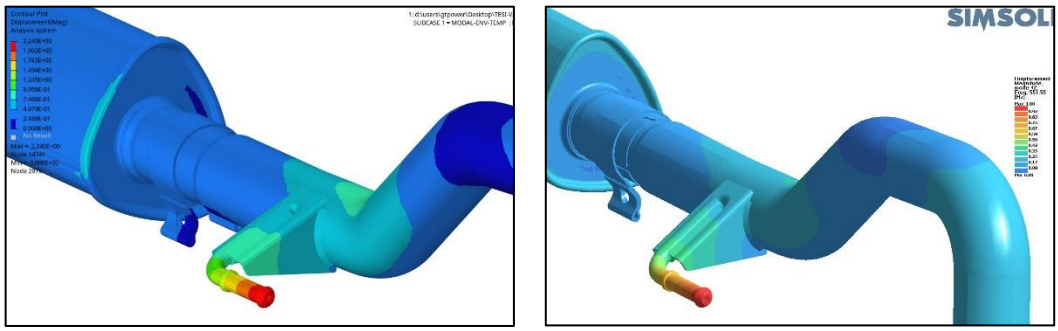


Figura 3.10: Analisi modale Model 520 - Forme modali staffa 2 - FEM (sinistra) e SimSolid ™ (destra)

Dal punto di vista del tempo impiegato per svolgere le simulazioni, tramite il metodo FEM tradizionale, la fase di Pre-Processing è durata circa una settimana, mentre la fase di Solving è durata qualche minuto. Utilizzando *SimSolid* ^{TM} , invece, il tempo impiegato per preparare il modello è stato di qualche ora, mentre per svolgere l'analisi il software ha impiegato circa due ore.

Dal Post-Processing è possibile notare che, per tutti i modi vibrazionali compresi tra 0 Hz e 700 Hz, la differenza tra le frequenze di risonanza ricavate tramite le due metodologie non supera il 10%. Maggior attenzione è stata rivolta alle prime frequenze modali delle quattro staffe.

Dalla *Tabella 3.2* si può notare come la precisione dei risultati ottenuti tramite metodo meshless risulti accettabile, con un massimo di differenza pari al 6.9% per la Staffa 2. Inoltre, per tutte e quattro le staffe, la frequenza ottenuta utilizzando *SimSolid* ^{TM} risulta superiore a quella ricavata utilizzando il FEM tradizionale. Ciò probabilmente è la conseguenza di una maggior rigidità in *SimSolid* ^{TM} della connessione di saldatura tra staffa e cavallotto o tra cavallotto e tubazione, rispetto al modello "meshato". Inoltre, durante la fase di Pre-Processing, è stato possibile rilevare una leggera differenza di peso tra i due modelli preparati con *HyperMesh*^{TM} e *SimSolid* ^{TM}. In particolare, poiché il metodo meshless opera direttamente sulle superfici CAD originarie, probabilmente il problema risiede nella discretizzazione effettuata con il metodo FEM tradizionale. Per ottenere una miglior precisione nel modello "meshato", sarebbe stato necessario discretizzare i componenti "shell" partendo dalla superficie media.

Dalle *Figure 3.8, 3.9 e 3.10* , invece, si può osservare la coincidenza delle forme modali ottenute con entrambi i metodi, per tutte e quattro le staffe.

Da tali considerazioni è possibile quindi ritenere *SimSolid* ^{TM} un ottimo supporto al metodo tradizionale degli elementi finiti per svolgere rapidamente un'analisi modale di una Cold End, ottenendo risultati piuttosto accurati.

3.2.2 Analisi modale *Model W*

La parte calda di un sistema di scarico, essendo a diretto contatto con il compartimento motore, è il tratto di linea maggiormente sollecitato dalle vibrazioni causate dalla combustione. Per tale motivo, tramite una analisi modale, è necessario effettuare un controllo delle frequenze di risonanza della struttura. La finalità di tale analisi non è quella di ridurre al minimo la trasmissione delle vibrazioni che potrebbero causare rumore (come effettuato per una Cold End), quanto piuttosto quella di non raggiungere frequenze di risonanza nei componenti che potrebbero così arrivare facilmente ad una rottura per fatica. Generalmente, quindi, si effettua una verifica controllando che le prime frequenze modali del sistema siano superiori ad un certo target, di solito coincidente con la frequenza di eccitazione del motore.

Sia con la metodo FEM tradizionale sia con il metodo meshless, è stato scelto di eseguire un'analisi modale della Hot End fino a 1000 *Hz*. Nella tabella seguente sono stati riportati i primi quattro modi individuati.

Modo	**Frequenza [Hz] FEM**	**Frequenza [Hz] *SimSolid* ™**	**Differenza [%]**
1	279.2	274,1	1,8%
2	516,3	473,2	8,3%
3	734,5	722.0	1,7%
4	903,4	866,9	4,0%

Tabella 3.3: Analisi modale Model W - Primi 4 modi

Dalla *Tabella 3.3* è possibile notare come la precisione dei risultati ottenuti per primi quattro modi tramite metodo meshless risulti accettabile, con una differenza massima dell' 8.3% tra le frequenze di risonanza ricavate con le due metodologie. Inoltre, per tutti e quattro i modi, la frequenza ottenuta utilizzando il FEM tradizionale risulta superiore a quella ricavata utilizzando *SimSolid* ™. Ciò probabilmente è la conseguenza di una maggior rigidità della connessione di saldatura tra i semigusci del collettore e del catalizzatore realizzata con *HyperMesh*™, rispetto alle connessioni create con *SimSolid* ™, essendo le superfici da saldare di geometria abbastanza complessa.

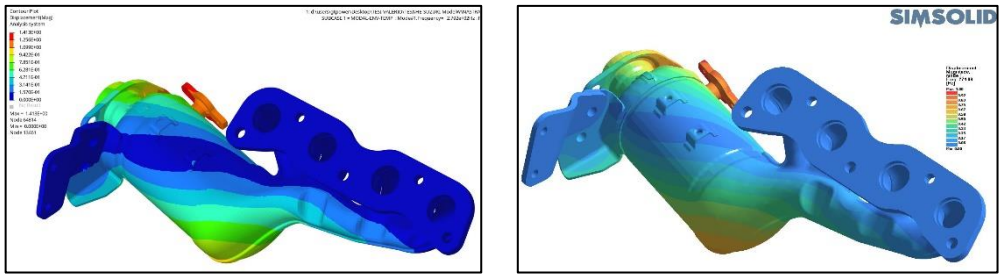


Figura 3.11: Analisi modale Model W - Modo 1 - FEM (sinistra) e SimSolid TM (destra)

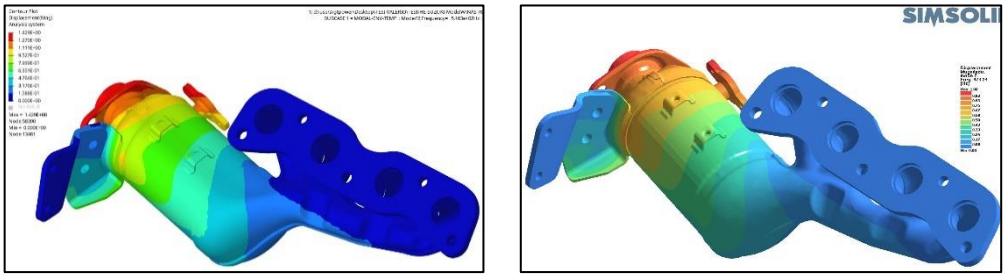


Figura 3.12: Analisi modale Model W - Modo 2 - FEM (sinistra) e SimSolid TM (destra)

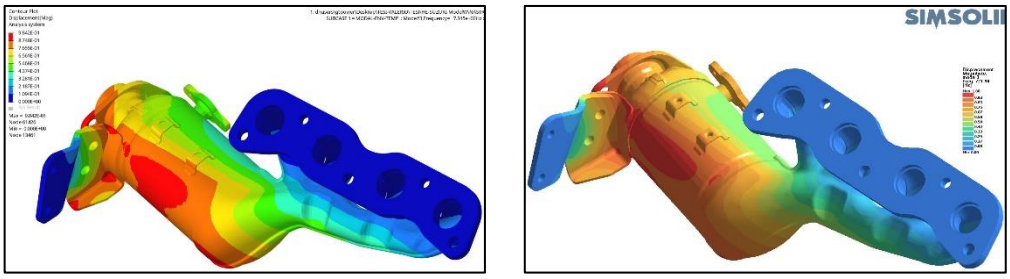


Figura 3.13: Analisi modale Model W - Modo 3 - FEM (sinistra) e SimSolid TM (destra)

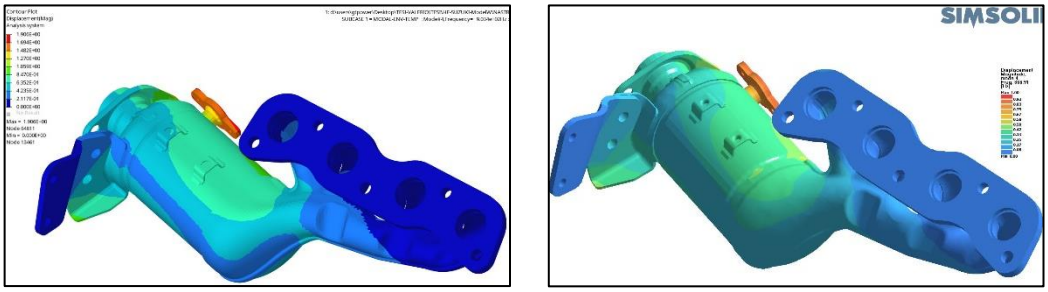


Figura 3.14: Analisi modale Model W - Modo 4 - FEM (sinistra) e SimSolid TM (destra)

Dalle *Figure 3.11, 3.12 , 3.13 e 3.14* , invece, si può osservare la coincidenza delle forme modali ottenute con entrambi i metodi, per tutti e quattro i modi.

Anche per una Hot End, quindi, *SimSolid TM* si conferma essere un ottimo strumento di supporto al metodo FEM tradizionale per svolgere un'analisi modale ed ottenere risultati affidabili in breve tempo.

3.3 Risposta in frequenza *Model 520*

Una analisi di risposta in frequenza permette di rappresentare in maniera sintetica il comportamento dinamico di un sistema lineare, studiandone la risposta ad eccitazioni armoniche a diverse frequenze . Generalmente una Funzione di Risposta in Frequenza (FRF) presenta una serie di picchi, spesso molto acuti e con una frequenza centrale ben evidente, ai quali corrispondono delle condizioni di risonanza. Per tale motivo l'analisi modale e la FRF sono strettamente legate, e rappresentano entrambe la dinamica del medesimo modello andando ad individuare le condizioni di risonanza del sistema.

3.3.1 Inertanza staffe

Per misura dell'inertanza si intende lo studio della dinamica vibrazionale di un sistema a seguito dell'applicazione di una forzante. Infatti l'inertanza è il rapporto tra l'accelerazione in un determinato punto e la forza applicata in esso. Inoltre essa è funzione della frequenza di applicazione della forza ed i valori massimi vengono raggiunti in corrispondenza delle frequenze di risonanza, ove le accelerazioni risultano amplificate. Tale analisi permette così di identificare le zone in cui una forzante armonica potrebbe sovrapporsi con una risonanza del modello, indicando di quanto può essere amplificata la risposta.

Come già descritto precedentemente, dal punto di vista strutturale, le staffe di una Cold End sono i componenti maggiormente controllati, essendo loro una delle principali fonti di vibrazioni che possono essere trasmesse al veicolo causando quindi rumore all'interno dell'abitacolo. Per tale motivo, oltre all'analisi modale, viene effettuata una misura dell'inertanza per ognuna delle staffe presenti lungo una linea di scarico. Sperimentalmente, per svolgere tale analisi, ogni staffa viene eccitata in un punto tramite un martello strumentato con una cella di carico e con uno o più accelerometri si rileva la risposta del sistema in quel punto. In campo virtuale, invece, l'analisi consiste in una risposta in frequenza durante la quale si valutano gli spostamenti dei punti eccitati da una forzante costante in frequenza pari a 1N e che agisce lungo l'asse Z, simulando così una martellata.

Con entrambe le metodologie è stata eseguita un'analisi di risposta in frequenza della Cold End *Model 520* in un range di frequenze da *20 Hz* a *600 Hz*. All'estremità di ogni staffa è stata quindi applicata lungo l'asse Z una forzante unitaria costante in frequenza ed è stato ricavato, per ogni punto di applicazione della forza, un grafico dello spostamento Z in funzione della frequenza.

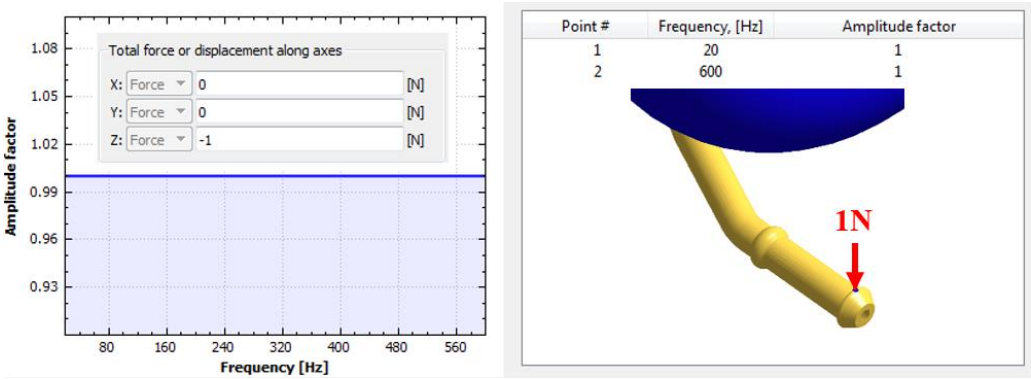


Figura 3.15: Inertanza staffe - Forzante 1N

Nelle seguenti figure sono rappresentate le curve di spostamento lungo Z in funzione della frequenza delle quattro staffe, ricavate con entrambe le metodologie.

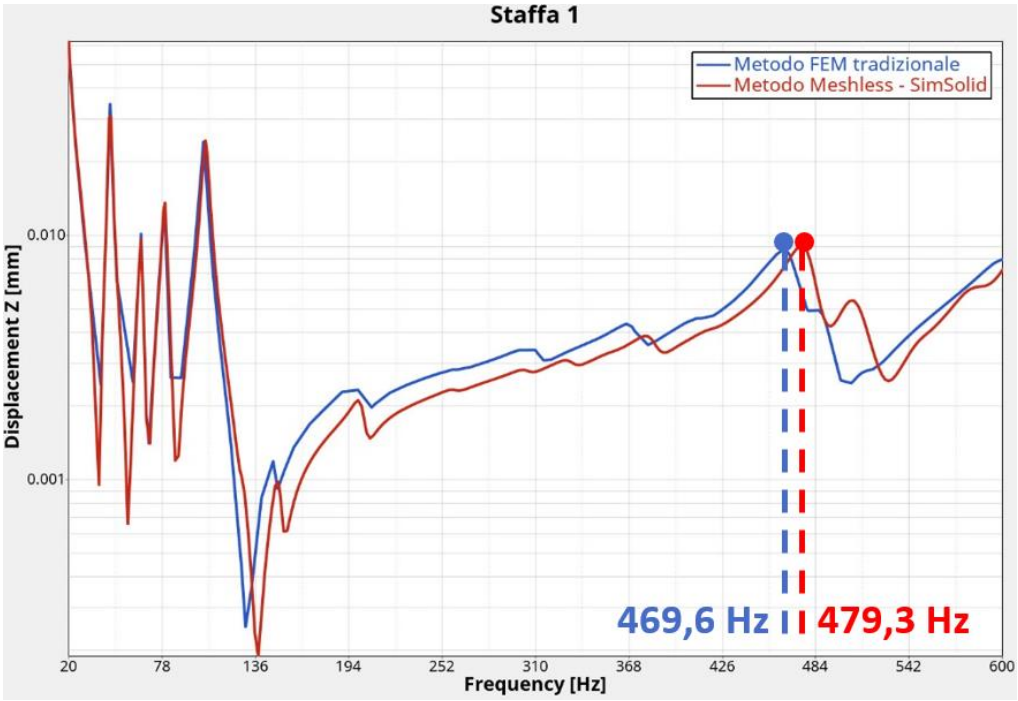


Figura 3.16: Spostamento Z vs Frequenza - Staffa 1

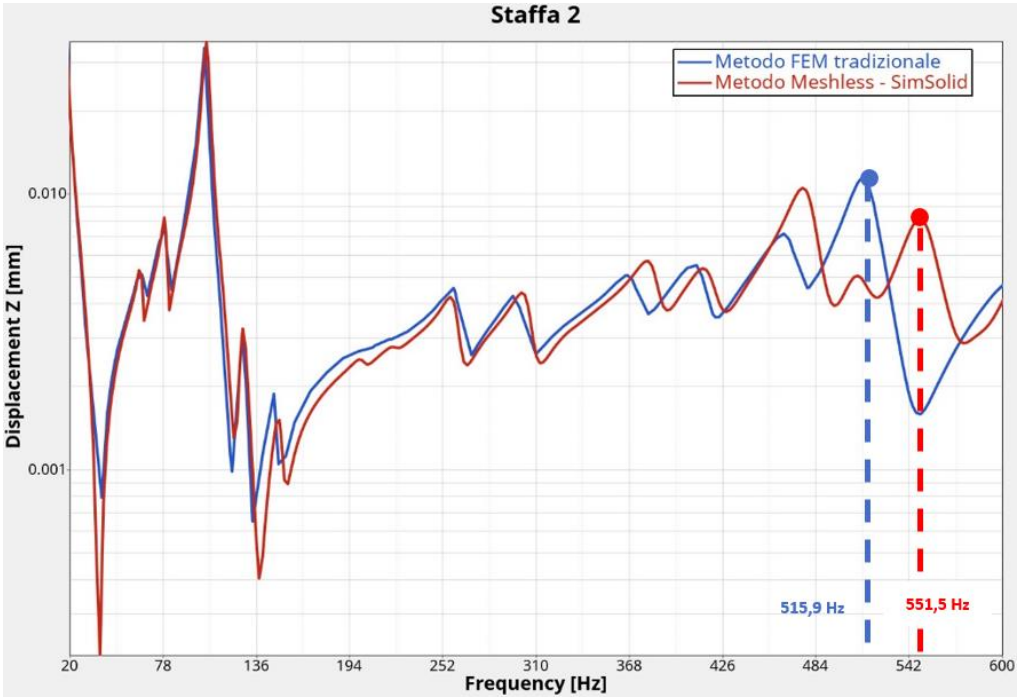


Figura 3.17: Spostamento Z vs Frequenza - Staffa 2

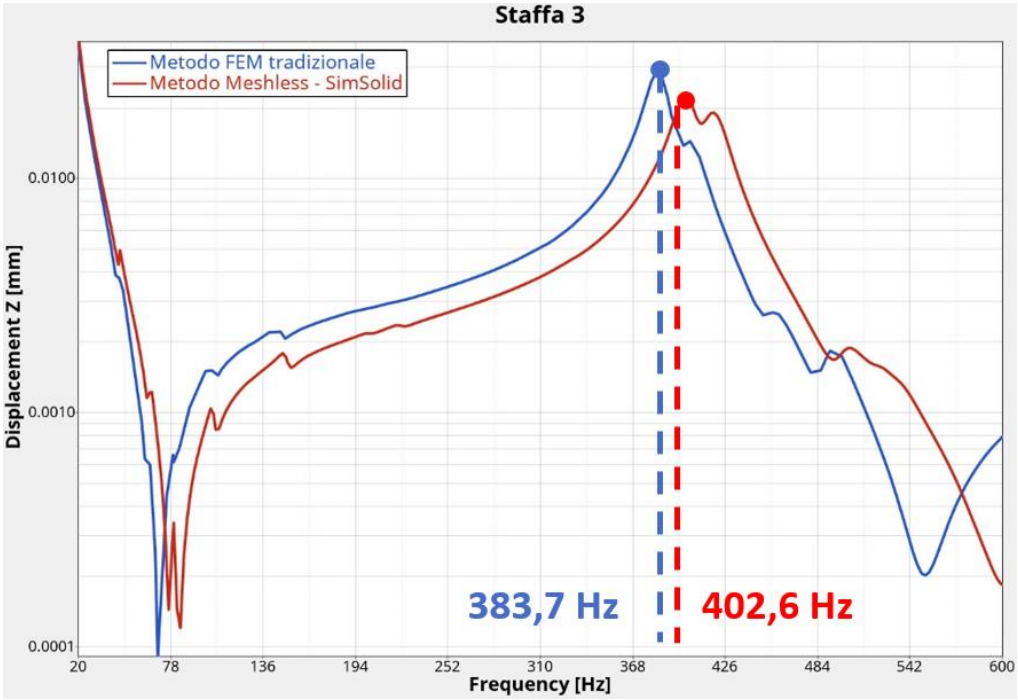


Figura 3.18: Spostamento Z vs Frequenza - Staffa 3

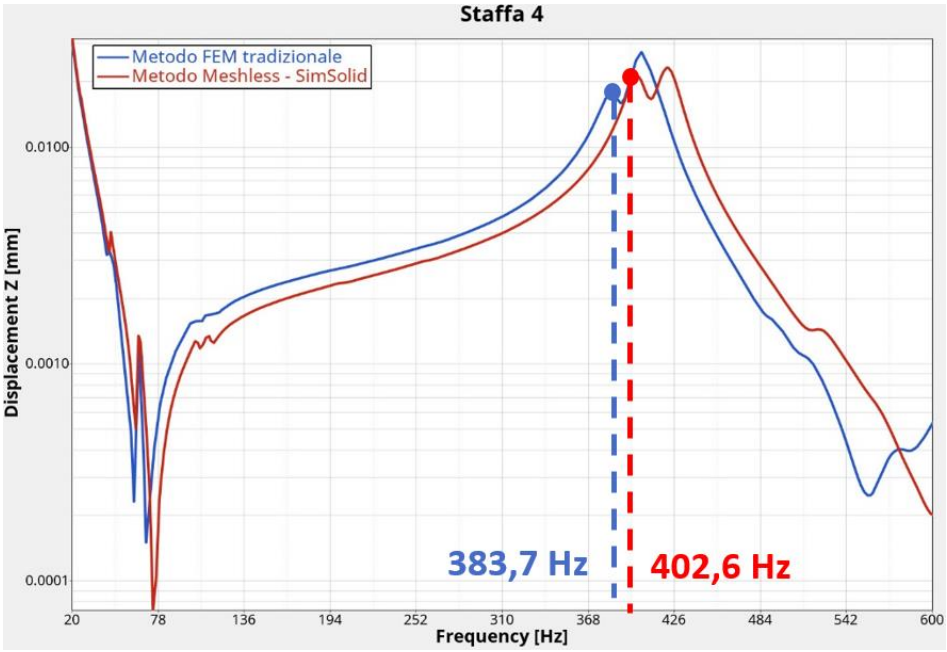


Figura 3.19: Spostamento Z vs Frequenza - Staffa 4

Dai grafici precedenti è possibile effettuare alcune osservazioni. Dalle *figure 3.16* e *3.17* si può notare che sino alla frequenza di circa *130 Hz* le due curve si sovrappongono perfettamente, mentre per frequenze maggiori le curve risultano essere leggermente sfasate tra loro. Dalle *figure 3.18* e *3.19*, invece, si nota uno sfasamento sin dalle prime frequenze che tende a crescere all'aumentare della frequenza. In particolare, per tutte e quattro le staffe, utilizzando *SimSolid* ^{TM} i picchi di risonanza vengono raggiunti per frequenze superiori rispetto al metodo tradizionale, e tale sfasamento probabilmente è la conseguenza di una maggior rigidità in *SimSolid* ^{TM} della connessione di saldatura rispetto al modello "meshato". Inoltre, in tutti i grafici, si può notare che ai valori delle prime frequenze naturali delle staffe individuate durante l'analisi modale, corrispondono dei picchi di risonanza, e ciò è testimonianza un corretto esito dell'analisi di inertanza. I restanti picchi di risonanza individuati corrispondono a dei modi di vibrare globali della struttura.

Da tali considerazioni è possibile quindi ritenere *SimSolid* ^{TM} una valida alternativa al metodo tradizionale degli elementi finiti per svolgere rapidamente una misura dell'inertanza delle staffe di una Cold End, ottenendo dei grafici di spostamento coerenti con l'analisi modale e piuttosto simili ai grafici ricavati utilizzando il metodo FEM tradizionale.

3.4 Correlazione statica lineare *Model 520*

L'analisi statica lineare è una delle analisi più semplici e più frequenti in campo virtuale. Il termine statica indica che il carico a cui è sottoposto il sistema analizzato risulta costante nel tempo. Il termine lineare, invece, indica che il materiale possiede sempre un comportamento lineare, secondo la legge di Hooke ($\sigma = E\ \epsilon$).

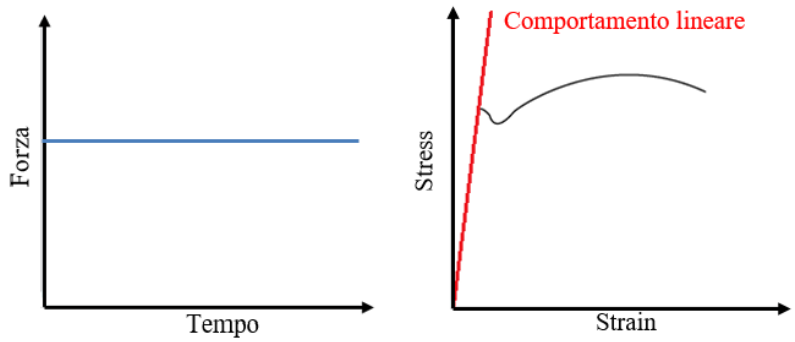


Figura 3.20: Analisi statica lineare

Un sistema di scarico, avendo una massa distribuita non indifferente ed essendo presenti elementi elastici come tasselli e flessibile, tende inevitabilmente a spostarsi sotto l'effetto di forze ed accelerazioni. Per tale motivo vengono effettuate una serie di analisi statiche lineari per valutare i seguenti aspetti:

- Spostamenti e carichi sui tasselli;
- Spostamenti sul flessibile;
- Spostamento della linea;
- Carichi sulle staffe.

I risultati delle analisi statiche in termini di spostamenti sono necessari al fine di verificare che la linea, nella nuova configurazione deformata, rispetti i vincoli di layout imposti dal cliente. In termini di carichi, invece, è fondamentale valutare la resistenza dei vari componenti.

Se, a seguito delle analisi, le luci minime di progetto non dovessero essere rispettate, gli analisti CAD generalmente tendono a spostare la linea in direzione +Z (pretensionamento) al fine di compensare gli effetti gravitazionali ed ottenere un

assetto più efficiente. Se un tassello invece dovesse risultare sovraccaricato è necessaria la sostituzione con un altro più performante o una nuova disposizione delle staffe per ottenere una miglior ripartizione dei carichi.

3.4.1 Validazione tasselli e spostamento flessibile

Come già descritto precedentemente, i tasselli sono i componenti elastici che permettono il collegamento della Cold End con il pianale dell'autoveicolo e consentono una adeguata liberà di movimento della linea al fine di smorzare il più possibile le vibrazioni. Per tale motivo, per ogni tassello viene valutato lo spostamento verticale ed il carico a cui è sottoposto tramite un'analisi statica lineare. In particolare la verifica di affidabilità dei tasselli avviene tramite un confronto tra il carico ottenuto dall'analisi ed il carico ammissibile riportato nella tavola inerente al tassello in esame.

Anche il giunto flessibile permette una certa liberà di movimento della Cold End rispetto alla Hot End, e per tale motivo è necessario valutarne gli spostamenti. Generalmente è buona norma non superare gli 1,5-2 mm di spostamento.

Sia con la metodo FEM tradizionale sia con il metodo meshless è stato applicato al sistema un carico gravitazionale verticale pari a *1g* (9.81 m/s^2) lungo la direzione -Z, sottoponendo così il sistema ad una sollecitazione pari al peso proprio. Successivamente sono stati ricavati gli spostamenti verticali dei tasselli e del flessibile, ed il carico sui tasselli è stato valutato misurando i valori delle reazioni vincolari (SPC force) nei punti di ancoraggio. Infatti, poiché tutti i tasselli presenti nel *Model 520* lavorano secondo il sistema di riferimento globale, il valore di SPC force coincide con il carico ricavato moltiplicando lo spostamento verticale per la rigidezza lungo l'asse Z del componente.

Come prima analisi qualitativa, dalla *figura 3.21,* è possibile osservare come le mappe colorimetriche degli spostamenti della linea analizzata con le due metodologie siano praticamente coincidenti tra loro.

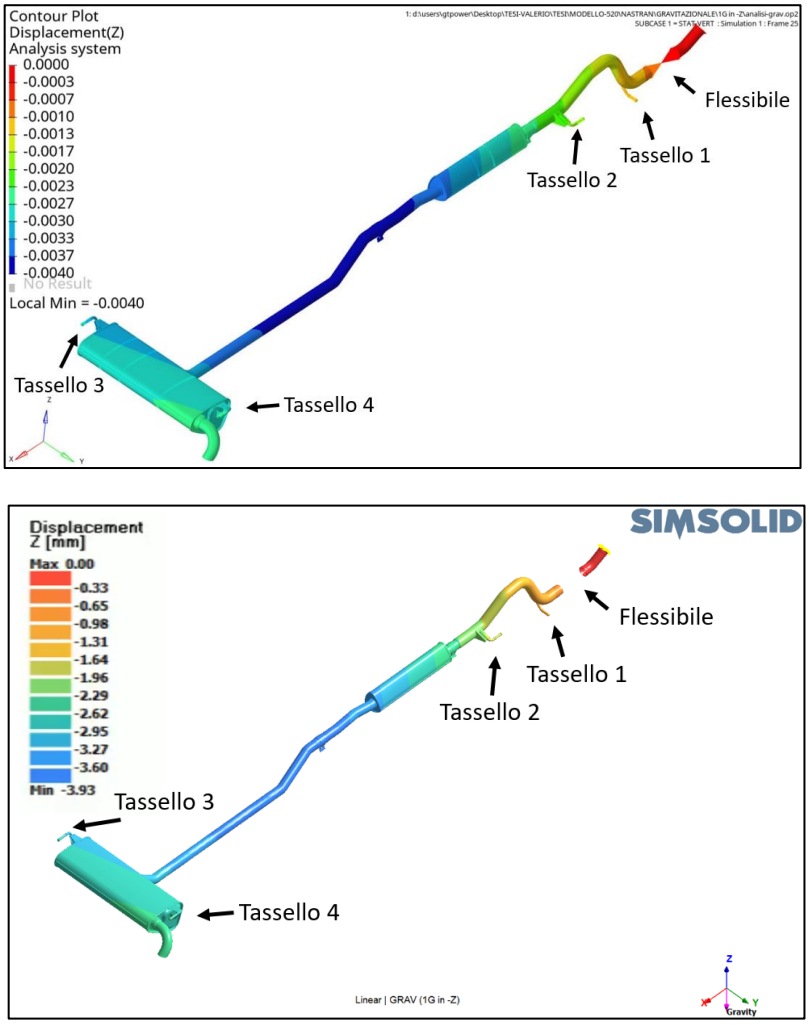


Figura 3.21: Analisi statica lineare Model 520 – Spostamenti linea con carico 1g verticale – FEM (in alto) e SimSolid ™ (in basso)

Entrando più nello specifico, dalla *tabella 3.4* è possibile notare come per tutti e quattro i tasselli e per il flessibile la differenza tra gli spostamenti ricavati tramite le due metodologie risulti inferiore al 4%. Inoltre si può osservare che gli spostamenti ottenuti utilizzando il metodo FEM tradizionale risultano sempre superiori a quelli ricavati utilizzando *SimSolid ™*. Ciò probabilmente è la conseguenza di una leggera differenza di peso tra i due modelli, ed anche in questo caso, per ottenere una miglior precisione nel modello "meshato", sarebbe stato necessario discretizzare i componenti "shell" partendo dalla superficie media.

	Spostamento Z [mm] FEM	Spostamento Z [mm] *SimSolid ™*	SPC force [N] FEM	SPC force [N] *SimSolid ™*	Differenza [%]
Tassello 1	-1,16	-1,13	19,72	19,27	2,28
Tassello 2	-1,83	-1,78	31,11	30,33	2,51
Tassello 3	-3,01	-2,91	51,17	49,41	3,44
Tassello 4	-2,64	-2,60	44,88	44,28	1,34
Flessibile	-0,93	-0,90	-	-	3,23

Tabella 3.4: Analisi statica lineare Model 520 - Spostamenti tasselli e flessibile con carico 1g verticale

Quindi tramite *SimSolid* ™ è possibile svolgere rapidamente e con buona precisione un'analisi statica lineare applicando un carico gravitazionale lungo un solo asse, al fine di valutare gli spostamenti e le reazioni vincolari del sistema analizzato.

3.4.2 Spostamento linea

Per verificare il contenimento laterale della linea e quindi il rispetto delle luci minime di progetto, è stato applicato al sistema un carico gravitazionale verticale pari a *1g* (9.81 m/s^2) lungo l'asse -Z, ed una accelerazione trasversale pari a *1g* (9.81 m/s^2) lungo l'asse Y. La scelta di imporre un'accelerazione laterale di tale entità risulta coerente con i carichi subiti generalmente da un sistema di scarico durante le comuni manovre di un autoveicolo. Successivamente, per effettuare un confronto tra le due metodologie, sono state ricavate le risultanti degli spostamenti lungo i tre assi di quattro punti significativi situati lungo la Cold End. Sono state scelte quelle zone dove le tubazioni possiedono ad esempio una geometria contorta o dove vi sono componenti esposti verso l'esterno come ad esempio il codino.

Come prima visione qualitativa, dalla *figura 3.22* è possibile osservare come, anche per questa analisi, le mappe colorimetriche degli spostamenti della linea analizzata con le due metodologie siano praticamente le medesime.

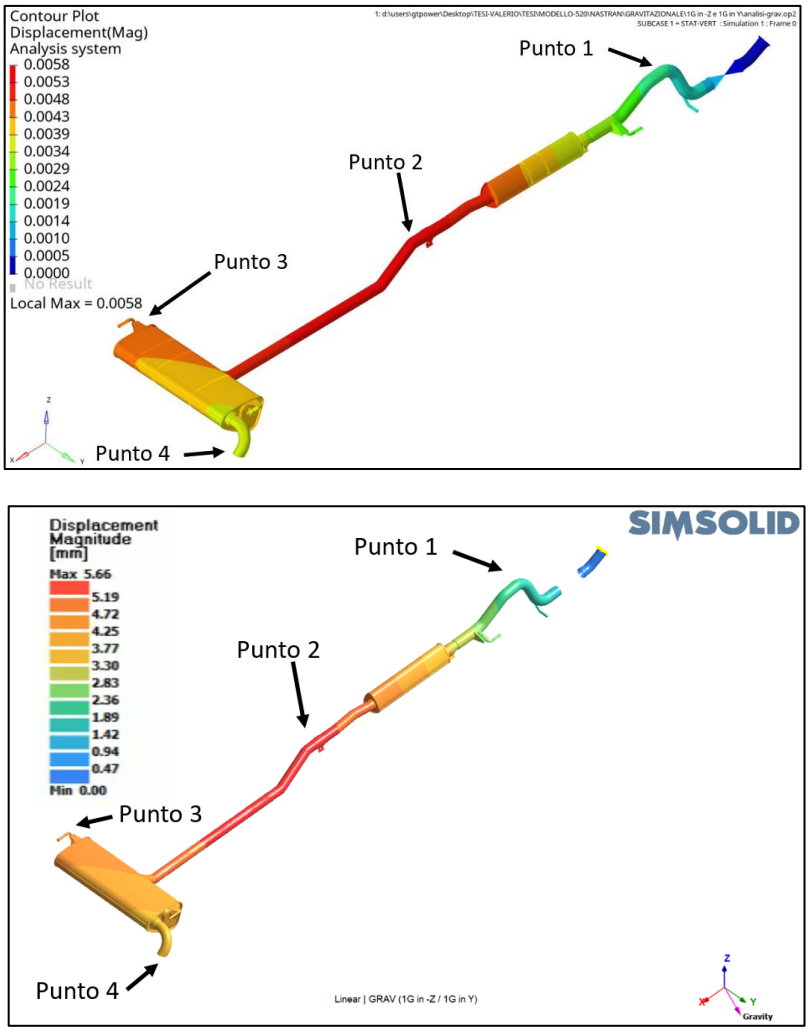


Figura 3.22: Analisi statica lineare Model 520 – Spostamenti linea con carico 1g verticale e 1g trasversale - FEM (in alto) e SimSolid ™ (in basso)

Infatti, entrando più nello specifico, dalla *tabella 3.5* è possibile notare come per tutti e quattro i punti investigati la differenza tra gli spostamenti ricavati tramite le due metodologie risulti inferiore al 3%. Inoltre, anche in questa analisi, si può osservare come gli spostamenti ottenuti utilizzando il metodo FEM tradizionale risultino superiori a quelli ricavati utilizzando *SimSolid ™*.

	Spostamento magnitude [mm] FEM	Spostamento magnitude [mm] *SimSolid* ™	Differenza [%]
Punto 1	1,78	1,76	1,12
Punto 2	5,56	5,44	2,16
Punto 3	4,79	4,67	2,51
Punto 4	3,75	3,64	2,93

Tabella 3.5: Analisi statica lineare Model 520 - Spostamenti punti con carico 1g verticale e 1g trasversale

Dai risultati di tale analisi *SimSolid* ™ si conferma essere una rapida alternativa al metodo tradizionale degli elementi finiti per svolgere con buona accuratezza un'analisi statica lineare applicando carichi gravitazionali lungo più direzioni, al fine di valutare gli spostamenti del sistema analizzato.

3.4.3 Validazione staffe

L'analisi statica in questione permette di valutare lo stato di affidabilità delle staffe mediante un approccio di tipo statico. In particolare viene effettuata una stima del danno a fatica confrontando le massime sollecitazioni locali di ogni staffa con i relativi limiti di fatica del materiale, utilizzando il diagramma di Haigh.

Ogni staffa è sottoposta ad una massima sollecitazione media (σ_m) causata dalla presenza di un carico statico e ad una massima sollecitazione alternata (σ_a) causata dall'applicazione di un carico dinamico.

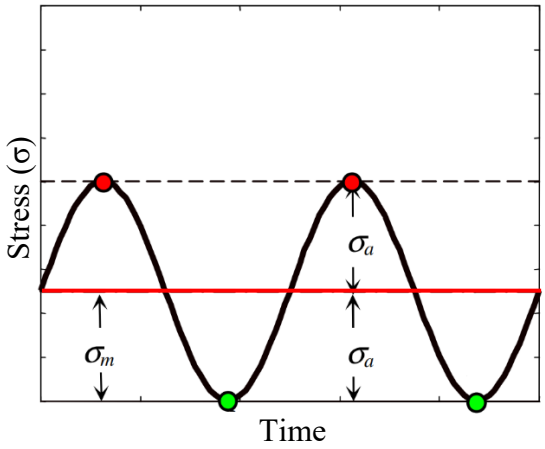


Figura 3.23: Sollecitazione media ed alternata

Il diagramma di Haigh rappresenta la zona di "vita sicura" a fatica di un materiale ad una determinata temperatura di esercizio e per un numero di cicli di vita fissato. Esso presenta una curva che permette di individuare in ordinate la sollecitazione alternata (σ_a) in funzione della sollecitazione media (σ_m) in ascisse. Se il punto di lavoro definito dalla tensione media massima ed alternata massima a cui è sottoposta una staffa risulta all'interno del diagramma di Haigh, si ha la validazione della staffa in esame. Se si mantiene costante il rapporto tra tensione media ed alternata, si può individuare una retta passante per l'origine, definita retta di carico, corrispondente al luogo dei punti che rappresenta le coppie di σ_a e σ_m al variare del carico esterno. Definito A il punto di lavoro, O l'origine del diagramma e B l'intersezione tra la retta di carico e la curva limite di fatica, il coefficiente di sicurezza è ricavato dal seguente rapporto:

$$CS = \frac{OB}{OA}$$

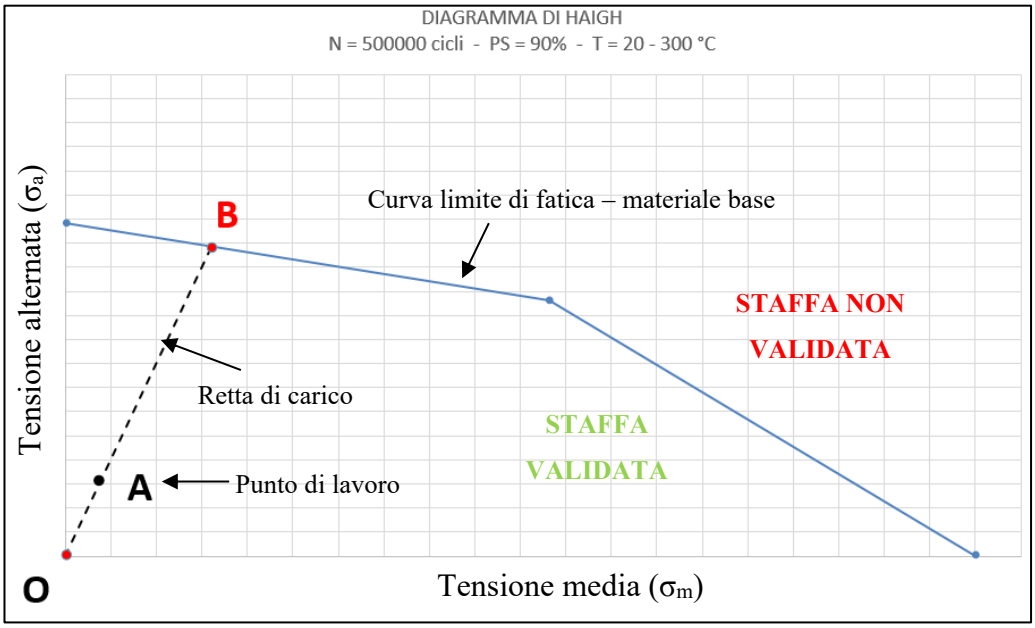


Figura 3.24: Diagramma di Haigh - materiale base

Inoltre, seguendo le metodologie aziendali per la validazione delle staffe, è possibile individuare una seconda curva di limite di fatica per valutare la resistenza delle zone interessate dalla saldatura, essendo zone termicamente alterate. Infatti all'aumentare della temperatura diminuisce la resistenza a fatica del materiale e per tale motivo si ipotizza che i valori del diagramma di Haigh per la nuova curva siano dimezzati.

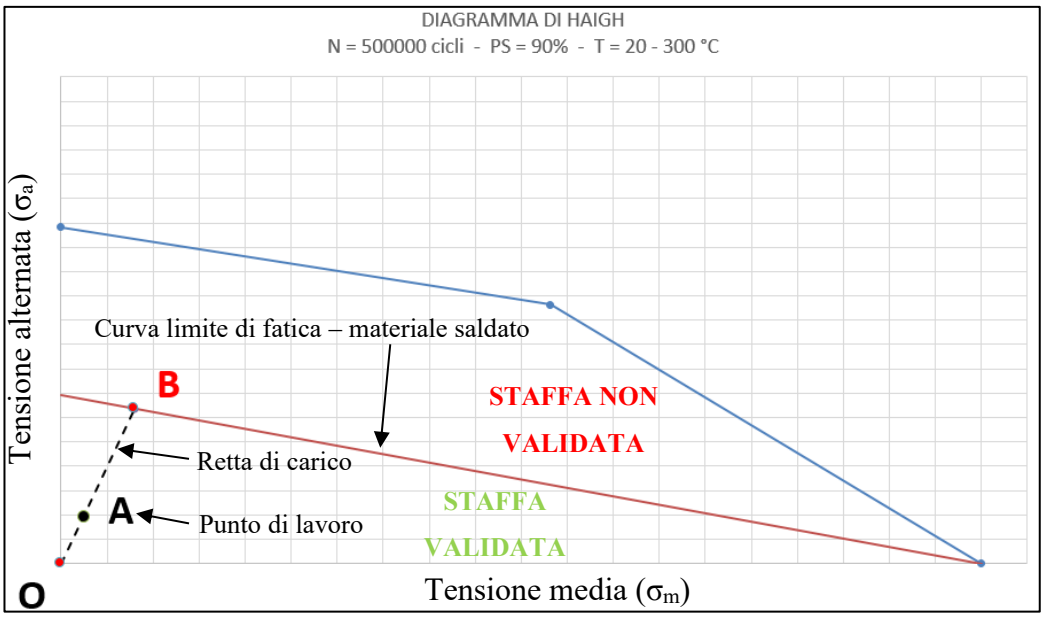


Figura 3.25: Diagramma di Haigh - materiale saldato

Durante il lavoro di tesi, sia con il metodo FEM tradizionale sia con il metodo meshless, per effettuare la validazione a fatica di ogni staffa sono state eseguite le seguenti fasi:

- Alla Cold End è stato applicato un carico gravitazionale verticale pari a *1g* (9.81 m/s^2) lungo l'asse -Z, sottoponendo così il sistema ad una sollecitazione pari al peso proprio. Tale carico corrisponde al carico statico a cui è soggetta la linea di scarico. Successivamente si sono registrati i valori massimi di stress di Von Mises per ogni staffa. In particolare si è identificato un valore di stress massimo nelle zone non saldate ed un valore di stress massimo nelle zone saldate. Tali stress corrispondono ai valori di tensione media (σ_m) dei punti di lavoro.

- Alla Cold End è stato applicato un carico gravitazionale verticale pari a *4g* ($4 \cdot 9.81$ m/s^2) lungo l'asse –Z. Tale valore rappresenta la massima sollecitazione dinamica a cui è soggetta la linea di scarico. Il fattore moltiplicativo "4" deriva dall'ipotesi secondo la quale la massima accelerazione a cui il sistema può essere sottoposto è pari a *4g* (salvo diversa richiesta del cliente). Successivamente si sono registrati i valori massimi di stress di Von Mises per ogni staffa. In particolare si è identificato un valore di stress massimo nelle zone non saldate ed un valore di stress massimo nelle zone saldate. Tali stress corrispondono ai valori di tensione alternata (σ_a) dei punti di lavoro. Inoltre è da precisare che, trattandosi di un'analisi lineare, la distribuzione delle tensioni risulta coincidente con la distribuzione ricavata con carico *1g,* ed i valori delle tensioni sono semplicemente quadruplicati.
- Per ogni staffa, entrando nel diagramma di Haigh con la coppia di σ_a e σ_m, è stato calcolato un coefficiente di sicurezza per le zone non saldate ed un coefficiente di sicurezza per le zone saldate.

Le analisi sono state eseguite su tutte e quattro le staffe della Cold End *Model 520* ma di seguito sono mostrati solamente i risultati delle prime due, poiché l'esito dell'analisi sulla terza e sulla quarta staffa è stato del tutto similare a quello dell'analisi sulla seconda, potendo così effettuare le stesse identiche considerazioni.

3.4.3.1 Staffa 1

Come prima analisi qualitativa, dalla *figura 3.26,* è possibile osservare come le distribuzioni degli stress di Von Mises della prima staffa ottenute con le due metodologie siano praticamente coincidenti tra loro. In particolare il punto con valore di stress massimo per il materiale di base è situato nella medesima zona della staffa.

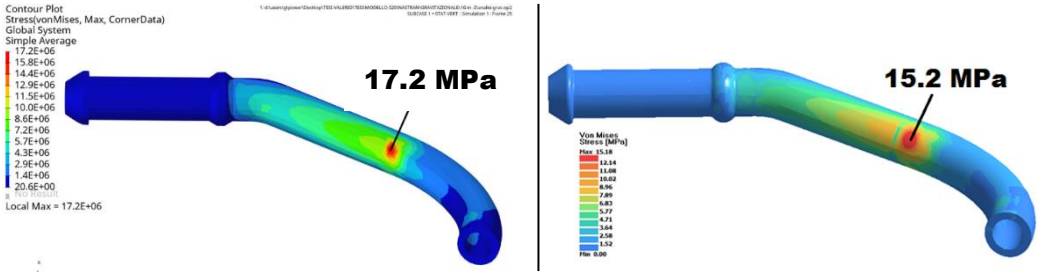


Figura 3.26: Staffa 1 - Distribuzione stress Von Mises - Carico 1g – Tensione massima materiale base FEM (a sinistra) e SimSolid ™ (a destra)

Invece, entrando più nello specifico, dalla *tabella 3.6* è possibile notare come, nonostante le mappe colorimetriche siano abbastanza simili tra loro, la differenza tra i valori di stress massimi ricavati tramite le due metodologie sia superiore al 10%. In particolare i valori di stress calcolati con il metodo meshless risultano inferiori rispetto a quelli ricavati utilizzando il metodo FEM tradizionale, avendo così una sottostima delle sollecitazioni (aspetto negativo).

	σ_m [MPa] (1g) FEM	**σ_a [MPa] (4g) FEM**	**σ_m [MPa] (1g) SimSolid ™**	**σ_a [MPa] (4g) SimSolid ™**	**Differenza [%]**
Materiale base	17.2	68.8	15.2	60.8	11.6

Tabella 3.6: Staffa 1 - Tensioni massime - Carico 1g /4g - Materiale base

Di conseguenza, come è possibile notare dalla *figura 3.27*, il coefficiente di sicurezza ricavato utilizzando *SimSolid* ^{TM} risulta sovrastimato.

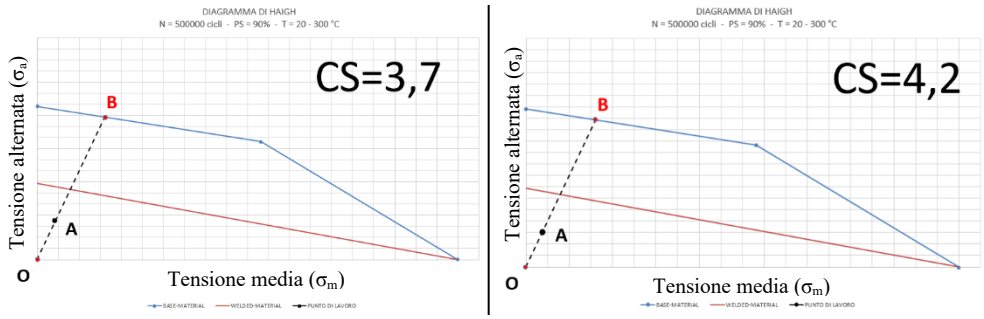


Figura 3.27: Staffa 1 - Coefficiente di sicurezza materiale base - FEM (a sinistra) e SimSolid ^{TM} *(a destra)*

Dalla *figura 3.28* si può osservare come, anche per il materiale saldato, in entrambe le analisi il punto con valore di stress massimo è situato nella medesima zona della staffa.

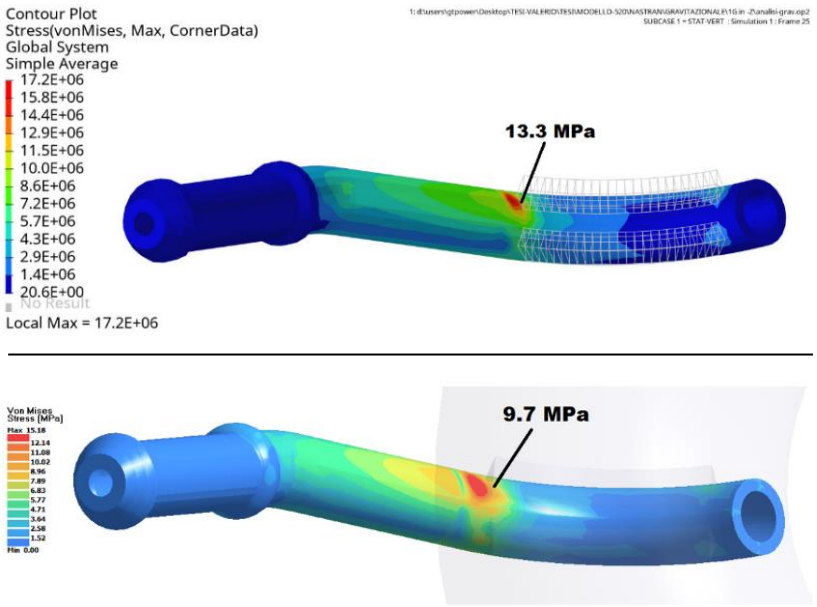


Figura 3.28: Staffa 1 - Distribuzione stress Von Mises - Carico 1g – Tensione massima materiale saldato FEM (in alto) e SimSolid ^{TM} *(in basso)*

In questo caso, però, è stata calcolata una differenza tra i valori di stress massimi ricavati tramite le due metodologie addirittura quasi prossima al 30%. In particolare i valori di stress calcolati con il metodo meshless risultano inferiori rispetto a quelli ricavati utilizzando il metodo FEM tradizionale, avendo così anche in questo caso una sottostima delle sollecitazioni ed una sovrastima del coefficiente di sicurezza.

	σ_m [MPa] (1g) FEM	σ_a [MPa] (4g) FEM	σ_m [MPa] (1g) SimSolid ™	σ_a [MPa] (4g) SimSolid ™	Differenza [%]
Materiale saldato	13.3	53.2	9.7	38.8	27.1%

Tabella 3.7: Staffa 1 - Tensioni massime - Carico 1g /4g - Materiale saldato

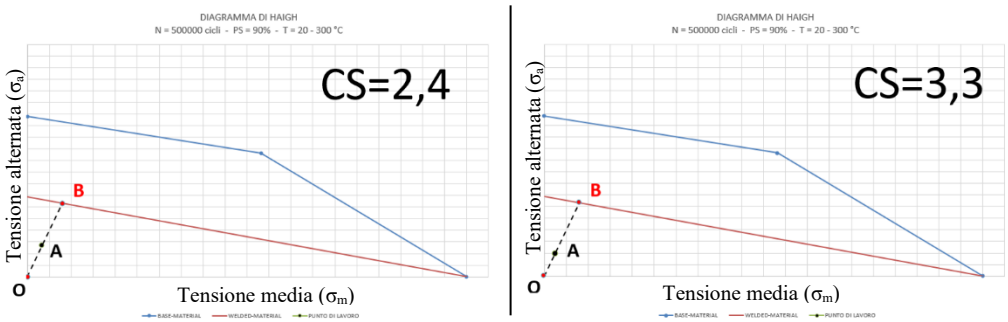


Figura 3.29: Staffa 1 - Coefficiente di sicurezza materiale saldato - FEM (a sinistra) e SimSolid ™ (a destra)

Da tali analisi effettuate sulla prima staffa, è possibile concludere che i risultati ottenuti utilizzando *SimSolid ™* sono troppo distanti da quelli ricavati tramite metodo FEM tradizionale, nonostante la distribuzione degli stress sia la medesima. Inoltre il nuovo software si pone in una situazione troppo gravosa andando a sottostimare le sollecitazioni e a sovrastimare i coefficienti di sicurezza. Probabilmente vi è stato uno scorretto settaggio delle impostazioni di analisi oppure il software, al momento, necessita ancora di ulteriori implementazioni e miglioramenti.

3.4.3.2 Staffa 2

Per la seconda staffa invece, a differenza dei risultati ottenuti sulla prima staffa, il punto con valore di stress massimo per il materiale di base ricavato con le due metodologie è situato in due zone differenti della staffa. Le distribuzioni degli stress di Von Mises, quindi, non coincidono perfettamente tra loro e, per tale motivo, non ha avuto senso calcolare nella *tabella 3.9* la differenza tra i valori di stress, trattandosi di punti di analisi differenti.

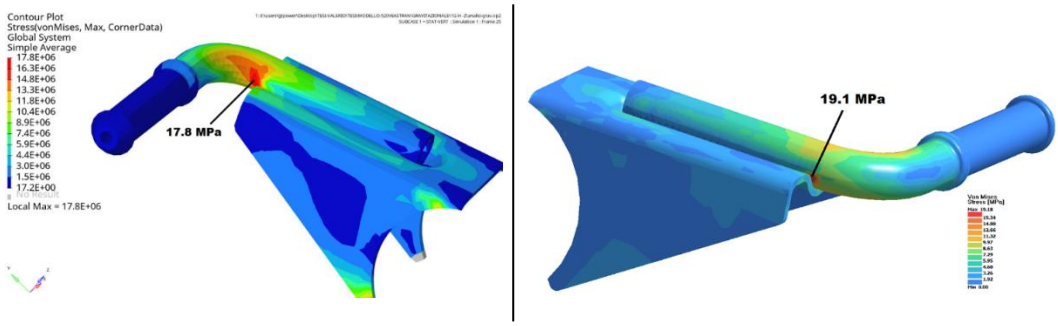


Figura 3.30: Staffa 2 - Distribuzione Stress Von Mises - Carico 1g – Tensione massima materiale base FEM (a sinistra) e SimSolid ™ (a destra)

	σ_m [MPa] (1g) FEM	σ_a [MPa] (4g) FEM	σ_m [MPa] (1g) SimSolid ™	σ_a [MPa] (4g) SimSolid ™
Materiale base	17.8	71.2	19.1	76.4

Tabella 3.8: Staffa 2 - Tensioni massime - Carico 1g /4g - Materiale base

Dalla *figura 3.30* si può osservare come, anche per il materiale saldato, in entrambe le analisi il punto con valore di stress massimo è situato in due zone differenti della staffa.

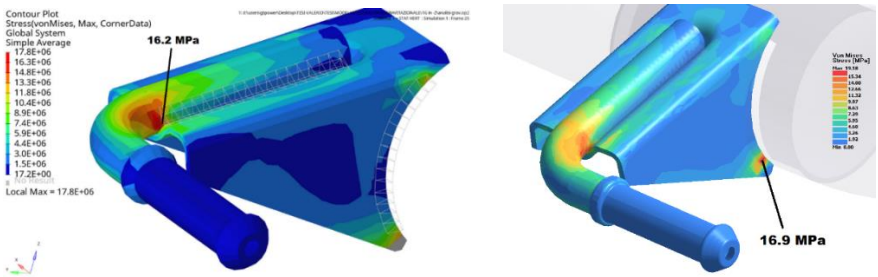


Figura 3.31: Staffa 2 - Distribuzione stress Von Mises - Carico 1g – Tensione massima materiale saldato FEM (a sinistra) e SimSolid ™ (a destra)

	σ_m [MPa] (1g) FEM	σ_a [MPa] (4g) FEM	σ_m [MPa] (1g) SimSolid ™	σ_a [MPa] (4g) SimSolid ™
Materiale saldato	16.2	64.8	16.9	67.6

Tabella 3.9: Staffa 2 - Tensioni massime - Carico 1g /4g - Materiale saldato

Da tali analisi effettuate sulla seconda staffa, è possibile concludere che i risultati ottenuti utilizzando *SimSolid* ™ sono troppo distanti da quelli ricavati tramite metodo FEM tradizionale, presentando persino delle distribuzioni delle tensioni differenti. Probabilmente anche in questo caso vi è stato uno scorretto settaggio delle impostazioni di analisi oppure il software, al momento, necessita ancora di ulteriori implementazioni e miglioramenti.

3.5 Correlazione statica non lineare *Model 520*

Per studiare in modo completo il comportamento di un sistema di scarico è necessario considerare fenomeni che non rispettano più le ipotesi di linearità. Tali fenomeni riguardano:

- Modellazione del contatto;
- Comportamento non lineare del materiale;
- Non linearità della geometria.

Durante il lavoro di tesi, è stata considerata esclusivamente la non linearità dei materiali. Quando gli stress in un materiale duttile risultano inferiori al limite di snervamento, è sufficiente considerare un comportamento perfettamente lineare del materiale. Ma nel momento in cui gli stress superano la tensione di snervamento, nella realtà il materiale inizia a mostrare un comportamento plastico, e l'ipotesi di linearità del comportamento del materiale risulta così inadeguata per simulare correttamente un qualsiasi fenomeno meccanico. Superato lo snervamento infatti il materiale non è più in grado di sostenere ulteriori incrementi di tensioni locali, le quali avranno la tendenza a ridistribuirsi in una zona limitata.

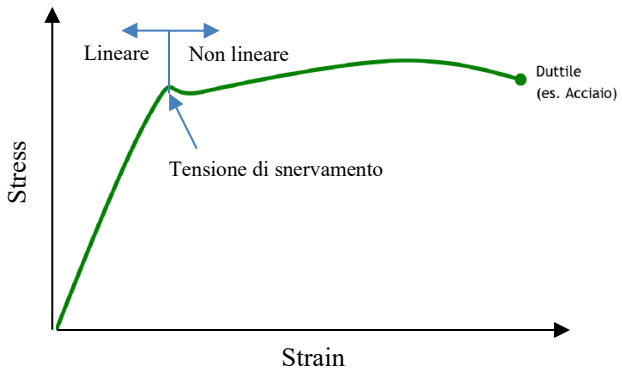


Figura 3.32: Curva sforzo-deformazione

Inoltre il comportamento e le proprietà del materiale non dipendono solamente dallo stato di sollecitazione ma anche dalla temperatura. Infatti all'aumentare della temperatura diminuiscono le prestazioni (modulo di elasticità e tensione di snervamento minori) e per tale motivo è necessario definire diverse curve di Stress-Strain al variare della temperatura.

3.5.1 Spostamento linea

Per valutare il comportamento non lineare dei materiali che costituiscono la Cold End *Model 520,* e per effettuare un confronto tra le due metodologie, è stata effettuata una analisi statica non lineare durante la quale sono stati ricavati gli spostamenti della linea. In particolare sono stati applicati tre carichi gravitazionali lungo i tre assi del sistema di riferimento globale:

- Accelerazione *5g* (5 · 9.81 m/s^2) lungo l'asse X;
- Accelerazione *5g* (5 · 9.81 m/s^2) lungo l'asse Y;
- Accelerazione 10*g* (10 · 9.81 m/s^2) lungo l'asse Z;

Inoltre l'analisi è stata svolta a 300°C, quindi per ogni materiale è stata caricata la curva sforzo-deformazione corrispondente a tale temperatura di esercizio.

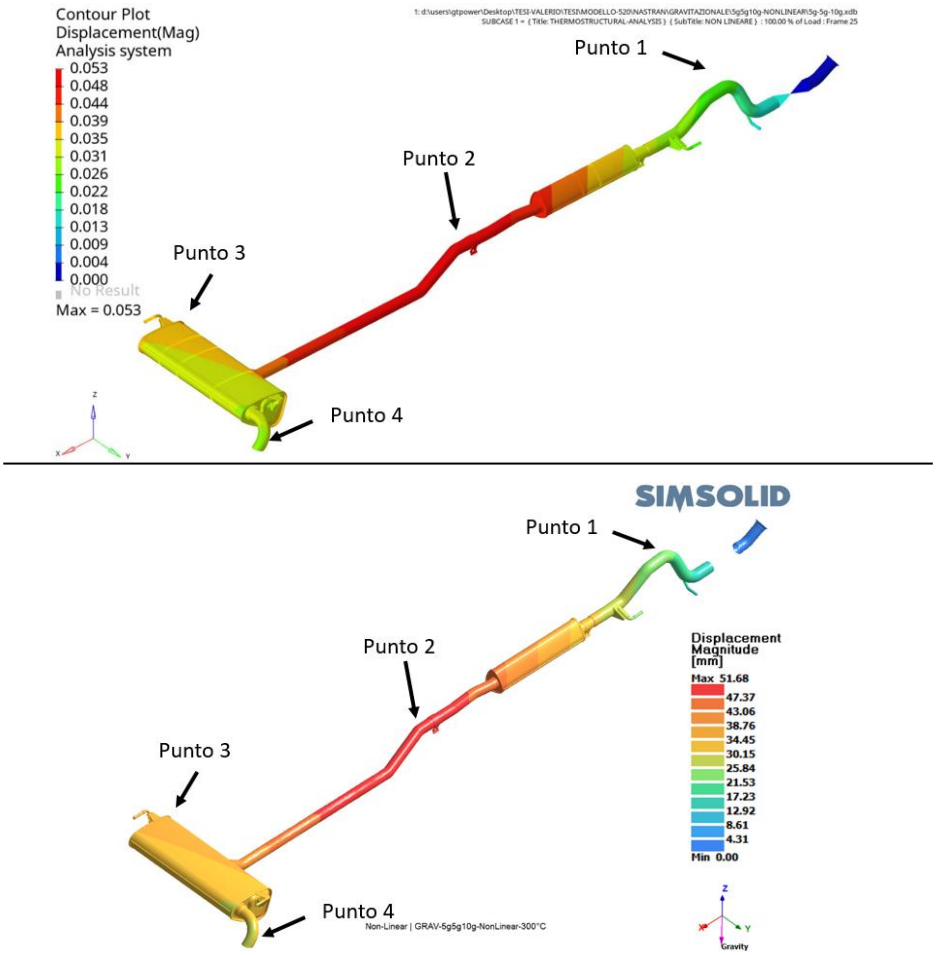


Figura 3.33: Analisi statica non lineare Model 520 – Spostamenti linea con carico 5g/5g/10g a 300°C - FEM (in alto) e SimSolid ™ (in basso)

Come prima visione qualitativa, dalla *figura 3.32* è possibile osservare come le mappe colorimetriche degli spostamenti della linea analizzata con le due metodologie siano praticamente le medesime.

	Spostamento magnitude [mm] FEM	**Spostamento magnitude [mm] *SimSolid ™***	**Differenza [%]**
Punto 1	23,3	22,7	2,58
Punto 2	51,6	50,7	1,74
Punto 3	40,1	38,9	2,82
Punto 4	30,4	30,1	0,99

Tabella 3.10: Analisi statica non lineare Model 520 - Spostamenti punti con carico 5g/5g/10g 300°C

Entrando più nello specifico, dalla *tabella 3.11* è possibile notare come per tutti e quattro i punti investigati la differenza tra gli spostamenti ricavati tramite le due metodologie risulti inferiore al 3%. Inoltre, come per l'analisi statica lineare, si può osservare come gli spostamenti ottenuti utilizzando il metodo FEM tradizionale risultino superiori a quelli ricavati utilizzando *SimSolid ™*. Ciò probabilmente è sempre dovuto ad una leggera differenza di peso tra i due modelli.

Anche in questo caso è possibile quindi ritenere *SimSolid ™* un rapido supporto al metodo tradizionale degli elementi finiti per svolgere con buona affidabilità un'analisi statica non lineare applicando carichi gravitazionali lungo più direzioni, al fine di valutare gli spostamenti del sistema analizzato.

3.6 Analisi termica in regime stazionario *Model 520*

Un'analisi termica consiste nello studio della distribuzione delle temperature e del trasporto di calore in un sistema sottoposto ad un carico termico applicando e risolvendo le equazioni della trasmissione del calore per conduzione, convezione ed irraggiamento.

La conduzione di calore consiste nello scambio di energia termica all'interno di un corpo o tra due corpi posti in contatto tra di loro, ed è dovuto alla cessione di energia cinetica molecolare da zone a temperatura maggiore a zone adiacenti a minor temperatura.

$$\boxed{\dot{Q} = -k\,A\frac{\Delta T}{\Delta x}}$$

Ove:

- $\dot{Q}$ = potenza termica scambiata (W);
- A = area di scambio termico (m^2);
- ΔT = differenza di temperatura tra due punti (°C);
- Δx = distanza tra due punti (m);
- k = coefficiente di conducibilità termica (W/mK);

La trasmissione di calore per convezione consiste nello scambio di energia termica tra un corpo ed un fluido che ne lambisce la superficie. In particolare il corpo tende a cedere calore al fluido se si trova ad una temperatura maggiore o ad assorbire energia se si trova ad una temperatura inferiore rispetto al fluido.

$$\boxed{\dot{Q} = h_c\,A\,(T_P - T_F)}$$

Ove:

- $\dot{Q}$ = potenza termica scambiata (W);
- A = area di scambio termico (m^2);
- T_P = temperatura parete del corpo (°C);
- T_F = temperatura fluido (°C);
- h_c = coefficiente di scambio termico convettivo (W/m^2K);

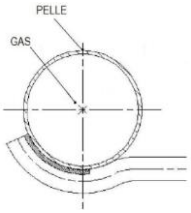
Infine il fenomeno dell'irraggiamento consiste nel trasporto di energia sotto forma di calore tramite onde elettromagnetiche. La trasmissione può avvenire o da un corpo verso l'ambiente o tra due corpi, senza la necessità di avere un mezzo trasmissivo interposto.

I gas che attraversano un sistema di scarico sono fluidi che raggiungono temperature piuttosto elevate. Per tale motivo è necessario ricavare una mappa delle temperature di pelle dei componenti di tutta la linea partendo dalle temperature dei gas di scarico che ne lambiscono le superfici interne e dalla temperatura esterna dell'aria. Successivamente, una volta effettuata la mappatura termica, viene di solito eseguita un'analisi termo-strutturale per determinare l'entità delle dilatazioni e delle sollecitazioni termiche indotte sui componenti.

3.6.1 Mappa di temperatura

Per effettuare una mappatura termica di un sistema di scarico in campo virtuale, si parte dalle temperature dei gas misurate sperimentalmente e successivamente, impostati i valori k dei materiali e di h_c dell'aria esterna e dei gas interni, si ricavano le temperature di pelle dei componenti. È da precisare che la conducibilità termica k di un materiale è una proprietà che varia con la temperatura e per tale motivo, per ottenere risultati più simili alla realtà, è necessario caricare sul software di analisi le proprietà dei materiali in funzione della temperatura.

Durante il lavoro di tesi, al fine di valutare il funzionamento del metodo meshless durante un'analisi termica, è stata riprodotta una mappa di temperatura della Cold End *Model 520* ed i risultati sono stati confrontati con i valori derivanti dalle prove sperimentali. Durante le prove sperimentali il sistema è stato regimato alla massima temperatura, e successivamente il veicolo è stato arrestato il più velocemente possibile per simulare il colpo di calore. I componenti della linea di scarico sono stati strumentati con termocoppie che misurano le temperature di pelle e dei gas.



Nelle seguenti figure sono mostrati i valori delle temperature dei gas interni valutate al momento dell'arresto del veicolo ed i rispettivi andamenti nel tempo.

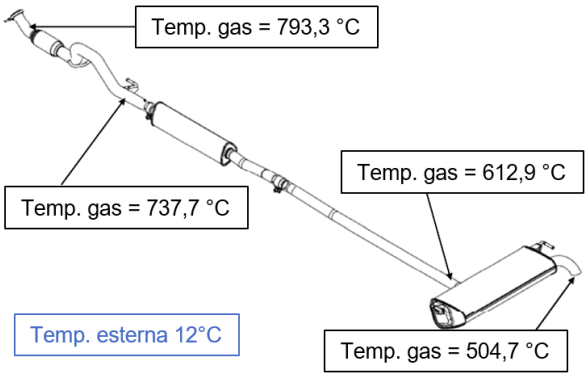


Figura 3.34: Valori sperimentali temperatura gas Model 520

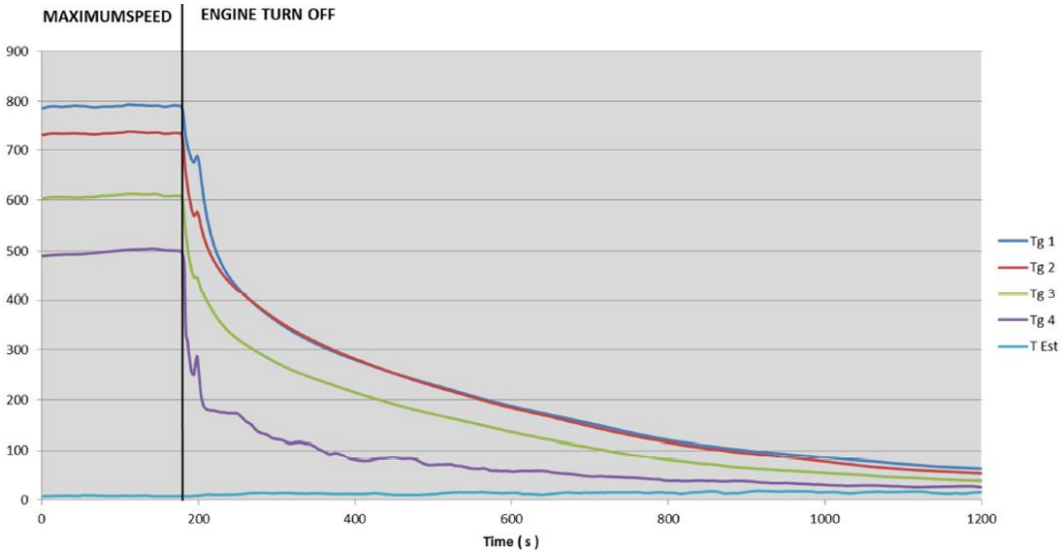


Figura 3.35: Andamenti sperimentali temperatura gas Model 520

Per svolgere l'analisi termica utilizzando *SimSolid* ^{TM} sono state riscontrate due limitazioni non indifferenti. La prima riguarda la conducibilità termica dei materiali. Infatti il software non permette di caricare le proprietà dei materiali in funzione della temperatura ed è stato quindi necessario inserire un valore medio di k per ogni materiale. La seconda riguarda l'irraggiamento. Infatti il software non è ancora predisposto a simulare tale tipologia di trasmissione di calore. Per tali motivi, è stato necessario agire sui valori di h_c dell'aria esterna e dei gas al fine di raggiungere valori di temperatura attendibili.

Nella *figura 3.35* è mostrata la mappa di temperatura ricavata utilizzando *SimSolid*™ partendo dalle temperature dei gas misurate sperimentalmente. Nella *tabella 3.12*, invece, sono riportate le temperature di pelle derivanti sia dalle prove sperimentali sia dal software di calcolo di 5 punti lungo le tubazioni della linea e di 4 punti all'estremità di ogni staffa.

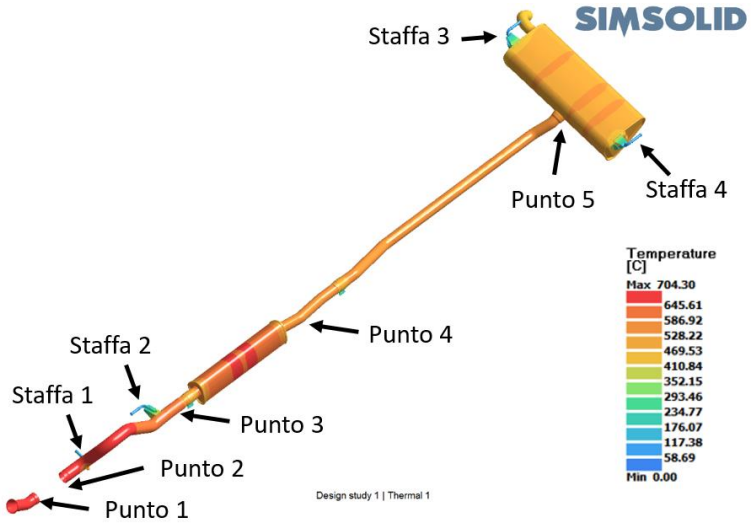


Figura 3.36: Analisi termica Model 520 -Mappa di temperatura - SimSolid ™

	Temperatura pelle [°C] Sperimentale	**Temperatura pelle [°C] *SimSolid* ™**
Punto 1	522,9	510,6
Punto 2	478,7	487,6
Punto 3	429,2	427,8
Punto 4	407,1	403,9
Punto 5	378,4	383,9
Staffa 1	63,5	65,3
Staffa 2	32,7	33,1
Staffa 3	47,4	38,6
Staffa 4	43,2	37,1

Tabella 3.11: Analisi termica Model 520 - Temperature di pelle

Dalla mappa colorimetrica si può notare come la distribuzione delle temperature sia piuttosto realistica, e ciò viene confermato dalla tabella dei risultati ove si può osservare come i valori di temperatura puntuali calcolati con *SimSolid* ™ siano prossimi ai valori sperimentali.

Per svolgere una successiva analisi termostrutturale è necessario definire diverse curve di Stress-Strain dei materiali al variare della temperatura, poiché all'aumentare della temperatura diminuiscono le prestazioni (modulo di elasticità e tensione di snervamento minori). *SimSolid* ™ però ancora non permette di caricare le proprietà dei materiali in funzione della temperatura e per tale motivo non è stata eseguita alcuna analisi termostrutturale.

Quindi tramite *SimSolid* ™ è possibile eseguire una mappatura termica di un qualsiasi sistema in modo semplice ed accurato, ma non è ancora adatto per effettuare analisi termiche più dettagliate.

4 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi, sviluppato presso l'azienda *Marelli Europe S.p.A*. nel dipartimento *R&D - Green Technology Systems* di *Venaria Reale (TO)*, è stato analizzato e descritto in maniera dettagliata il funzionamento del software di simulazione *SimSolid* ^{TM} della compagnia *Altair Engineering Inc.,* studiandone le potenzialità.

SimSolid ^{TM} si presenta come uno strumento innovativo e "rivoluzionario" di simulazione meccanica strutturale e termica che, a differenza del metodo degli elementi finiti tradizionale, si basa su un metodo numerico meshless. Non vi è più infatti la necessità di eseguire le attività di semplificazione geometrica e di discretizzazione del modello da parte dell'operatore, semplificando di conseguenza l'esecuzione delle analisi e riducendo drasticamente le tempistiche di preparazione del modello e di calcolo. È stato quindi effettuato un confronto diretto tra la metodologia FEM tradizionale ed il metodo numerico meshless durante una serie di simulazioni del comportamento meccanico di sistemi di scarico per autoveicoli.

Inizialmente è stato necessario comprendere il funzionamento generale del nuovo software ed i vari passaggi da eseguire durante le fasi di Pre-Processing, Solving e Post-Processing. In particolare maggior attenzione è stata rivolta alla procedura di creazione delle connessioni per replicare il più fedelmente possibile i collegamenti tra i vari componenti di un sistema di scarico e creare quindi una metodologia sulle connessioni in *SimSolid* ^{TM} da poter utilizzare in seguito in azienda.

Successivamente sono state effettuate una serie di analisi di tipo statico, dinamico e termico per valutare la precisione dei risultati ottenuti tramite *SimSolid* ^{TM} attraverso un confronto con i risultati ottenuti utilizzando il metodo FEM tradizionale, essendo il metodo di riferimento ufficialmente utilizzato in azienda.

La prima linea analizzata è stata una Cold End (*Model 520)*, e per essa sono state eseguite le seguenti analisi:

- Analisi modale a temperatura ambiente per ricavare le frequenze proprie delle staffe;
- Analisi di risposta in frequenza per valutare l'inertanza delle staffe;
- Correlazione statica lineare per valutare gli spostamenti e i carichi sui tasselli, gli spostamenti sul flessibile, lo spostamento della linea ed i carichi sulle staffe;
- Correlazione statica non lineare per valutare gli spostamenti della linea considerando un comportamento non lineare dei materiali;
- Analisi termica in regime stazionario per creare una mappa di temperatura di pelle della linea partendo dalle temperature dei gas di scarico che lambiscono le superfici interne delle tubazioni e dalla temperatura esterna dell'aria.

É stata inoltre analizzata una Hot End (*Model W)* per la quale invece è stata effettuata solamente un'analisi modale a temperatura ambiente al fine di ricavare le prime frequenze modali del sistema.

Dal punto di vista del tempo impiegato per svolgere le simulazioni, tramite il metodo FEM tradizionale, la fase di Pre-Processing è durata circa una settimana, mentre la fase di Solving è durata qualche minuto. Utilizzando *SimSolid* ^{TM} , invece, il tempo impiegato per preparare il modello è stato di qualche ora, mentre per svolgere le analisi il software ha impiegato circa due ore.

Dai risultati ottenuti durante le analisi modali delle due linee di scarico, avendo calcolato una differenza massima tra le frequenze di risonanza ricavate con le due metodologie inferiore al 10%, è possibile considerare *SimSolid* ^{TM} un ottimo supporto al metodo tradizionale degli elementi finiti per svolgere rapidamente un'analisi modale di una Cold End e di una Hot End, ottenendo risultati piuttosto accurati.

A seguito dell'analisi di risposta in frequenza si sono ottenuti dei grafici di spostamento delle staffe coerenti con l'analisi modale e piuttosto simili ai grafici ricavati utilizzando il metodo FEM tradizionale e, per tale motivo, si può anche in questo caso ritenere *SimSolid* ^{TM} una valido ausilio al metodo FEM tradizionale per svolgere rapidamente una misura dell'inertanza delle staffe di una Cold End.

Anche a seguito delle correlazioni statiche lineari e non lineari si può affermare che utilizzando *SimSolid* ^{TM} è possibile valutare rapidamente e con buona affidabilità gli spostamenti e le reazioni vincolari del sistema analizzato, applicando sia un carico gravitazionale lungo un solo asse sia carichi gravitazionali lungo più direzioni. Infatti la differenza tra gli spostamenti ricavati tramite le due metodologie è risultata inferiore al 4%.

Lo stesso discorso non vale invece per la valutazione degli stress. Infatti i risultati ottenuti utilizzando *SimSolid* ^{TM} sono stati troppo distanti da quelli ricavati tramite metodo FEM tradizionale, presentando persino delle distribuzioni delle tensioni differenti. Probabilmente in questo caso vi è stato uno scorretto settaggio delle impostazioni di analisi oppure il software, al momento, necessita ancora di ulteriori implementazioni e miglioramenti.

Infine è stato possibile creare una mappatura termica della Cold End piuttosto realistica ricavando valori di temperatura puntuali lungo la linea prossimi ai valori sperimentali. *SimSolid* ^{TM} non risulta però adatto per effettuare analisi termiche più dettagliate poiché ancora non permette di caricare le proprietà dei materiali in funzione della temperatura.

Da tale lavoro si evince come *SimSolid* ^{TM} possa essere ritenuto un ottimo strumento di analisi strutturale piuttosto affidabile ed utile durante le prima fasi della progettazione ove è necessario ricevere un feedback rapido sul progetto in questione. Per studi più dettagliati invece risultano più adeguati ancora i tradizionali metodi di simulazione FEM.

Per un eventuale sviluppo futuro del lavoro, attendendo necessarie implementazioni nelle prossime versioni di *SimSolid* ^{TM}, si potrebbe:

- rieseguire un'analisi degli stress di Von Mises;
- effettuare un'analisi vibrazionale della linea fornendo in input delle accelerazioni o degli spostamenti per simulare la trasmissione delle vibrazioni prodotte dal compartimento motore;
- eseguire un'analisi termostrutturale considerando le proprietà dei materiali in funzione della temperatura.

Bibliografia

[1] Altair University eBook, *Simulation Revolution with Altair SimSolid ™*, 1st Edition, 2019.

[2] https://it.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_engineering.

[3] https://www.marelli.com.

[4] Metodologie *Marelli R&D - Green Technology Systems*.

[5] Altair University eBook, *Practical Aspects of Finite Element Simulation,* 5th Edition, 2019.

[6] Roberto Dardano, *Tecnologia e analisi delle vibrazioni.*

[7] A.Fasana, S.Marchesiello, *Meccanica delle vibrazioni, 2006.*

[7] Brüel & Kjær, *Analisi strutturale, Parte 2: Analisi modale e simulazione.*

[8] Brüel & Kjær, *Introduzione alle misure di vibrazione.*

[9] Gong, Yupan & Dan, Qingcao. (2016), *Vibration Characteristics Analysis of Exhaust System Based on Optimization of Hanger Position*, 10.2991/icseee-15.2016.117.

[10] Potente, D.. (2005), *General design principles for an automotive muffler,* Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2005, Acoustics 2005: Acoustics in a Changing Environment. 121-126.

[11] Vinutha B.S & Hemanth.K, *Study of static and frequency responsible analysis of hangers with exhaust system*, International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 3, 2017.