



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**

Anno accademico 2024/2025
Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2025

**Studio di una cassa ferroviaria innovativa
con l'impiego di materiali compositi in
fibra di carbonio**

Relatori

prof. Ing. Aurelio Somà
prof. Ing. Nicola Bosso

Candidato

Andrea Barbagallo

Sommario

Lo scopo dell'elaborato, dal titolo "Studio di una cassa ferroviaria innovativa con l'impiego di materiali compositi in fibra di carbonio", è quello di studiare gli eventuali benefici apportati dall'utilizzo di materiali compositi fibro-rinforzati nella progettazione di veicoli ferroviari. Inizialmente si è svolta una ricerca per capire quali sono le innovazioni che caratterizzano i rotabili recentemente messi sul mercato dai principali costruttori europei, nell'ambito di un'attività commissionata a BLUE Engineering di Rivoli (TO) da un'azienda terza. Dall'indagine è emerso che, mentre i materiali predominanti rimangono acciaio e alluminio, le innovazioni si concentrano prevalentemente sul comfort dei passeggeri, sulla condivisione di informazioni con gli stessi e sui sistemi di diagnostica e manutenzione. Tuttavia, a livello di ricerca sono stati rilevati studi promettenti sui benefici offerti dai materiali compositi, oltre a un prototipo di cassa ferroviaria interamente in fibra di carbonio, noto con il nome di "Carbodin project". Partendo da queste premesse, si è deciso di analizzare i benefici derivanti dalla sostituzione della parete di un veicolo metropolitano interamente progettato in acciaio inossidabile con una parete in laminato fibro-rinforzato. Questa scelta ha richiesto un approfondimento sui metodi di connessione tra materiali compositi e acciaio, al fine di garantire un collegamento efficace ed evitare problematiche quali corrosione galvanica, dovuta a interazioni chimiche, e delaminazione, causata dai carichi trasmessi. Dopo aver effettuato il disegno, il CAD viene importato in un programma di simulazione agli elementi finiti e vengono creati due modelli di calcolo, costituiti da elementi planari. Nel primo modello, le superfici rappresentanti parete e cassa, a contatto fra loro, sono state vincolate rigidamente, simulando un collegamento ideale in cui parete e cassa si comportano come un unico elemento continuo. Tale ipotesi, pur semplificativa, non è realistica, per cui si realizza un secondo modello dove invece le reazioni vincolari interne sono definite dagli elementi di collegamento. I carichi applicati sono definiti dalla normativa di riferimento UNI EN 12663, con prove di compressione e trazione che includono anche carichi verticali aggiuntivi, come il peso dell'impianto di condizionamento e del coupler. I risultati mostrano come si ha un notevole risparmio di peso e le tensioni che si sviluppano non portano al cedimento strutturale delle varie lamine. Tuttavia, le deformazioni risultano eccessive e vengono formulate alcune ipotesi su come risolvere tale problematica.

Abstract

The purpose of this thesis, titled “Study of an Innovative Railway Carbody Using Carbon Fiber Composite Materials”, is to evaluate the potential benefits of using fiber-reinforced composite materials in the design of railway vehicles. Initially, a study was conducted to analyze the innovations characterizing the rolling stock recently introduced to the market by leading European manufacturers, as part of an activity commissioned to BLUE Engineering in Rivoli (TO) by a third-party company. The analysis revealed that, while steel and aluminum remain the predominant materials, innovations are primarily focused on passenger comfort, including information sharing, as well as diagnostic and maintenance systems. However, research has identified promising studies on the potential benefits of composite materials, along with a prototype of a railway carbody entirely made of carbon fiber, known as the “Carbodin project”. Building on these findings, the decision was made to analyze the benefits of replacing the wall of a metropolitan vehicle, originally designed entirely in stainless steel, with a fiber-reinforced laminate wall. This approach required further investigation into connection methods between composite materials and steel, to ensure an effective joint and to avoid issues such as galvanic corrosion due to chemical interactions and delamination caused by transmitted loads. After completing the design, the CAD model was imported into a finite element simulation software, where two calculation models were created, consisting of planar elements. In the first model, the surfaces representing the wall and the carbody, in contact with each other, were rigidly constrained, simulating an ideal connection in which the wall and the carbody behave as a single continuous element. This assumption, although simplifying, is not realistic, which is why a second model was created where the internal reaction forces are instead defined by the connecting elements. The applied loads followed the UNI EN 12663 reference standard, including compression and tension tests as well as additional vertical loads, such as the weight of the air conditioning system and the coupler. The results showed a significant weight reduction, with stresses that do not lead to structural failure of the laminates. However, the deformations were found to be excessive, and some hypotheses were formulated to address this issue.

Indice

| | |
|----------------------------|------------|
| Elenco delle figure | VII |
|----------------------------|------------|

| | |
|-----------------------------|-----------|
| Elenco delle tabelle | IX |
|-----------------------------|-----------|

| | |
|---|----------|
| 1 Casse ferroviarie di recente produzione | 1 |
| 1.1 Introduzione | 1 |
| 1.2 Alluminio | 2 |
| 1.3 Acciaio inossidabile | 4 |
| 1.4 Materiali compositi | 6 |
| 2 Meccanica dei materiali compositi | 9 |
| 2.1 Introduzione ai materiali compositi | 9 |
| 2.2 Produzione di laminati fibrorinforzati a matrice polimerica | 10 |
| 2.2.1 Metodi manuali o semimanuali | 11 |
| 2.2.2 Stampaggio ad alta pressione | 11 |
| 2.2.3 Formatura a bassa pressione in stampo aperto | 11 |
| 2.2.4 Formatura a bassa pressione in stampo chiuso | 12 |
| 2.2.5 Poltrusione | 12 |
| 2.2.6 Avvolgimento di fibre pre-impregnate | 12 |
| 2.3 Comportamento macromeccanico di una lamina | 12 |
| 2.4 Comportamento macromeccanico di un laminato | 20 |
| 2.4.1 Introduzione | 20 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4.2 | Teoria classica di laminazione | 22 |
| 2.4.3 | Resistenza di un laminato | 27 |
| 2.5 | Giunzione dei materiali compositi | 28 |
| 2.5.1 | Introduzione | 28 |
| 2.5.2 | Tecniche di giunzione | 29 |
| 3 | Progettazione della fiancata | 35 |
| 3.1 | Cassa originale in acciaio | 35 |
| 3.2 | Fiancata in materiale composito | 38 |
| 3.2.1 | Introduzione | 38 |
| 3.2.2 | Moduli costituenti la fiancata | 38 |
| 3.3 | Fissaggio della fiancata alla cassa in acciaio | 42 |
| 3.4 | Elementi di rinforzo | 43 |
| 4 | Analisi FEM | 45 |
| 4.1 | Introduzione | 45 |
| 4.2 | Costruzione del modello numerico | 46 |
| 4.2.1 | Elementi per i materiali compositi | 46 |
| 4.2.2 | Conversione dei corpi solidi in superfici | 47 |
| 4.2.3 | Correzione dei contatti e definizione delle reazioni vincolari interne | 48 |
| 4.2.4 | Definizione delle layered section | 51 |
| 4.2.5 | Creazione della mesh | 52 |
| 4.2.6 | Definizione dei vincoli e dei pesi di esercizio | 52 |
| 4.3 | Risultati numerici | 55 |
| 4.3.1 | Modello con vincolo rigido tra parete e cassa | 55 |
| 4.3.2 | Modello con connessione tra parete e cassa costituita da rivetti | 64 |
| 4.4 | Risultati della cassa originale in acciaio per confronto | 76 |
| 5 | Conclusioni | 83 |

Elenco delle figure

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Rappresentazione schematica del processo di Friction Stir Welding [2] | 3 |
| 2.1 | Distinzione tra ν_{12} e ν_{21} [11] | 14 |
| 2.2 | Analisi di un laminato a due strati | 20 |
| 2.3 | Deformazione nel piano $x-z$ [11] | 23 |
| 2.4 | Variazione ipotetica di deformazioni e tensioni lungo lo spessore del laminato, che evidenzia le discontinuità all'interfaccia delle lamine [11] | 25 |
| 2.5 | Forze nel piano su un laminato piatto [11] | 25 |
| 2.6 | Momenti su un laminato piatto [11] | 25 |
| 2.7 | Geometria di un laminato a N strati [11] | 26 |
| 2.8 | Quattro dei principali tipi di cedimento. [13] | 32 |
| 2.9 | Parametri geometrici di un tipico provino. [13] | 33 |
| 3.1 | Rappresentazione di metà cassa, interamente in acciaio | 36 |
| 3.2 | Parte di fiancata in acciaio, costituita da lamiere parzialmente sovrapposte e saldate | 37 |
| 3.3 | Lamiera di sostegno a forma di omega (Ω) | 37 |
| 3.4 | Fiancata progettata in carbonio, costituita da nove elementi | 38 |
| 3.5 | Profilo utilizzato per la progettazione della fiancata | 40 |
| 3.6 | Disegno del modulo "porta" | 41 |
| 3.7 | Disegno del modulo "finestrino" | 41 |
| 3.8 | Disegno del modulo "pieno" | 42 |
| 3.9 | Rappresentazione di un rivetto a strappo | 43 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.10 | Deformazione che si vuole impedire con gli elementi di supporto | 44 |
| 3.11 | Elemento di supporto realizzato nella parete stessa | 44 |
| 4.1 | Geometria dell'elemento SHELL181 [7] | 46 |
| 4.2 | Sistema di riferimento dello strato rispetto al sistema di riferimento dell'elemento [7] | 47 |
| 4.3 | Tensioni risultanti dell'elemento SHELL181 [7] | 48 |
| 4.4 | Funzione <i>midsurface</i> per creare la superfici partendo dai corpi solidi | 49 |
| 4.5 | Funzione "estendi" per estendere le superfici e correggerle | 50 |
| 4.6 | Esempio di contatto tra parete e cassa | 51 |
| 4.7 | Definizione di una <i>layered section</i> della fiancata | 51 |
| 4.8 | Sistema di riferimento locale definito per le <i>layered section</i> per la parte bassa della fiancata | 52 |
| 4.9 | Mesh generata per la discretizzazione della cassa | 53 |
| 4.10 | Vincoli applicati agli elementi sezionati con un piano parallelo al piano $x-y$ | 54 |
| 4.11 | Applicazione dei carichi verticali | 56 |
| 4.12 | Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di compressione | 57 |
| 4.13 | Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di compressione | 58 |
| 4.14 | Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di compressione | 59 |
| 4.15 | Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di trazione | 61 |
| 4.16 | Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di trazione | 62 |
| 4.17 | Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di trazione | 63 |
| 4.18 | Rivetto rappresentato geometricamente da una linea | 65 |
| 4.19 | Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di compressione, struttura rivettata | 66 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.20 | Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di compressione, struttura rivettata | 67 |
| 4.21 | Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di compressione, struttura rivettata | 68 |
| 4.22 | Deformazione totale della parete nell'analisi di compressione | 70 |
| 4.23 | Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di trazione, struttura rivettata | 71 |
| 4.24 | Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di trazione, struttura rivettata | 72 |
| 4.25 | Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di trazione, struttura rivettata | 73 |
| 4.26 | Deformazione totale della parete nell'analisi di trazione | 75 |
| 4.27 | Creazione del modello della parete in acciaio | 76 |
| 4.28 | Tensioni ideali di von Mises per la parete in acciaio, analisi di compressione | 78 |
| 4.29 | Deformazione totale della parete in acciaio nell'analisi di compressione | 79 |
| 4.30 | Tensioni ideali di von Mises per la parete in acciaio, analisi di trazione | 80 |
| 4.31 | Deformazione totale della parete in acciaio nell'analisi di trazione . . | 81 |
| 5.1 | Particolare della deformazione della fiancata in composito nell'analisi di compressione | 84 |

Elenco delle tabelle

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Differenti acciai inossidabili utilizzati nel settore ferroviario | 4 |
| 3.1 | Acciai utilizzati nella progettazione della cassa | 35 |
| 3.2 | Dimensioni della cassa in acciaio | 35 |
| 3.3 | Proprietà meccaniche della resina epossidica con fibre di carbonio . . . | 39 |
| 3.4 | Caratteristiche dei rivetti utilizzati | 43 |
| 4.1 | Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di compressione | 60 |
| 4.2 | Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di trazione | 64 |
| 4.3 | Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di compres- sione, parete rivettata | 69 |
| 4.4 | Deformazione totale della parete nella prova di compressione, parete rivettata | 69 |
| 4.5 | Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di trazione, parete rivettata | 74 |
| 4.6 | Deformazione totale della parete nella prova di trazione, parete rivettata | 74 |
| 4.7 | Risultati delle prove per la cassa interamente in acciaio | 77 |
| 4.8 | Deformazioni totali della cassa interamente in acciaio | 77 |
| 5.1 | Risparmio di peso | 83 |

Capitolo 1

Casse ferroviarie di recente produzione

1.1 Introduzione

Il mercato europeo nel settore ferroviario si sta muovendo principalmente verso rotabili della tipologia EMU¹, ossia treni elettrici costituiti da più unità non riconfigurabili dagli operatori ferroviari. Vengono venduti già in set, con differenti numeri di casse. Spesso diversi treni appartengono alla stessa famiglia, solitamente chiamata “piattaforma”, consentendo al costruttore di ridurre i costi di impianto e produrre più treni con le stesse strutture cassa, apportando solo alcune modifiche in base alle specifiche del cliente.

Le innovazioni presenti nei treni immessi sul mercato dai principali costruttori negli ultimi anni non presentano innovazioni interessanti rispetto ai materiali o ai processi produttivi, ma si sono orientati principalmente nell’offrire miglior comfort ai viaggiatori, e nell’introduzione di sistemi informatici ed elettronici innovativi utili sia durante il servizio per il monitoraggio e per le informazioni ai viaggiatori, sia durante le operazioni di manutenzione, per valutare lo stato di salute e di integrità di ogni componente.

I principali materiali utilizzati per la costruzione della cassa sono acciaio e alluminio. Con il primo si ottengono dalle lamiere dei profili tagliati, piegati e poi saldati, mentre con l’alluminio si ha più versatilità, e i componenti della cassa vengono ottenuti per estrusione e poi saldati insieme. Si sta anche studiando, a livello di ricerca, l’utilizzo dei materiali compositi per la costruzione dei rotabili ferroviari.

I processi produttivi utilizzati per la produzione delle casse dipendono dal materiale utilizzato, e ogni processo apporta vantaggi e svantaggi alla produzione e al prodotto finale.

¹Electric Multiple Unit

1.2 Alluminio

La maggior parte delle aziende produttrici di veicoli ferroviari utilizza l'alluminio come materiale per le parti della carrozzeria, grazie alla sua leggerezza, alla resistenza relativamente elevata² e alla durata. I principali produttori che utilizzano l'alluminio per la produzione delle casse ferroviarie sono:

- **BOMBARDIER:** Bombardier Transportation rivendica il merito di essere stata la prima azienda in Europa a proporre il suo concetto di carrozzeria in alluminio per i treni ad alta velocità.
- **ALSTOM:** L'azienda francese Alstom utilizza l'alluminio per le casse dei suoi treni ad alta velocità.
- **SIEMENS:** L'azienda tedesca Siemens utilizza l'alluminio saldato per la carrozzeria della maggior parte dei treni della metropolitana della famiglia Inspiro, che attualmente circolano in Polonia, Arabia Saudita, Germania, Australia, Bulgaria e Regno Unito.
- **HITACHI:** La compagnia ferroviaria Hitachi ha utilizzato con successo l'alluminio come materiale per la carrozzeria di numerosi treni metropolitani senza conducente che circolano in diverse città del mondo, tra cui Milano, Roma, Copenaghen e Taipei.
- **STADLER:** L'azienda svizzera Stadler Rail ha realizzato con successo la cassa del treno EMU ad alta velocità "Giruno" che circola sulla tratta transalpina tra Milano e le città svizzere di Basilea e Zurigo, attraverso il tunnel del San Gottardo.
- **CAF:** L'azienda spagnola CAF³ sta adottando l'alluminio per la carrozzeria di diversi treni, compresi i veicoli rinnovati della metropolitana che circolano a Lione.
- **CRRC:** La CRRC Corporation, di proprietà statale cinese, utilizza l'alluminio come materiale per la carrozzeria dei veicoli metropolitani.
- **TITAGARH:** Il produttore indiano di materiale rotabile utilizza l'alluminio come materiale per la carrozzeria di diversi tipi di veicoli.

L'alluminio assicura un peso ridotto e una superficie liscia e uniforme, in quanto, a differenza dell'acciaio, il materiale non presenta "onde". Ciò richiede meno operazioni di finitura dopo l'assemblaggio, consentendo di ridurre i tempi di produzione.

Per l'alluminio è molto comune utilizzare sui profili estrusi, come tecnica di saldatura, la "Friction Stir Welding" sviluppata al "The Welding Institute" di Cambridge

²rispetto al peso

³Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles

nel 1991 [1]. Il processo si basa sul rimescolamento allo stato solido del materiale, provocato dall'azione meccanica di un utensile posto in rotazione, che viene fatto penetrare e avanzare in corrispondenza della linea di giunzione dei due lembi da saldare. L'attrito che di conseguenza si genera tra utensile e pezzo provoca il riscaldamento del materiale da saldare, fino al raggiungimento di una condizione di elevata duttilità, che consente appunto all'utensile rotante di avanzare, rimescolando il materiale (figura 1.1).

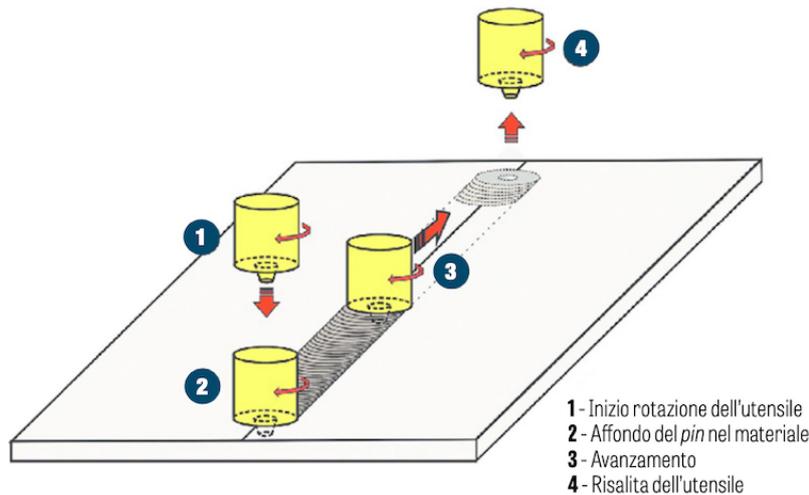


Figura 1.1: Rappresentazione schematica del processo di Friction Stir Welding [2]

Dal momento che il materiale è rimescolato allo stato solido, questo tipo di saldatura è definita come saldatura a freddo: le temperature raggiunte non superano mai il 75-80% della temperatura di fusione del materiale. Un altro vantaggio di questa tecnica è la mancanza dei tipici difetti legati ai processi tradizionali di saldatura. Essendo il Friction Stir Welding un processo allo stato solido, vengono meno le problematiche legate ad eventuali ritiri, cricche e porosità dovute al gas che potrebbe rimanere intrappolato nel giunto durante la sua fase di solidificazione.

Infine, l'intensa deformazione plastica localizzata che subisce il materiale saldato consente di ottenere, al cuore della saldatura, una microstruttura in grado di garantire un minor decadimento delle proprietà meccaniche rispetto alle saldature per fusione. Il limitato flusso termico coinvolto nel processo porta a una importante riduzione dello stato tensionale residuo dei giunti saldati e delle distorsioni dei prodotti finiti. Tra gli svantaggi di questo metodo di saldatura si deve considerare che la mancanza di materiale fuso lungo il giunto, sebbene migliori le caratteristiche meccaniche ottenibili nel giunto, risulta essere problematica per la durata della vita utile dell'utensile, in quanto è soggetto all'azione di carichi e temperature elevati, in special modo per la giunzione di metalli particolarmente duri, quali acciai e leghe di titanio.

Grazie a questo tipo di saldatura, è possibile ottenere componenti di grande dimensioni le cui tolleranze sono più rigorose e i costi inferiori.

1.3 Acciaio inossidabile

L'acciaio inossidabile è un metallo che offre numerosi vantaggi per le applicazioni ferroviarie, come resistenza alla corrosione, resistenza meccanica, tenacità, resistenza al fuoco e riciclabilità. È ampiamente utilizzato nella costruzione di vagoni passeggeri e merci, nonché nelle infrastrutture ferroviarie. L'acciaio inossidabile può anche ridurre il peso⁴ e i costi di manutenzione dei veicoli ferroviari e migliorarne l'efficienza energetica e la sicurezza. Secondo uno studio dell' "International Stainless Steel Forum", l'impiego dell'acciaio inossidabile per la produzione di vagoni ferroviari rappresenterebbe la migliore soluzione tecnica anche in termini di sostenibilità ambientale, grazie alla sua lunga vita operativa con bassa manutenzione, leggerezza e riciclabilità al 100% a fine vita, resistenza alla corrosione e agli urti e facilità di pulizia [3]. Tale materiale è solitamente destinato per la produzione di veicoli destinati al servizio regionale, metropolitano e tranviario. La scelta del materiale e i criteri di progettazione sono influenzati dalle condizioni operative a cui il veicolo sarà sottoposto. La tabella 1.1 presenta i diversi gradi di acciaio inossidabile che vengono principalmente utilizzati nel settore ferroviario [3].

| ASTM | EN | Tipologia | Composizione chimica [%] | Tensione di snervamento [MPa] | Allungamento a rottura [%] | Condizione |
|-------------|--------|-------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| AISI 410 | 1.4003 | Ferritico | 12Cr | 320 | 20 | Ricotto |
| S420 35 | 1.4589 | Ferritico | 15Cr, 2Ni, Mo, Ti | 420 | 16 | Ricotto |
| AISI 301 LN | 1.4318 | Austenitico | 18Cr, 7Ni, N | 350 | 35 | Ricotto |
| AISI 304 | 1.4301 | Austenitico | 18Cr, 9Ni | 230 | 45 | Ricotto |
| AISI 201 | 1.4372 | Austenitico | 17Cr, 7Mn, 5Ni, N | 350 | 45 | Ricotto |

Tabella 1.1: Differenti acciai inossidabili utilizzati nel settore ferroviario

La ricerca dell'ISSF riporta anche alcuni casi studio di aziende produttrici che hanno prodotto veicoli che utilizzano l'acciaio come materiale, riportando anche le motivazioni della scelta.

Caso di studio 1. Il costruttore svizzero Stadler ha progettato nel 2008 un tram per la città svizzera di Basel, tram che prende il nome commerciale di *Tango*. Viene utilizzato un acciaio inossidabile di grado EN 1.4589 per la fabbricazione della cassa, acciaio composto al 15% di cromo, al 2% di nichel e all'1% di molibdeno e titanio ciascuno. La scelta è dovuta alle particolari condizioni operative dovute alla rete tranviaria della città di Basel, con elevati dislivelli e curve estremamente strette.

⁴se si utilizza acciaio inossidabile con elevata resistenza alla trazione e rispetto all'acciaio convenzionale

Caso di studio 2. Il servizio metropolitano di nuova generazione per la città di Hamburg, in Germania, in servizio dal 2009, è basato su un design interamente in acciaio inossidabile. L'operatore ferroviario, Hamburg Hochbahn, vanta una lunga esperienza in convogli in acciaio inossidabile, e una motivazione fondamentale per la scelta di tale materiale è l'obiettivo di ottenere un servizio pubblico che sia sostenibile, portando a una scelta responsabile dei materiali e al quasi totale utilizzo di materiali riciclabili. Il veicolo è progettato con una vita utile di 45 anni. L'alto contenuto di sali marini lungo la costa del Mare del Nord e i gas corrosivi rilasciati dalle navi hanno spinto Hamburger Hochbahn a scegliere un tipo di acciaio resistente alla corrosione per la superficie non verniciata dei loro treni. La scelta è ricaduta su un acciaio inossidabile austenitico incrudito, principalmente composto da cromo e nichel, di classificazione AISI 301 LN (EN 1.4318).

Caso di studio 3. Vossloh España ha deciso di utilizzare l'acciaio inossidabile per la progettazione dei primi tram e treni prodotti in Spagna, puntando sulle proprietà meccaniche del materiale e sulla sua grande capacità di resistere all'usura senza ridurre né la vita utile né il fascino estetico. Vengono scelti sia acciai ferritici (EN 1.4003) che austenitici (EN 1.4301 [AISI 304]).

Caso di studio 4. Tokyu Car Corporation è il primo produttore giapponese ad utilizzare l'acciaio inossidabile di grado SUS304 per la produzione, sin dal 1958. Le casse prodotte interamente con acciaio inossidabile sono state introdotte nel 1962, e fu introdotto anche un acciaio ad alta resistenza di grado SUS301. Recentemente è stato introdotto anche lo studio dell'alluminio. L'acciaio al carbonio è stato scartato poiché, sebbene abbia un basso costo, richiede maggiori lavorazioni finali, aumentando quindi il costo totale di produzione, mentre invece il costo di produzione per una cassa interamente in acciaio inox si è via via abbassato grazie all'introduzione e alla diffusione di robot e processi automatici, rendendo il processo più economico rispetto a quello che utilizza gli acciai al carbonio. I vantaggi dell'acciaio sull'alluminio possono essere riassunti come segue:

- Le casse in alluminio hanno bisogno di un rivestimento per migliorare la resistenza alla corrosione.
- Le casse in alluminio, nonostante il materiale più leggero, non presentano una significativa riduzione di peso in quanto è presente una struttura a doppia pelle per rinforzare i lati.
- L'alluminio di grado 5000, 6000 e 7000 contengono percentuali di ferro per aumentare la rigidità. Essendo molto costoso rimuovere il ferro dagli scarti di alluminio, se quest'ultimo viene riciclato insieme ad altre leghe di alluminio, il materiale ottenuto può essere utilizzato solo per prodotti di fonderia.

Le casse così prodotte hanno una vita utile di 35 anni e con la corretta manutenzione essa si può estendere fino a 50 anni. In passato si pensava anche che una ripara-

zione potesse aumentare la vita di esercizio di ulteriori 10 anni, ma l'esperienza ha dimostrato che:

- I dispositivi ausiliari diventano obsoleti dopo appena 20 anni, e non sono recuperabili.
- Le innovazioni nelle tecnologie di produzione e l'utilizzo di componenti elettrici a risparmio energetico hanno ridotto il peso complessivo delle casse, portando a riduzioni significative nel consumo di energia e nelle emissioni di CO₂.
- Le aziende hanno ridotto la manodopera disponibile per le manutenzioni, aumentando il costo delle manutenzioni.

Caso di studio 5. In India, la rete ferroviaria rappresenta una delle principali modalità di trasporto del Paese. Vi è un costante impegno da parte delle autorità per migliorare e innovare la produzione di veicoli ferroviari, al fine di soddisfare le crescenti esigenze della popolazione e potenziare l'efficienza del sistema. Nel corso del tempo si è passati dalle carrozze in legno, a carrozze formate da gusci in acciaio al carbonio di progettazione svizzera, arrivando all'utilizzo di un mix di acciai ferritici e austenitici non verniciato. Il design delle nuove carrozze, che saranno interamente in acciaio inox, deriva da quelle di LHB⁵ dalla Germania.

1.4 Materiali compositi

I materiali compositi in fibra di carbonio rinforzata (CFRP), che presentano un elevato rapporto resistenza-peso, sono preferiti per progettare strutture complesse e leggere in vari settori industriali. In particolare, nel settore ferroviario, i compositi, grazie alla loro leggerezza e flessibilità di design, contribuiscono ad aumentare l'efficienza del carburante e la convenienza economica nello sviluppo complessivo dei veicoli ferroviari.

La leggerezza e la flessibilità dei compositi CFRP svolgono un ruolo fondamentale nell'industria ferroviaria, permettendo la progettazione di strutture complesse e aerodinamiche che riducono la resistenza dell'aria e la forza di trascinamento quando il veicolo ferroviario attraversa gallerie.

L'Unione Europea sta attualmente spingendo verso l'adozione di materiali compositi per la carrozzeria, come promosso dal progetto CARBODIN finanziato nell'ambito del programma Shift2Rail. Il progetto mira a migliorare la produzione della scocca della carrozzeria con materiali compositi. Il progetto si concentra sullo sviluppo di processi di stampaggio intelligenti, automatizzati, modulari ed efficienti in termini di costi per la produzione di scocche della carrozzeria, nonché di processi e tecnologie di produzione innovativi in grado di ridurre il peso del sistema e migliorare il comfort dei passeggeri [5].

⁵Linke Haufman Busch

Studi UE dichiarano che l'adozione di materiali compositi può essere correlata a diversi benefici per la produzione di veicoli ferroviari: riduzione del peso del 20-30%, riduzione delle emissioni di CO₂ almeno del 5%, minor costo del ciclo di vita (16%), minore impatto ambientale (26%), possibile riduzione dei costi di manutenzione.

Capitolo 2

Meccanica dei materiali compositi

2.1 Introduzione ai materiali compositi

I materiali compositi sono materiali costituiti da due o più materiali diversi che vengono combinati per creare un nuovo materiale con proprietà migliorate. Sono utilizzati nella produzione di carrozzerie ferroviarie e di carrozze per ottenere prestazioni più elevate, peso inferiore e un design migliore. Alcuni esempi di materiali compositi sono i polimeri rinforzati con fibra di carbonio o fibra di vetro e pannelli sandwich¹.

Esistono quattro tipologie di materiali compositi comunemente accettati:

- Materiali compositi **fibrosi**, che consistono in fibre leggere molto rigide e resistenti inserite in un materiale circostante chiamato matrice. Le fibre di un determinato materiale presentano rigidità e resistenza maggiori rispetto allo stesso materiale in forma sfusa. La geometria e il metodo per realizzarle sono fondamentali per la valutazione di durezza e resistenza e vanno tenute in considerazione per le applicazioni strutturali. Le diverse proprietà delle fibre sono giustificate dalla migliore struttura cristallina.
- Materiali compositi **laminati**, che consistono nella sovrapposizione di diversi livelli di almeno due materiali diversi, legati insieme. Si punta principalmente a ottenere migliore resistenza e rigidità, riduzione di peso e resistenza alla corrosione.
- Materiali compositi **particolati**, costituiti da particelle dure disperse in modo casuale in una matrice più morbida.
- Combinazione delle tipologie precedenti, come i laminati rinforzati con fibre di carbonio, essendo sia fibrosi che laminati.

¹due strati di un materiale che costituiscono le “pelli” e un secondo materiale all’interno che costituisce l’“anima”

I **laminati rinforzati con fibre** costituiscono una classe ibrida dei materiali compositi, che includono sia materiali compositi fibrosi che tecniche di laminazione. Diversi livelli di materiale rinforzato con fibre vengono legati insieme con le direzioni delle fibre di ogni lamina orientate diversamente per offrire resistenza e rigidezza del laminato complessivo nelle varie direzioni.

La matrice dei materiali fibrosi può essere costituita da quattro materiali diversi: polimeri, metalli, ceramiche e carbonio.

Lo scopo della matrice è quello di supportare le fibre e i particolati immersi in esso, proteggerli dall'ambiente esterno e trasferire i carichi tra i vari elementi. Solitamente il materiale costituente la matrice presenta densità, rigidezza e resistenza inferiori rispetto alle stesse proprietà possedute dalle fibre, ma la loro combinazione consente di ottenere comunque un elemento strutturale finale che possiede entrambe le peculiarità dei due differenti materiali: bassa densità e notevoli rigidezza e resistenza.

Le matrici polimeriche, principalmente considerate in questo studio, possono essere suddivise in due classi in base al tipo di polimero utilizzato: termoindurenti e termoplastiche.

I polimeri termoindurenti sono caratterizzati da un reticolo cristallino con molte interconnessioni tra i vari rami, a differenza dei reticoli dei materiali termoplastici che invece sono poco ramificate e con legami deboli.

I materiali compositi hanno un comportamento meccanico che differisce dai materiali ingegneristici più comuni. Solitamente quest'ultimi sono omogenei ed isotropi, hanno quindi proprietà meccaniche che non dipendono da posizione ed orientamento. I materiali compositi, al contrario, sono eterogenei e, generalmente, anisotropi, ossia le proprietà dipendono dalla posizione e dalla direzione in esame. Le lamine fibrorinforzate presentano un comportamento, in particolare, ortotropo, con le proprietà del materiale differenti nelle tre direzioni mutualmente perpendicolari.

2.2 Produzione di laminati fibrorinforzati a matrice polimerica

Le proprietà finali di un materiale composito sono fortemente influenzate dal processo produttivo utilizzato per la loro realizzazione, per cui solitamente il processo manifatturiero del materiale viene inglobato nel processo produttivo dell'elemento strutturale finale. Si vogliono quindi presentare alcuni dei principali processi produttivi, seguendo la trattazione di Badini [8].

2.2.1 Metodi manuali o semimanuali

I tessuti di fibre, o feltri², vengono disposti sul fondo di uno stampo, nel quale viene poi fatta colare la resina in stato fuso, costituente la matrice del composito, e si procede successivamente con la levigazione. Ripetendo il processo più volte, si ottiene la sovrapposizione di diversi strati. L'attrezzatura necessaria è costituita dallo stampo, il quale deve essere adeguatamente trattato, ricoperto da un agente distaccante e da un gel la cui funzione è proteggere la superficie del manufatto.

Con questo metodo è possibile ottenere una percentuale massima di fibre all'interno del manufatto pari a 25%-30% in volume e la possibile presenza di aria intrappolata nella struttura non consente di avere proprietà meccaniche ottimali.

2.2.2 Stampaggio ad alta pressione

Una miscela di resina e rinforzante viene stampato a caldo con uno stampo metallico, la cui chiusura genera una pressione tra i 10 e i 50 MPa. Tale metodo viene utilizzato per la produzione in serie di piccoli oggetti o pannelli rinforzati. Il materiale composito utilizzato può essere costituito da una serie di lamine di composito, ovvero prepreg³ con fibre lunghe disposte opportunamente, oppure una pasta. Il maggior costo dell'impianto produttivo è rappresentato dallo stampo.

2.2.3 Formatura a bassa pressione in stampo aperto

Un pannello costituito da più strati di resina e fibre pre-impregnate è depositato sullo stampo aperto, e un involucro di materiale plastico si occupa di sigillare il materiale dall'ambiente esterno. Il processo prevede la creazione del vuoto, per evitare che rimangano inclusioni d'aria, il riscaldamento e l'applicazione di una pressione che costringe il multistrato ad aderire allo stampo e prenderne la forma. Il vuoto può essere creato:

- in autoclave contenente gas inerte e riscaldando il campione;
- aspirando aria in un punto dello stampo;
- inviando aria sotto pressione nel forno.

Si ottiene un valore di pressione di circa 5 MPa. Gli stampi possono essere metallici, o nel caso in cui è richiesta una maggiore stabilità dimensionale durante il ciclo termico, è possibile adottare stampi in carboresina.

²Semilavorato derivante dalle fibre, in forma di nastro, con fibre orientate in modo casuale sul piano del feltro, legate da una minima quantità di resina.

³Semilavorato costituito da fogli di fibre lunghe allineate in una direzione, o di tessuto, pre-impregnati con la resina che costituirà la matrice del composito.

2.2.4 Formatura a bassa pressione in stampo chiuso

Il rinforzante, sotto forma di feltri, tessuti o preforme, viene disposto in uno stampo chiuso in cui viene iniettata la resina, costringendola a infiltrare il rinforzante ed allontanando così l'aria presente mediante canali di sfiato. Si creano modeste pressioni forzando la resina nello stampo e le temperature raggiunte sono limitate dal materiale dello stampo, solitamente vetroresina, per cui il processo di reticolazione richiede tempi prolungati. Si ottengono strutture finali con un contenuto di rinforzante fino al 50% in volume ed è possibile ottenere forme molto complesse senza la necessità di applicare elevate pressioni.

2.2.5 Poltrusione

Un fascio di fibre viene impregnato per immersione in una vasca contenente la resina, poi trascinato all'interno di uno stampo preriscaldato dove il manufatto prende forma e inizia il processo di reticolazione, completato in un forno successivo. Il movimento del materiale è affidato a rulli trascinanti disposti a valle, e questa tecnica può essere utilizzata solamente per la produzione di barre e manufatti continui a sezione costante.

2.2.6 Avvolgimento di fibre pre-impregnate

Nastri di fibre pre-impregnate sono avvolti su un mandrino rotante e le fibre incrociate secondo geometrie predeterminate e controllate. Terminata la disposizione si effettua un trattamento termico per indurre la reticolazione.

2.3 Comportamento macromeccanico di una lamina

Considerando le tensioni e le deformazioni in un cubo elementare in un sistema di riferimento cartesiano ortogonale xyz , è possibile scrivere la legge di Hooke generalizzata di un materiale anisotropo come:

$$\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (2.1)$$

dove:

- σ_i rappresenta le componenti della tensione con la notazione contratta
- C_{ij} rappresenta la matrice di rigidità del materiale
- ϵ_j rappresenta le componenti di deformazione con la notazione contratta

La matrice di rigidità C_{ij} contiene 36 costanti, ma per un materiale ortotropo la matrice si semplifica con sole 9 costanti:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{22} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

e, in forma inversa:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{22} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Le costanti ingegneristiche che entrano in gioco per scrivere le leggi costitutive del materiale vengono valutate mediante semplici test come la prova di trazione uniassiale e la prova di taglio puro, applicando carichi o tensioni noti. Misurando gli spostamenti o le deformazioni risultanti, si ottengono i valori delle costanti, che solitamente rappresentano la pendenza delle curve tensione-deformazione, come la costante di rigidità $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, o la pendenza delle curve deformazione-deformazione, come $\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$.

Si ottengono quindi gli elementi della matrice di deformabilità S_{ij} :

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

dove:

- E_1, E_2, E_3 sono le costanti di rigidità nelle tre direzioni
- ν_{ij} sono i rapporti di Poisson
- G_{23}, G_{31}, G_{12} sono le costanti di taglio nei piani 2-3, 3-1, 1-2

Ricordando che la matrice di deformabilità per un materiale ortotropo è simmetrica, con sole 9 costanti indipendenti, ossia $S_{ij} = S_{ji}$, come visto nell'equazione (2.3).

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad i \neq j \quad (2.5)$$

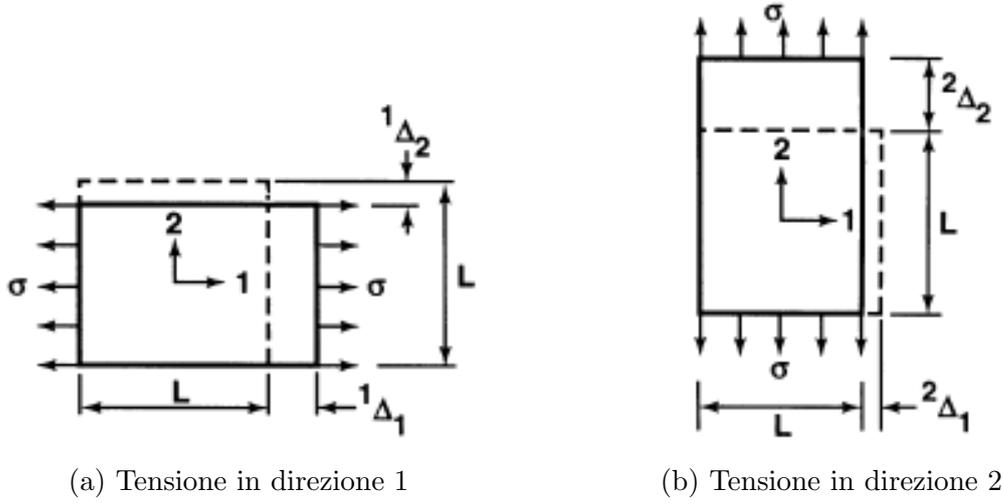


Figura 2.1: Distinzione tra ν_{12} e ν_{21} [11]

Considerando un elemento piano di dimensioni $L \times L$ come in figura (2.1), considerando la prima condizione di carico in direzione 1, con tensione applicata $\sigma_1 = \sigma$ si ottengono le deformazioni:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \quad \epsilon_2 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}\sigma \quad (2.6)$$

e gli spostamenti:

$$\Delta L_1 = \frac{\sigma L}{E_1} \quad \Delta L_2 = \frac{\nu_{12}}{E_1}\sigma L \quad (2.7)$$

Considerando la seconda condizione di carico in direzione 2, con tensione applicata $\sigma_2 = \sigma$ si ottengono le deformazioni:

$$\epsilon_1 = -\frac{\nu_{21}}{E_2}\sigma \quad \epsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} \quad (2.8)$$

e gli spostamenti:

$$\Delta L_1 = \frac{\nu_{21}}{E_2}\sigma L \quad \Delta L_2 = \frac{\sigma L}{E_2} \quad (2.9)$$

L'equazione (2.5) può essere riscritta considerando le deformazioni nelle due condizioni di carico, rispettivamente il primo e il secondo:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \left(-\frac{\epsilon_2}{\sigma}\right)_1 = \left(-\frac{\epsilon_1}{\sigma}\right)_2 = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.10)$$

e, riscrivendo rispetto agli spostamenti:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \left(\frac{\Delta L_2}{\sigma L}\right)_1 = \left(\frac{\Delta L_1}{\sigma L}\right)_2 = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.11)$$

ossia:

$$(\Delta L_2)_1 = (\Delta L_1)_2 \quad (2.12)$$

Il risultato dell'equazione (2.12)⁴ è una generalizzazione del teorema di Betti per i materiali ortotropi, secondo cui la deformazione trasversale è identica sia se la tensione applicata è in direzione 1 che in direzione 2.

La valutazione della resistenza meccanica dei materiali si basa su stati tensionali uniassiali. Ma in un generico problema di meccanica strutturale si ha uno stato tensionale biassiale, se non triassiale. È stato quindi necessario definire dei modelli matematici con cui si ottiene un valore equivalente di tensione uniassiale da confrontare con il carico limite di rottura uniassiale, ottenuto secondo opportune ipotesi di rottura.

Per i materiali compositi, sono stati definiti diversi criteri di cedimento biassiali che verranno adesso approfonditi. L'applicabilità di uno specifico criterio dipende dal fatto che il materiale studiato abbia un comportamento fragile o duttile. Per ognuno dei criteri di rottura, viene definita una condizione di carico la cui direzione non coincide con le direzioni principali del materiale. Applicando una tensione uniassiale σ_x si ottiene uno stato tensionale piano nel sistema di riferimento principale con le tensioni:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \theta \\ \tau_{12} &= -\sigma_x \sin \theta \cos \theta\end{aligned}\tag{2.13}$$

Criterio della massima tensione di rottura

Per il criterio della massima tensione di rottura, ognuna delle tensioni principali deve essere minore della rispettiva tensione di rottura del materiale. Per i carichi di trazione:

$$\sigma_1 < X_t \quad \sigma_2 < Y_t\tag{2.14}$$

e per i carichi di compressione:

$$\sigma_1 > X_c \quad \sigma_2 > Y_c\tag{2.15}$$

Si deve anche verificare che:

$$|\tau_{12}| < S\tag{2.16}$$

Nota le equazioni della (2.13) è possibile valutare i valori limite che può assumere la tensione uniassiale σ_x per non incorrere nella rottura del componente:

$$\frac{X_c}{\cos^2 \theta} < \sigma_x < \frac{X_t}{\cos^2 \theta} \quad \frac{Y_c}{\sin^2 \theta} < \sigma_x < \frac{Y_t}{\sin^2 \theta} \quad |\sigma_x| < \left| \frac{S}{\sin \theta \cos \theta} \right|\tag{2.17}$$

Criterio della massima deformazione di rottura

Per il criterio della massima deformazione di rottura, ognuna delle deformazioni principali deve essere minore della rispettiva deformazione di rottura del materiale.

⁴I pedici dopo le parentesi tonde indicano le direzioni di carico

Per i carichi di trazione:

$$\epsilon_1 < X_{\epsilon_t} \quad \epsilon_2 < Y_{\epsilon_t} \quad (2.18)$$

e per i carichi di compressione:

$$\epsilon_1 > X_{\epsilon_c} \quad \epsilon_2 > Y_{\epsilon_c} \quad (2.19)$$

Si deve anche verificare che:

$$|\gamma_{12}| < S_\epsilon \quad (2.20)$$

Per un componente composito con fibre in una sola direzione, soggetto a un carico uniassiale la cui direzione forma un angolo θ con la direzione delle fibre, la tensione ammissibile può essere valutata a partire dalle deformazioni principali ammissibili X_ϵ e Y_ϵ . Per un materiale ortotropo bidimensionale, le deformazioni principali sono scrivibili come:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2) \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1) \\ \gamma_{12} &= \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Note le equazioni della (2.13), le deformazioni principali possono essere espresse rispetto alla tensione uniassiale σ_x :

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E_1} (\cos^2 \theta - \nu_{12} \sin^2 \theta) \sigma_x \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E_2} (\sin^2 \theta - \nu_{21} \cos^2 \theta) \sigma_x \\ \tau_{12} &= \frac{1}{G_{12}} (\sin \theta \cos \theta) \sigma_x \end{aligned} \quad (2.22)$$

Le deformazioni ammissibili si ricavano dalle tensioni ammissibili:

$$X_{\epsilon_t} = \frac{X_t}{E_1} \quad Y_{\epsilon_t} = \frac{Y_t}{E_2} \quad S_\epsilon = \frac{S}{G_{12}} \quad X_{\epsilon_c} = \frac{X_c}{E_1} \quad Y_{\epsilon_c} = \frac{Y_c}{E_2} \quad (2.23)$$

ottenendo, alla fine, i valori limite per la tensione uniassiale σ_x :

$$\begin{aligned} \frac{X_c}{\cos^2 \theta - \nu_{12} \sin^2 \theta} < \sigma_x < \frac{X_t}{\cos^2 \theta - \nu_{12} \sin^2 \theta} \\ \frac{Y_c}{\sin^2 \theta - \nu_{21} \cos^2 \theta} < \sigma_x < \frac{X_t}{\sin^2 \theta - \nu_{21} \cos^2 \theta} \\ |\sigma_x| < \left| \frac{S}{\sin \theta \cos \theta} \right| \end{aligned} \quad (2.24)$$

La differenza tra i due criteri citati sta nel considerare il coefficiente di Poisson nel secondo criterio.

Criterio di rottura di Tsai-Hill

Hill ha proposto un criterio di snervamento per i materiali ortotropi:

$$(G + H) \sigma_1^2 + (F + H) \sigma_2^2 + (F + G) \sigma_3^2 + \\ - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (2.25)$$

Tale criterio di snervamento, che può essere considerato come un'estensione del criterio di von Mises, viene utilizzato come criterio di rottura poiché entrambi possono essere considerati come criteri limiti della fase elastica. Le tensioni di snervamenti di Hill, indicate con F, G, H, L, M, N prendono il nome di tensioni di rottura.

Considerando le tensioni di rottura introdotte da Tsai e viste nei precedenti due criteri, è possibile riscrivere la legge 2.28 rispetto alle tensioni di Tsai. Ipotizzando che il componente sia sollecitato con la sola tensione σ_1 , essendo il suo valore massimo ammissibile pari a X , si ottiene:

$$(G + H) X^2 = 1 \quad \Rightarrow \quad G + H = \frac{1}{X^2} \quad (2.26)$$

Analogamente si trovano tutte le tensioni di rottura:

$$\begin{aligned} G + H &= \frac{1}{X^2} \\ F + H &= \frac{1}{Y^2} \\ F + G &= \frac{1}{Z^2} \\ 2N &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Per un materiale ortotropo bidimensionale, con stato tensionale piano, le tensioni σ_3 , τ_{23} e τ_{13} sono nulle, per cui la legge di Hill diventa:

$$(G + H) \sigma_1^2 + (F + H) \sigma_2^2 + 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (2.28)$$

Combinando le equazioni della 2.27 si ottengono le relazioni tra i parametri di Hill F, G, H con i parametri di Tsai X, Y, Z :

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\ 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Si ottiene quindi la legge di Tsai-Hill:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (2.30)$$

Come per i precedenti criteri, nel caso di una lamina le cui fibre sono orientate secondo la direzione 1 e si ha una tensione uniassiale σ_x lungo una direzione che forma un angolo θ con la direzione principale 1, ricordando le leggi 2.13 si ottiene:

$$\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left[\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right] \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (2.31)$$

Per una lamina in composito, i valori di resistenza a trazione e compressione sono differenti, per cui i valori di X e Y devono essere valutati correttamente in base al tipo di sollecitazione.

A differenza dei precedenti criteri, si ottiene un'unica formulazione matematica da cui è possibile valutare la massima tensione σ_x ammissibile. Inoltre, la corrispondenza tra i risultati di questo criterio e i valori sperimentali è migliore rispetto alle precedenti.

Criterio di rottura di Hoffman

Per tenere in considerazione le diverse tensioni di rottura a trazione e compressione, Hoffman ha aggiunto dei termini lineari all'equazione di Hill (2.25):

$$C_1 (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2 (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3 (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \\ + C_4 \sigma_1 + C_5 \sigma_2 + C_6 \sigma_3 + C_7 \tau_{23}^2 + C_8 \tau_{31}^2 + C_9 \tau_{12}^2 = 1 \quad (2.32)$$

dove le nove costanti C_i sono ottenute dalle nove tensioni di rottura nelle direzioni principali del materiale $X_t, X_c, Y_t, Y_c, Z_t, Z_c, S_{23}, S_{31}, S_{12}$. Considerando uno stato di tensione piano per il piano 1-2 e una condizione di isotropia trasversale nel piano 2-3, in modo da ottenere $Z_t = Y_t, Z_c = Y_c, S_{31} = S_{12}$, la legge 2.32 diventa:

$$-\frac{\sigma_1^2}{X_c X_t} + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_c X_t} - \frac{\sigma_2^2}{Y_c Y_t} + \frac{X_c + X_t}{X_c X_t} \sigma_1 + \frac{Y_c + Y_t}{Y_c Y_t} \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (2.33)$$

Nel caso di tensioni di rottura uguali in trazione e compressione, tale formulazione diventa identica al criterio di Tsai-Hill visto precedentemente.

Criterio di rottura del tensore di Tsai-Wu

Tutti i criteri precedenti non hanno una congruenza perfetta tra valori sperimentali e valori teorici. Per migliorare la congruenza, è necessaria una legge con più termini. Tsai e Wu introducono una nuova formulazione, dove la resistenza del materiale è espressa sotto forma di tensore, per cui è necessaria una nuova definizione di resistenza.

Una superficie di rottura in uno spazio a sei dimensioni ha la forma:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (2.34)$$

dove F_i e F_{ij} sono tensori di resistenza, rispettivamente, di rango due e rango quattro, e i termini σ_i rappresentano le tensioni con la notazione contratta.

La legge 2.34 ridotta a un caso di stato tensionale piano per un materiale ortotropo diventa:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2.35)$$

I termini lineari che coinvolgono le tensioni sono utili per rappresentare le diverse resistenze a trazione e a compressione, mentre i termini quadratici corrispondono più o meno con i termini visti in precedenza nella legge di Tsai-Hill.

La maggior parte degli elementi del tensore di resistenza sono ottenuti dalle resistenze ingegneristiche. Per esempio, considerando un carico di trazione che genera una tensione uniassiale σ_1 , da 2.35 si ottiene che la tensione massima ammissibile:

$$F_1X_t + F_{11}X_t^2 = 1 \quad (2.36)$$

e, con un carico di compressione:

$$F_1X_c + F_{11}X_c^2 = 1 \quad (2.37)$$

Risolvendo le ultime due equazione, e svolgendo lo stesso ragionamento, si ottengono tutti i valori del tensore di resistenza:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} & F_{11} &= -\frac{1}{X_tX_c} \\ F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} & F_{22} &= -\frac{1}{Y_tY_c} \\ F_6 &= 0 & F_{66} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Il termine F_{12} non può essere valutato con test di carico uniassiale. Considerando uno stato di tensione biassiale in cui si ha $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ l'equazione 2.35 diventa:

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1 \quad (2.39)$$

Risolvendo l'equazione 2.39 rispetto a F_{12} e sostituendo i valori calcolati in 2.38:

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left[\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right] \sigma + \left[\frac{1}{X_tX_c} + \frac{1}{Y_tY_c} \right] \sigma^2 \right] \quad (2.40)$$

In letteratura sono disponibili alcune espressioni empiriche che il coefficiente F_{12} :

Tsai-Hill

$$F_{12} = -\frac{1}{2X_t^2}$$

Hoffman

$$F_{12} = -\frac{1}{2X_tX_c}$$

Mises-Hencky

$$F_{12} = -\frac{1}{2\sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}}}$$

2.4 Comportamento macromeccanico di un laminato

2.4.1 Introduzione

Un laminato è costituito da due o più lamine legate insieme in modo che si comportino come un unico elemento strutturale. Le rigidità e le resistenze, nelle diverse direzioni, sono ottenute dalle proprietà delle singole lamine costituenti il laminato secondo diverse procedure che consentono di analizzare e combinare le proprietà delle lamine che possiedono direzioni principali arbitrarie, e quindi in generale differenti tra le varie lamine.

L'analisi fondamentale per un laminato può essere spiegata utilizzando, in prima considerazione, un laminato con sole due lamine, una lamina con le fibre orientate nella direzione x e una lamina con le fibre a 90° rispetto alla direzione x (figura 2.2).

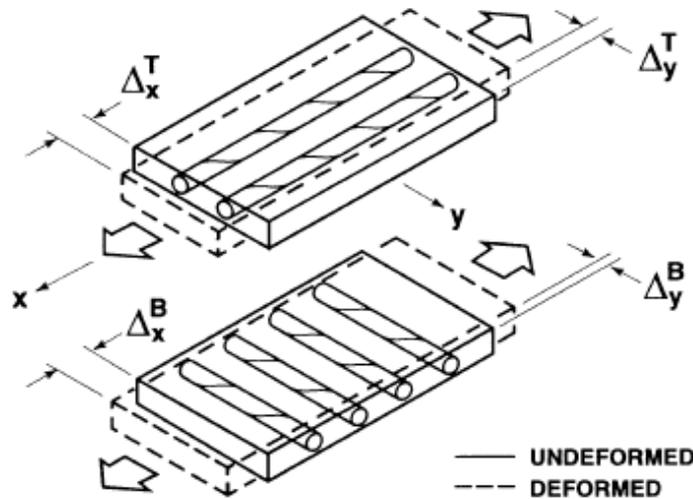


Figura 2.2: Analisi di un laminato a due strati

Considerando i due strati separati e sottoposti al carico compressivo N_x , questo si distribuisce sulle due lamine in modo da ottenere la stessa deformazione nella direzione x . Lo strato superiore, con le fibre orientate lungo la direzione x , presenta tensioni maggiori essendo più rigido rispetto allo strato inferiore, con le fibre orientate ortogonalmente. Le tensioni in direzione x sono legate dalla relazione:

$$\Delta_x^T = \Delta_x^B \quad \Rightarrow \quad \epsilon_1^T \mathcal{L} = \epsilon_2^B \mathcal{L} \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_x^T}{E_1} = \frac{\sigma_x^B}{E_2} \quad (2.41)$$

Si considerino gli spostamenti in direzione y di entrambi gli strati. Senza il legame tra le due lamine, lo spostamento laterale dipende dalle proprietà delle singole lamine e dalle tensioni che si sono sviluppate, ottenendo due spostamenti distinti legati dalla seguente relazione:

$$\begin{aligned} \Delta_y^T &= \epsilon_2^T t = S_{12} \sigma_x^T t \\ \Delta_y^B &= \epsilon_1^B t = S_{12} \sigma_x^B t \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta_y^T}{\Delta_y^B} = \frac{\sigma_x^T}{\sigma_x^B} = \frac{E_1}{E_2} \quad (2.42)$$

La deformazione della lamina superiore è maggiore rispetto a quella della lamina inferiore. Avere spostamenti diversi viola la condizione di compatibilità delle deformazioni delle due lamine. I due spostamenti devono essere identici, ciò comporta la formazione di una tensione σ_y che ha lo scopo di allargare la lamina superiore e restringere la lamina inferiore. Tale tensione può essere valutata considerando l'equilibrio delle forze in direzione y :

$$\sigma_y^T L t + \sigma_y^B L t = 0 \quad (2.43)$$

dove:

- L è la lunghezza della lamina
- t è lo spessore della lamina

Le forze devono equilibrarsi non essendoci forze esterne in direzione y , per cui sono uguali e opposte.

Ne risulta che gli spostamenti in direzione x sono influenzati anche dalle tensioni sviluppate in direzione y , e per mantenere gli spostamenti uguali anche le tensioni σ_x si riaggiustano per mantenere la compatibilità delle deformazioni (eq. 2.44).

$$\Delta_x^T = \epsilon_1^T L = \left(\frac{\sigma_x^T}{E_1} + S_{12} \sigma_y^T \right) L = \left(S_{12} \sigma_x^B + \frac{\sigma_y^B}{E_2} \right) L = \epsilon_2^B L = \Delta_x^B \quad (2.44)$$

Questo processo passo-passo di aggiustamento delle tensioni e deformazioni per mantenere valide le ipotesi di:

- compatibilità delle deformazioni
- relazioni tensione-deformazione
- equilibrio

ha posto le basi per l'analisi dei laminati, che prende il nome di "teoria classica di laminazione".

2.4.2 Teoria classica di laminazione

La teoria classica della laminazione consiste in una raccolta di ipotesi di sollecitazione e deformazione che fanno parte della meccanica dei materiali. Consente di ottenere le proprietà del laminato partendo direttamente dalle proprietà della singola lamina [11].

Comportamento tensione-deformazione di una lamina

Il comportamento tensione-deformazione nelle direzioni principali del materiale di una lamina con materiale ortotropo in uno stato tensionale piano si rappresenta come:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

La stessa relazione, per qualunque sistema di riferimento nel piano della lamina, si esprime come:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

L'equazione 2.46 può essere utilizzata per esprimere il comportamento tensione-deformazione della generica lamina k :

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\epsilon\}_k \quad (2.47)$$

Variazione di tensione e deformazione lungo lo spessore del laminato

Si ipotizzi che il laminato sia costituito da lamine perfettamente legate tra loro. In particolare, i legami sono assunti infinitesimamente sottili e non deformabili a taglio. Ciò implica che gli spostamenti sono continui tra le frontiere delle lamine, e quindi nessuna lamina può scorrere su quelle adiacenti. Il laminato si comporterà come costituito da un unico strato con specifiche proprietà, costituendo un unico elemento strutturale [11].

Se il laminato è sottile, si consideri l'ipotesi di Kirchhoff per le piastre, che prevede che le sezioni inizialmente perpendicolari alla superficie media rimangono perpendicolari anche in seguito alla deformazione [4].

Tale ipotesi implica che gli spostamenti nelle tre direzioni x , y e z possono essere espressi in funzione dello spostamento di un punto giacente sulla superficie media del laminato e dell'angolo di rotazione della sezione trasversale dovuto alla flessione del laminato, come da figura 2.3, e possono essere ignorate le deformazioni per taglio nei piani ortogonali alla superficie media:

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

Inoltre, le sezioni normali si considerano di altezza costante, per cui anche la deformazione in direzione z è trascurabile:

$$\epsilon_z = 0$$

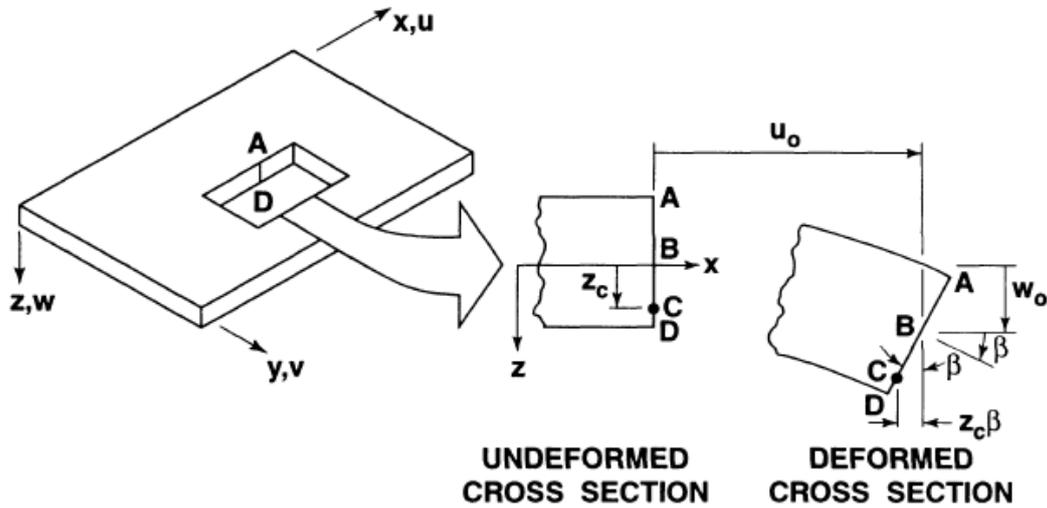


Figura 2.3: Deformazione nel piano $x - z$ [11]

La linea ABCD in figura 2.3 rimane dritta e ortogonale alla superficie media, per cui lo spostamento del punto C sarà esprimibile dalla legge:

$$u_C = u_o - z_C \beta \quad (2.48)$$

L'angolo β corrisponde alla pendenza della superficie media del laminato in direzione x :

$$\beta = \frac{\partial w_o}{\partial x} \quad (2.49)$$

Riscrivendo l'equazione 2.48 in funzione della legge 2.49 si ottiene:

$$u = u_o - z \frac{\partial w_o}{\partial x} \quad (2.50)$$

e in modo analogo lo spostamento in direzione y è espresso come:

$$v = v_o - z \frac{\partial w_o}{\partial y} \quad (2.51)$$

Le deformazioni del laminato, nel caso di piccole deformazioni e quindi nel campo di elasticità lineare del materiale, si esprimono come:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Unendo le equazioni in 2.52 con 2.50 e 2.51 si ottiene:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\partial u_o}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v_o}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_o}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_o}{\partial x \partial y}\end{aligned}\tag{2.53}$$

o, in forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^\circ \\ \epsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}\tag{2.54}$$

dove:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^\circ \\ \epsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_o}{\partial x} \\ \frac{\partial v_o}{\partial y} \\ \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} \end{bmatrix}\tag{2.55}$$

e:

$$\begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_o}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_o}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}\tag{2.56}$$

Risulta che le deformazioni dipendono solamente dalle deformazioni e rotazioni della superficie media, e dalla posizione lungo la direzione z che si vuole valutare.

Sostituendo l'equazione 2.54 nella legge tensioni-deformazioni della singola lamina 2.47, e ricordando che le deformazioni di ogni lamina devono essere uguali alle deformazioni del laminato, si ottiene che le tensioni della k -esima lamina espresse in funzione delle deformazioni e rotazioni del piano medio del laminato:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \epsilon_x^\circ \\ \epsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}\tag{2.57}$$

I coefficienti \bar{Q}_{ij} possono differire da una lamina all'altra, per cui anche in presenza di variazione lineare della deformazione lungo lo spessore del laminato, si ha che la variazione di tensioni è generalmente lineare solo lungo lo spessore della singola lamina, e presenta discontinuità all'interfaccia tra le lamine (figura 2.4).

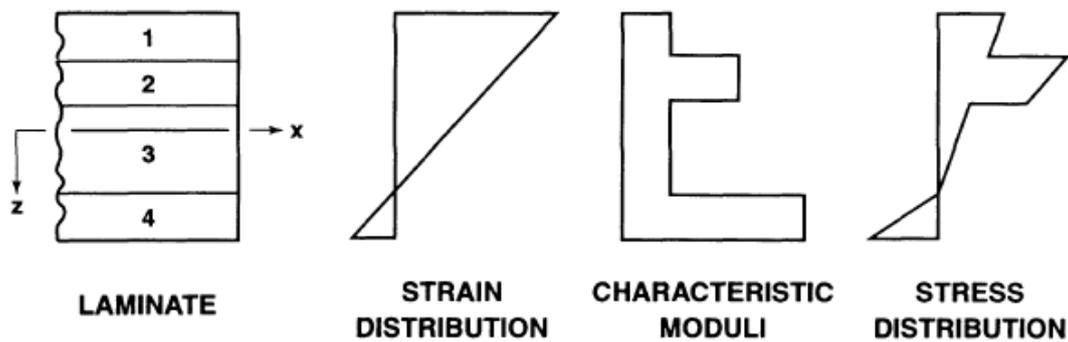


Figura 2.4: Variazione ipotetica di deformazioni e tensioni lungo lo spessore del laminato, che evidenzia le discontinuità all'interfaccia delle lamine [11]

Forze e momenti risultanti sul laminato

Le forze e i momenti risultanti che agiscono sul laminato sono ottenuti per integrazione delle tensioni in ogni lamina:

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dx \quad M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dx \quad (2.58)$$

Le forze e i momenti sono espressi per unità di larghezza della sezione trasversale del laminato, come mostrato nelle figure 2.5 e 2.6. Le forze e i momenti si possono

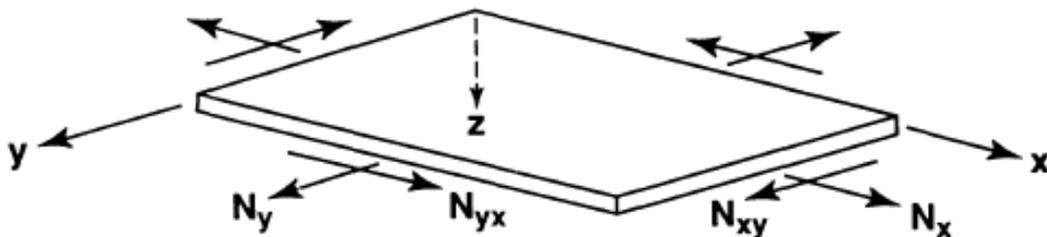


Figura 2.5: Forze nel piano su un laminato piatto [11]

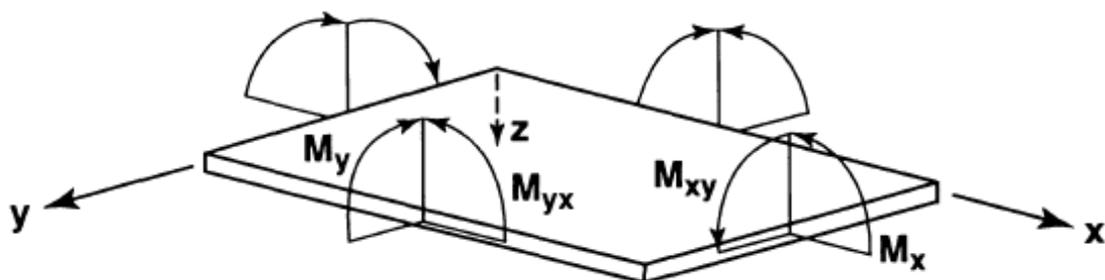


Figura 2.6: Momenti su un laminato piatto [11]

calcolare come somma di forze e momenti di ogni lamina:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \quad (2.59)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz \quad (2.60)$$

dove z_k e z_{k-1} vengono definiti in accordo con la figura 2.7: ovvero:

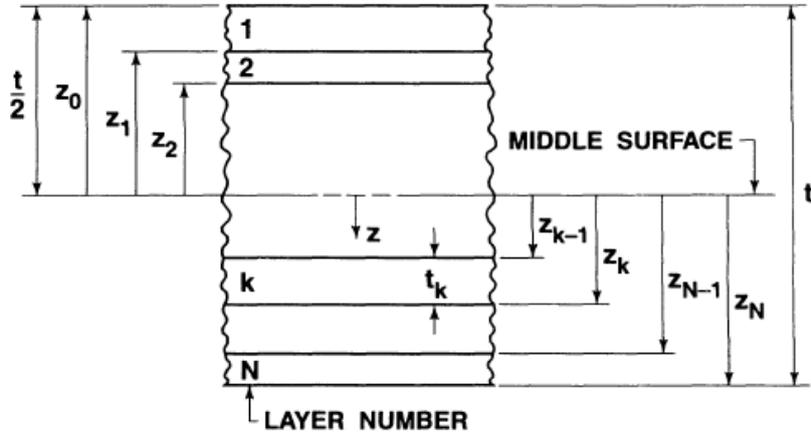


Figura 2.7: Geometria di un laminato a N strati [11]

- z_k è la distanza dal piano medio del laminato al piano inferiore della lamina k -esima
- z_{k-1} è la distanza dal piano medio del laminato al piano superiore della lamina k -esima

Tenendo in considerazione la legge 2.57, è possibile le leggi di forze e momenti esplicitando la dipendenza dalla rigidezza della singola lamina e dalle deformazioni al piano medio del laminato:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z dz \right] \quad (2.61)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right] \quad (2.62)$$

Ricordando che ϵ_x° , ϵ_y° , γ_{xy}° , κ_x , κ_y e κ_{xy} non dipendono da z , possono essere portati fuori dal segno di sommatoria e le equazioni vengono riarrangiate come:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^\circ \\ \epsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^\circ \\ \epsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

dove:

- $A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\overline{Q_{ij}})_k (z_k - z_{k-1})$ sono le rigidzze estensionali
- $B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\overline{Q_{ij}})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$ sono le rigidzze di accoppiamento
- $D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\overline{Q_{ij}})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$ sono le rigidzze flessionali

La presenza delle rigidzze di accoppiamento fa sì che non è possibile sottoporre a trazione/compressione un laminato senza anche ottenere flessione dello stesso.

2.4.3 Resistenza di un laminato

La resistenza di un laminato, come stato per la rigidzza, dipende dalle caratteristiche delle lamine che lo compongono, dalla loro resistenza e dalle loro interazioni reciproche [11].

Non è possibile formulare un criterio di cedimento che tenga conto delle resistenze di tutti gli strati componenti il laminato, per cui l'unico modo per valutare la sua resistenza è quella di effettuare un calcolo iterativo in cui si aumenta progressivamente il carico applicato e si valuta lo stato tensionale nelle varie lamine usando i criteri discussi al paragrafo 2.3.

Nel momento in cui si trova un carico per cui si ha il cedimento della prima lamina, bisogna capire come degradare le sue proprietà:

1. Portare rigidzza e resistenza a zero (o quasi zero per evitare singolarità nella matrice), considerando quindi si abbia un cedimento delle fibre;
2. Continuare a considerare la sola rigidzza e resistenza nella direzione delle fibre, azzerando le altre, considerando quindi il cedimento della matrice.

Una volta aver degradato la lamina, si valuta come varia lo stato tensionale nelle altre lamine con lo stesso carico. Verificato che non ci sono altre rotture, si aumenta il carico e si ripete la procedura, fino ad arrivare al cedimento di tutte le lamine.

Nella teoria classica di laminazione non vengono prese in considerazione le tensioni σ_z , τ_{xz} e τ_{yz} . Tali tensioni prendono il nome di tensioni interlaminari e si sviluppano sulle facce di interconnessione nei pressi dei bordi liberi per bilanciare le tensioni che secondo la teoria classica si sviluppano in ogni strato, ma che non potrebbero esistere su un bordo libero.

2.5 Giunzione dei materiali compositi

2.5.1 Introduzione

Solitamente la scelta del meccanismo di giunzione dei materiali compositi rientra in una fase secondaria del processo di progettazione, ma si è visto che ogni applicazione richiede un opportuno studio per scegliere il corretto meccanismo di giunzione ed evitare problemi successivi che possano portare alla modifica del progetto [13].

È bene ricordare che il problema di giuntare i materiali compositi sta nella difficoltà di mantenere la continuità e l'integrità delle fibre attraverso il giunto. Per cui, il comportamento di un prodotto costruito in composito è fortemente influenzato dalla scelta del tipo di giunzione.

La flessibilità progettuale offerta dall'utilizzo di materiali compositi può indurre alla decisione di non utilizzare giunzioni, in modo da ridurre i fenomeni di debolezza locale e di aumento di peso. Ma esistono altrettante buone ragioni per ricorrere all'utilizzo delle giunzioni:

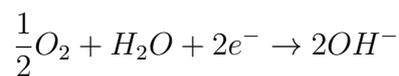
- Funzionalità
- Facilitare la fabbricabilità
- Riduzione dei costi
- Valorizzazione estetica

Va anche approfondito il legame tra materiali compositi in fibra di carbonio e i metalli, in quanto l'interazione diretta tra le fibre di carbonio e il metallo può portare a fenomeni di corrosione come la corrosione galvanica [6], in quanto le fibre sono conduttori elettrici. Tale tipo di corrosione si presenta quando due metalli diversi sono immersi in una soluzione elettrolitica. La differenza di potenziale elettrochimico che si instaura tra i due genera una debole corrente elettrica che con il tempo corrode i metalli. I cinque requisiti affinché si presenti la corrosione galvanica sono:

- un materiale metallico che si può corrodere;

- un composito elettricamente conduttivo, come appunto la fibra di carbonio;
- una connessione elettrica tra metallo e fibra di carbonio, ovvero l'assenza di un isolante elettrico tra i due materiali;
- un elettrolita, come l'acqua salata;
- la presenza di ossigeno.

Il problema diventa anche peggiore quando il materiale metallico è rappresentato da rivetti e bulloni, in quanto si ha una grande area superficiale di materiale composito accoppiata a piccole parti metalliche. La cella galvanica è costituita dalla fibra di carbonio che si comporta da catodo e dal metallo dei rivetti che si comporta da anodo. Per la differenza di potenziale elettrochimico accennata prima, si crea quindi uno spostamento di elettroni dai rivetti alla fibra di carbonio, la quale interagisce con l'umidità e l'ossigeno presenti nell'aria. La fibra di carbonio non reagisce, comportandosi da materiale nobile, e cede gli elettroni ricevuti a ossigeno e acqua, che si riducono e formano:



Il metallo invece, meno nobile della fibra di carbonio, si ossida e si lega con gli ioni OH^- liberi disponibili.

Per limitare il fenomeno, si può agire su diversi aspetti:

- il materiale costituente i rivetti;
- isolare elettricamente i due materiali a contatto, per esempio con l'aggiunta di un rivestimento in fibra di vetro.

Gli studi pubblicati [6] sottolineano come alluminio e acciaio al carbonio risentono parecchio della corrosione galvanica quando sono a contatto con la fibre di carbonio. L'acciaio inossidabile invece non presenta fenomeni di corrosione quando connesso con il composito, ma possono verificarsi dei fenomeni di corrosione locale, come il pitting o la corrosione da fessura, quando la connessione avviene in un ambiente contenente cloruro di sodio areato.

Il titanio è il materiale che meglio si comporta, in quanto, nonostante il suo potenziale elettrochimico faccia supporre sia un metallo attivo, su di esso si forma uno strato di ossido protettivo, denso e stabile, che fa sì che il materiale non reagisca con l'ambiente esterno, comportandosi quindi come un materiale nobile. Per cui, il titanio e le sue leghe sono completamente resistenti alla corrosione galvanica quando accoppiati con le fibre di carbonio.

2.5.2 Tecniche di giunzione

La scelta del processo di giunzione, la sua progettazione e i materiali da utilizzare sono influenzati dai seguenti fattori:

- Tipo di giunzione:
 - flessibile
 - fissa
- Durata della giunzione:
 - breve
 - indefinita
- Uso della giunzione:
 - monouso
 - riutilizzabile
- Smontaggio e riciclaggio:
 - permanente
 - smontaggio a fine vita
- Operatività, ossia come la funzione deve funzionare durante l'uso del prodotto.

Le giunzioni possono essere categorizzate, in funzione delle forze esercitate, in:

- fissaggio meccanico
- incollaggio con adesivi
- saldatura

Fissaggio meccanico

Il fissaggio meccanico è una delle tecniche di giunzione più ampiamente utilizzata nella storia, ma la sua applicazione con i materiali compositi prevede l'adozione di regole e linee guida diverse da quelle solitamente utilizzate con gli altri materiali, in quanto il danneggiamento delle fibre durante le fasi di taglio e foratura può compromettere la funzionalità del componente finale.

Con fissaggio meccanico si intende tutte le giunzioni in cui si ha un elemento separato di fissaggio che viene inserito nei due materiali da unire, per trasferire i carichi. Richiedono generalmente la realizzazione di un foro in tutte le parti da unire, fanno eccezione gli elementi che sono già incorporati nella parte in composito, durante la fase di polimerizzazione. Possono essere di due categorie, permanenti e rimovibili, e i materiali principalmente usati sono metallici e non metallici.

Come discusso nel paragrafo precedente, il materiale utilizzato dipende dall'ambiente di interazione tra l'elemento fissante stesso e il materiale composito, per evitare la corrosione galvanica. Nel caso dei materiali CFRP si vanno a prediligere elementi in

titano o acciaio inossidabile. I dispositivi in materiale non metallico sono costituiti da polimeri termoplastici o termoindurenti rinforzati.

I fori necessari per l'inserimento di tali collegamenti possono essere realizzati nella fase di produzione del composito stesso, mediante un processo di posizionamento e orientamento delle fibre. I fori realizzati dopo la produzione, mediante tecniche di asportazione del materiale, sono più comuni perché offrono flessibilità nel posizionamento dei fissaggi e possono compensare disallineamenti e variazioni geometriche. Di contro, questi processi meccanici possono introdurre difetti nel composito come delaminazione, danneggiamento delle fibre e degrado termico.

Le principali modalità di cedimento dei giunti meccanici sono:

- cedimento per trazione alla sezione netta
- cedimento per taglio a strappo
- cedimento per compressione superficiale, o schiacciamento
- cedimento per clivaggio
- cedimento del bullone o rivetto

I cedimenti per trazione alla sezione netta e taglio a strappo sono improvvisi e catastrofici, mentre il cedimento per compressione superficiale si verifica quando la deformazione del foro diventa eccessiva, ottenendo quindi un cedimento graduale e progressivo, non catastrofico (figura 2.8).

Si definiscono alcuni parametri geometrici per favorire il cedimento meno catastrofico. Tali parametri sono i rapporti e/d e w/d , che devono assumere i seguenti valori:

$$\frac{e}{d} > 3 \quad \frac{w}{d} > 4$$

dove (vedi figura 2.9):

- e è la distanza tra il foro e il margine finale;
- w è la larghezza;
- d è il diametro del foro.

Operando in questi intervalli, il carico di rottura diventa indipendente dal valore assunto dai rapporti.

La disposizione degli strati, e l'orientamento delle fibre di ognuno, costituenti un laminato può influenzare la resistenza dei giunti. Un giunto in un laminato unidirezionale cede per taglio se sono applicati carichi, anche molto massi, con direzione parallela alle fibre, mentre cede per trazione alla tensione netta se sono applicati

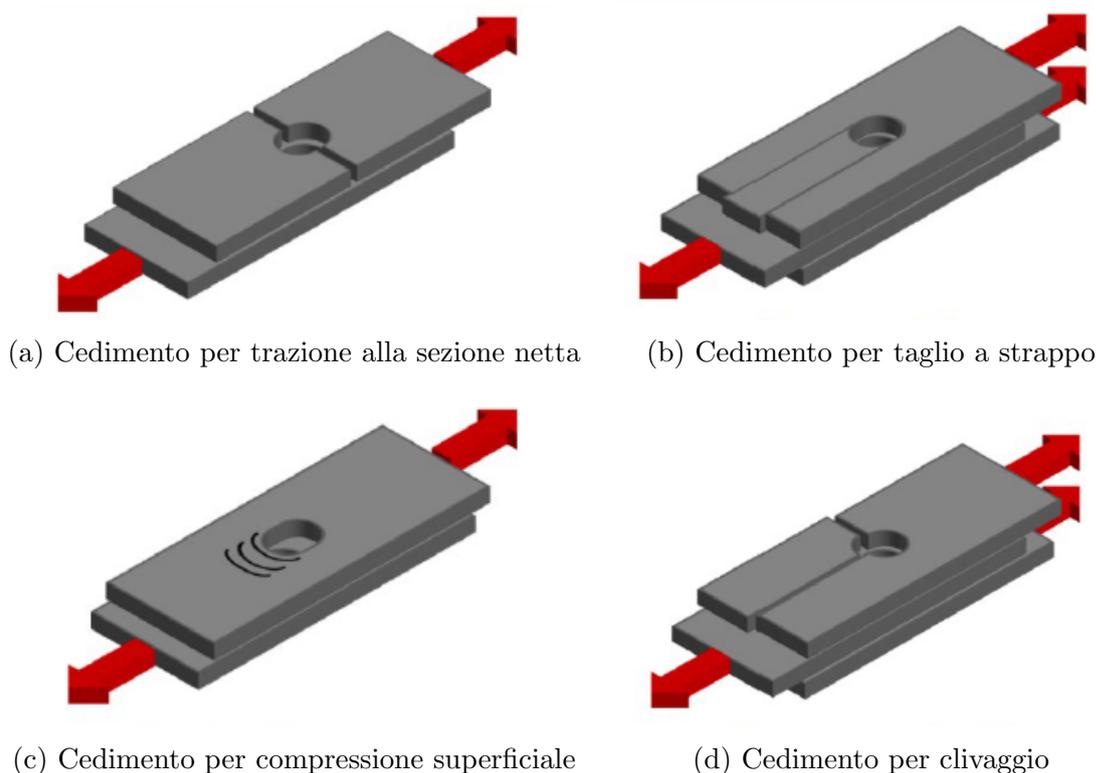


Figura 2.8: Quattro dei principali tipi di cedimento. [13]

carichi con direzione normale alle fibre. Aumentando la presenza di lamine orientate a $\pm 45^\circ$, la resistenza al taglio aumenta fino a quando il cedimento per compressione superficiale diventa predominante. Ulteriori aumenti del numero di lamine con tale orientazione porta invece ad ottenere il cedimento per trazione predominante, in quanto i laminati $\pm 45^\circ$ hanno una resistenza a trazione inferiore.

La resistenza di un giunto meccanico è anche influenzata dallo spazio presente tra il bordo del foro praticato nel materiale composito e l'elemento meccanico di collegamento. Maggiore è lo spazio, minore è la resistenza del giunto, causando cedimento per trazione alla sezione netta. La condizione ideale è rappresentata da accoppiamento con interferenza, ma ciò causerebbe il danneggiamento del materiale durante la fase di montaggio. Non essendo realizzabile una condizione con gioco nullo tra i due elementi, si cerca di renderlo il più piccolo possibile.

Incollaggio con adesivi

L'incollaggio con adesivi rappresenta la tecnica di giunzione più versatile, e per i materiali compositi rappresenta spesso il metodo più pratico per poterli combinare con altri materiali, come polimeri e metalli [13]. I materiali fibro-rinforzati stessi possono essere definiti come prodotti ottenuti dall'adesione di due materiali diversi, una resina e le fibre strutturali al loro interno.

L'incollaggio è un processo considerabile bidimensionale, in cui tensioni e deformazioni

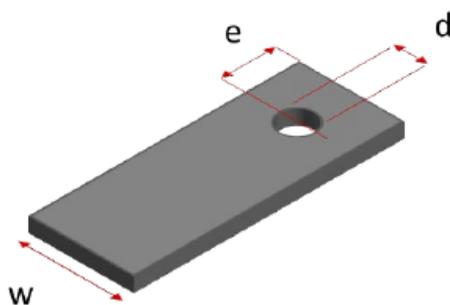


Figura 2.9: Parametri geometrici di un tipico provino. [13]

vengono trasferite attraverso un'interfaccia tra due piani: il substrato e l'adesivo. Quando lo spessore dello strato adesivo è ridotto, inferiore a $100 \mu m$, l'adesivo può essere descritto come un'unica zona di interfaccia tra i due substrati. Per adesivi di spessore maggiore, essi diventano un componente a sé, e il giunto andrebbe studiato come costituito da due substrati, due interfacce e uno strato adesivo, con le sue proprietà inerziali che incidono sulle prestazioni del giunto.

Gli adesivi, grazie alla loro capacità di trasferire carichi su ampie superfici, generando un impatto minimo sulla superficie sottostante, sono spesso la scelta preferita rispetto alle giunzioni meccaniche, che danneggiano le fibre e creano regioni di elevata concentrazione di tensioni. Per ottenere prestazioni ottimali da una giunzione adesiva, è necessario un pretrattamento delle superfici.

Saldatura

La saldatura, nota anche come giunzione per fusione, è una tecnologia utilizzabile solo con i materiali compositi la cui resina è un polimero termoplastico, in quanto offre la possibilità di essere fuso e modellato nuovamente [13]. I compositi a matrice termoindurente possono essere saldati interponendo un polimero termoplastico che viene fuso per creare il giunto tra i due materiali termoindurenti.

Le tecniche utilizzate possono essere classificate in funzione del metodo con cui viene fornito calore per fondere la resina:

- Riscaldamento elettromagnetico
- Riscaldamento meccanico
- Tecniche di riscaldamento esterno

Ogni tecnica di saldatura presenta vantaggi e svantaggi che la rendono adatta o meno alle varie applicazioni, a seconda dei requisiti specifici.

Capitolo 3

Progettazione della fiancata

3.1 Cassa originale in acciaio

La cassa originale è progettata con due diversi tipi di acciaio inossidabile, usati rispettivamente per le lamiere che compongono la cassa e per le strutture di fissaggio dei carrelli e del gancio di traino.

| Materiale | Modulo di elasticità [MPa] | Densità [kg/dm ³] | Tensione di snervamento [MPa] | Parte di cassa |
|-----------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| SUS301L | 210 | 7.85 | 345 | Lamiere della cassa |
| S355J2 | 210 | 7.85 | 355 | Strutture di fissaggio dei carrelli |

Tabella 3.1: Acciai utilizzati nella progettazione della cassa

Si riportano le dimensioni e il peso della struttura, di cui si riportano alcune rappresentazioni in figura 3.1:

| | |
|-----------|---------|
| Lunghezza | 21.65 m |
| Larghezza | 2.76 m |
| Altezza | 3.18 m |
| Massa | 7659 kg |

Tabella 3.2: Dimensioni della cassa in acciaio

La fiancata è costituita da lamiere sovrapposte e saldate (figura 3.2), e la maggior parte dei carichi è sostenuta dalle lamiere piegate a forma di omega (figura 3.3), disposte sia verticalmente che in direzione longitudinale, saldate sul lato interno della fiancata.

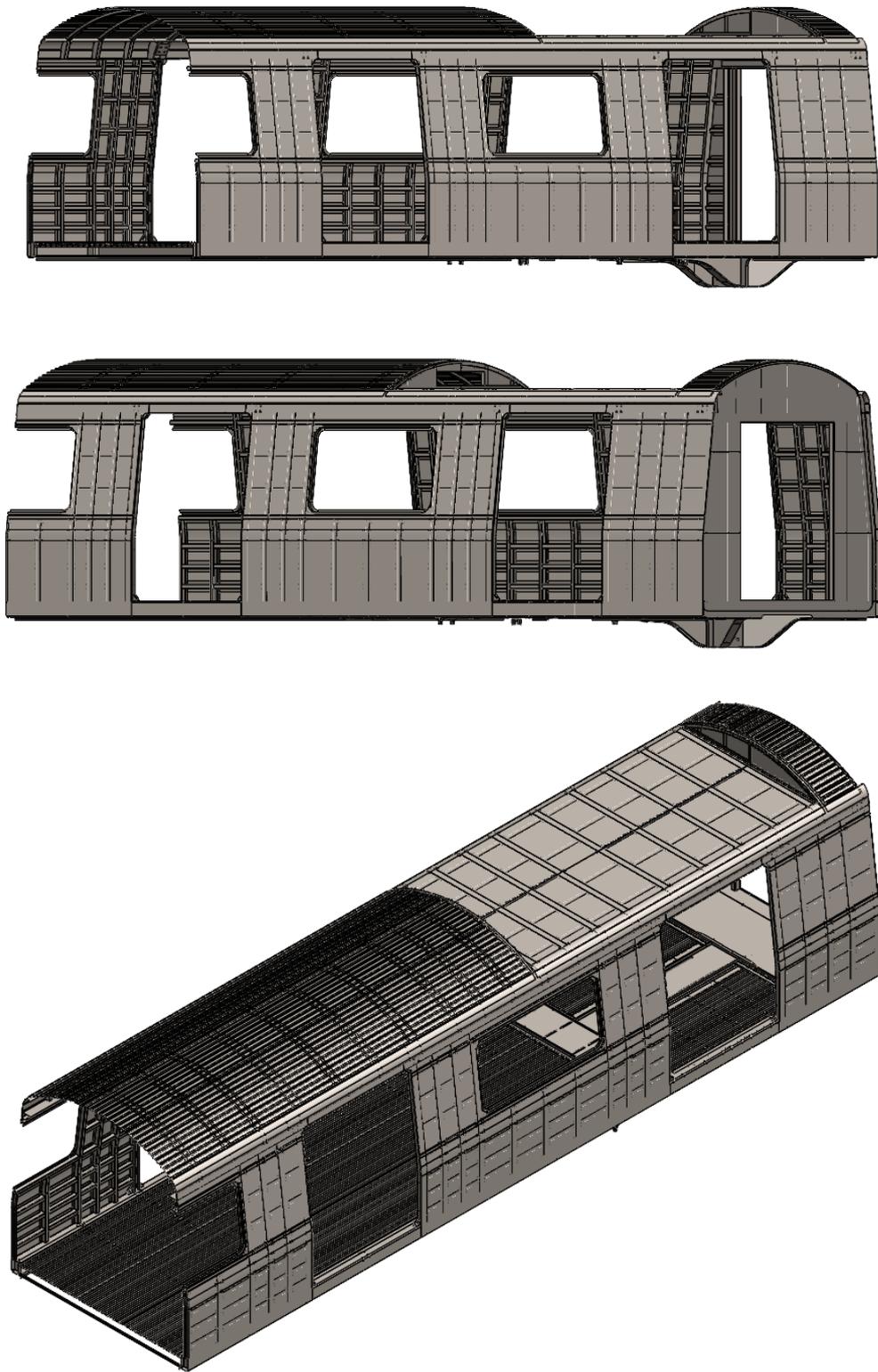


Figura 3.1: Rappresentazione di metà cassa, interamente in acciaio

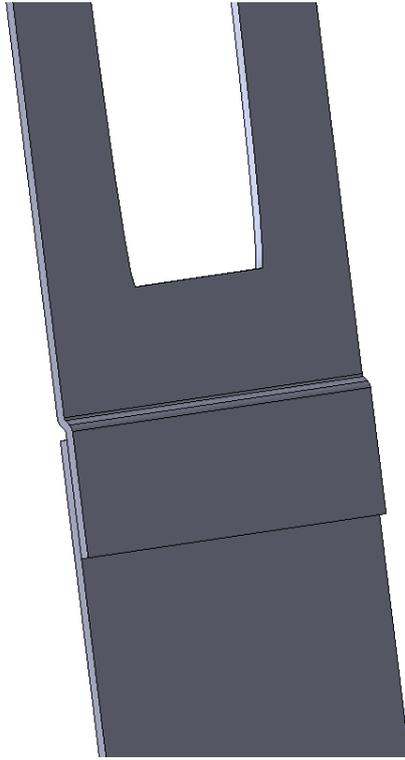


Figura 3.2: Parte di fiancata in acciaio, costituita da lamiere parzialmente sovrapposte e saldate

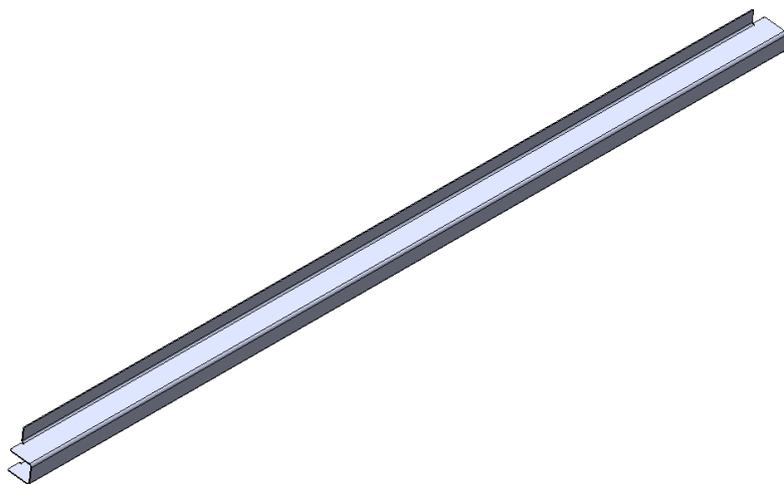


Figura 3.3: Lamiera di sostegno a forma di omega (Ω)

3.2 Fiancata in materiale composito

3.2.1 Introduzione

L'obiettivo principale è quello di ridurre il peso finale della cassa garantendo comunque il rispetto dei requisiti imposti dalla normativa vigente. Considerando le ricerche effettuate e convenzionate dall'Unione Europea, si è optato per l'impiego di un materiale composito per la progettazione della fiancata. In particolare, è stato scelto di utilizzare un materiale composito costituito da resina epossidica rinforzata con fibre di carbonio unidirezionali di rigidità pari a 230 GPa. Il materiale presenta le proprietà in tabella 3.3.

Il laminato è costituito da tre livelli di spessore 2 mm ciascuno, per un totale di 6 mm. Le fibre sono orientate con angoli di 90° , 0° e 90° rispetto all'asse di riferimento longitudinale della cassa. Presenta un peso complessivo di 452 kg con lunghezza pari a 21.642 m.

La parete viene progettata in modo da essere formata da tre elementi distinti e ripetibili in fase di produzione, e poi fissati insieme per costituire l'intera parete. La resina epossidica è un polimero termoindurente, quindi non è possibile utilizzare metodi di fissaggio come la saldatura, a meno di aggiungere un materiale termoplastico in mezzo, e si ipotizza sia sufficiente l'incollaggio.

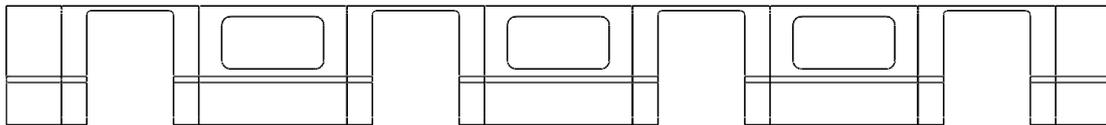


Figura 3.4: Fiancata progettata in carbonio, costituita da nove elementi

Il profilo comune a tutti gli elementi è mostrato in figura 3.5.

3.2.2 Moduli costituenti la fiancata

Modulo “porta”

Il modulo denominato “porta” è la parte di fiancata progettata con un'apertura destinata all'installazione della porta. I meccanismi di apertura e chiusura sono fissati ad appositi sostegni situati nella parte superiore della cassa. La zona è appositamente sagomata prendendo le dimensioni dalla fiancata originale, ha un ingombro complessivo di 2700x2335.5x261 mm con un peso di 32 kg (figura 3.6).

| Proprietà | | Valore | Unità di misura |
|---------------------------------------|-------------|---------|-------------------|
| Densità | | 1490 | kg/m ³ |
| Modulo elastico | Direzione X | 121000 | MPa |
| | Direzione Y | 8600 | MPa |
| | Direzione Z | 8600 | MPa |
| Rapporto di Poisson | Piano XY | 0.27 | - |
| | Piano YZ | 0.4 | - |
| | Piano XZ | 0.27 | - |
| Tensione limite a trazione | Piano XY | 4700 | MPa |
| | Piano YZ | 3100 | MPa |
| | Piano XZ | 4700 | MPa |
| Tensione limite | Direzione X | 2231 | MPa |
| | Direzione Y | 29 | MPa |
| | Direzione Z | 29 | MPa |
| Tensione limite a compressione | Direzione X | -1082 | MPa |
| | Direzione Y | -100 | MPa |
| | Direzione Z | -100 | MPa |
| Tensione limite a taglio | Piano XY | 60 | MPa |
| | Piano YZ | 32 | MPa |
| | Piano XZ | 60 | MPa |
| Deformazione limite | Direzione X | 0.0167 | - |
| | Direzione Y | 0.0032 | - |
| | Direzione Z | 0.0032 | - |
| Deformazione limite a compressione | Direzione X | -0.0108 | - |
| | Direzione Y | -0.0192 | - |
| | Direzione Z | -0.0192 | - |
| Deformazione limite tangenziale | Piano XY | 0.012 | - |
| | Piano YZ | 0.011 | - |
| | Piano XZ | 0.012 | - |

Tabella 3.3: Proprietà meccaniche della resina epossidica con fibre di carbonio

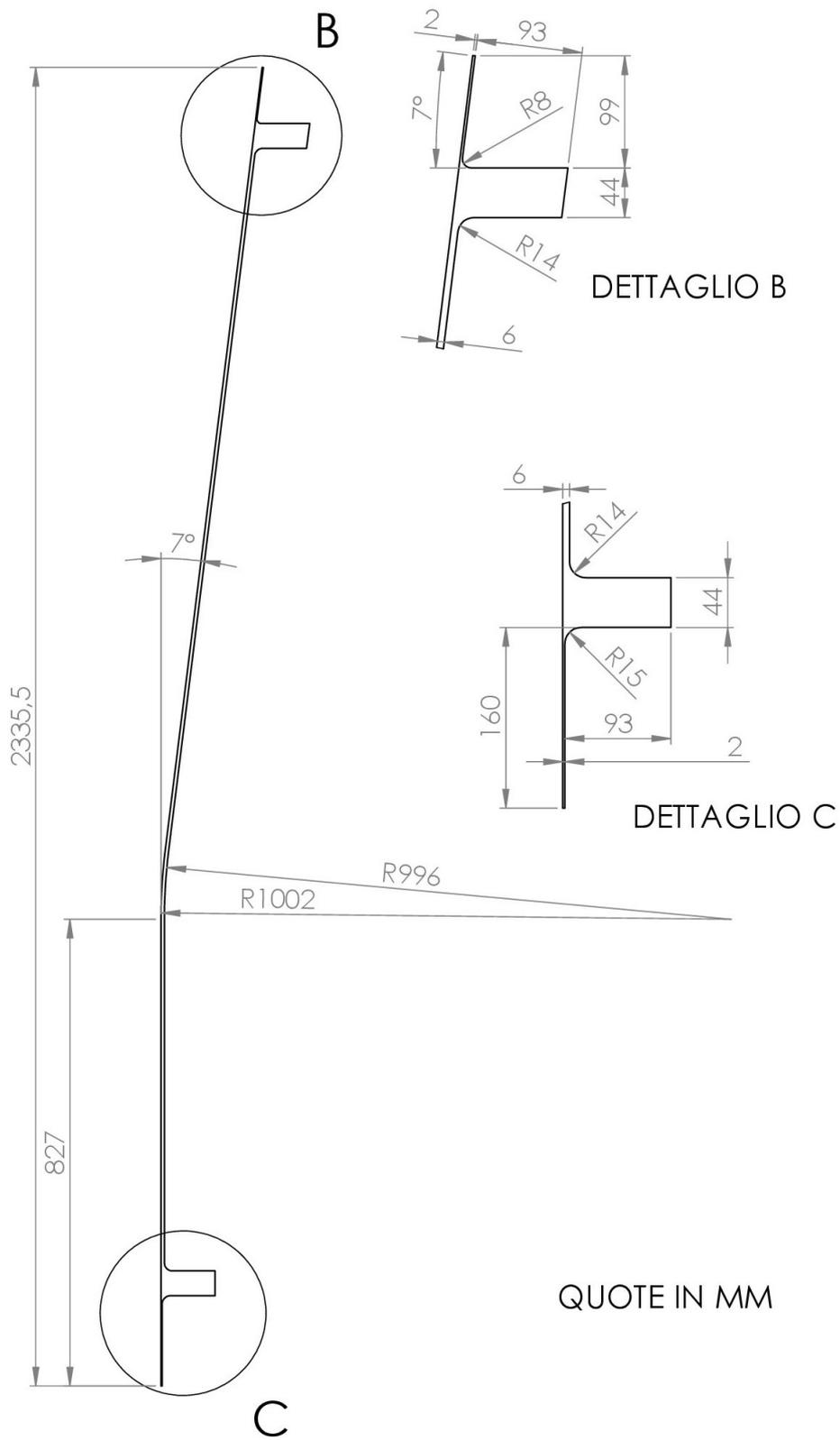


Figura 3.5: Profilo utilizzato per la progettazione della fiancata

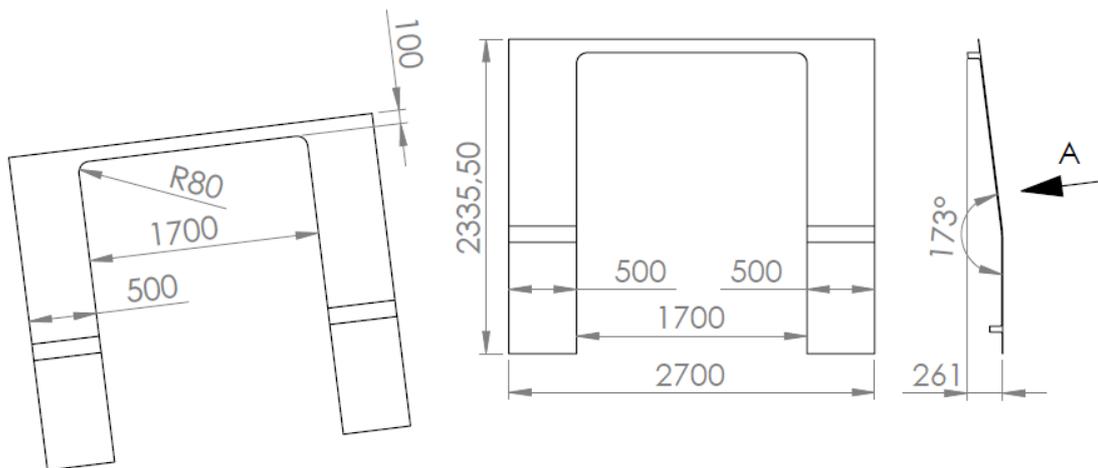


Figura 3.6: Disegno del modulo “porta”

Modulo “finestrino”

Il modulo denominato “finestrino” è la parte della fiancata progettata per ospitare il finestrino e la sua cornice. Anche in questo caso il modulo è stato dimensionato considerando le dimensioni della fiancata originale, ottenendo un ingombro complessivo di 2900x2335.5x261 mm con un peso di 72.5 kg (figura 3.7).

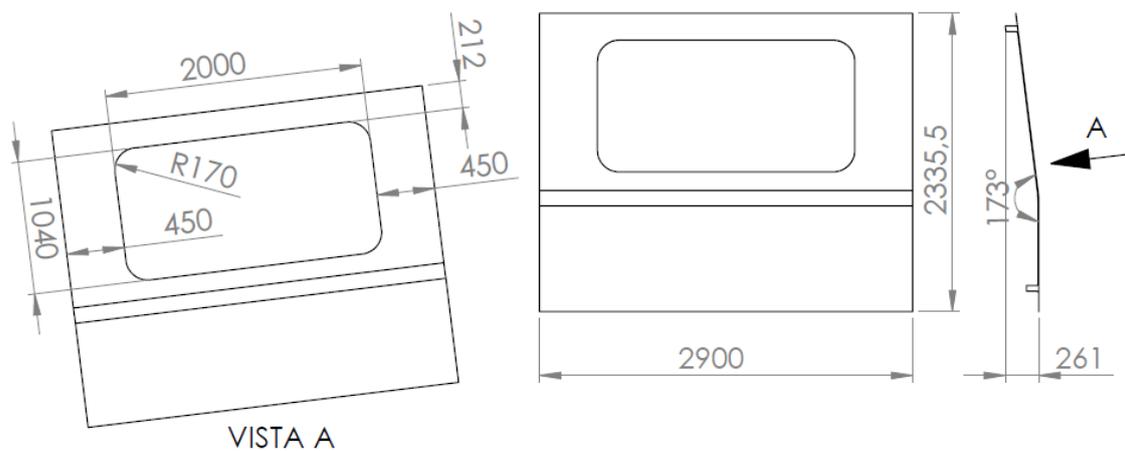


Figura 3.7: Disegno del modulo “finestrino”

Modulo “pieno”

Il modulo denominato “pieno” assume questa denominazione in quanto, a differenza degli altri due, non presenta alcuna apertura destinata a finestre o porte. É il modulo montato ai due estremi della parete, a lato interno presenta anche un ispessimento per favorire il montaggio con gli elementi della facciata anteriore e posteriore in

acciaio. Il modulo ottenuto ha un ingombro di 1071x2335.5x261 mm con un peso di 53.5 kg (figura 3.8).

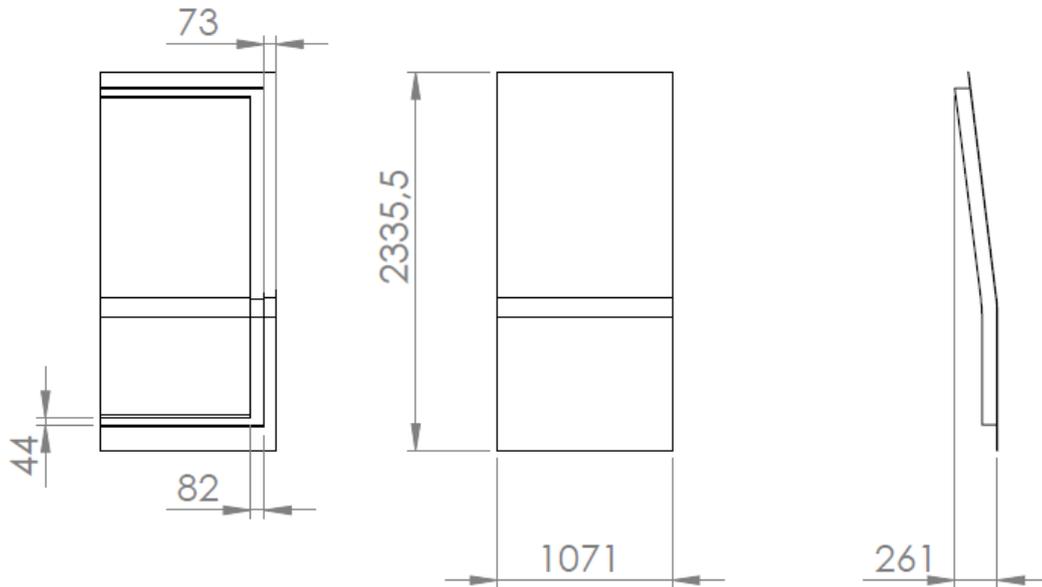


Figura 3.8: Disegno del modulo “pieno”

3.3 Fissaggio della fiancata alla cassa in acciaio

Nel capitolo 2.5 si è affrontato il tema di come si possano creare le connessioni tra materiali quando si utilizzano i materiali compositi. Per vincolare la fiancata al resto della struttura, sono disponibili diversi meccanismi di giunzione, in particolare la giunzione meccanica e l’incollaggio. Si decide di adottare la giunzione meccanica mediante rivetti, in quanto l’utilizzo di adesivi aumenta la complessità di calcolo.

Essendo la struttura progettata in acciaio inossidabile, non ci si pongono problemi sull’interazione tra fibre di carbonio e metallo, escludendo il rischio della galvanizzazione. Il problema si potrebbe porre invece nella scelta degli elementi meccanici utilizzati per la giunzione. Come spiegato sempre nel capitolo 2.5, l’elevato rapporto tra la superficie della fiancata e la superficie degli elementi di giunzione, amplifica l’effetto della corrosione galvanica, quindi sono necessari dei rivetti che non interagiscono con il materiale composito. La scelta è ricaduta su rivetti a strappo 4.8 x 11 in acciaio zincato, che previene la corrosione galvanica, che presentano le seguenti caratteristiche (tabella 3.4 e figura 3.9):

Si decide di praticare un foro, sia nella parete che nella cassa, di diametro 5 mm. Per favorire il cedimento meno catastrofico, come visto al capitolo 2.5.2, si fissano i

| | |
|--------------------------------|-----------------|
| Campo di serraggio | 1.50 - 6.00 mm |
| Lunghezza del corpo rivettato | 11.00 mm |
| Diametro del foro | 4.9 - 5.2 mm |
| Diametro della testa | 10.00 mm |
| Diametro del gambo | 3.00 mm |
| Diametro del corpo del rivetto | 4.80 mm |
| Resistenza al taglio | 2700 N |
| Resistenza alla trazione | 3200 N |
| Materiale corpo e gambo | Acciaio zincato |
| Forma della testa | Bombata |

Tabella 3.4: Caratteristiche dei rivetti utilizzati



Figura 3.9: Rappresentazione di un rivetto a strappo

parametri geometrici tali per cui:

$$e = 30mm$$

$$w = 50mm$$

$$\frac{e}{d} = 6 > 3$$

$$\frac{w}{d} = 10 > 4$$

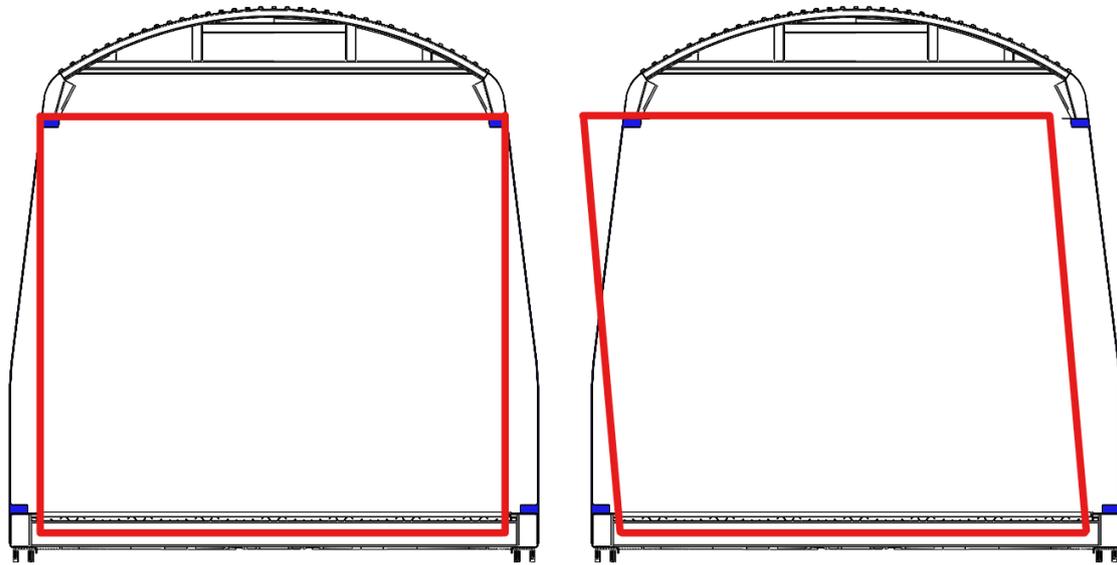
dove:

- e è la distanza tra il foro e il margine finale;
- w è la distanza tra due fori consecutivi;
- d è il diametro del foro.

3.4 Elementi di rinforzo

Fissare la parete alla cassa solamente attraverso rivetti può non essere sufficiente. Nel caso di strutture interamente in acciaio, vengono introdotte degli elementi di rinforzo, saldati direttamente alle lamiere, per aumentare la rigidità locale, impedendo che i due elementi collegati possano piegarsi e deformarsi localmente. La deformazione che si vuole evitare può essere descritta considerando che la sezione trasversale del

vagone può essere descritto con una forma quadrata. I carichi applicati, specialmente quelli verticali, e fenomeni di instabilità, possono far sì che il quadrato si deformi diventando un parallelogramma, raggiungendo quindi una condizione di cedimento. (figura 3.10).



(a) Sezione trasversale indeformata

(b) Sezione trasversale deformata

Figura 3.10: Deformazione che si vuole impedire con gli elementi di supporto

I materiali compositi offrono una maggiore flessibilità di design, per cui anziché utilizzare elementi esterni di supporto, che impediscono il cedimento per eccessiva deformazione nelle zone di interconnessione, si progetta la fiancata in modo che tali elementi siano integrati nella fiancata stessa. Inoltre, ciò consentirebbe una migliore distribuzione dei carichi.

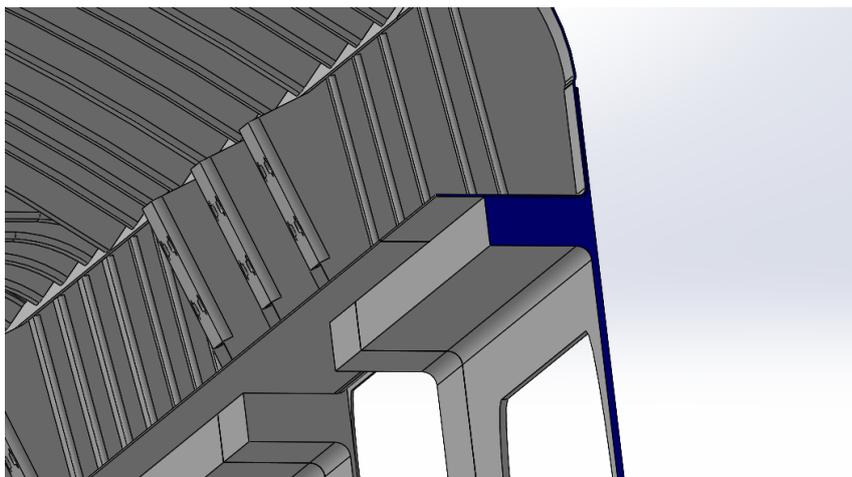


Figura 3.11: Elemento di supporto realizzato nella parete stessa

Capitolo 4

Analisi FEM

4.1 Introduzione

Completata la progettazione della fiancata, con la creazione dei modelli CAD, si intende valutare il suo comportamento strutturale quando la cassa è sottoposta ai carichi previsti dalla normativa UNI EN 12663-1.

Nel contesto della meccanica strutturale dei continui, il problema che vorremmo risolvere può essere descritto dal problema matematico di Cauchy, ossia da equazioni differenziali alle derivate parziali e da equazioni algebriche, la cui soluzione analitica non è generalmente ottenibile in modo diretto. È possibile ottenere una soluzione numerica delle stesse equazioni espresse in forma integrale, su un numero finito di sotto-domini chiamati “elementi” ottenuti mediante discretizzazione del continuo.

Considerando la simmetria sia della geometria che dei carichi applicati, si è deciso di modellare soltanto un quarto della cassa. A tale modello sono stati applicati vincoli adeguati per simulare la presenza del materiale che, nella configurazione completa, impedirebbe spostamenti e rotazioni.

Essendo la struttura costituita da corpi solidi che presentano una dimensione molto più piccola rispetto alle altre due, si decide di utilizzare elementi bidimensionali per ridurre la complessità di calcolo. Per ottenere tali elementi, la discretizzazione deve essere effettuata su corpi superficiale e non su corpi solidi.

Una volta ottenuto il modello numerico, è possibile proseguire con la risoluzione del modello, e determinare quindi tensioni e deformazioni che si sviluppano nella struttura, e valutare quindi il cedimento o meno delle singole lamine con il criterio di Tsai-Wu.

4.2 Costruzione del modello numerico

4.2.1 Elementi per i materiali compositi

Gli elementi sono entità matematiche a cui vengono associate delle proprietà fisiche, come le caratteristiche del materiale e gli spessori. Tali informazioni sono necessarie per calcolare le matrici di rigidezza di ogni elemento e, mediante assemblaggio, della struttura intera.

Gli elementi utilizzati sono denominati SHELL181. L'elemento è particolarmente adatto per l'analisi di strutture a guscio sottili o moderatamente spesse, è un elemento a quattro nodi con sei gradi di libertà per nodo: traslazioni nelle direzioni x , y e z e rotazioni attorno agli stessi assi. Tale elemento può essere utilizzato in applicazioni stratificate per modellare gusci in materiale composito o strutture a sandwich [7].

L'accuratezza nella deformazioni dei gusci compositi è determinata dall'ipotesi di Mindlin per i gusci, che prevede che la deformazione a taglio non è trascurabile, per cui una sezione piana ortogonale alla superficie media non rimane ortogonale alla stessa dopo la deformazione.

Geometria dell'elemento

La figura 4.1 mostra la geometria, la posizione dei nodi, la direzione normale e la struttura multistrato dell'elemento.

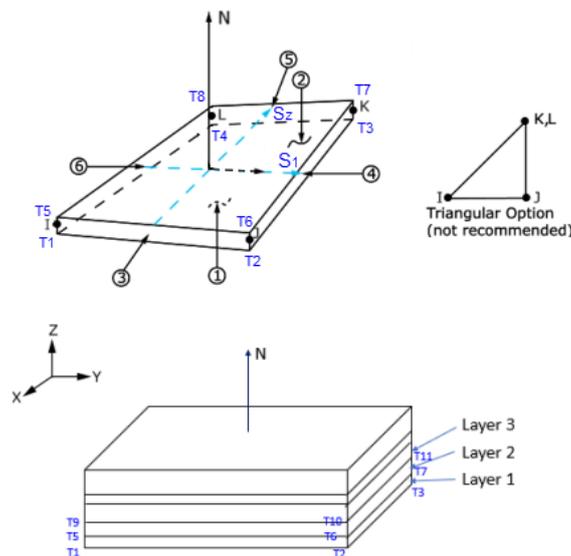


Figura 4.1: Geometria dell'elemento SHELL181 [7]

La definizione delle *layered section* (cap. 4.2.4) consente di definire un elemento strutturato a strati, e per ogni strato vengono definiti spessore, materiale e orientamento. Si può anche variare il numero di punti di integrazione lungo lo spessore di

ogni strato. Il valore di default è tre punti, che vengono così posizionati al piano superiore, al piano medio e al piano inferiore di ogni strato.

Gli strati vengono sovrapposti a partire dalla superficie inferiore del guscio, seguendo la direzione della normale N all'elemento.

Orientamento dell'elemento e dello strato

L'elemento ha un unico sistema di riferimento e_1, e_2, e_3 al centro dell'elemento, con il versore e_1 orientato rispetto alla prima direzione parametrica S_1 , la quale dipende dalla geometria, espressa in funzione della posizione dei nodi nel sistema di riferimento globale, e della funzione di forma con coordinate isoparametriche.

Il sistema di riferimento di ogni strato L_1, L_2, L_3 è ottenuto ruotando il sistema di riferimento dell'elemento attorno all'asse e_3 di un angolo pari all'angolo di orientamento definito per ogni strato (fig. 4.2).

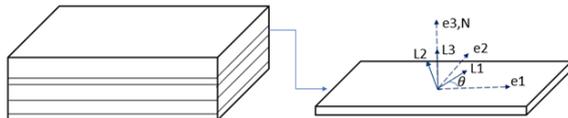


Figura 4.2: Sistema di riferimento dello strato rispetto al sistema di riferimento dell'elemento [7]

Risultati della soluzione

Tra i dati restituiti dall'elemento durante la soluzione si hanno le deformazioni membranali, le curvature, le forze in piano e i momenti, espressi rispetto al sistema di riferimento dell'elemento. In particolare è possibile ottenere lo stato tensionale per ogni singolo strato, espresse nel sistema di riferimento locale dello strato, consentendo un'analisi dettagliata del comportamento dei materiali compositi, e una corretta valutazione della sollecitazione per ogni lamina. In figura 4.3 sono illustrate alcune grandezze restituite dalla soluzione, con riferimento alla geometria e al sistema di riferimento.

4.2.2 Conversione dei corpi solidi in superfici

La conversione dei corpi solidi in superfici viene effettuata mediante comandi che sostituiscono il solido con una superficie di riferimento a cui è assegnata una proprietà numerica che identifica lo spessore. Questa superficie può essere creata al piano superiore, inferiore o intermedio. Essendo che il calcolo numerico viene effettuato sulle superfici e che lo spessore è solo una proprietà necessaria per il calcolo dell'andamento

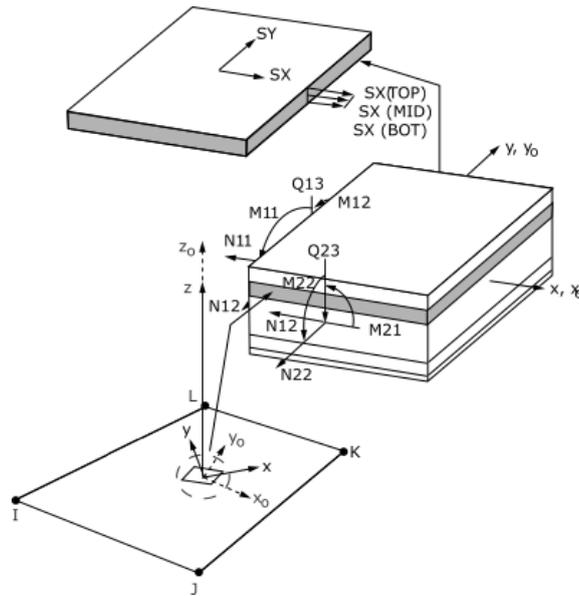


Figura 4.3: Tensioni risultanti dell'elemento SHELL181 [7]

delle tensioni al variare dello spessore, per ogni corpo solido si decide qual è il piano migliore in cui creare la superficie media, in modo da ottimizzare i contatti con le altre superfici.

Lo strumento *midsurface* crea una superficie a metà tra due facce sfalsate, e la distanza originale tra le facce viene memorizzata come proprietà di spessore [9]. È anche possibile ottenere superfici al piano superiore o inferiore.

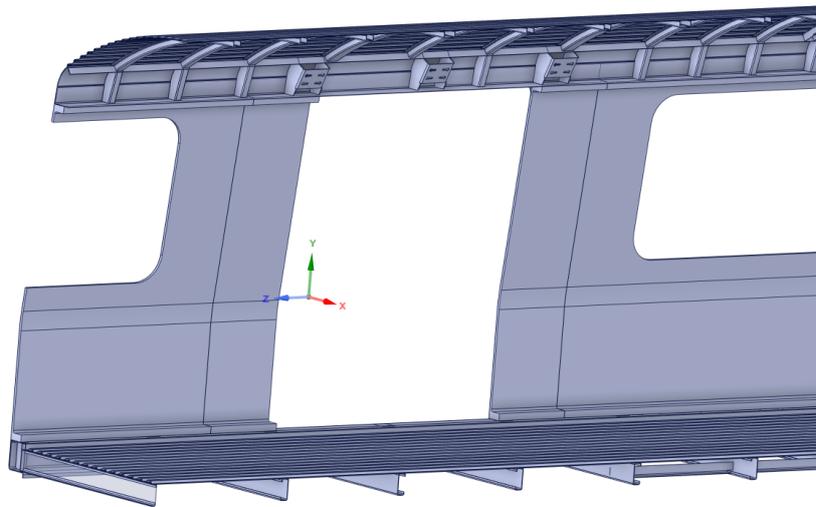
Una volta ottenute le superfici, molte di queste vanno corrette in quanto superfici ortogonali possono non essere a contatto poiché lo distanziate dallo spessore originale dei corpi solidi. L'utilizzo di una funzione di estensione consente di correggere tali superfici senza introdurre eccessivi errori nel calcolo numerico.

Lo strumento *extend* consente di estendere o tagliare le superfici per unirle a parti vicine [10].

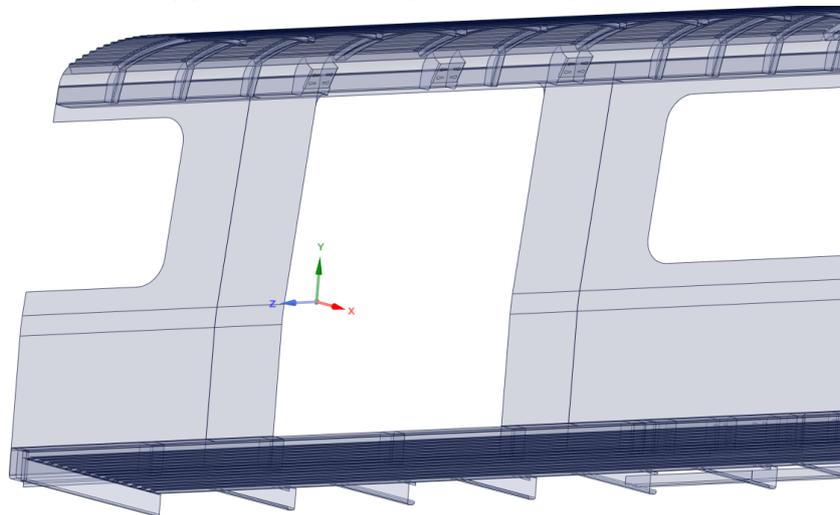
A causa della particolare forma di alcune superfici, queste non possono essere estese, allora verranno appositamente vincolate con le reazioni vincolari interne definite nel prossimo paragrafo.

4.2.3 Correzione dei contatti e definizione delle reazioni vincolari interne

Le superfici che costituiscono la fiancata presentano tutte un lato in comune. Avendo ipotizzato che i vari moduli sono vincolati tra loro mediante l'incollaggio, anziché andare a definire le reazioni interne che vincolano ogni modulo l'uno all'altro, si imposta la condivisione della topologia in modo da ottenere un unico corpo rappresentante la fiancata costituito da più superfici.



(a) Geometria composta da corpi solidi



(b) Geometria composta da superfici

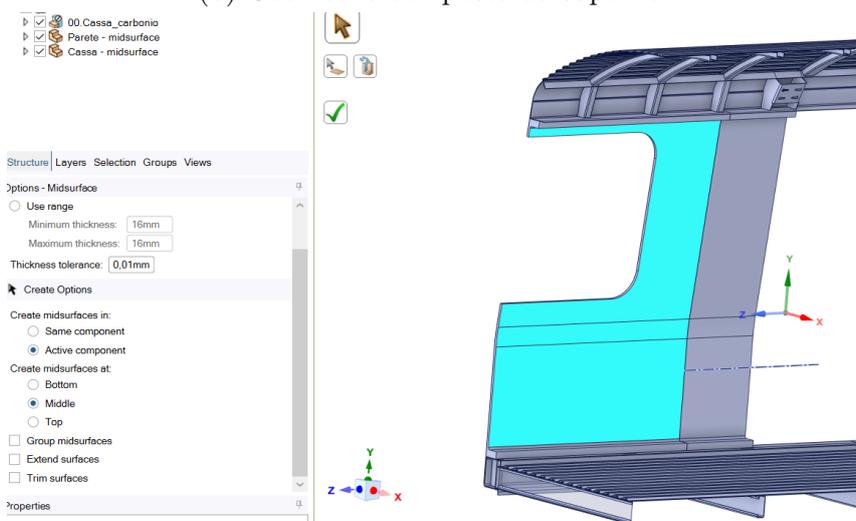
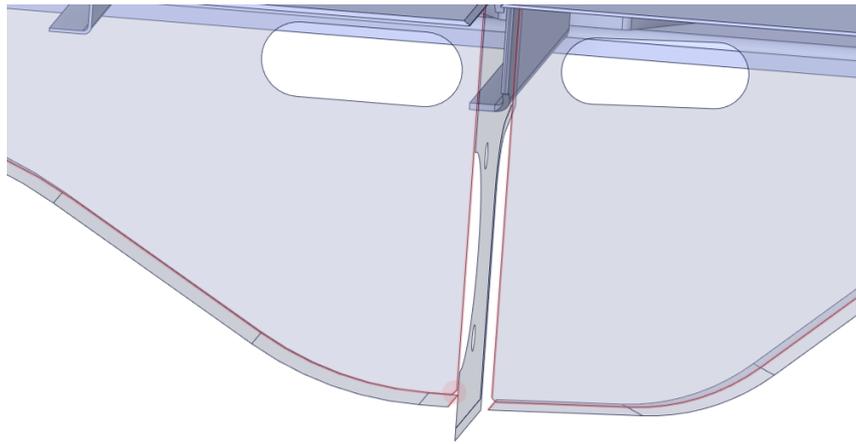
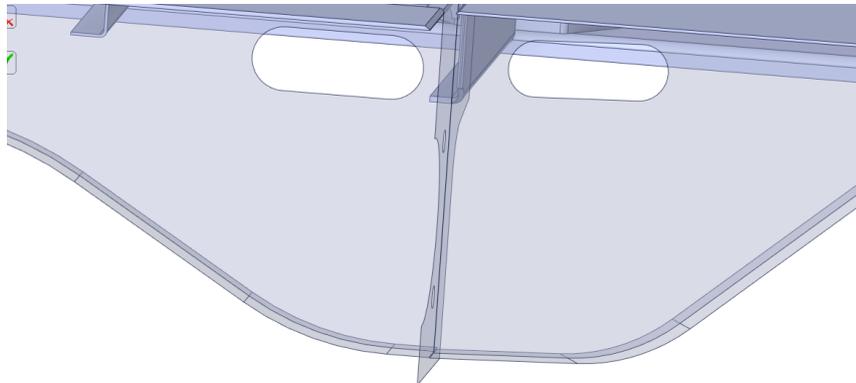


Figura 4.4: Funzione *midsurface* per creare la superfici partendo dai corpi solidi



(a) Superfici non a contatto, prima dell'estensione



(b) Superfici a contatto, corrette estendendole

Figura 4.5: Funzione “estendi” per estendere le superfici e correggerle

La stessa soluzione non è applicabile per le superfici costituenti la cassa in quanto si otterrebbero elementi che non rappresentano correttamente la realtà. Si vanno allora a creare le reazioni vincolari interne andando a definire i contatti tra superfici, che possono essere del tipo *face to face*, *face to edge* e *edge to edge*, in base a quale elemento topologico della superficie è a contatto con l'altra, ossia la faccia o il lato. La creazione è automatica, è sufficiente definire alcuni parametri come l'intervallo di tolleranza all'interno del quale si devono trovare gli elementi topologici delle superfici da considerare a contatto, e il tipo di contatto da creare. Si utilizzano contatti di tipologia *bonded*, che non consentono né scorrimento né separazione tra facce o spigoli, simulando un incollaggio.

La fiancata è vincolata alla cassa mediante contatti di tipo *bonded*, che simulano l'incollaggio, impostando le superfici della stessa come elementi *contact* e le superfici della cassa con cui si vuole creare il contatto come *target*. Un esempio è riportato in figura 4.6, dove una faccia di una superficie della fiancata, colorata in rosso, viene vincolata a una faccia del longherone inferiore della cassa, colorato in blu, ottenendo

il vincolo voluto tra le due superfici.

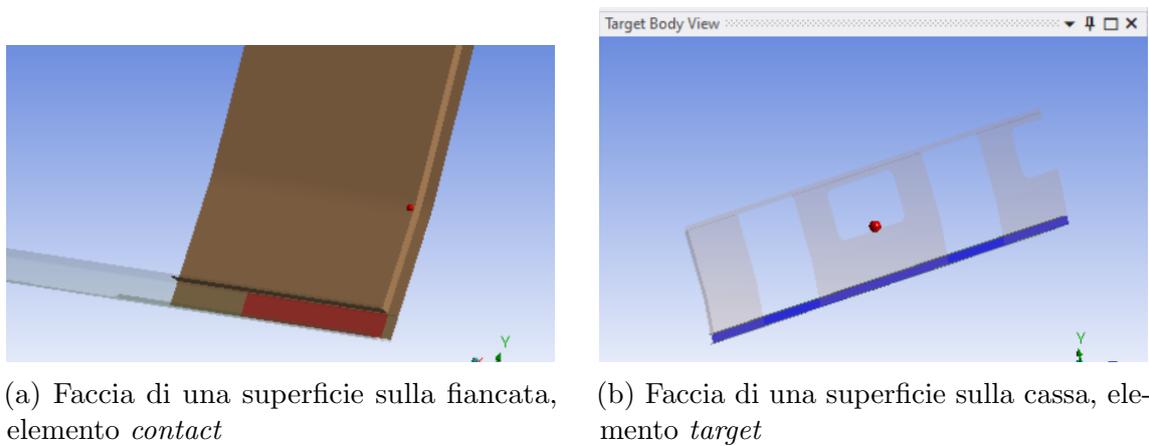


Figura 4.6: Esempio di contatto tra parete e cassa

4.2.4 Definizione delle layered section

La funzione *layered section* consente di creare e applicare uno o più strati su un corpo superficiale, consentendo la modellazione di un materiale composito. L'utilizzo di questa funzione comporta l'impiego degli elemento SHELL181 discussi al paragrafo 4.2.1, essenziali per rappresentare il comportamento meccanico del laminato in composito. Per ogni *layered section* definita, si indica il numero di strati, il materiale di ciascuno e l'orientamento delle fibre. Va anche impostato per ciascuna il sistema di riferimento locale che indichi la direzione x rispetto a cui indicare l'orientamento delle fibre e la direzione z che indica la direzione secondo cui vengono impilate le varie lamine. In figura 4.7 un esempio di una *layered section*.

| Layer | Material | Thickness (mm) | Angle (°) |
|-------|-----------------------------------|----------------|-----------|
| (+Z) | | | |
| 3 | Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg | 2 | 90 |
| 2 | Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg | 2 | 0 |
| 1 | Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg | 2 | 90 |
| (-Z) | | | |

Figura 4.7: Definizione di una *layered section* della fiancata

Il sistema di riferimento locale viene definito in modo che la direzione x combacia con la direzione longitudinale della cassa e la direzione z che procede dall'esterno verso l'interno della cassa (fig. 4.8).

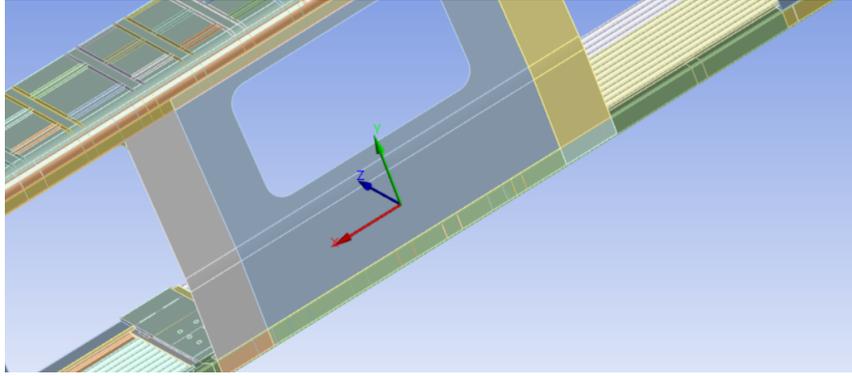


Figura 4.8: Sistema di riferimento locale definito per le *layered section* per la parte bassa della fiancata

4.2.5 Creazione della mesh

Vengono impostate alcune proprietà che devono caratterizzare gli elementi della mesh. In particolare, si desidera avere funzioni di forma di primo grado, le quali garantiscono un andamento delle deformazioni lineare rispetto agli spostamenti nodali. Tale scelta permette di semplificare il modello mantenendo comunque un buon livello di dettaglio per il calcolo delle tensioni.

Inoltre, si vuole ottenere una mesh costituita principalmente da elementi quadrangolari, evitando il più possibile la generazione di elementi triangolari. Questi ultimi, avendo delle funzioni di forma di primo grado, presentano delle deformazioni costanti e non lineari con gli spostamenti nodali, per cui si vogliono evitare.

La dimensione caratteristica degli elementi viene imposta a 25 mm, anche qui per avere un adeguato equilibrio tra dettaglio geometrico e tempi di calcolo, assicurando una discretizzazione sufficientemente fine e mantenere un rapporto larghezza/spessore sufficiente all'impiego di elementi di tipo guscio, come gli elementi SHELL181. Si ottiene quindi la mesh in figura 4.9.

La mesh così creata è caratterizzata da 183865 nodi e 173461 elementi.

4.2.6 Definizione dei vincoli e dei pesi di esercizio

La normativa prevede che i carichi longitudinale da applicare per un rotabile ferroviario per il trasporto passeggeri per il servizio metropolitano sotterraneo siano di compressione per un valore di 800 kN e di trazione per un valore di 600 kN, entrambi applicate, alternativamente, all'attacco del gancio di trazione [12]. Come carichi verticali, la normativa prevede che vanno considerate la massa di progetto del veicolo in ordine di servizio e le masse dei carichi eccezionali, senza maggiorazioni. Per semplicità di calcolo, gli unici carichi verticali eccezionali considerati sono il peso dell'impianto di condizionamento e il peso del gancio di traino.

Avendo modellato solamente un quarto di cassa, le forze da applicare all'attacco del gancio corrispondono a metà dei carichi imposti dalla normativa.

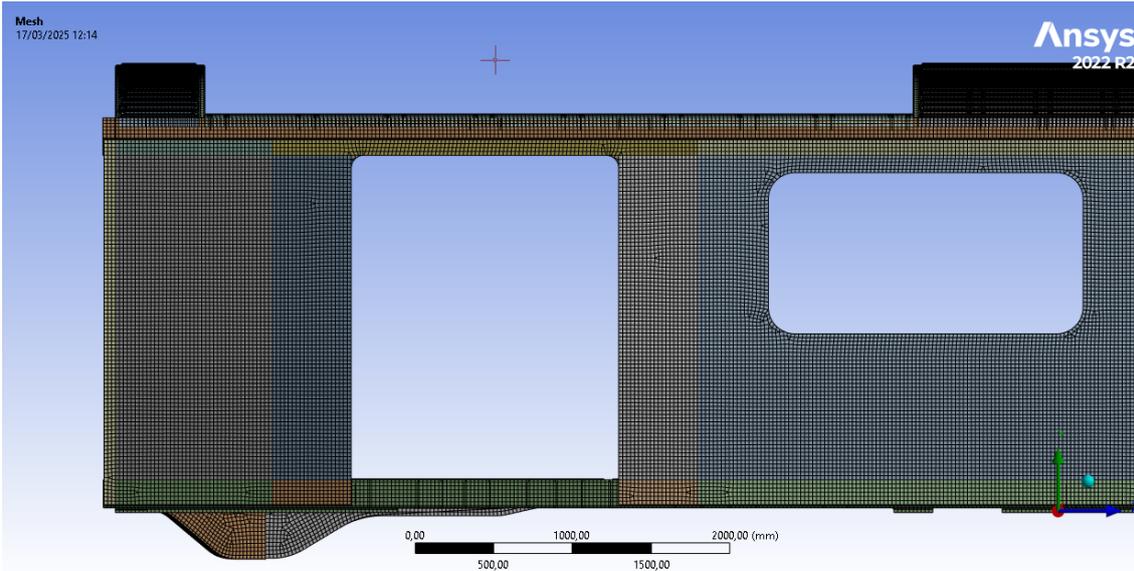


Figura 4.9: Mesh generata per la discretizzazione della cassa

Per evitare il moto rigido della struttura, e ottenere quindi una soluzione, la cassa va vincolata. Per un rotabile ferroviario, i vincoli vengono rappresentati dai carrelli, dalle sospensioni e dal gancio di trazione. In particolare:

- i carrelli impediscono le traslazioni nella direzione trasversale alla cassa,
- le sospensioni impediscono le traslazioni verticali,
- il gancio di trazione impedisce la traslazione nella direzione longitudinale, in quanto la presenza di un'altra cassa agganciata alla prima si oppone al suo movimento.

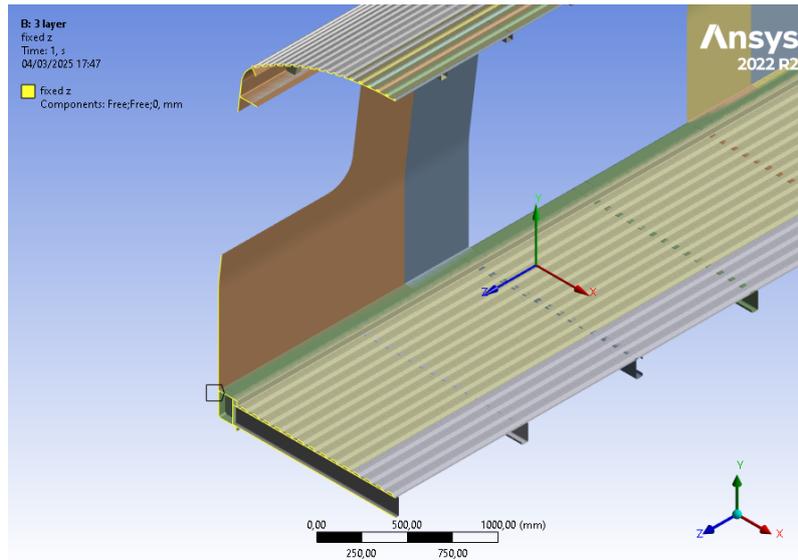
Nel modello vengono quindi definiti i vincoli necessari, imponendo traslazioni nulle nelle direzioni appropriate alle curve e alle superfici che rappresentano il montaggio degli elementi descritti precedentemente.

Modellare un quarto di cassa impone anche la necessità di inserire nel modello ulteriori vincoli dovuti alla presenza di materiale che impone certe traslazioni e rotazioni, in base a quale piano di sezione si sta considerando.

I nodi giacenti sul piano di sezione parallelo al piano $x-y$ sono vincolati in modo da impedire la traslazione in z e le rotazioni attorno a x e y (figura 4.10).

Procedura simile viene eseguita per l'altro piano di taglio, parallelo al piano $y-z$, per cui vanno vincolate le traslazioni in x e le rotazioni attorno a y e a z .

La definizione di una ***named selection*** consente di selezionare tutti gli elementi topologici dello stesso tipo che posseggono delle caratteristiche in comune, e andare quindi ad applicare a tutti gli elementi lo stesso vincolo. Con la *named selection*



(a) Elementi a cui viene applicato il vincolo

| | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Named Selection |
| Named Selection | edges z1005 |
| Definition | |
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| X Component | Free |
| Y Component | Free |
| <input type="checkbox"/> Z Component | 0, mm (ramped) |
| Suppressed | No |

(b) Vincolo per impedire le traslazioni lungo z

| | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Named Selection |
| Named Selection | edges z1005 |
| Definition | |
| Type | Fixed Rotation |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| <input type="checkbox"/> Rotation X | Fixed |
| <input type="checkbox"/> Rotation Y | Fixed |
| <input type="checkbox"/> Rotation Z | Free |
| Suppressed | No |

(c) Vincolo per impedire le rotazioni attorno a x e a y

Figura 4.10: Vincoli applicati agli elementi sezionati con un piano parallelo al piano $x-y$

visibile nelle figure 4.10b e 4.10c si vanno a selezionare tutte le linee che si trovano alla quota $z = 1005$ mm rispetto all'origine del sistema di riferimento globale.

I carichi verticali considerati, ossia i pesi dell'impianto di condizionamento e del gancio di traino, vanno applicati agli elementi che rappresentano i corpi reali su cui verranno agganciati. In particolare, il peso dell'impianto di condizionamento viene applicato alle superfici del tetto considerandolo come un carico distribuito, di massa totale 500 kg (figura 4.11a). Mentre il peso del gancio di traino viene applicato come un carico concentrato di massa 250 kg la cui posizione è al centro della reale zona di applicazione del gancio di traino, e viene vincolato ai fori di fissaggio (figura 4.11b).

4.3 Risultati numerici

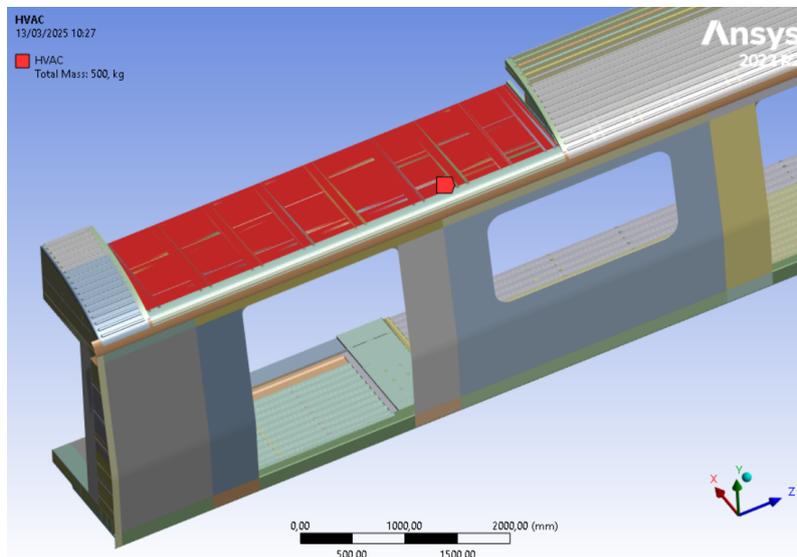
4.3.1 Modello con vincolo rigido tra parete e cassa

Come prima analisi, si considera la parete vincolata alla struttura cassa come spiegato al paragrafo 4.2.3

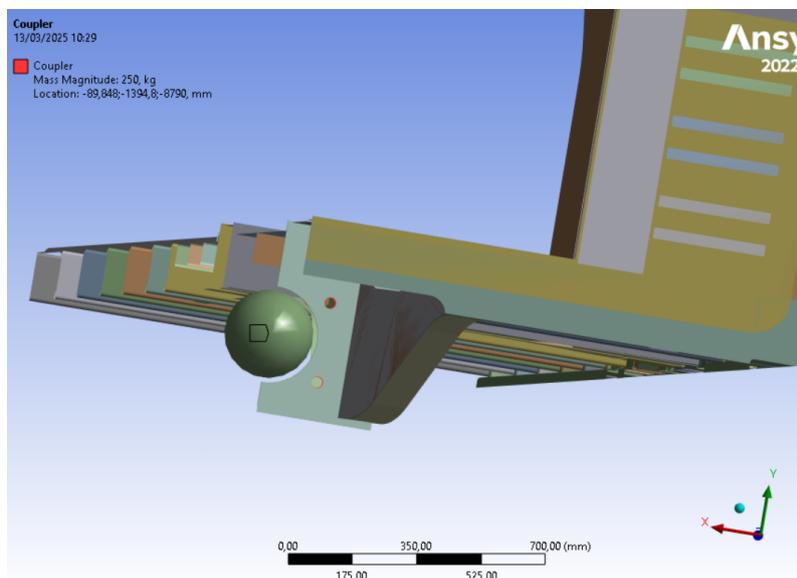
Verifica a compressione

Si riportano i risultati per ogni singola lamina, secondo il criterio di Tsai-Wu discusso al capitolo 2. Il valore è diverso per il piano superiore ed inferiore, poiché si ha un andamento delle tensioni diverso al variare dello spessore (figura 2.4). La normativa prevede un carico di compressione pari a 800 kN, essendo che si eseguono i calcoli solamente su metà cassa si applica una forza di 400 kN.

La numerazione dei singoli strati procede dall'esterno verso l'interno della cassa.

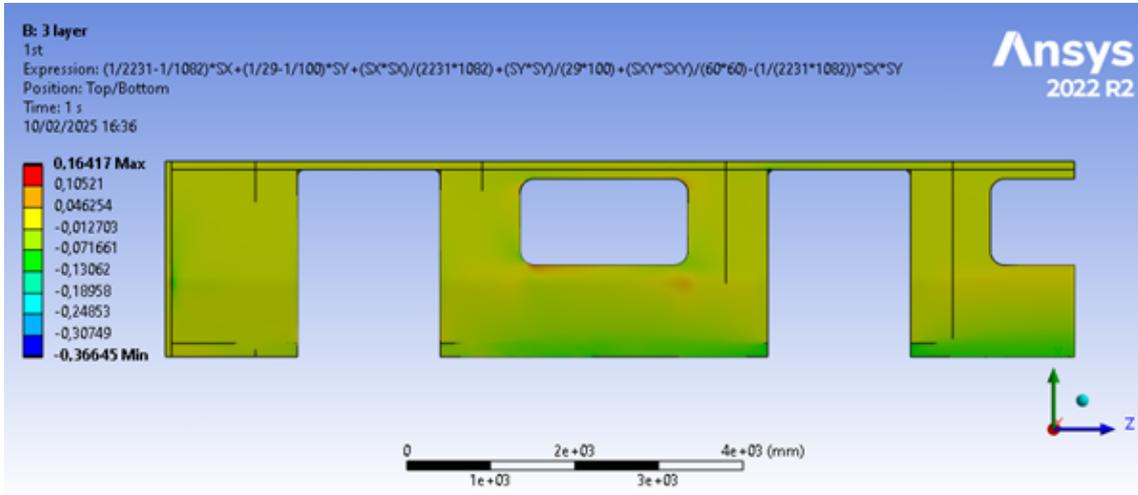


(a) Applicazione del peso dell'impianto di condizionamento

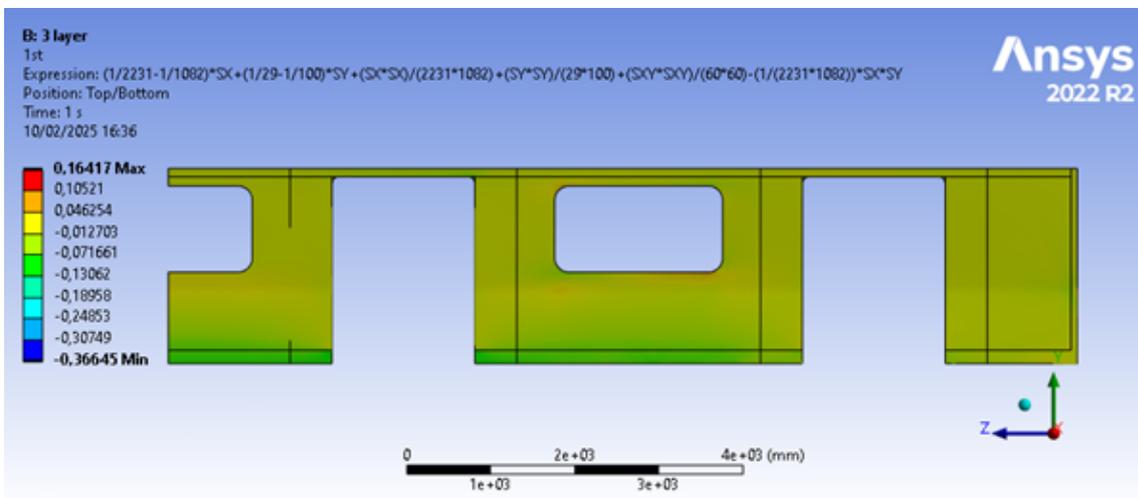


(b) Applicazione del peso del gancio di traino

Figura 4.11: Applicazione dei carichi verticali

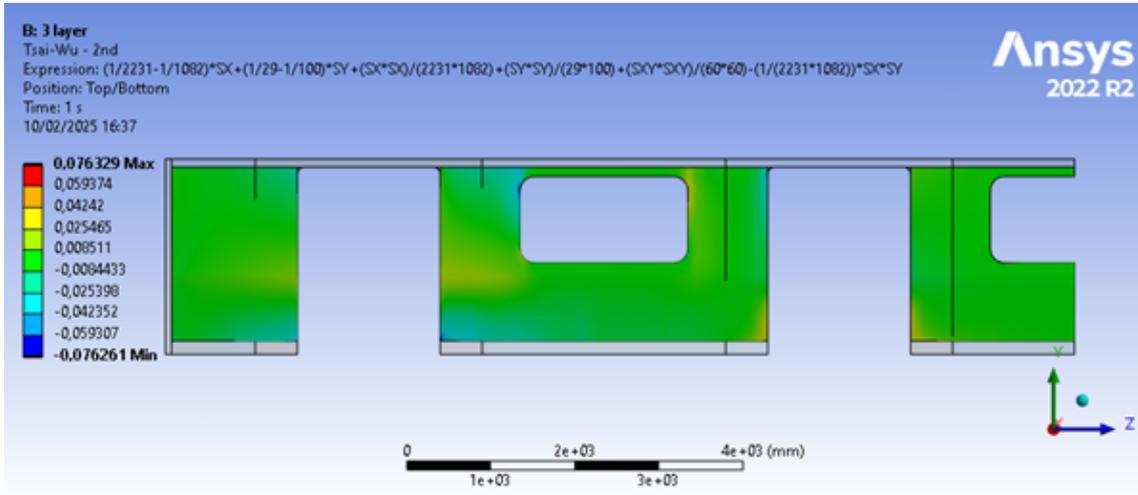


(a) Piano inferiore

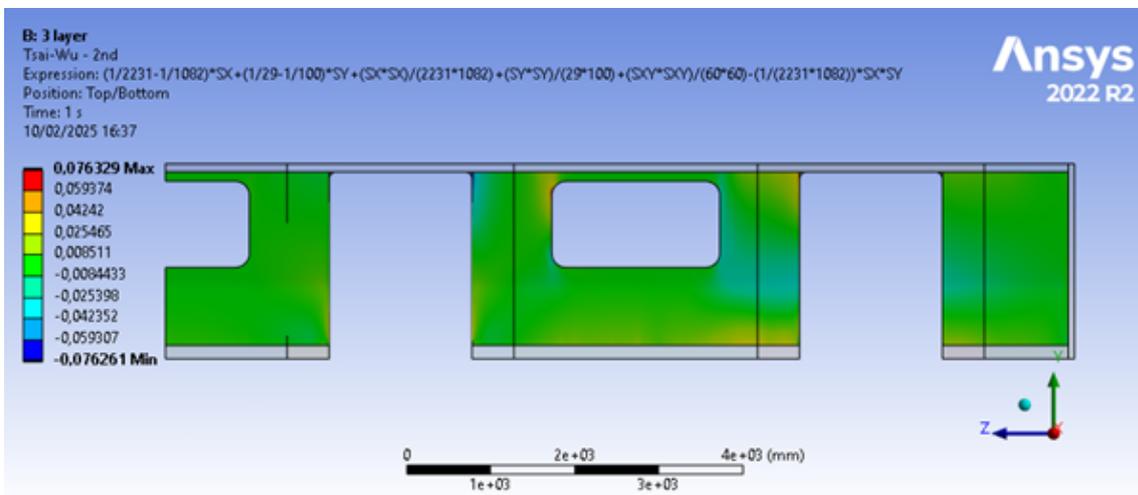


(b) Piano superiore

Figura 4.12: Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di compressione

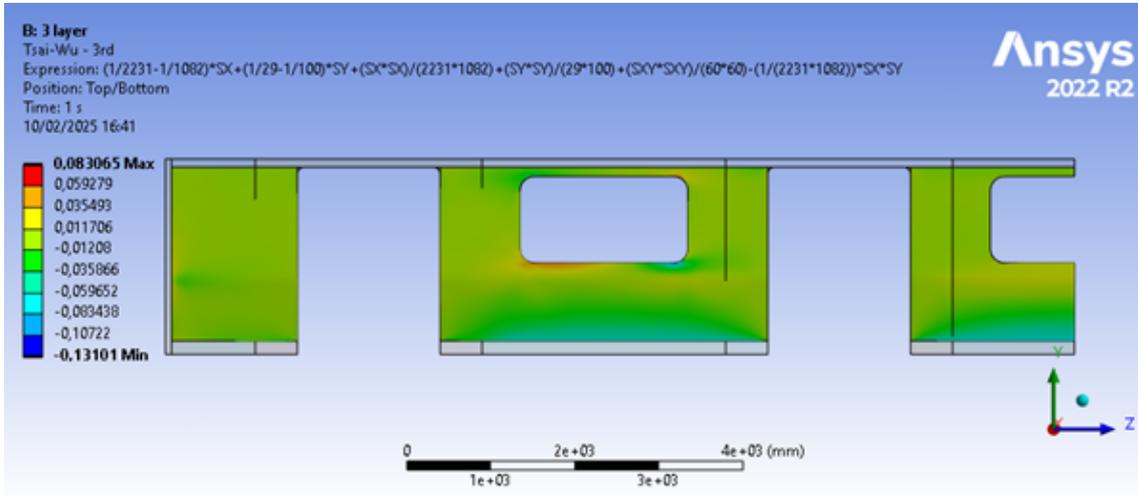


(a) Piano inferiore

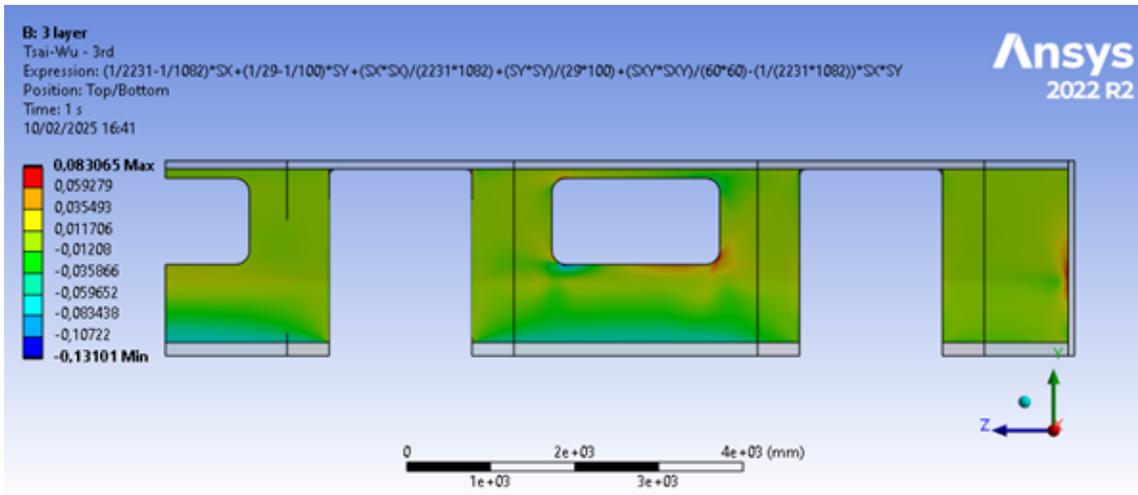


(b) Piano superiore

Figura 4.13: Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di compressione



(a) Piano inferiore



(b) Piano superiore

Figura 4.14: Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di compressione

Il criterio di Tsai-Wu indica che si ha cedimento della lamina quando

$$f(\sigma) = 1 \quad (4.1)$$

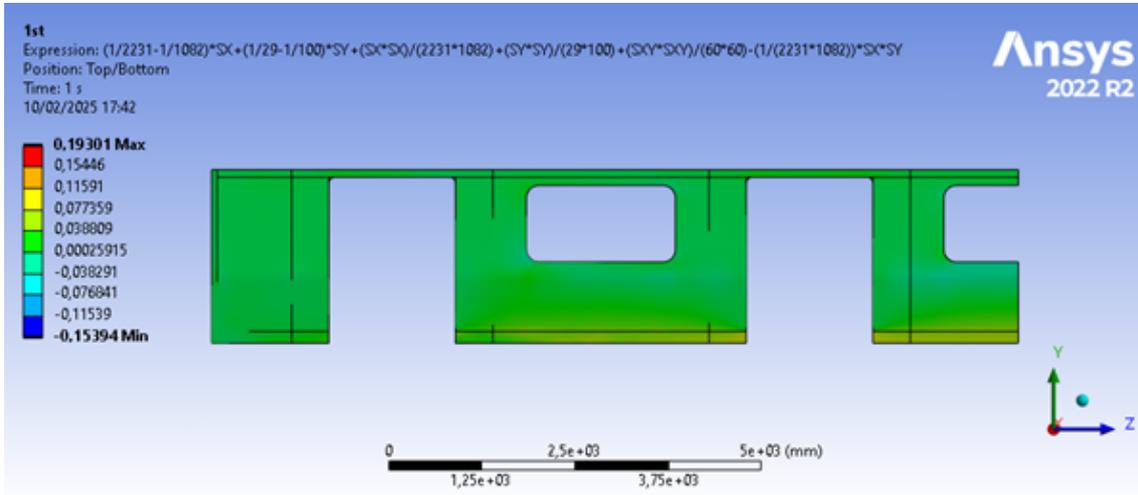
Come si evince dalle immagini riportate, in nessuna zona delle lamine si arriva al cedimento strutturale. Si riassumono i risultati nella tabella 4.1.

| Lamina | | Valore massimo | Valore minimo | Valore medio |
|---------|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| Prima | Piano inferiore | 0.1492 | -0.3665 | -0.0117 |
| | Piano superiore | 0.1642 | -0.3057 | -0.0118 |
| Seconda | Piano inferiore | 0.0600 | -0.0763 | -0.0032 |
| | Piano superiore | 0.0763 | -0.0705 | -0.0020 |
| Terza | Piano inferiore | 0.0666 | -0.1086 | -0.0060 |
| | Piano superiore | 0.0831 | -0.1310 | -0.0059 |

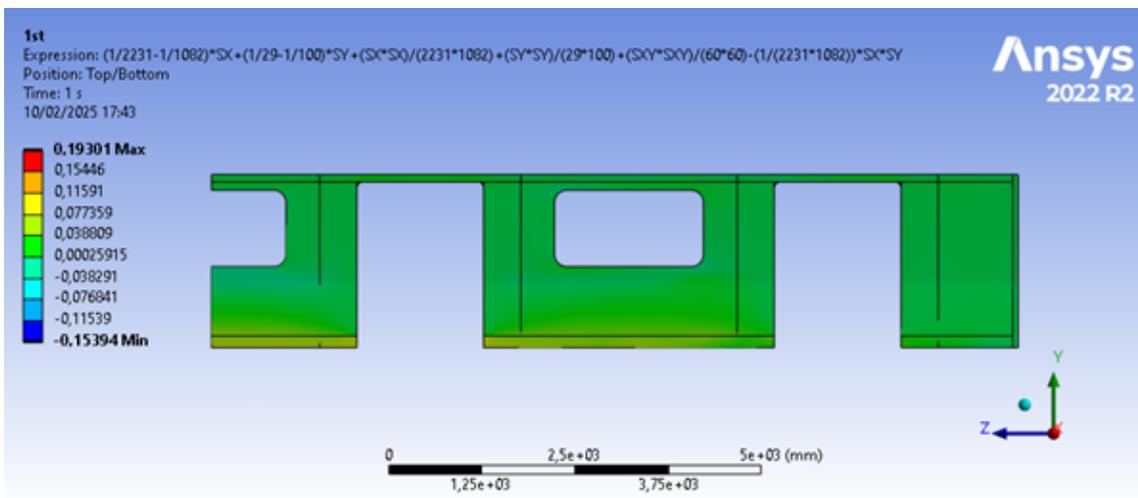
Tabella 4.1: Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di compressione

Verifica a trazione

Si riportano nuovamente i risultati per ogni singola lamina secondo il criterio di Tsai-Wu. La normativa prevede un carico di compressione pari a 600 kN, essendo che si eseguono i calcoli solamente su metà cassa si applica una forza di 300 kN.

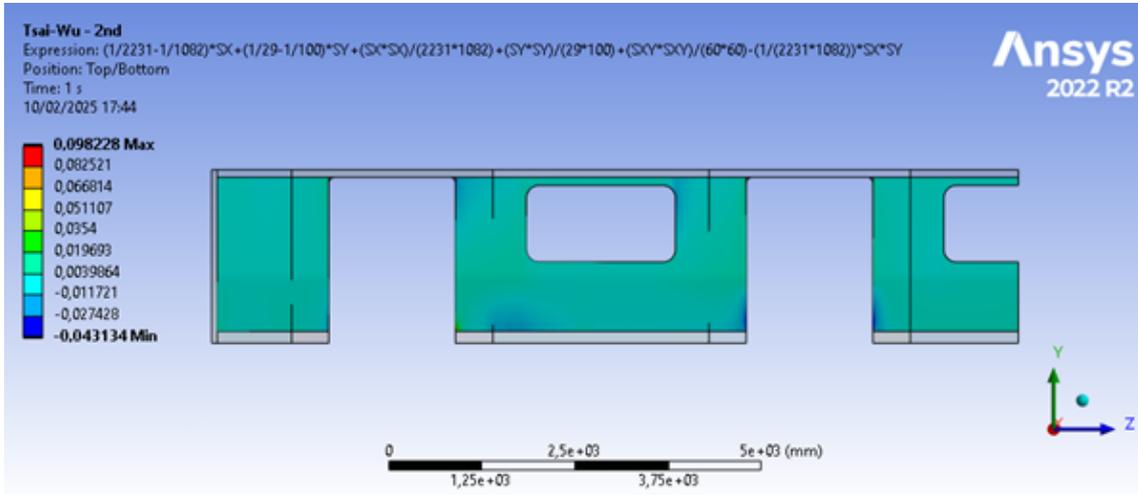


(a) Piano inferiore

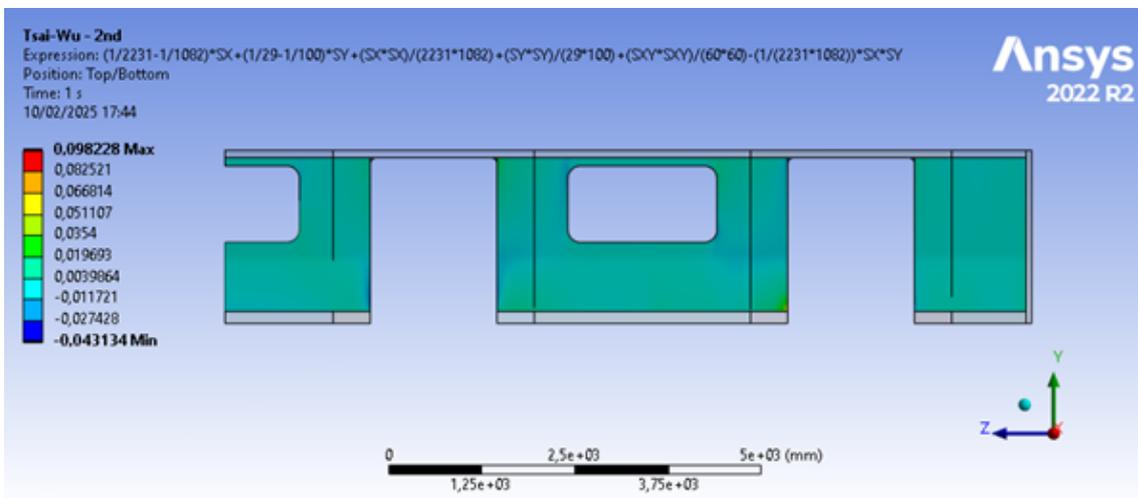


(b) Piano superiore

Figura 4.15: Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di trazione

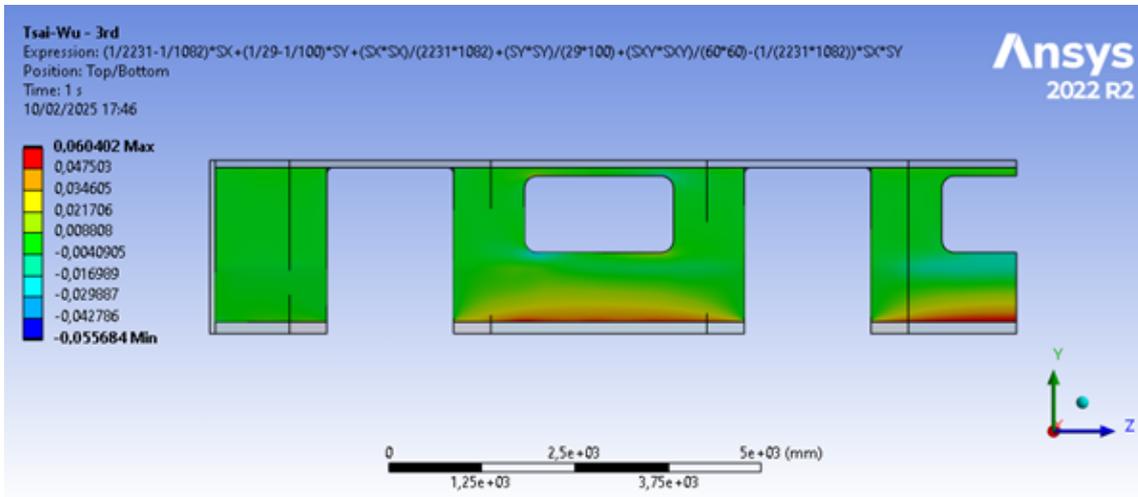


(a) Piano inferiore

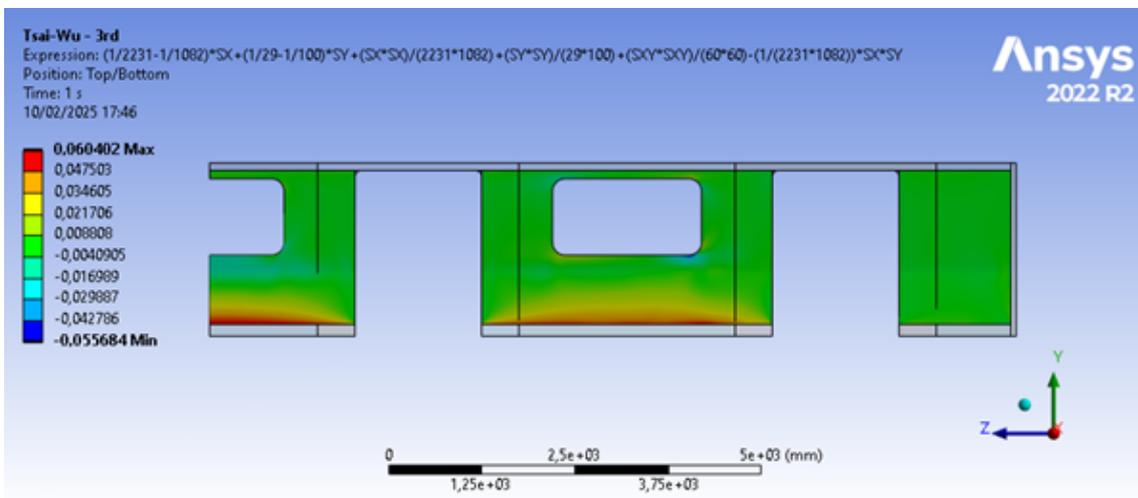


(b) Piano superiore

Figura 4.16: Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di trazione



(a) Piano inferiore



(b) Piano superiore

Figura 4.17: Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di trazione

Anche per la prova di trazione, il criterio di Tsai-Wu non raggiunge mai il valore unitario. Si riportano i valori massimi e minimi nella tabella 4.2.

| Lamina | | Valore massimo | Valore minimo | Valore medio |
|---------|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| Prima | Piano inferiore | 0.1930 | -0.1539 | 0.0096 |
| | Piano superiore | 0.1413 | -0.1216 | 0.0099 |
| Seconda | Piano inferiore | 0.0835 | -0.0431 | 0.0014 |
| | Piano superiore | 0.0982 | -0.0333 | 0.0015 |
| Terza | Piano inferiore | 0.0604 | -0.0413 | 0.0057 |
| | Piano superiore | 0.0596 | -0.0557 | 0.0061 |

Tabella 4.2: Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di trazione

4.3.2 Modello con connessione tra parete e cassa costituita da rivetti

La precedente ipotesi sul vincolo tra parete e cassa risulta essere poco realistica, per cui si vuole simulare una connessione tra parete e struttura mediante rivetti, più vicina alla reale connessione prevista in fase di progettazione al paragrafo 3.3.

I rivetti vengono simulati come elementi trave fissati sui bordi dei fori praticati nella struttura cassa e nella parete. Quindi a livello geometrico sono rappresentati da una linea di 2 mm di lunghezza (figura 4.18).

Vengono rimossi tutti i contatti tra la parete e la cassa, che erano contatti del tipo *face to face*, e vengono create delle connessioni rigide tra gli estremi dei segmenti rappresentanti i rivetti e le circonferenze dei fori. Le connessioni vengono create sfruttando delle *named selection* che consentono di selezionare tutti gli estremi, esterni ed interni, dei rivetti superiori e inferiori, e connetterli con le *named selection* che raggruppano le circonferenze rappresentanti i fori.

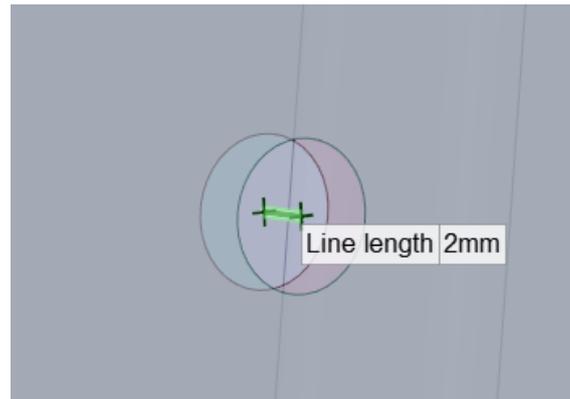
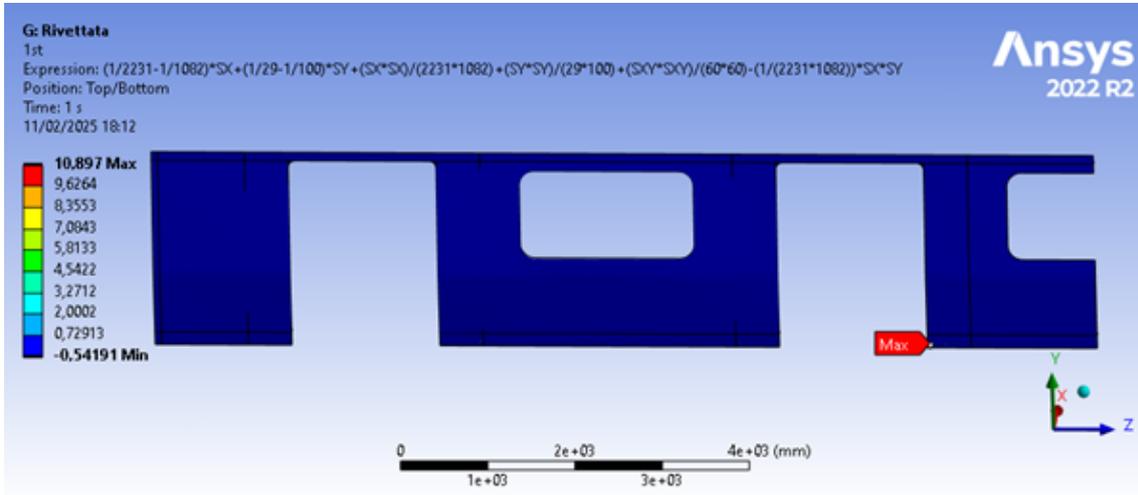


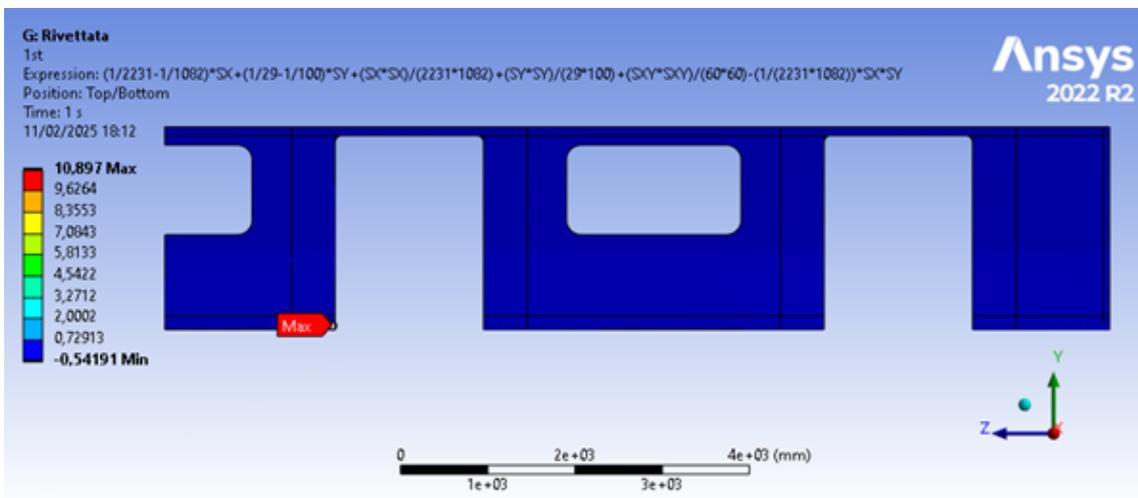
Figura 4.18: Rivetto rappresentato geometricamente da una linea

Verifica a compressione

Si riportano i risultati, secondo il criterio di Tsai-Wu, della prova di compressione, con carico applicato di 400 kN. Si riporta anche la deformazione totale del laminato.

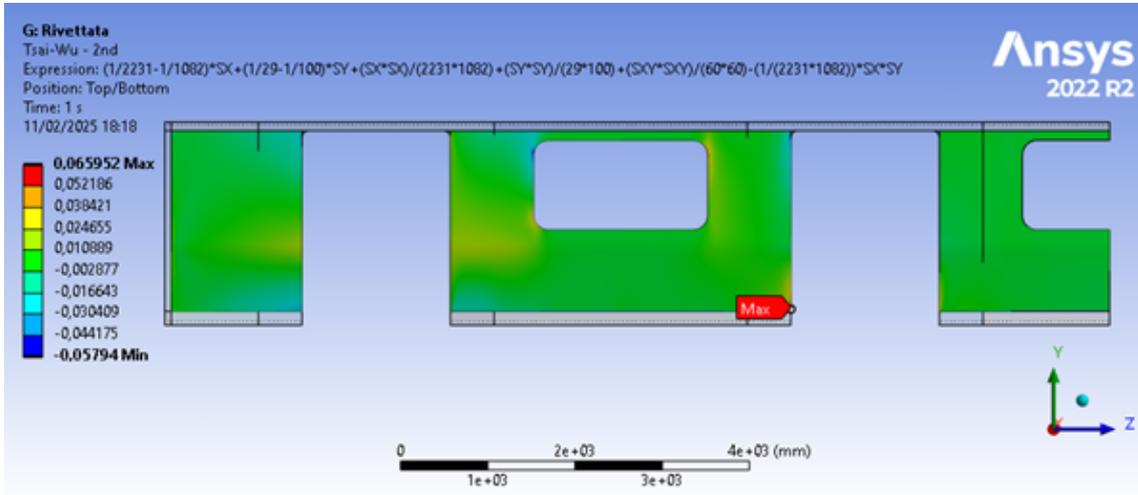


(a) Piano inferiore

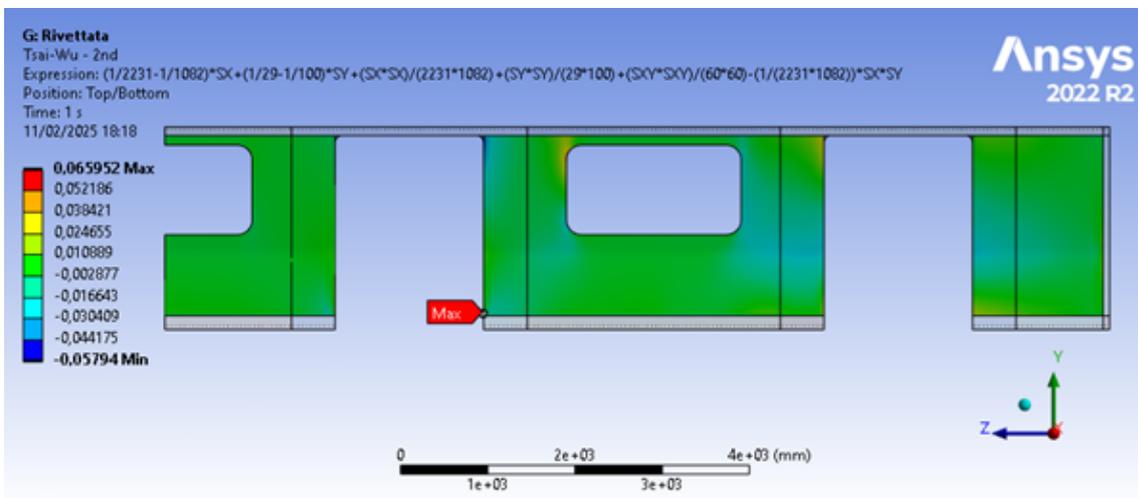


(b) Piano superiore

Figura 4.19: Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di compressione, struttura rivettata

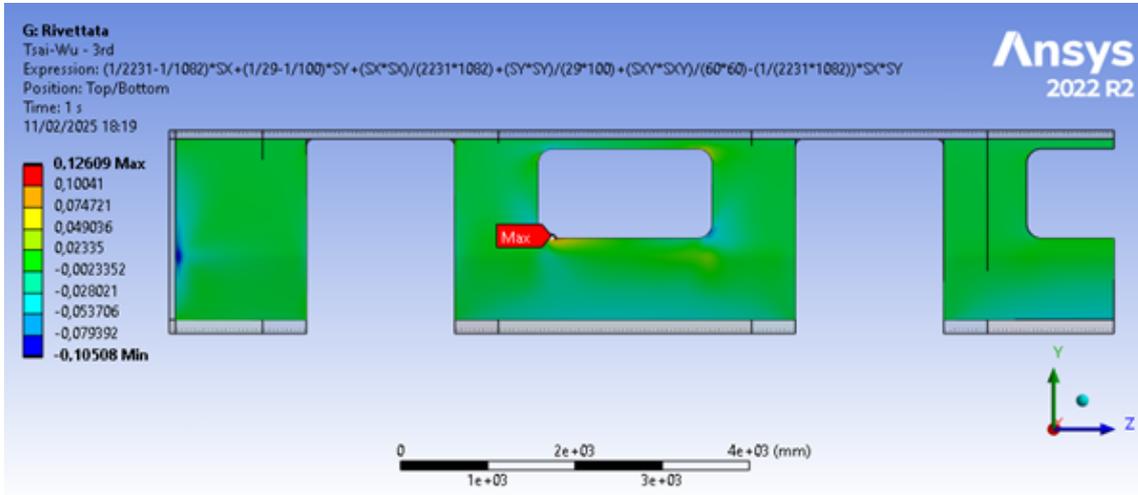


(a) Piano inferiore

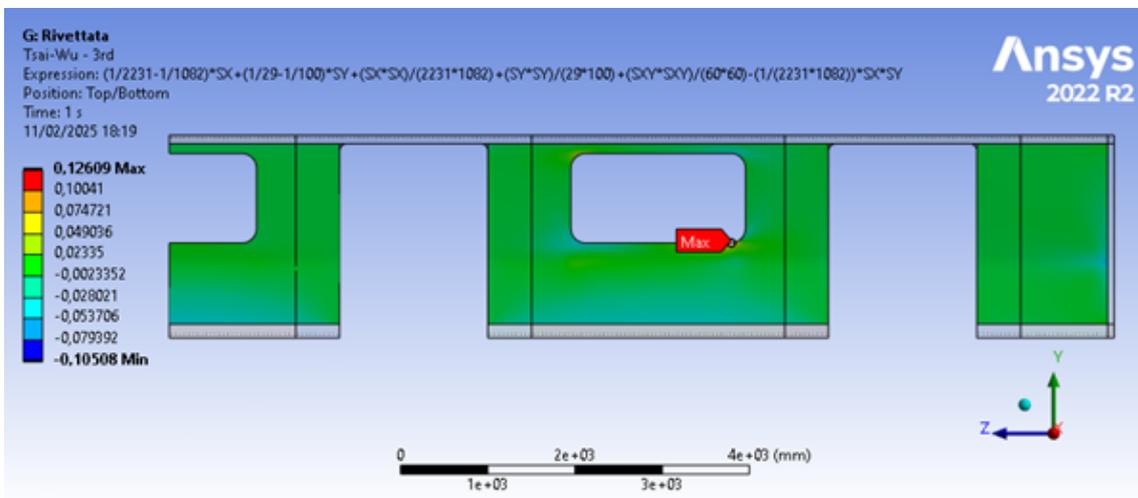


(b) Piano superiore

Figura 4.20: Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di compressione, struttura rivettata



(a) Piano inferiore



(b) Piano superiore

Figura 4.21: Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di compressione, struttura rivettata

Questa volta si osserva la presenza di zone in cui il criterio di Tsai-Wu assume valori significativamente superiori a 1. Tuttavia, si può ipotizzare che tali risultati, localizzati nelle aree di interconnessione, siano imputabili a una mesh non ottimale e distorta, che genera valori numerici non attendibili. Si riportano i valori nella tabella 4.3.

| Lamina | | Valore massimo | Valore minimo | Valore medio |
|---------|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| Prima | Piano inferiore | 7.836 | -0.5419 | 0.0027 |
| | Piano superiore | 10.897 | -0.4204 | 0.0144 |
| Seconda | Piano inferiore | 0.0599 | -0.0579 | -0.0025 |
| | Piano superiore | 0.0660 | -0.0541 | 0.0010 |
| Terza | Piano inferiore | 0.1050 | -0.0608 | -0.0033 |
| | Piano superiore | 0.1261 | -0.1051 | -0.0040 |

Tabella 4.3: Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di compressione, parete rivettata

Si riporta anche la deformazione totale del laminato (4.22). Si può notare che la fiancata si deforma in modo eccessivo, formando una bombatura nella zona della porta.

| Deformazione massima | Deformazione minima | Deformazione media |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| 35.91 mm | 0.4032 mm | 7.633 mm |

Tabella 4.4: Deformazione totale della parete nella prova di compressione, parete rivettata

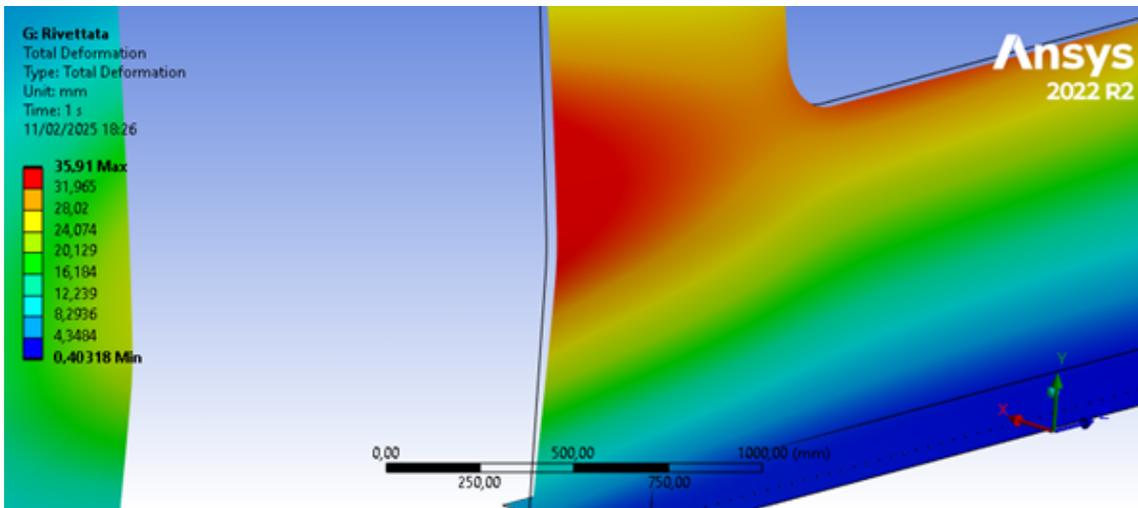
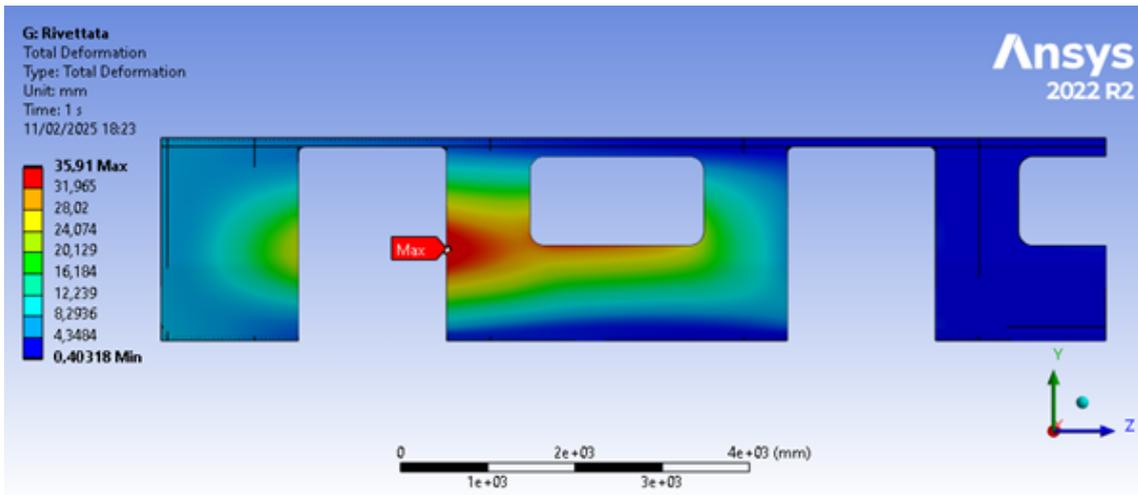
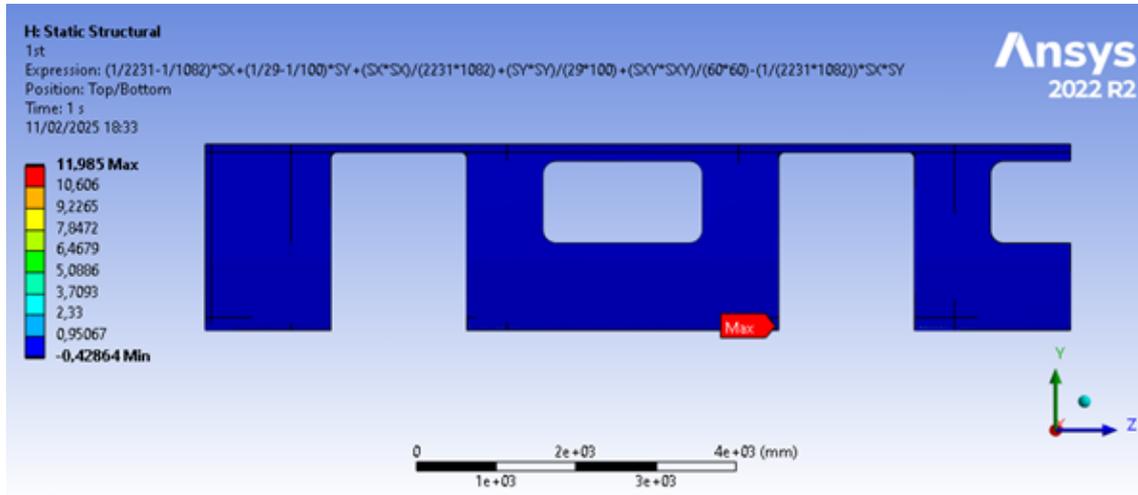


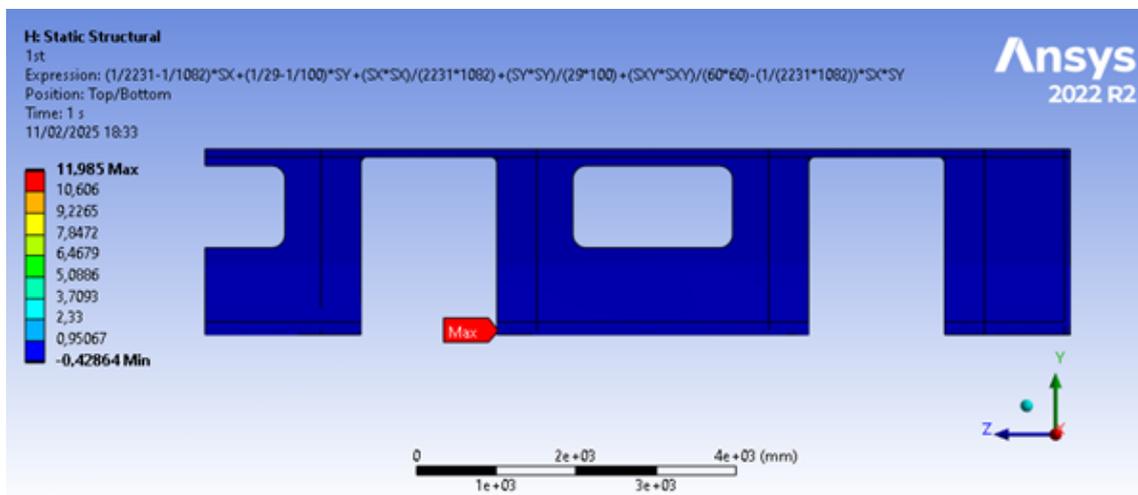
Figura 4.22: Deformazione totale della parete nell'analisi di compressione

Verifica a trazione

Si riportano nuovamente i risultati per ogni singola lamina secondo il criterio di Tsai-Wu. Viene applicato, come per il modello precedente, un carico di trazione pari a 300 kN nei fori di fissaggio del gancio di traino.

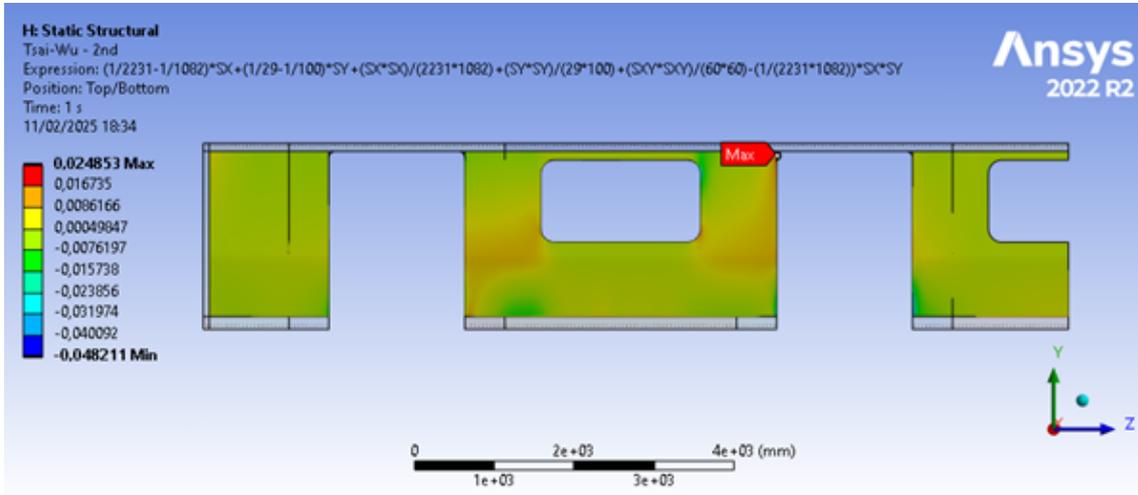


(a) Piano inferiore

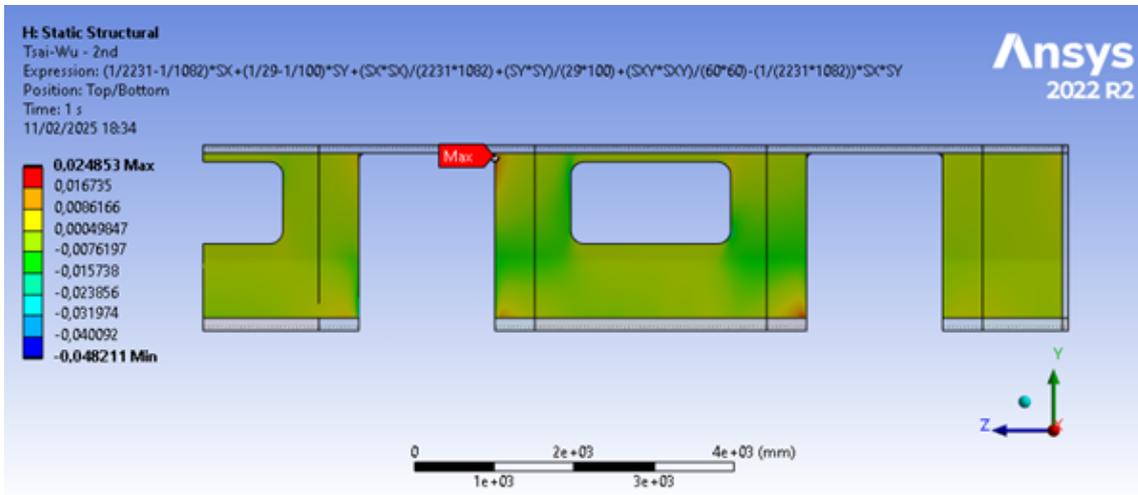


(b) Piano superiore

Figura 4.23: Tensioni al piano superiore e inferiore della prima lamina nell'analisi di trazione, struttura rivettata

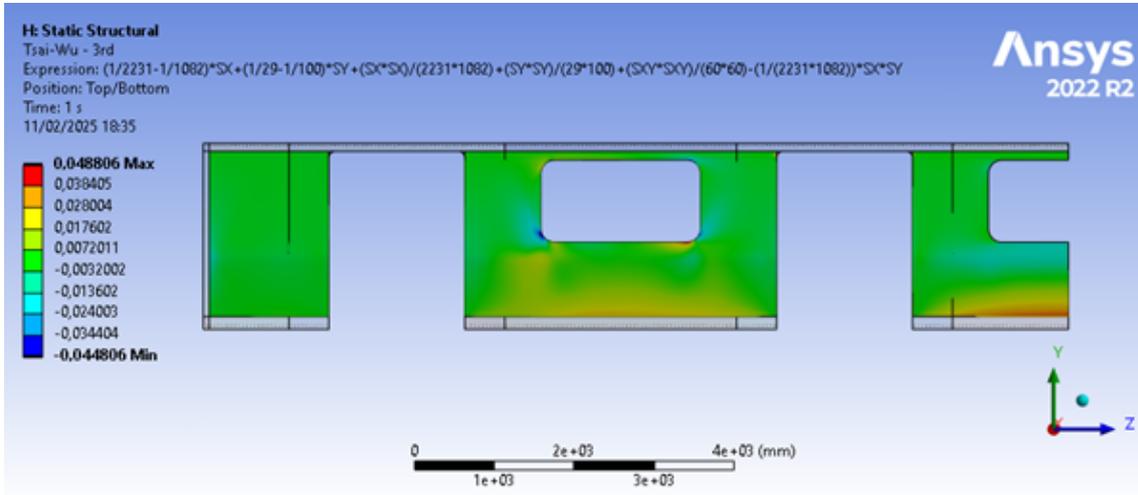


(a) Piano inferiore

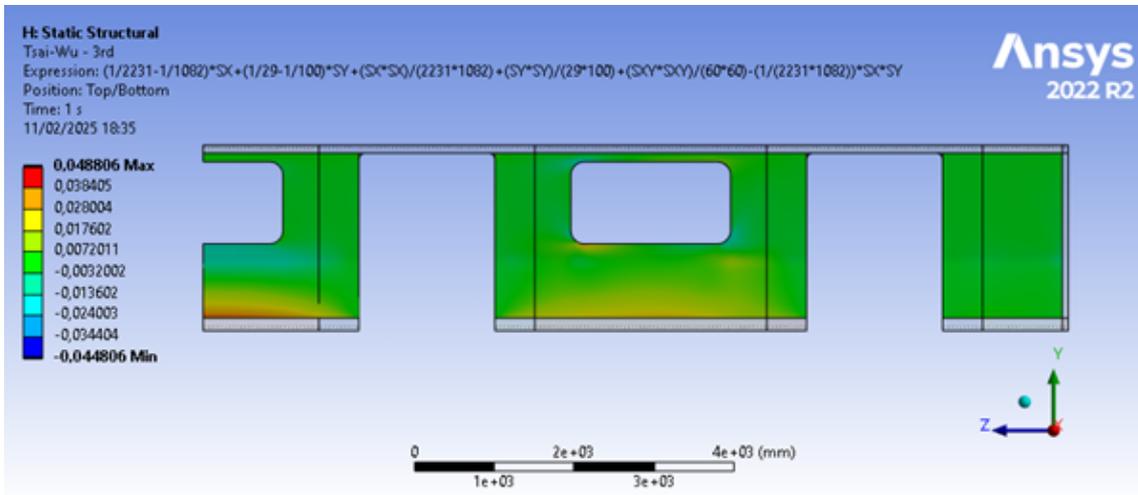


(b) Piano superiore

Figura 4.24: Tensioni al piano superiore e inferiore della seconda lamina nell'analisi di trazione, struttura rivettata



(a) Piano inferiore



(b) Piano superiore

Figura 4.25: Tensioni al piano superiore e inferiore della terza lamina nell'analisi di trazione, struttura rivettata

Si riportano i valori massimi e minimi valutati per ogni lamina e ai due diversi piani superiore e inferiore nella tabella 4.5.

| Lamina | | Valore massimo | Valore minimo | Valore medio |
|---------------|-----------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Prima | Piano inferiore | 2.401 | -0.4196 | 0.0149 |
| | Piano superiore | 11.99 | -0.4286 | 0.0266 |
| Seconda | Piano inferiore | 0.0249 | -0.0302 | -0.0015 |
| | Piano superiore | 0.0233 | -0.0482 | 0.0012 |
| Terza | Piano inferiore | 0.0431 | -0.0260 | 0.0026 |
| | Piano superiore | 0.0488 | -0.0448 | 0.0022 |

Tabella 4.5: Valori del criterio di Tsai-Wu per ogni lamina nella prova di trazione, parete rivettata

Si riporta anche la deformazione totale del laminato (4.26). Come per la prova di compressione si ha lo stesso tipo di deformazione, con valori massimi differenti in quanto il carico applicato è inferiore.

| Deformazione massima | Deformazione minima | Deformazione media |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 18.30 mm | 0.2263 mm | 5.326 mm |

Tabella 4.6: Deformazione totale della parete nella prova di trazione, parete rivettata

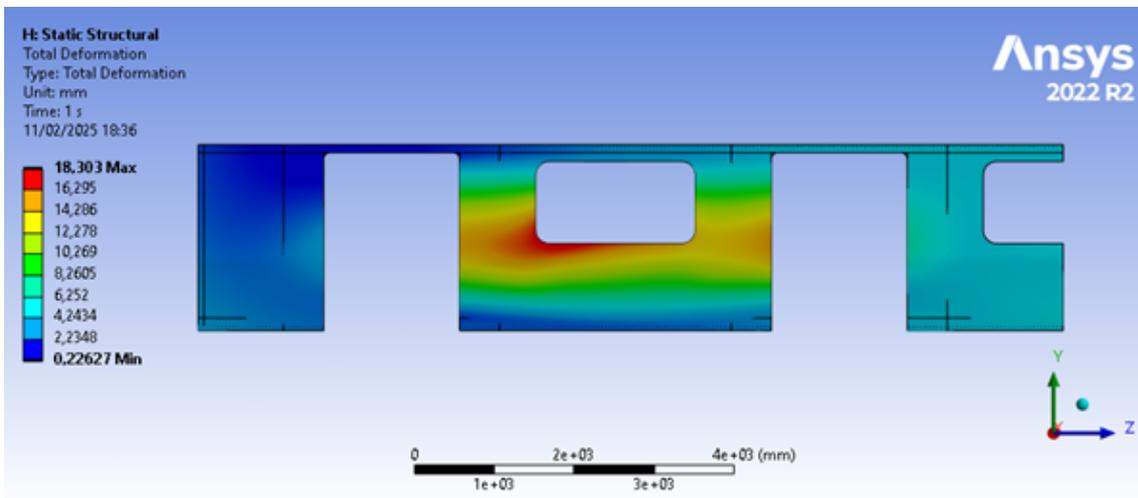
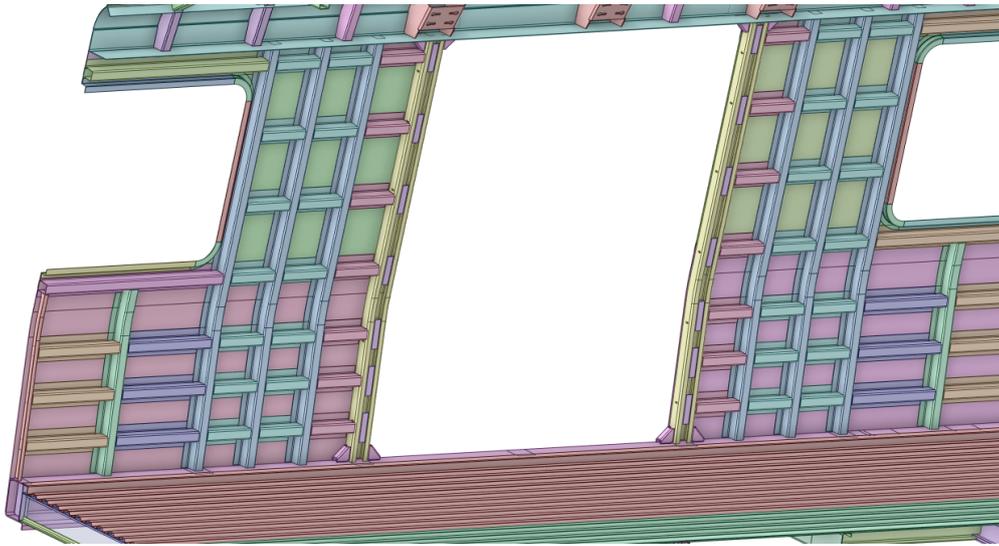


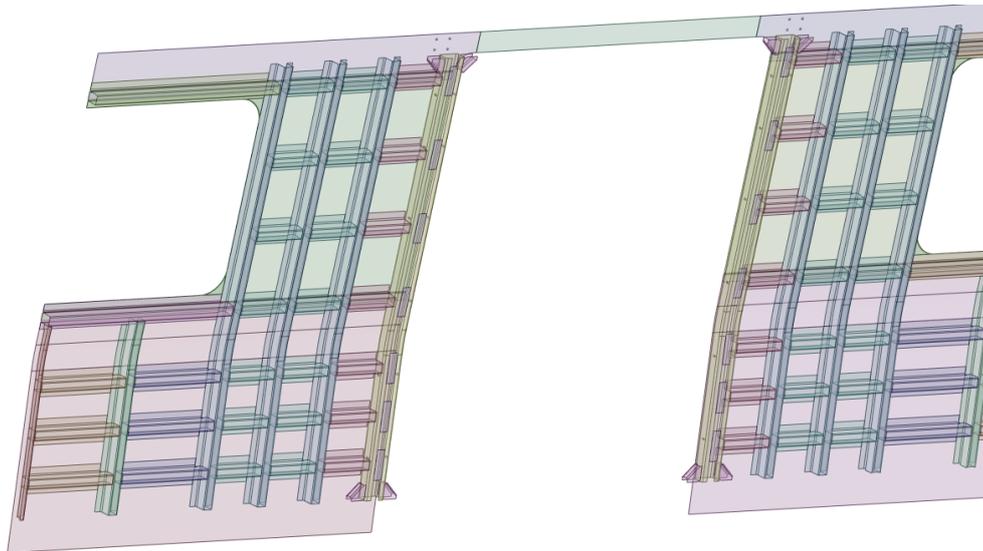
Figura 4.26: Deformazione totale della parete nell'analisi di trazione

4.4 Risultati della cassa originale in acciaio per confronto

Il modello della cassa interamente in acciaio viene creato in modo simile al precedente modello utilizzato. Viene utilizzata la stessa struttura, costituita da elementi SHELL181, mentre vengono sostituiti le superfici rappresentanti la fiancata in composito con le superfici ottenute con le funzioni *midsurface* e *extend* partendo dalla rappresentazione geometrica tridimensionale della parete in acciaio, costituita dalle lamiere esterne e dalle lamiere piegate a forma di omega, fissate alle precedenti per offrire rigidità e sostenere i carichi applicati.



(a) Rappresentazione geometrica della parete in acciaio mediante copri solidi



(b) Parete in acciaio rappresentata da superfici

Figura 4.27: Creazione del modello della parete in acciaio

Si riportano le tensioni ideali di von Mises che si sviluppano nella parete nel caso

in cui questa sia realizzata interamente in acciaio inossidabile, come nel progetto originale.

Considerando, come tensione limite, la tensione di snervamento più bassa in tabella 3.1, ossia $\sigma_{lim} = 345$ MPa, è possibile valutare i coefficienti di sicurezza per le due prove (tabella 4.7).

| Prova | Tensione massima | Coefficiente di sicurezza |
|--------------|-------------------------|----------------------------------|
| Compressione | 179.69 MPa | 1.92 |
| Trazione | 119.5 MPa | 2.89 |

Tabella 4.7: Risultati delle prove per la cassa interamente in acciaio

| Prova | Deformazione massima | Deformazione minima | Deformazione media |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Compressione | 2.89 mm | 0.057 mm | 1.28 mm |
| Trazione | 1.72 mm | 0.877 mm | 1.21 mm |

Tabella 4.8: Deformazioni totali della cassa interamente in acciaio

Verifica a compressione

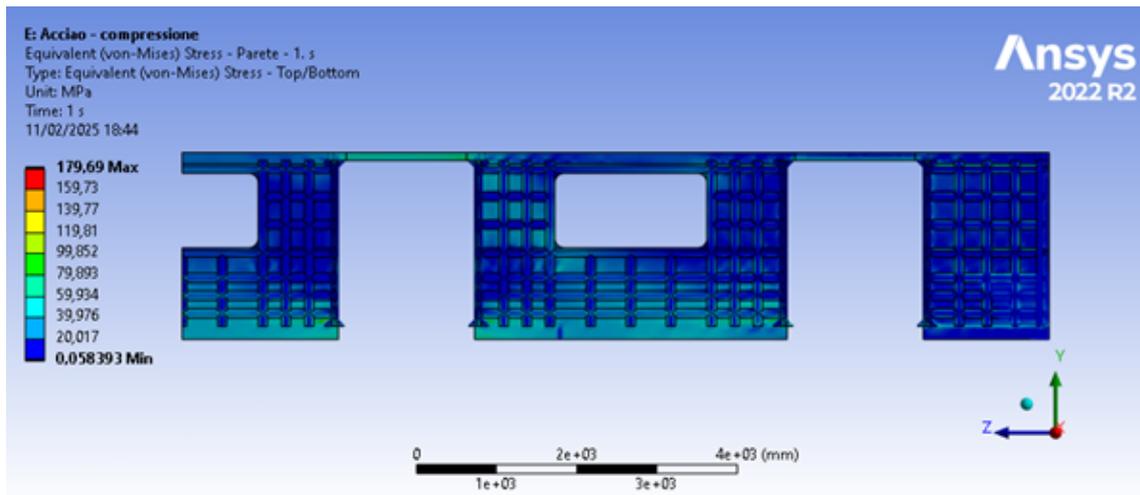
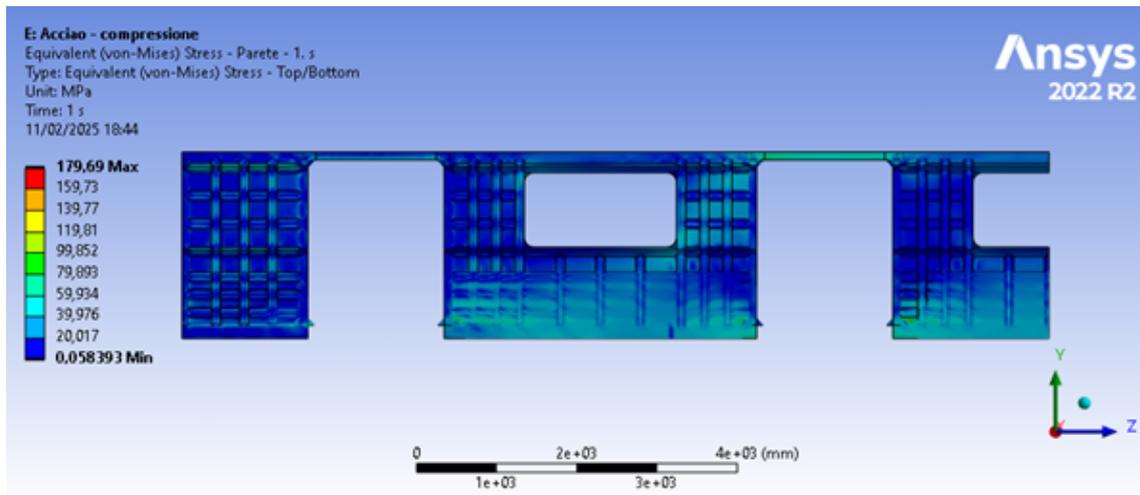


Figura 4.28: Tensioni ideali di von Mises per la parete in acciaio, analisi di compressione

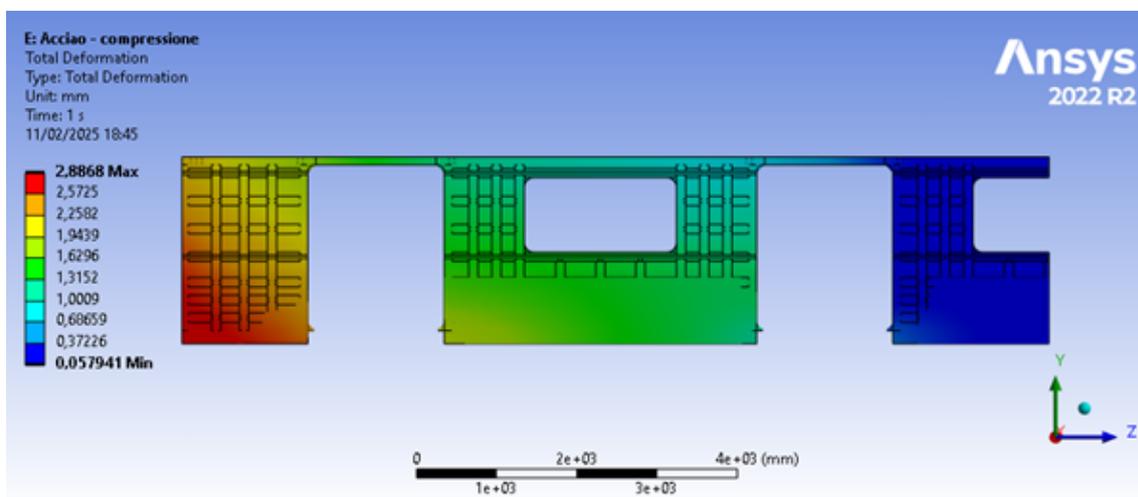


Figura 4.29: Deformazione totale della parete in acciaio nell'analisi di compressione

Verifica a trazione

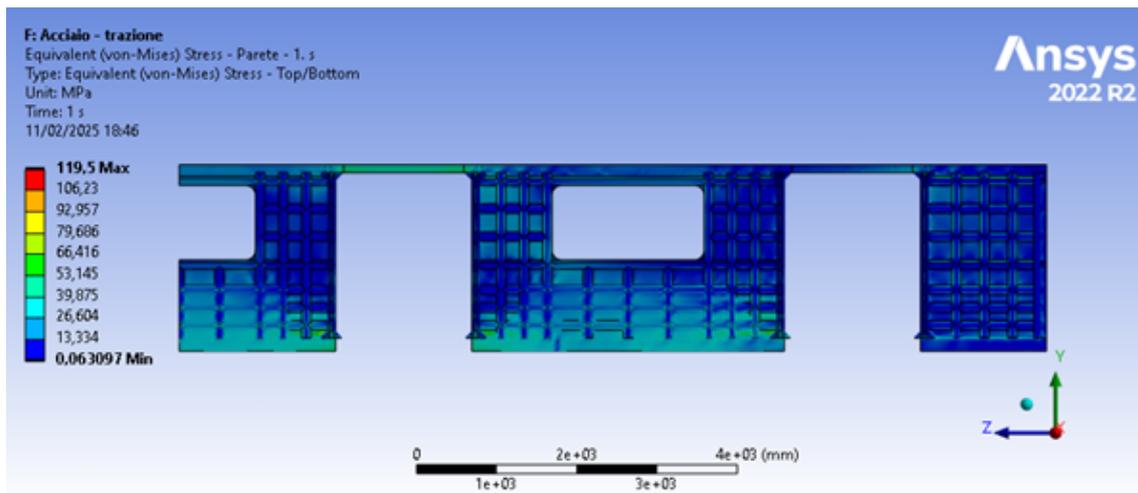
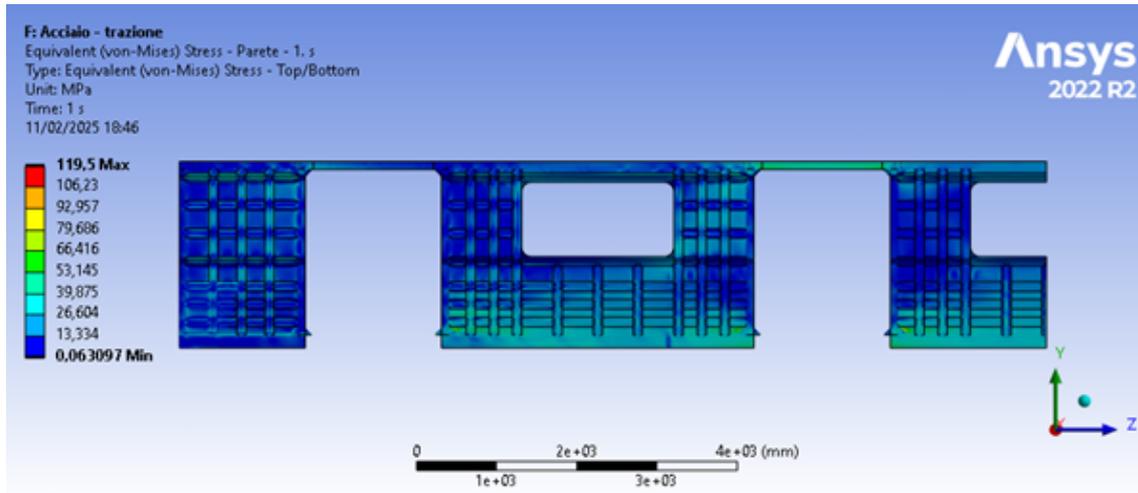


Figura 4.30: Tensioni ideali di von Mises per la parete in acciaio, analisi di trazione

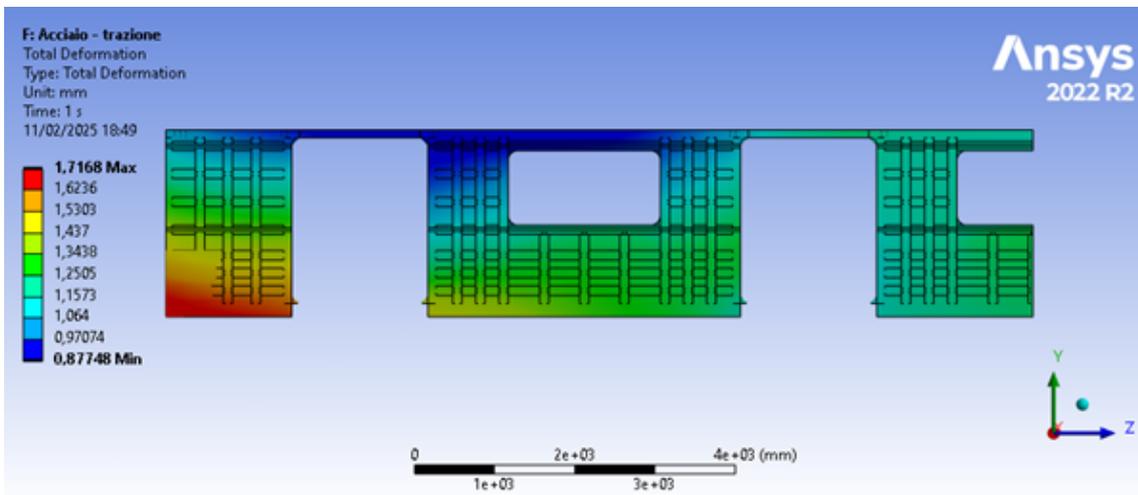


Figura 4.31: Deformazione totale della parete in acciaio nell'analisi di trazione

Capitolo 5

Conclusioni

Il settore dell'industria ferroviaria è sempre più orientato verso soluzioni progettuali innovative che consentano di ridurre il peso complessivo del convoglio, pur mantenendo i requisiti imposti dalle normative di riferimento. Una riduzione della massa della cassa ferroviaria si traduce in possibile aumento del carico pagante trasportabile oppure in risparmio energetico durante la trazione, con benefici sia economici che in termini di efficienza operativa e sostenibilità ambientale.

Lo studio ha evidenziato come l'utilizzo dei materiali compositi, in particolare i laminati CFRP, offrono la possibilità di esplorare nuove soluzioni progettuali per l'ottimizzazione strutturale. Le analisi numeriche dimostrano che tale materiale è in grado di sostenere i carichi di esercizio trasmessi alla fiancata, con una riduzione di peso interessante pari al 18% (tabella 5.1).

| | |
|-----------------------|---------|
| Peso cassa originale | 7659 kg |
| Peso cassa innovativa | 6264 kg |
| Risparmio | 1396 kg |
| | 18% |

Tabella 5.1: Risparmio di peso

Tuttavia, i risultati mostrano anche un'eccessiva deformazione, caratterizzata da una dimensione massima pari a 35.91 mm, non accettabile nelle attuali condizioni progettuali (figura 5.1).

Per risolvere tale criticità, si ipotizza che la soluzione risieda nell'aggiunta di una centina strutturale lungo l'intero perimetro della sezione trasversale della cassa. Questa aggiunta, realizzabile con un laminato unidirezionale in fibra di carbonio, aumenterebbe la rigidità della struttura, riducendo la deformazione e quindi contrastando il fenomeno di bombatura riscontrato nei risultati.

Gli studi futuri dovranno approfondire non solo l'aspetto strutturale, ma anche le implicazioni produttive ed economiche legate all'impiego del materiale composito. Sarà necessario valutare dettagliatamente il processo di produzione della parete

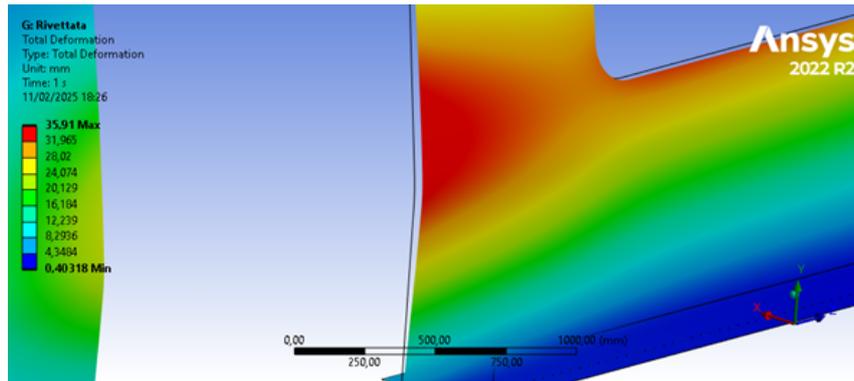


Figura 5.1: Particolare della deformazione della fiancata in composito nell'analisi di compressione

in CFRP, la sua ingegnerizzazione e l'effettiva fattibilità di ottenere le geometrie previste in fase di progetto, in modo da garantire una produzione industrializzabile e ripetibile. Inoltre, sarà necessario anche condurre uno studio economico che tenga conto del compromesso tra il risparmio derivante dall'aumento del carico utile e i costi aggiuntivi legati alla produzione della nuova fiancata innovativa.

Infine, sarà fondamentale eseguire test sperimentali con l'obiettivo di validare le ipotesi progettuali e verificare il comportamento strutturale reale della fiancata e dell'intera cassa. La nuova fiancata, di rigidità diversa da quella originale in acciaio, comporterà una distribuzione delle tensioni che può differire da quella già vista e studiata per la cassa interamente in acciaio, quindi lo studio non può essere limitato alla sola fiancata.

Solo attraverso un'analisi completa, che comprenda aspetti strutturali, produttivi ed economici, sarà possibile valutare la fattibilità di un'applicazione su larga scala di materiali compositi per la progettazione di casse ferroviarie innovative.

Bibliografia

- [1] Meccanica News. *Friction Stir Welding: la saldatura proiettata verso il futuro*. online. Lug. 2022. URL: <https://www.meccanicanews.com/2022/07/06/friction-stir-welding-la-saldatura-proiettata-verso-il-futuro/>.
- [2] Kirk Fraser, Lyne St-Georges e Laszlo I. Kiss. “A Mesh-Free Solid-Mechanics Approach for Simulating the Friction Stir-Welding Process”. In: *Joining Technologies*. A cura di Mahadzir Ishak. Rijeka: IntechOpen, 2016. Cap. 3. DOI: 10.5772/64159. URL: <https://doi.org/10.5772/64159>.
- [3] International Stainless Steel Forum. *Railcars in Stainless Steel – A sustainable solution for Sustainable Public Transport*. 2017. URL: https://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/ISSF_Railcars_in_Stainless_Steel.pdf.
- [4] A. Gugliotta, A. Somà e N. Zampieri. *Elementi finiti*. Quine, 2022. ISBN: 9788831284066. URL: <https://books.google.it/books?id=NoNFzwEACAAJ>.
- [5] *CARBODIN Project - Car Body Shells, Doors and Interiors*. URL: <https://carbodin.eu/projects-99/article/carbodin?recherche=carbodin>.
- [6] Mehdi Yari. *Galvanic Corrosion of Metals Connected to Carbon Fiber Reinforced Polymers*. 2021. URL: <https://www.corrosionpedia.com/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers/2/1556>.
- [7] Ansys Inc. *SHELL181 Element Reference*. Accessed: 2025-02-27. 2022. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html.
- [8] Claudio Badini. *Materiali compositi per l'ingegneria / Claudio Badini*. ita. Torino: CELID, 2013. ISBN: 9788876619922.
- [9] Ansys Inc. *Creating Midsurface Faces*. Accessed: 2025-02-27. 2022. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/spaceclaim/Discovery/user_manual/midsurface.html%23c_creating_midsurface_faces.
- [10] Ansys Inc. *Extending Adjacent Faces*. Accessed: 2025-02-28. 2022. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/spaceclaim/Discovery/user_manual/extend.html%23c_extending_adjacent_faces.

- [11] Robert M. Jones. *Mechanics of composite materials*. eng. 2nd. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- [12] *UNI EN 12663-1: Requisiti strutturali delle casse dei rotabili ferroviari - Parte 1: Locomotive e materiale rotabile per passeggeri (e metodo alternativo per i carri merci)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2010.
- [13] Chris Worrall, Ewen Kellar e Charlotte Vacogne. *Joining of fibre-reinforced polymer composites*. 2020.