



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Analisi FEM di un serbatoio Diesel per veicolo ferroviario

FEM analysis of a railway vehicle's diesel tank

Relatore: Chiar.mo
Prof. Ing. Dario Amodio

Tesi di Laurea di:
Emanuele Barone

A.A. 2022 / 2023

Sommario

INTRODUZIONE.....	3
1. TIPOLOGIA DI MEZZI ROTABILI E RIFERIMENTI NORMATIVI	4
2. MEZZI D’OPERA PER LA MANUTENZIONE E COSTRUZIONE DI LINEE FERROVIARIE 6	
3. DIMENSIONAMENTO DI UN SERBATOIO DIESEL.....	17
3.1 Riferimenti normativi EU ed AAR.....	17
3.2 Requisiti strutturali secondo normative Europee (EU)	17
3.3 Requisiti strutturali secondo normative Americane (AAR)	22
3.4 Requisiti funzionali	23
4. PROGETTAZIONE DI UN SERBATOIO	25
5. VERIFICA STRUTTURALE.....	26
5.1 Analisi FEM	26
5.2 Preparazione del modello	27
5.3 Casi di carico.....	31
6. CONCLUSIONI.....	47
BIBLIOGRAFIA	48
SITOGRAFIA.....	49
APPENDICE.....	50

INTRODUZIONE

Il settore dei trasporti ferroviari rappresenta un importante ambito nell'infrastruttura globale, sostenendo la mobilità e la connessione su scala mondiale. In questo contesto, l'efficienza e la sicurezza dei mezzi d'opera ferroviari sono fondamentali per garantire il funzionamento ottimale di reti complesse e in costante evoluzione. L'azienda del Gruppo Salcef SRT si colloca al cuore di questa dinamica, impegnandosi nella progettazione e nel collaudo di soluzioni moderne per il settore ferroviario.

In particolare, il presente elaborato si focalizza sulla progettazione e il collaudo di un serbatoio Diesel destinato ai mezzi d'opera, in quanto rappresenta un componente fondamentale nelle strutture e nelle prestazioni di tali veicoli. La ricerca è avvenuta all'interno dell'ambito specifico dell'azienda Salcef SRT, esplorando le fasi cruciali, le sfide tecniche e le metodologie adottate per garantire elevate performance, sicurezza e affidabilità dei mezzi ferroviari.

Attraverso un'analisi dettagliata delle diverse fasi di sviluppo e collaudo, questa tesi mira a fornire una panoramica esaustiva delle scelte progettuali, delle tecnologie impiegate e dei test di verifica svolti, contribuendo così all'approfondimento delle conoscenze nel campo della progettazione dei serbatoi Diesel per mezzi d'opera ferroviari.

La ricerca si basa su dati, metodologie e informazioni ottenute direttamente dall'esperienza pratica all'interno dell'azienda, integrando conoscenze teoriche e pratiche per offrire una visione completa e approfondita del processo di sviluppo di questi componenti vitali per il funzionamento ottimale dei mezzi ferroviari.

Un ulteriore obiettivo del lavoro è quello di contribuire alle conoscenze nel settore ferroviario, offrendo una prospettiva dettagliata sulla progettazione e il collaudo di serbatoi Diesel per mezzi d'opera, con particolare attenzione al contesto aziendale del Gruppo Salcef SRT.

1. TIPOLOGIA DI MEZZI ROTABILI E RIFERIMENTI NORMATIVI

Quando parliamo di mezzi rotabili possiamo distinguerli in due categorie principali: materiale motore e materiale trainato. Il materiale motore può essere ripartito ulteriormente in locomotive e composizioni bloccate. Le locomotive e le composizioni bloccate possono essere ad alimentazione elettrica o termica o ibrida. Le prime sono unità singole che si occupano della trazione di treni passeggeri e merci e appartengono alle famiglie di locomotive da treno e locomotive da manovra. Entrambe sono disponibili in versione elettrica o diesel o ibrida e alcune locomotive possono essere utilizzate sia per treni che per manovre. Le composizioni bloccate (elettromotrici EMU e automotrici DMU) sono veicoli formati da un certo numero di unità, fra loro connesse in modo stabile. Queste composizioni dispongono di propri equipaggiamenti di trazione e di spazi per il trasporto di passeggeri. Anche per quanto riguarda il materiale trainato possiamo dividerlo in due tipi di categorie che sono le carrozze passeggeri e i carri merci. Le carrozze passeggeri sono adibite per servizi di lunga distanza diurni (con carrozze ristorante e semipilota), servizi di lunga distanza notturni (con carrozze letto e a cuccette) e servizi di breve/media distanza (a singolo o doppio piano). Di carri merci invece ne esistono di svariate categorie e sono concepiti per trasportare diversi tipi di merci. Qui una lista dei principali:

- Carri pianali
- Carri a sponde
- Carri con scarico a gravità
- Carri a tetto mobile
- Carri cisterna
- Carri a tasca
- Bisarche
- Carri articolati

La scelta del materiale rotabile da utilizzare per i diversi servizi dipende di solito da tre elementi di base che sono: ciò che deve essere trasportato (passeggeri o merci); le quantità da trasportare (passeggeri per ora per tratta o tonnellate per giorno per tratta); le caratteristiche del trasporto (si fa riferimento sulla base delle caratteristiche dell'infrastruttura).

Oltre ai tipi di materiale rotabile di cui abbiamo parlato finora possiamo aggiungere anche quello impiegato per servizi ausiliari: veicoli per costruzione e manutenzione delle infrastrutture, veicoli (o treni) diagnostica e veicoli per interventi di soccorso ed emergenza. Sul mercato sono disponibili numerosi tipi di veicoli specializzati per la costruzione e la manutenzione meccanizzata della infrastruttura, spesso indicati come mezzi d'opera.

Tutti i mezzi citati finora fanno riferimento a determinate normative. I riferimenti normativi per i mezzi rotabili, inclusi treni, tram e altri veicoli ferroviari, in territorio italiano, sono principalmente rappresentati dalle direttive e dai regolamenti dell'Unione Europea (UE) che stabiliscono standard e requisiti per la progettazione, la costruzione, l'omologazione e l'esercizio di tali veicoli. Sono in circolazione numerose di queste normative che hanno appunto lo scopo di mettere a servizio i mezzi rotabili, sia destinati a passeggeri, merci sia per la manutenzione o costruzione delle ferrovie, in modo da rispettare tutti i requisiti di sicurezza necessari per evitare problemi o disastri.

2. MEZZI D'OPERA PER LA MANUTENZIONE E COSTRUZIONE DI LINEE FERROVIARIE

Ci concentriamo ora nella descrizione dei mezzi rotabili per la manutenzione e costruzione di linee ferroviarie. In particolare, possiamo far riferimento a quelli progettati e costruiti da SRT s.r.l..

- SGMNS CARRO A 4 ASSI

Questo tipo di veicolo si basa su una piattaforma modulare standardizzata composta da un carro base a quattro assi e da una serie di allestimenti che permettono di adattare rapidamente il veicolo a diverse specifiche esigenze operative. Le forme che i carri possono assumere sono:

- Dynamic Hopper System (DHS): L'allestimento DHS, inquadrato come "macchina" in base alla direttiva 2006_42_CE, è studiato e realizzato per consentire di caricare/trasportare/scaricare materiali di varia pezzatura e granulometria, in particolare materiale di risulta prodotto durante il risanamento della massicciata ferroviaria.
- Sponde: L'allestimento sponde permette di trasportare materiali, componenti o accessori di diverso tipo e di scaricarli con più facilità e meno fatica. È dotato di sponde alte 0,6 m, abbattibili durante le operazioni di carico/scarico del materiale. La tenuta delle sponde è garantita da chiusure a blocco e da robusti perni di sicurezza.
- Tramoggia: L'allestimento tramoggia consente di trasportare e mettere in opera il ballast. Dotata di 8 bocche dosatrici, la tramoggia può scaricare il ballast sia all'interno che all'esterno della rotaia. Il sistema di scarico è totalmente automatizzato: comandi elettroidraulici azionano i cilindri di apertura e chiusura delle bocche di scarico.
- Porta traverse: L'allestimento porta traverse viene utilizzato principalmente durante le operazioni di rinnovamento del binario. I binarietti installati lateralmente permettono il passaggio della macchina operatrice, consentendo di effettuare il trasbordo delle traverse direttamente sul treno di posa. Sfruttando le caratteristiche di circolabilità del carro Sgmns, l'allestimento può

essere inoltre adibito al trasporto delle traverse dallo stabilimento al punto di impiego, assolvendo in pieno le funzioni di un classico carro merci.



Figura 1: SGMNS carro a 4 assi



Figura 2: Dynamic Hopper System



Figura 3: Sponde



Figura 4: Tramoggia



Figura 5: Porta traverse

- KGMNS CARRO A 2 ASSI

Questo mezzo rotabile, a differenza del primo, è composto da un carro base a due assi e da una diversa serie di allestimenti che permette anche a quest'ultimo di avere una grossa versatilità. Ecco i suoi allestimenti:

- Nastro di carico: allestimento che viene utilizzato in cantieri di risanamento della massicciata di binari e scambi. Questo mezzo viene posizionato tra il convoglio di carri (DHS o similari) per il trasporto del materiale di risulta e la macchina escavatrice (pala, escavatore, caricatore, etc.), consentendo di elevare il materiale dal piano di scavo fino alla quota del primo carro. A differenza dei tradizionali carri con sponde, utilizzati per caricare il materiale di risulta nel risanamento dei deviatori, questo allestimento della serie Kgmns consente il carico senza impegnare il binario attiguo.
- Sponde: L'allestimento sponde permette di trasportare materiali, componenti o accessori di diverso tipo e di scaricarli con più facilità e meno fatica. È dotato di sponde alte 0,6 m, abbattibili durante le operazioni di carico/scarico materiale. La tenuta delle sponde è garantita da chiusure a blocco e da robusti perni di sicurezza.
- Tramoggia: L'allestimento tramoggia consente di trasportare e mettere in opera il ballast. Dotata di 4 bocche dosatrici, la tramoggia può scaricare il ballast sia all'interno che all'esterno della rotaia. Il sistema di scarico è totalmente automatizzato: comandi elettroidraulici azionano i cilindri di apertura e chiusura delle bocche di scarico.
- Betoniera: L'allestimento betoniera, inquadrato come "macchina" secondo la direttiva 2006_42_CE, è studiato e realizzato per effettuare il trasporto e la gettata di calcestruzzo in opera sull'infrastruttura ferroviaria.
- Ventola: L'allestimento ventola consente di migliorare la ventilazione all'interno delle gallerie. Questo allestimento fa parte della gamma degli allestimenti installabili sul carro polifunzionale Kgmns, e insieme a esso costituisce un mezzo d'opera per la costruzione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie secondo le norme EN 14033. L'interfaccia allestimento-carro Kgmns è analoga a quella del trasporto intermodale UIC 571-4.



Figura 6: KGMNS carro a 2 assi



Figura 7: nastro di carico



Figura 8: tramoggia

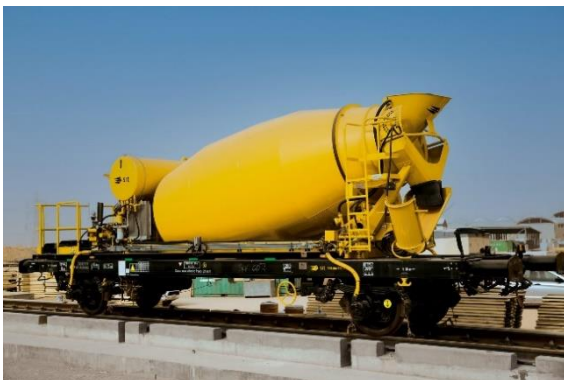


Figura 9: betoniera



Figura 10: ventola

- KGMNS_M CARRO A 2 ASSI

Il carro Kgmns_M è un veicolo ferroviario costruito e utilizzato per il trasporto di container e attrezzature necessarie per lavori di costruzione e manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria. Il carro è corredato da blocchi per aggancio container, utilizzati come interfacce di blocco tra il carro e le attrezzature (allestimenti) trasportate e utilizzate in fase di lavoro. Il Kgmns_M ha la possibilità, esclusivamente in fase di lavoro, di essere un mezzo auto-trazionato in quanto è dotato di motori idrostatici. Vediamo anche per questo mezzo i suoi allestimenti:

- Nastro di carico con escavatore: L'allestimento nastro di carico con escavatore consente di scavare, raccogliere e trasportare il materiale di risulta fino alla quota del primo carro atto al trasporto di materiale durante le operazioni di manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria. Il nastro di carico consente di elevare tale materiale dalla tramoggia fino alla quota del primo carro atto al trasporto di materiale di risulta. Il motore installato nella torretta gru consente l'autotrazione del mezzo in fase lavoro.
- Calamita: L'allestimento calamita consente di raccogliere, trasportare e gestire il materiale necessario per le operazioni di manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria e risulta particolarmente utile nella raccolta del materiale ferroso di scarto dalla manutenzione del binario e delle traverse.
- Saldatrice: L'allestimento saldatrice consente la saldatura delle rotaie durante le operazioni di manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria. L'energia necessaria viene fornita da un motore diesel che consente anche l'autotrazione del veicolo in fase lavoro. L'allestimento saldatrice fa parte della gamma degli allestimenti installabili sul Carro Kgmns_M e insieme ad esso costituisce, secondo le norme EN 14033, un mezzo d'opera per la costruzione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie. L'interfaccia allestimento-carro Kgmns_M è analoga a quella del trasporto intermodale UIC 571-4.



Figura 11: nastro di carico con escavatore



Figura 12: calamita



Figura13: saldatrice

- TRENII MOLATORI

Questo tipo di treno è un mezzo rotabile utilizzato nelle operazioni di manutenzione e costruzione delle linee ferroviarie, studiato e realizzato per il ripristino della sagoma delle rotaie di un binario o di uno scambio. L'azienda SRT produce due tipi di treni molatori che vediamo di seguito:

- Vulcano heavy 50-96: Vulcano Heavy è una soluzione modulare di nuova concezione, all'avanguardia e tecnologicamente avanzata. È disponibile in configurazioni scalabili da 52 a 96 mole per soddisfare qualunque necessità. Il treno è dotato di accurati sistemi di misura che forniscono una registrazione precisa e continua dello stato delle rotaie prima, durante e dopo l'operazione di molatura, con riferimento alle mazzature (ondulazioni corte, medie e lunghe), alla sezione delle rotaie e allo scartamento. L'adozione di sistemi Industria 4.0 consente il controllo da remoto per analizzare in tempo reale il rendimento della macchina e le scadenze manutentive. Il treno è dotato di motori ad alta prestazione e operano attraverso mole orientabili secondo diverse inclinazioni, caratterizzate da elevata capacità di abrasione. Il rotabile, oltre a circolare in "travelling mode" e "working mode", potrà circolare in "running mode" come mezzo automotore a una velocità massima di 100 km/h. Il treno molatore è inquadrato come OTM (On-Track-Machine) di categoria 1 in conformità con la norma EN14033-1:2017. Vulcano Heavy è composto dalla combinazione di 4 diverse tipologie di rotabili collegati tra loro in configurazione bloccata: Modulo P (modulo di molatura pilota), Modulo L (modulo di molatura intermedio), Modulo C (modulo cisterna) e Modulo S (modulo di servizio).
- Vulcano light: Il treno molatore Vulcano Light 10-24M è un rotabile automotore a carrelli ed è classificato, secondo le norme EN 14033, come mezzo d'opera per la costruzione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie. Vulcano Light è una soluzione flessibile di nuova concezione, all'avanguardia e tecnologicamente avanzata. È disponibile nella versione da 10 e 20 mole. Grazie ad una sagoma ridotta Vulcano Light può operare anche su linee metropolitane. Il treno è dotato di accurati sistemi di misura che forniscono una registrazione precisa e continua dello stato delle rotaie prima, durante e dopo l'operazione di molatura, con riferimento alle mazzature (ondulazioni corte, medie e lunghe), alla sezione delle rotaie e allo scartamento. L'adozione di sistemi Industria 4.0 consente il controllo da remoto per analizzare in tempo reale il rendimento della

macchina e le scadenze manutentive. Il rotabile è studiato e realizzato per la molatura e il ripristino della sagoma delle rotaie di un binario o di uno scambio in conformità alla norma UNI EN 13231-3. Il rotabile potrà circolare: in regime di circolazione ordinaria in composizione a treno come mezzo rimorchiato alla velocità massima di 100km/h o come mezzo automotore ad una velocità massima.



Figura 14: vulcano heavy 50-96



Figura 15: vulcano light

- SRT 407 MOTOCARRELLO

Questa serie di veicoli è composta da un motocarrello a doppia cabina e da una serie di allestimenti che permettono di adattare rapidamente il veicolo a diverse e specifiche esigenze operative. Gli allestimenti possibili per questo mezzo sono:

- Gru sottoponte: L'allestimento gru sottoponte consente di effettuare ispezioni e manutenzioni di ponti dell'infrastruttura ferroviaria. L'energia elettrica, idrostatica e pneumatica per la movimentazione sono fornite direttamente dal motocarrello SRT 407. L'allestimento può essere integrato a livello software con il motocarrello sul quale viene montato, in questo modo l'operatore a bordo cestello è in grado di controllare i movimenti di entrambi i macchinari contemporaneamente. A bordo del cestello sono presenti prese di energia elettrica, pneumatica e oleodinamica, che consentono all'operatore di utilizzare strumenti per il prelievo di campioni di materiali e per l'esecuzione di piccole riparazioni.
- Sponde con gru: L'allestimento sponde con gru permette di trasportare materiali, componenti o accessori di diverso tipo e di scaricarli con più facilità e meno fatica. È dotato di sponde alte 0,6 m, abbattibili durante le operazioni di carico/scarico del materiale. La tenuta delle sponde è garantita da chiusure a blocco e da robusti perni di sicurezza.



Figura 16: SRT 407 motocarrello



Figura 17: gru sottoponte

- **ATTREZZATURE LEGGERE**

Oltre ai mezzi di cui abbiamo parlato finora, l'azienda mette a disposizione anche attrezzature di dimensioni più contenute e che hanno maggiore versatilità. Questo tipo di mezzi sono:

- **Piattina motorizzata:** la piattina semovente motorizzata con trazione su entrambi gli assi e sistema frenante di tipo negativo. È dotata di una gru e di un cassone con sponde apribili per il carico, trasporto e scarico di materiale e attrezzature minute dal cantiere al punto di impiego.
- **Concrete dispenser:** il concrete dispenser è un carrello autotrazionato munito di tramoggia per il trasporto e lo scarico di calcestruzzo durante la realizzazione del piano di piattaforma in cemento per linee tranviarie e metropolitane.
- **Track position jig:** la maschera di posizionamento binario posiziona in modo rapido e preciso le rotaie su binari rettilinei e curvilinei ed è stata progettata e realizzata per consentire la regolazione dei livelli dei binari trasversali e longitudinali, l'allineamento e scartamento dei binari e l'angolo di installazione del binario. Inoltre, La maschera di posizionamento binario può essere abbinata al carrello motore dosatore calcestruzzo SRT : la maschera mantiene il binario in posizione, consentendo al veicolo di spostarsi lungo la rotaia e scaricare il calcestruzzo.

Tutti questi mezzi prodotti da SRT sono certificati e fanno riferimento alle normative UNI EN 14033-1, UNI EN 14033-2 e UNI EN 14033-3. Corrispettivamente, ci forniscono i requisiti tecnici per la circolazione, i Requisiti tecnici di viaggio e di lavoro e i requisiti generali di sicurezza nello specifico per mezzi di manutenzione e costruzione delle linee ferroviarie.



Figura 18: piattina motorizzata



Figura 19: concrete dispenser



Figura 20: track position jig

3. DIMENSIONAMENTO DI UN SERBATOIO DIESEL

3.1 Riferimenti normativi EU ed AAR

Per il dimensionamento di un serbatoio diesel si può fare riferimento principalmente a due serie di norme, quelle Europee (EU), che sono le normative UNI EN 12663-1 e UNI EN 12663-2 che ne redigono i requisiti strutturali minimi. E quelle Americane (AAR). Le norme Europee specificano i carichi che le casse dei rotabili dovrebbero essere in grado di sopportare, identificano come dovrebbero essere utilizzati i dati relativi ai materiali e presenta i principi da utilizzare per la validazione della progettazione mediante analisi e prove. Per quanto riguarda l'organismo normativo per le ferrovie nordamericane, la AAR stabilisce gli standard che forniscono procedure semplici e sicure sull'intera rete di trasporto ferroviario americano. Inoltre AAR ha il supporto di due sue controllate, che sono TTCI e Railinc, le quali contribuiscono a sostenere una continua ricerca e progetti di sviluppo per migliorare la sicurezza e l'efficienza del settore ferroviario americano e canadese. TTCI si occupa di ricerca, sviluppo e test a livello mondiale nel campo della sicurezza e dell'efficienza operativa. Railinc invece si preoccupa di raccogliere dati ferroviari dell'information technology e dei servizi di informazione utilizzando una delle più importanti banche dati per monitorare le spedizioni dei clienti.

Analizziamo ora, secondo le due normative, i requisiti strutturali di un serbatoio.

3.2 Requisiti strutturali secondo normative Europee (EU)

Per quanto riguarda i requisiti strutturali possiamo fare riferimento per le norme EU alle UNI EN 12663-1 capitolo 5 "Requisiti strutturali". L'introduzione di questo capitolo parla in generale di quei requisiti che le carrozzerie dei veicoli ferroviari devono avere per potersi considerare idonei alla messa in funzione. In particolare, si fa riferimento ai carichi massimi che devono sopportare per raggiungere la durata di servizio richiesta in condizioni operative normali con un'adeguata probabilità di sopravvivenza. Inoltre, la carrozzeria del veicolo ferroviario deve essere in grado di sostenere i carichi richiesti senza deformazioni e fratture

permanenti e questa capacità deve essere dimostrata mediante calcoli e/o prove eseguite sulla struttura. La valutazione della capacità si baserà sui seguenti criteri:

- carico eccezionale che definisce il carico massimo che deve essere sostenuto e che deve mantenere una condizione operativa completa;
- margine di sicurezza come definito ai punti 5.4.3 e 5.4.4, tale che il carico eccezionale possa essere considerevolmente superato prima che si verifichi una frattura o un collasso catastrofico;
- servizio oppure carichi ciclici sostenuti per la durata specificata senza pregiudicare la sicurezza strutturale;
- carichi dovuti a ringhiera e recupero operazioni senza guasti catastrofici.

Questi requisiti si basano sull'uso di materiali metallici e i requisiti di cui si parla nei paragrafi e nei capitoli successivi sono specificatamente applicabili solo a tali materiali. Se, invece, vengono utilizzati materiali diversi (non metallici), devono comunque essere applicati i principi di base della presente norma e dovranno essere utilizzati dati idonei a rappresentare le prestazioni di questi materiali.

I vari casi di carico che si utilizzano come base per la progettazione della carrozzeria devono rientrare nei casi pertinenti elencati nel capitolo 6. I parametri formali sono espressi in unità SI e l'accelerazione causata dalla gravità g è $-9,8 \text{ m/s}^2$.

Per l'applicazione della presente norma europea, tutti i veicoli ferroviari sono classificati in categorie. La classificazione delle diverse categorie di veicoli ferroviari si basa esclusivamente sui requisiti strutturali delle carrozzerie dei veicoli. A causa della natura specifica della loro costruzione e dei diversi obiettivi di progettazione si distinguono tre gruppi principali, vale a dire locomotive (L), veicoli passeggeri (P) e carri merci (F). I tre gruppi possono essere suddivisi ulteriormente in categorie in base ai loro requisiti strutturali. Questi tre gruppi sono descritti nei sottoparagrafi 5.2.2, 5.5.3 e 5.5.4.

- **LOCOMOTIVE**

A questo gruppo appartengono tutti i tipi di locomotive e di propulsori il cui unico scopo è fornire movimento di trazione e non sono destinati al trasporto di passeggeri.

- Categoria L → locomotive e unità di potenza.

- VEICOLI PASSEGGERI

A questo gruppo appartengono tutti i tipi di veicoli ferroviari destinati al trasporto di passeggeri, che vanno dai principali veicoli di linea, stock di transito suburbano e urbano fino alle tramvie. I veicoli passeggeri sono divisi in cinque categorie di progettazione strutturale in cui possono essere assegnati tutti i veicoli. Di seguito vengono elencate le cinque categorie, con l'indicazione delle tipologie di veicolo generalmente associate a ciascuna:

- Categoria P-I → vagoni
- Categoria P-II → carri e vagoni
- Categoria P-III → linea sotterranea, veicoli per l'alta velocità e automotrici leggere
- Categoria P-IV → veicoli metropolitani leggeri e tramviari pesanti
- Categoria P-V → tram

- CARRI MERCI

Tutti i vagoni merci di questo gruppo vengono utilizzati per il trasporto di merci. Sono state definite due categorie:

- Categoria F-I
- Categoria F-II

Le strutture devono anche fare riferimento ai valori minimi delle proprietà del materiale, come già sopraccitato. Nel paragrafo 5.3.3 si specifica quali sono le cause che possono influenzare le proprietà del materiale:

- Velocità di caricamento
- Tempo (cioè, invecchiamento del materiale)
- Ambiente
- Saldature o altri processi di fabbricazione

Nel caso in cui questi parametri diventino rilevanti si dovrà procedere a determinare nuovi valori minimi.

Normalmente è accettabile basare i calcoli sulle dimensioni nominali dei componenti. È necessario considerare le dimensioni minime solo in caso di significative riduzioni di spessore (dovute a usura, ecc.). Un'adeguata protezione contro la corrosione è parte integrante delle

specifiche del veicolo. La perdita di materiale dovuta a questa causa normalmente può essere trascurata.

Le caratteristiche prestazionali esibite dal materiale nei componenti reali possono differire da quelli derivati dai campioni di prova. Tali differenze sono dovute a variazioni nei processi di produzione e lavorazione, che non possono essere rilevati in nessuna procedura praticabile di controllo della qualità. Durante il processo di fabbricazione le caratteristiche prestazionali esibite dal materiale nei componenti reali possono differire da quelli derivati dai campioni di prova. Tali differenze sono dovute a variazioni nei processi di produzione e lavorazione, che non possono essere rilevati in nessuna procedura praticabile di controllo della qualità.

Dopo aver distinto le varie categorie dei veicoli rotabili a cui fare riferimento per le verifiche e aver accennato al comportamento del materiale di cui sono costituiti, nel capitolo 5.4 e nei suoi sotto capitoli, in particolare 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 e 5.4.4, si analizzano i requisiti che devono soddisfare le strutture per il superamento delle prove. Infatti, deve essere dimostrato, mediante calcoli e/o prove, che non si verificheranno deformazioni o fratture permanenti e significative della struttura nel suo complesso, di ogni singolo elemento o di ogni accessorio dell'attrezzatura, in base ai casi di carico di progetto prescritti. Il requisito deve essere raggiunto soddisfacendo lo snervamento o la resistenza alla prova. Se il progetto è limitato dalla resistenza ultima e/o dalle condizioni di stabilità anche questi dovranno essere soddisfatti.

Nel paragrafo 5.4.1 della norma 12663-1 si compara lo sforzo calcolato o misurato allo sforzo permissibile, il valore di utilizzo del componente deve essere meno di o uguale a 1 secondo la seguente equazione generale:

$$U = \frac{R_d S}{R_L} \leq 1$$

U = valore di utilizzo del componente

R_d = risultato determinato dal calcolo o dal test

S = fattore di sicurezza del progetto, R_L = valore consentito o limite

Nel paragrafo 5.4.2. si definisce il rendimento o forza di prova. Quando il progetto è verificato solo mediante calcolo, S dovrà essere 1,15 per ogni singolo caso di carico. Può essere preso

come 1,0 laddove i casi di carico di progetto devono essere verificati mediante prova e/o la correlazione tra prova e calcolo è stata stabilita con successo:

$$U = \frac{\sigma_C S_1}{R} \leq 1$$

U = utilizzo

σ_C = stress calcolato

S_1 = fattore di sicurezza

R = resa del materiale

Nel paragrafo 5.4.3. si parla di fallimento definitivo. È necessario fornire un margine di sicurezza tra il carico eccezionale di progetto e il carico al quale la struttura cederà. Ciò si ottiene introducendo un fattore di sicurezza S_1 tale che l'utilizzo sia inferiore a o uguale a 1 come dato dalla seguente equazione:

$$U = \frac{\sigma_C S_2}{R_m} \leq 1$$

U = utilizzo

S_2 = fattore di sicurezza per il fallimento finale

σ_C = sollecitazione calcolata

R_m = tensione ultima del materiale

Di solito $S = 1.5$ ma può essere di 1.3 laddove i casi di carico di progetto devono essere verificati mediante prove e/o la correlazione tra prova e calcolo è stata stabilita con successo. Il criterio di rottura ultima non si applica alle parti della struttura che sono specificamente progettate per collassare in modo controllato.

All'interno del paragrafo 5.4.4 si introduce l'instabilità. L'instabilità locale, sotto forma di instabilità elastica, è ammissibile purché esistano percorsi di carico alternativi e siano soddisfatti i criteri di snervamento o di prova. La struttura del veicolo deve avere un margine di sicurezza contro un'instabilità che porta a un cedimento strutturale generale sotto carichi eccezionali. L'utilizzo deve essere inferiore o uguale a 1 quando la sollecitazione o il carico calcolato viene confrontato con la sollecitazione di punta critica o il carico di punta:

$$U = \frac{\sigma_C S_3}{\sigma_{cb}} \leq 1 \quad \text{oppure} \quad U = \frac{L_C S_3}{L_{cb}} \leq 1$$

U = utilizzo

S₃ = sicurezza per l'instabilità

σ_C = stress calcolato

σ_{cb} = stress critico di instabilità

L_C = carico calcolato

L_{cb} = carico di punta critico

Il fattore S₃ sarà pari a 1.5. Il criterio di instabilità non si applica a quelle parti della struttura che sono specificatamente progettate per collassare in modo controllato.

3.3 Requisiti strutturali secondo normative Americane (AAR)

Ora si andranno ad analizzare, in maniera più generale e schematica, i requisiti strutturali che ci forniscono le normative Americane (AAR).

Prima di tutto possiamo parlare dei materiali da costruzione, che dovranno essere materiali robusti, e il serbatoio dovrà essere costruito in modo tale che abbia una ottima resistenza strutturale e sia conforme agli standard di sicurezza. Ad esempio, acciaio di alta qualità o leghe speciali. Questi materiali devono avere sicuramente una buona tenuta e resistenza che renda il serbatoio ermeticamente sigillato per evitare perdite di carburante, e la struttura deve essere resistente per sopportare carichi e pressioni durante l'uso. Devono essere inoltre sicuri in caso di incendi ed esplosioni con l'aggiunta di sistemi di sicurezza che ne riducano il rischio, come dispositivi di ventilazione adeguati o sistemi di rilevamento delle fiamme. Sono installate anche valvole di sicurezza che aiutano a prevenire sovrapressioni o situazioni pericolose.

Anche se non specificatamente dettagliati, i serbatoi dovrebbero aderire agli standard di sicurezza generale e alle normative relative alla tenuta dei contenitori per il trasporto di carburante. Una volta aver completato la struttura dei serbatoi, questi dovranno essere sottoposti a test e certificazioni che ne attestino la sicurezza ai vari requisiti che abbiamo citato fin ora. Ovviamente i test sono superati se sono conformi agli standard imposti dalle normative AAR.

Altri requisiti possono essere aggiunti in base ad altre esigenze eccezionali di costruzioni o richieste dell'utente che richiede il serbatoio. Anche in questi casi si dovrà rispettare la resistenza strutturale e di sicurezza.

3.4 Requisiti funzionali

I requisiti funzionali sono quei requisiti che un serbatoio deve possedere essenzialmente per garantire il corretto funzionamento, l'affidabilità e la sicurezza del sistema. Se ne possono individuare alcuni dei principali che un serbatoio diesel dovrebbe soddisfare:

- Capacità di stoccaggio: il serbatoio deve essere in grado di contenere una quantità sufficiente di carburante per supportare l'autonomia prevista del treno senza dover effettuare frequenti rifornimenti.
- Sicurezza e durata: Deve essere costruito con materiali robusti e resistenti che possano sopportare le sollecitazioni meccaniche e termiche durante il funzionamento del treno, deve essere completamente ermetico per prevenire perdite carburante e deve resistere a sollecitazioni meccaniche e termiche durante il funzionamento del treno.
- Compatibilità ed efficienza operativa: Deve fornire un flusso costante di carburante alla locomotiva, compatibile con il tipo di motore diesel utilizzato nel treno e deve essere progettato per garantire un flusso efficiente e privo di impurità o contaminazioni che potrebbero danneggiare il motore.
- Sistemi di Controllo e Sicurezza: deve essere dotato di valvole di sicurezza e dispositivi anti-sovra-pressione per prevenire situazioni pericolose dovute a eccessi di pressione nel serbatoio. Può includere sensori di livello del carburante, indicatori di pressione e sistemi di allarme per rilevare eventuali anomalie o perdite.
- Manutenzione e Accessibilità: deve essere progettato in modo che l'accesso per l'ispezione e la manutenzione periodica sia agevole. Deve essere possibile rifornire il serbatoio in modo agevole e sicuro, sia in stazione che durante il servizio.
- Conformità Normativa: Deve essere progettato e costruito in conformità con le normative e gli standard di sicurezza specifici per il trasporto ferroviario e il contenimento dei carburanti.
- Integrazione nel Sistema del Treno: Deve essere posizionato in modo strategico per garantire un equilibrio e una distribuzione del peso ottimali all'interno del treno. Questi

requisiti funzionali sono fondamentali per garantire che il serbatoio diesel funzioni in modo affidabile, sicuro ed efficiente all'interno del sistema ferroviario, contribuendo così al corretto funzionamento del treno nel suo complesso.

4. PROGETTAZIONE DI UN SERBATOIO

Progettare un serbatoio diesel per un treno richiede un'attenta pianificazione e diverse considerazioni tecniche. Ecco alcuni passaggi generali che si potrebbero considerare:

- **Requisiti e specifiche:** si determina la capacità del serbatoio richiesta per il treno in base all'autonomia necessaria. In questa fase si considera il tipo di diesel da utilizzare, il consumo energetico del motore e la distanza massima che il treno dovrà percorrere senza rifornimenti.
- **Materiali e costruzione:** la scelta dei materiali da costruzione ricadrà su materiali resistenti e sicuri per il serbatoio, come acciaio inossidabile o leghe speciali. Ci si assicura che il serbatoio sia costruito per resistere alle sollecitazioni meccaniche e alle variazioni di temperatura.
- **Sicurezza e normative:** rispetto delle normative di sicurezza riguardanti il trasporto di carburante, come le leggi sul contenimento delle perdite e la resistenza strutturale. Inserimento di sistemi di sicurezza come valvole di sicurezza, sensori di pressione e dispositivi anti-sovra-pressione.
- **Posizionamento e installazione:** posizionamento del serbatoio in modo sicuro e bilanciato all'interno del treno, considerando il centro di gravità per evitare sbilanciamenti. L'accesso al serbatoio per la manutenzione e l'ispezione sarà posizionato in un posto agevolmente raggiungibile.
- **Sistema di rifornimento e gestione del carburante:** andrà progettato un sistema di rifornimento efficiente e sicuro per il carburante. Aggiunta di filtri e separatori per mantenere il carburante pulito e ridurre l'usura del motore.
- **Test e manutenzione:** infine, si sottoporrà il serbatoio a test approfonditi per verificare la sua resistenza e la tenuta. Si stabilisce un programma di manutenzione preventiva per garantire il corretto funzionamento nel tempo.

Inoltre, è da specificare, che tutti questi passaggi devono essere concordati con chi eventualmente commissiona il serbatoio per definire i requisiti di progettazione in base alle esigenze.

5. VERIFICA STRUTTURALE

Una volta completate le operazioni di dimensionamento e progettazione, si passa alla fase di verifica strutturale mediante un programma di calcolo 3D. Il programma che viene utilizzato per questo scopo dall'azienda SRT è SolidWorks mediante analisi FEM.

5.1 Analisi FEM

L'analisi FEM è un approccio numerico-ingegneristico utilizzato per la risoluzione di problemi fisici. Essa permette di calcolare il comportamento strutturale di un sistema scomponendo un oggetto complesso in un numero elevato di elementi che possono essere risolti in maniera molto più semplice. Eseguire un'analisi strutturale FEM significa ottenere grandi vantaggi in quanto è un'operazione che viene effettuata prima della produzione di un determinato oggetto. Alcuni dei vantaggi derivati dall'utilizzo dell'analisi FEM sono la precisione nella realizzazione, la progettazione di prototipi virtuali e la riduzione dei tempi tecnici.

Il metodo degli elementi finiti è una tecnica di simulazione virtuale che ha come obiettivo la risoluzione in forma approssimata di un sistema complesso. Si applica a corpi fisici che devono essere scomposti in numeri molto elevati di elementi di forma definita e di dimensioni contenute.

Ogni singolo elemento finito è considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee. L'analisi FEM serve per calcolare il comportamento strutturale di un sistema. Particolarmente indicata quando si ha a che fare con strutture molto complesse o quando devono essere trattate macchine e sistemi meccanici dal punto di vista ingegneristico.

I dati di *input* che vengono inseriti all'inizio dell'analisi FEM devono essere molto accurati: solo in questo modo si possono ottenere risultati altrettanto accurati. Si rischia, altrimenti, di ottenere risultati poco corrispondenti alla realtà e quindi non utilizzabili.

Il metodo FEM suddivide il modello geometrico in tanti piccoli elementi che possono essere calcolati facilmente, utilizzando una griglia geometrica, *mesh*. La soluzione finale corrisponde alla somma di tutte le soluzioni parziali calcolate per ogni elemento. Grazie ad un'analisi FEM si possono evidenziare spostamenti, eventuali deformazioni e/o tensioni presenti in un sistema strutturale. Analizziamo nel dettaglio le fasi del processo di analisi.

5.2 Preparazione del modello

Per l'analisi statica del serbatoio si è iniziato dall'assieme di quest'ultimo montato sul vagone. Una volta individuato ed isolato, il serbatoio viene privato di tutte quelle parti che non sono rilevanti per la verifica strutturale. Queste parti sono nello specifico tubazioni esterne, carene o rivestimenti, quelle parti che hanno uno spessore elevato e i portelloni superiori.

Una volta aver eliminate questi componenti si passa alla semplificazione del modello. Le semplificazioni vengono effettuate nell'ambiente di SolidWorks che permette di ridisegnare e modificare le parti; infatti, si passerà a cambiare tutti i raggi di raccordo con spigoli vivi, eliminare tutte le parti che compenetrano che durante l'importazione del modello possono essersi create e tutte le distanze che tra i componenti che possono dare un risultato falsato dell'analisi. Queste distanze però devono essere lasciate o riempite in quei casi in cui da progetto verranno riempite con saldature.

Le semplificazioni devono essere effettuate per permettere la creazione di una mesh deformata il meno possibile perché, essendo formata da elementi tetraedrici, nei raggi di raccordo formati da piegature potrebbe deformarsi eccessivamente per adattarsi al modello. In generale più tempo si spende per semplificare e adattare il modello e più tempo si guadagnerà nell'acquisizione dei risultati FEM. Di seguito alcune immagini dei primi passaggi di cui si è parlato.

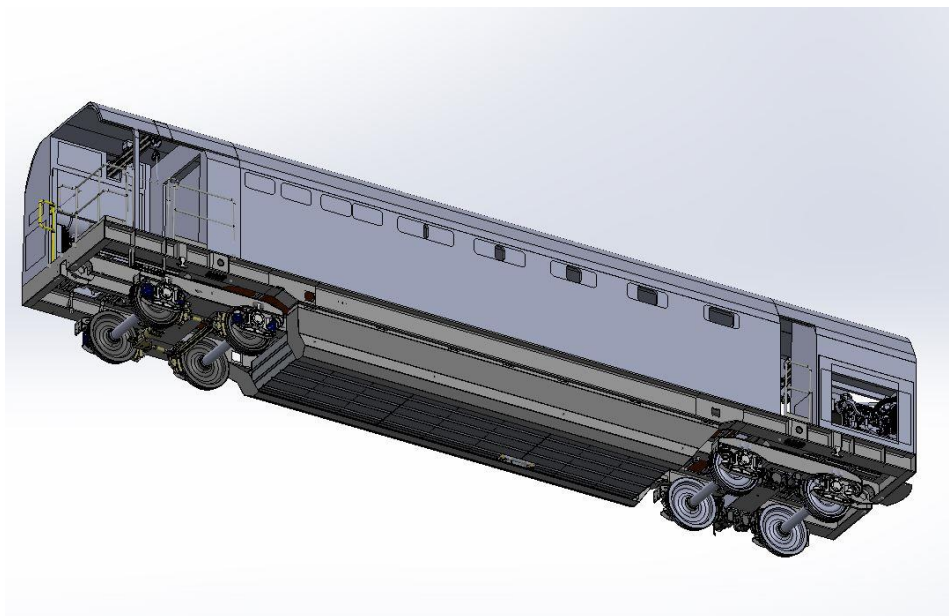


Figura 21: assieme serbatoio vagone

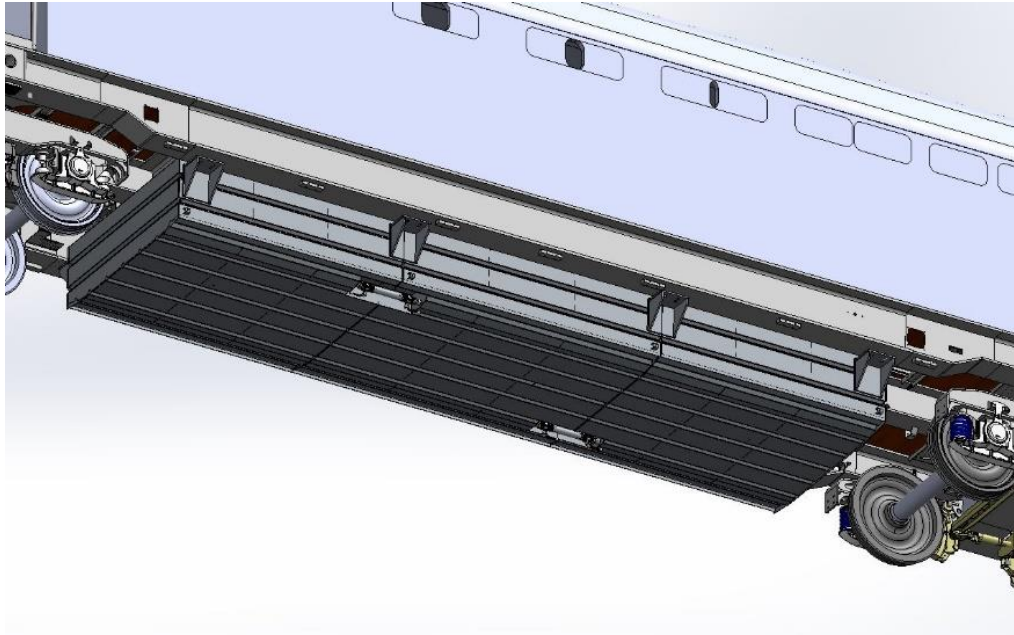


Figura 22: dettaglio serbatoio

Da questo assieme del serbatoio installato sul vagone si è poi passato a isolare il componente di interesse.

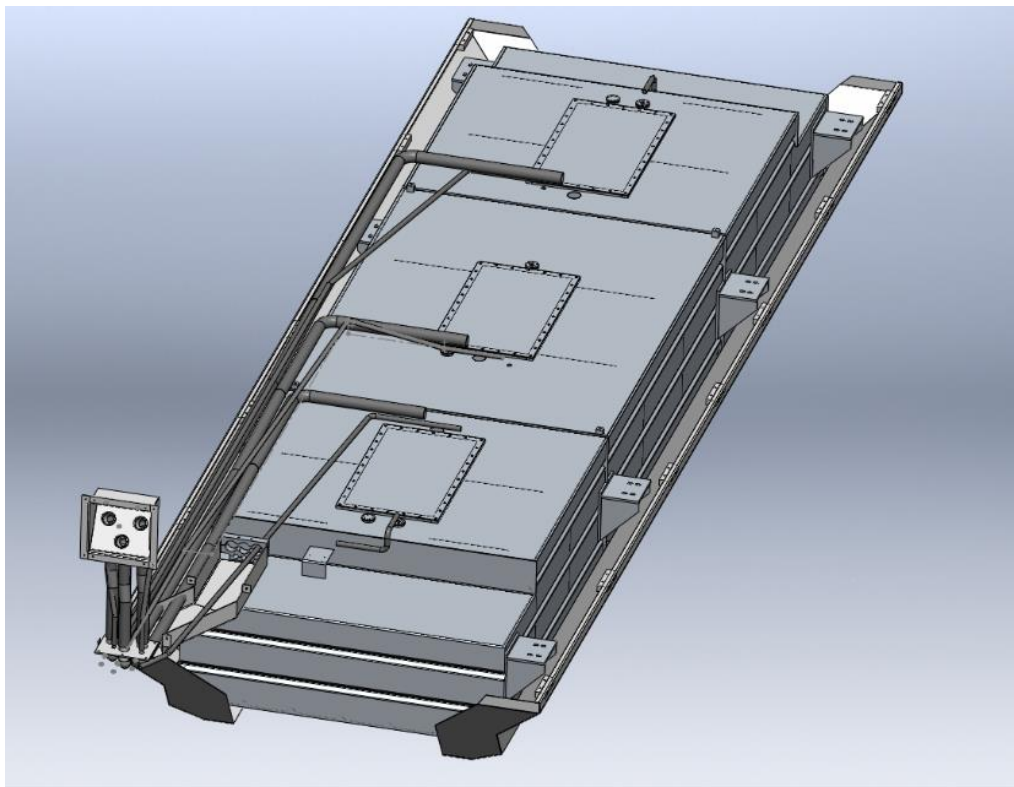


Figura 23: assieme serbatoio isolato visa frontale

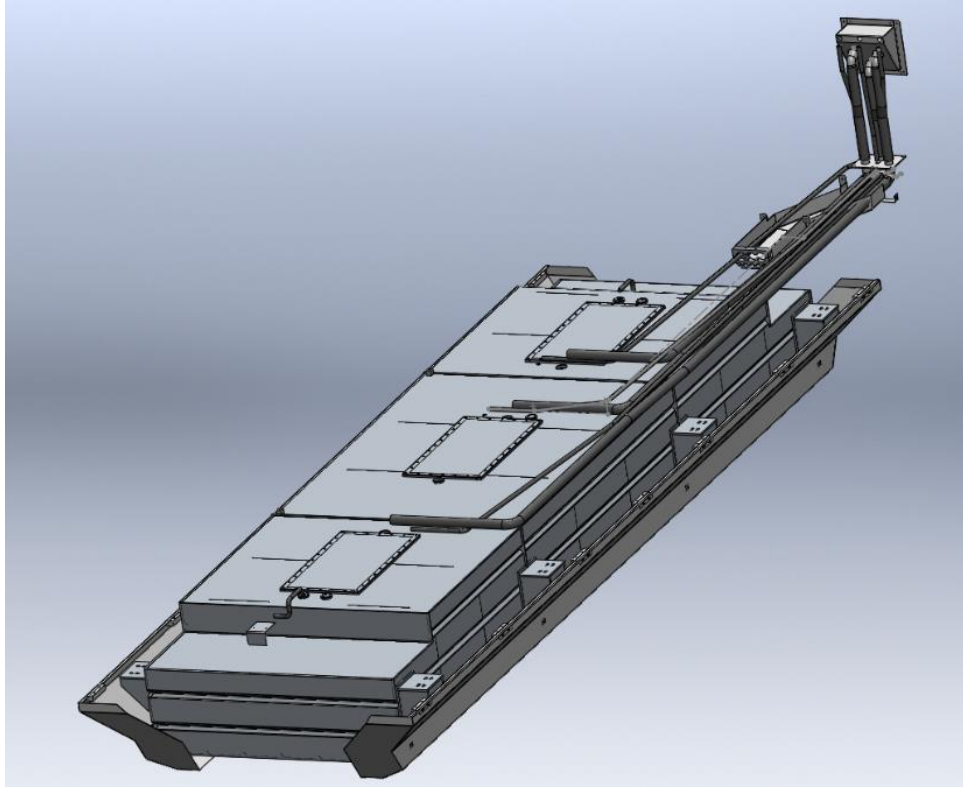


Figura 24: assieme serbatoio isolato vista posteriore

In seguito, nell'ambiente di lavoro di SolidWorks, si semplificherà le geometrie del serbatoio. Verranno eliminate le tubazioni, le carene di copertura inferiori e i portelloni superiori. Tutti questi elementi non saranno necessari alla verifica strutturale.

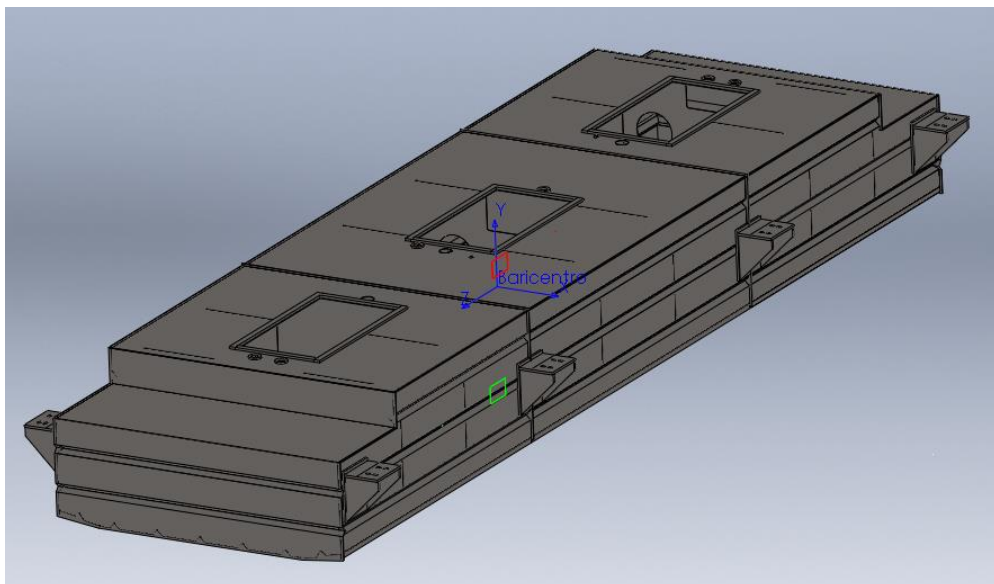


Figura 25: serbatoio dopo la semplifica

Con il modello pronto e semplificato nella sezione di Solidworks Simulation si andranno ad introdurre i vincoli. Questi saranno necessari per far sì che il serbatoio sia vincolato nelle parti di ancoraggio e che rispecchi le reali prestazioni.

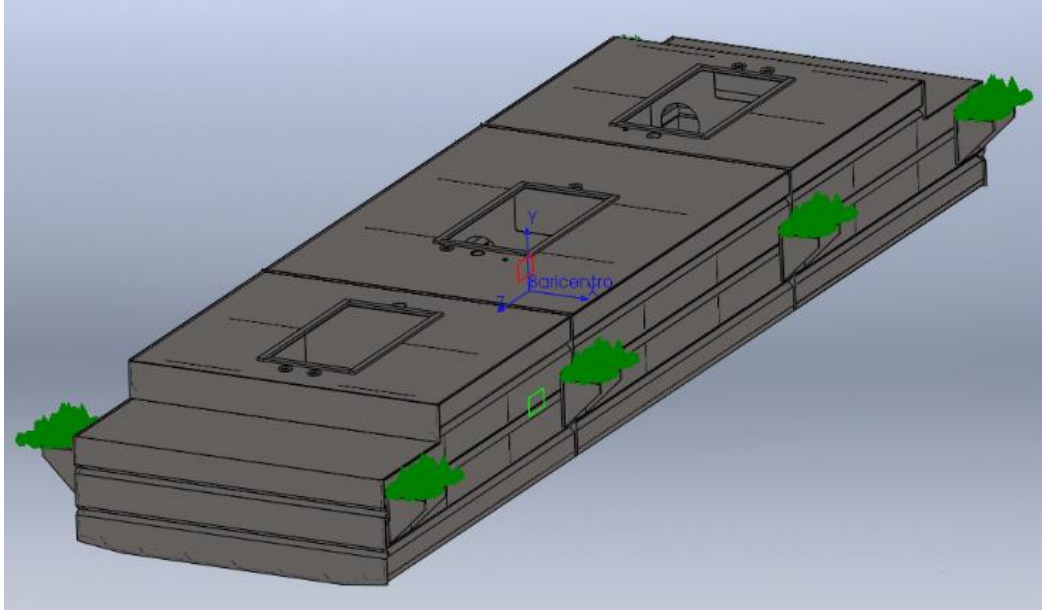


Figura 26: applicazione dei vincoli

In particolare si introdurranno dei vincoli fissi negli otto ancoraggi superiori del serbatoio.

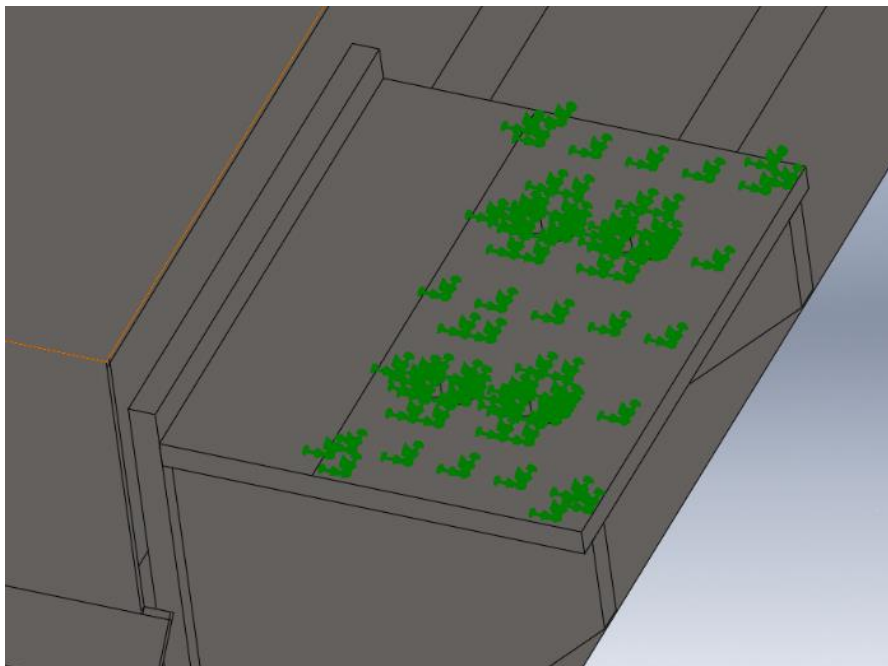


Figura 27: dettaglio vincoli

A questo punto si proseguirà ad introdurre la Mesh al modello. Questo permetterà di avere i risultati delle prove grazie alla creazione di un reticolo formato da elementi tetraedrici che coprirà tutto il serbatoio. Per questo modello si utilizzerà una Mesh di grandezza 30 mm con rapporto 1,5.

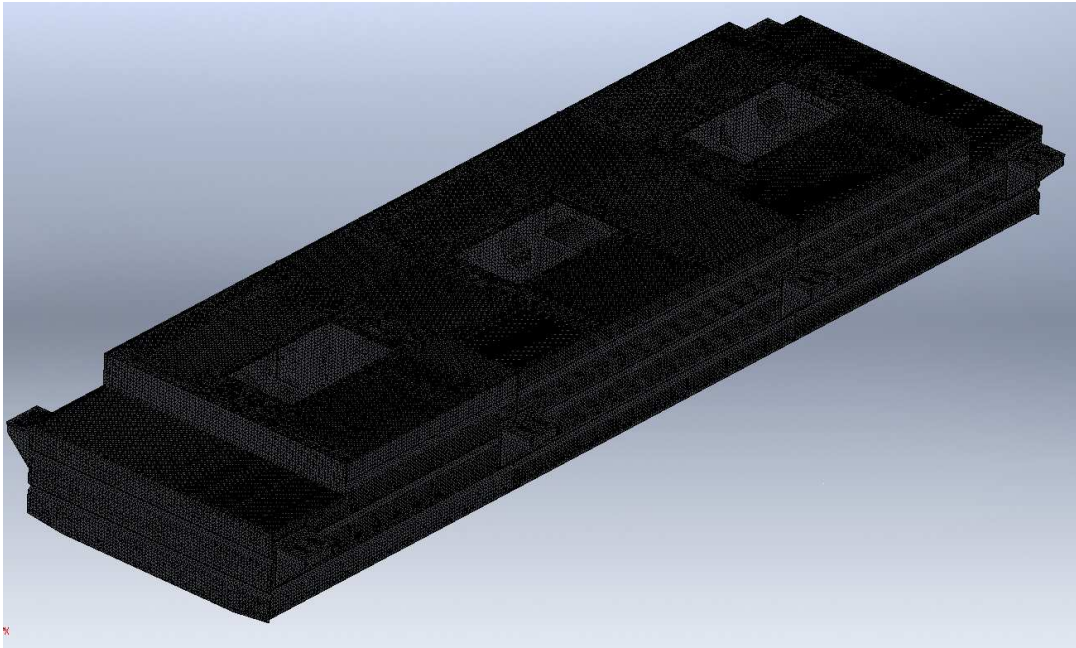


Figura 28: mesh

5.3 Casi di carico

Ora è tutto pronto per iniziare le varie prove. Per farlo si dovrà far riferimento alla normativa 12663-1 la quale specifica come dovranno essere effettuate. Per prima cosa si andranno a determinare le dimensioni del serbatoio, il volume del diesel che verrà immesso e verrà considerata l'accelerazione di gravità pari a 10m/s.

Volume Diesel	V	12,5	m ³
Densità Diesel EN15663	ρ	840	kg/m ³
Altezza Serbatoio	h	0,896	m
Larghezza Serbatoio	b ₁	2	m
Lunghezza Serbatoio	b ₂	7,4	m
Gravità	g	10	m/s ²

Grazie a questi dati si possono ricavare il peso del fluido che premerà sul fondo e la pressione idrostatica che viene esercitata sulle pareti del serbatoio.

1 - Peso fluido	10500	kg
2 - Pressione idrostatica parete 1	6744	N
3 - Pressione idrostatica parete 2	6744	N
4 - Pressione idrostatica parete 3	24952	N
5 - Pressione idrostatica parete 4	24952	N

Ora si divideranno i vari casi di carico. In questo caso, secondo le normative, avremmo un caso stazionario, cioè senza sollecitazioni, che chiameremo caso 0. Poi ci saranno due casi con sollecitazione longitudinale, sia in verso positivo che in verso negativo rispetto al sistema di riferimento, che simuleranno il caso di un piccolo urto che andrà ad accelerare il fluido all'interno del serbatoio di 5g ma che potrà essere ridotto a 3g secondo il capitolo 6.1 della normativa EN14033-1. Questi casi verranno chiamati 1+ e 1-. I due casi trasversali, positivo e negativo, che verranno accelerati di 1g, sono chiamati 2+ e 2-. Poi un caso di accelerazione verticale dove la componente che andrà a moltiplicare la condizione stazionaria verrà ricavata dalla formula $1 \pm c \times g$, dove il valore dipenderà dal baricentro del veicolo e che potrà avere valore da 2, all'inizio e alla fine del veicolo, scendendo linearmente fino a 0,5 al centro del veicolo. Nel nostro caso essendo il veicolo simmetrico si avrà il valore di $c = 0,5$ avendo un'accelerazione di 1,5g al centro in direzione verticale. Questa sarà la prova 3. Come ultima verifica si farà riferimento alla normativa 14033-3 che chiede una pressione interna di 30kPa. Chiamiamo questa prova caso 4. In tutte le prove, ad eccezione del caso 4, si terrà in considerazione la pressione idrostatica che influisce sulle pareti.¹ Si applicherà al serbatoio un materiale, acciaio AISI 304. Questo tipo di acciaio ha una tensione di snervamento pari a 206,8 MPa che con un coefficiente di sicurezza di 1,15 verrà ridotto a 179 con il seguente calcolo $206,8/1,15 = 179$ MPa. Le prove verranno ritenute superate se questo valore non verrà superato. Di seguito inserirò i risultati delle prove.

¹ Riferimento tabelle casi di carico in Appendice.

Caso stazionario 0

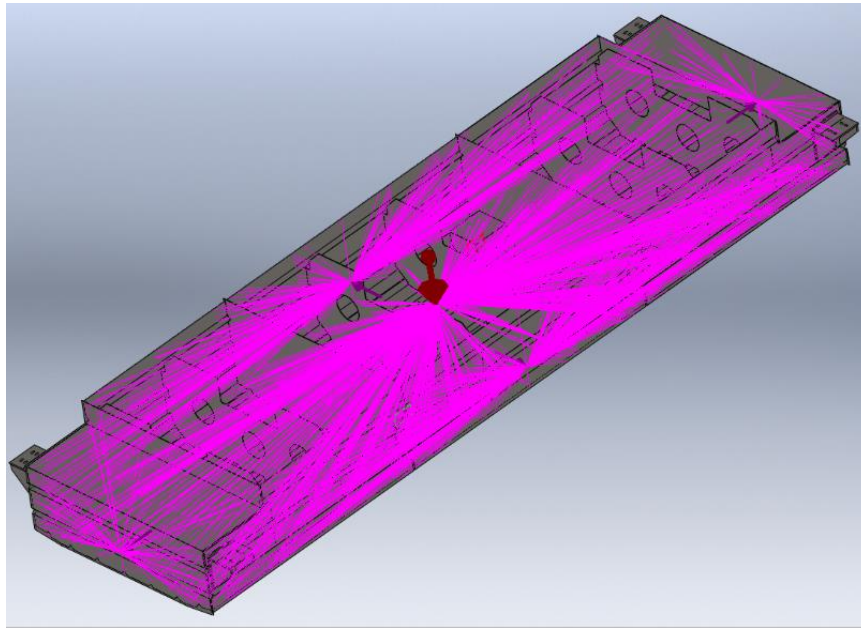


Figura 29: Applicazione della pressione idrostatica e peso del fluido.

:Analisi statica Q-Default-]
to: Analisi statica sollecitazione elemento Sollecitazione1

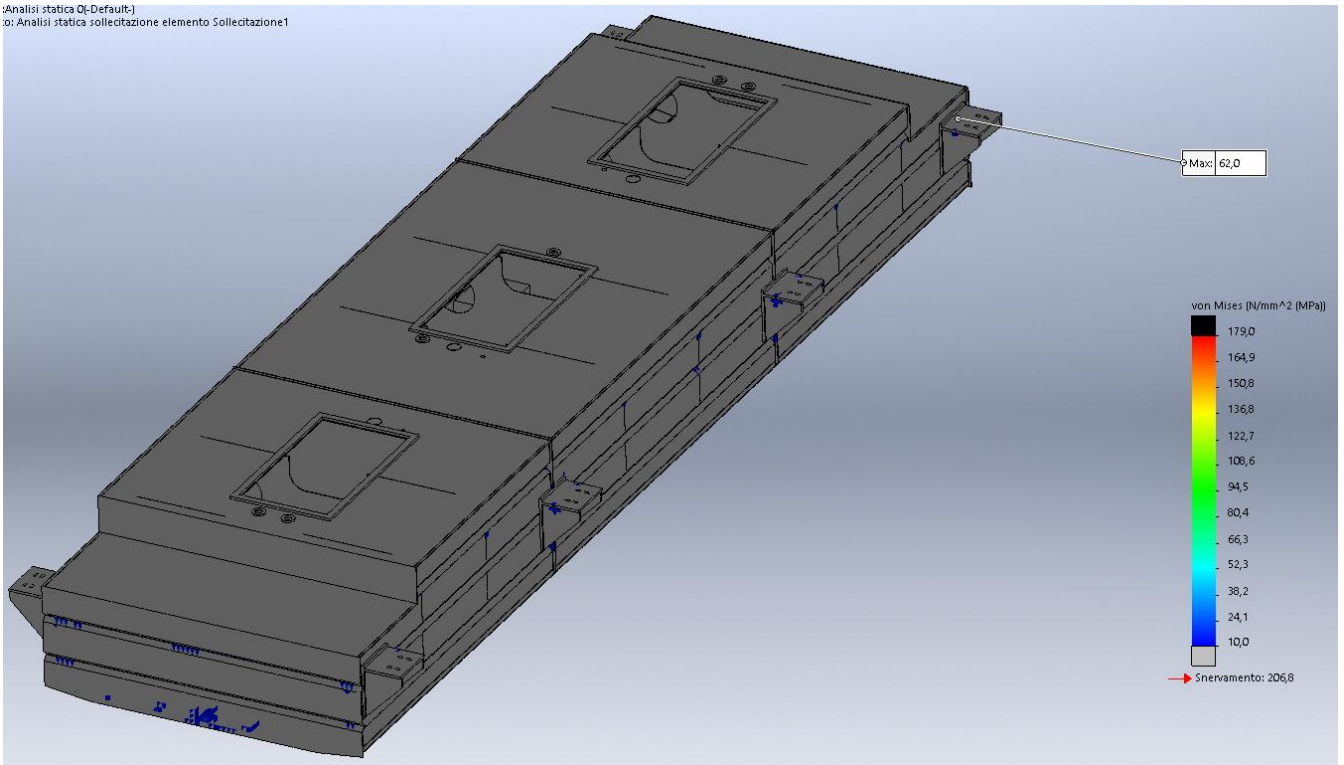


Figura 30: Snervamento 0

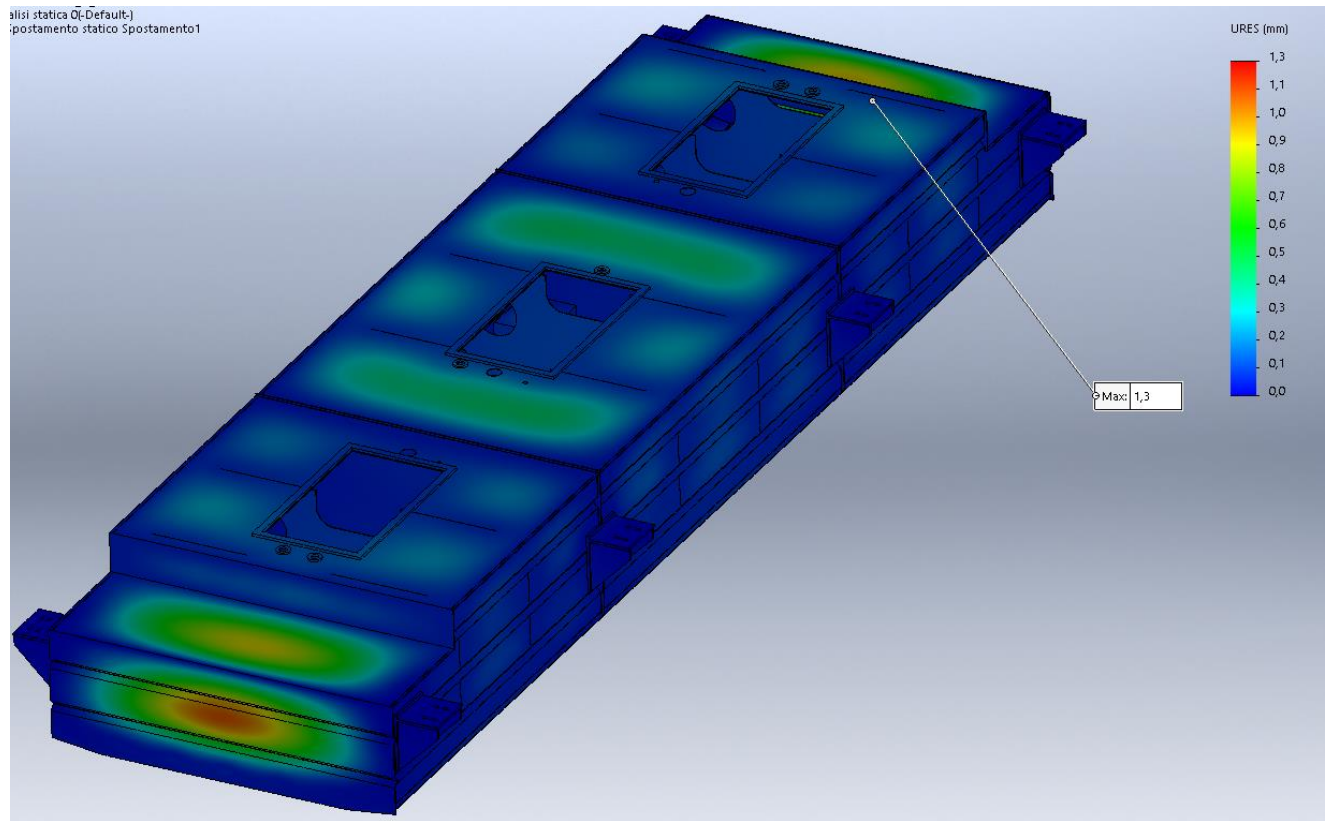


Figura 31: Spostamento 0

Caso Longitudinale 1+

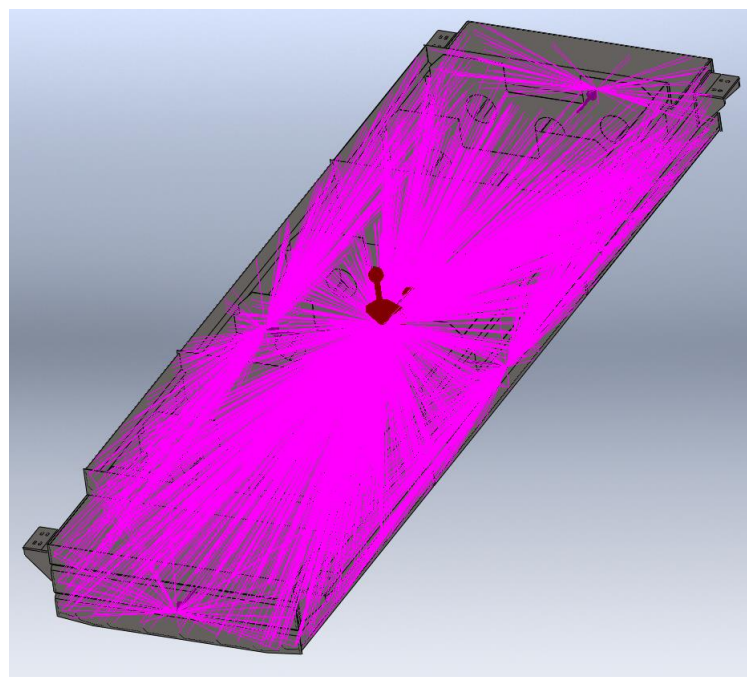


Figura 32: Applicazione della pressione idrostatica e dell'accelerazione Longitudinale in senso positivo

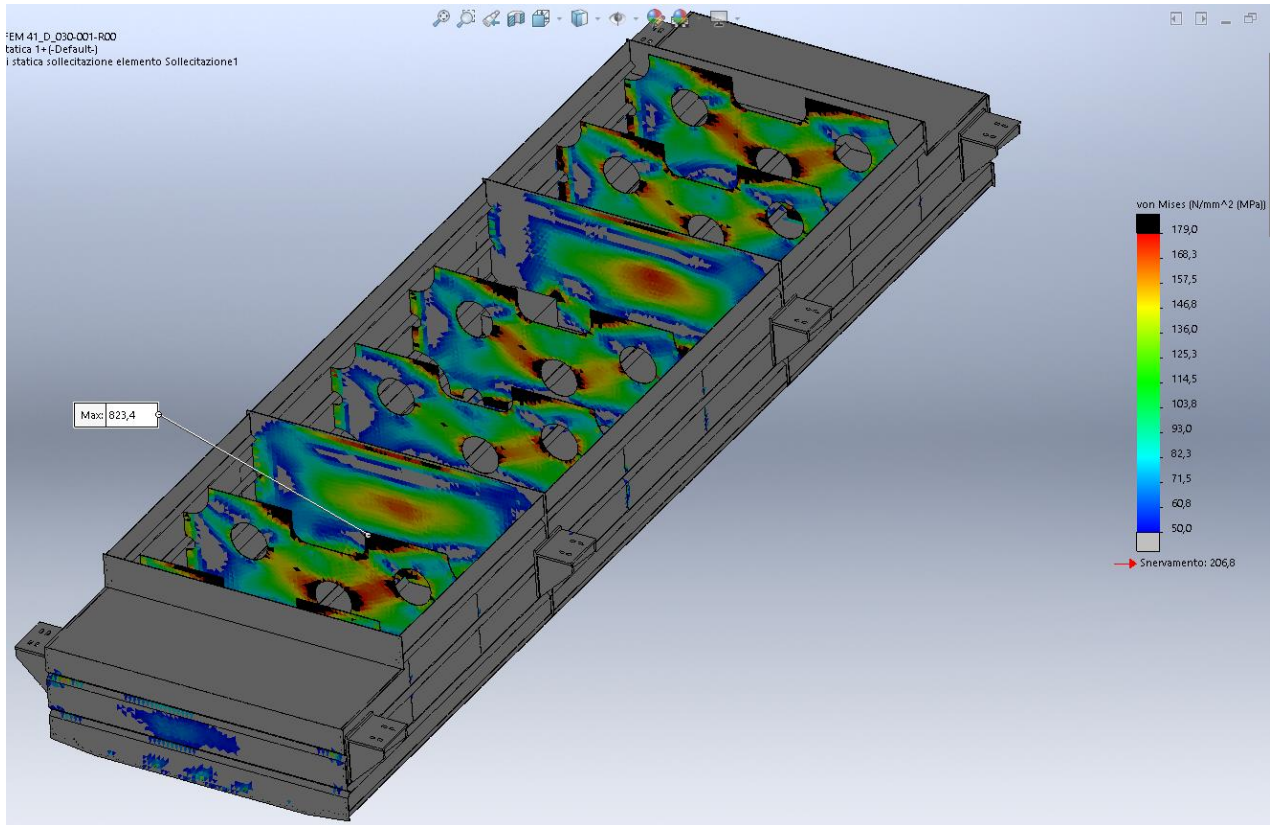


Figura 33: Snervamento 1+

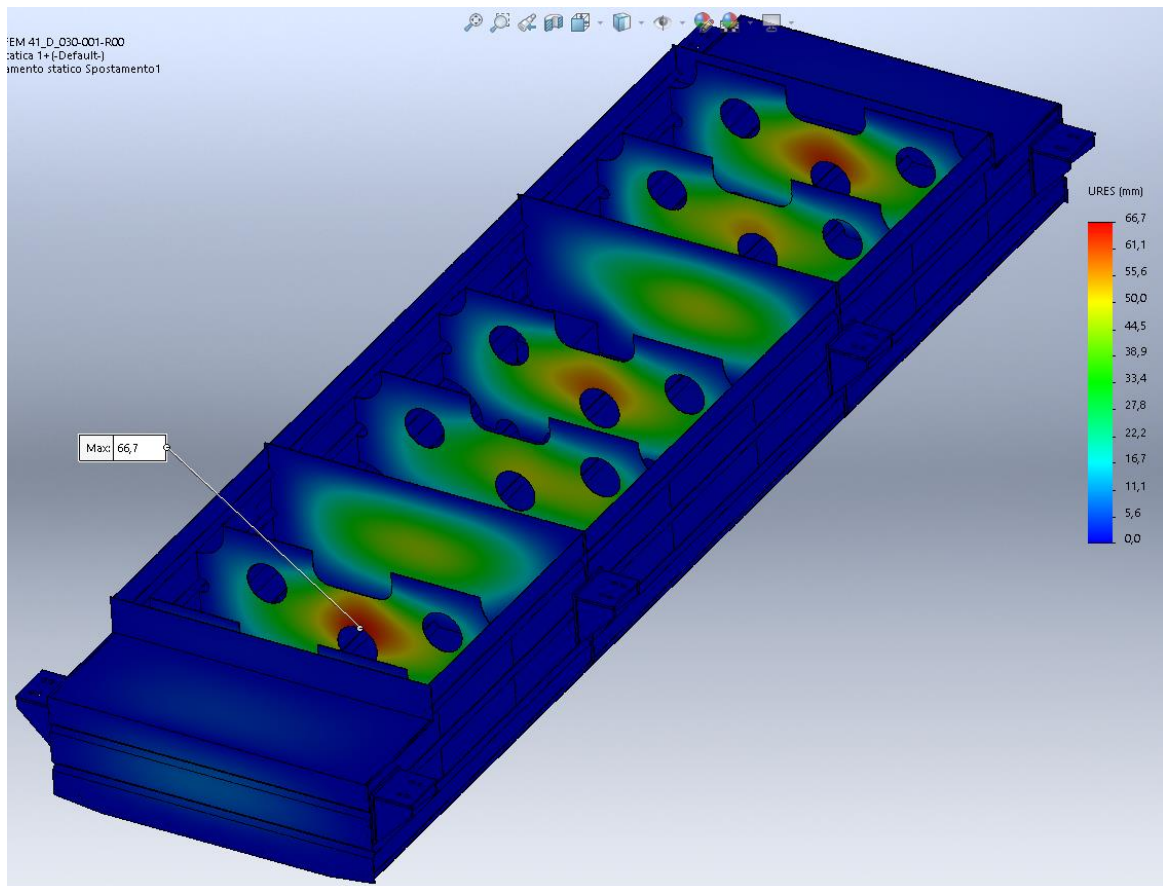


Figura 34: Postazione 1+

Possiamo osservare che nel caso Longitudinale 1+ ci sono delle zone con tensione di snervamento molto superiore al valore ammissibile. Verranno perciò apportate delle modifiche al pezzo con l'introduzione di travi a forma di C. Ne verranno messe due per ogni frangiflutti e due per ogni paratie di separazione. Poi si eseguiranno di nuovo le prove.

Caso Stazionario 0

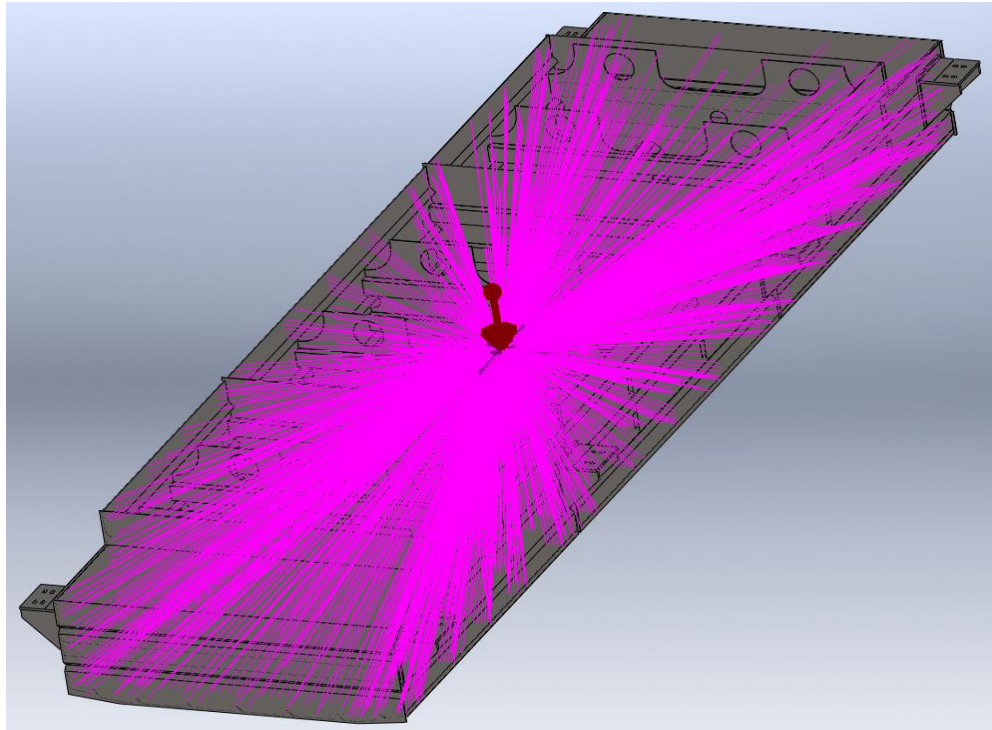


Figura 35: Applicazione carichi completi caso 0

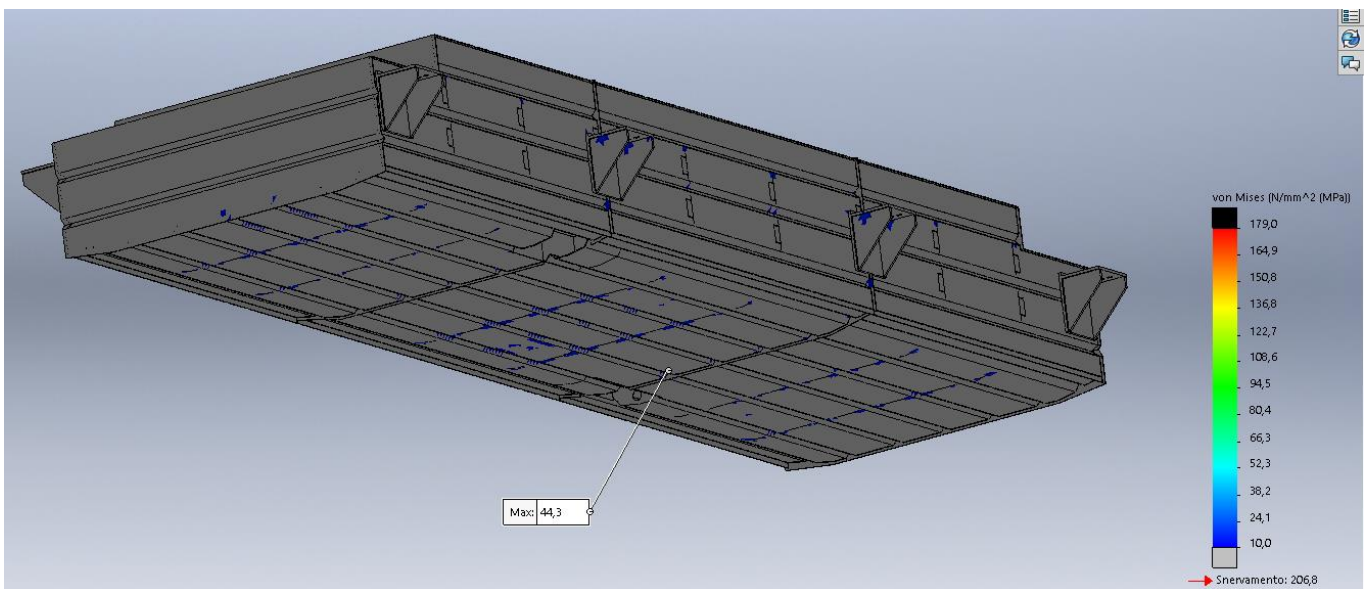


Figura 36: Snervamento 0 con modifica

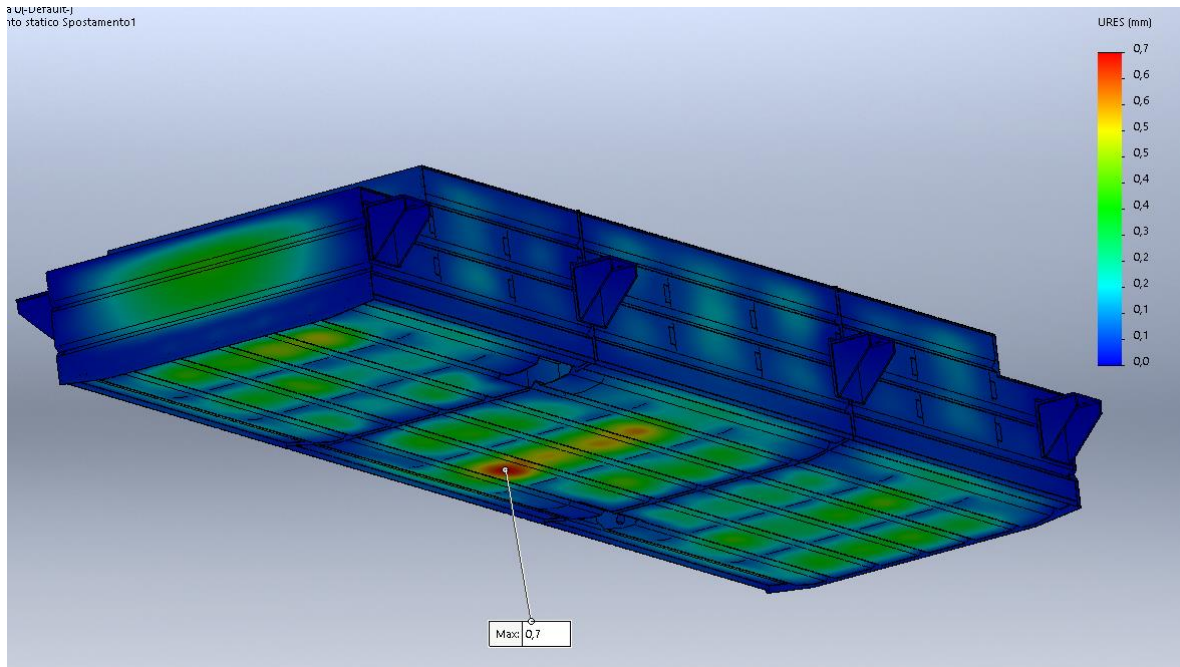


Figura 37: spostamento 0 con modifica

Caso Longitudinale 1+

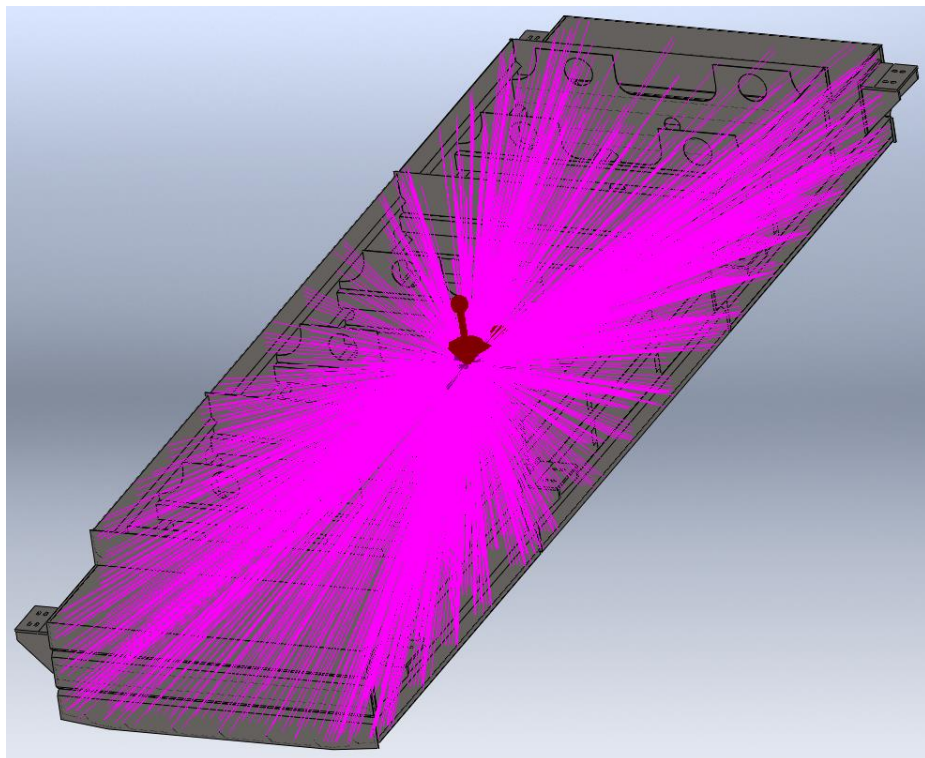


Figura 38: applicazione carico longitudinale senso positivo + forza idrostatica + peso fluido

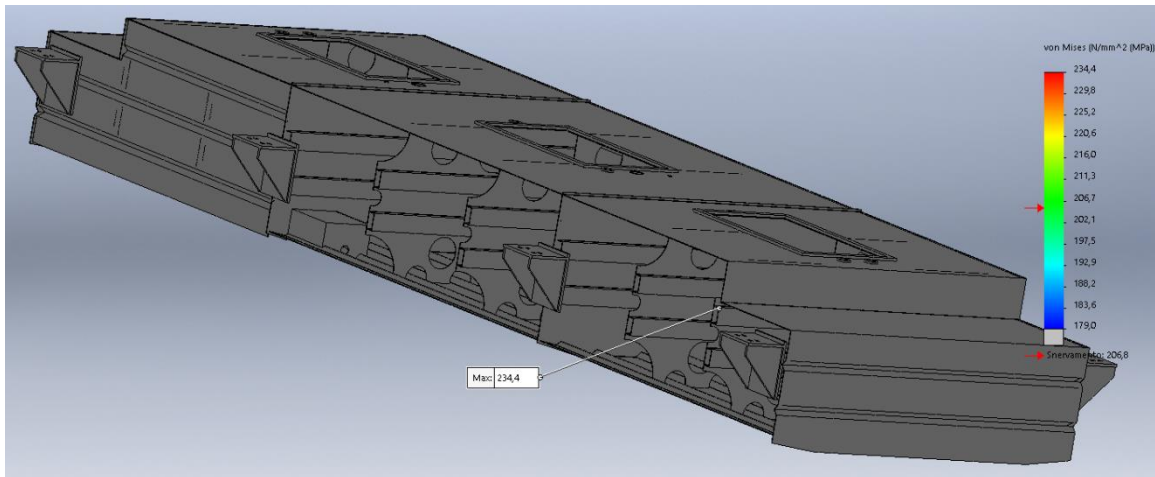


Figura 39: snervamento 1+ con modifica

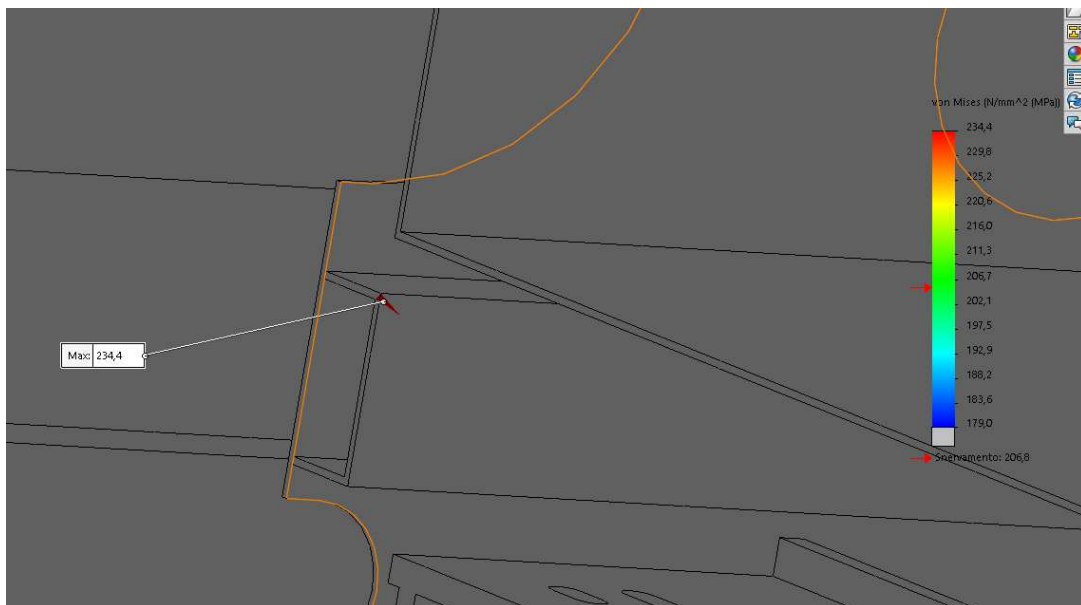


Figura 40: dettaglio snervamento

Come si può vedere da questa prova, effettuata sulla nuova configurazione del serbatoio, una minima parte risulterebbe superare, con 234, lo snervamento ammissibile di 179. Possiamo però fare due considerazioni: la prima è che essendo una parte molto ridotta si può affermare che potrebbe trattarsi di un errore di discretizzazione della mesh, il quale porterebbe ad un picco su quell'elemento troppo deformato. Un'ulteriore considerazione possiamo farla facendo riferimento alla normativa EN 12663-1 capitolo 5.4.2 dove viene detto "Nel determinare i livelli di sollecitazione nei materiali duttili, non è necessario soddisfare lo snervamento limite per le caratteristiche che producono una concentrazione locale di sollecitazioni. Se l'analisi incorpora concentrazioni di sollecitazioni locali, allora è consentito che la sollecitazione teorica superi lo snervamento del materiale o il limite di prova dello 0,2%. Le aree di deformazione plastica locale associate alle concentrazioni di sollecitazioni devono essere

sufficientemente piccole da non provocare alcuna deformazione permanente significativa quando il carico viene rimosso”. Fatte queste due importanti osservazioni possiamo dire perciò che la prova Longitudinale 1+, che inizialmente aveva prodotto risultati non adeguati al superamento della prova, si può considerare superata grazie all’introduzione delle travi a forma C.

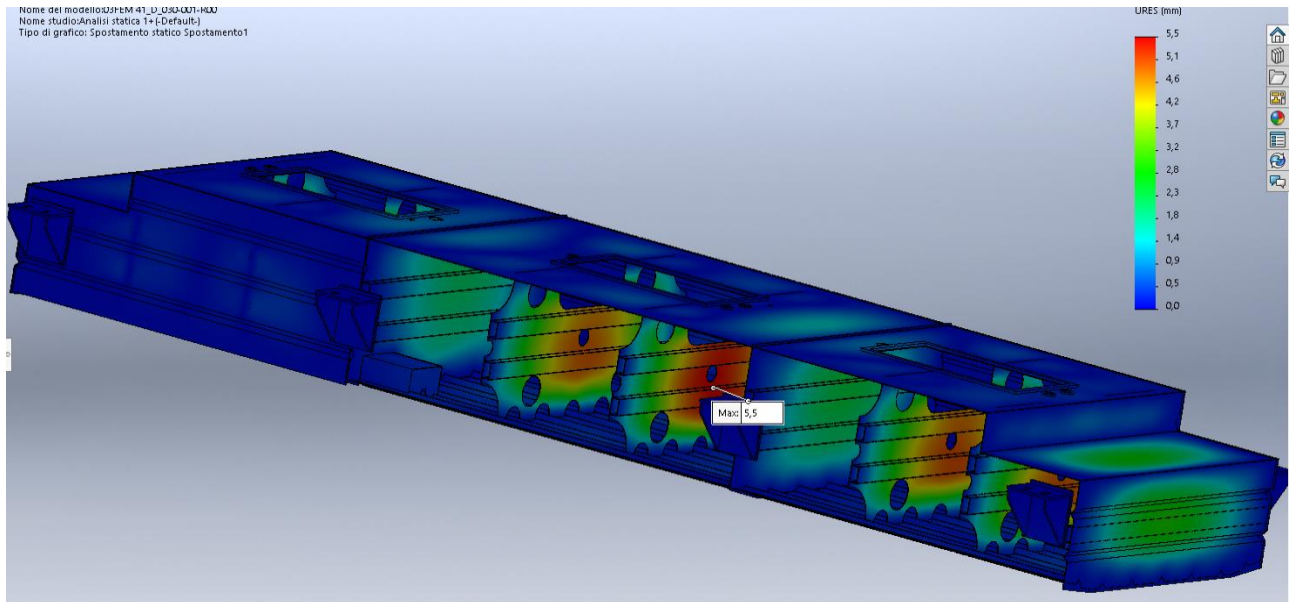


Figura 41: spostamento 1+ con modifica

Caso Longitudinale 1-

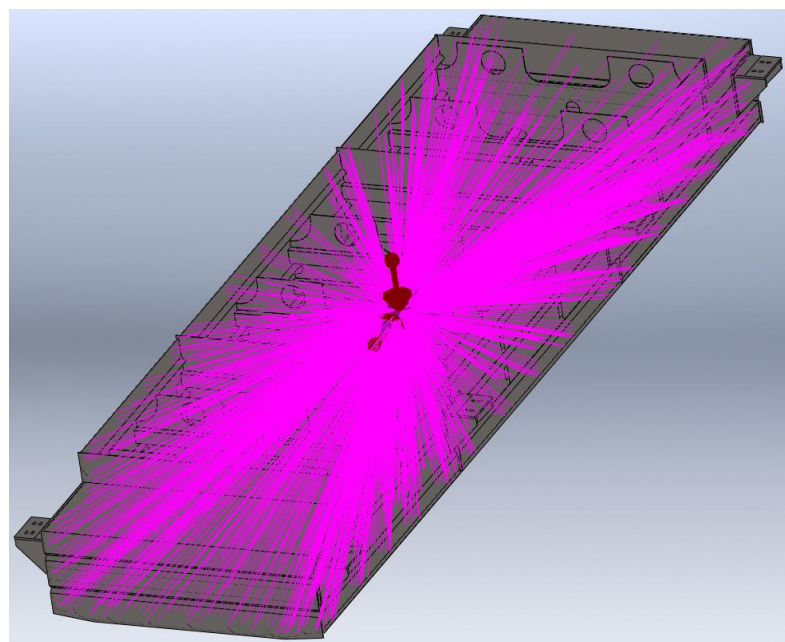


Figura 42: applicazione carico longitudinale senso negativo + forza idrostatica + peso fluido

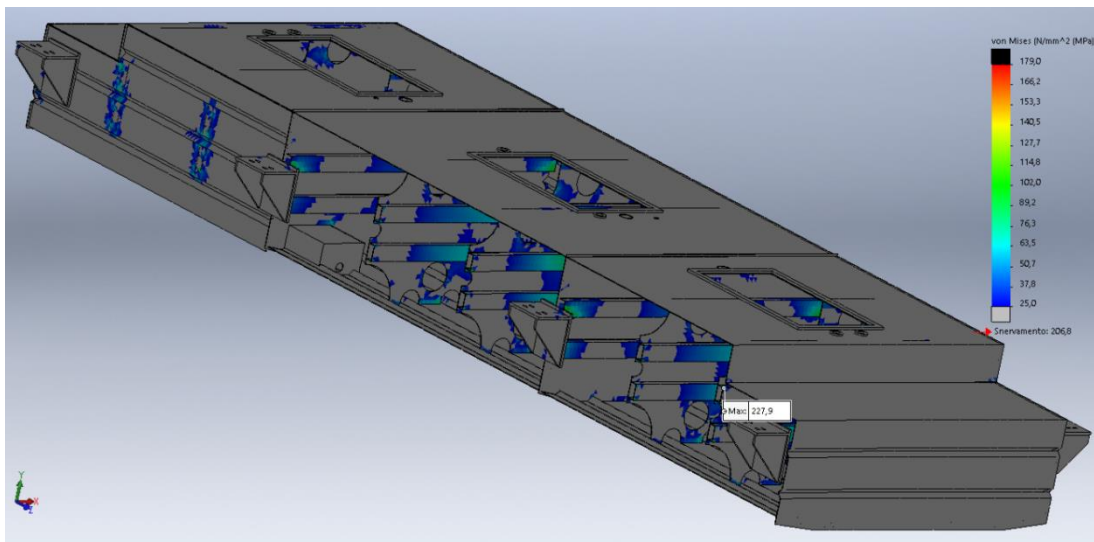


Figura 43: snervamento 1-

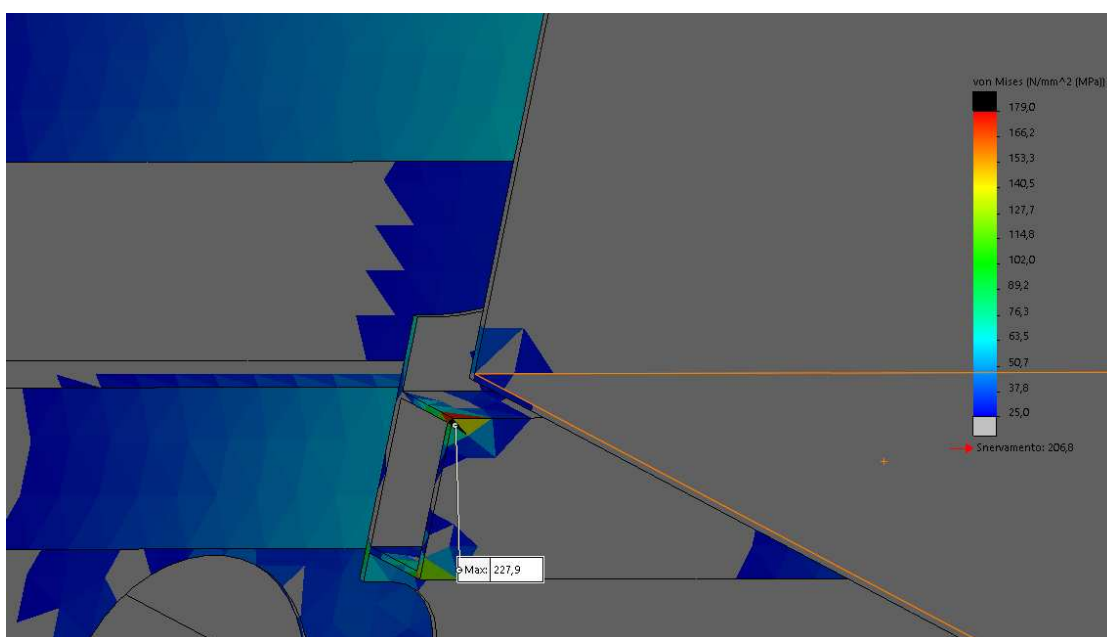


Figura 44: dettaglio snervamento 1-

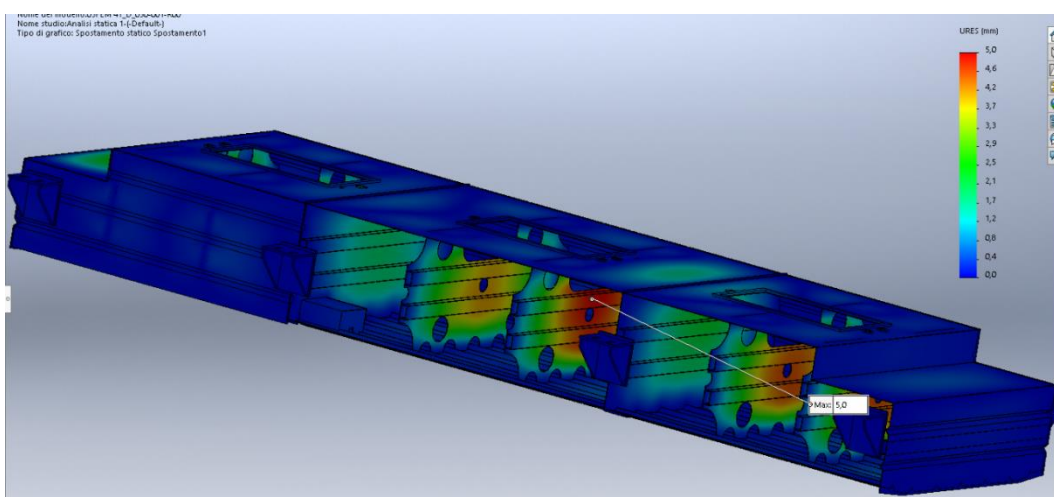


Figura 45: spostamento 1-

Caso Trasversale 2+

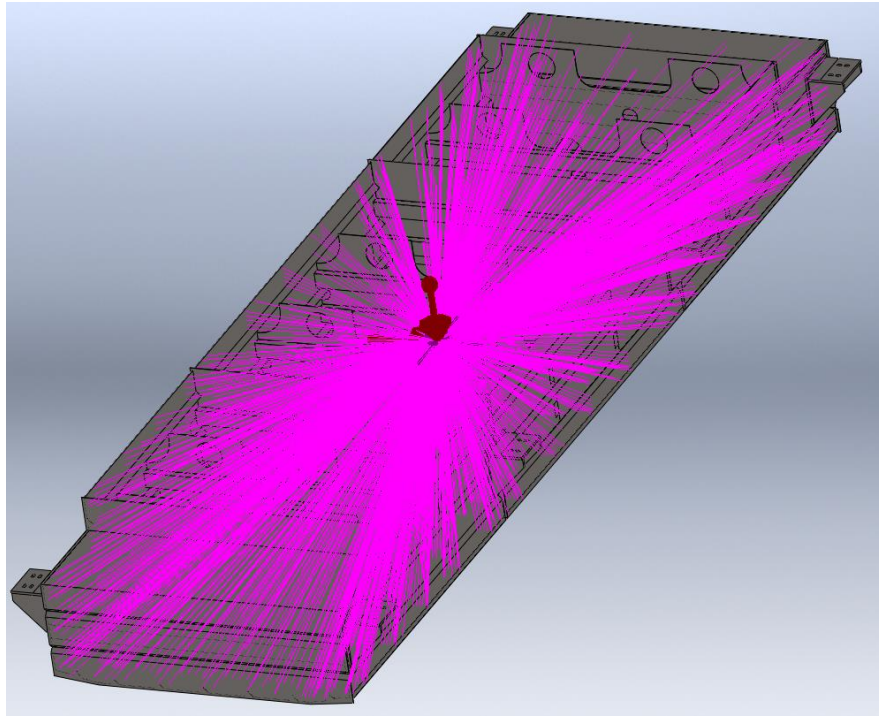


Figura 46: applicazione carico trasversale senso positivo + forza idrostatica + peso fluido

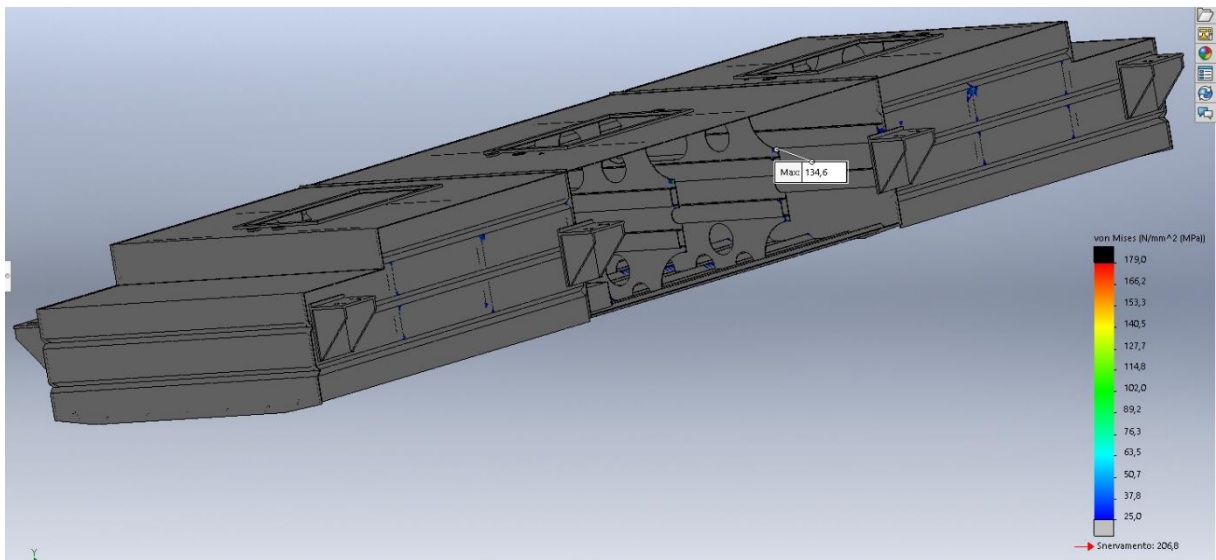


Figura 47: snervamento 2+

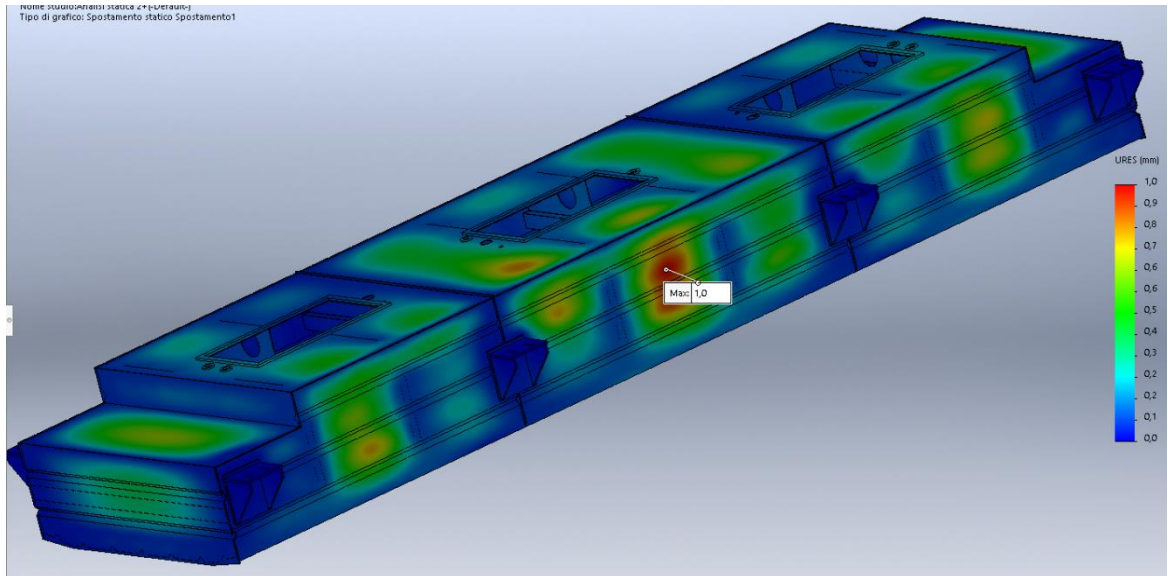


Figura 48: spostamento 2+

Caso Trasversale 2-

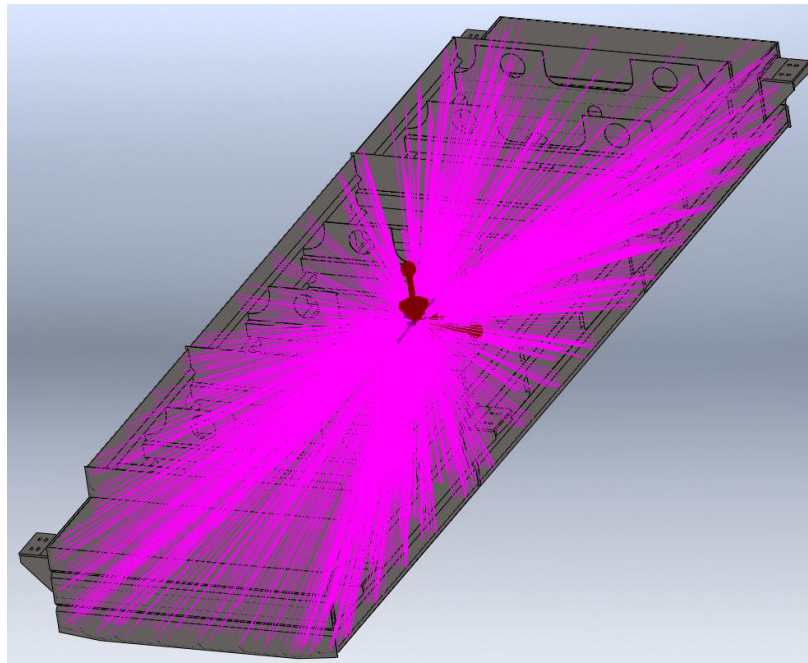


Figura 49: applicazione carico trasversale senso negativo + forza idrostatica + peso fluido

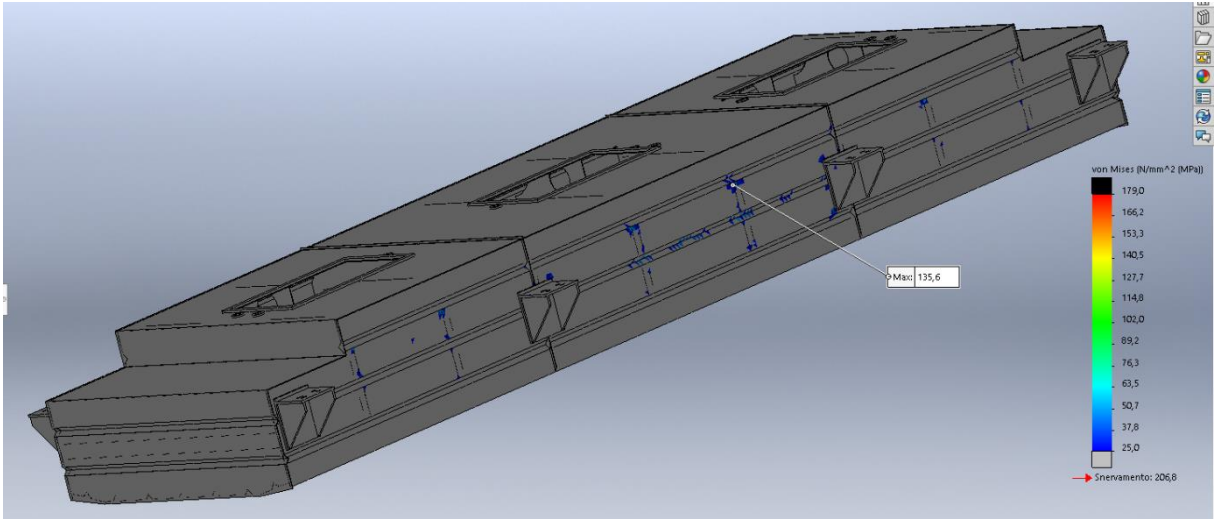


Figura 50: snervamento 2-

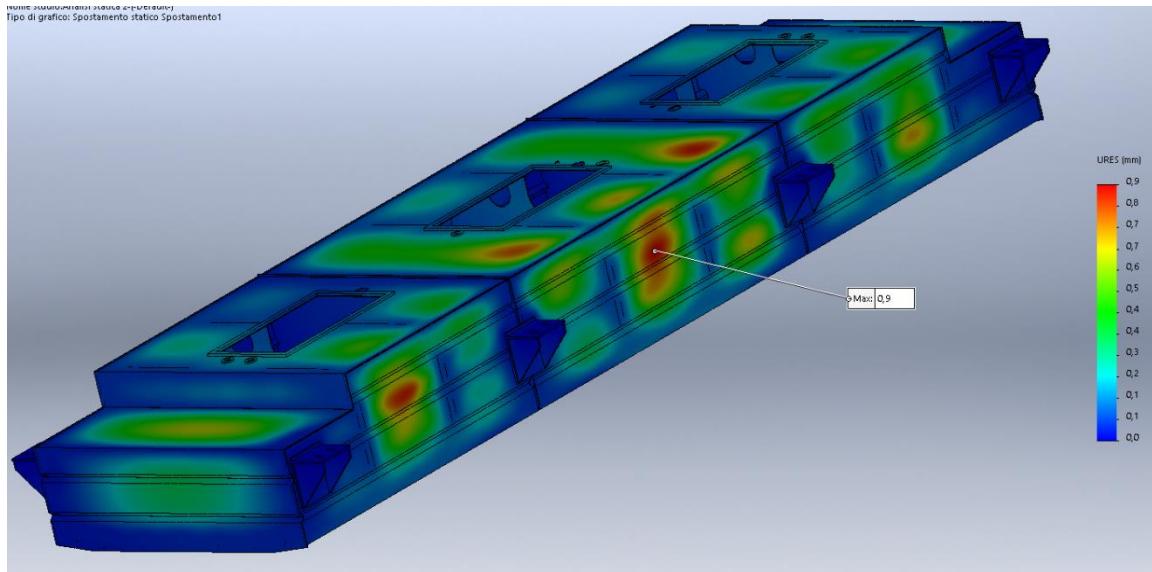


Figura 51: spostamento 2-

Caso Verticale 3

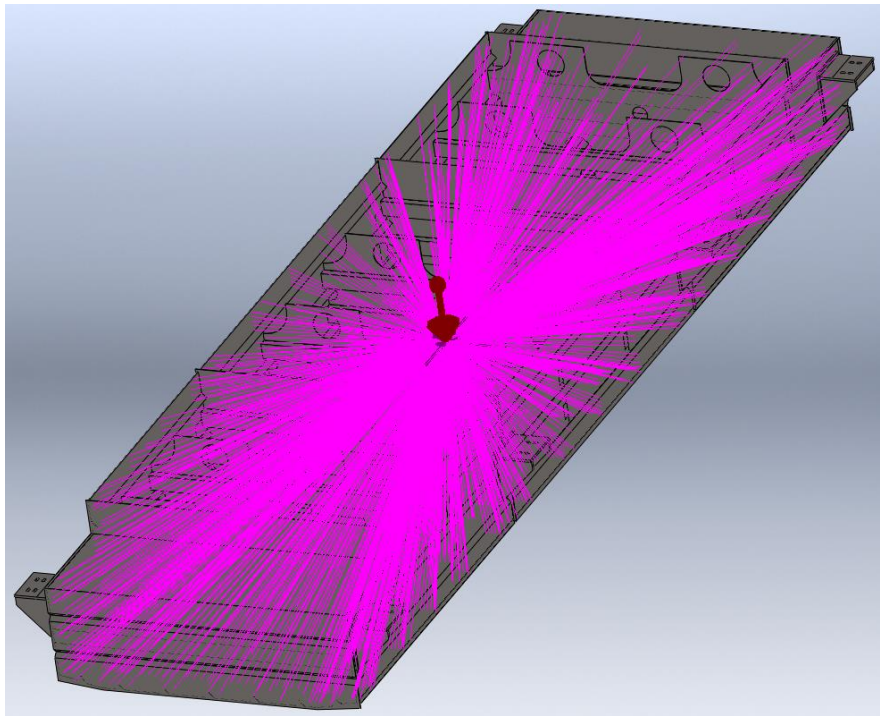


Figura 52: applicazione carico verticale + forza idrostatica + peso fluido

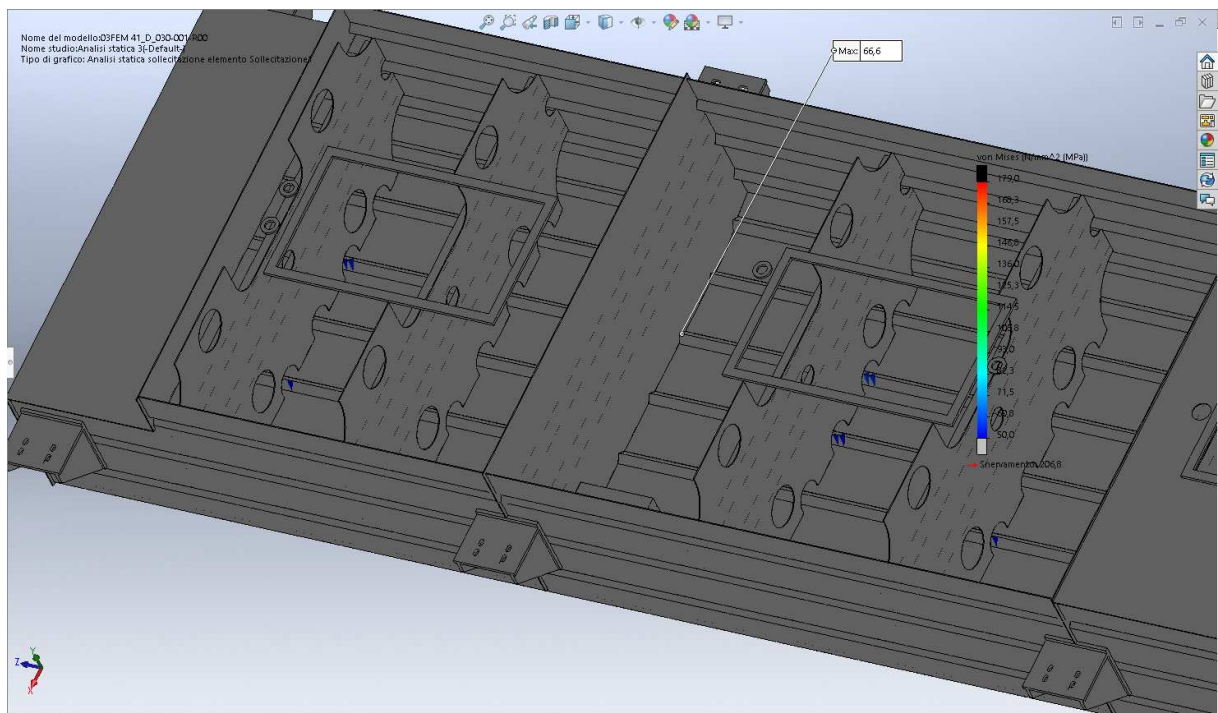


Figura 53: snervamento 3

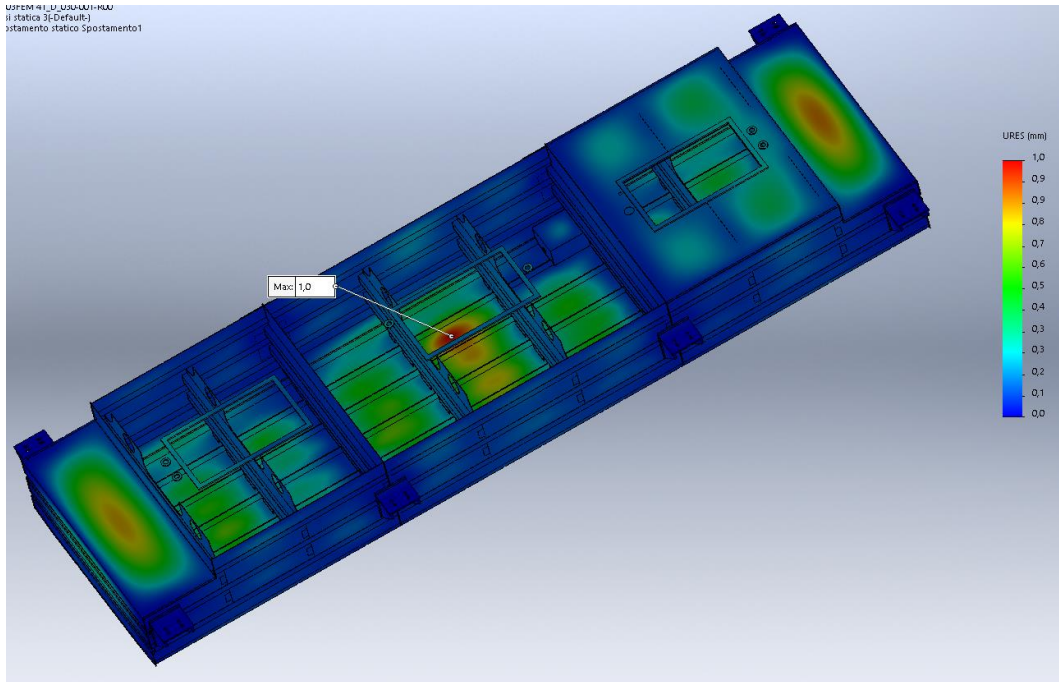


Figura 54: spostamento 3

Pressione Interna 4

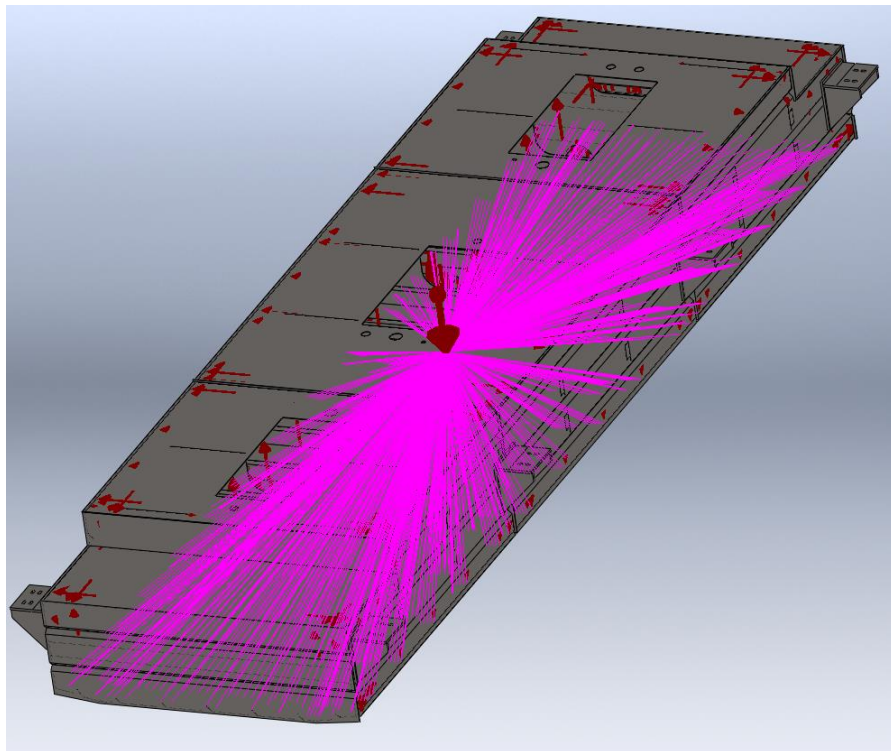


Figura 55: applicazione pressione 30kPa + peso fluido

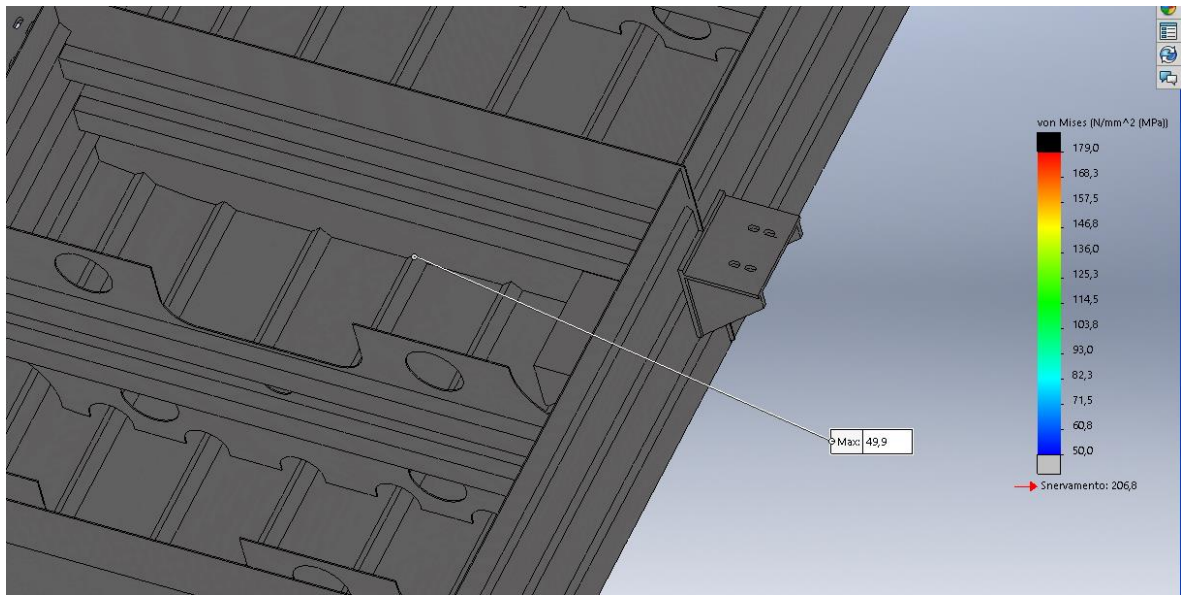


Figura 56: snervamento 4

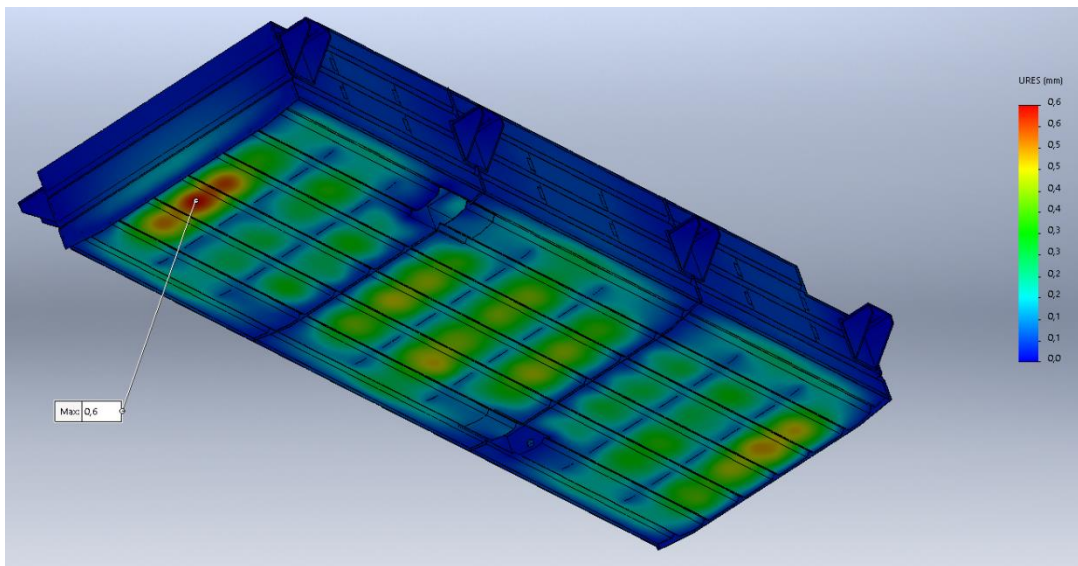


Figura 57: spostamento 4

6. CONCLUSIONI

Ultimato il lavoro sui casi di carico, si è potuto osservare come l'utilizzo del programma SolidWorks sia riuscito a mettere in luce i punti critici del serbatoio, in particolare quelle parti dove il materiale con l'applicazione di determinati carichi avrebbe una tensione di snervamento molto superiore a quella ammissibile. Si è perciò effettuata un'importante modifica a livello strutturale, come l'introduzione di due travi a forma di C per ogni frangiflutti (che risultava la parte più sollecitata e in crisi) e per ogni paratia di separazione, in modo da sorreggere la spinta longitudinale del fluido. Questo ha portato, dopo la ripetizione delle verifiche, al superamento della prova strutturale da parte del serbatoio.

BIBLIOGRAFIA

Ente Italiano di Normazione, *Applicazioni ferroviarie Requisiti strutturali delle casse dei rotabili ferroviari Parte 1: Locomotive e materiale rotabile per passeggeri (e metodo alternativo per i carri merci)*, UNI EN 12663-1, febbraio 2015.

Ente Italiano di Normazione, *Applicazioni ferroviarie Requisiti strutturali delle casse dei rotabili ferroviari Parte 2: Carri merci*, UNI EN 12663-2, ottobre 2010.

Ente Italiano di Normazione, *Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 1 : Requisiti tecnici per la circolazione*, UNI EN 14033-1, luglio 2017.

Ente Italiano di Normazione, *Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 2: Requisiti tecnici di viaggio e di lavoro*, UNI EN 14033-2, luglio 2017.

Ente Italiano di Normazione, *Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 3: Requisiti generali di sicurezza*, UNI EN 14033-3, luglio 2017.

SITOGRAFIA

<https://www.cifi.it/UplDocumenti/Corso%20di%20Tecnica%20Ferroviaria/1%20materiale%20rotabile%20ferroviario.pdf>.

<https://www.srtfano.com>

<https://www.cordstrap.com/it/Cordstrap/conformita-approvazione-e-certificazione/association-of-american-railroads/>

<https://biblus.acca.it/analisi-fem/>

APPENDICE

Tabelle dei vari casi di carico. Nelle prove 0, 1+, 1-, 2+, 2- e 3 è sempre presente la pressione idrostatica nelle pareti del serbatoio.

0	Caso stazionario		
Accelerazione considerate da moltiplicare con "g"	Verticale	Longitudinale	Trasversale
		1	0
Componente	Verticale	Longitudinale	Trasversale
Gravità	10	-	-
1 - Peso fluido	105000	-	-

1+	Tab 13 - Longitudinale verso positivo		
Accelerazione considerate da moltiplicare con "g"	Verticale	Longitudinale	Trasversale
		1	3
Componente	Verticale	Longitudinale	Trasversale
Gravità	10	30	-
1 - Peso fluido	105000	315000	-

1-	Tab 13 - Longitudinale verso negativo		
Accelerazione considerate da moltiplicare con "g"	Verticale	Longitudinale	Trasversale
		1	3
Componente	Verticale	Longitudinale	Trasversale
Gravità	10	30	-
1 - Peso fluido	105000	315000	-

2+	Tab 14 - Trasversale verso positivo		
Accelerazione considerate da moltiplicare con "g"	Verticale	Longitudinale	Trasversale
	1	0	1
Componente	Verticale	Longitudinale	Trasversale
Gravità	10	-	10
1 - Peso fluido	105000	-	105000

2-	Tab 14 - Trasversale verso negativo		
Accelerazione considerate da moltiplicare con "g"	Verticale	Longitudinale	Trasversale
	1	0	1
Componente	Verticale	Longitudinale	Trasversale
Gravità	10	-	10
1 - Peso fluido	105000	-	105000

3	Tab 15 - Verticale	
Componente	1+c	Verticale
Gravità	1,500	15,00
1 - Peso fluido	1,500	157500

4	Pressione interna di 30 kPa (EN 14033-3)		
Accelerazione considerate da moltiplicare con "g"	Verticale	Longitudinale	Trasversale
	1	0	0
Componente	Verticale	Longitudinale	Trasversale
Gravità	10,00	-	-
1 - Peso fluido	105000	-	-

