

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi strutturale di un telaio da mountain bike  
in materiale composito**



**Politecnico  
di Torino**

**Relatore**

Prof. Marco Gherlone

**Candidato**

Pasquale Santopietro

Ottobre 2021



## Sommario

In questa tesi si effettua l'analisi statica lineare di un moderno telaio da mountain bike realizzato in materiale composito, nello specifico in fibra di carbonio, attraverso il metodo degli elementi finiti. L'obiettivo è quello di valutare lo stato di sollecitazione e deformazione a cui è sottoposto il telaio, ed evidenziare i vantaggi dell'uso del composito in carbonio rispetto ad un altro materiale tipicamente impiegato nella costruzione dei telai ciclistici, l'acciaio.

Il Capitolo 1 è dedicato ad una breve introduzione al lavoro svolto, con cenni sull'evoluzione dei materiali impiegati in ambito ciclistico.

Nel Capitolo 2 si descrivono le proprietà generiche degli acciai e dei materiali compositi, e si definiscono le caratteristiche specifiche dell'acciaio e del composito in fibra di carbonio e resina epossidica impiegati nell'analisi.

Nel Capitolo 3, si descrivono le caratteristiche geometriche di un telaio da mountain bike, e degli elementi strutturali che lo compongono. Inoltre, si analizza la tipologia di carico applicato al telaio.

Nel Capitolo 4, si realizza il modello geometrico tridimensionale del telaio mediante superfici.

Nel Capitolo 5, dopo un'introduzione al metodo degli elementi finiti e ai principi sui quali si basa, si esegue la modellazione FEM del telaio, importando il modello geometrico nel software di pre-processo.

Nel Capitolo 6, si procede con l'analisi statica attraverso il software solutore, esaminandone i risultati in termini di tensioni e deformazioni con il software di post-processo.

Infine, il Capitolo 7, è dedicato all'analisi delle differenze tra la soluzione composita e quella metallica, a parità di vincoli e carichi, e alle relative conclusioni.



# Indice

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Materiali.....</b>	<b>5</b>
2.1 Acciaio .....	6
2.1.1 Acciaio <i>25CrMo4</i> .....	8
2.2 Composito in fibra di carbonio.....	8
2.2.1 <i>Toray T700G-2510</i> .....	15
<b>3. Caratteristiche geometriche del telaio e carichi applicati .....</b>	<b>17</b>
3.1 Geometria del telaio .....	17
3.2 Giant XTC Advanced 29er.....	19
3.3 Tubazioni, scatola movimento centrale, forcellino posteriore .....	20
3.4 Carichi applicati .....	22
<b>4. Modello 3D .....</b>	<b>23</b>
4.1 Finestra principale di Rhinoceros .....	23
4.2 Struttura del telaio .....	25
4.3 Superfici.....	25
<b>5. Modello FEM.....</b>	<b>29</b>
5.1 Fondamenti del Metodo degli Elementi Finiti.....	30
5.1.1 Elemento 0D .....	31
5.1.2 Elemento 1D.....	31
5.1.3 Elemento 2D: l'elemento <i>shell</i> .....	31
5.1.4 Elemento 3D.....	33
5.2 Creazione del modello FEM.....	33
5.2.1 Importazione del modello 3D .....	33
5.2.2 Creazione della <i>Mesh</i> .....	35
5.2.2.1 <i>Mesh Seed</i> .....	35
5.2.2.2 <i>Mesh</i> .....	36
5.2.2.3 Equivalenza e verifica congruenza .....	39
5.2.3 Definizione dei carichi e delle condizioni al contorno.....	40
5.2.3.1 Definizione dei carichi.....	40
5.2.3.2 Definizione delle condizioni al contorno.....	42
5.2.4 Proprietà degli elementi.....	45

5.2.4.1 Caratteristiche del materiale: composito Toray <i>T700G-2510</i> .....	45
5.2.4.2 Tipologia dell'elemento strutturale e assegnazione delle proprietà.....	49
5.2.4.3 Caratteristiche del materiale per acciaio <i>25CrMo4</i> e assegnazione delle proprietà.....	52
<b>6. Analisi Strutturale.....</b>	<b>55</b>
6.1 Analisi statica con <i>Nastran</i> .....	55
6.2 Analisi soluzione modello in composito .....	60
6.2.1 Verifica dell'indice di <i>failure</i> .....	60
6.2.2 Tensioni .....	64
6.2.3 Deformazioni .....	66
6.3 Analisi soluzione modello in acciaio.....	68
6.3.1 Tensioni e verifica dei criteri strutturali .....	68
6.3.2 Deformazioni .....	71
<b>7. Conclusioni .....</b>	<b>75</b>

# 1. Introduzione

L'obiettivo principale di questa tesi è di valutare lo stato di tensione e deformazione di un telaio ciclistico, nello specifico da mountain bike, mediante un'analisi statica lineare.

Il metodo utilizzato è quello cosiddetto degli elementi finiti, abbreviato in FEM (*Finite Element Method*), attualmente il principale mezzo di analisi nell'ambito del calcolo strutturale.

L'idea di base del FEM consiste nel discretizzare il dominio di cui si vuole effettuare l'analisi, in molteplici sottodomini di dimensioni finite, per giungere ad una soluzione al problema approssimata, che tende alla soluzione reale all'aumentare del numero degli elementi finiti ottenuti con la discretizzazione.

Per effettuare un'analisi agli elementi finiti, si utilizza un software generalmente diviso in tre parti:

- un pre-processore, utilizzato per la definizione del modello agli elementi finiti, mediante la creazione o l'importazione della geometria, la discretizzazione del dominio, o *mesh*, e l'applicazione delle condizioni di carico e di vincolo, nonché delle proprietà del materiale;
- un solutore, che, ricevendo in input un file estratto dal pre-processore, genera e risolve le equazioni differenziali relative a ciascun sottodominio, fornendo in output la soluzione richiesta;
- un post-processore, che permette di esaminare anche graficamente i risultati ottenuti dal solutore.

I software utilizzati a tale scopo in questa tesi, sono *MSC Patran 2021 (Student Edition)* in qualità di pre-post-processore, e *MSC Nastran 2021 (Student Edition)* in qualità di solutore.

Per la modellazione geometrica, invece, si è fatto ricorso a *Rhinoceros 7 (Evaluation Version)*.

Il sistema di unità di misura scelto per la modellazione e l'analisi è il sistema internazionale SI.

Tabella 1 – Unità di misura

Grandezza	Unità di misura		Equivalenza
Lunghezza	mm	millimetro	$1 \text{ mm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Massa	ton	tonnellata	$1 \text{ ton} = 1 \cdot 10^3 \text{ kg}$
Tempo	s	secondo	
Forza	N	Newton	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ ton} \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$
Tensione interna	MPa	megaPascal	$1 \text{ MPa} = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Densità	ton/mm <sup>3</sup>		$1 \frac{\text{ton}}{\text{mm}^3} = 1 \cdot 10^{12} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Accelerazione di gravità	g		$1 \text{ g} = 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9806 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$

Il FEM, originariamente sviluppato per lo studio delle tensioni agenti sulle strutture aeronautiche, trova oggi applicazioni in molteplici campi, dalla meccanica alla fluidodinamica, all'acustica. La scelta di analizzare un telaio ciclistico, in particolare da mountain bike, è legata ad una personale passione per tale disciplina.

La mountain bike (spesso abbreviata in MTB, acronimo di Mountain/Trial Bike o Mountain Trail Bike) è una tipologia di bicicletta concepita appositamente per affrontare percorsi fuoristrada, ed è caratterizzata da ruote larghe e tassellate, e dalla presenza di sospensioni (solo anteriore o anche posteriore).



Figura 1 – Giant XTC Advanced 29ER 2018 [1]

I primi modelli di mountain bike, realizzati negli USA nella seconda metà degli anni '70, presentano una configurazione molto simile a quella delle bici da strada, ovvero la cosiddetta forma *a diamante*, costituita da due triangoli con un lato in comune. Il triangolo anteriore, in realtà un quadrilatero irregolare, è costituito da un tubo verticale, nel quale si inserisce la sella mediante il reggisella, collegato, con un tubo orizzontale ed uno obliquo, al tubo sterzo, nel quale si inseriscono lo sterzo appunto, e la forcella. Il triangolo posteriore, detto anche *carro*, presenta due coppie di *foderi*, che partendo dal tubo verticale, si uniscono creando la sede di aggancio della ruota posteriore.

Il materiale utilizzato è l'acciaio, anch'esso mutuato dai modelli di biciclette in produzione all'epoca, grazie alle sue caratteristiche meccaniche e tecnologiche adatte a resistere alle sollecitazioni derivanti dall'uso intensivo della bicicletta. L'acciaio, infatti, è caratterizzato da elevata rigidità, cioè la capacità di resistere alle deformazioni, ed elevata resistenza a fatica, cioè la capacità di sopportare, senza giungere a cedimento, carichi ciclicamente variabili nel tempo, seppure inferiori a quello di rottura; quest'ultima caratteristica conferisce ad un telaio ciclistico una durata praticamente infinita. Tuttavia l'acciaio è soggetto a corrosione e, soprattutto, ha un'elevata densità, che si traduce in un peso del telaio complessivamente elevato.

Ricercando soluzioni alternative e più leggere, comincia a diffondersi l'uso della lega di alluminio, avente una densità circa tre volte inferiore a quella dell'acciaio, a cui corrisponde, però, un modulo elastico anch'esso tre volte inferiore a quello dell'acciaio. Per conferire, dunque, le stesse caratteristiche di rigidità di un telaio in acciaio, si adottano sezioni oversize dei tubi, con conseguente aumento della resistenza a torsione, e geometrie cosiddette *sloping*, ovvero tubo orizzontale non più parallelo al terreno, ma inclinato posteriormente verso il basso.

L'impiego del composito in carbonio comincia a metà degli anni '90, inizialmente per la sua elasticità, maggiore rispetto all'alluminio: i foderi del telaio, infatti, iniziano ad essere realizzati in materiale composito, per migliorare il comfort di guida, ovvero la capacità di assorbire le vibrazioni trasmesse dal terreno al ciclista attraverso il telaio.

La differenza di potenziale elettrico tra i due materiali a contatto (alluminio e composito), tuttavia, comporta dei flussi galvanici, che, in breve tempo, causano fenomeni di corrosione e, di conseguenza, cedimenti della struttura. Anche i primi telai realizzati completamente in

composito di carbonio presentano il fenomeno della corrosione galvanica, essendo i vari tubi uniti tra di loro con congiunzioni in alluminio.

L'introduzione di elementi di incollaggio anch'essi in composito, con relativo aumento della sicurezza della struttura, e l'industrializzazione dei processi produttivi, hanno permesso, nel corso degli anni 2000, una rapida diffusione di telai interamente in composito di carbonio. I principali vantaggi rispetto all'alluminio e all'acciaio sono:

- la maggiore elasticità, per un migliore smorzamento delle vibrazioni, come già detto;
- la minore densità, che unita all'elevata rigidità e all'alta resistenza a trazione, si traducono in un notevole risparmio del peso complessivo;
- la maggiore resistenza a fatica e alla corrosione, che aumentano in modo rilevante la durata dei prodotti.

I processi di realizzazione di un telaio in composito di carbonio sono complessi e costosi, per tale motivo, attualmente, è il materiale principalmente utilizzato per la realizzazione dei modelli di media e alta gamma. Per modelli più economici, si usa ancora l'alluminio, per il minor costo del materiale e dei metodi di lavorazione. L'acciaio, invece, è ormai relegato ad un piccolo segmento di mercato, costituito prevalentemente da appassionati.

## 2. Materiali

I materiali scelti per l'analisi ed il confronto, sono l'acciaio e il composito in fibra di carbonio, che, come descritto nell'introduzione, rappresentano, astrattamente, due punti fondamentali dell'evoluzione tecnologica dei materiali in ambito ciclistico, e non solo.

Le principali proprietà fisiche e meccaniche prese in considerazione per descriverne il comportamento, sono:

- la densità  $\rho$ , è il rapporto tra massa e volume, la cui unità di misura è generalmente  $kg/m^3$ ;
- la rigidità, è la capacità di resistere alla deformazione elastica sotto l'azione di una forza esterna; le rigidità longitudinale e trasversale sono espresse tramite il modulo di Young  $E$ , che rappresenta il rapporto tra tensione e deformazione; la rigidità tangenziale, invece, è espressa mediante il modulo tangenziale o di taglio  $G$ , rapporto tra taglio e scorrimento angolare; le due grandezze sono legate secondo la relazione generica

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

dove  $\nu$  è il *coefficiente di Poisson*, caratteristica intrinseca del materiale, che rappresenta il grado di variazione trasversale di un corpo soggetto a trazione;

- la resistenza, indica il massimo sforzo che un materiale può sopportare senza giungere a rottura, e si differenzia, in base al tipo di sollecitazione, in resistenza a trazione, compressione, torsione o taglio; la grandezza che valuta la resistenza è il carico a rottura  $\sigma_R$ ;
- il carico di snervamento, rappresenta il punto di transizione da deformazione elastica a plastica; infatti, per valori inferiori, cessata la sollecitazione, il corpo torna al suo stato iniziale, invece, per valori superiori al carico di snervamento, il corpo subisce una deformazione permanente; esso è generalmente indicato con  $\sigma_{0.2}$ , ovvero il carico che produce una deformazione plastica pari allo 0.2% della configurazione iniziale.

Rigidità, resistenza e carico di snervamento si misurano in  $MPa$  o  $N/mm^2$ .

## 2.1 Acciaio

L'acciaio è una lega metallica, costituita principalmente da ferro e carbonio, che presenta elevate prestazioni in termini di rigidità, resistenza, resistenza a fatica, cioè la capacità di sopportare carichi ciclicamente variabili nel tempo senza giungere a rottura, e durezza, ovvero l'attitudine a resistere a scalfittura e penetrazione.

L'acciaio è un materiale isotropo ed omogeneo, ovvero è caratterizzato da proprietà meccaniche e fisiche indipendenti dalla direzione e dalla posizione.

Le proprietà tecnologiche principali sono la malleabilità e la duttilità, rispettivamente l'attitudine ad essere trasformato in fili sottili e in lamine sottili.

Il tenore di carbonio presente, il cui valore massimo è in genere il 2 %, conferisce il grado di durezza, e consente una prima classificazione degli acciai, che va dagli *extra dolci* agli *extra duri*.

Tabella 2 - Caratteristiche degli acciai al carbonio

	carbonio %	carico di snervamento [N/mm <sup>2</sup> ]	carico di rottura a trazione [N/mm <sup>2</sup> ]	durezza [N/mm <sup>2</sup> ]	allungamento a rottura %
extra dolci	0,06 - 0,13	330 - 430	450 - 550	150	16 - 20
dolci	0,13 - 0,2	380 - 500	550 - 650	180	14 - 18
semiduri	0,3 - 0,4	400 - 600	600 - 800	230	10 - 13
duri	0,5	650	800 - 850	260	8 - 11
extra duri	0,6	650 - 750	900 - 1000	300	6 - 9

Una ulteriore distinzione degli acciai si basa sulla quantità di altri elementi presenti, oltre a ferro e carbonio, come manganese, silicio, cromo e molibdeno. Se il tenore di questi elementi è inferiore al valore stabilito dalla normativa, si parla di acciai *non legati*, altrimenti si definiscono *legati*.

La presenza degli elementi di lega determina la variazione delle proprietà meccaniche e tecnologiche, per questo vengono aggiunti, durante il processo di fabbricazione, in specifiche percentuali per la produzione di acciai con caratteristiche definite.

Tabella 3 - Influenza degli elementi di lega sulle proprietà dell'acciaio [2]

Elemento di lega	Caratteristiche Meccaniche									Velocità di raffreddamento	Formazione di carburi	Resistenza ad usura	Fucibilità	Truciolabilità	Resistenza all'ossidazione	Nitribilità	Resistenza alla corrosione
	Durezza	Carico di rottura	Carico di snervamento	Allungamento	Stirazione	Resilienza KV	Elasticità	Carico di rottura a caldo									
Silicio (Si)	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	↓	↓	—
Manganese (Mn) negli acciai perlitici	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓	↑	↓	~	~	—	—
Manganese (Mn) negli acciai austenitici	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	—	—	—	↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	—	—	—
Cromo (Cr)	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	—	↓↓↓	↑↑	↑↑↑	—
Nichel (Ni) negli acciai perlitici	↑	↑	↑	~	~	~	—	↑	↓	—	↓	↓	↓	↓	—	—	—
Nichel (Ni) negli acciai austenitici	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	—	↑↑↑	↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	—	↑↑	—
Alluminio (Al)	—	—	—	—	↓	↓	—	—	—	—	—	↓	—	↓	↑↑↑	—	—
Tungsteno (W) (Wolframio)	↑	↑	↑	↓	↓	~	—	↑↑↑	↓	↑↑	↑↑↑	↓	↓	↓	↓	↑	—
Vanadio (V)	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑	—	↓	↑	↑	—
Cobalto (Co)	↑	↑	↑	↓	↓	↓	—	↑↑	↑↑	—	↑↑↑	↓	~	↓	—	—	—
Molibdeno (Mo)	↑	↑	↑	↓	↓	↑	—	↑↑	↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	↑↑	—	—
Rame (Cu)	↑	↑	↑↑	~	~	~	—	↑	—	—	—	↓↓↓	~	~	—	—	↑
Zolfo (S)	—	—	—	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↑↑↑	—	—	—	↓
Fosforo (P)	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	—	—	—	—	—	↓	↑↑	—	—	—	—

Tabella 4 - Acciai legati e non legati

	modulo di Young [N/mm <sup>2</sup> ]	densità [kg/dm <sup>3</sup> ]	carico di rottura a trazione [N/mm <sup>2</sup> ]	coefficiente di dilatazione termica
C40 (non legato)	220000	7,87	500	0,0108
C45 (non legato)	220000	7,87	680	0,0108
42CrMo4 (legato)	230000	7,87	1050	0,0124
18NiCrMo5 (legato)	230000	7,87	980	0,0124
AISI 304 INOX	196000	7,91	515	0,0165

### 2.1.1 Acciaio 25CrMo4

Un acciaio ad elevate prestazioni utilizzato nella costruzione dei telai ciclistici, ma anche per la realizzazione di elementi strutturali in campo aeronautico e automobilistico, è il 25CrMo4, in cui, la presenza di cromo e molibdeno induce incrementi di:

- resistenza all'usura e alla corrosione;
- durezza e resistenza meccanica ad alta temperatura;
- attitudine alla tempra, trattamento termico atto ad aumentare la resistenza meccanica;
- stabilità al rinvenimento, trattamento di raffreddamento successivo alla tempra;
- saldabilità e lavorabilità.

La composizione chimica è definita dalla norma europea *UNI EN 10083-3*:

Tabella 5 - Composizione chimica 25CrMo4 UNI EN 10083-3

	C	Mn	Si max	P max	S	Cr	Mo
%	0,22 - 0,29	0,6 - 0,9	0,4	0,025	0,02 - 0,04	0,9 - 1,2	0,15 - 0,3

Ai fini dell'analisi svolta in questa tesi, si assumono i seguenti valori tipici:

- modulo di Young:  $E = 205000 \text{ MPa}$
- coefficiente di Poisson:  $\nu = 0.29$
- densità:  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3 = 7800 \cdot 10^{-12} \text{ ton/mm}^3$
- carico a rottura:  $\sigma_R = 1200 \text{ MPa}$
- carico di snervamento:  $\sigma_{0.2} = 760 \text{ MPa}$

## 2.2 Composito in fibra di Carbonio

Un materiale composito è, nella sua accezione generale, un materiale costituito da due o più fasi, chimicamente distinte e con proprietà fisiche e meccaniche sensibilmente diverse, e dei quali è possibile individuare, macroscopicamente, le superfici di interfaccia.

Nei compositi costituiti da due componenti, si definisce *rinforzo* il componente più resistente, presente in genere in forma discontinua, e *matrice* il componente meno resistente, e presente invece in forma continua.

Una prima distinzione dei materiali compositi si basa sulla forma del rinforzo, per cui si parla di compositi rinforzati con particelle, e compositi fibrosi.

Nei compositi rinforzati con particelle, disposte ad orientamento casuale o preferenziale, le particelle hanno il compito di migliorare alcune caratteristiche della matrice, come la durezza superficiale e la resistenza all'usura, senza produrre aumenti significativi delle proprietà meccaniche.

Diversamente per i compositi rinforzati con fibre, la cui presenza conferisce elevati valori di resistenza e rigidità, e per tale motivo sono impiegati per la realizzazione di elementi strutturali.

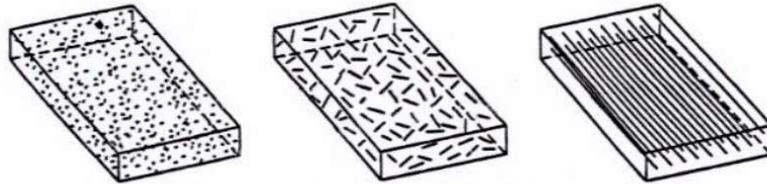


Figura 2 - Compositi rinforzati con particelle e con fibre corte e lunghe

A titolo di esempio, si riportano i valori di rigidità, espressa tramite il modulo di Young, e resistenza, espressa in termini di carico di rottura a trazione, delle fibre solitamente utilizzate per la realizzazione dei materiali compositi, e alcuni materiali convenzionali.

Tabella 6 - Rigidezza e resistenza di fibre e materiali convenzionali [5]

Material	Tensile modulus ( $E$ ) (GN/m <sup>2</sup> )	Tensile strength ( $\sigma_u$ ) (GN/m <sup>2</sup> )	Density ( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	Specific modulus ( $E/\rho$ )	Specific strength ( $\sigma_u/\rho$ )
<b>Fibers</b>					
E-Glass	72.4	3.5	2.54	28.5	1.38
S-Glass	85.5	4.6	2.48	34.5	1.85
Graphite (high modulus)	390.0	2.1	1.90	205.0	1.1
Graphite (high tensile strength)	240.0	2.5	1.90	126.0	1.3
Boron	385.0	2.8	2.63	146.0	1.1
Silica	72.4	5.8	2.19	33.0	2.65
Tungsten	414.0	4.2	19.30	21.0	0.22
Beryllium	240.0	1.3	1.83	131.0	0.71
Kevlar-49 (aramid polymer)	130.0	2.8	1.50	87.0	1.87
<b>Conventional materials</b>					
Steel	210.0	0.34-2.1	7.8	26.9	0.043-0.27
Aluminum alloys	70.0	0.14-0.62	2.7	25.9	0.052-0.23
Glass	70.0	0.7-2.1	2.5	28.0	0.28-0.84
Tungsten	350.0	1.1-4.1	19.30	18.1	0.057-0.21
Beryllium	300.0	0.7	1.83	164.0	0.38

Le fibre prevalentemente utilizzate nei materiali compositi ad impiego strutturale sono le fibre di vetro, quelle di aramide, meglio conosciute con il marchio Kevlar, e soprattutto le fibre di carbonio.

Le fibre di vetro, antesignane nella realizzazione di compositi fibrosi, sono caratterizzate da basso costo, elevata rigidezza, comparabile con quella dell'alluminio, e notevole resistenza meccanica, superiore a quella dell'acciaio. Le fibre di aramide sono impiegate per la costruzione di elementi soggetti ad impatto, grazie alla loro elevata resistenza all'urto.

Le fibre di carbonio sono attualmente le più impiegate, per merito anche della riduzione dei costi di produzione, e, dapprima impiegate prevalentemente in aeronautica, trovano applicazione in diversi campi, dall'automotive agli articoli sportivi.

Hanno un diametro dell'ordine di  $10 \mu m$ , e sono contraddistinte da elevata rigidezza, superiore rispetto alla fibre di vetro, e rigidezza specifica (rapporto rigidezza/peso) pari a otto volte quella dei materiali tradizionali come acciaio e alluminio. In base alla rigidezza, si possono classificare in:

- *SM (Standard Modulus)*: modulo elastico minore di 250 GPa, detta anche *HS High Strength/High Stain*
- *IM (Intermediate Modulus)*: modulo elastico tra 250 GPa e 320 GPa
- *HM (High Modulus)*: modulo elastico tra 320 GPa e 440 GPa
- *UHM (Ultra High Modulus)*: modulo elastico maggiore di 440 GPa

Tabella 7 – Caratteristiche di diverse fibre commerciali

	Modulo di Young [GPa]	carico di rottura a trazione [GPa]	allungamento a rottura %	densità [g/cm <sup>3</sup> ]	Poisson
T300	230	3,53	1,5	1,75	0,2
M50	490	2,45	0,5	1,91	0,2
AS2	227	2,756	1,3	1,8	0,2
AS4-D	241	4,134	1,6	1,77	0,2
IM6	275,6	5,133	1,73	1,74	0,2
HMS4	317	2,343	0,8	1,8	0,2
UHM	441	3,445	0,8	1,85	0,2
P55	379	1,9	0,5	2	0,2
P100	758	2,41	0,32	2,16	0,2

Si può notare che, all'aumento di rigidità, corrisponde un aumento della fragilità, come si evince dai valori dell'allungamento percentuale a rottura.

Le fibre di carbonio si ottengono generalmente modificando le proprietà organiche di un precursore, il poliacrilonitrile (*PAN-based fiber*) o la pece (*pitch-based fibers*), mediante un processo di carbonizzazione e successivi trattamenti termici.

La matrice di un materiale composito ha il compito di tenere insieme le fibre, trasferire le sollecitazioni dall'esterno alle fibre e tra le fibre stesse, e di proteggerle da danni meccanici e agenti atmosferici.

Per assolvere a tali compiti, la matrice, oltre a possedere una buona resistenza meccanica, deve essere resistente alla corrosione e agli agenti atmosferici, e presentare una buona caratteristica di resistenza allo scorrimento fibra-matrice.

In base ai materiali che rispondono a tali requisiti e che vengono impiegati a tale scopo, si distingue tra matrici metalliche, ceramiche e polimeriche. Le prime due sono state

sviluppate essenzialmente per aumentare le prestazioni dei metalli tradizionali e per ottenere componenti ad elevata resistenza termica; le matrici polimeriche, abbinata alle fibre di vetro, carbonio e aramide, sono quelle maggiormente impiegate in ambito strutturale.

Il materiale di cui sono costituite le matrici polimeriche sono le resine termoplastiche e, soprattutto, le resine termoindurenti, che consentono di raggiungere rapporti in volume di fibra e matrice superiori all'80%. Tra le resine termoindurenti il polimero più in uso è la resina epossidica, in alternativa la resina poliestere per un riduzione dei costi, la resina poliammidica per una temperatura di esercizio elevata, la resina fenolica per la capacità di resistere al fuoco.

La resina epossidica possiede buona resistenza meccanica e alla frattura, agli agenti ambientali e alla corrosione, e permette di ottenere un ottimo legame tra fibra e matrice, che riduce il rischio di delaminazione, cioè il distacco tra le diverse lamine che costituiscono il composito, e che ne possono comportare la rottura.

Le resine termoplastiche invece, si impiegano quando si vuole privilegiare la resistenza all'urto e alla frattura, e, per effetto del rammollimento, consentono la giunzione di parti diverse mediante riscaldamento locale.

Tabella 7 – Caratteristiche delle resine

	poliestere	epossidica	fenolica	siliconica	termoplastica
densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1100 - 1460	1110 - 1400	300 - 1320	1700 - 1900	1300
modulo a trazione [Mpa]	2 - 4,5	2,3 - 3,9	3,1	-	3,8
resistenza a trazione [MPa]	42 - 68	28 - 91	41 - 62	20 - 48	100
resistenza a compressione [MPa]	90 - 186	100 - 175	86 - 103	62 - 124	-
resistenza a flessione [MPa]	275	106 - 129	75 - 117	67	-
coeff dilatazione termica	80 - 100	50 - 70	60 - 80	300	-
Poisson	0,34	0,2 - 0,34	0,3 - 0,5	-	-
assorbimento H <sub>2</sub> O (%)	0,15 - 0,6	0,08 - 0,15	0,3 - 1	0,2 - 0,5	-

Le proprietà meccaniche delle resine polimeriche non sono confrontabili con quelli delle fibre, per questo motivo, la resistenza e la rigidità specifiche del composito sono inferiori a

quelle delle singole fibre, ma comunque elevate ed in genere superiori a quelle dei materiali convenzionali.

Tabella 8 - Rigidezza e resistenza di compositi e materiali convenzionali

	densità $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	modulo di Young E [Gpa]	carico di rottura a trazione $\sigma_r$ [GPa]	E/ $\rho$	$\sigma_r/\rho$
composito carbonio- resina epossidica 58% fibre uniassiali	1,5	189	1050	126	700
composito vetroresina poliestere 50% fibre uniassiali	2	48	1240	24	620
composito Kevlar-resina epossidica 60% fibre uniassiali	1,4	76	1240	54	886
acciaio	7,8	207	1000	27	128
alluminio	2,8	71	500	25	179

L'orientamento del rinforzo all'interno della matrice, influisce sull'anisotropia del composito: se è distribuito in maniera casuale, allora si può parlare di isotropia, cioè caratteristiche indipendenti dalla direzione; se è distribuito con orientamento fisso, le caratteristiche dipendono dalla direzione del rinforzo, e il materiale è da considerarsi anisotropo.

I materiali compositi fibrosi sono disponibili generalmente in forma di semilavorati, detti *prepregs* e disponibili in varie forme e dimensioni, ovvero lamine di spessore compreso tra 0.1 e 1 mm, con matrice non completamente polimerizzata, e fibre unidirezionali o bidirezionali a formare dei veri e propri tessuti. Tali lamine vengono sovrapposte, con orientamento fisso o variabile, e portando a termine la polimerizzazione, permettono di ottenere laminati compositi di spessore e forma variabili, e anisotropia secondo le esigenze progettuali.

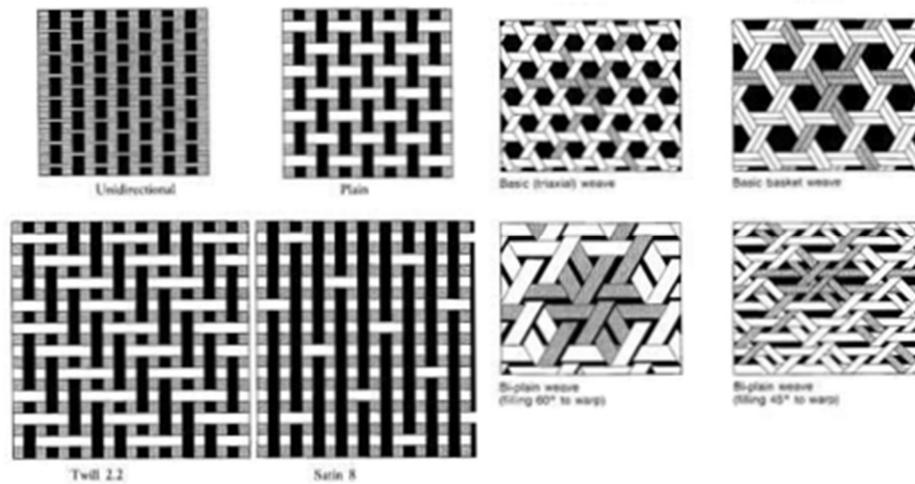


Figura 3 – Configurazioni di lamine unidirezionali e bidirezionali

Una lamina unidirezionale può essere schematizzata come un complesso di fibre parallele ed equidistanti, immerse in un matrice, in cui è possibile individuare una direzione longitudinale  $l$  parallela alle fibre, e due direzioni trasversali 2 e 3.

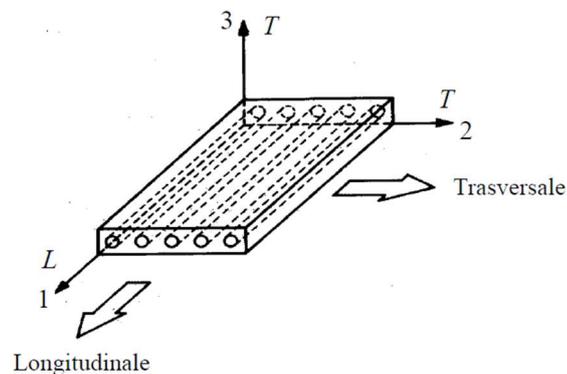


Figura 4 – Schematizzazione di una lamina unidirezionale

Le caratteristiche meccaniche in un qualsiasi direzione ortogonale a quella delle fibre, sono notevolmente inferiori a quelle nella direzione longitudinale, per cui la lamina si può considerare trasversalmente isotropa.

Il comportamento elastico ortotroppo di una lamina trasversalmente isotropa, è definito da:

- $E_1$ : modulo di Young longitudinale
- $E_2$ : modulo di Young trasversale
- $G_{12}$ : modulo elastico tangenziale nel piano della lamina
- $\nu_{12}$ : coefficiente di Poisson nel piano della lamina

Per esprimere il legame tra le proprietà dei singoli componenti e quelle del composito, si ricorre alla *teoria delle miscele*, secondo la quale, la generica proprietà del composito è data dalla media pesata delle proprietà del rinforzo e della matrice, secondo le concentrazioni espresse solitamente in termini di volume.

Sulla base di tale teoria, indicando con il pedice  $f$  le grandezze relative alle fibre, con  $m$  quelle relative alla matrice, e con  $c$  quelle relative al composito, e  $V_f$  e  $V_m$  le frazioni in volume, ovvero il rapporto tra i volumi di fibre e matrice e quello totale del composito, si può scrivere la densità del composito, e le grandezze elastiche:

- $\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$
- $E_1 = E_f V_f + E_m V_m$ ;  $E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f}$ ;
- $G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f}$ ;  $G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}$ ;  $G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$
- $\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$

### 2.2.1 Toray T700G-2510

Per la produzione dei telai da bici, è molto diffuso l'impiego delle fibre di carbonio prodotte dall'azienda giapponese Toray, e tra queste, si prendono in considerazione le T700G, del tipo Standard Modulus, di cui sono riportate le caratteristiche nella tabella successiva, tratte dal data sheet della Toray [4]:

Tabella 9 - Caratteristiche delle fibre T700G

carico di rottura a trazione $\sigma_r$	4900 MPa
modulo di Young	240 GPa
allungamento a rottura %	2
densità	1,80 g/cm <sup>3</sup>
diametro	7 $\mu$ m

Tali fibre sono impiegate per la produzione di lamine prepreg in resina epossidica, con orientamento unidirezionale, di cui si assumono le caratteristiche per la definizione del composito in carbonio, da associare al telaio oggetto dell'analisi:

Tabella 10 - Caratteristiche lamina Toray a - 54° C [5]

modulo di Young 0°	128 Gpa	modulo di Young 90°	9,03 Gpa
carico di rottura a trazione 0°	1682 MPa	carico di rottura a trazione 90°	52,9 MPa
carico di rottura a compressione 0°	1400 MPa	carico di rottura a compressione 90°	283 MPa
modulo elastico tangenziale	5,22 GPa	carico di rottura tangenziale	159 MPa
densità	1,517 g/cm <sup>3</sup>	spessore	0,152 mm
volume % fibre	54,4	Poisson	0,35

### 3. Caratteristiche geometriche del telaio e carichi applicati

#### 3.1 Geometria del telaio

Un telaio da mountain bike è costituito essenzialmente da due triangoli, uno anteriore, che in realtà è un quadrilatero irregolare, ed uno posteriore, aventi un tubo in comune. Il triangolo anteriore è costituito da: un tubo verticale, nel quale si inserisce la sella mediante il reggisella; un tubo sterzo, nel quale vengono inseriti lo sterzo e la forcella; un tubo obliquo ed un tubo orizzontale. Il triangolo posteriore, detto anche *carro*, è costituito da: un tubo verticale, in comune con il triangolo anteriore; due coppie di tubi, detti *foderi*, una coppia orizzontale ed una verticale, che partono dal tubo verticale e si uniscono creando i forcellini, sedi di aggancio della ruota posteriore. Il tubo verticale, il tubo obliquo ed i foderi orizzontali si collegano in corrispondenza della scatola del movimento centrale, in cui si inserisce la guarnitura delle pedivelle.

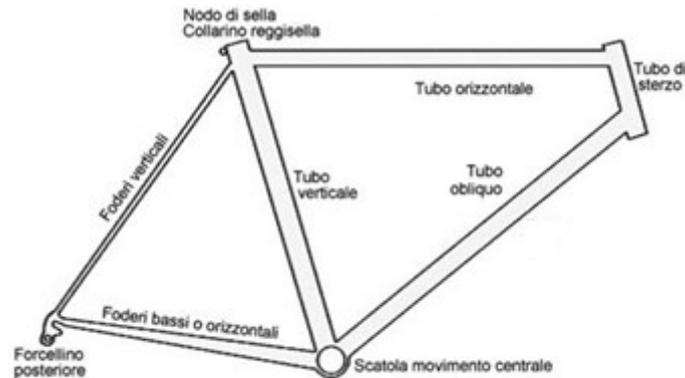


Figura 5 - Telaio classico [6]

La geometria di un telaio è definita dalle seguenti caratteristiche geometriche:

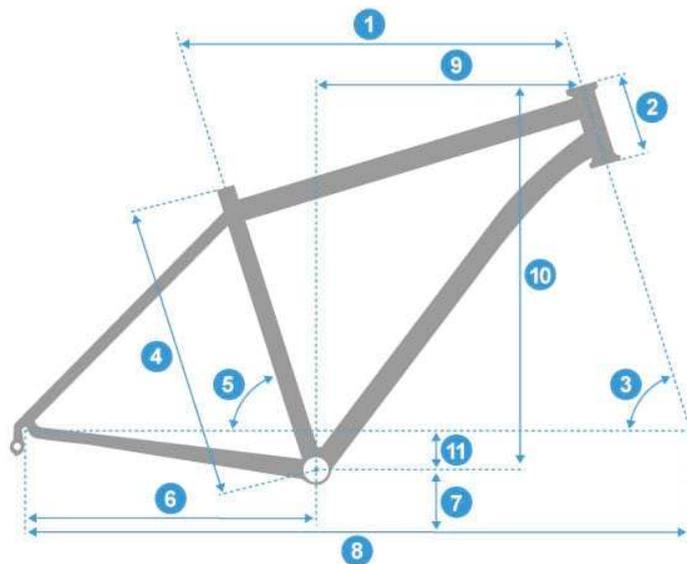


Figura 6 - Caratteristiche geometriche del telaio [7]

1. lunghezza tubo orizzontale: lunghezza tra l'asse del tubo sterzo e l'asse del tubo verticale, misurata orizzontalmente;
2. lunghezza tubo sterzo;
3. angolo di sterzo: angolo compreso tra la forcella o il tubo sterzo, e il piano orizzontale;
4. lunghezza tubo verticale;
5. angolo tubo sella: angolo compreso tra il tubo verticale e il piano orizzontale;
6. lunghezza *foderi* orizzontali, misurata orizzontalmente;
7. distanza dal suolo: misura tra l'asse del movimento centrale e il piano orizzontale;
8. interasse: distanza tra l'asse delle due ruote;
9. *reach*: distanza tra l'asse del movimento centrale e l'asse del tubo sterzo;
10. *stack*: distanza tra l'asse del movimento centrale e la linea orizzontale del tubo sterzo;
11. *drop*: distanza tra l'asse del movimento centrale e la linea orizzontale virtuale tra i due assi delle ruote.

I diversi valori che queste caratteristiche possono assumere, influenzano notevolmente vari aspetti del comportamento di una bicicletta durante l'utilizzo, come ad esempio, la stabilità e

la maneggevolezza, sulle quali influiscono l'angolo di sterzo e l'interasse. Per tale motivo, ogni disciplina del ciclismo in generale, richiede un telaio con geometrie specifiche per l'impiego a cui è destinato. Inoltre, la lunghezza del tubo verticale e di quello orizzontale hanno effetti sul posizionamento del ciclista e quindi sul comfort di guida, di conseguenza, la misura del telaio deve essere adatta alla conformazione fisica dell'utilizzatore.

### 3.2 Giant XTC Advanced 29er

Per la modellazione del telaio oggetto di questa tesi, si prendono in considerazione le geometrie di un moderno modello di mountain bike in commercio, l'*XTC Advanced 29er 2018*, prodotto dall'azienda americana *Giant*, nella taglia L.

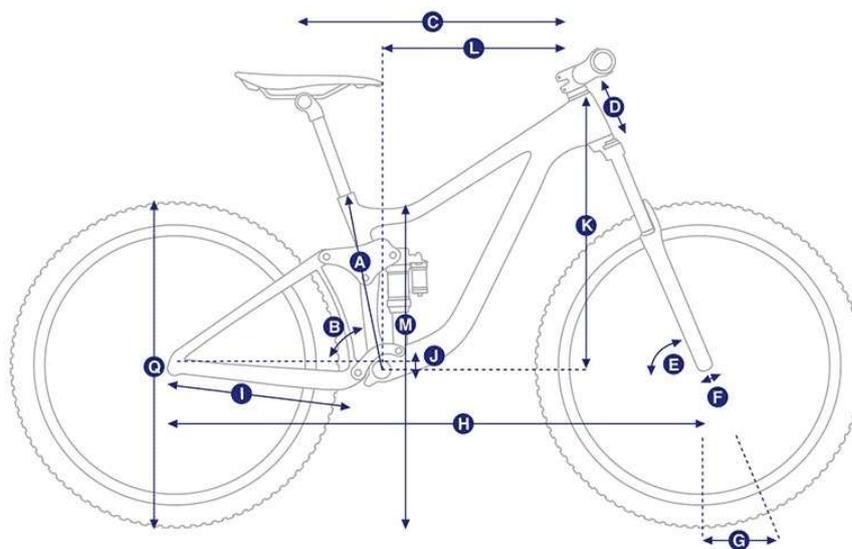


Figura 7 - Giant off road geometrie [1]

Tabella 11 - Giant XTC Advanced 29er 2018 caratteristiche geometriche [1]

	S	M	L	XL
<b>A</b> LUNGHEZZA TUBO SELLA (mm)	390	440	490	535
<b>B</b> ANGOLO TUBO SELLA	73,0°	72,5°	72,0°	72,0°
<b>C</b> LUNGHEZZA TUBO ORIZZONTALE (mm)	585	605	625	645
<b>D</b> LUNGHEZZA TUBO STERZO (mm)	95	95	105	115
<b>E</b> ANGOLO STERZO	70,0°	70,0°	70,0°	70,0°
<b>F</b> RAKE FORCELLA (mm)	51	51	51	51
<b>G</b> TRAIL (mm)	82	82	82	82
<b>H</b> INTERASSE (mm)	1074	1088	1102	1122
<b>I</b> LUNGHEZZA CARRO POSTERIORE (mm)	425	425	425	425
<b>J</b> DROP MOVIMENTO CENTRALE (mm)	60	60	60	60
<b>K</b> STACK (mm)	612	612	621	631
<b>L</b> REACH (mm)	398	412	423	440
<b>M</b> ALTEZZA STAND OVER (mm)	739	765	797	827
<b>N</b> LARGHEZZA MANUBRIO C/C (mm)	750	750	750	750
<b>O</b> LUNGHEZZA ATTACCO MANUBRIO (mm)	60	70	80	90
<b>P</b> LUNGHEZZA PEDIVELLA (mm)	170	175	175	175
<b>Q</b> DIMENSIONE RUOTE	29"	29"	29"	29"

### 3.2 Tubazioni, scatola movimento centrale, forcellino posteriore

La sezione delle tubazioni che compongono un telaio da mountain bike, e di una bicicletta in generale, varia nella forma e nella dimensione, in funzione delle sollecitazioni a cui i singoli tubi sono sottoposti.

Per la modellazione del telaio oggetto della tesi, si fa riferimento ad alcune delle caratteristiche delle tubazioni in acciaio realizzate dalla ditta *Columbus*, nello specifico i prodotti delle gamme *Zona* e *XCR*. Per agevolare l'analisi, inoltre, si assume lo stesso spessore per tutte le tubazioni, considerandolo costante lungo l'asse delle singole tubazioni.

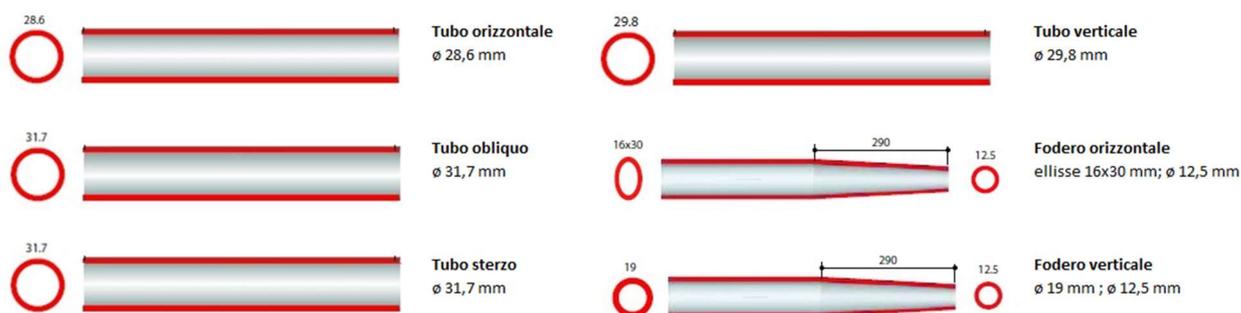


Figura 8 – Geometrie delle tubazioni [8]

La scatola del movimento centrale si disegna con riferimento al diametro esterno e alla larghezza di un movimento centrale di uso comune, ovvero lo *Shimano Press-Fit 90-95*. Nell'applicazione ai modelli di mountain bike, il valore della larghezza da considerare è *95.5 mm*.

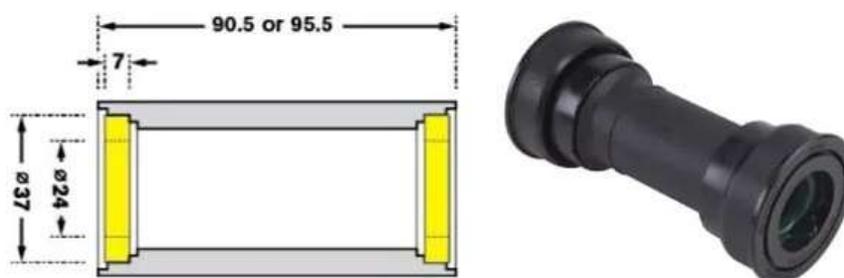


Figura 9 - Scatola del movimento centrale [9]

Per quanto concerne la forma del forcellino posteriore, si considera, come unica caratteristica geometrica, ai fini della modellazione, il diametro del foro utile per l'alloggiamento del perno assiale della ruota posteriore, in genere pari a *12 mm*.

### 3.3 Carichi applicati

I carichi considerati ai fini dell'analisi statica lineare oggetto di questa tesi, sono le forze principali esercitate sul telaio durante il suo utilizzo, ovvero quelle relative alla forza peso del ciclista.

Per tale sollecitazione, si fa riferimento al limite di peso massimo del ciclista come indicato da *Giant*, la casa produttrice del telaio di cui si sono riprodotte le geometrie. Come riportato nel *Bicycle Owner's Manual Version 12.0*, per biciclette progettate per utilizzo su superfici pavimentate, strade ghiaiose pianeggianti e sentieri ottimizzati, in cui le ruote non perdono il contatto con il suolo, e su percorsi accidentati, piccoli ostacoli e aree tecniche piane, incluse aree in cui le ruote possono perdere momentaneamente il contatto con il suolo, categoria alla quale appartengono tutte le mountain bike sprovviste di sospensioni posteriori, il limite di peso massimo del ciclista è  $136\text{ kg}$  [10].

Il carico espresso in Newton, è dato da

$$F = 136\text{ kg} \cdot 9.086 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cong 1235\text{ N}.$$

Secondo la biomeccanica applicata al ciclismo, il corretto posizionamento del ciclista sulla bicicletta, prevede che il peso sia distribuito per il  $60\%$  sulla sella, e per il  $40\%$  sul manubrio.

Di conseguenza, nell'analisi, si considerano due forze così definite:

- una forza anteriore  $F_a = 0.4 \cdot 1235\text{ N} = 494\text{ N}$ , applicata in corrispondenza del tubo sterzo, sede di inserimento del manubrio
- una forza posteriore  $F_p = 0.6 \cdot 1235\text{ N} = 741\text{ N}$ , applicata in corrispondenza del tubo verticale, sede di inserimento della sella.

## 4. Modello 3D

La realizzazione del modello geometrico tridimensionale del telaio si effettua rappresentando gli elementi che lo compongono mediante sole superfici, mentre lo spessore viene assegnato come proprietà nel software di pre-processo. A tale scopo, si impiega il software di modellazione 3D Rhinoceros 7 (Evaluation Version), specifico per la realizzazione di superfici nello spazio, che permette di esportare il risultato ottenuto in un file di formato compatibile con l'importazione in Patran.

### 4.1 Finestra principale di Rhinoceros

Nella barra di menu principale, compaiono i comandi per operare sui file, e le funzioni raggruppate per entità geometriche, quali curve, superfici e solidi. Altre funzioni presenti, permettono di effettuare una *mesh*, operazioni di *rendering*, quotature del disegno.

Nella barra laterale sinistra, si trovano gli strumenti per il disegno di entità geometriche come punto, linee e polilinee, cerchi, curve interpolate, e funzioni utili come *Copia*, *Esplodi* e *Unisci*.

Sulla destra, sono presenti i comandi relativi all'utilizzo dei diversi *layer*, utili nella realizzazione di geometrie complesse con molte parti: la suddivisione delle diverse zone in *layer*, infatti, permette di poter escludere dalla visualizzazione quelle non utili in un determinato momento.

Di grande utilità sono anche gli strumenti di selezione veloce, nella barra in basso, che permettono di selezionare automaticamente, con l'avvicinarsi del cursore, specifici punti di elementi geometrici, come *Vicino*, *Centro*, *Medio*.

L'ambiente di disegno è inizialmente diviso in quattro viste, tre delle quali bidimensionali, *Superiore*, *Frontale*, *Destra*, ed una tridimensionale, *Prospettica*. Ciascuna di esse può essere selezionata, per ottenere una singola vista nell'area di lavoro.

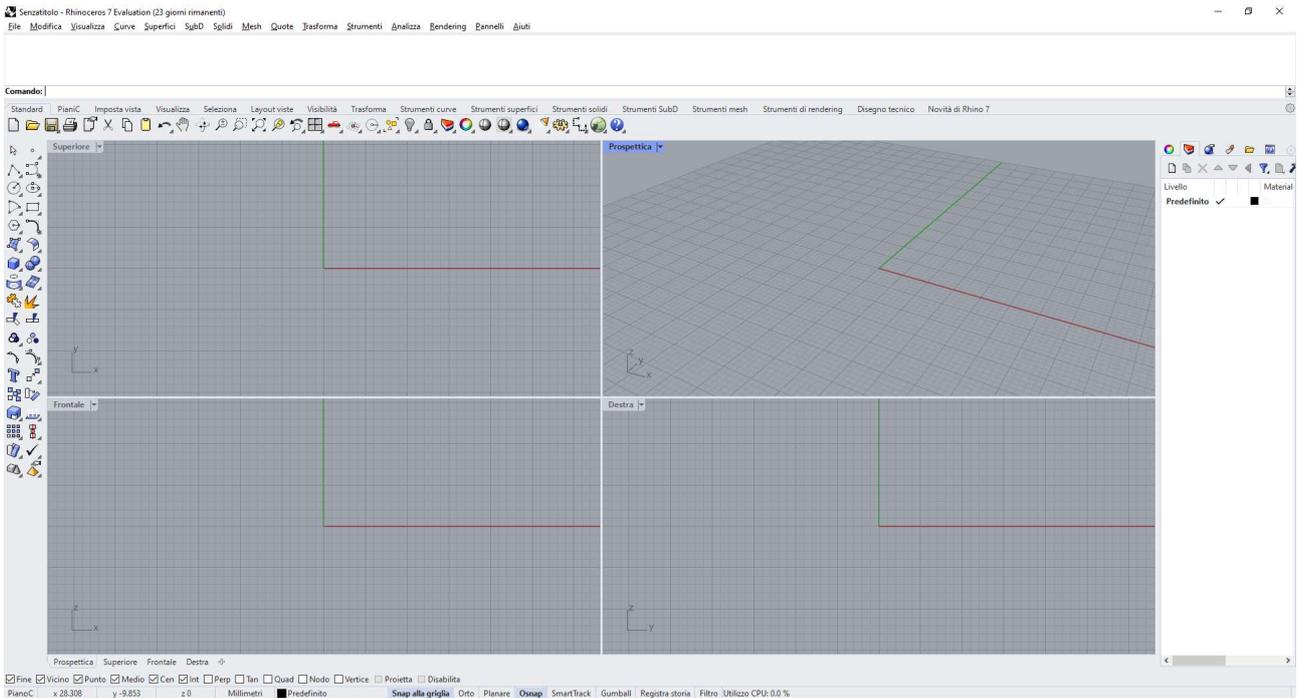


Figura 10 - Finestra principale Rhinoceros

Il primo passo per la creazione di un nuovo modello, consiste nel definire l'unità di misura, selezionando il modello *Oggetti grandi – millimetri*, coerentemente con il sistema di unità di misura scelto per questa tesi.

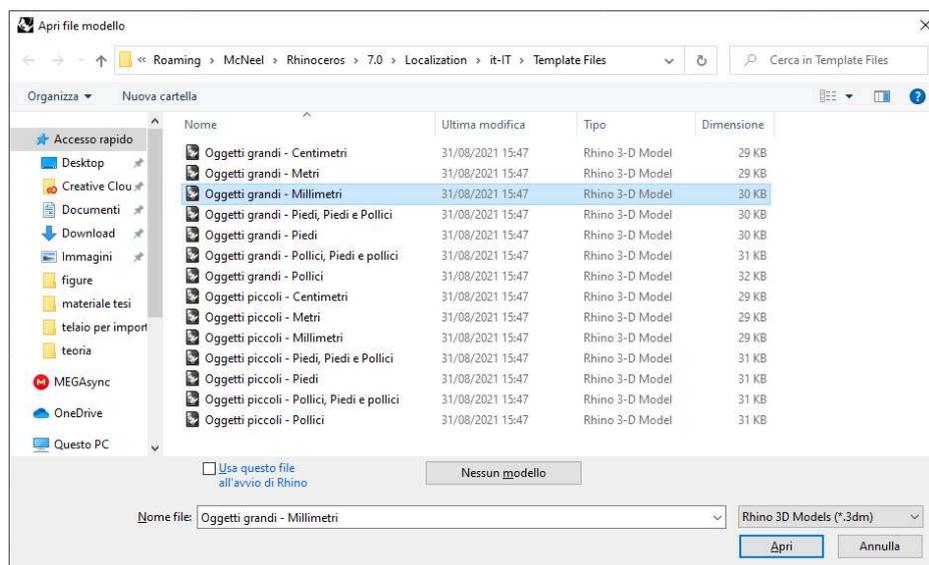


Figura 11 - Finestra di dialogo per le unità di misura

## 4.2 Struttura del telaio

Seguendo le caratteristiche geometriche precedentemente stabilite, si disegnano le entità geometriche utili a definire la struttura del telaio, utilizzando le principali funzioni di disegno 2D, tra le quali, *Linea*, *Polilinea*, *Cerchio*, *Ellisse*.

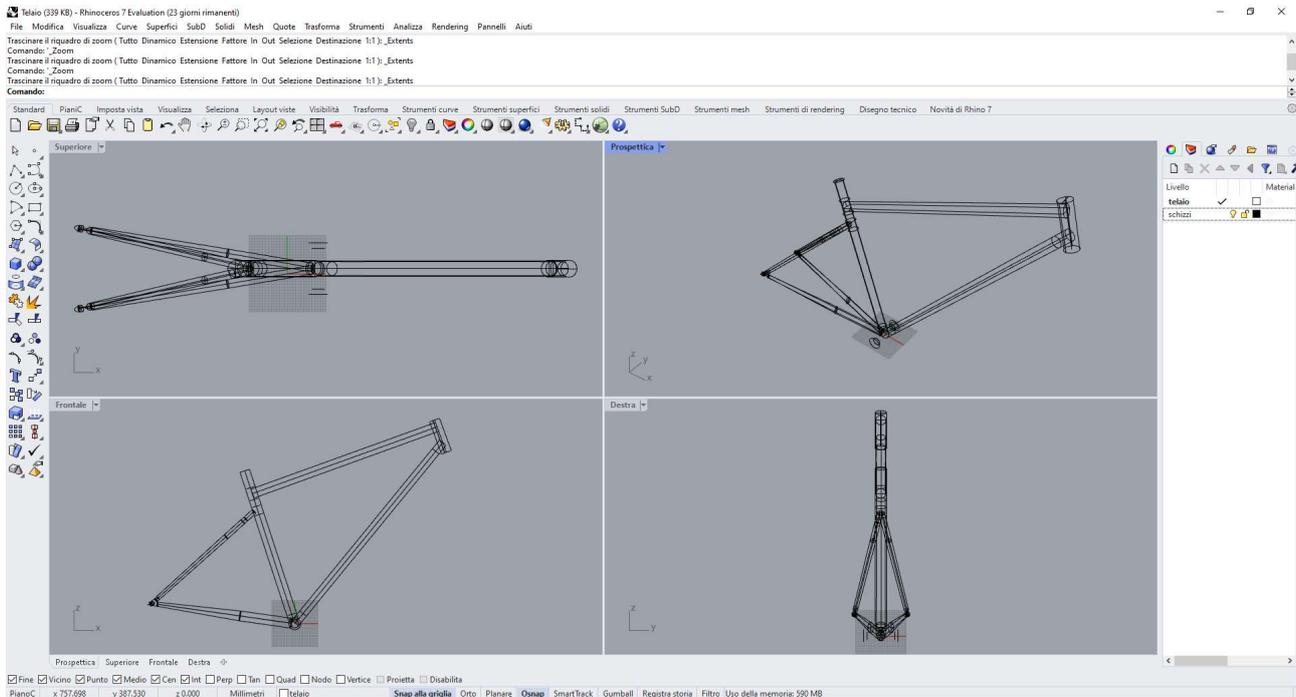


Figura 12 - Struttura del telaio

## 4.3 Superfici

La realizzazione delle superfici, avviene utilizzando principalmente le funzioni *Estrudi curva/Lineare*, che estrude linearmente una curva, e *Rete di Curve*, che realizza una superficie a partire da un insieme di curve, e consente di definire la tolleranza delle curve di bordo ed interne, e il tipo di continuità desiderata ai bordi della superficie creata.

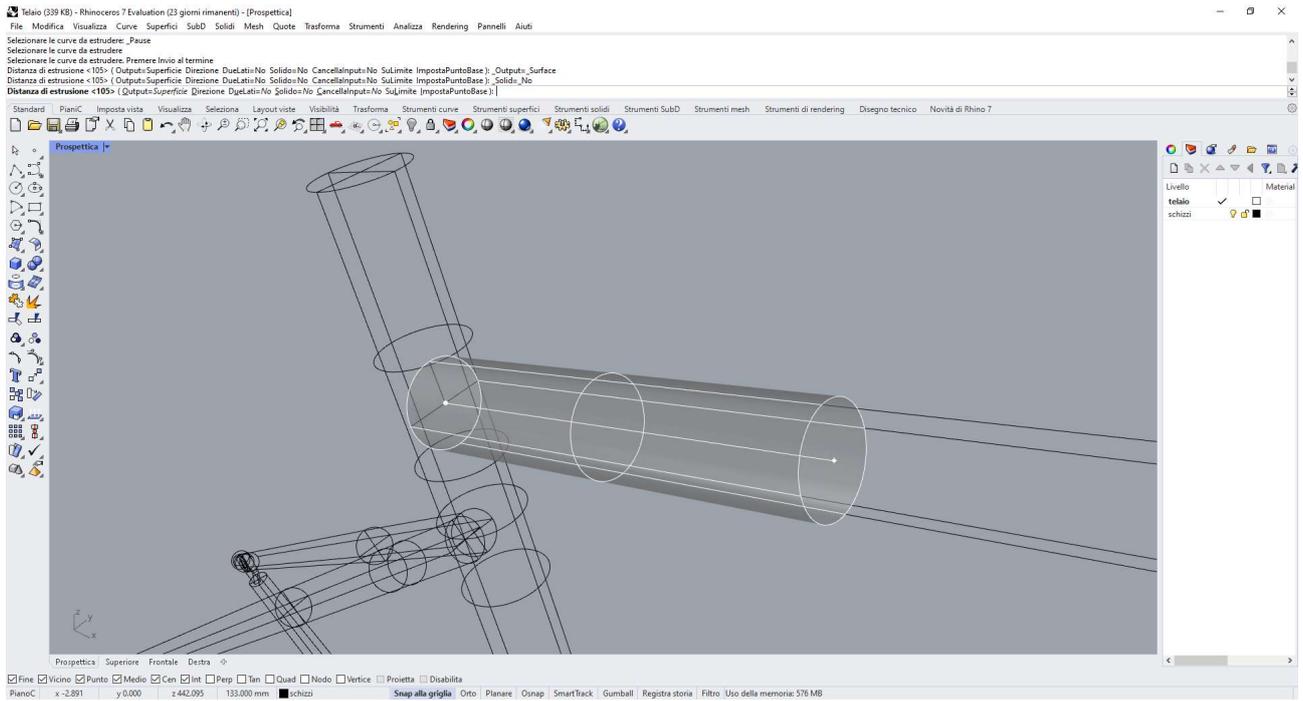


Figura 12 - Superficie per estrusione di curva lineare

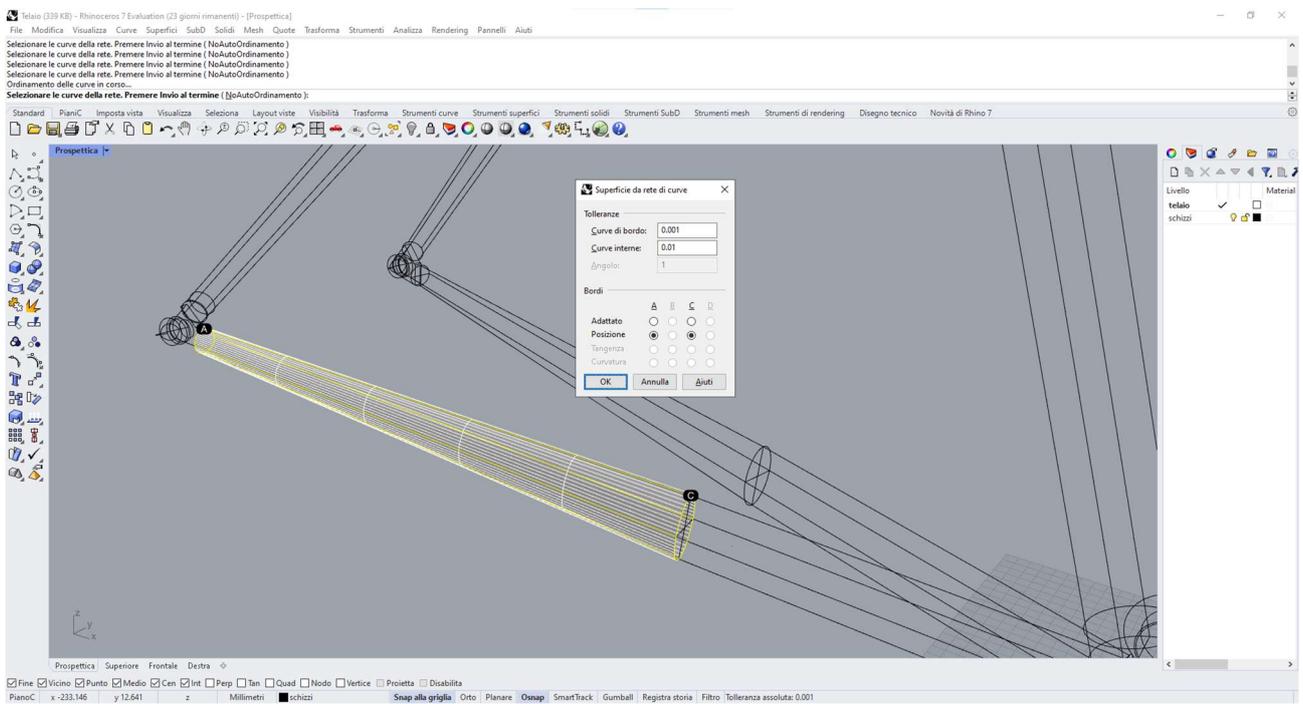


Figura 13 - Superficie per rete di curve

Il passo successivo consiste nell'eliminazione delle intersezioni tra le superfici, allo scopo di ottenere congruenza dei bordi nei punti di congiunzione delle singole tubazioni componenti il telaio. Con la funzione *Separa*, si suddividono reciprocamente le entità intersecanti, eliminando successivamente le aree superflue.

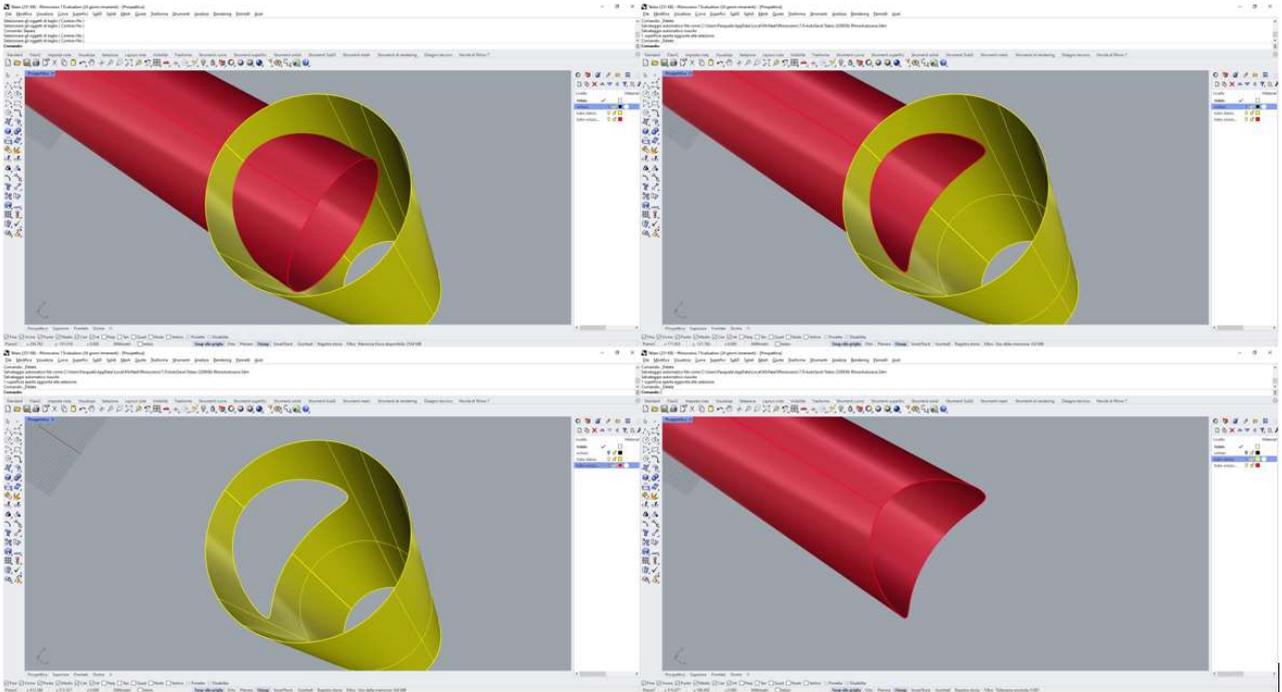


Figura 14 - Eliminazione intersezioni tra superfici

Si riporta nella figura seguente, il risultato finale ottenuto.

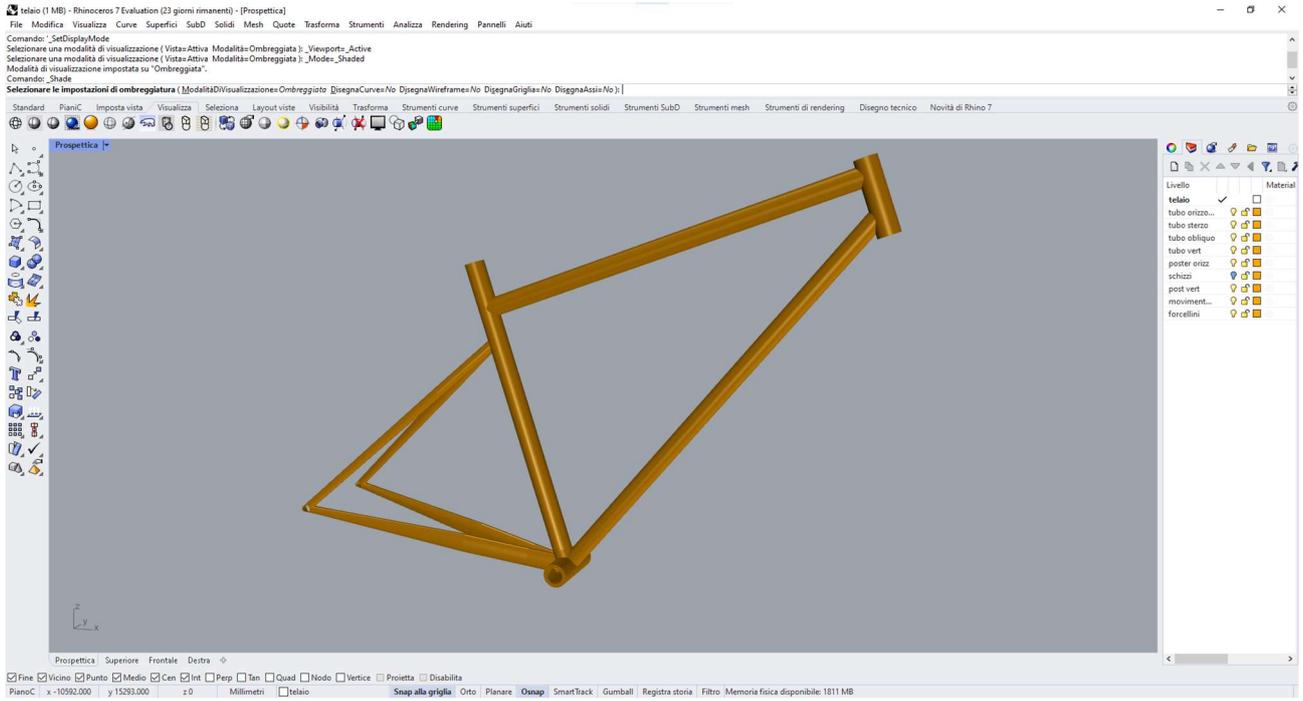


Figura 15 – Modello 3D

## 5. MODELLO FEM

### 5.1 Fondamenti del Metodo degli Elementi Finiti

Il metodo degli elementi finiti (FEM – *Finite Element Method*) è attualmente il principale mezzo di analisi nell'ambito del calcolo strutturale, ma i concetti sui quali si basa e la duttilità di impiego, ne permettono l'applicazione in una grande varietà di campi quali, ad esempio, la trasmissione del calore, la fluidodinamica, l'elettromagnetismo.

In ambito strutturale, la formulazione più comune del metodo degli elementi finiti ha come base teorica il metodo degli spostamenti, per il quale l'incognita del problema è costituita dal campo di spostamenti. In generale, il campo degli spostamenti è una funzione vettoriale continua della posizione dei punti del corpo, per la cui determinazione a partire dai carichi esterni e dalle condizioni di vincolo, è necessario risolvere il sistema di equazioni differenziali ed algebriche che costituiscono il problema elastico. La risoluzione analitica del problema, è possibile solo quando la geometria del corpo e la distribuzione dei carichi sia sufficientemente regolare. Quando ciò non è possibile, si ricorre al metodo degli elementi finiti, il cui concetto di base consiste in una discretizzazione del dominio, definita *mesh*, per una trasformazione del problema da continuo a discreto.

Di conseguenza, invece di ricercare una funzione continua del campo di spostamenti, si cerca la soluzione in un numero finito di punti, detti *nodi*, che definiscono la geometria dei sottodomini risultato della discretizzazione, detti *elementi*. A partire da tale soluzione, si risale alla deformazione all'interno dei singoli elementi, e quindi agli spostamenti in tutti i punti della struttura.

La prima operazione per un'analisi agli elementi finiti, consiste nello scegliere il tipo di elemento in cui suddividere la struttura, individuarne i nodi e i relativi gradi di libertà nel sistema di riferimento locale.

Successivamente si definiscono le *funzioni di forma*  $[N_e]$ , che permettono di esprimere gli spostamenti  $\{U_e\}$  all'interno dell'elemento in funzione degli spostamenti nodali  $\{q_e\}$ :

$$\{U_e\} = [N_e] \{q_e\}.$$

Derivando gli spostamenti si ottengono le deformazioni:

$$\{\epsilon\} = [B_e] \{q_e\}$$

da cui le tensioni, secondo la *legge di Hooke*:

$$\{\sigma\} = [K_e] \{\varepsilon\}$$

dove  $[K_e]$  è la *matrice di rigidezza* dell'elemento, funzione del modulo di Young e del coefficiente di Poisson.

L'applicazione del *principio dei lavori virtuali* permette di ottenere l'equazione risolutiva di ogni singolo elemento nel sistema di riferimento locale:

$$\{F\} = [K_e] \{q_e\}$$

dove  $\{F\}$  è il vettore dei carichi nodali applicati.

Dopo aver trasformato i vettori e le matrici così determinate, dal sistema di riferimento locale a quello globale della struttura, ed aver ripetuto il procedimento per tutti gli elementi che compongono la discretizzazione, si procede con l'*assemblaggio*, ovvero la costruzione della matrice di rigidezza della struttura.

Il problema strutturale diventa, quindi:

$$\{F\} = [K] \{q\}$$

ed una volta risolto, ed ottenuti gli spostamenti nodali, permette di calcolare tensioni e deformazioni dell'intera struttura.

Affinché si ottenga una soluzione unica, la matrice di rigidezza deve essere singolare, cioè determinante diverso da zero, ovvero, da un punto di vista meccanico, la struttura non deve essere labile. Bisogna, dunque, imporre le condizioni al contorno per eliminare i moti di corpo rigido.

L'intero processo può essere riassunto come segue:

- discretizzazione della struttura in elementi finiti (mesh);
- formulazione della matrice di rigidezza dei singoli elementi;
- assemblaggio della matrice di rigidezza globale della struttura;
- definizione delle condizioni di vincolo e dei carichi nodali;
- risoluzione del sistema di equazioni  $\{F\} = [K] \{q\}$ ;
- calcolo di tensioni e deformazioni a partire dagli spostamenti nodali.

La scelta del tipo di elemento da utilizzare per la discretizzazione, risulta molto importante allo scopo di simulare un corretto comportamento della struttura. Di seguito, alcuni degli elementi più utilizzati, classificati in base alle dimensioni.

### 5.1.1 Elemento 0D

Gli elementi scalari, sono impiegati per creare una quantità scalare, come ad esempio una massa concentrata o la rigidità di una molla, e non hanno definita alcuna proprietà geometrica e del materiale.

### 5.1.2 Elemento 1D

Gli elementi monodimensionali sono impiegati per la rappresentazione di forze agenti lungo una linea. Sono caratterizzati da lunghezza, proprietà del materiale e proprietà geometriche come sezione trasversale e momenti d'inerzia, e possono essere a due o più *nodi*. Gli elementi 1D si dividono in elementi asta (*Rod*), in grado di trasferire solo carico assiale, e elementi trave (*Beam*), in grado di trasferire anche momento flettente, e sono utilizzati in genere per la modellazione di strutture reticolari.



Figura 16 – Elementi monodimensionali

### 5.1.3 Elemento 2D: l'elemento *shell*

Gli elementi bidimensionali sono impiegati per la rappresentazione di forze variabili su una superficie e sono, quindi, caratterizzati da un'area, oltre che dalle proprietà del materiale e dalle proprietà geometriche. Sono utilizzati per rappresentare modelli, o singole parti di essi, in cui una delle tre dimensioni, ad esempio lo spessore, è trascurabile rispetto alle altre due. Le forme più comuni sono il *Tria3*, elemento triangolare a tre nodi, e il *Quad4*, quadrangolare a quattro nodi

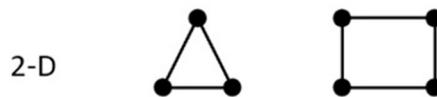


Figura 17 - Elementi bidimensionali a tre e quattro nodi

Gli elementi bidimensionali consentono di rappresentare diversi stati tensionali, e tra questi, il più comune in ambito strutturale, è quello relativo all'elemento di tipo guscio o *shell*, che accoppia gli stati tensionali di membrana e piastra: la membrana, dotata di rigidezza membranale, è in grado di trasmettere sforzi normali e taglio solo nel proprio piano; la piastra, dotata di rigidezza flessionale, è in grado di trasmettere sforzi normali, taglio e momento flettente fuori dal proprio piano.

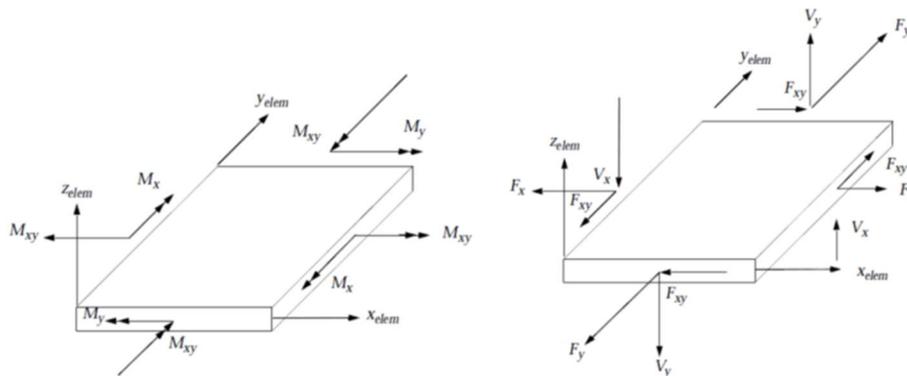


Figura 18 - Stato tensionale elemento shell

Per quanto detto in precedenza, quindi, lo stato tensionale di un elemento shell, è definito da:

- sollecitazioni di taglio e sforzi normali sulle facce  $x$  e  $y$ ;
- momenti flettenti lungo gli assi  $x$  e  $y$ , momento torcente lungo l'asse  $z$ .

Per la modellazione agli elementi finiti del telaio oggetto di questa tesi, in considerazione delle geometrie che caratterizzano i tubi che lo costituiscono, in cui lo spessore risulta trascurabile rispetto alle altre due dimensioni, e in virtù dello stato di tensione che si vuole analizzare, si ritiene di impiegare l'elemento bidimensionale, di forma *Quad4* e di tipo *shell*.

### 5.1.4 Elemento 3D

Gli elementi tridimensionali sono impiegati per la rappresentazione di stati di tensione generale, variabili nelle tre dimensioni, e sono, quindi, caratterizzati da un volume, oltre che dalle proprietà del materiale e dalle proprietà geometriche. Sono utilizzati per rappresentare modelli strutturali di geometria complessa, che non possono essere rappresentati con elementi unidimensionali o bidimensionali.



Figura 19 - Elementi tridimensionali

## 5.2 Creazione del modello FEM

Per la creazione del modello FEM, ovvero il meshing, l'applicazione delle condizioni di carico e di vincolo, e delle proprietà del materiale, si utilizza come pre-processor il software *MSC Patran 2021 Student Edition*. Tale software è adimensionale, quindi tutti le grandezze inserite, e di conseguenza i risultati ottenuti, sono coerenti con il sistema di unità di misura definito nel Capitolo 1.

### 5.2.1 Importazione del modello 3D

L'importazione della geometria 3D del telaio in Patran, avviene tramite un file esportato dal software di modellazione Rhino. Tra i vari formati di importazione a disposizione, il risultato migliore per il modello in oggetto, in termini di corrispondenza geometrica in Patran, si ottiene con *Parasolid (.x\_t e .x\_b)*, uno dei principali standard CAD di interscambio.

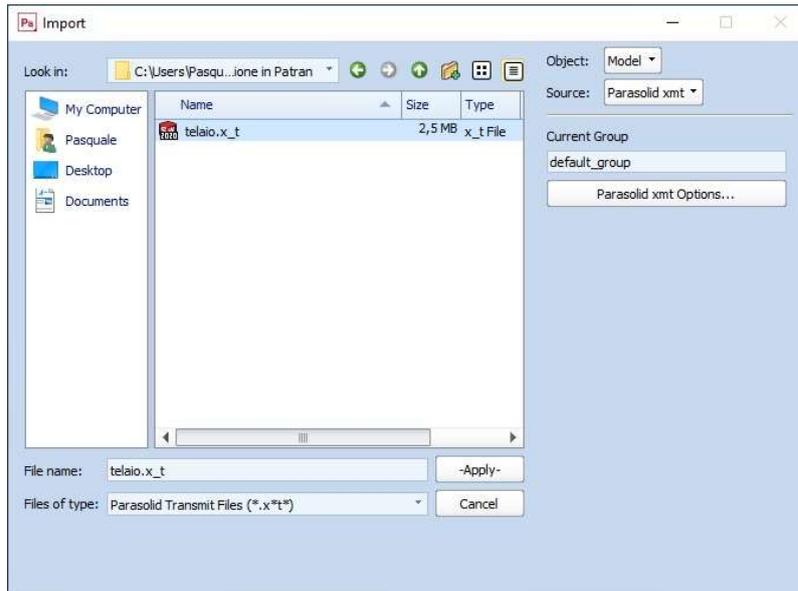


Figura 20 - Finestra di importazione del modello geometrico in Patran

L'operazione si completa quando appare la finestra 'Import Summary', in cui è riportato il riassunto delle entità geometriche importate, da cui si evince che il modello in Patran è costituito da 105 superfici.

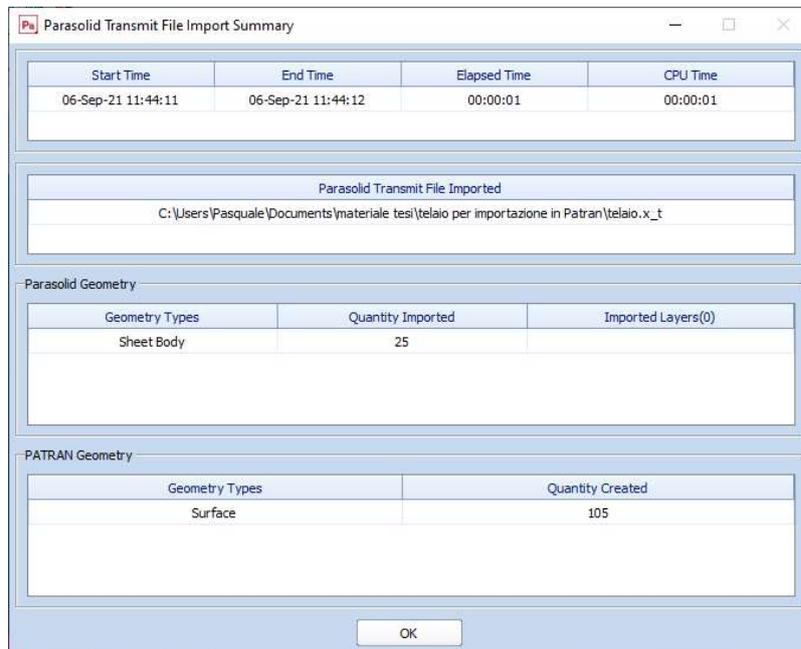


Figura 21 - Import Summary

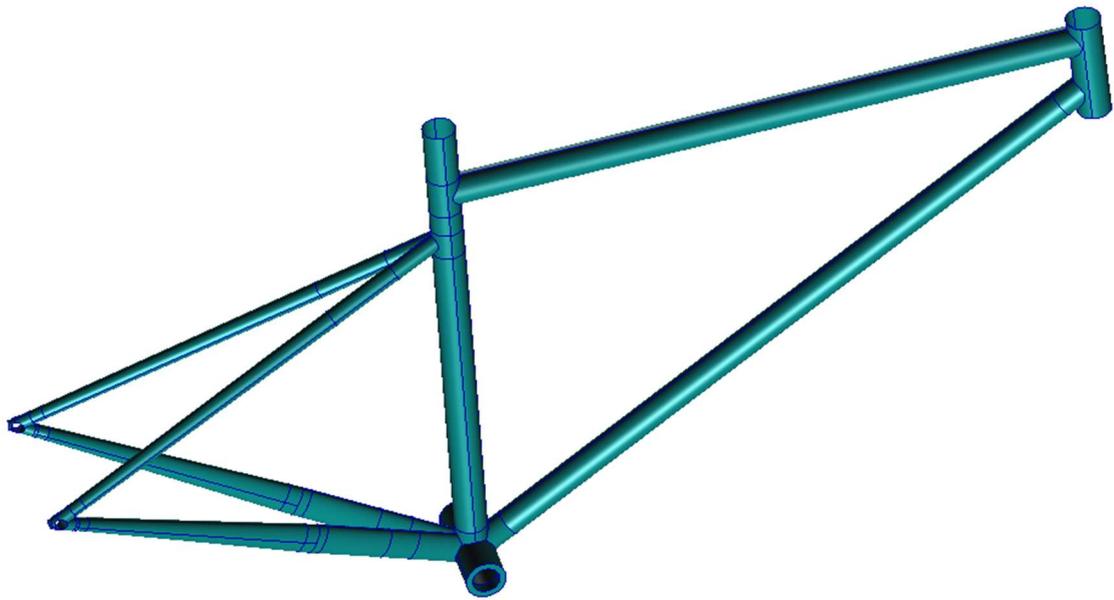


Figura 22 – Visualizzazione del telaio in Patran

### 5.2.2 Creazione della *mesh*

La discretizzazione della struttura in un numero finito di elementi, ha come risultato la realizzazione di una griglia, detta *mesh*. Tale operazione, definita *meshing*, risulta molto importante, dato che dalla qualità della *mesh* dipende l'accuratezza dei risultati dell'analisi. In molte analisi, l'indice di adeguatezza della *mesh* adottata, è la convergenza del risultato verso un valore asintotico al crescere della fittezza della schematizzazione. Infatti, al crescere del numero degli elementi, la soluzione approssimata converge verso la soluzione reale.

#### 5.2.2.1 *Mesh Seed*

L'operazione preliminare consiste nel definire la densità della *mesh*, tramite il comando *Mesh Seed*, selezionato dal menu *Meshing*, che applica dei demarcatori (*seeds*) lungo i bordi delle superfici. La scelta del tipo *Uniform* determina una *mesh seed* costituita da elementi di lunghezza uniforme (nodi equamente spaziati), ottenuta specificando la lunghezza del

generico elemento, o il numero totale degli elementi in cui si vuole suddividere il bordo della superficie.

Per l'analisi oggetto di questa tesi, si impone lunghezza dell'elemento pari a  $0,4$ , corrispondente al minimo valore che non comporta il superamento del numero massimo di elementi ammessi nella versione per studenti del software Patran.

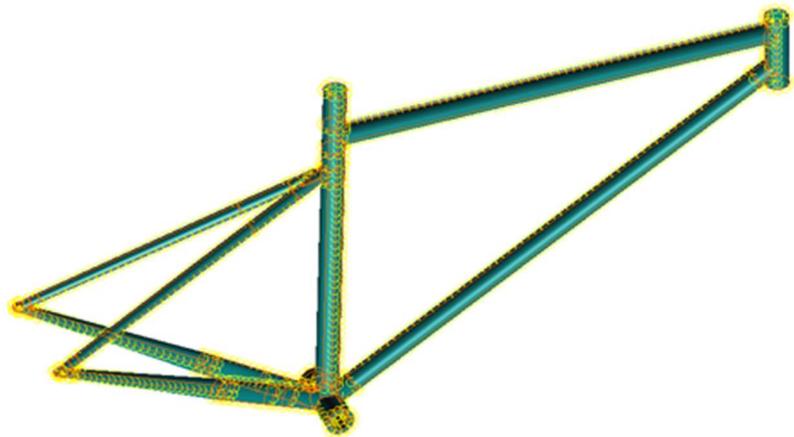
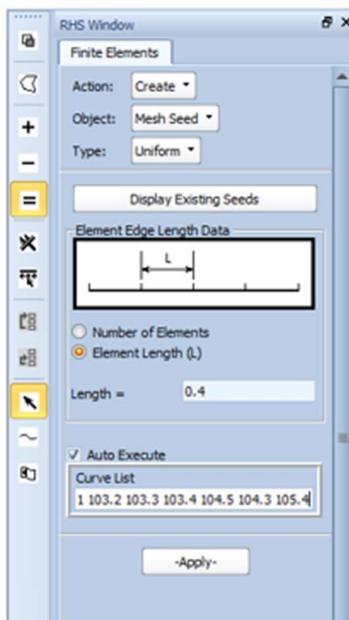


Figura 23 - Mesh Seed

### 5.2.2.2 Mesh

Il passo successivo è la creazione della *mesh*, effettuata tramite il comando *Mesh*, impostando l'opzione *Surface* (Superficie), ricordando che, il modello geometrico del telaio è composto di sole superfici, e selezionando, quindi, come forma dell'elemento, l'elemento quadrangolare a quattro nodi *Quad4*, come stabilito nel paragrafo 5.1.3.

Per la tecnica da impiegare, si seleziona la tradizionale *Isomesh*, che consente di ottenere una mesh regolare con nodi equidistanti, e agisce solo su superfici biparametriche, cioè rappresentabile tramite le coordinate parametriche  $\xi_1$  e  $\xi_2$ , applicandola a tutte le superfici che compongono il modello.

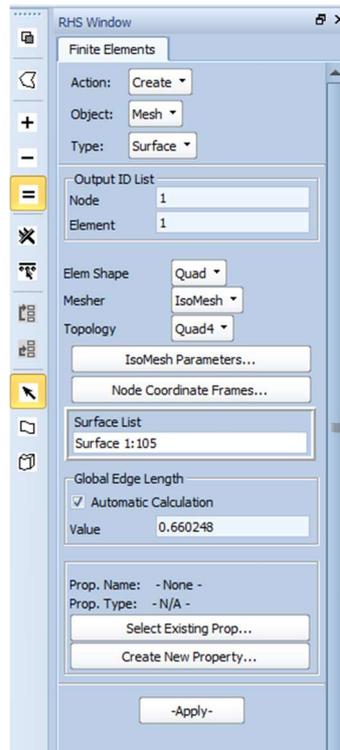


Figura 24 - Impostazioni mesh Isomesh

La *mesh* non viene effettuata per ciascuna superficie che risulti non parametrica, alle quali non è possibile applicare *Isomesh*, e per le quali compare una finestra di dialogo.



Figura 25 - Finestra di dialogo per superfici non parametriche

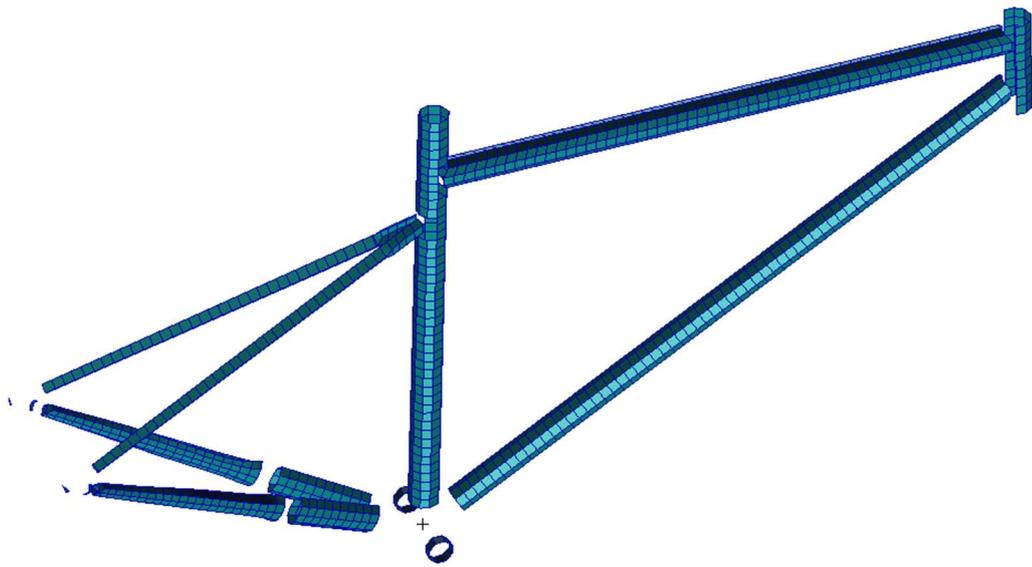


Figura 26 - Mesh delle superfici parametriche

Per le superfici non parametriche, risultate tali perché presentano fori o variazione rapida di curvatura, si applica il mesher *Paver*, specifico per questa tipologia di superfici, selezionando ancora, come forma dell'elemento, il *Quad4*.



Figura 27 – Mesh completa del telaio

La *mesh* ottenuta è costituita da 4083 nodi e 2852 elementi.

### 5.2.2.3 Equivalenza e verifica congruenza

L'equivalenza è il processo di riduzione di tutti i nodi che coesistono in un punto, ad un singolo nodo. Essa si applica tramite il comando *Equivalence*, sempre nel menu *Meshing*, a tutti i nodi selezionando l'opzione *All*.

Il comando *Verify*, abbinato all'opzione *Free Edges*, consente di verificare che superfici adiacenti non presentino bordi liberi, ovvero la congruenza della *mesh*, condizione necessaria per la continuità dei carichi e delle deformazioni tra superfici contigue.

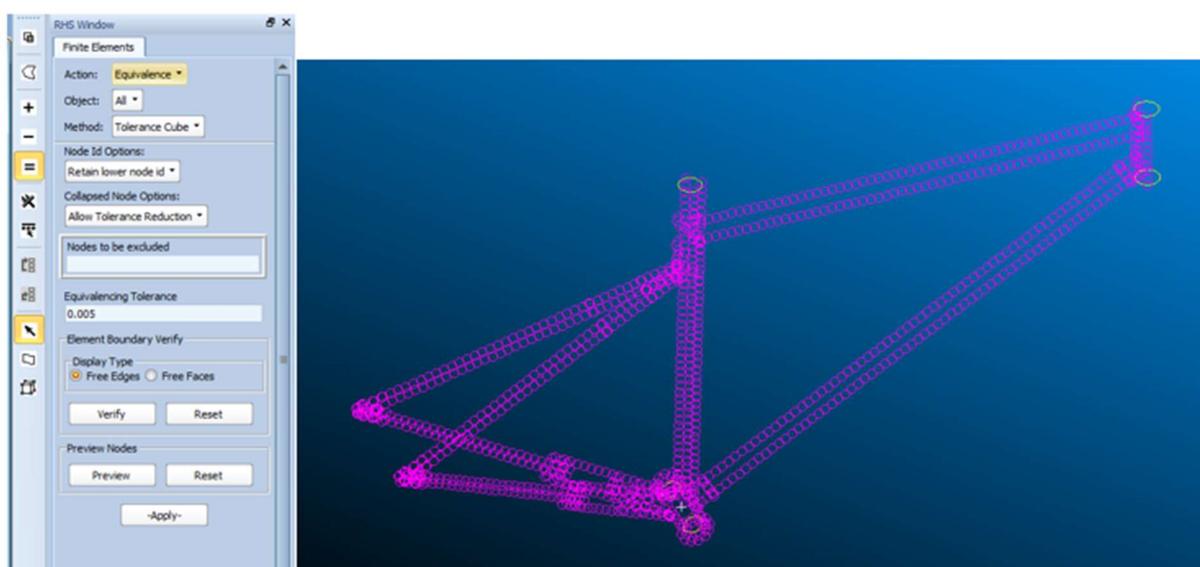


Figura 28 - Equivalenza e verifica congruenza

La figura evidenzia come, gli unici bordi liberi presenti, rappresentati da una curva di colore giallo, siano, correttamente, quelli non a contatto con alcuna superficie.

## 5.2.3 Definizione dei carichi e delle condizioni al contorno

La definizione dell'insieme dei carichi e delle condizioni al contorno a cui è soggetto il modello, avviene selezionando il menu *Loads/BCs*.

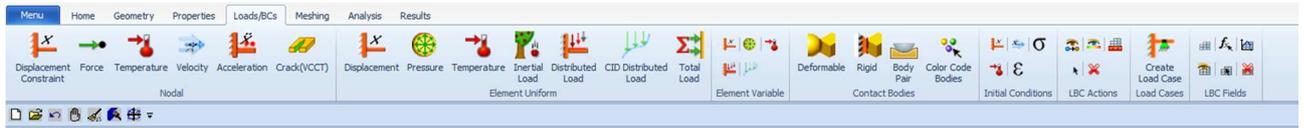


Figura 29 - Menu Loads/BCs

### 5.2.3.1 Definizione dei carichi

I carichi da applicare al modello per effettuare l'analisi sono, come definiti nel paragrafo 3.4:

- una forza anteriore  $F_a = 494 \text{ N}$ , la cui applicazione avviene sul bordo del tubo sterzo; il quale, nella rappresentazione agli elementi finiti, è suddiviso in dieci nodi, quindi, su ciascuno di essi si applica un carico  $F_a = \frac{494}{10} \text{ N} = 49.4 \text{ N}$ ;
- una forza posteriore  $F_p = 741 \text{ N}$ , la cui applicazione avviene sul bordo del tubo verticale; il quale, nella rappresentazione agli elementi finiti, è suddiviso in nove nodi, quindi, su ciascuno di essi si applica un carico  $F_p = \frac{741}{9} \text{ N} \cong 82.4 \text{ N}$ .

L'applicazione ai nodi avviene selezionando la funzione *Force* nel sottomenu *Nodal*. Dalla finestra di comando, tramite *Input Properties*, si inseriscono i valori delle forze, agenti lungo l'asse  $z$  in quanto corrispondenti ad una forza peso, e con verso congruente con il sistema di riferimento globale, indicato nel campo *Analysis Coordinate Frame*. Ai carichi così creati si assegnano i nomi  $F_a$  e  $F_p$ .

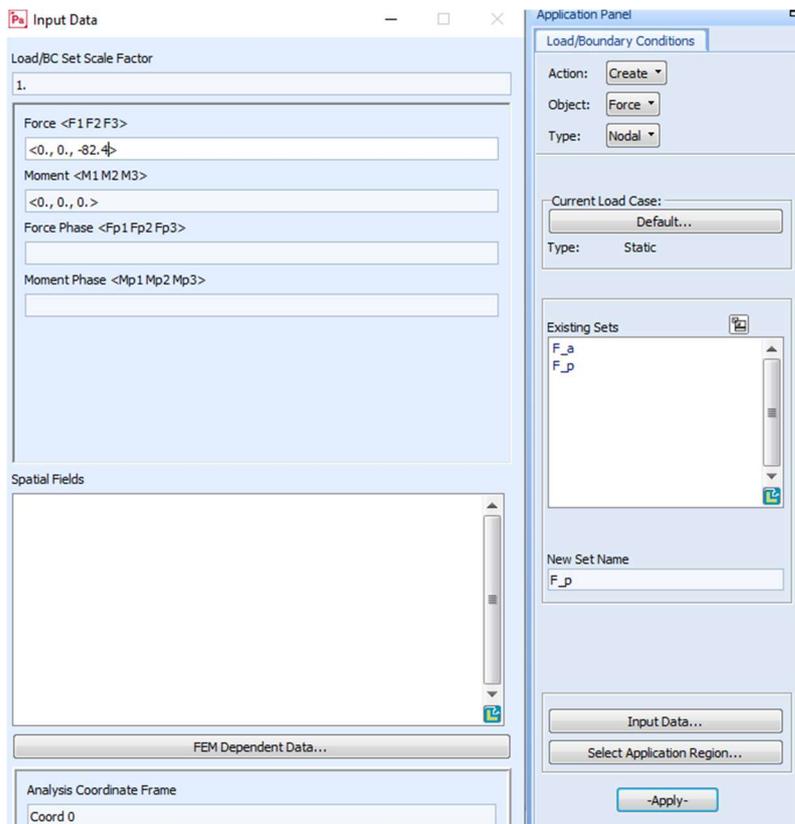
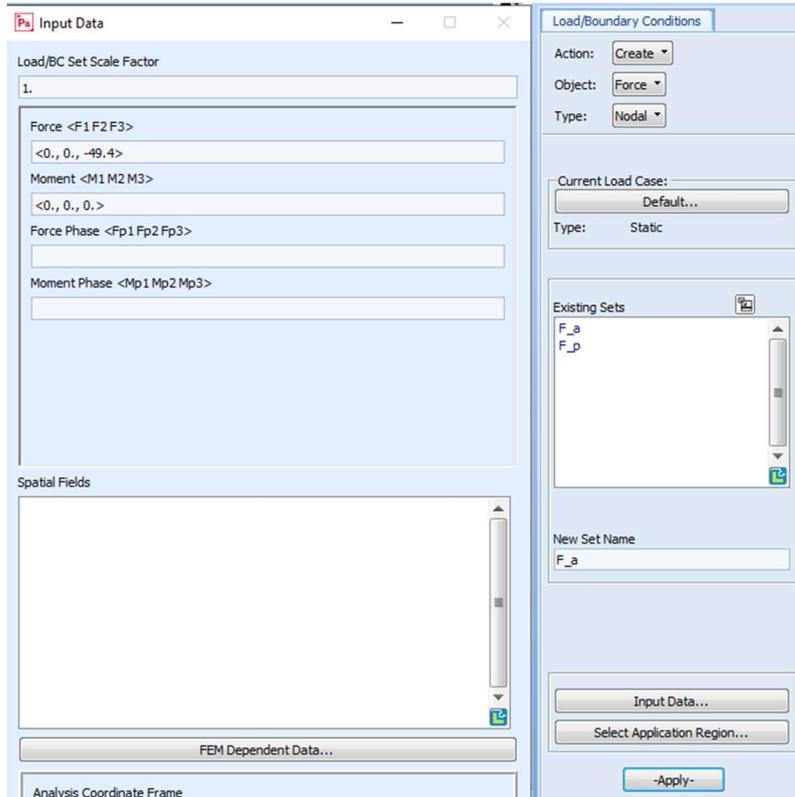


Figura 30 – Definizione dei carichi  $F_a$  e  $F_p$

L'applicazione al modello, avviene con il comando *Select Application Region*, e la selezione dei nodi interessati.

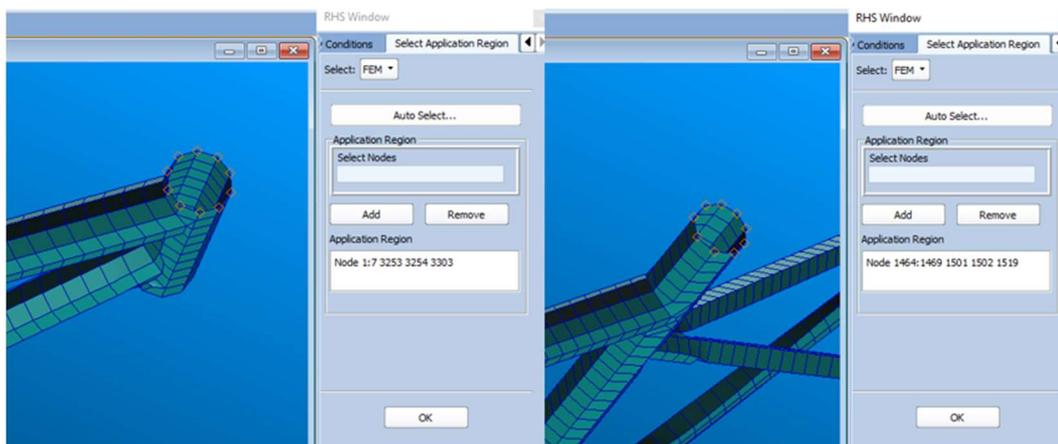


Figura 31 - Selezione dei nodi

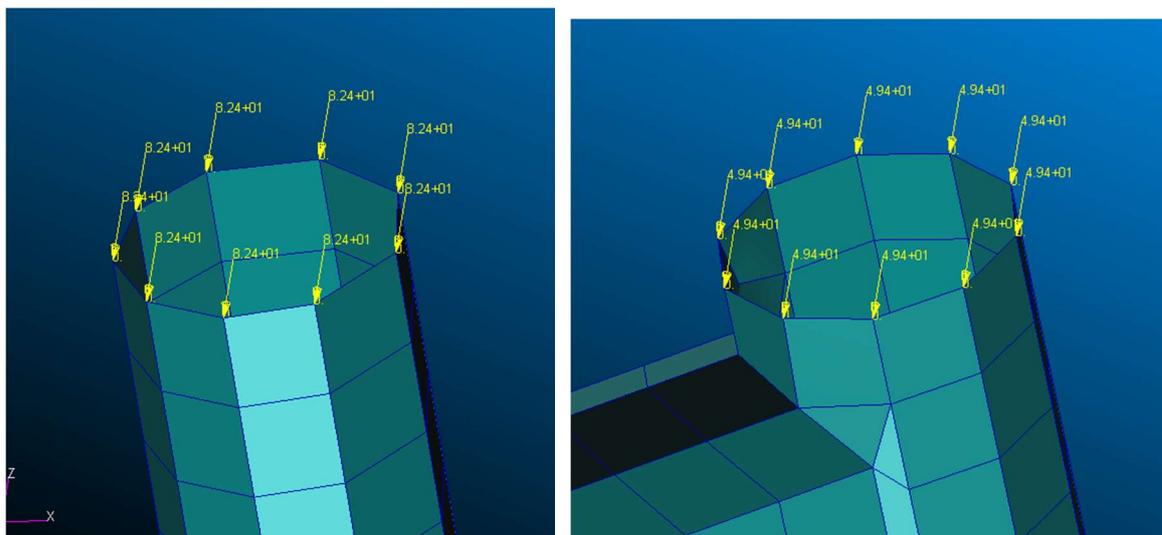


Figura 32 - Carichi applicati al telaio

### 5.2.3.2 Definizione delle condizioni al contorno

I vincoli a cui deve essere sottoposto il modello, devono essere tali da simulare il contatto del telaio, tramite le ruote, con il terreno.

La ruota posteriore è assicurata al telaio mediante un perno assiale che attraversa i forcellini, quindi, il vincolo è applicato sui bordi dei fori degli stessi.

La ruota anteriore è collegata al telaio per mezzo della forcella, che attraversa il tubo sterzo, sul cui bordo inferiore, di conseguenza, è opportuno applicare il vincolo.

La condizione di vincolo che si vuole simulare è quella di un incastro, che annulla i gradi di libertà traslazionali e rotazionali.

Per l'associazione nodale, si seleziona la funzione *Displacement Constraint* nel sottomenu *Nodal*, si assegna il nome *vincoli*, e, tramite *Input Data*, si attribuisce valore nullo agli spostamenti lungo gli assi del sistema di riferimento, e alle rotazioni attorno agli stessi.

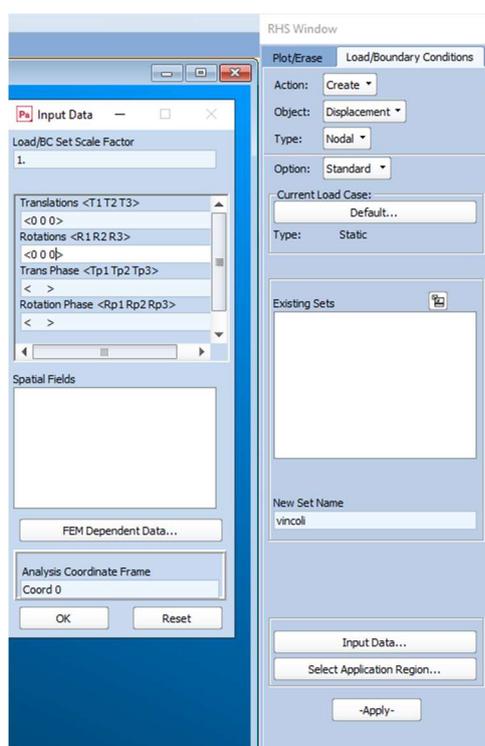


Figura 33 – Definizione delle condizioni di vincolo

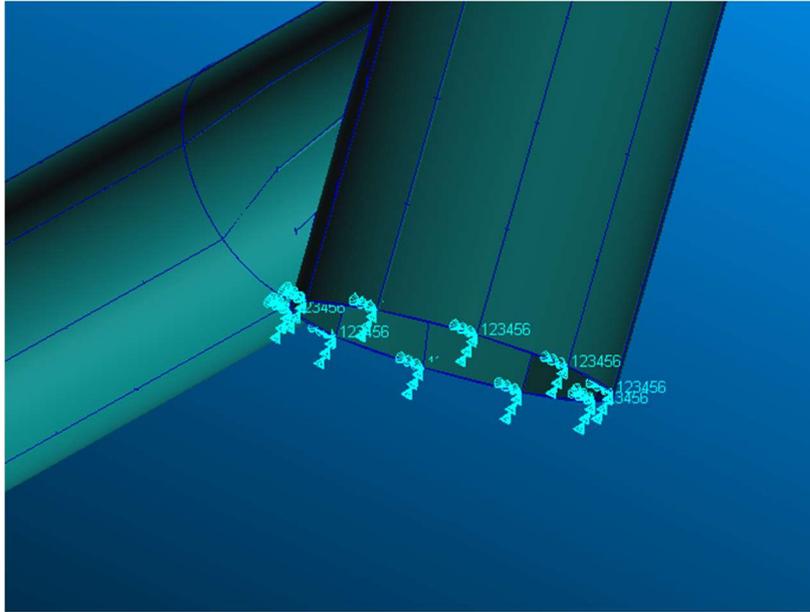


Figura 34 - Vincolo applicato al tubo sterzo

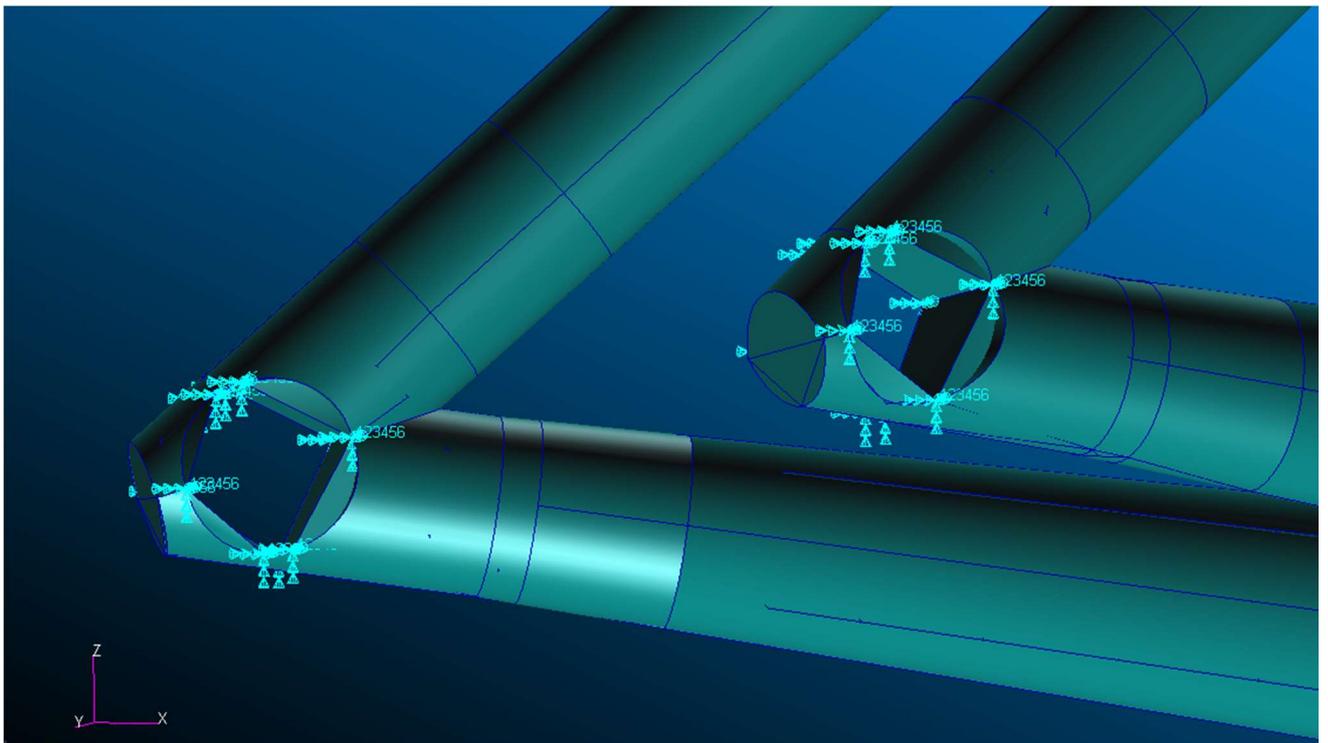


Figura 35 - Vincoli applicati ai forcellini

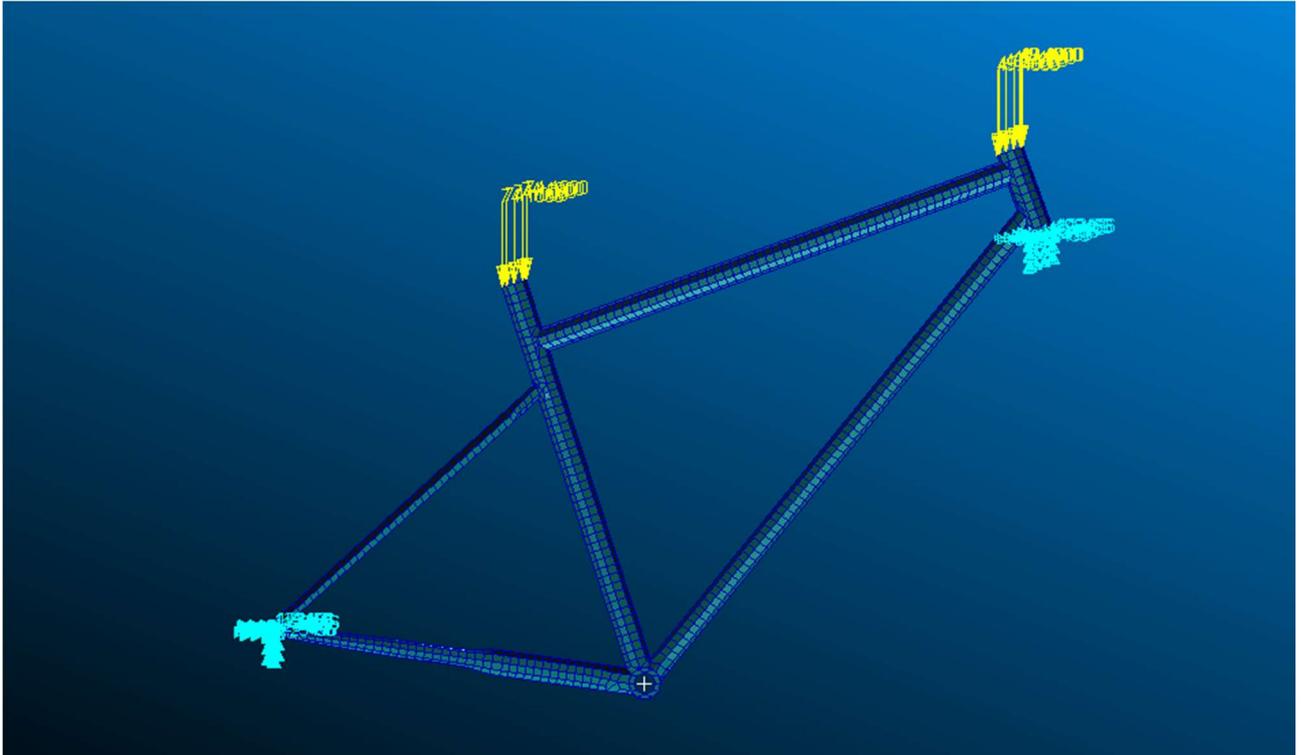


Figura 36 - Condizioni al contorno e carichi applicati al telaio

## 5.2.4 Proprietà degli elementi

In questa fase si definisce l'insieme delle proprietà da associare ai singoli elementi, necessarie per determinarne le caratteristiche ai fini dell'analisi.



Figura 37 - Menu delle funzioni Properties

### 5.2.4.1 Caratteristiche del materiale: composito *Toray T700G-2510*

L'opzione *Laminated Composite* in Patran, consente di definire un laminato ad  $n$  strati, e, per ogni singolo strato, il tipo di materiale, lo spessore e l'orientamento delle fibre.

L'operazione preliminare consiste, quindi, nel fissare le proprietà del materiale costituente il singolo strato.

Un lamina unidirezionale, quale appunto quella del prepreg Toray T700G-2510, può essere considerata trasversalmente isotropa e con comportamento elastico ortotropo, quindi, nel sottomenu *Orthotropic* di *Properties* si seleziona la funzione *2d Orthotropic*, si attribuisce il nome *Single ply Toray*, e con il comando *Input Properties* si inseriscono le caratteristiche della lamina Toray T700G-2510, come definite nel paragrafo 2.2.1, coerentemente con il sistema di unità di misura scelto:

Tabella 12 – Caratteristiche fisiche lamina Toray

$E_{11} = 128000 \text{ MPa}$
$E_{22} = 9030 \text{ MPa}$
$G_{12} = 5220 \text{ MPa}$
$\nu_{12} = 0.35$
$\rho = 1517 \cdot 10^{-12} \text{ ton/mm}^3$

Ai fini di un'analisi di tipo lineare, si sceglie un modello costitutivo del materiale di tipo elastico (*Linear Elastic*).

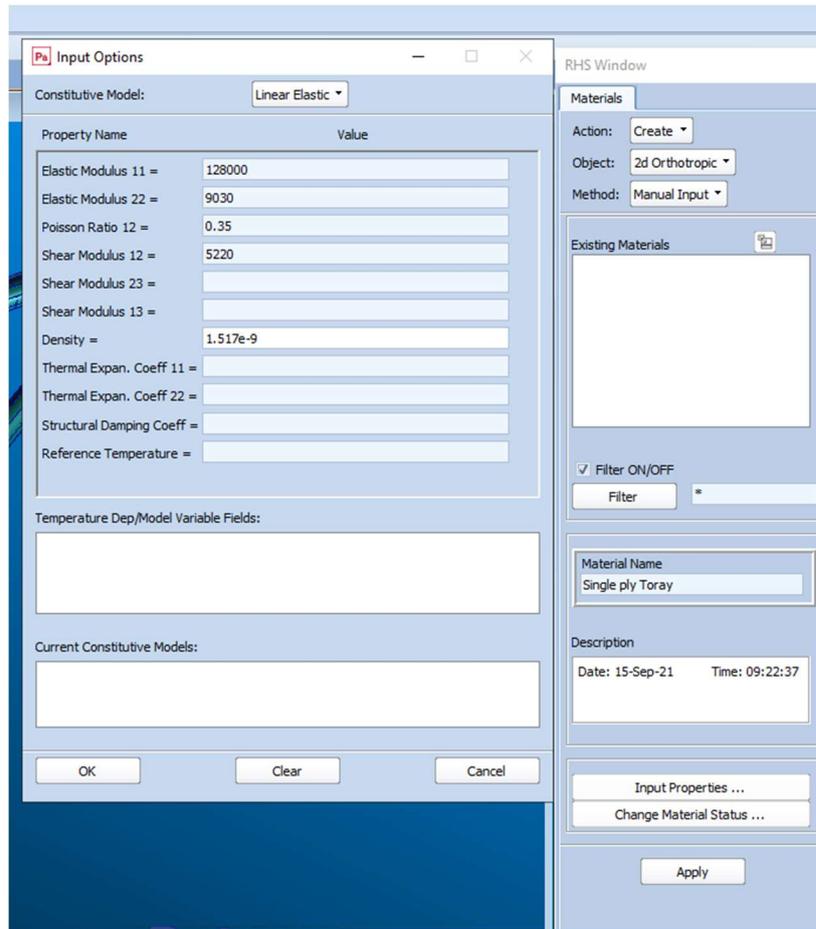


Figura 38 - Inserimento proprietà Single ply Toray

Si inseriscono poi, i valori delle tensioni limite per la lamina, definiti nel paragrafo 2.2.1, utili per il calcolo dell'indice di *failure* secondo il criterio verifica strutturale di *Tsai-Wu*:

Tabella 13 – Tensioni limite

$\sigma_{Rt0^\circ} = 1682 \text{ MPa}$
$\sigma_{Rt90^\circ} = 52.9 \text{ MPa}$
$\sigma_{Rc0^\circ} = 1400 \text{ MPa}$
$\sigma_{Rc90^\circ} = 283 \text{ MPa}$
$\tau_R = 159 \text{ MPa}$

Input Options

Constitutive Model: Failure

Failure Limits: Stress

Composite Failure Theory: Tsai-Wu

Property Name	Value
Tension Stress Limit 11 =	1682.
Tension Stress Limit 22 =	52.900002
Compress Stress Limit 11 =	1400.
Compress Stress Limit 22 =	283.
Shear Stress Limit =	159.
Interaction Term =	
Bonding Shear Stress Limit =	

Current Constitutive Models:

- Linear Elastic - [,,,] - [Active]
- Failure - [Stress,Tsai-Wu,,,] - [Active]

OK Clear Cancel

Figura 39 - Tensioni limite per il criterio di failure di Tsai-Wu

L'operazione successiva consiste nel selezionare la funzione *Laminate* nel sottomenu *Composite*, che apre la finestra per l'inserimento delle proprietà di ogni singolo strato; il multistrato che si vuole realizzare è composto da due strati di lamina ad orientamento fisso, ovvero un *single layer* con spessore doppio rispetto alla lamina, dunque, i campi si compilano con:

- il nome del materiale *Single ply Toray* precedentemente creato;
- lo spessore pari a  $0.312 \text{ mm}$ ;
- l'orientamento delle fibre pari a  $0^\circ$ , per un laminato con fibre unidirezionali.

Il campo *Global Ply Id* si usa per definire la successione degli strati nel laminato: in questo caso si lascia vuoto in quanto il composito in oggetto è costituito da un unico strato.

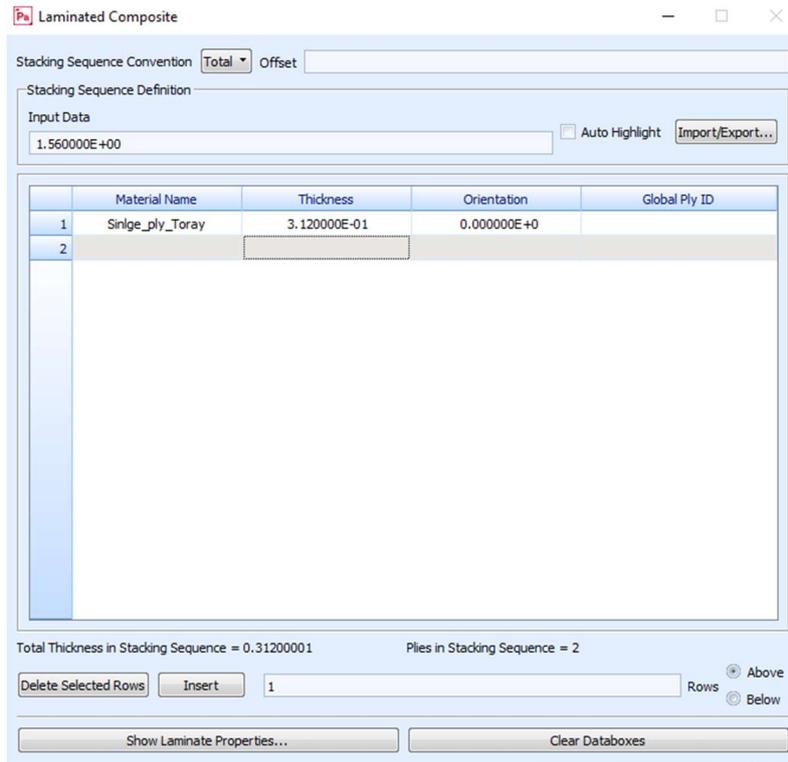


Figura 40 - Proprietà del laminato

#### 5.2.4.2 Tipologia dell'elemento strutturale e assegnazione delle proprietà

Lo stato tensionale che si vuole analizzare è quello tipico dell'elemento guscio, come definito nel paragrafo 5.1.3, che accoppia il comportamento a flessione, e il comportamento a membrana, cioè le deformazioni nel piano medio. In Patran, il corrispondente di questa tipologia di elemento, è rappresentato dall'elemento *shell*, selezionabile nel sottomenu *2D Properties*, con l'opzione *Laminate*.

La definizione delle proprietà di questo elemento prevede l'assegnazione del materiale in termini di proprietà fisiche, e il relativo orientamento della direzione principale, trattandosi di materiale non isotropico.

Affinché la direzione delle fibre del composito unidirezionale sia parallela all'asse delle singole tubazioni che costituiscono la struttura, si rende necessario creare dei sistemi di riferimento locali per ciascuna di esse, in modo tale da assegnare agli elementi l'orientamento desiderato della direzione principale.

Ad esempio, per il tubo verticale, si crea un sistema di coordinate locale, con asse  $x$  parallelo all'asse del tubo:

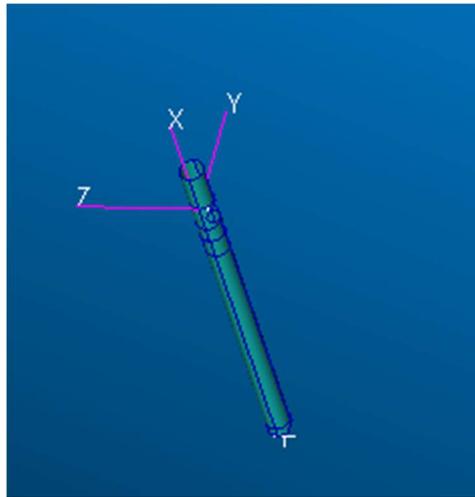


Figura 41 - Coordinate locale per il tubo verticale

Tramite *Mat Prop Name* si richiama il materiale da assegnare, e nel campo *Material Orientation* si inserisce il riferimento locale del tubo in oggetto:

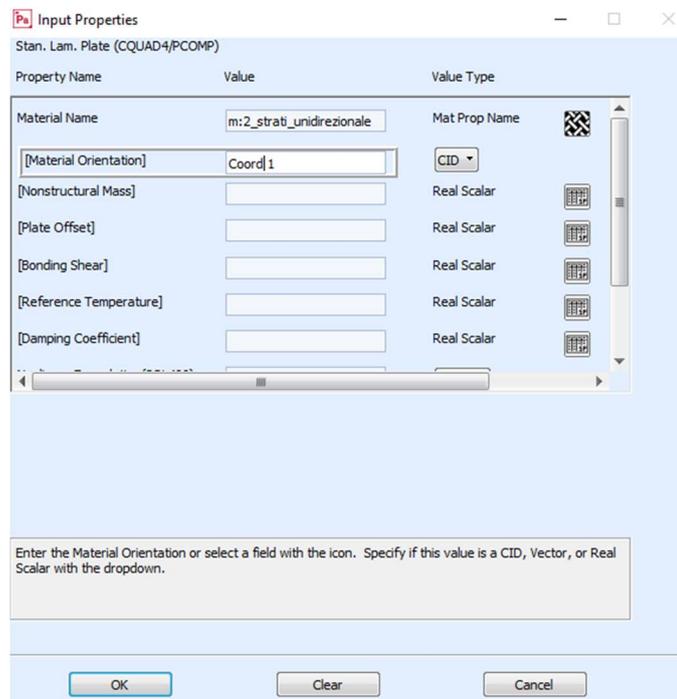
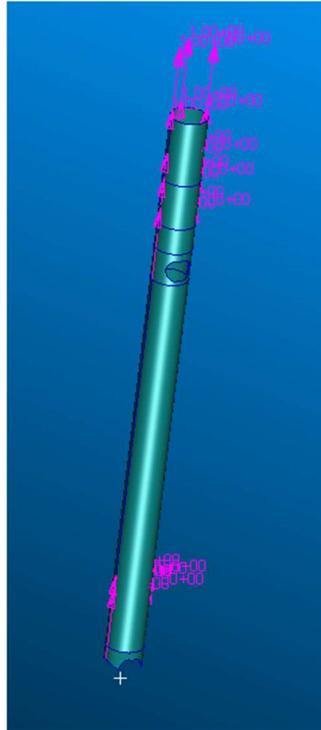


Figura 42 - Inserimento delle proprietà per gli elementi shell del tubo verticale

Le proprietà degli elementi così create, vengono applicate agli elementi che costituiscono il tubo verticale, con il comando *Select Application Region* dalla finestra di creazione dell'elemento *Shell*, e, successivamente, dopo aver selezionato tutte le superfici, con il comando *Add*.



*Figura 43 – Tubo verticale con materiale orientato lungo l'asse*

Ripetendo il procedimento per ciascun elemento strutturale del telaio, si ottiene il modello rappresentato nella figura successiva, in cui, ai diversi colori corrispondono i differenti orientamenti del materiale associati ai singoli componenti:

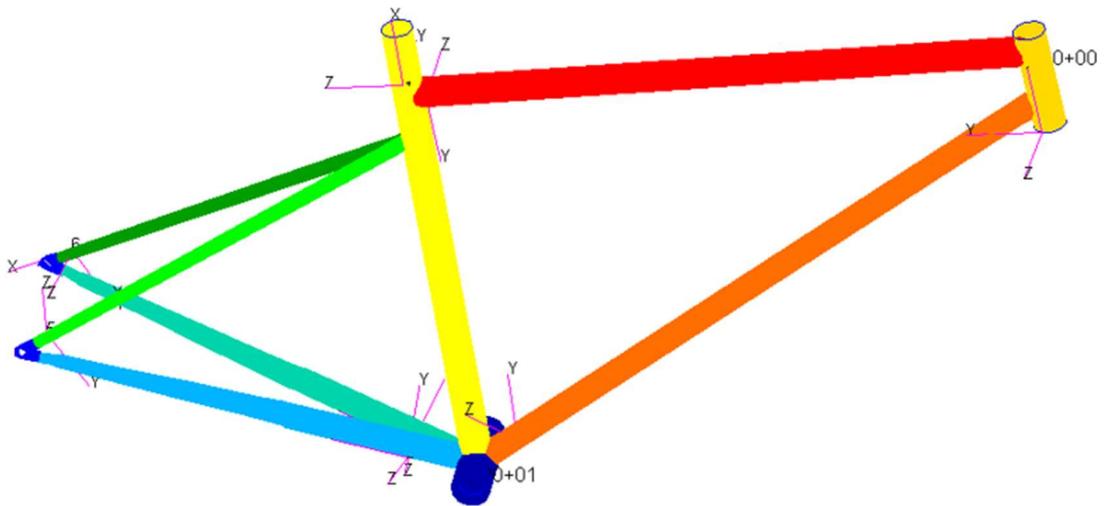


Figura 44 - Differenziazione degli orientamenti assegnati

### 5.2.4.3 Caratteristiche del materiale per acciaio *25CrMo4* e assegnazione delle proprietà

Per definire le caratteristiche dell'acciaio, si esegue una procedura simile a quella vista per il composito.

Trattandosi di un materiale isotropo e omogeneo, si utilizza l'apposita funzione *Isotropic* per l'inserimento dei valori di densità, modulo di Young e coefficiente di Poisson, come definiti nel paragrafo 2.1.1.

Tabella 14 - Caratteristiche fisiche acciaio

$E_1 = 205000 \text{ MPa}$
$\nu = 0.29$
$\rho = 7800 \cdot 10^{-12} \text{ ton/mm}^3$

Un'ulteriore differenza rispetto alla creazione del composito, riguarda l'assegnazione delle proprietà agli elementi shell, che avviene con opzione *Homogeneous*, senza necessità di

definire l'orientamento del materiale, ma con indicazione obbligatoria dello spessore, stabilito in  $1\text{ mm}$ .

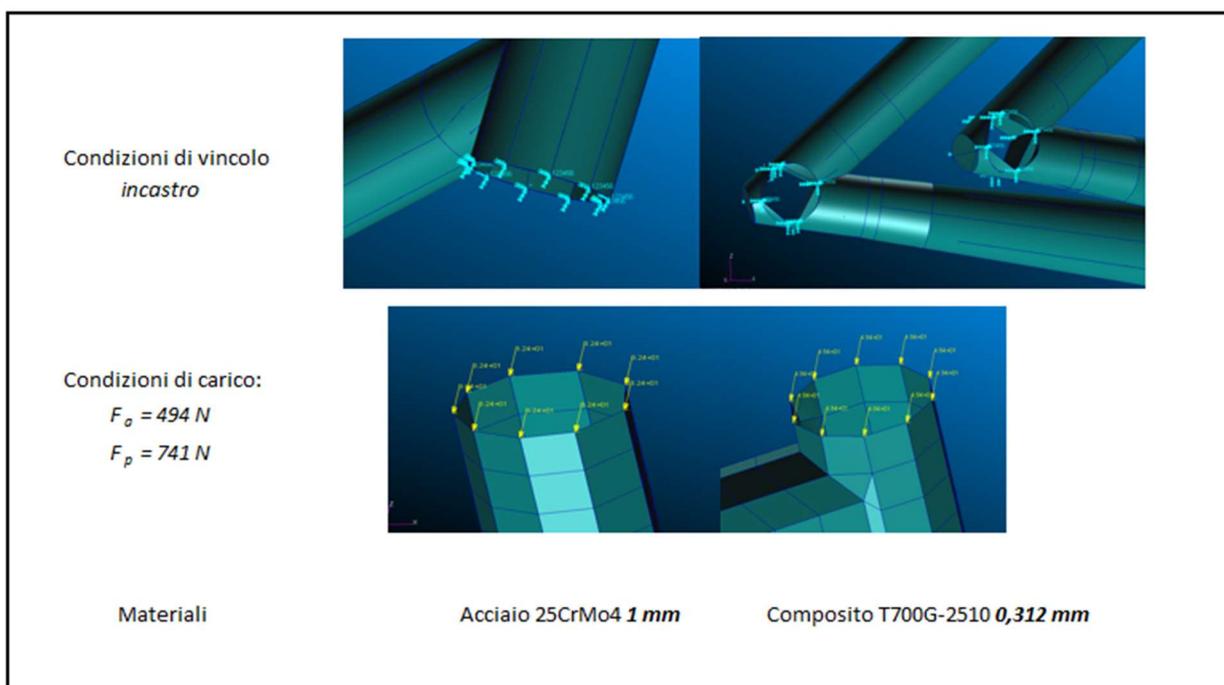


Figura 45 – Riepilogo



## 6. Analisi strutturale

### 6.1 Analisi statica con *Nastran*

L'analisi statica lineare si realizza mediante l'uso del software *MSC Nastran 2021 Student Edition*.

L'operazione preliminare consiste nella scelta delle opzioni di analisi in Patran, selezionando, nel menu *Analysis*, il comando *Entire Model*, per l'analisi dell'intero modello, e l'opzione *Full Run* nella relativa finestra di comando, per imporre al codice di calcolo di effettuare la traduzione dei dati e l'analisi completa.

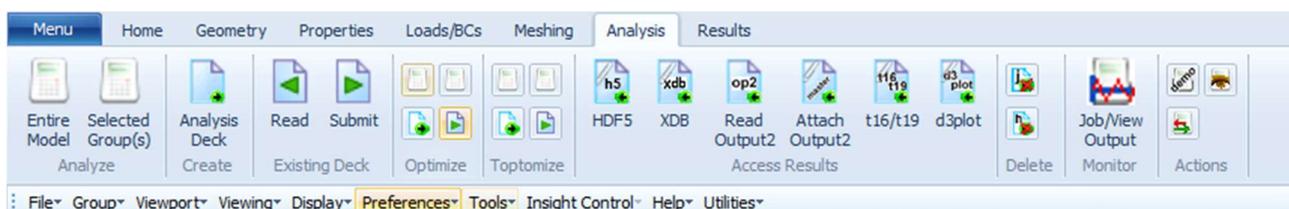


Figura 45 – Menu Analysis



Figura 46 – Finestra di comando Analysis

Con il comando *Solution Type* si stabilisce il tipo di analisi, *Linear Static*, e, in *Solution Parameters > Results Output Format*, si sceglie il formato *.op2* del file di output dei risultati per il post processo.

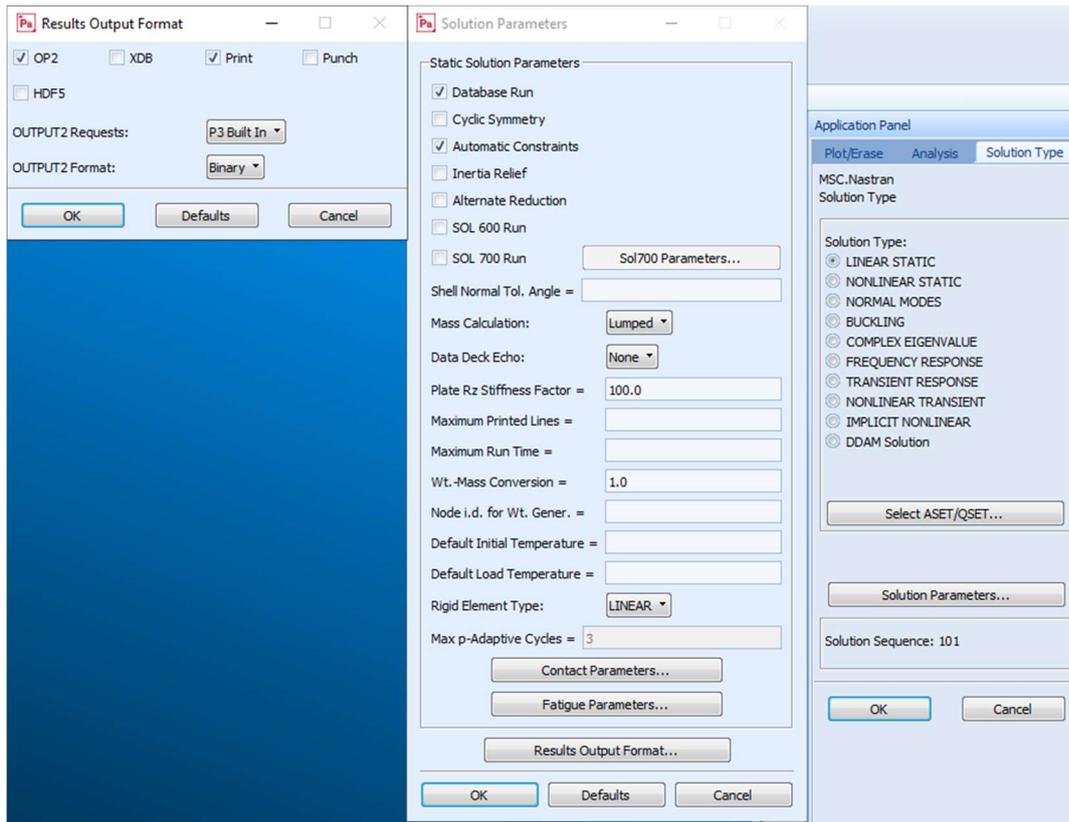


Figura 47 - Scelta del tipo di analisi e del formato di output

In *Subcases* si creano e visualizzano le condizioni di carico per l'analisi, e in *Output Requests* si definiscono i risultati che si intendono ottenere dall'analisi, nello specifico:

- deformazioni (*Displacements*)
- tensioni agenti sull'elemento (*Element Stresses*)
- reazioni vincolari (*Constraint Forces*)
- forze agenti sull'elemento (*Element Forces*)
- carichi applicati (*Applied Loads*)

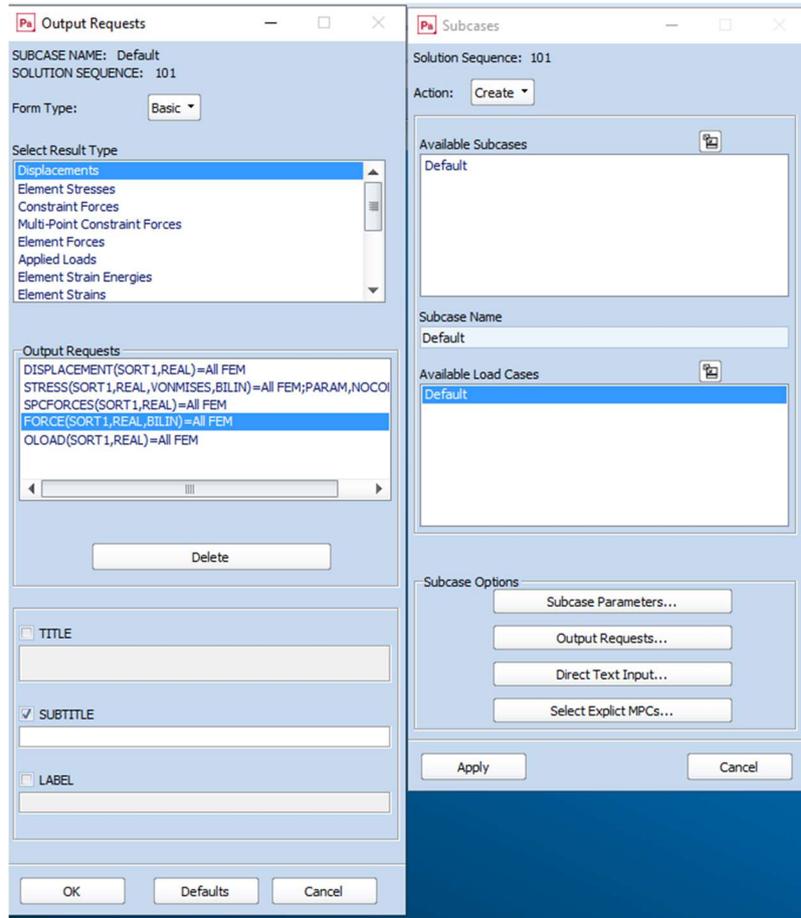


Figura 48 – Finestra di comando Subcases e Output Requests

Infine, dopo aver selezionato la condizione di carico in *Subcase Select*, si inizializza l'analisi in *Nastran*.

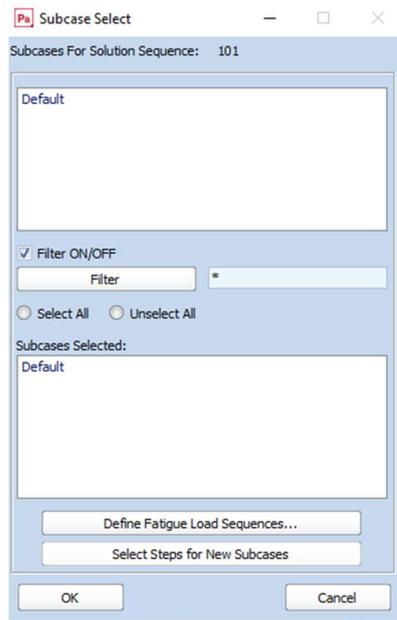


Figura 49 – Scelta della condizione di carico

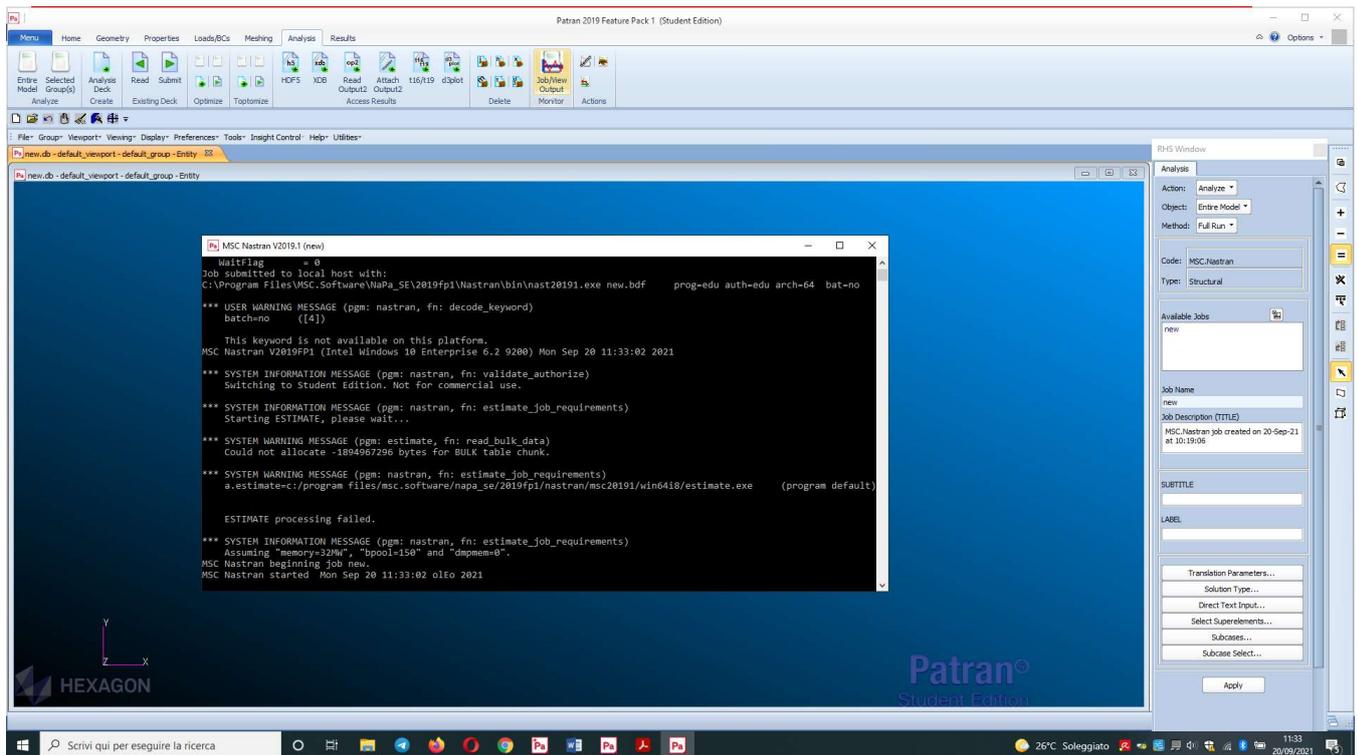


Figura 50 – Esecuzione dell'analisi in Nastran

Al termine dell'esecuzione, si verifica la correttezza dell'analisi svolta all'interno del file di estensione *.f06*, prodotto dal codice di calcolo Nastran, il quale contiene tutte le informazioni e i dati numerici dell'analisi. L'assenza di messaggi di errore di tipo *Fatal* conferma la validità dell'analisi.

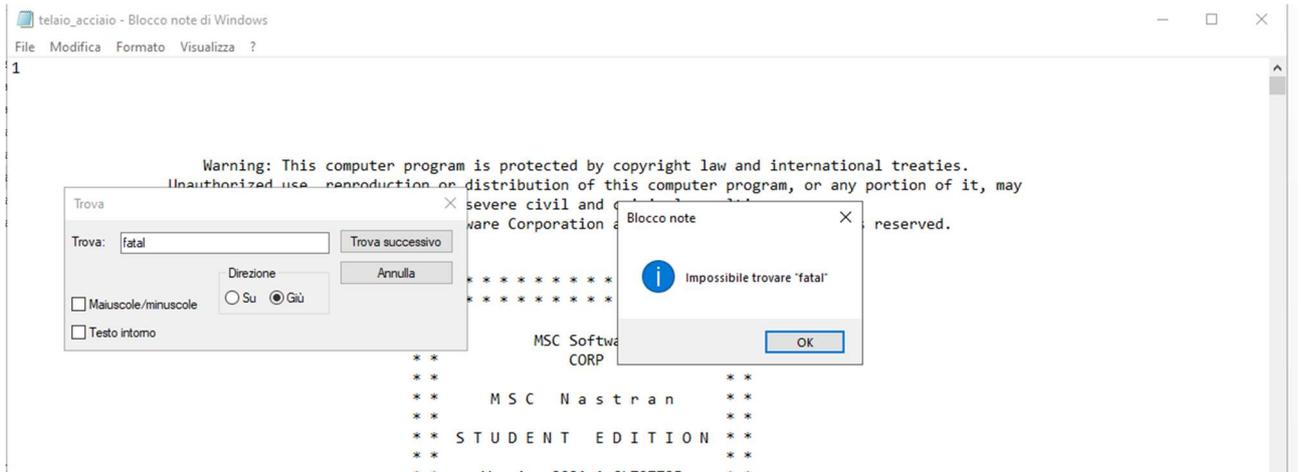


Figura 51 – Verifica assenza di errori nell'analisi

Per l'analisi dei risultati in Patran, si allega il file di formato *.op2*, mediante il comando *Access Results* e l'opzione *Attach OP2*.

## 6.2 Analisi soluzione modello in composito

### 6.2.1 Verifica dell'indice di *failure*

L'operazione preliminare per l'analisi della soluzione composita, consiste nella verifica dell'indice di failure, calcolato secondo il criterio di Tsai-Wu, il quale prevede la rottura del laminato, secondo una relazione quadratica che coinvolge le tre tensioni cartesiane nel riferimento principale del materiale. Nel caso tridimensionale, la condizione di resistenza è assicurata se

$$\sum_{ij} F_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_i F_i \sigma_i < 1.$$

Dalla scala cromatica in cui sono elencati progressivamente i valori di tale indice, si nota facilmente come il requisito non sia soddisfatto in diverse regioni del modello, in particolare nelle zone di congiunzioni dei tubi e in prossimità dell'applicazione dei carichi e dei vincoli, con un massimo in corrispondenza dell'innesto dei tubi al movimento centrale.

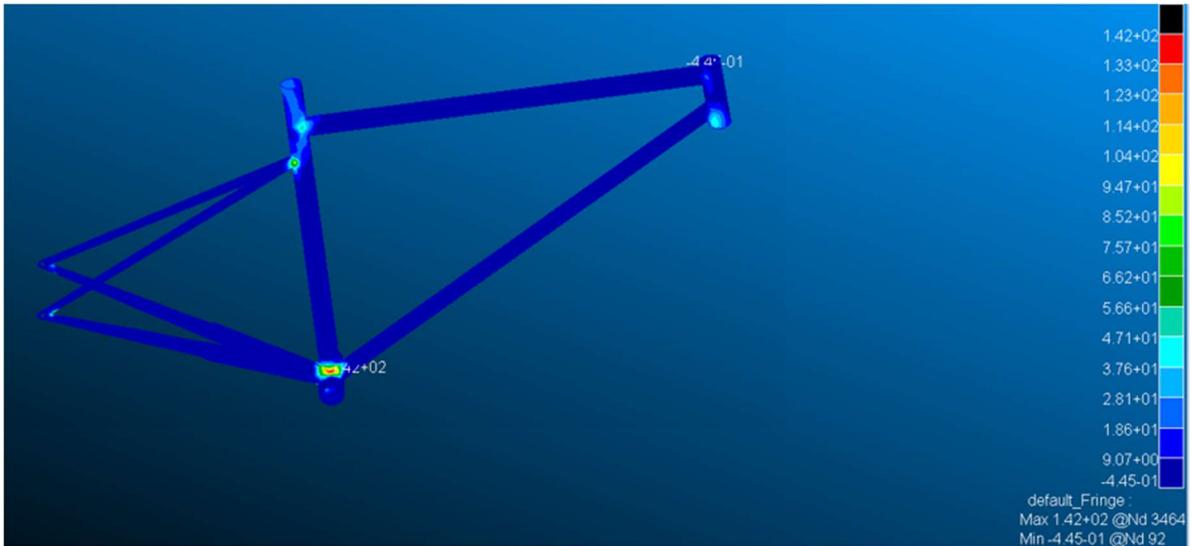


Figura 52 – Analisi dell'indice di failure

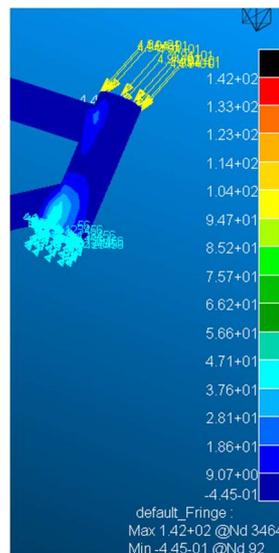


Figura 53 - Indice di failure per il tubo sterzo

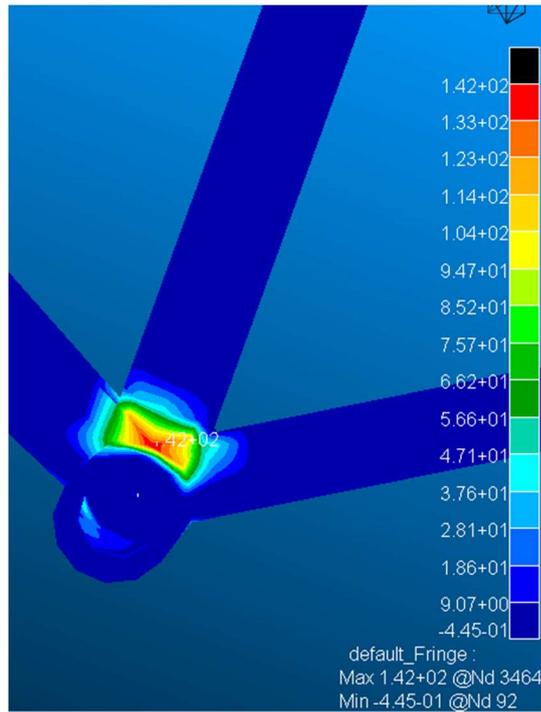


Figura 54 - Indice di failure massimo in corrispondenza del movimento centrale

Il risultato ottenuto indica che lo spessore adottato per il multistrato non è sufficiente affinché la struttura resista, senza rompersi, alla sollecitazioni prodotte dalle condizioni di carico e di vincolo definite.

Si decide, quindi, di consolidare esclusivamente le zone maggiormente sollecitate, per non sovradimensionare la struttura in termini di peso.

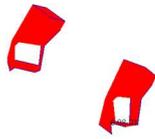
Il risultato finale, ottenuto a seguito di diversi tentativi condotti variando lo spessore del laminato, è costituito da:



foderi orizzontali: struttura principale  $0.312\text{ mm}$ , estremità  $0.936\text{ mm}$



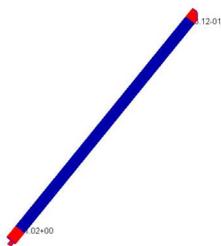
foderi verticali:  $0.312\text{ mm}$



forcellini:  $0.624\text{ mm}$



movimento centrale:  $1.248\text{ mm}$



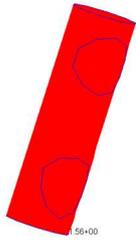
tubo obliquo: struttura principale  $0.312\text{ mm}$ , estremità  $1.248\text{ mm}$



tubo orizzontale: struttura principale  $0.312\text{ mm}$ , estremità  $1.248\text{ mm}$



tubo verticale: struttura principale  $0.78\text{ mm}$ , estremità  $1.248\text{ mm}$



tubo sterzo: 1.248 mm

Con questa nuova configurazione, l'indice di failure risulta inferiore ad uno per tutta la struttura:

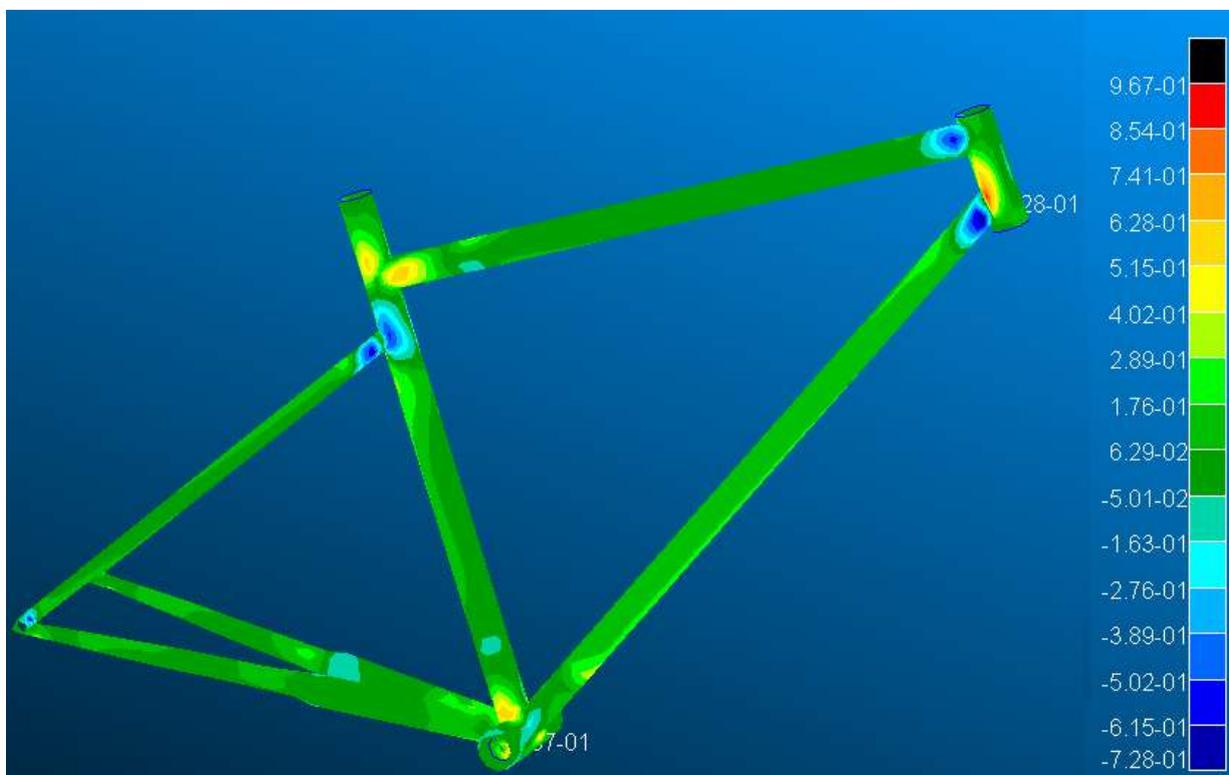


Figura 54 - Indice di failure per la nuova configurazione

### 6.2.2 Tensioni

L'analisi dello stato tensionale rappresentato nella figura seguente, si effettua in base al tensore delle tensioni nella formulazione di default di Von Mises.



Figura 55 - Stato tensionale telaio in composito

La massima tensione si verifica in corrispondenza dell'innesto dei foderi verticali con il tubo verticale, ed è pari a 1200 MPa:

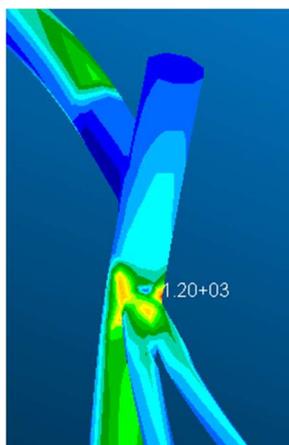


Figura 56 - Tensione massima

### 6.2.3 Deformazioni

Considerata la tipologia dei carichi, si analizza la deformata statica delle sole deformazioni traslazionali, con un fattore di scala di  $0.05$ , riportata nella figura seguente:

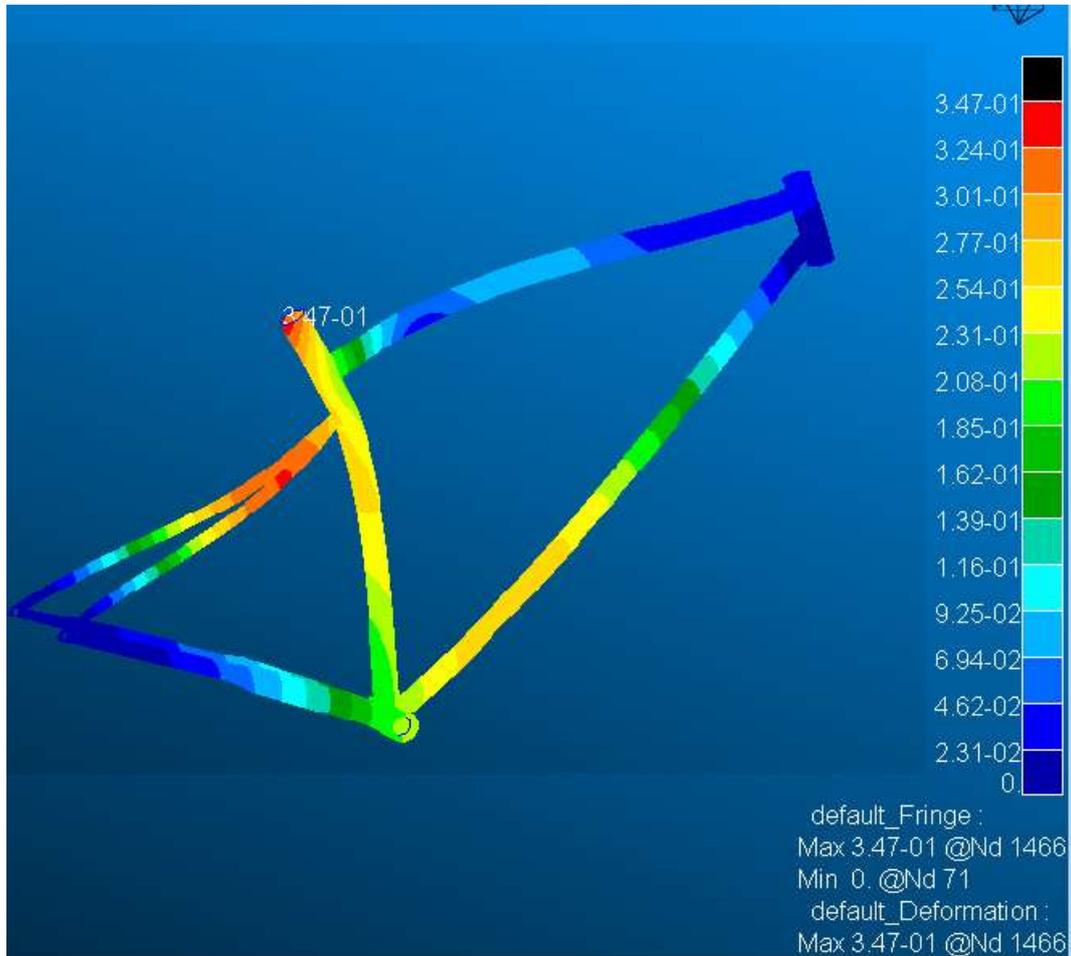


Figura 57 - Deformata statica telaio in composito

Il valore massimo di deformazione, pari a  $0.347\text{ mm}$ , si verifica in due regioni della struttura, ovvero in corrispondenza del bordo superiore del tubo verticale, e nei foderi verticali.

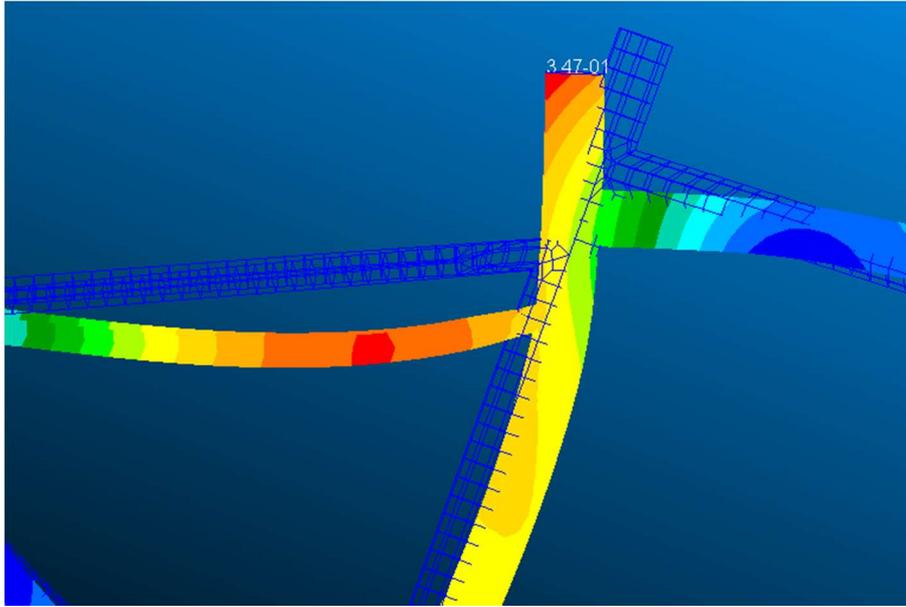


Figura 58 - Deformazione massima

Deformazioni significative si verificano anche per il resto del tubo verticale e per il tubo obliquo, con un massimo di circa  $0.254 \text{ mm}$ .

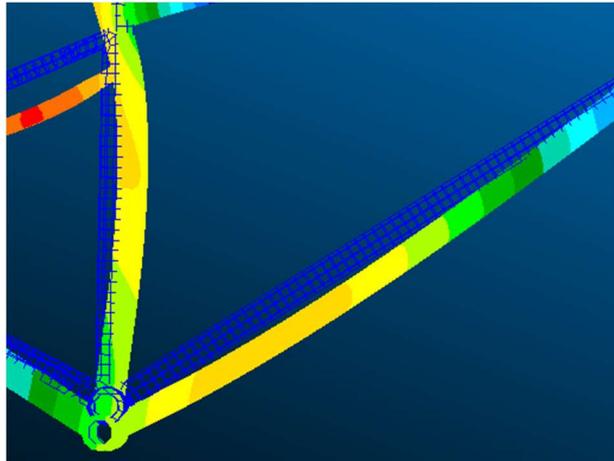


Figura 59 - Deformazioni dei tubi verticali ed obliquo

## 6.3 Analisi soluzione modello in acciaio

### 6.3.1 Tensioni e verifica dei criteri strutturali

L'analisi dello stato tensionale, anche per il caso metallico, si effettua considerando il tensore degli sforzi secondo la formulazione di Von Mises.

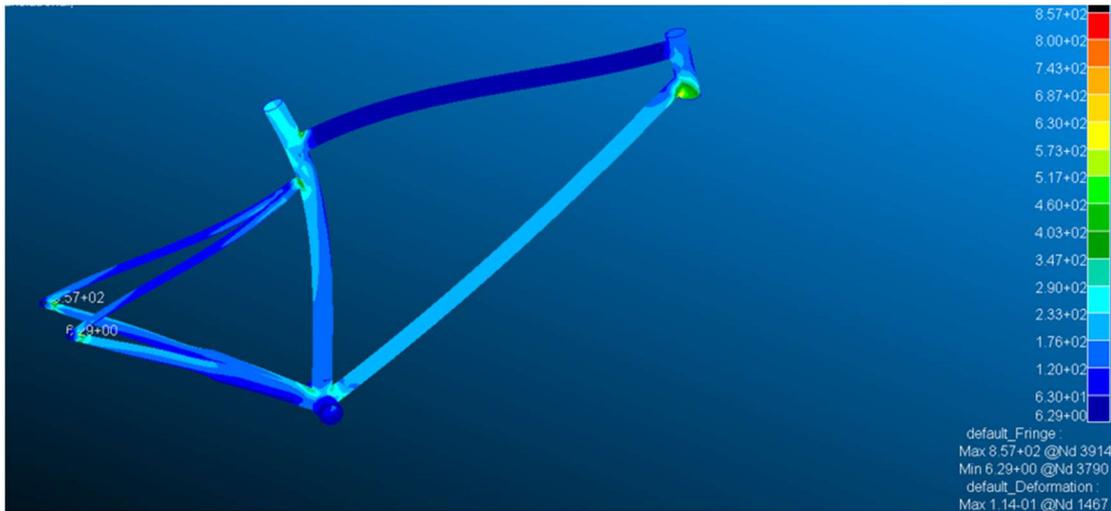


Figura 60 – Stato tensionale telaio in acciaio

La verifica strutturale avviene, nel caso dei materiali omogenei, mediante l'utilizzo dei criteri di robustezza e di rigidezza:

- criterio di robustezza: la struttura deve poter sopportare il carico limite  $\sigma_l$ , ovvero il carico massimo agente in condizioni operative, senza giungere a rottura, evento definito dal carico di rottura  $\sigma_r$  moltiplicato per un fattore di sicurezza  $SF$ , generalmente posto pari a 1.5:

$$\sigma_l < \frac{\sigma_r}{SF} = \frac{1200 \text{ MPa}}{1.5} = 800 \text{ MPa}$$

essendo  $\sigma_r = 1200 \text{ MPa}$  il carico a rottura per l'acciaio 25CrMo4 definito nel paragrafo 2.1.1.

- criterio di rigidezza: la struttura deve poter sopportare il carico limite  $\sigma_l$ , ovvero il carico massimo agente in condizioni operative, senza superare il limite di deformazione definito dal carico di snervamento  $\sigma_{0.2}$ :

$$\sigma_l < \sigma_{0.2} = 760 \text{ MPa}$$

essendo  $\sigma_{0,2} = 760 \text{ MPa}$  il carico di snervamento per l'acciaio 25CrMo4 definito nel paragrafo 2.1.1.

Dalla scala delle tensioni, si nota facilmente che i criteri non sono soddisfatti in corrispondenza delle zone di congiunzioni tra foderi e forcellino

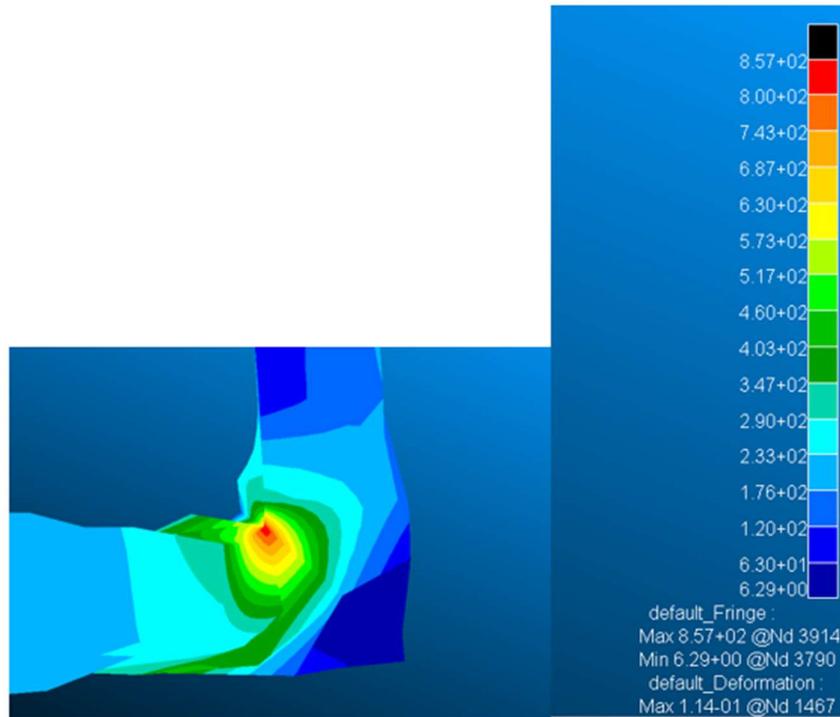


Figura 61 - Tensioni forcellino posteriore

Si decide, quindi, procedendo per tentativi, di aumentare lo spessore delle tubazioni nelle suddette zone, fino al soddisfacimento dei criteri verifica, che si ottiene per  $1.25 \text{ mm}$ :

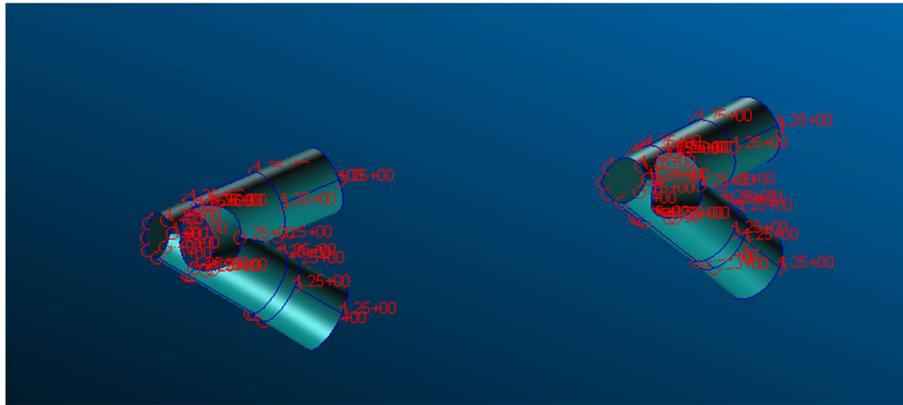


Figura 62 - Forcellini ed estremità foderi con spessore 1.25 mm

Ripetendo l'analisi si ottiene una tensione massima pari a  $715 \text{ MPa}$ , per cui si possono ritenere rispettati sia il criterio di verifica a robustezza che quello a rigidezza.

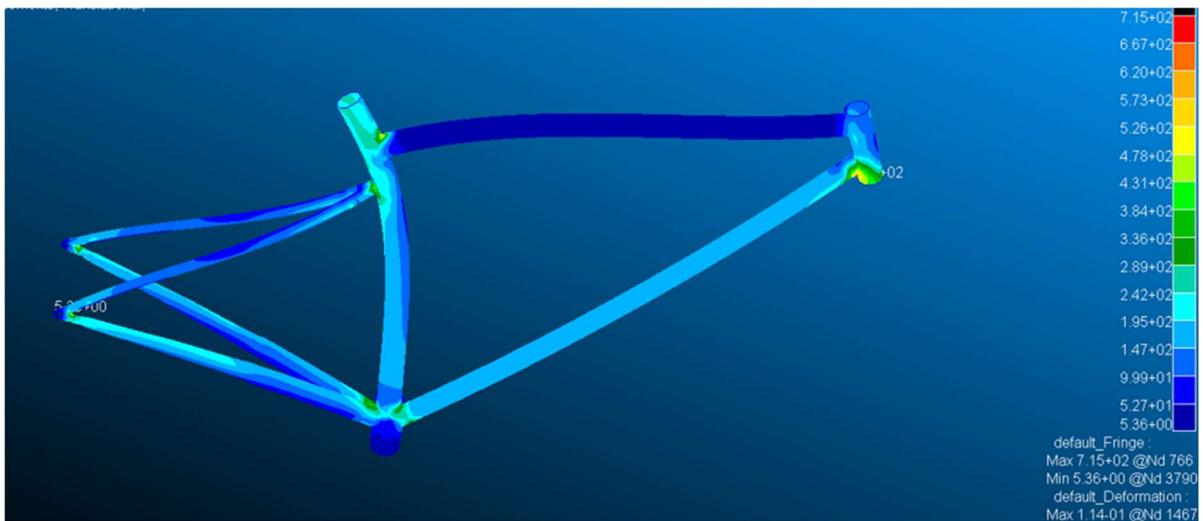


Figura 63 – Stato tensionale del telaio nella nuova configurazione

```
default_Fringe :
Max 7.15+02 @Nd 766
Min 5.36+00 @Nd 3790
default_Deformation :
Max 1.14-01 @Nd 1467
```

Figura 64 – Valori massimo e minimo delle tensioni

### 6.3.2 Deformazioni

Esaminando, anche nel caso della soluzione metallica, le sole deformazioni traslazionali, con un fattore di scala di  $0.05$ , la deformata statica si presenta come:

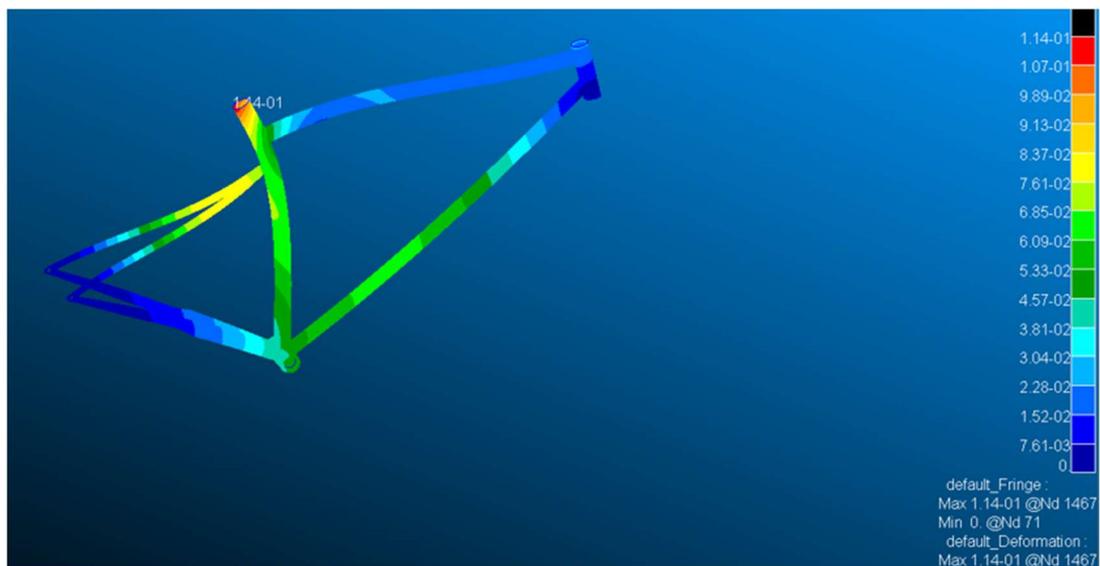


Figura 65 -Deformata statica del telaio in acciaio

L'elemento strutturale del telaio maggiormente deformato risulta il tubo verticale, con una deformazione massima pari a  $0.114 \text{ mm}$ , in corrispondenza della regione del bordo superiore.

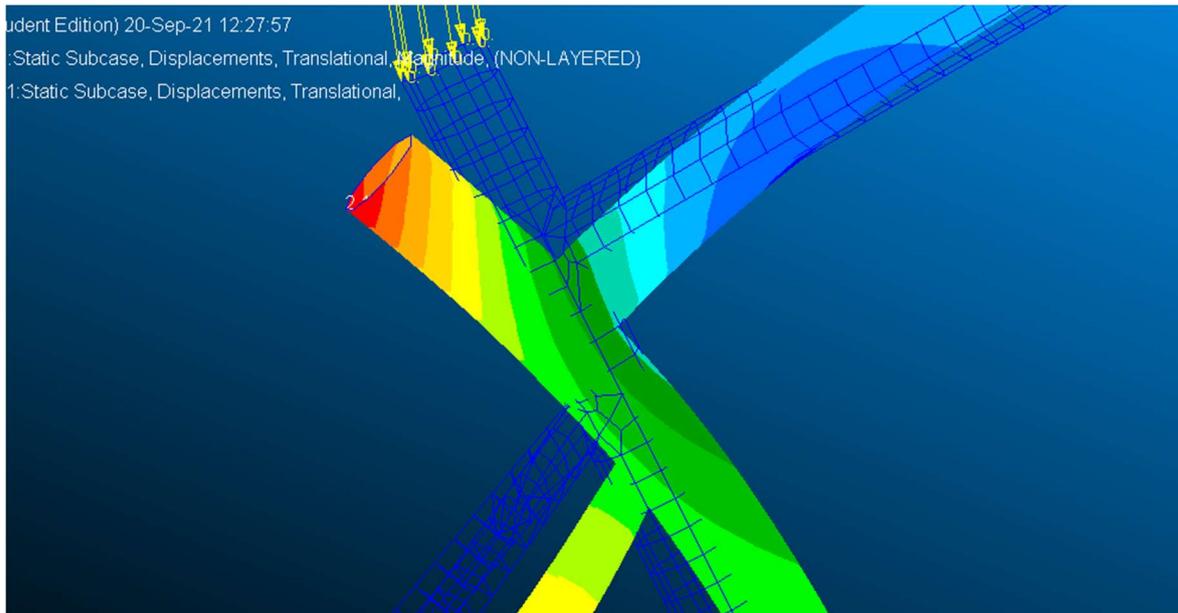


Figura 66 - Deformazione massima

Deformazioni rilevanti si verificano anche in corrispondenza della zona centrale del tubo verticale e di quello obliquo, con un picco dell'ordine di  $0.0685 \text{ mm}$ , e nei foderi verticali, in prossimità del tubo verticale, con un massimo dell'ordine di  $0.0837 \text{ mm}$

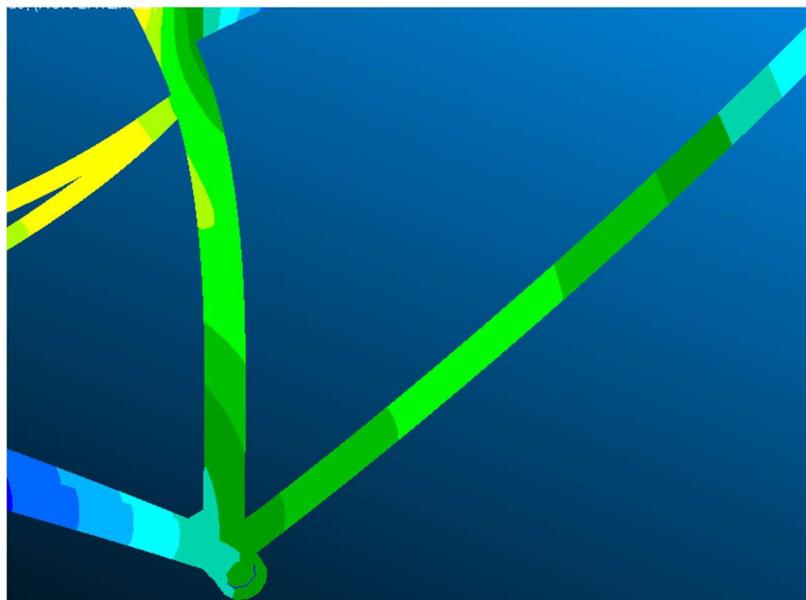
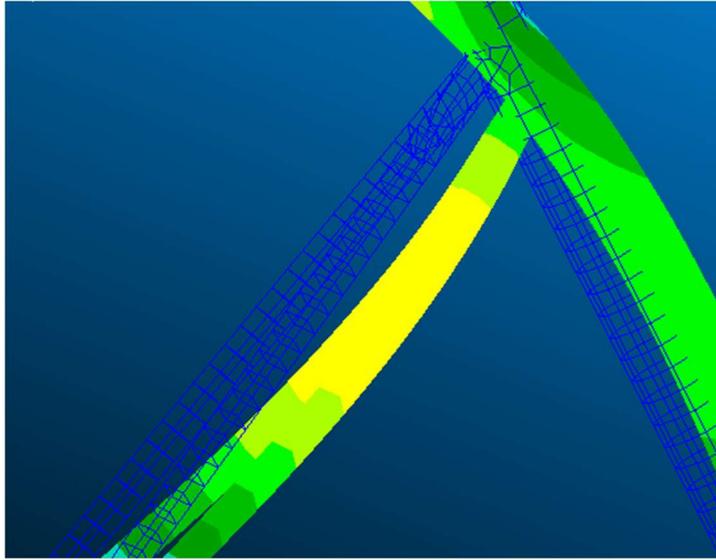


Figura 67 - Deformazione tubi verticale ed obliquo



*Figura 68 - Deformazione massima dei foderi verticali*



## 7. Conclusioni

L'analisi effettuata ha dimostrato come, per le condizioni di carico definite, sia l'impiego dell'acciaio che quello del composito permetta di soddisfare i requisiti strutturali.

Per la struttura in composito, lo spessore inizialmente stabilito di  $0.312\text{ mm}$ , risulta insufficiente in molteplici regioni, nelle quali si deve intervenire con un inspessimento del laminato, per evitarne la rottura. Nello specifico, i componenti che necessitano maggiormente di un rinforzo, sono il tubo sterzo, il movimento centrale e alcune parti del tubo verticale, con un aumento di spessore quattro volte quello iniziale.

Per la struttura in acciaio, invece, lo spessore iniziale di  $1\text{ mm}$ , si dimostra insufficiente solo per i forcellini posteriori, che richiedono un aumento di spessore del  $25\%$ .

L'aspetto fondamentale su cui basarsi per il confronto tra le due soluzioni è il peso della struttura.

L'analisi delle proprietà di massa, ha permesso di stimare il peso complessivo per le due soluzioni analizzate:

- telaio in composito: 592 g;
- telaio in acciaio: 1936 g.

La realizzazione del telaio in composito di carbonio permette una significativa riduzione di peso della struttura, pari a circa il  $70\%$ .

Tale risultato è legato principalmente alla notevole differenza di densità dei due materiali presi in considerazione:

- *prepreg Toray T700G-2510*:  $\rho = 1517\text{ kg/m}^3$
- *25CrMo4*:  $\rho = 7800\text{ kg/m}^3$

a cui corrispondono grandezze specifiche, ovvero in relazioni al peso, nettamente a favore del composito:

Tabella 15 – Modulo elastico e tensione a rottura specifici

	modulo elastico (a 0° per composito) [Mpa]	tensione a rottura (a 0° per composito) [Mpa]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	modulo elastico specifico	tensione a rottura specifica
<b>T700g-2510</b>	128000	1682	1517	84	1,1
<b>25CrMo4</b>	205000	1200	7800	26	0,15

La riduzione di peso è un aspetto fondamentale in ambito ciclistico, poiché si traduce in un minore dispendio energetico del ciclistica, e di conseguenza in un aumento delle prestazioni.

Il modulo elastico in valore assoluto del composito, invece, risulta molto inferiore rispetto a quello dell'acciaio, per effetto delle scarse proprietà meccaniche della matrice, che causa una riduzione del modulo elastico dai *240000 MPa* delle fibre di carbonio impiegate per la realizzazione del prepreg Toray, ai *128000 MPa* della lamina di composito.

La differenza di rigidità, si manifesta nella pratica, in una maggiore deformazione del telaio in composito sotto carico, con un picco di deformazione di *0.347 mm*, circa tre volte maggiore del picco di deformazione del caso dell'acciaio, entrambi in corrispondenza del bordo del tubo verticale.

Una maggiore deformabilità della struttura, determina, durante l'utilizzo della bicicletta, la dispersione di una piccola percentuale della potenza prodotta dal ciclista durante la pedalata, in energia di deformazione. Tuttavia, questo aspetto, è trascurabile rispetto ai notevoli vantaggi, sempre in termini energetici, prodotto dalla riduzione di peso legato all'utilizzo del

Ulteriori benefici dell'utilizzo del composito, consistono in una maggiore resistenza a trazione, e le eccellenti prestazioni in termini di resistenza alla corrosione e alla fatica, che aumentano notevolmente la vita del prodotto.

Il composito in carbonio, inoltre, è superiore non solo per le caratteristiche intrinseche del materiale, ma anche per le molteplici possibili soluzioni di realizzazione: la possibilità di scegliere il numero degli strati che compongono il tessuto, nonché l'orientamento delle fibre negli strati stessi, consente di conferire caratteristiche meccaniche diverse nei vari punti della struttura, a seconda delle esigenze progettuali.

## Bibliografia

- [1] Giant. [www.giant-bicycles.com/it](http://www.giant-bicycles.com/it).
- [2] Bonomi Acciai. [www.bonomiacciai.it](http://www.bonomiacciai.it).
- [3] Zuccarello B. Progettazione meccanica con materiali compositi. Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo.
- [4] Toray. T700G Standard modulus carbon fiber. [www.toraycma.com](http://www.toraycma.com).
- [5] Toray. 2510 prepreg system. [www.toraycma.com](http://www.toraycma.com).
- [6] Bikeitalia. [www.bikeitalia.it](http://www.bikeitalia.it).
- [7] Probikeshop. [www.probikeshop.it](http://www.probikeshop.it).
- [8] Columbus. Tube sets 2022 catalog. [www.columbustubi.com](http://www.columbustubi.com).
- [9] Pbikestore. [www.pbikestore.com](http://www.pbikestore.com).
- [10] Giant. Bicycle's owner manual version 12.0. [www.giant-bicycles.com](http://www.giant-bicycles.com).
- Bacchetto A. *Introduzione al metodo degli elementi finiti e alla modellazione FEM*. Adepron.
- Di Sciuva M. *Testi coordinati di analisi strutturale*. Politeko.
- MSC. *MSC Nastran 2013 Quick Reference Guide*. MSC Software, 2013.
- MSC. *Patran 2013 Reference Manual Part 2: Geometry Modeling*. MSC Software, 2013.
- MSC. *Patran 2013 Reference Manual Part 3: Finite Element Modeling*. MSC Software, 2013.
- MSC. *Reference Manual Part 4: Functional Assignments*. MSC Software, 2013.