Università Politecnica delle Marche



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Progettazione e ottimizzazione topologica del supporto ala posteriore del veicolo di Formula SAE

Design and topological optimization of the rear wing support for the Formula SAE vehicle

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Tesi di Laurea di:

Edoardo Pulcini

Matricola:

1114895

A.A. 2025-2026

INDICE

INDICE I

INDICE DELLE FIGURE II

1. INTRODUZIONE 1

2. VALUTAZIONI PRELIMINARI 3

2.1 RICHIESTE DA PARTE DEL TEAM 3
2.2 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI PROGETTO 3
2.3 VALUTAZIONE DELLE FORZE E DEI CARICHI A CUI SONO SOTTOPOSTI I SUPPORTI 4

3. DISEGNO DEL PEZZO IN SOLIDEDGE 6

4. SETTINGS SIMULAZIONI FEM 10

4.1 DEFINIZIONE DEI VINCOLI 10
4.2 PARZIALI SIMULAZIONI FEM 16
4.3 CREAZIONE ALA POSTERIORE FITTIZIA 19

5. SIMULAZIONE FEM DELL'ASSIEME 23

6. ANALISI E VALUTAZIONE DEI RISULTATI DELLA SIMULAZIONE FEM 32

7. ALLEGGERIMENTI 37

8. RIMODELLAZIONE GENERALE 51

9. CONSIDERAZIONI FINALI 54

10. VERIFICHE FINALI DELLE RICHIESTE PROGETTUALI 58

11. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI 60

12. BIBLIOGRAFIA 61

13. SITOGRAFIA 62

APPENDICE A – TAVOLA TECNICA DEL SINGOLO SUPPORTO 63

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Assieme supporti, tiranti e ala posteriore 3
Figura 2 - Estratto preso dal report sullo sviluppo del pezzo precedente fornito dal Team contenente informazioni riguardanti il materiale usato per la realizzazione del pezzo e i carichi stimati. 5
Figura 3 - Tavola tecnica del pezzo precedente estratta dal report fornito dal Team 6
Figura 4 - Geometria di partenza 7
Figura 5 - Quotatura complessiva 8
Figura 6 - Zoom 1 quotatura complessiva 8
Figura 7 - Zoom 2 quotatura complessiva 9
Figura 8 - Sotto-vincoli inseriti per simulare il vincolo di cerniera 11
Figura 9 - Vincoli di cerniera inseriti 11
Figura 10 - Distanza tra punto di fissaggio del tirante al supporto e il punto di fissaggio di tale tirante al telaio 13
Figura 11 - Angoli impostati per definire il nuovo sistema di riferimento 14
Figura 12 - Vincolo "Definito dall'utente" necessario a simulare la presenza del tirante 15
Figura 13 - Vista 1, risultato prime simulazioni (Deformazione) 17
Figura 14 - Vista 2, risultato prime simulazioni (Deformazione) 17
Figura 15 - Massa del singolo supporto privo di alleggerimenti 18
Figura 16 - Estratto del report sullo sviluppo dei supporti precedenti fornito dal Team raffigurante la pressione laterale da applicare alla simulazione per Regolamento 19
Figura 17 - Dimensioni endplate simili a quelle reali 20
Figura 18 - Ala posteriore completa disegnata in maniera schematica ai fini della simulazione. 20
Figura 19 - Caratteristiche del materiale usato per simulare l'ala posteriore nell'assieme. 21
Figura 20 - Assieme completo pronto per la simulazione 22
Figura 21 - Carichi verticali applicati ai due supporti 24
Figura 22 - Applicazione forze orizzontali dovute al drag 24
Figura 23 - Applicazione della pressione laterale 25
Figura 24 - Applicazione dei vincoli (a meno del tirante) all'assieme completo 26
Figura 25 - Sistema di riferimento ausiliario per vincolo imposto dal tirante 27
Figura 26 - Vincolo tirante per simulazione finale 28
Figura 27 - "Connessione bullone" nella simulazione finale 28
Figura 28 - Screenshot 1 - Analisi FEM preliminare - Deformazione 29
Figura 29 - Screenshot 2 analisi FEM preliminare - Tensione 29
Figura 30 - Screenshot 3 analisi FEM – Tensione 30
Figura 31 - Ala posteriore con rinforzo in corrispondenza della zona di applicazione della pressione 31
Figura 32 - Risultati simulazione FEM con ala posteriore irrigidita 31
Figura 33 - Analisi visiva dei risultati della simulazione FEM (Deformazione) 33
Figura 34 - Utilizzo strumento Sonda (Deformazione) sulla punta dei supporti 33
Figura 35 - Analisi visiva risultati simulazione FEM (Tensione) 34
Figura 36 - Criticità insorta in corrispondenza del bordo della superficie di fissaggio del tirante 35
Figura 37 - Utilizzo Sonda per criticità bordo superficie attacco tirante 35
Figura 38 - Estratto preso dal report fornito dal PoliMarche Racing Team sull'ottimizzazione topologica svolta dal Team 37
Figura 39 - Schizzo realizzato per estrudere il primo alleggerimento 38
Figura 40 - Simulazione FEM supporto con il primo alleggerimento 38

Figura 41 - Sonda in Deformazione nel punto di massimo spostamento in presenza di un alleggerimento _____ *39*
Figura 42 - Tensione equivalente nel punto critico in presenza del primo alleggerimento _____ *40*
Figura 43 - Massa del singolo supporto con un solo alleggerimento _____ *41*
Figura 44 - Zona in cui la tensione equivalente assume valori bassi _____ *41*
Figura 45 - Zona del supporto in cui si ha una tensione equivalente bassa _____ *42*
Figura 46 - Schizzo completamente vincolato relativo al secondo alleggerimento _____ *42*
Figura 47 - Risultati simulazione FEM con secondo alleggerimento _____ *43*
Figura 48 - Nuova zona critica formatasi a causa del nuovo alleggerimento _____ *44*
Figura 49 - Stato tensionale equivalente della zona di fissaggio del tirante a seguito del secondo alleggerimento _____ *44*
Figura 50 - Quotatura terzo alleggerimento _____ *45*
Figura 51 - Risultati simulazione FEM con terzo alleggerimento _____ *46*
Figura 52 - Quote relative al quarto ed ultimo alleggerimento _____ *46*
Figura 53 - Vista 1 rappresentante le zone con i più alti valori di tensione equivalente _____ *47*
Figura 54 - Vista 2 rappresentante le zone con i più alti valori di tensione equivalente _____ *47*
Figura 55 - Sonda nella zona di ancoraggio del tirante a seguito di tutti gli alleggerimenti _____ *48*
Figura 56 - Risultati simulazione FEM a seguito dell'ultimo alleggerimento – Deformazione _____ *49*
Figura 57 - Sonda nel punto maggiormente soggetto a spostamento a causa dell'applicazione dei carichi esterni _____ *49*
Figura 58 - Massa del singolo supporto nella configurazione quasi definitiva _____ *50*
Figura 59 - Quote rimodellazione generale _____ *51*
Figura 60 - Ingrandimento 1 quote rimodellazione generale _____ *52*
Figura 61 - Ingrandimento 2 quote rimodellazione generale _____ *52*
Figura 62 - Risultati simulazione FEM a seguito della rimodellazione generale _____ *53*
Figura 63 - Simulazioni FEM geometria molto prossima a quella finale _____ *54*
Figura 64 - Raccordo inserito nel tentativo di abbassare la tensione equivalente _____ *56*
Figura 65 - Sonda in corrispondenza del foro di fissaggio del tirante in presenza del raccordo _____ *57*
Figura 66 – Verifica traslazione orizzontale massima ala posteriore _____ *58*
Figura 67 – Massa supporto nella configurazione definitiva _____ *59*
Figura 68 - Tavola tecnica supporto ala posteriore _____ *63*
Figura 69 - Ingrandimento 1 - Tavola tecnica supporto ala posteriore _____ *64*
Figura 70 - Ingrandimento 2 - Tavola tecnica supporto ala posteriore _____ *64*

1. Introduzione

Tale Tesi si concentra interamente sullo sviluppo, sulla progettazione e sull'ottimizzazione topologica dei supporti di sostegno dell'ala posteriore dell'attuale vettura di Formula SAE sviluppata e gestita dal Polimarche Racing Team.

Il Polimarche Racing Team costituisce il team di Formula SAE dell'Università Politecnica delle Marche.

Lo scopo di questa Tesi è quello di progettare e ottimizzare i due supporti, ancorati al telaio, che hanno la funzione di sorreggere l'ala posteriore della monoposto in accordo con le specifiche richieste dal Polimarche Racing Team.

La necessità di riprogettare tali supporti è dovuta al cambio del Regolamento imposto dalla Formula SAE riguardante gli ingombri della vettura.

In questa Tesi si è anche studiato il comportamento di tali supporti a seguito dell'applicazione di forze che vanno a simulare le sollecitazioni a cui sono sottoposti nelle reali condizioni di esercizio della vettura monoposto. Si è quindi cercato di trovare la miglior geometria possibile per tali supporti al fine di ridurne il più possibile la massa, limitarne lo stato tensionale, abbassandone il valore della tensione equivalente nei punti maggiormente sollecitati, e ridurne la deformazione in termini di freccia massima. Questi tre parametri (massa, tensione equivalente e freccia massima) sono stati definiti e valutati in accordo con le esigenze del Polimarche Racing Team e con il Regolamento che la Formula SAE impone e che tali vetture devono rispettare.

Tale Tesi si propone anche l'obiettivo di rendere il più possibile coerenti e realistiche le simulazioni FEM svolte al fine di approssimare il meno possibile il caso reale dalla configurazione analizzata.

L'intera Tesi è dunque strutturata nel seguente modo: si crea una configurazione basata sui dati empirici ricavati dalle analisi sulle precedenti configurazioni, si verificano diversi parametri fra i quali quelli sopra citati, valutandone l'andamento e il significato, e si procede formulando commenti, valutazioni e deduzioni circa le nuove criticità insorte e quelle invece risolte.

Nel formulare considerazioni, ipotesi ed effettive soluzioni ai diversi problemi insorti in fase di progettazione, l'autore di tale Tesi, seppur estraneo al Polimarche Racing Team, si è più volte confrontato con diversi membri del Team al fine di avere una visione più aperta sulla situazione in analisi e al fine di acquisire il più possibile il know-how che da anni contraddistingue l'operato del Polimarche Racing Team. Si è cercato di collaborare al fine di trovare soluzioni concrete ed applicabili alla vettura che non si scontrassero con le esigenze e i relativi vincoli a cui è sottoposta la vettura stessa.

2. Valutazioni preliminari

2.1 Richieste da parte del Team

Come primo passo, prima di procedere al disegno in 3D dei supporti (elementi in arancione in *Figura 1*), si è, prima di tutto, cercato di capire quali fossero i requisiti ai quali tali supporti dovessero sottostare.

Le richieste da parte del Team consistevano nel riprogettare interamente i supporti dell'ala posteriore in vista del nuovo Regolamento che prevede un abbassamento della stessa di 10cm mantenendo tuttavia inalterati i punti di ancoraggio di tali supporti al telaio.

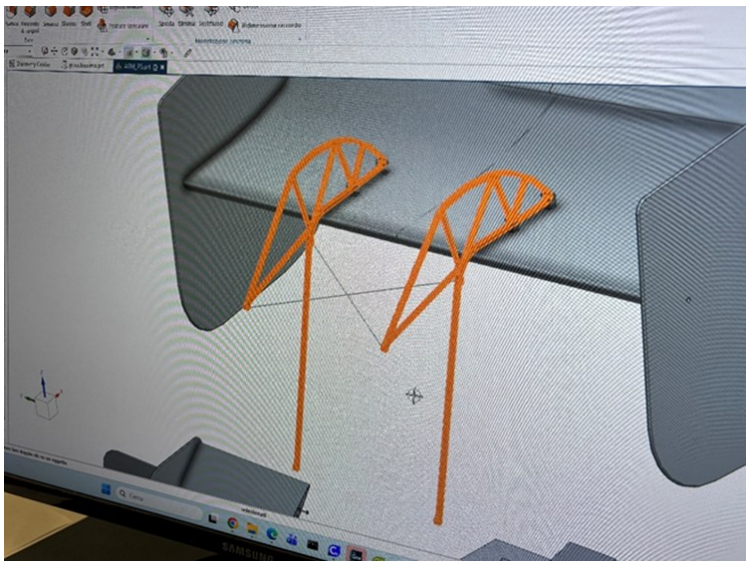


Figura 1 - Assieme supporti, tiranti e ala posteriore

2.2 Valutazione dei parametri di progetto

Basandosi su report fornito dal Team riguardante lo sviluppo del supporto precedente (progettato in ottica del vecchio Regolamento) si sono ricavate informazioni relative a:

- massa del pezzo precedentemente sviluppato;

- dimensioni e ingombri del pezzo precedentemente sviluppato;
- forze a cui deve essere sottoposto il singolo supporto simulando le effettive condizioni di esercizio della vettura;
- quali geometrie fossero immodificabili a causa di altre parti della vettura già progettate (ad esempio: ingombro ala posteriore, attacchi di collegamento con ala posteriore e attacchi di collegamento di tali supporti a telaio);
- materiale con cui il pezzo deve essere realizzato (Alluminio 6061);
- processo di realizzazione dello stesso.

2.3 Valutazione delle forze e dei carichi a cui sono sottoposti i supporti

Le principali sollecitazioni a cui sono sottoposti i due supporti consistono nel drag e nella downforce generati dall'ala posteriore, dal peso della stessa e da eventuali forze d'inerzia che tenderebbero a far traslare orizzontalmente l'ala posteriore in curva.

Per stimare i valori di tali sollecitazioni ci si è basati sul report relativo allo sviluppo del pezzo precedente in cui sono contenuti i dati relativi a diverse simulazioni aerodinamiche svolte sull'ala posteriore in galleria del vento simulando diverse inclinazioni della stessa a diverse velocità della vettura. Tali informazioni vengono sintetizzate in *Figura 2*.

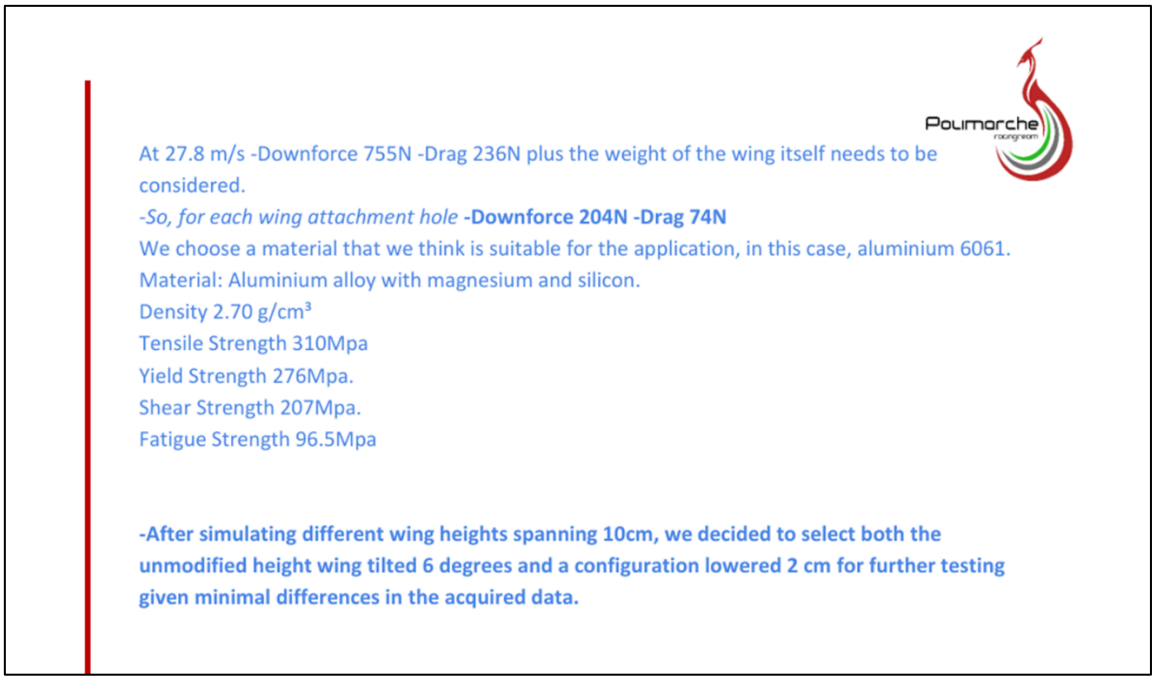


Figura 2 - Estratto preso dal report sullo sviluppo del pezzo precedente fornito dal Team contenente informazioni riguardanti il materiale usato per la realizzazione del pezzo e i carichi stimati.

3. Disegno del pezzo in SolidEdge

Per la realizzazione del pezzo si è scelto di utilizzare SolidEdge come software di modellazione 3D.

Come base dalla quale partire per iniziare a modellare la geometria del pezzo si è usata la tavola tecnica (*Figura* 3) contenuta nel report relativo allo sviluppo del pezzo precedente tenendo tuttavia conto dell'abbassamento richiesto dal nuovo Regolamento.

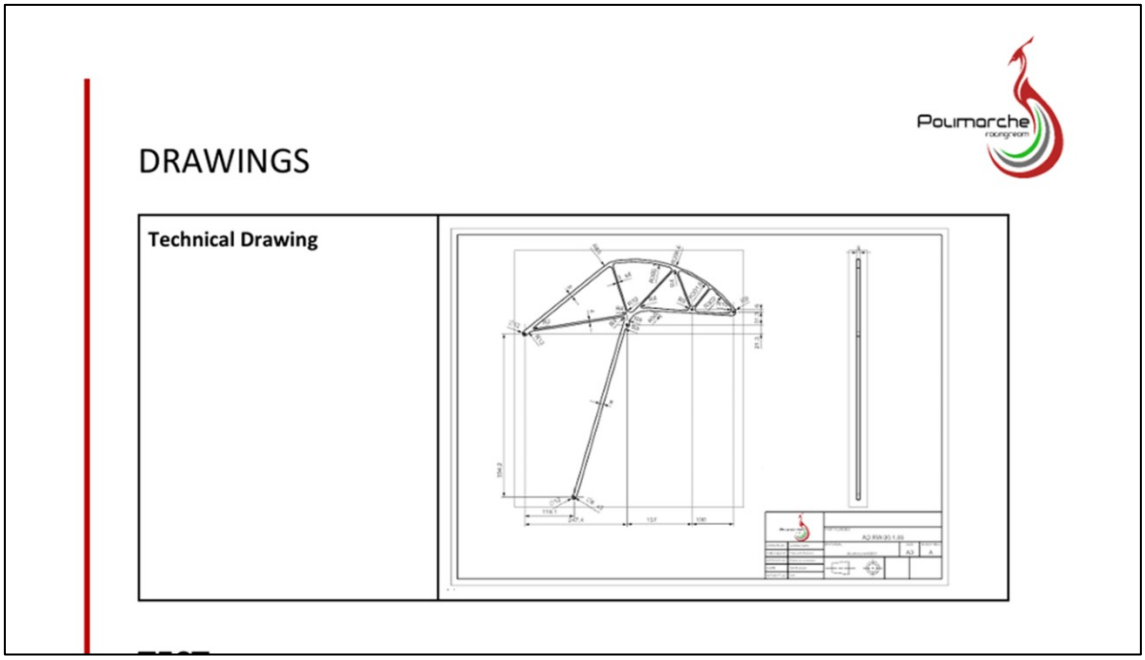


Figura 3 - Tavola tecnica del pezzo precedente estratta dal report fornito dal Team

Partendo dalla tavola mostrata in *Figura 3*, è stato modellato il pezzo a meno degli alleggerimenti necessari a contenere la massa nonché l'entità delle forze d'inerzia generate in curva e ad essa correlate.

Lo spessore è stato mantenuto invariato rispetto al pezzo precedente per via della decisione di mantenere invariate le dimensioni dei punti di ancoraggio al telaio e all'ala.

Come si può notare dalla *Figura 4* (sotto) la geometria della parte superiore è stata mantenuta piuttosto invariata.

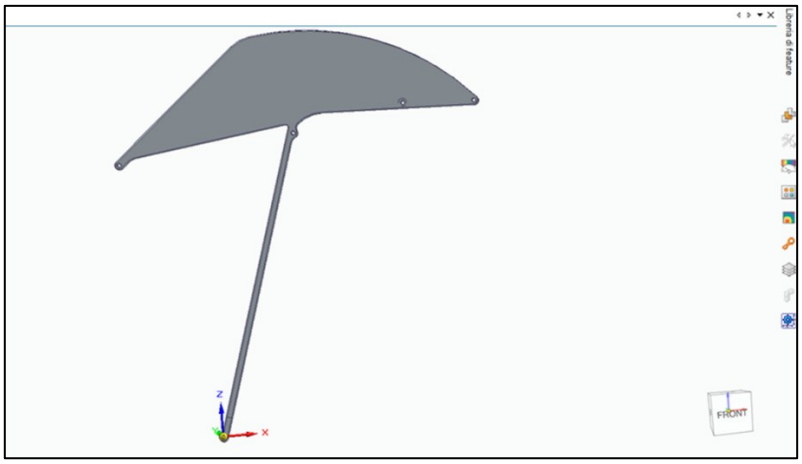


Figura 4 - Geometria di partenza

Come si può notare dalla *Figura 5*, *Figura 6* e *Figura 7* (sottostanti) si è scelto di definire tutte le quote affinché il pezzo risultasse, in SolidEdge, completamente vincolato, così da ottenere una geometria più "robusta" in caso di lievi future variazioni delle varie quote. Vincolando completamente il pezzo si riesce infatti a modificare in modo significativo la geometria, agendo sulle quote inserite, pur rimanendo all'interno di una famiglia di pezzi che mantenga inalterata la posizione dei fori. Solo in tal modo si possono modificare le diverse quote che regolano la geometria del pezzo indipendentemente dalla posizione relativa dei fori di ancoraggio al telaio e dei fori per i supporti dell'ala posteriore.

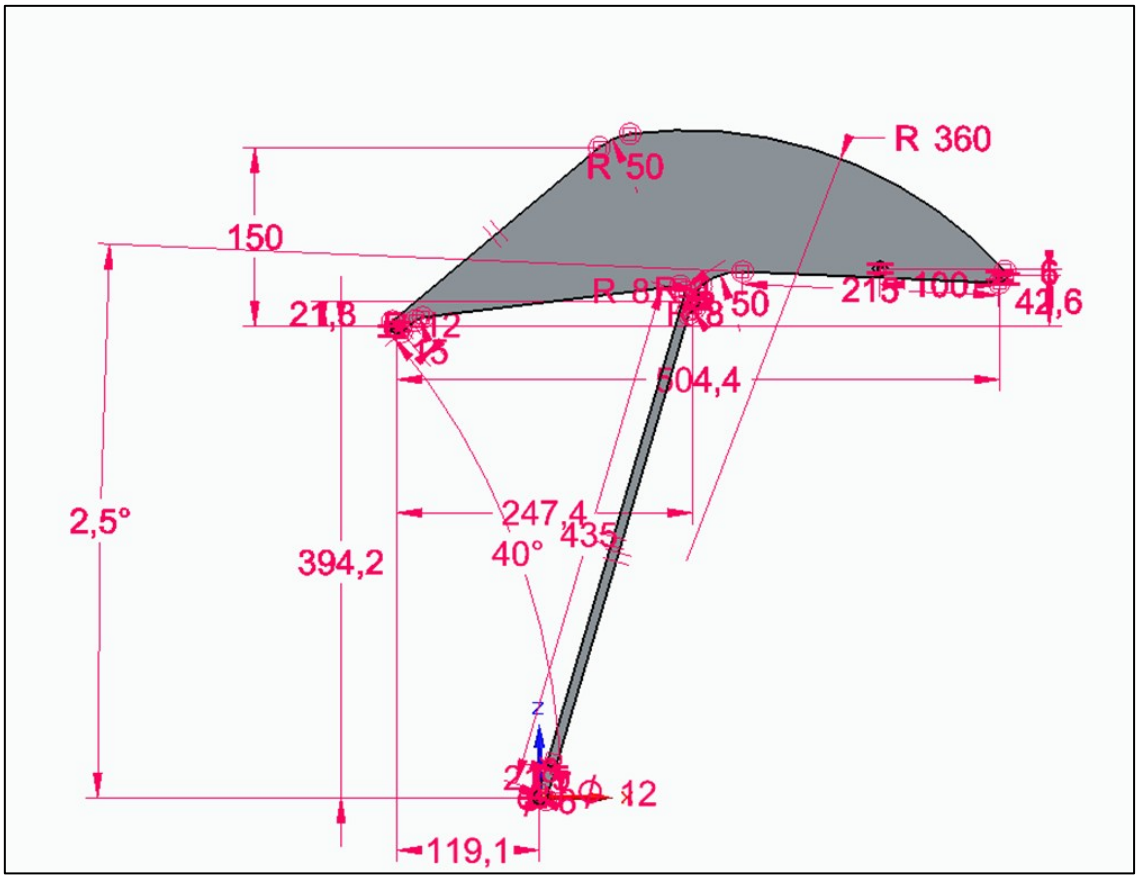


Figura 5 - Quotatura complessiva

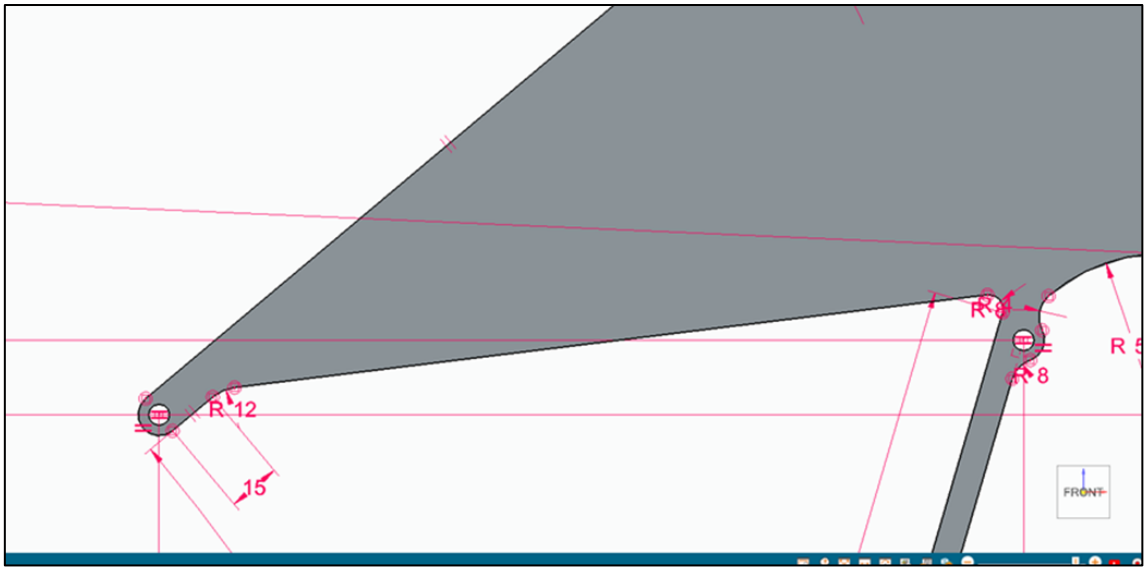


Figura 6 - Zoom 1 quotatura complessiva

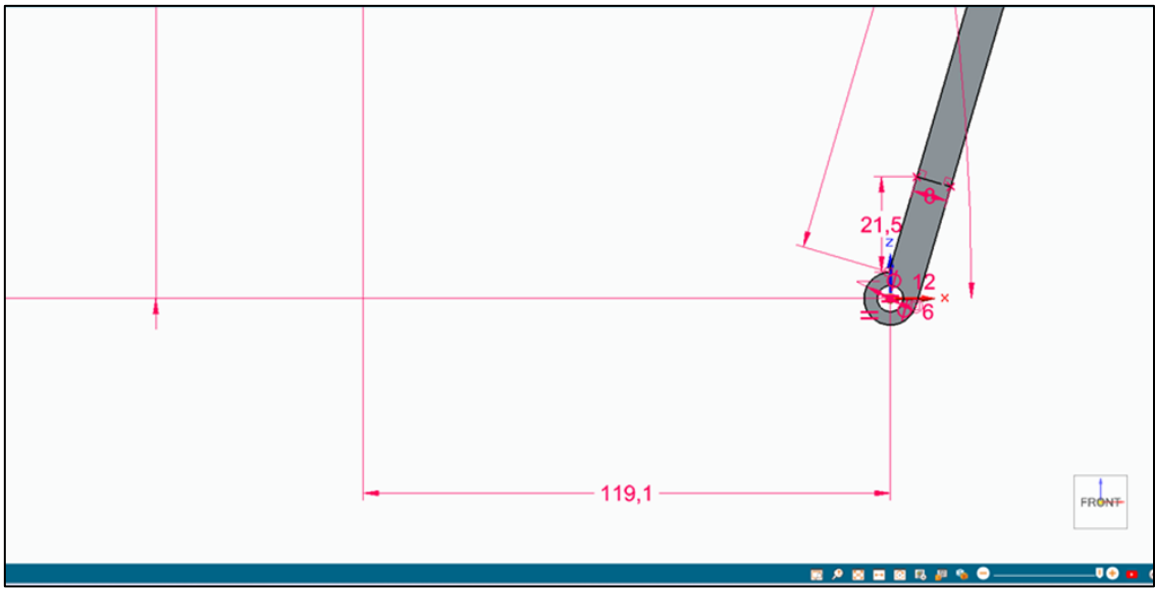


Figura 7 - Zoom 2 quotatura complessiva

4. Settings simulazioni FEM

Per effettuare le simulazioni FEM (acronimo di "Finite Element Method") si è scelto di utilizzare, come software, SolidEdge in quanto, grazie a tale scelta, si aveva, in primis, la geometria già importata nel formato nativo *(.par* o *.asm*) e, in secondo luogo, si aveva la possibilità di modificare in tempo reale la geometria per poi rieseguire una nuova simulazione senza ricaricare, ad ogni simulazione, un nuovo modello e senza reimpostare, ad ogni simulazione, i medesimi vincoli.

Prima di procedere con le varie simulazioni, l'autore di tale Tesi si è assicurato, attraverso un confronto con il Polimarche Racing Team, che il pezzo soddisfacesse, al netto della massa, le specifiche della vettura e i requisiti imposti dal Regolamento.

In questo capitolo l'intento dell'autore è quello di analizzare in primo luogo il comportamento del pezzo privo di alleggerimenti nella parte superiore in termini di freccia (spostamento dei vari punti del supporto) e di tensioni equivalenti calcolate attraverso il criterio di Von Mises.

Si procederà, in secondo luogo, ad applicare correttamente tutti quei vincoli necessari a rendere tale simulazione FEM il più coerente possibile con l'effettiva condizione di utilizzo reale della vettura.

Nell'ultima parte del capitolo, invece, l'intento dell'autore consiste nel modellare una geometria dell'ala posteriore fittizia in maniera molto schematica con l'unico fine di rendere la simulazione quanto più realistica possibile.

4.1 Definizione dei vincoli

I vincoli da inserire nel programma per avere una simulazione quanto più realistica possibile, sono tre: i due vincoli di fissaggio al telaio e il tirante, anch'esso collegato al telaio della vettura. Successivamente verranno inseriti anche i vincoli di collegamento tra i due supporti e l'ala posteriore simulata.

Per realizzare correttamente, in SolidEdge, i due vincoli sopra citati si è inserito il vincolo di cerniera (denominato "Cilindrico") inserendo anche la spunta (*Figura* 8) vincolante

l’aumento radiale, la rotazione della superficie interna del foro e lo scorrimento lungo l’asse di rotazione. I primi due sotto-vincoli, secondo l’autore della Tesi, sono giustificati dal fatto che tale componente verrà assemblato al telaio attraverso un collegamento bullonato serrato con un’opportuna coppia di serraggio che limita l’aumento radiale e la rotazione nell’intorno del foro.

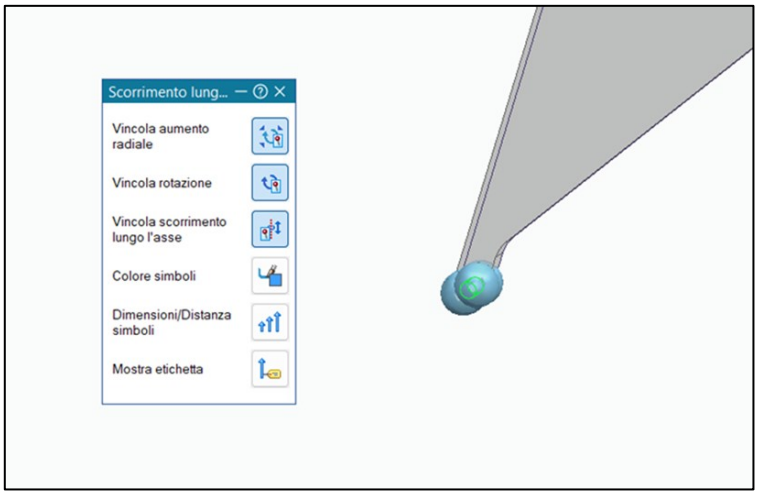


Figura 8 - Sotto-vincoli inseriti per simulare il vincolo di cerniera

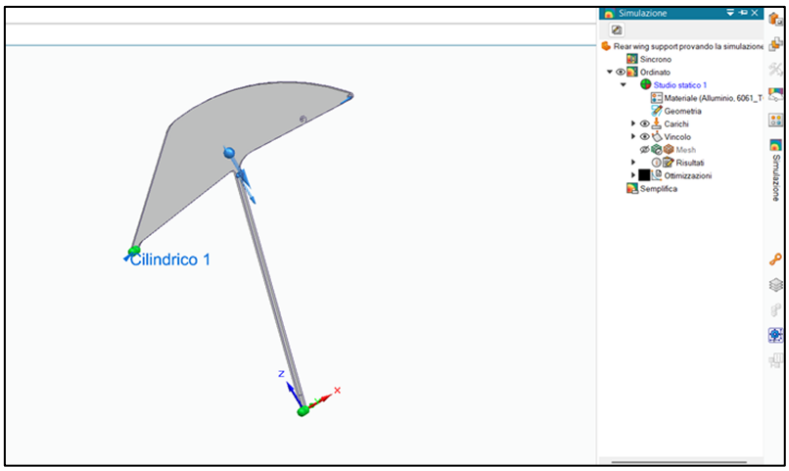


Figura 9 - Vincoli di cerniera inseriti

Per quanto riguarda il vincolo imposto dal tirante, si è ritenuto opportuno non approssimare tale vincolo con un vincolo di cerniera seppur con più gradi di libertà rispetto ai precedenti (inserendo meno sotto-vincoli). Si è scelto quindi di utilizzare il comando “Vincolo definito dall’utente” andando a vincolare la sola direzione in cui

agisce il tirante. Tale tipologia di vincolo si basa sulla definizione di un nuovo sistema di riferimento (terna di vettori ortogonali). Dopo aver definito tale terna, si è imposto al programma di limitare il movimento di una specifica superficie, (in questo caso della superficie interna del foro di ancoraggio del tirante), rimuovendone i tre gradi di libertà relativi alla rotazione (di tale superficie) attorno tali assi (rotazioni che non possono essere vincolate singolarmente) e rimuovendo il grado di libertà relativo alla traslazione di tale superficie lungo l'asse del tirante. Sono stati lasciati solo i due gradi di libertà relativi alla traslazione lungo gli altri due assi ortogonali. Questa è ovviamente un'approssimazione che può essere ritenuta valida in quanto, in esercizio, i tiranti si muoveranno di pochi gradi quindi si può ritenere che la direzione del vincolo, coincidente con quella del tirante, rimanga pressoché parallela a quella inserita, avendo però la possibilità di "scostarsi" da essa (motivo per cui sono stati lasciati i gradi di libertà relativi alla traslazione lungo gli altri due assi).

Per definire tale vincolo si ha dunque la necessità di definire una nuova terna di riferimento che contenga una direzione coincidente con quella del tirante.

Per completezza, va sottolineato che ciascun tirante reagisce solo a trazione e non a compressione, tuttavia, poiché i supporti sono due e i tiranti disposti in maniera incrociata, si può ritenere l'azione di un tirante valida per reagire alle forze di traslazione orizzontale dell'ala posteriore (ad esempio quando la vettura affronta una curva) in entrambe le direzioni.

Si passa ora alla definizione del nuovo sistema di riferimento, definito a partire da quello coincidente con quello utilizzato per la modellazione 3D del pezzo, ruotando i nuovi assi di tre angoli attorno tali direzioni. L'intento è dunque quello di trovare il valore dei tre angoli di cui è inclinato il tirante rispetto al sistema di riferimento di partenza, visti dai tre piani ortogonali. L'angolo richiesto dal software, come ad esempio l'angolo X° (*Figura 11)*, rappresenta l'angolo di cui si deve ruotare, attorno all'asse X, il vecchio sistema di riferimento per ottenere quello nuovo.

Si ricavano dunque i valori dei tre angoli (*Figura 11*) prendendo la distanza nelle tre direzioni spaziali tra il punto di fissaggio del tirante al supporto (quello a sinistra rispetto al pilota) e il punto di fissaggio del medesimo tirante al telaio (*Figura 10*).

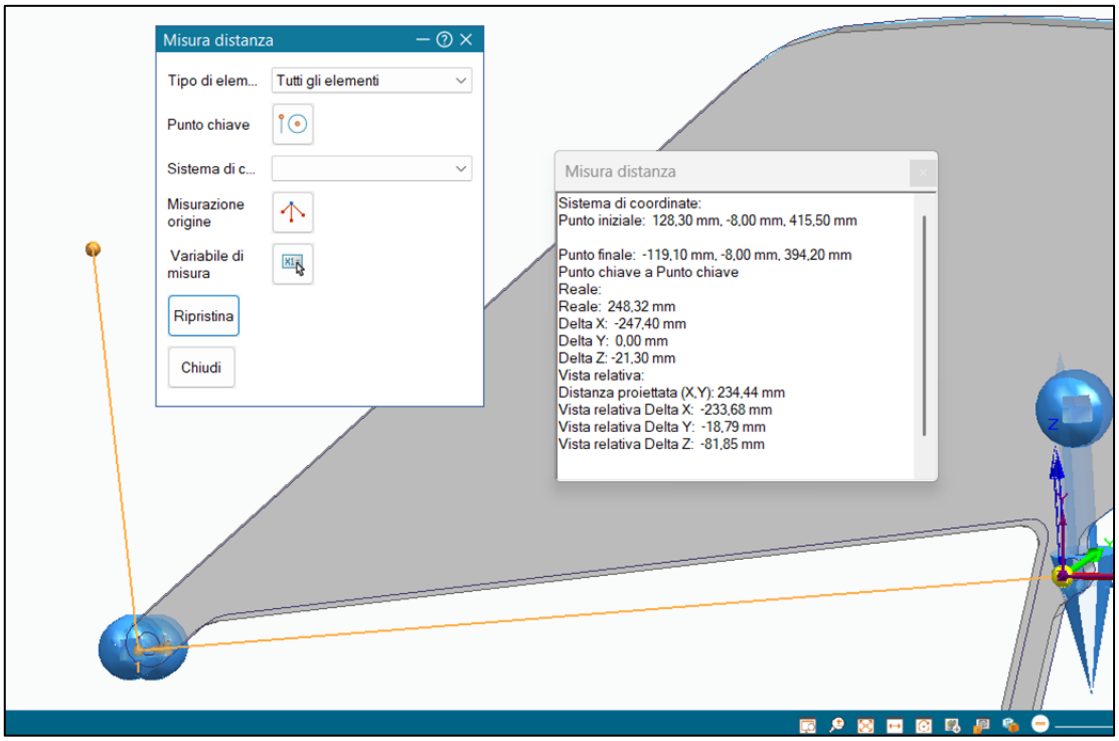


Figura 10 - Distanza tra punto di fissaggio del tirante al supporto e il punto di fissaggio di tale tirante al telaio

PIANO Y-Z:

$\Delta Z = -21{,}3mm$

$\Delta Y = 320mm$

$$X° = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta Z}{\Delta Y}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-21{,}3}{320}\right) = -3{,}8°$$

PIANO X-Y:

$\Delta X = -247{,}4mm$

$\Delta Y = 320mm$

$$Z° = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{320}{-247{,}4}\right) = -52{,}3°$$

PIANO X-Z:

$\Delta X = -247{,}4mm$

$\Delta Z = 21{,}3mm$

$$Y° = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta Z}{\Delta X}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-21{,}3}{247{,}4}\right) = -4{,}9°$$

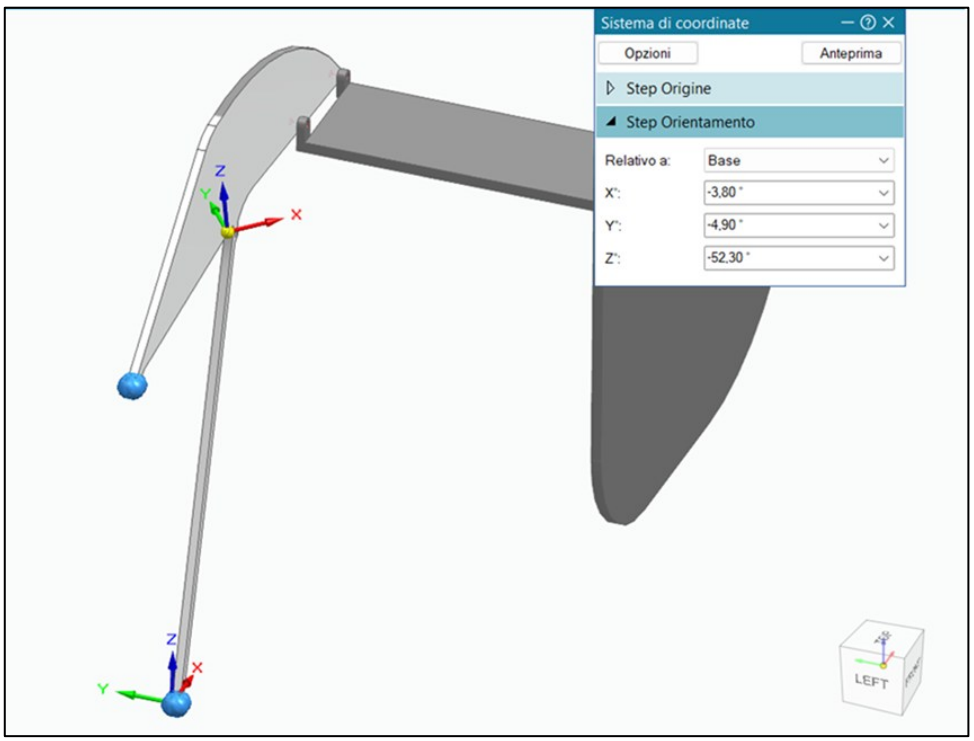


Figura 11 - Angoli impostati per definire il nuovo sistema di riferimento

Come si può notare dalla *Figura 11* e dalla *Figura 12*, oltre a costruire tale sistema di riferimento, si è proceduto a modellare parte dell'ala posteriore (con una geometria semplificata) per fare i primi tentativi su un modello piuttosto semplice. I ragionamenti necessari alla creazione e all'inserimento, all'interno della simulazione, dell'ala posteriore fittizia verranno illustrati successivamente in maniera più approfondita.

Da *Figura 12,* si può vedere chiaramente il nuovo sistema di riferimento centrato nel punto dato dall'intersezione della retta giacente sull'asse del foro e il piano contenente la

parte “esterna” del supporto. Di tale sistema di riferimento, servirà solo ed esclusivamente la direzione X, in quanto sarà proprio quella la direzione di azione del vincolo esercitato dal tirante.

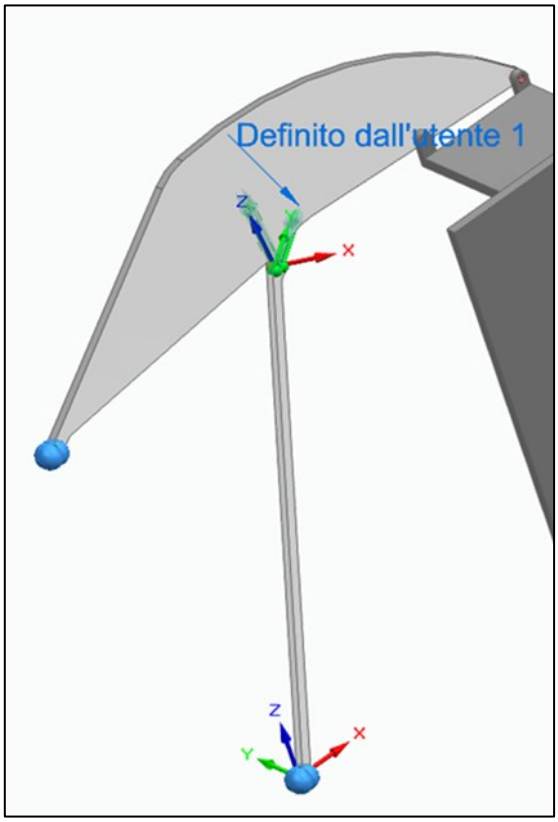


Figura 12 - Vincolo "Definito dall'utente" necessario a simulare la presenza del tirante

Come si può chiaramente vedere dalla *Figura 12*, il vincolo esercitato dal tirante è stato simulato con un vincolo riguardante la superficie interna del foro alla quale non è concesso di traslare lungo la direzione del tirante (direzione X che in *Figura 12* è rappresentata dalla freccia rossa ortogonale a quelle in verde più scuro). Sono dunque ammesse le traslazioni lungo le altre due direzioni in verde più scuro (frecce grandi in *Figura 12*) mentre sono bloccate le tre rotazioni, come precedentemente accennato.

Poiché si sta analizzando il supporto sinistro (rispetto alla posizione del pilota), potrebbe sembrare un assurdo il fatto che, per come è diretta la forza (per Regolamento sarà una pressione), il tirante lavori a compressione, in quanto tale elemento lavora sempre e solo a trazione. Tuttavia, si può assumere, in questo caso, che esso lavori a compressione in quanto tale vincolo è esercitato dal supporto destro (rispetto al pilota) il cui tirante,

lavorando a trazione, impedisce al tirante di sinistra di deformarsi a compressione. Riesco dunque ad avere una simulazione di una situazione molto prossima a quella reale in quanto i due supporti sono identici e la forza stimata potrebbe tranquillamente variare mantenendo la stessa direzione ma verso opposto, facendo quindi lavorare tale tirante a trazione. In sostanza si stanno ipotizzando medesime reazioni vincolari da parte del tirante verso il supporto, sia che esso lavori a trazione che a compressione.

Tale configurazione verrà successivamente cambiata nel corso della Tesi per evidenziare altri aspetti del problema e per simulare configurazioni diverse da quella attuale.

4.2 Parziali simulazioni FEM

Nell'intento di controllare la correttezza dei vincoli inseriti valutando la coerenza dello stato tensionale e deformativo ottenuto, si è deciso di procedere con una prima simulazione applicando un carico laterale pari a 200N in punta (*Figura 13*). Il verso e il modulo di tale forza non sono corretti e varieranno successivamente nella simulazione vera e propria.

Come si può vedere dalla *Figura 14* si è cercato di osservare che le deformazioni ottenute fossero coerenti con i vincoli applicati.

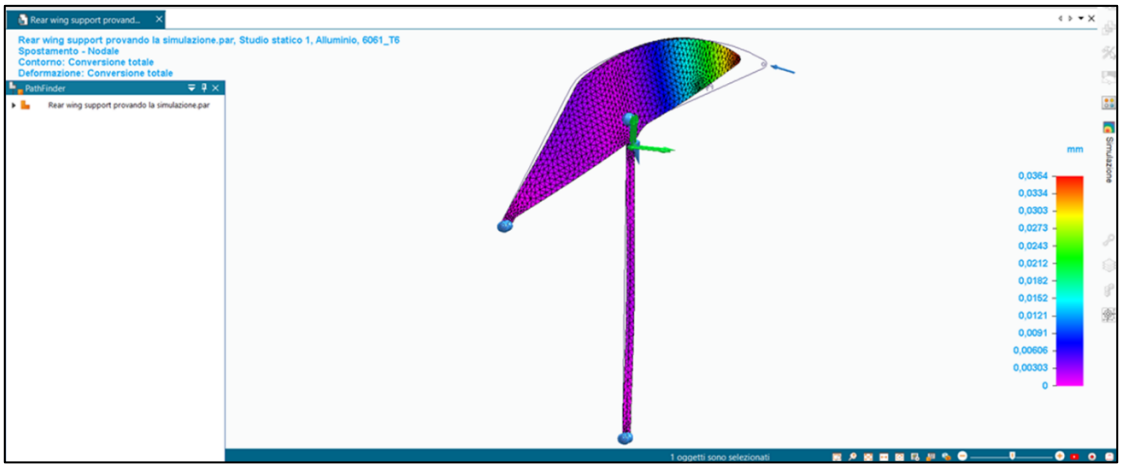


Figura 13 - Vista 1, risultato prime simulazioni (Deformazione)

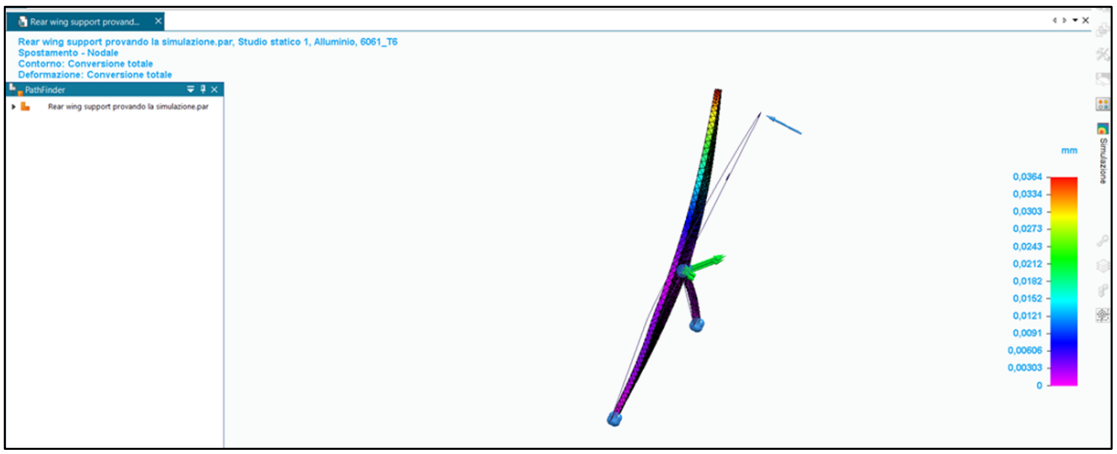


Figura 14 - Vista 2, risultato prime simulazioni (Deformazione)

Sia in *Figura 13* che in *Figura 14* la visualizzazione della deformazione del pezzo non è stata impostata in modalità "Effettivo" bensì in modalità "Percentuale" al fine di rendere maggiormente visibile la deformazione. La deformazione reale "effettiva", infatti, sarebbe stata quasi impercettibile da visualizzare a prima vista. In tale configurazione, le deformazioni del pezzo sarebbero molto piccole, ma si deve, tuttavia, tener conto del fatto che non sono ancora presenti gli alleggerimenti sulla parte superiore. La massa dell'intero supporto risulta dunque molto importante: oltre 1kg (*Figura 15*).

In ogni caso, le deformazioni del pezzo visualizzate in *Figura 13* e in *Figura 14* risultano coerenti con i vincoli precedentemente applicati.

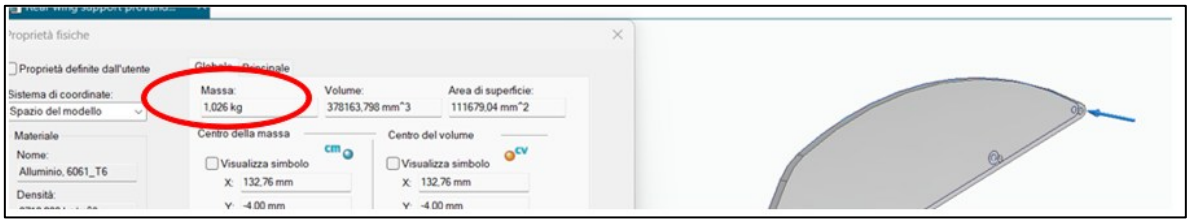


Figura 15 - Massa del singolo supporto privo di alleggerimenti

4.3 Creazione ala posteriore fittizia

Al fine di rendere più realistica la simulazione, si è deciso di creare un'ala posteriore fittizia in quanto, da specifiche di Regolamento, si deve simulare l'azione di una pressione data dall'azione della forza laterale (stimata attraverso simulazioni di diversa natura eseguite dal Team) su un'area quadrata di lato pari a 15cm (l'area per Regolamento deve essere pari a 225cm^2). Tale forza, applicata all'endplate dell'ala posteriore, genererà un momento flettente sui supporti oggetto della simulazione. La situazione è schematizzata in *Figura 16*, che presenta un estratto del report sullo sviluppo del pezzo precedente fornitomi dal Team. In tale figura si vede chiaramente l'applicazione di tale pressione (frecce rosse) in una determinata posizione dell'endplate (successivamente seguiranno considerazioni sul fatto che tale configurazione risulta essere la più sfavorevole possibile).

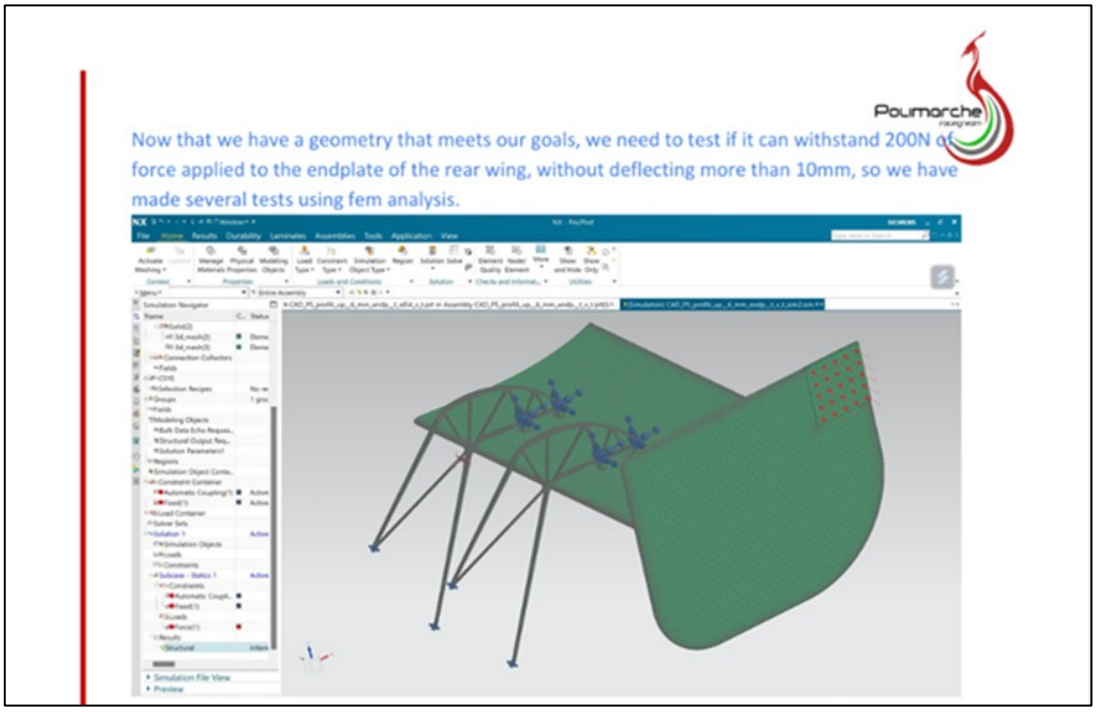


Figura 16 - Estratto del report sullo sviluppo dei supporti precedenti fornito dal Team raffigurante la pressione laterale da applicare alla simulazione per Regolamento

Si è proceduto dunque con il disegno schematico dell'ala posteriore con delle dimensioni prossime a quelle reali (*Figura 17*). Non si ha la necessità che le dimensioni siano

corrispondenti al vero, in quanto tale Tesi è incentrata esclusivamente nell'analisi FEM dei due supporti.

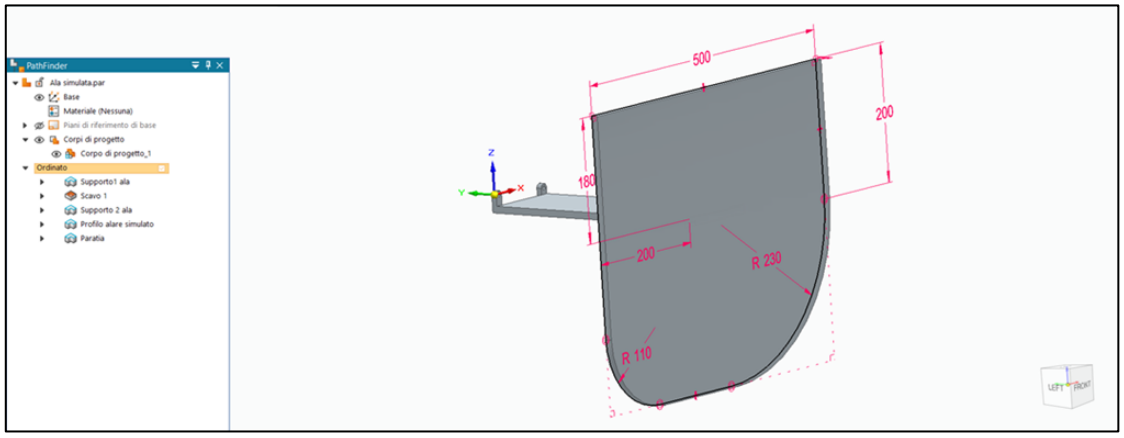


Figura 17 - Dimensioni endplate simili a quelle reali

Si è proceduto dunque al disegno dell'ala completa (*Figura 18*).

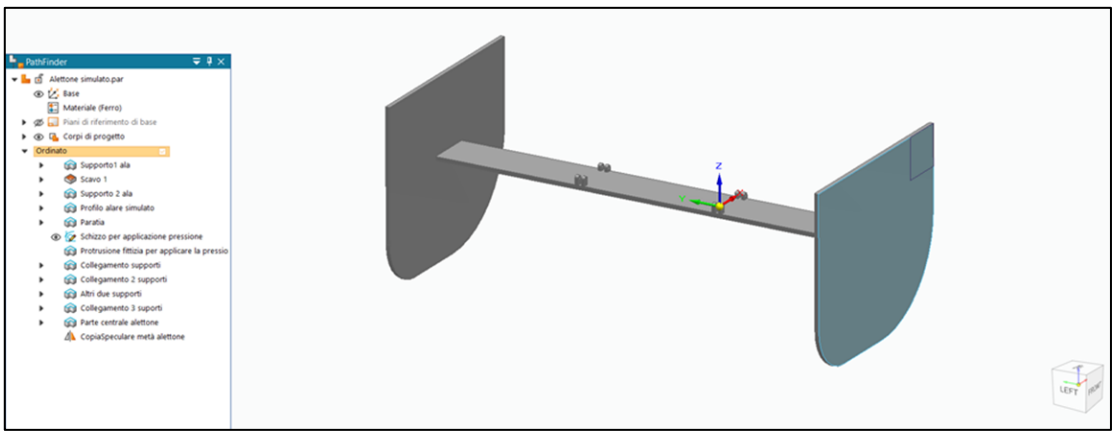


Figura 18 - Ala posteriore completa disegnata in maniera schematica ai fini della simulazione.

Il carico di pressione, necessario per Regolamento per verificare la resistenza dei due supporti, deve necessariamente essere applicato all'endplate. Si è scelto di applicarlo in un'area quadrata adiacente al vertice in alto a destra in quanto, tenendo conto delle dimensioni reali dell'endplate, solo in tal posizione viene generato un momento flettente massimo (braccio della forza massimo) rispetto ai supporti in analisi (oltre che una

reazione vincolare orizzontale indipendente, in questo caso, dalla posizione sull'endplate).

Nel file *.par* mostrato in *Figura 18* si è definito come input al software di simulazione il materiale di cui dovesse essere costituita l'ala. Ciò potrebbe sembrare un controsenso se si pensa al fatto che l'oggetto di tale analisi FEM sono solo ed esclusivamente i due supporti. Bisogna tuttavia tenere in considerazione il fatto che, in SolidEdge, se si vuole eseguire una simulazione su dei componenti applicando dei carichi su altri componenti diversi da quelli che si vogliono analizzare, è necessario includere anche i secondi nella simulazione. Non presentando SolidEdge la possibilità di rendere perfettamente rigidi solo alcuni dei componenti all'interno dell'assieme oggetto della simulazione, si è preferito assegnare a tali un materiale quanto più rigido possibile.

Ai fini di tale simulazione si vuole che, applicando le forze previste, l'ala posteriore si deformi il meno possibile, scaricando il maggior quantitativo possibile di forza sui supporti. Per tale motivo, non essendo presente l'opzione per rendere l'ala rigida, si è scelto di utilizzare un materiale con modulo di Young più alto possibile. Tra tutti i materiali proposti dal programma si è scelto il Tungsteno, il quale ha modulo di elasticità pari a 406 GPa, di gran lunga superiore rispetto a quello dell'Alluminio 6061 (avente modulo di Young pari a 69GPa).

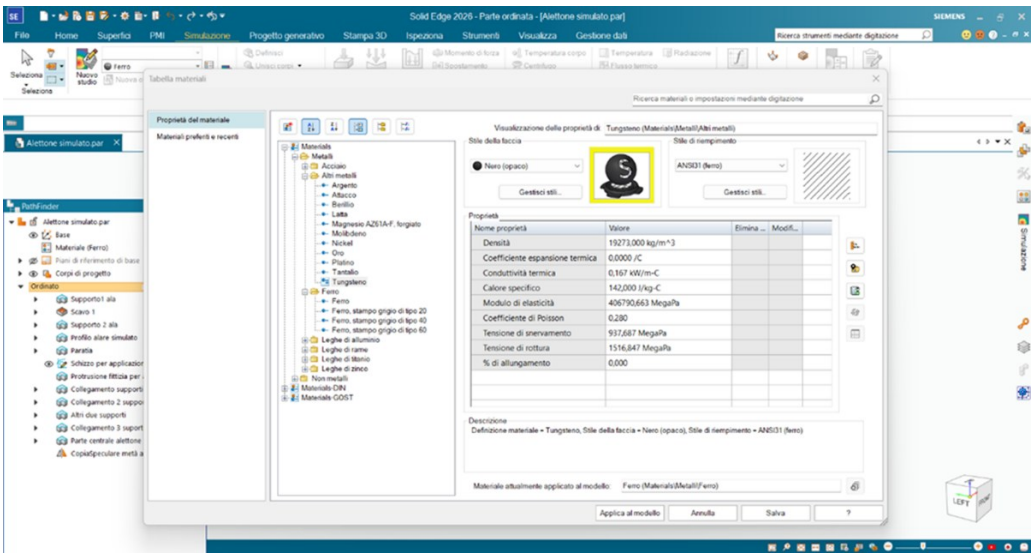


Figura 19 - Caratteristiche del materiale usato per simulare l'ala posteriore nell'assieme.

4.4 Creazione assieme completo

Una volta creata una geometria dell'ala coerente, si è proceduto a creare un file d'assieme (di estensione *.asm*) in cui si sono inseriti sia i supporti, sia l'ala fittizia (*Figura 20*) ciascuno con i relativi materiale.

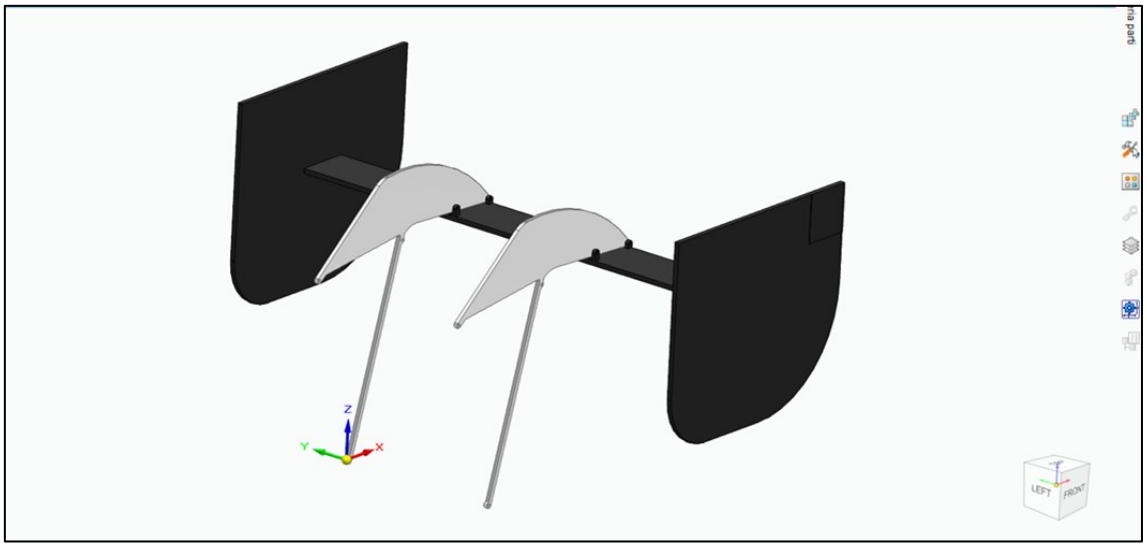


Figura 20 - Assieme completo pronto per la simulazione

Prima di procedere alla simulazione FEM vera e propria, è stato necessario dare in input al software tutte le relazioni esistenti tra i vari corpi. A tal proposito si è utilizzato la funzione "Connettori" scegliendo, come relazione che legasse i due supporti all'ala posteriore, il connettore di tipo "Bullone", atto appunto a simulare la presenza reale di collegamenti bullonati che assicurano l'ala ai supporti.

5. Simulazione FEM dell'assieme

Per eseguire la simulazione FEM dell'assieme, sono stati riapplicati gli stessi vincoli di cerniera precedentemente analizzati e giustificati. Il vincolo di tirante è stato imposto, in tale configurazione finale, solo nel supporto di destra rispetto al pilota, in quanto si è scelto di eseguire la simulazione ipotizzando una forza laterale applicata alla parte sinistra dell'ala posteriore. In tale configurazione, se si considera il caso reale, tra i due tiranti, lavorerebbe a trazione solo ed esclusivamente il tirante relativo al supporto alla destra del pilota mentre il tirante dell'altro supporto sarebbe sottoposto a compressione quindi non lavorerebbe. L'azione del tirante del supporto di destra, tuttavia, influenza anche lo stato tensionale, e quindi deformativo, dell'altro supporto in quanto produce reazioni vincolari che si scaricano a catena anche nell'altro supporto passando attraverso l'ala posteriore (assunta ai fine di tale simulazione come corpo quasi-rigido).

Si è creato dunque un nuovo studio statico ("Studio Statico 1") in cui sono stati selezionati tutti e tre i componenti inseriti nell'assieme.

Per eseguire la simulazione si è scelto di utilizzare una mesh della geometria nello studio attivo formata da elementi tetraedrici. Per quanto riguarda la dimensione di tali elementi si è scelto, al fine di avere dei tempi di risoluzione e analisi ragionevoli, di lasciar decidere in automatico al programma la dimensione degli elementi impostando tuttavia il cursore su una via di mezzo tra eccessivamente "ruvida" ed eccessivamente "fine". La mesh creata con tali impostazioni presenta 231754 nodi e 131908 elementi (tetraedrici).

Per ragioni di completezza, ai fini della stesura di tale Tesi, si chiarisce che le simulazioni che verranno analizzate, sono state eseguite facendo coincidere la temperatura degli elementi in analisi con quella ambiente (pari a circa 21,1°C) come preimpostato di default da SolidEdge.

Si definiscono ora tutti i carichi strutturali a cui è sottoposto l'assieme riprendendo i dati forniti dal Polimarche Racing Team. Come si può notare dalla *Figura 21*, per ogni foro di attacco dell'ala, viene applicata una forza verticale la cui direzione è parallela all'asse Z, verso rivolto verso il basso e modulo pari a 204N.

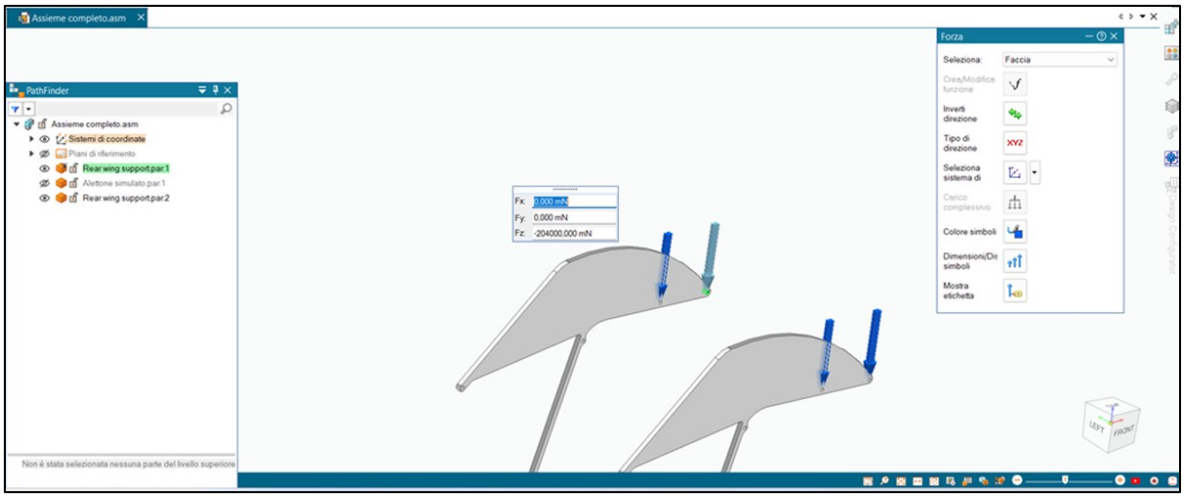


Figura 21 - Carichi verticali applicati ai due supporti

A seguito dell'applicazione delle forze verticali si è passati all'applicazione di quelle orizzontali dovute al drag. Si è preferito applicare tali forze in maniera separata rispetto a quelle orizzontali per motivi di chiarezza e semplicità. Si sarebbe infatti potuto inserire tali forze direttamente come componenti, dirette lungo l'asse X, delle quattro forze verticali precedentemente inserite. Tali forze orizzontali dovute al drag (*Figura 22*) hanno la direzione parallela all'asse X, verso coerente con il verso positivo dell'asse X (nel sistema di riferimento adottato nel disegno del componente) e modulo pari a 74N.

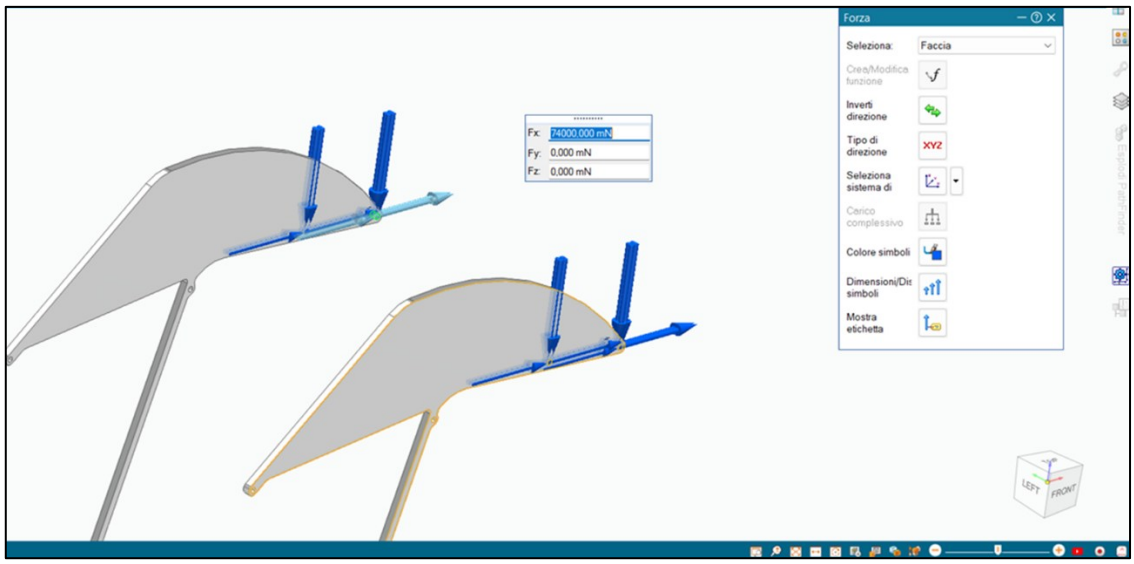


Figura 22 - Applicazione forze orizzontali dovute al drag

Ci si è soffermati poi sull'applicazione della forza laterale di 200N che, per Regolamento, deve essere applicata su una sezione quadrata di lati 15cm x 15cm. Si è deciso dunque di usare il comando "Pressione" da applicare nell'estremo in alto a destra dell'endplate dell'ala per il motivo precedentemente spiegato (*Figura 23*). Per quanto riguarda il valore di tale pressione invece:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{200}{15 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^{-2}} = 0{,}8889 \cdot 10^{4}\ Pa = 8{,}889\ kPa$$

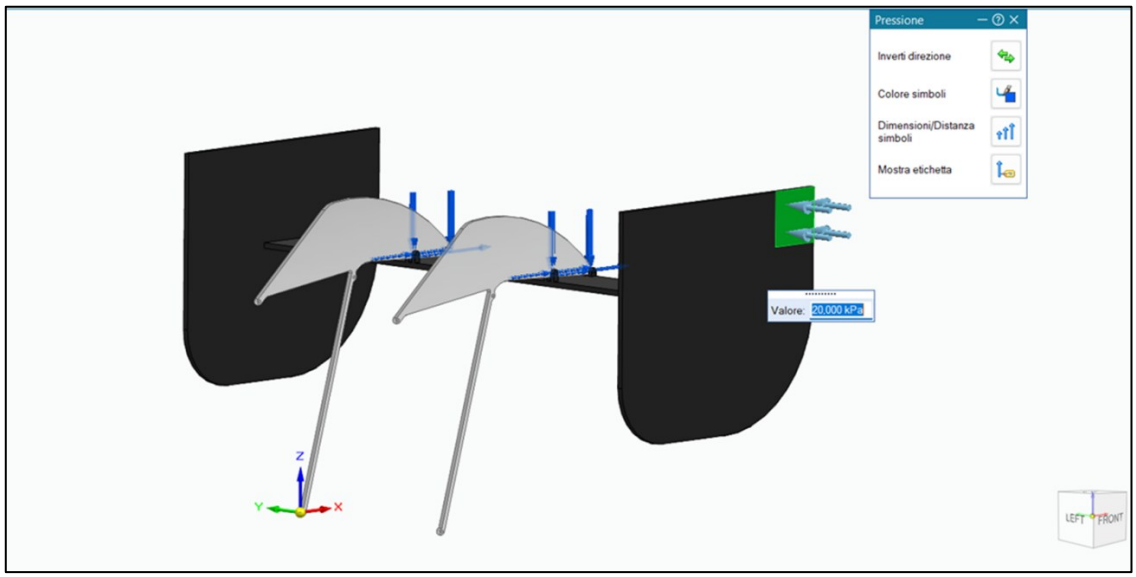


Figura 23 - Applicazione della pressione laterale

Sono stati successivamente definiti i vincoli; sono stati inseriti per primi i quattro vincoli di cerniera nei relativi collegamenti a telaio usando il vincolo "Cilindrico", applicato alla superficie interna, vincolandone la rotazione, l'aumento radiale e lo scorrimento lungo l'asse. Come precedentemente spiegato, si sono usate tali opzioni di vincolo (*Figura 24*) in quanto tali supporti verranno collegati al telaio attraverso un collegamento bullonato che vincola tali gradi di libertà, come precedentemente spiegato.

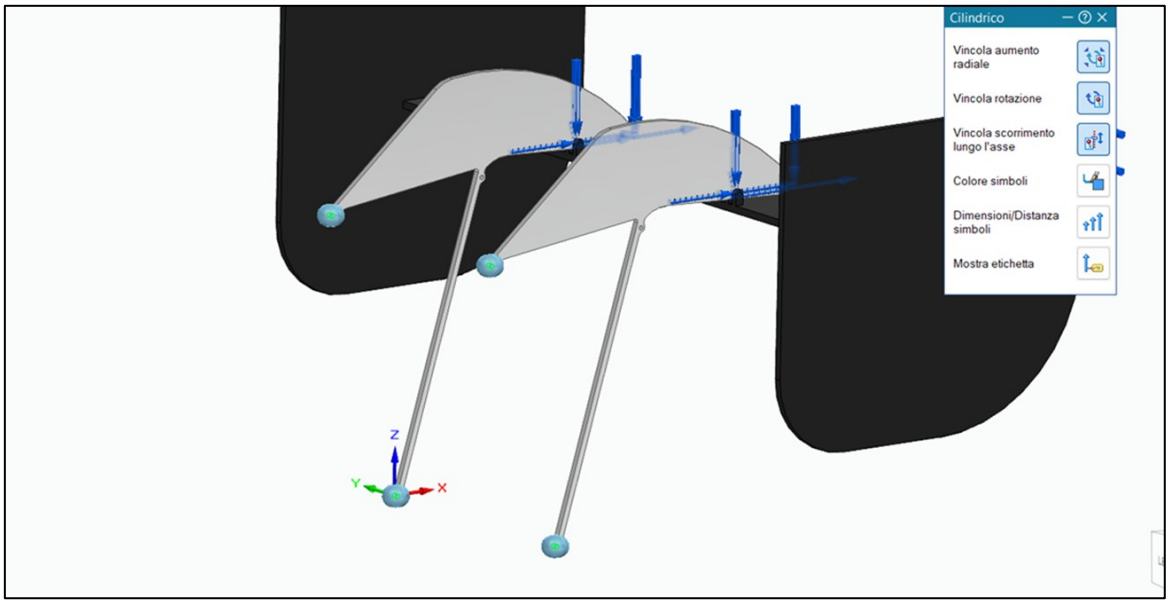


Figura 24 - Applicazione dei vincoli (a meno del tirante) all'assieme completo

È stato poi applicato il vincolo imposto dal tirante solo al supporto alla destra del pilota come precedentemente spiegato. Analizzando la situazione in maniera più approfondita ci si accorge del fatto che si sta attuando un'ulteriore semplificazione in quanto il vincolo imposto dal tirante del supporto sinistro, anche nel caso di applicazione di una forza laterale diretta come in *Figura 23*, svolge comunque un'azione di vincolo nei confronti delle forze di drag e di quelle di downforce. Si è scelto di semplificare le reazioni del tirante, causate da tali forze, in quanto:

- il tirante è fissato al supporto in una posizione più in basso rispetto ai due punti di collegamento dell'ala, quindi il tirante sarebbe sottoposto a compressione a seguito dell'applicazione della downforce e, come si sa, il tirante nella realtà non lavora a compressione;
- rispetto alla forza di drag invece, il tirante offrirebbe un maggior contributo ma ricordiamo comunque che è posizionato, nel piano X-Y inclinato di circa 45°. Si intuisce inoltre che, per la geometria del supporto, questo ha una buona resistenza ai carichi diretti lungo la direzione X. Va aggiunto inoltre che la forza di drag è di 74N, quindi ha modulo nettamente inferiore rispetto agli altri due carichi.

Anche in questo caso tuttavia, si può comunque contare sul vincolo di tirante inserito nell'altro supporto, le cui reazioni si scaricano, a catena, attraverso l'ala quasi-rigida.

Va evidenziato inoltre che, in tal modo, si sta mettendo un vincolo in meno, quindi si sta analizzando una condizione più sfavorevole rispetto a quella reale in modo da essere più cautelativi.

Si è passati poi (*Figura 25*) alla creazione del medesimo sistema di riferimento di prima centrato, questa volta, sulla superficie "esterna" del supporto di destra.

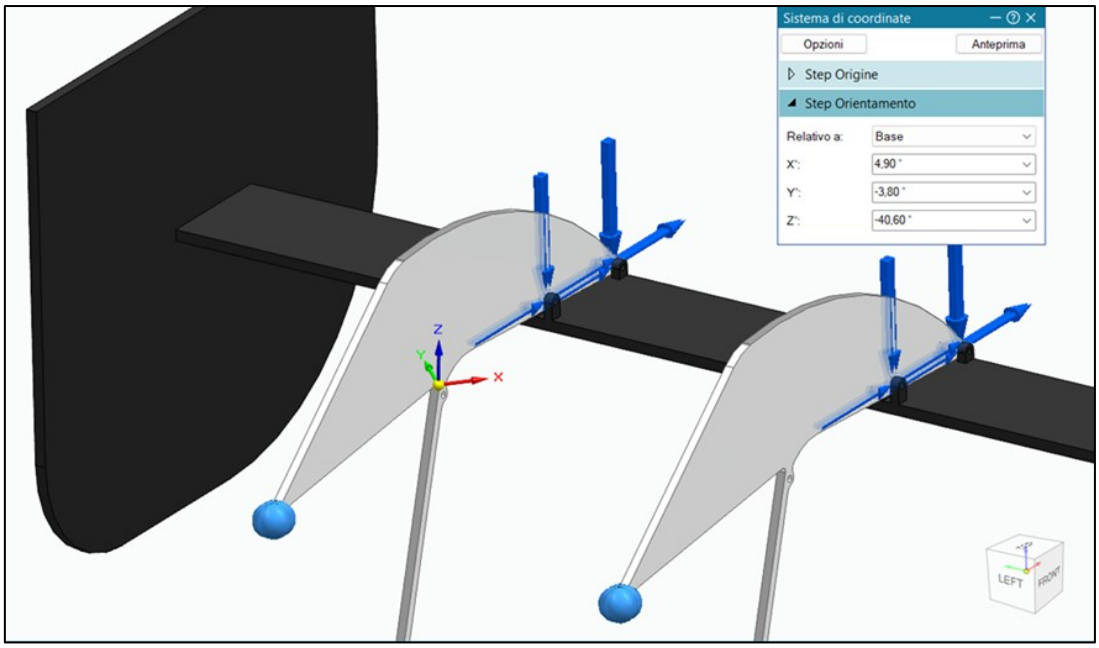


Figura 25 - Sistema di riferimento ausiliario per vincolo imposto dal tirante

Come si può notare dalla *Figura 25*, è variato in valore assoluto, rispetto al sistema creato in precedenza, solo un angolo (seppur di pochi gradi) in quanto, questa volta, il sistema di riferimento è stato centrato nella parte "esterna" del supporto che si trova ora a destra del supporto stesso (dal punto di vista del pilota).

È stato quindi tolto alla superficie interna del foro di fissaggio del tirante, come nel caso precedente, il grado di libertà relativo alla traslazione lungo l'asse Y (del tirante) e i gradi di libertà relativi alle tre rotazioni mentre sono state lasciate possibili le altre due traslazioni (*Figura 26*) attraverso l'applicazione del vincolo "Definito dall'utente".

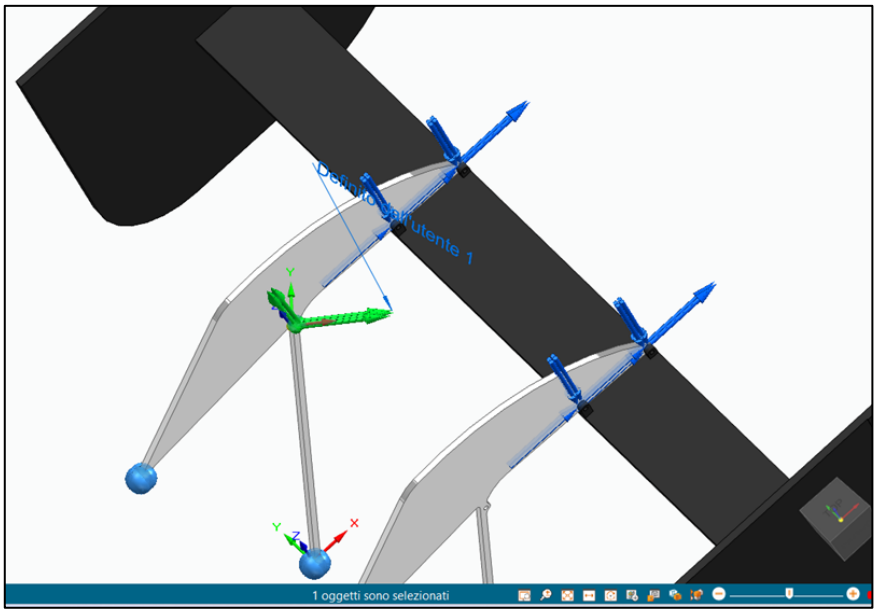


Figura 26 - Vincolo tirante per simulazione finale

Sono state infine inserite le relazioni fisiche tra i vari componenti presenti nell'assieme usando, come nel caso precedente, il comando "Connettori" scegliendo l'opzione "Bullone" (*Figura 27*) per simulare la presenza dei collegamenti bullonati tra ala posteriore e supporti.

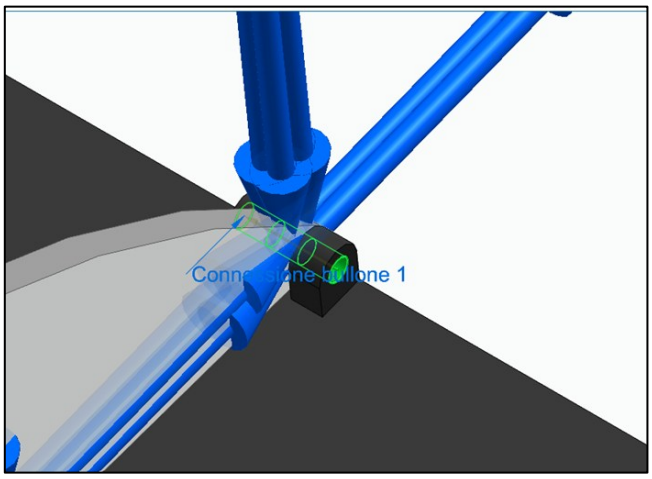


Figura 27 - "Connessione bullone" nella simulazione finale

È stata successivamente eseguita un'analisi FEM preliminare i cui risultati vengono mostrati dalle seguenti foto.

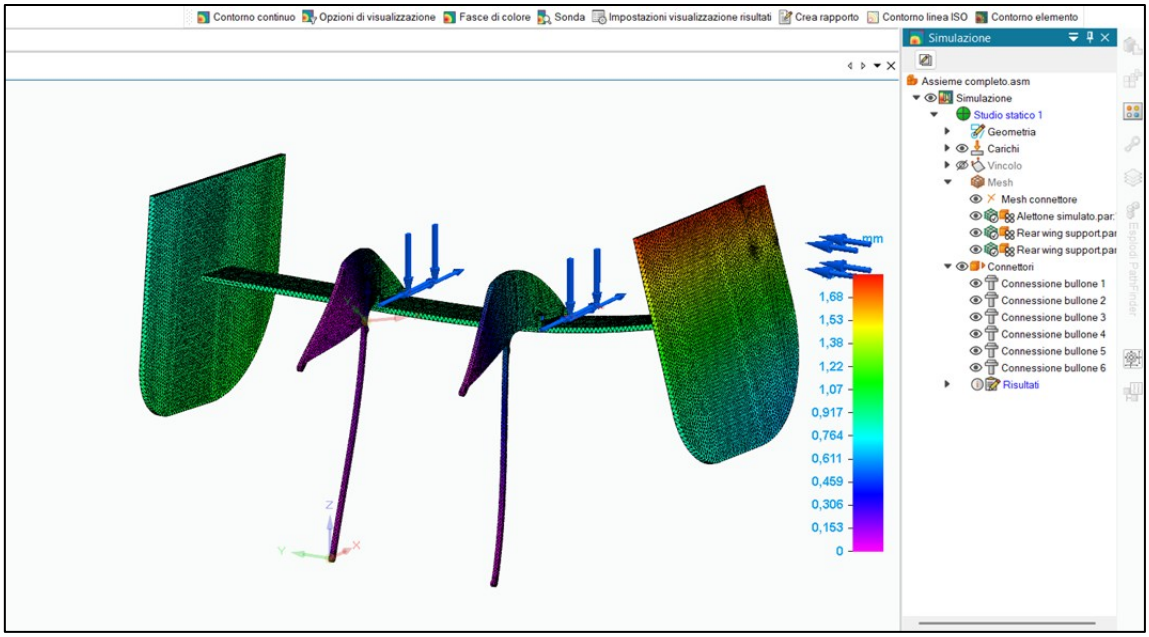


Figura 28 - Screenshot 1 - Analisi FEM preliminare - Deformazione

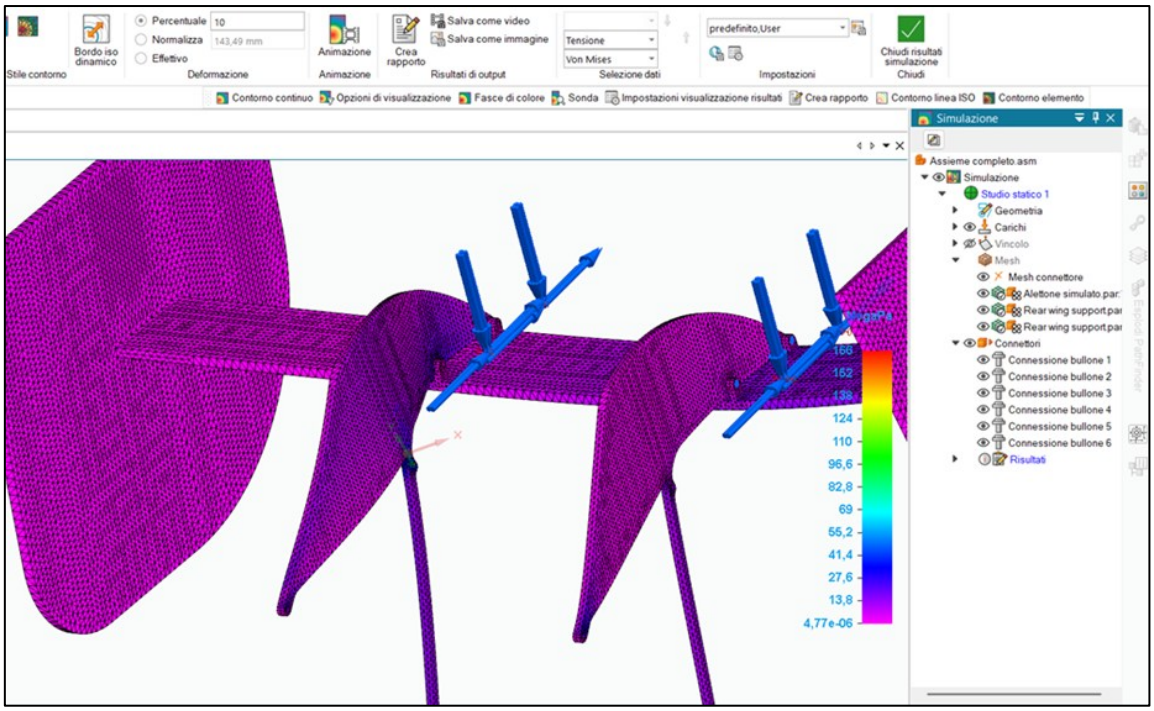


Figura 29 - Screenshot 2 analisi FEM preliminare - Tensione

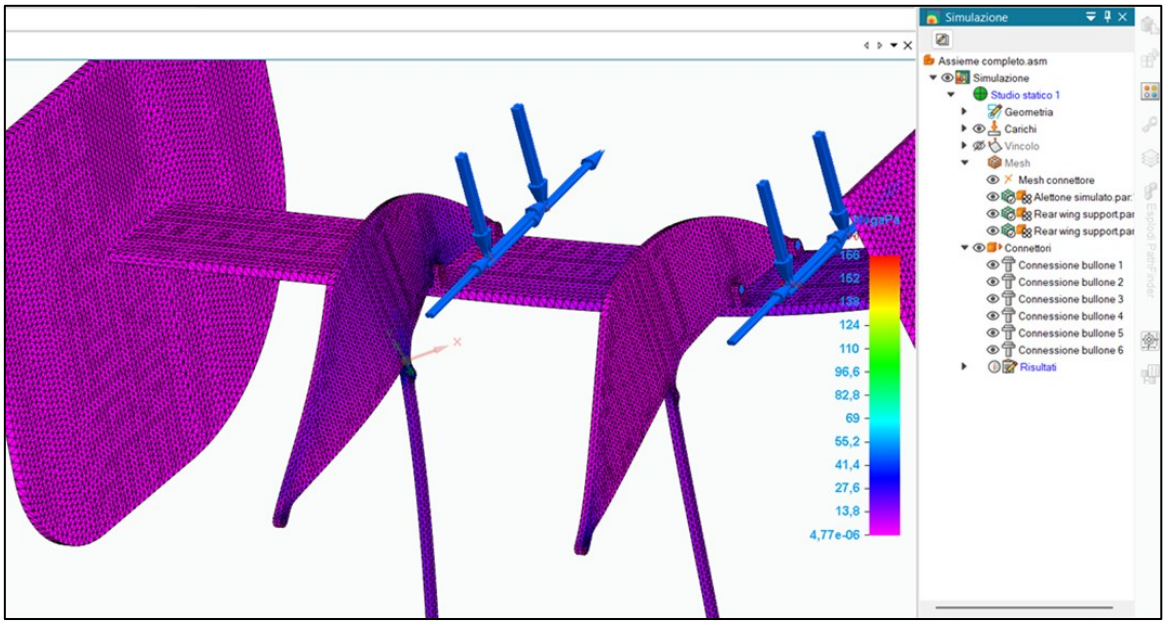


Figura 30 - Screenshot 3 analisi FEM – Tensione

È fondamentale notare che lo stato tensionale e deformativo, mostrato dalle foto precedenti (*Figure 28*, *29* e *30*), risulta coerente con i vincoli impostati, principalmente con quello rappresentato dal tirante messo solo sul supporto destro rispetto al pilota.

Altrettanto importante è sottolineare che, graficamente, lo stato deformativo rappresentato non è visualizzato in modalità "Effettivo" in quanto le deformazioni sarebbero poco visibili a prima vista. Si è, per tale motivo, preferito visualizzare la deformazione in modalità "Percentuale" impostando "10" come parametro in modo da rendere più evidente la deformazione.

Si nota tuttavia che l'endplate si deforma di parecchio in corrispondenza dell'attacco con l'ala posteriore e ciò potrebbe inquinare i risultati ottenuti dalla simulazione riguardante esclusivamente l'analisi dei due supporti. Si potrebbe dire, per spiegare meglio il concetto, che è come se la struttura, creata per simulare la presenza dell'ala posteriore, "assorbisse" parte dei carichi deformandosi molto. Quindi, dal momento che tale Tesi si concentra solo ed esclusivamente sull'analisi e sull'ottimizzazione dei due supporti, si è deciso di irrigidire la struttura dell'ala posteriore in corrispondenza della zona in cui viene applicata la pressione (*Figura 31*). Si ricorda che l'obiettivo di tale operazione è quello di irrigidire ulteriormente la struttura dell'ala posteriore per evitare che la sua deformazione inquini i risultati della simulazione FEM.

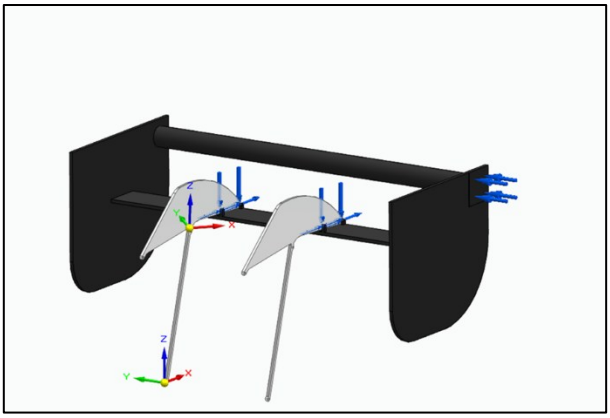


Figura 31 - Ala posteriore con rinforzo in corrispondenza della zona di applicazione della pressione

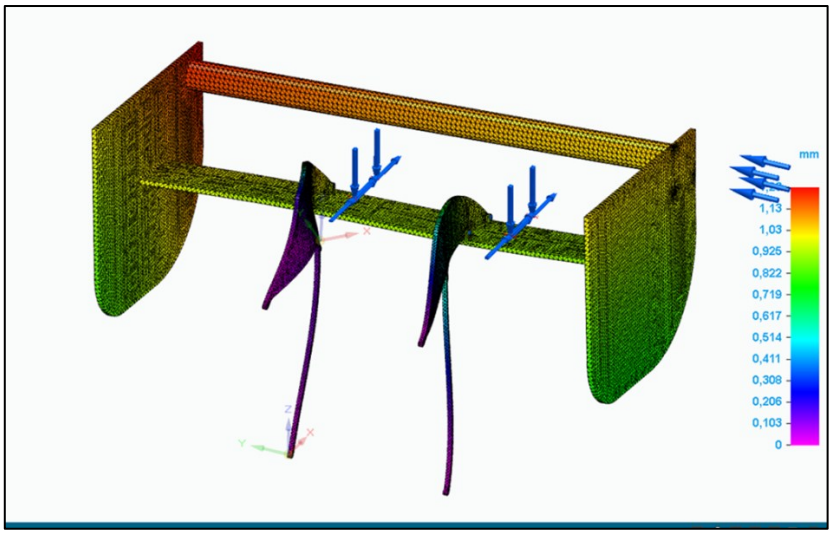


Figura 32 - Risultati simulazione FEM con ala posteriore irrigidita

Dalla *Figura 32* si nota chiaramente che le deformazioni risultano essere differenti rispetto a quelle ottenute con l'assieme contenente l'ala posteriore priva di rinforzo.

6. Analisi e valutazione dei risultati della simulazione FEM

Tale capitolo coincide con l'analisi dei risultati della simulazione FEM precedentemente svolta. Si verifica quindi che i supporti rispettino le specifiche imposte dal Regolamento: lo spostamento massimo di ciascun punto a seguito dell'applicazione dei carichi deve essere inferiore a 10mm in ciascuna delle 3 direzioni e la tensione equivalente massima deve essere inferiore a $\frac{\sigma_S}{2}$ in quanto, da richieste progettuali, il coefficiente di sicurezza deve essere pari a 2 (X=2). σ_S rappresenta la tensione di snervamento dell'Alluminio 6061 (pari 276 MPa).

Nei capitoli successivi si procederà ad alleggerire il più possibile tali supporti e ad ottimizzare la geometria per abbassare la tensione equivalente e risolvere alcune criticità.

Si prenda dunque ora in analisi il supporto alla destra del pilota in quanto è proprio su tale supporto che si è scelto di inserire il tirante. Il supporto alla sinistra del pilota, invece, risulterà, in questa simulazione, meno sollecitato a causa dell'assenza del tirante.

Si procede dunque con l'utilizzo dello strumento "Sonda". Tramite tale strumento, SolidEdge dà la possibilità all'utente di analizzare, punto per punto, lo stato deformativo (inteso come spostamento massimo del punto lungo le tre direzioni cartesiane) e lo stato tensionale equivalente.

Dalla *Figura 33* si osserva che, per il supporto di destra, la massima deformazione si ha sulla punta, o meglio sulla regione in cui ha luogo il collegamento bullonato con l'ala posteriore. Si procede quindi ad inserire una sonda (*Figura 34*) per analizzare con precisione cosa succede.

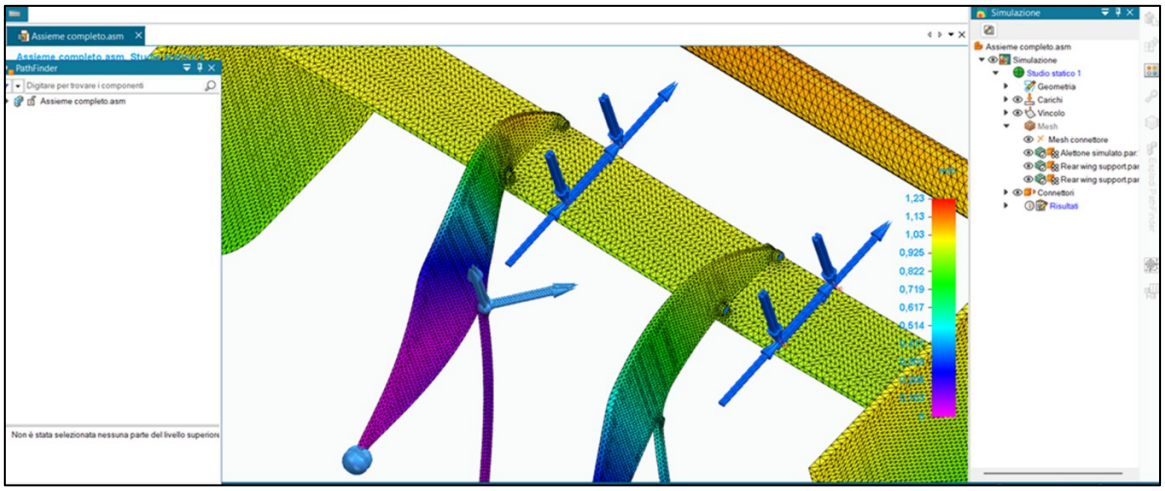


Figura 33 - Analisi visiva dei risultati della simulazione FEM (Deformazione)

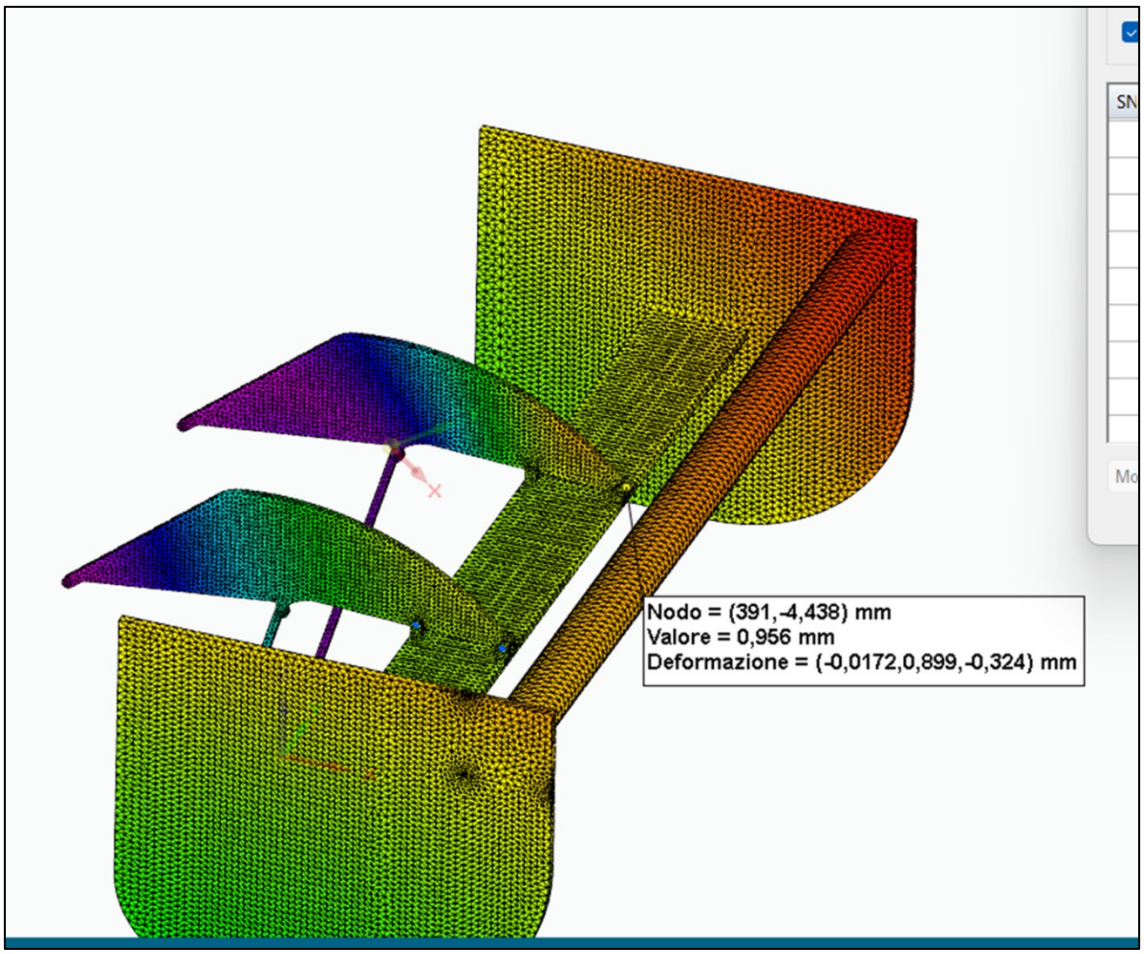


Figura 34 - Utilizzo strumento Sonda (Deformazione) sulla punta dei supporti

Come si può osservare dalla *Figura 34*, ovvero dall'analisi eseguita mediante lo strumento Sonda, in tale punto, la deformazione prevalente, ovvero quella lungo l'asse Y

(asse coincidente con quello di applicazione della pressione laterale sull'endplate) è pari a 0.899mm quindi ampiamente sotto i valori massimi consentiti dal Regolamento.

Per quanto riguarda il discorso sulla tensione equivalente invece, dai risultati della simulazione si osserva (*Figura 35*) che il punto maggiormente sollecitato risulta in corrispondenza del bordo della superficie di fissaggio del tirante (*Figura 36*).

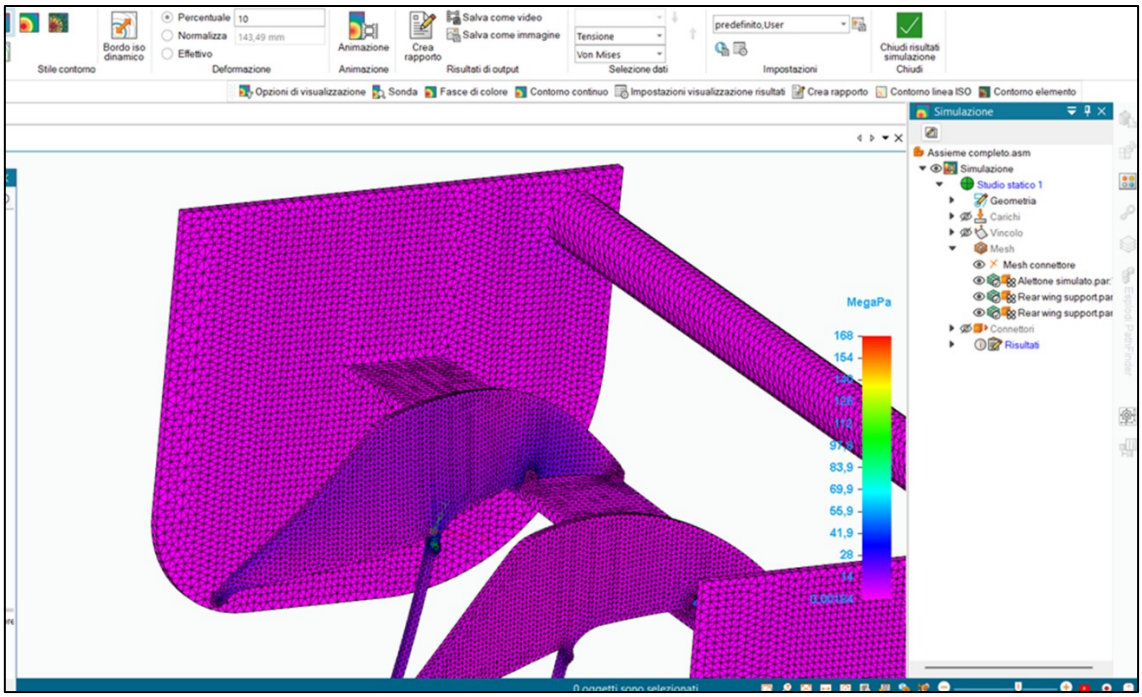


Figura 35 - Analisi visiva risultati simulazione FEM (Tensione)

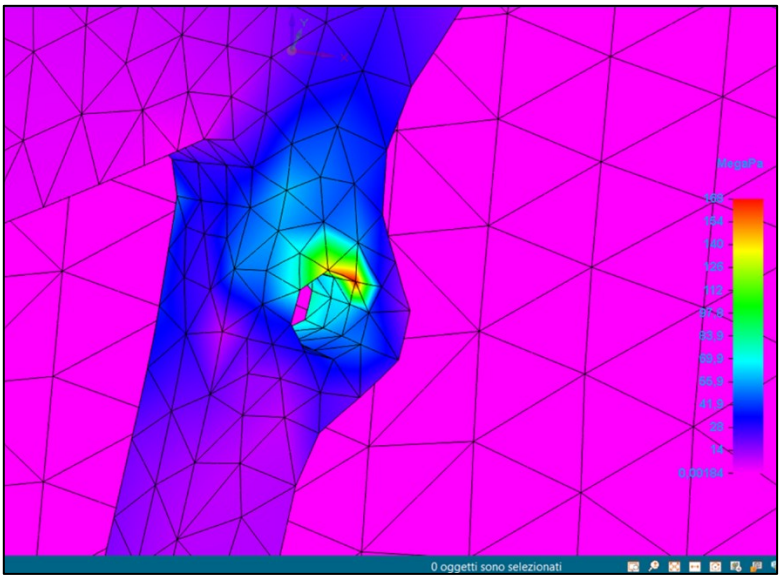


Figura 36 - Criticità insorta in corrispondenza del bordo della superficie di fissaggio del tirante

Utilizzando nuovamente lo strumento sonda:

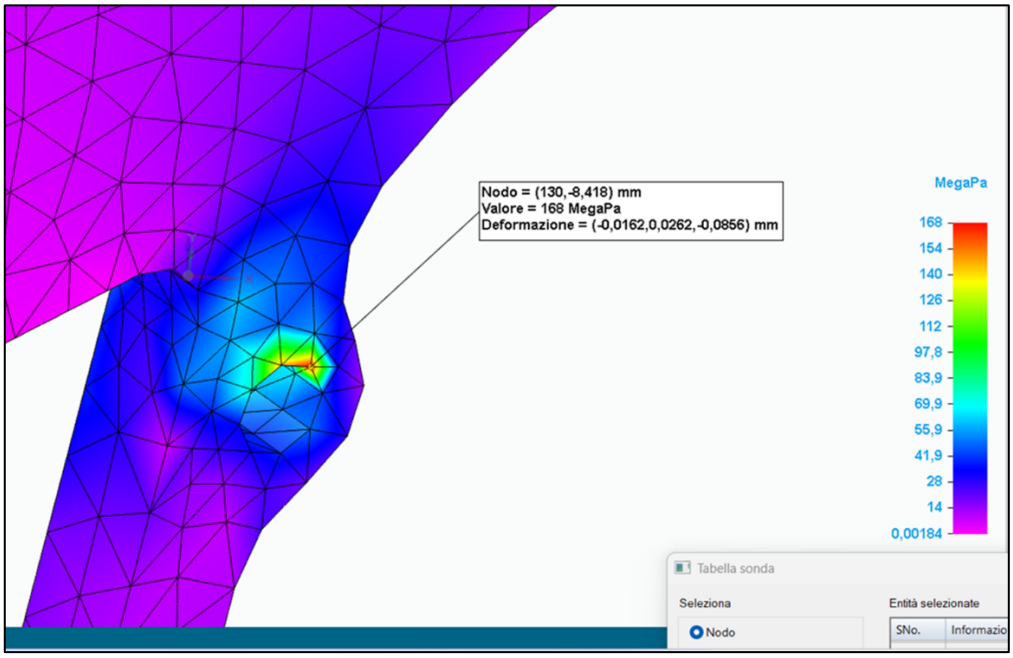


Figura 37 - Utilizzo Sonda per criticità bordo superficie attacco tirante

Come si può notare dalla *Figura* 37, è proprio in corrispondenza di tale punto che si raggiunge il valore massimo di tensione pari a 168MPa. Tale valore risulta essere ben al

di sotto della tensione di snervamento dell'Alluminio pari a 276MPa. Non si è tuttavia in sicurezza qualora si considerasse un coefficiente di sicurezza X=2 il quale imporrebbe una tensione massima pari a 138MPa.

7. Alleggerimenti

A seguito delle precedenti considerazioni sul supporto, si è passati ad alleggerire il pezzo in quanto lo stesso, privo di alleggerimenti, avrebbe una massa pari a circa 1kg.

Per fare ciò si è partiti sia dall'ottimizzazione topologica, svolta (e fornita) dal Polimarche Racing Team (mostrata in *Figura 38*), sia dall'analisi sull'andamento della tensione equivalente precedentemente svolta in tale Tesi nei capitoli precedenti.

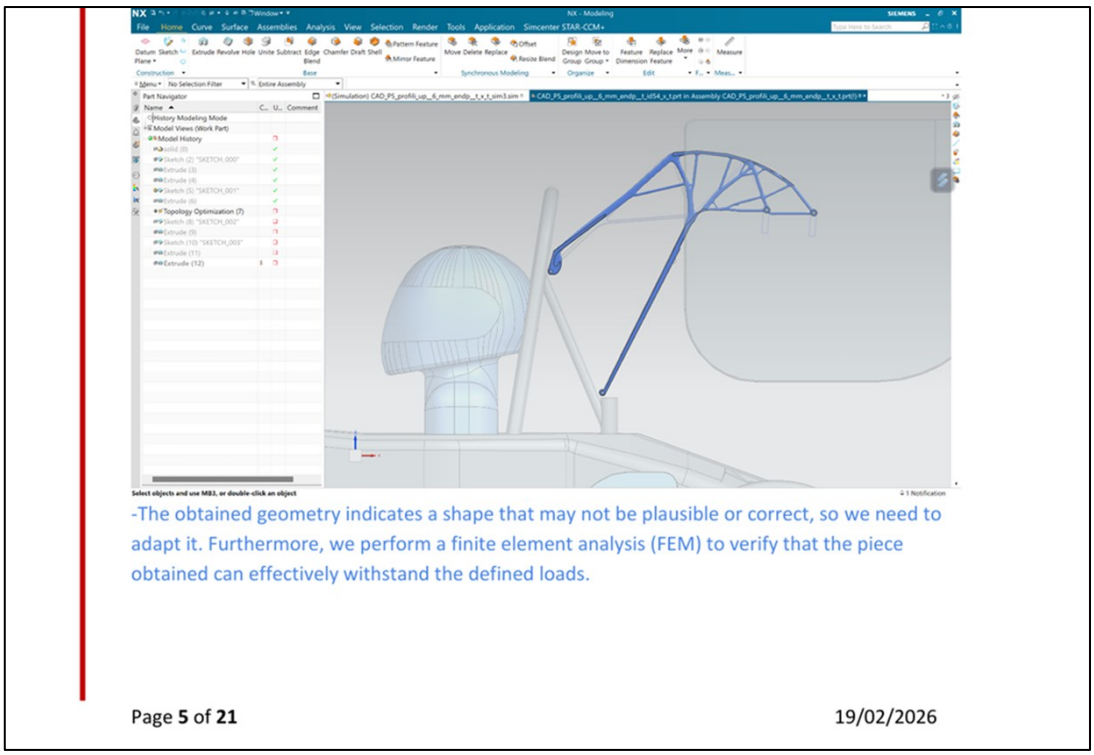


Figura 38 - Estratto preso dal report fornito dal PoliMarche Racing Team sull'ottimizzazione topologica svolta dal Team

Si passati dunque alla realizzazione del primo alleggerimento partendo da uno schizzo tracciato sulla superficie del supporto (*Figura 39*).

Tale schizzo è stato realizzato, come per la modellazione 3D dei supporti, in modo da vincolare completamente il profilo attraverso l'uso di quote che siano significative ai fini di un'eventuale futura modifica.

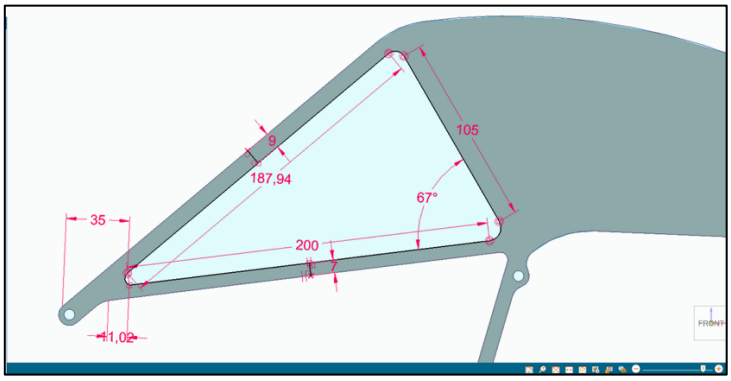


Figura 39 - Schizzo realizzato per estrudere il primo alleggerimento

Sono state dunque rieseguite nuove simulazioni FEM (*Figura 40*).

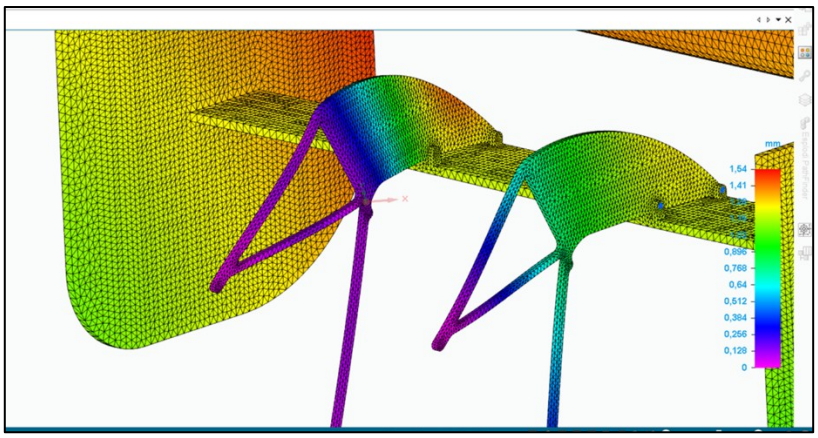


Figura 40 - Simulazione FEM supporto con il primo alleggerimento

Per quanto riguarda lo spostamento massimo, si nota dalla *Figura 40* che, questa volta, la zona che si è maggiormente spostata, non risulta più essere localizzata in punta del supporto di destra (rispetto al pilota), bensì nella zona leggermente superiore (colorata in rosso in *Figura 40*).

Analizzando meglio la situazione in *Figura 41* con una sonda, si nota che, ora, lo spostamento maggiore si ha ovviamente sempre lungo l'asse Y, ma questa volta, in tale zona è pari a 1,36mm. Anche in questa configurazione, si è molto al di sotto dei limiti imposti da progetto e da Regolamento.

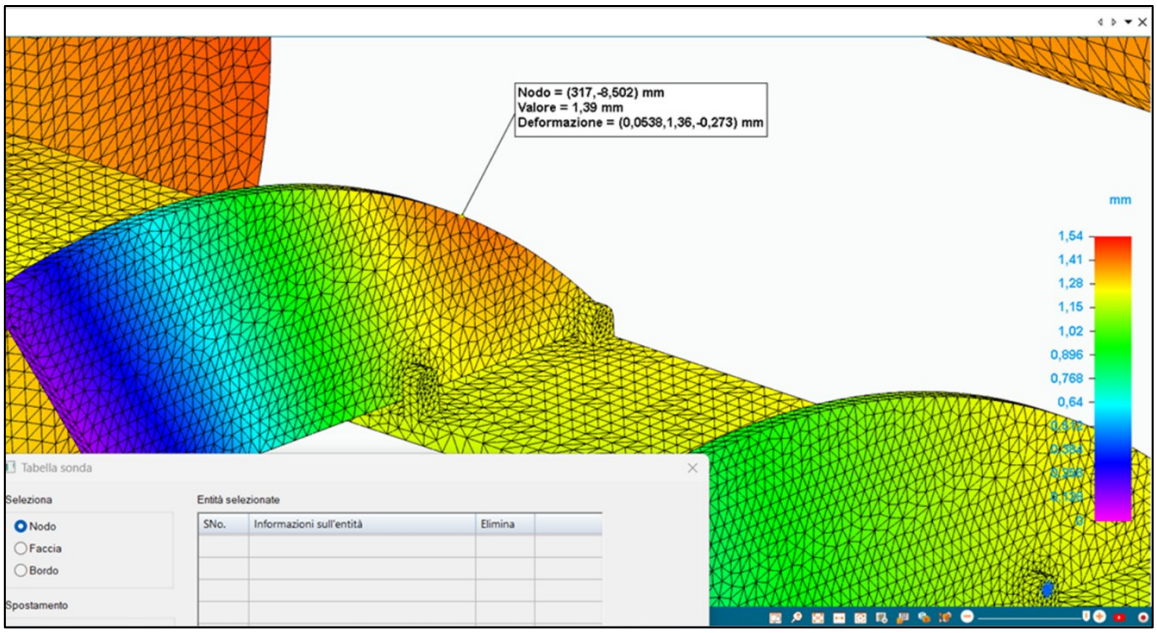


Figura 41 - Sonda in Deformazione nel punto di massimo spostamento in presenza di un alleggerimento

Analizzando invece l'andamento delle tensioni equivalenti, anche in questo caso, la zona più sollecitata risulta essere il bordo della superficie di collegamento con il tirante. Tuttavia ora, la tensione nel medesimo punto risulta essere più alta. I risultati ottenuti con l'utilizzo di una nuova sonda sono stati mostrati in *Figura 42*.

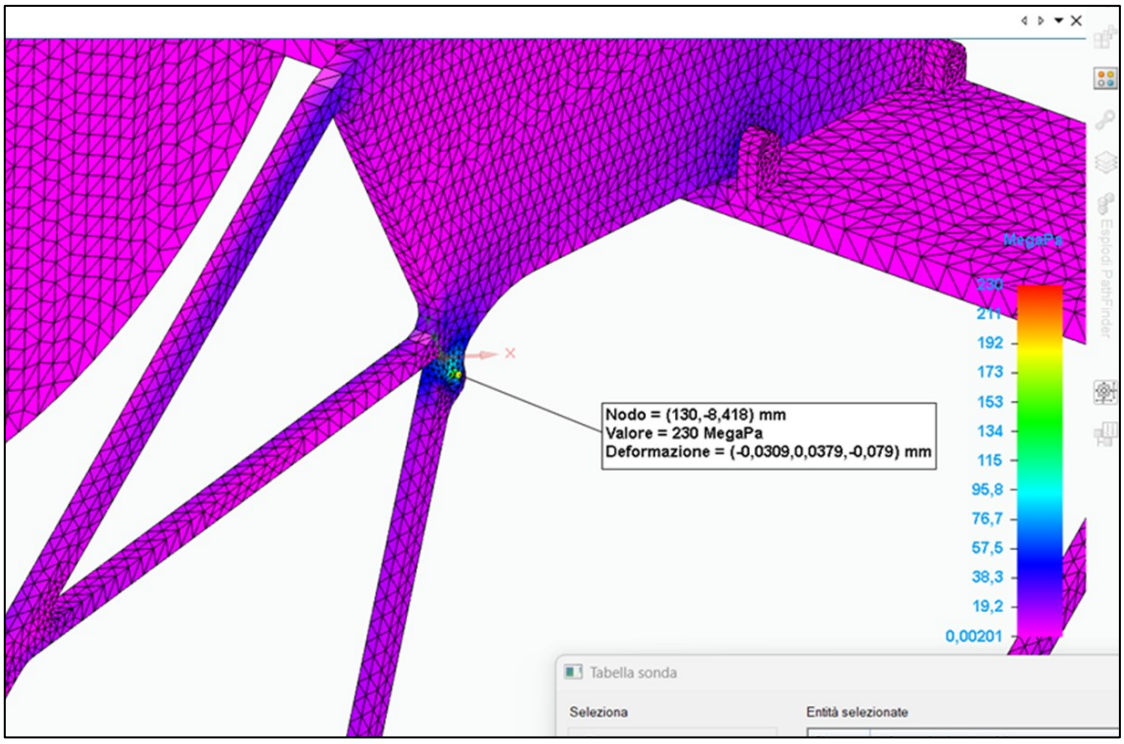


Figura 42 - Tensione equivalente nel punto critico in presenza del primo alleggerimento

Anche in questo caso, come mostrato in *Figura 42*, la tensione equivalente è al di sotto della tensione di snervamento ma non si è nuovamente in sicurezza qualora si considerasse un coefficiente di sicurezza pari a 2 (X=2).

Analizzando le proprietà del pezzo nella configurazione con il primo alleggerimento va sottolineato che si è riusciti ad ottenere, già solo con un alleggerimento, una significativa riduzione di massa: il singolo supporto è infatti arrivato ad avere una massa pari a 756g, come mostrato in *Figura 43*.

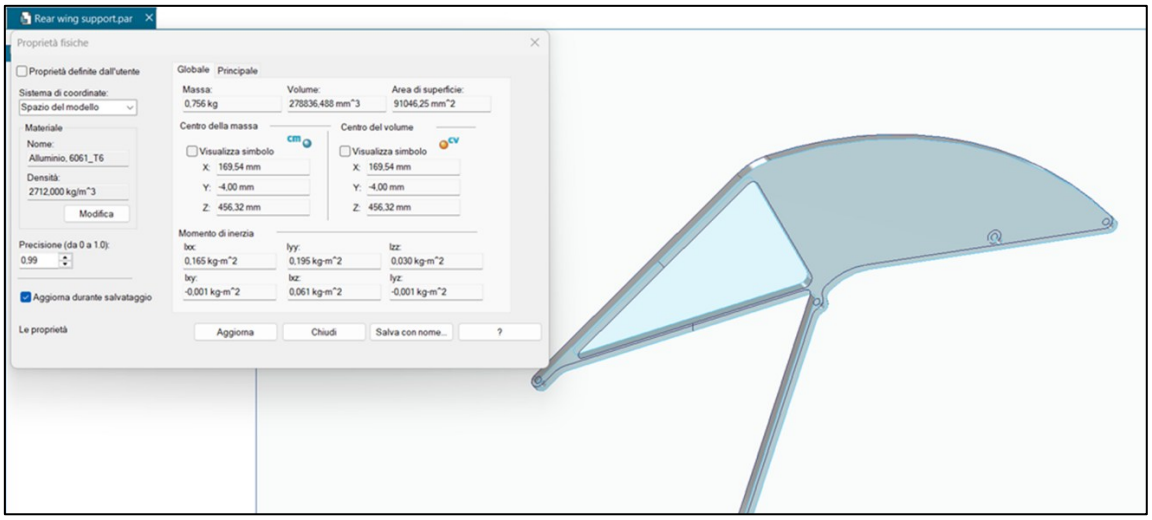


Figura 43 - Massa del singolo supporto con un solo alleggerimento

Si è passati dunque ad alleggerire ulteriormente il pezzo, basandosi, come per il primo alleggerimento, sull'osservazione dell'analisi FEM svolta, andando quindi ad eliminare materiale in eccesso nelle zone viola di *Figura 44* in cui si osservano valori di tensione equivalente molto bassi.

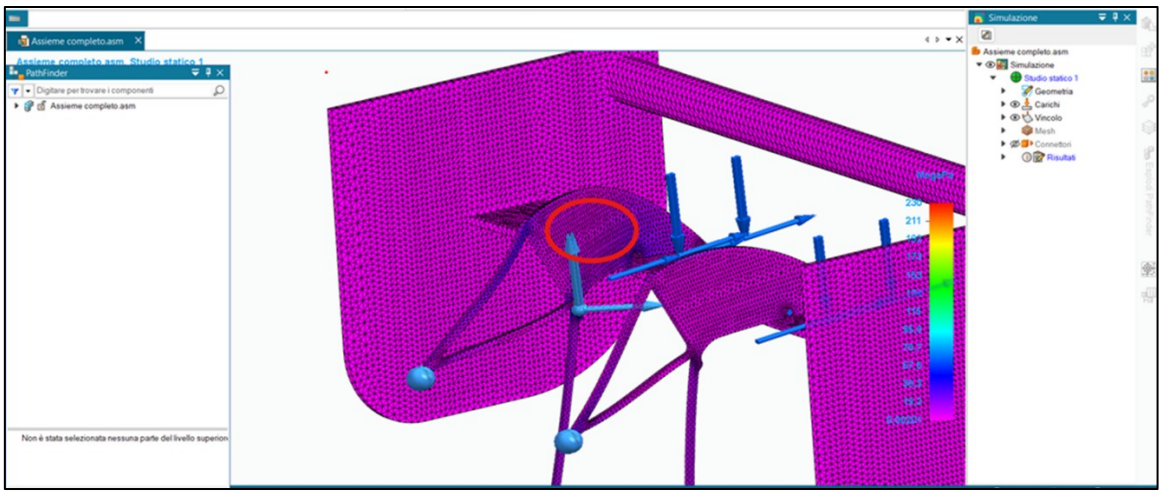


Figura 44 - Zona in cui la tensione equivalente assume valori bassi

Utilizzando lo strumento Sonda come in *Figura 45* si nota infatti che, in tale zona, la tensione equivalente si aggira intorno ai 5MPa.

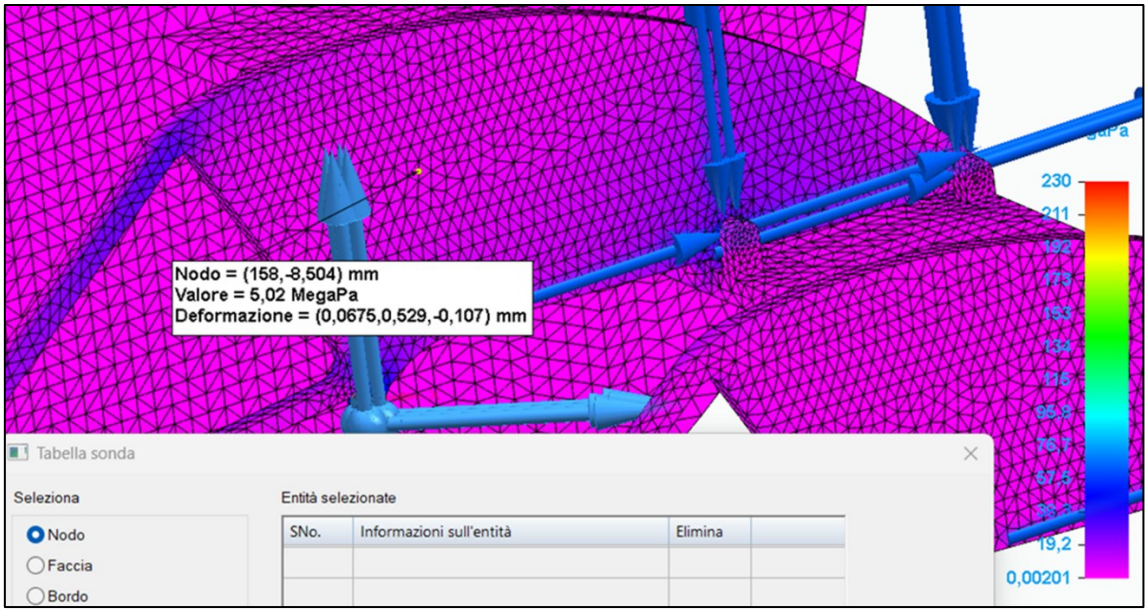


Figura 45 - Zona del supporto in cui si ha una tensione equivalente bassa

Seguendo i ragionamenti precedenti, si procede con l'alleggerimento basato, anche in questo caso, su uno schizzo completamente vincolato come mostrato in *Figura 46*.

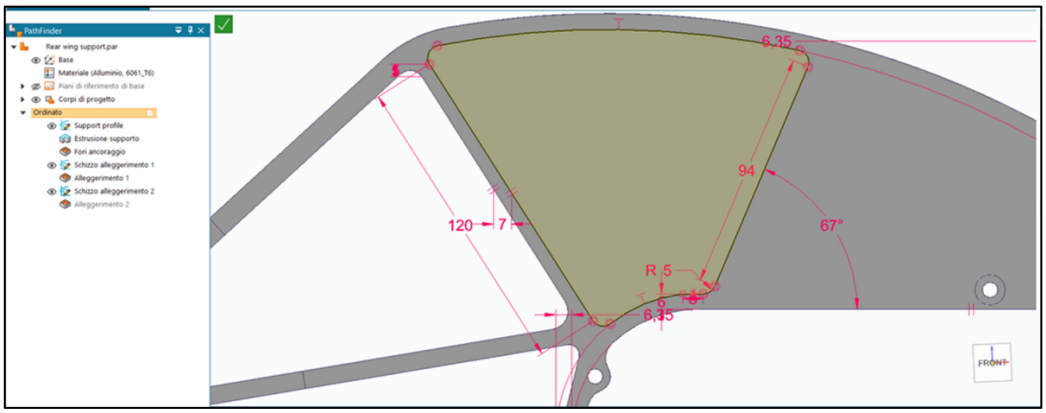


Figura 46 - Schizzo completamente vincolato relativo al secondo alleggerimento

Definendo le quote mostrate in *Figura 46*, si è creato un insieme di geometrie simili tra loro in quanto solo ora si ha la possibilità di modificare diverse quote utili a definire e a

correggere la geometria di questo specifico alleggerimento mediante l'utilizzo della tabella variabili di SolidEdge.

Come si può notare sempre dalla *Figura 46*, nello schizzo si sono definiti numerosi raccordi affinché non si creassero spigoli vivi o zone in cui si andasse a concentrare la tensione. È stata inoltre modellata con attenzione la zona limitrofa al punto di fissaggio del tirante in cui si ha l'intersezione tra le varie nervature in quanto, dalla precedente simulazione, si era osservato come la massima tensione equivalente si fosse sviluppata proprio in tale zona.

Rieseguendo quindi una nuova simulazione con i medesimi carichi e vincoli si è ottenuto il risultato mostrato in *Figura 47*.

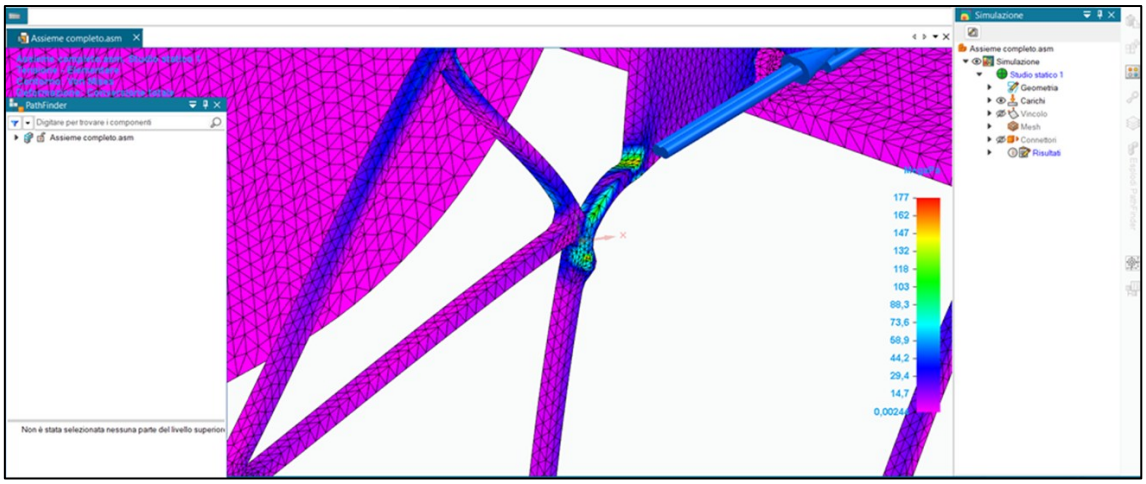


Figura 47 - Risultati simulazione FEM con secondo alleggerimento

Come evidenziato in *Figura 48* si nota ora la comparsa di una nuova zona (cerchiata in rosso) sollecitata a tensione, oltre a quella limitrofa all'attacco del tirante presente già nelle precedenti simulazioni. Tale nuova zona è localizzata nella zona di raccordo inferiore dell'ultimo alleggerimento inserito.

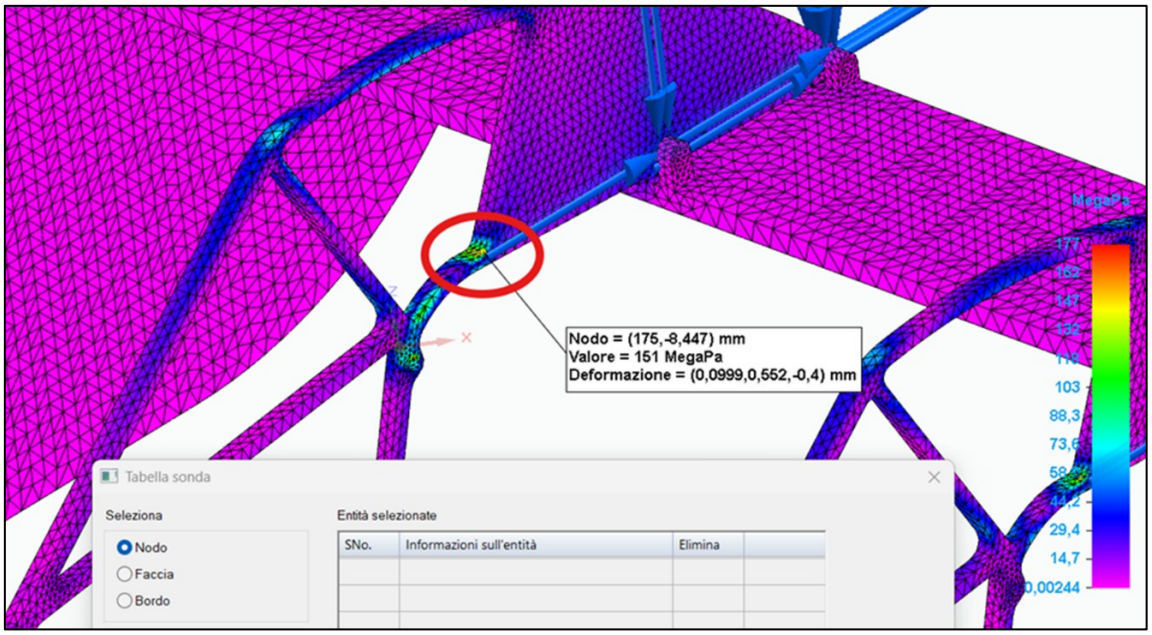


Figura 48 - Nuova zona critica formatasi a causa del nuovo alleggerimento

In *Figura 49* si è mostrato meglio, attraverso una sonda, lo stato tensionale equivalente della zona di fissaggio del tirante.

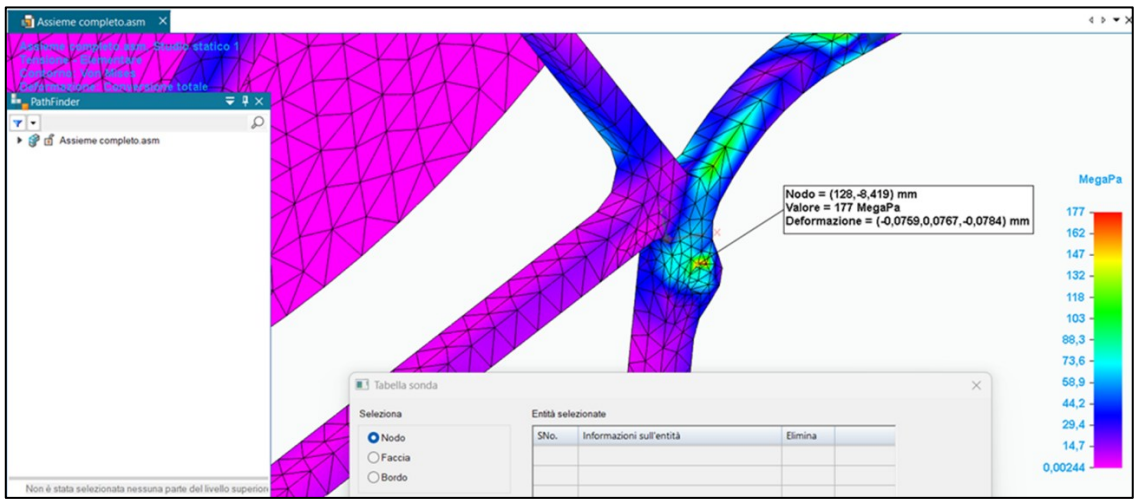


Figura 49 - Stato tensionale equivalente della zona di fissaggio del tirante a seguito del secondo alleggerimento

I dati mostrati dalla *Figura 49* conducono a considerazioni interessanti: alleggerendo il supporto rispetto alla precedente simulazione, si è riusciti a diminuire il valore della tensione equivalente massima nella zona limitrofa al bordo del foro di fissaggio del

tirante. Anche se potrebbe sembrare un assurdo, rimuovendo ulteriore materiale, lo stato tensionale in tale zona ha diminuito la sua entità. Per spiegare meglio il concetto in maniera figurativa si potrebbe dire che, indebolendo parte della struttura e modificando la configurazione del supporto, si è riusciti a "far assorbire" a zone diverse dalla zona di fissaggio del tirante parte della tensione derivante dai carichi esterni.

Ai fini di questa Tesi e delle richieste progettuali da parte del Team, tali risultati risultano essere favorevoli; si è deciso dunque, dopo diversi confronti con il Team, di continuare con gli alleggerimenti necessari.

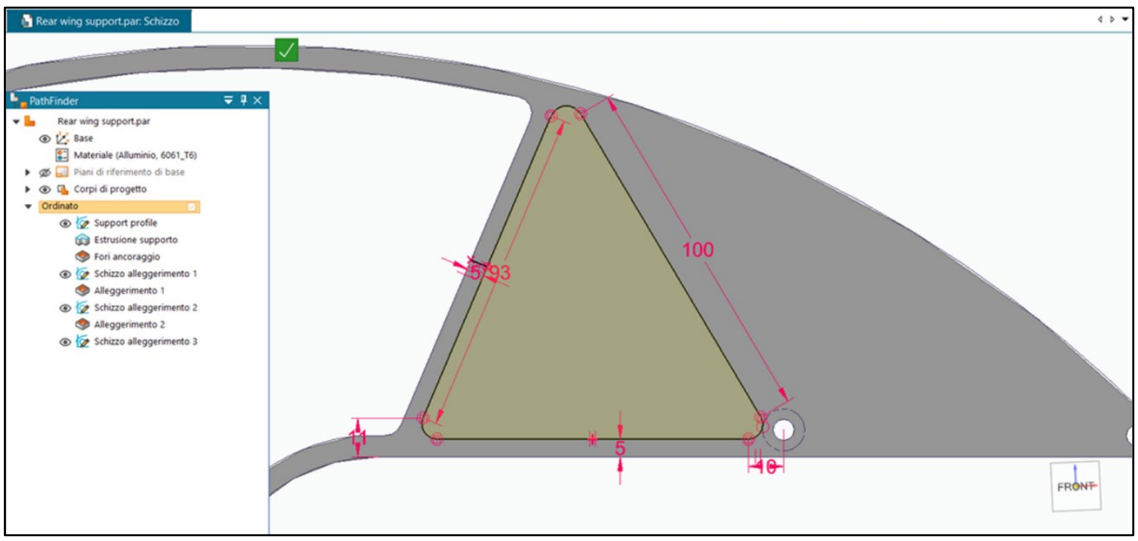


Figura 50 - Quotatura terzo alleggerimento

Analizzando i risultati ottenuti con tale configurazione (*Figura 51*) si nota una controtendenza rispetto alle deduzioni precedenti in quanto ora lo stato tensionale relativo alla zona di fissaggio del tirante si è aggravato arrivando appena oltre il limite di snervamento del metallo stesso (non considerando in questo caso neanche il coefficiente di sicurezza). Si osserva inoltre l'intensificarsi dello stato tensionale di altre zone (colorate in verde chiaro in *Figura 51*).

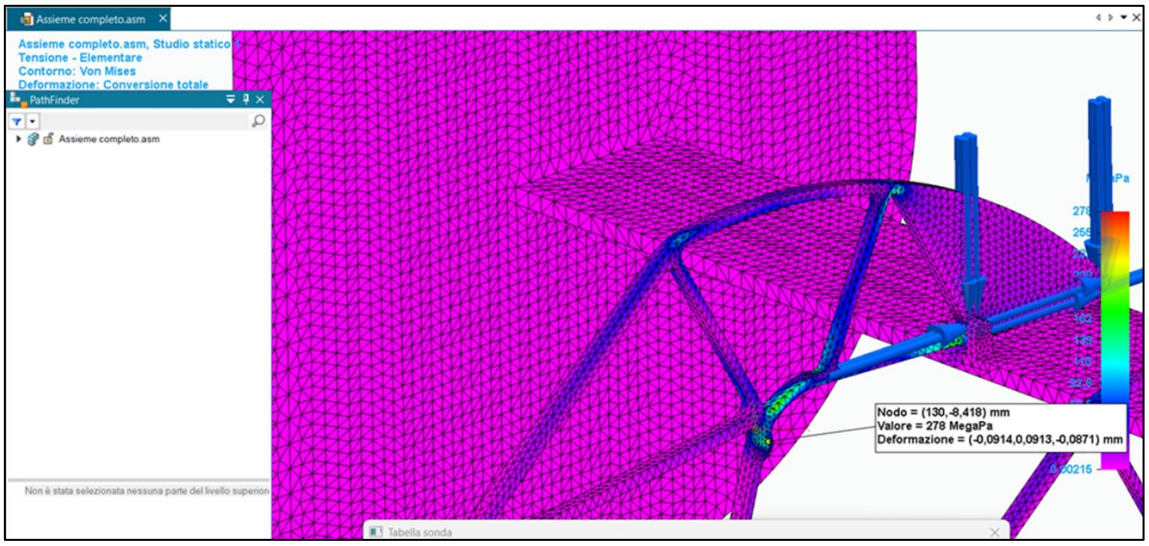


Figura 51 - Risultati simulazione FEM con terzo alleggerimento

Prima di andare a risolvere le criticità appena descritte intervenendo con modifiche riguardanti la geometria delle zone interessate, si è deciso di realizzare prima l'ultimo alleggerimento necessario (mostrato in *Figura 52*) per contenere la massa, per poi eventualmente andare a modificare la geometria.

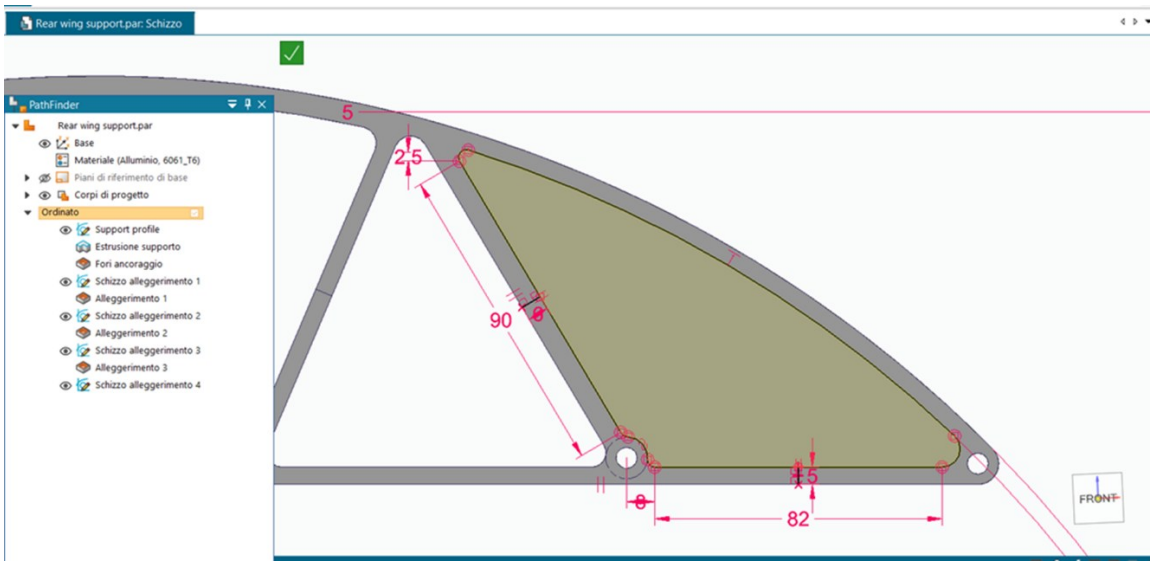


Figura 52 - Quote relative al quarto ed ultimo alleggerimento

Eseguendo una nuova simulazione sono emerse tutte le zone con i più alti valori di tensione equivalente cerchiati in *Figura 53* e in *Figura 54*.

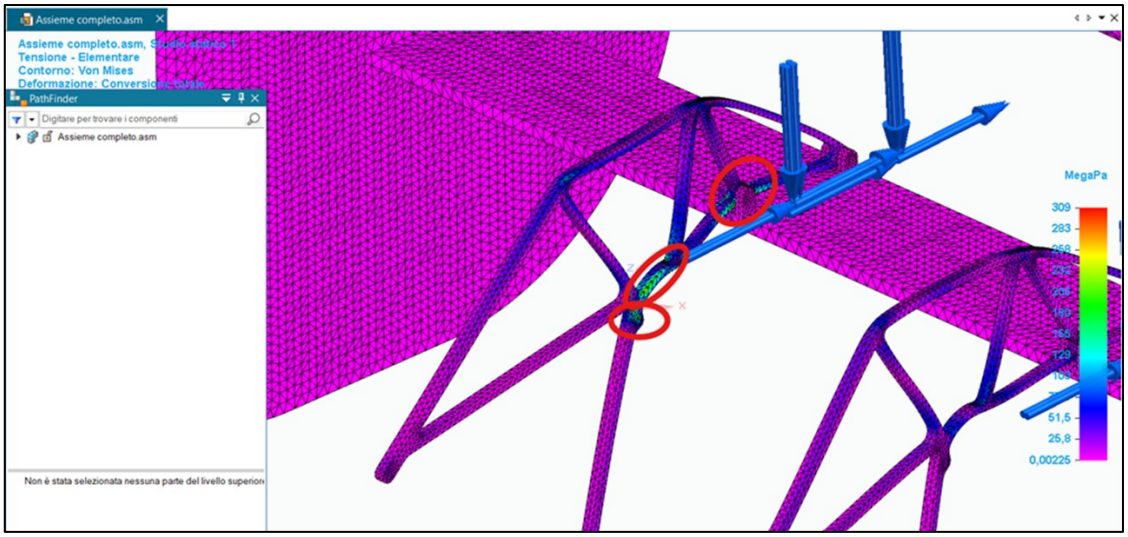


Figura 53 - Vista 1 rappresentante le zone con i più alti valori di tensione equivalente

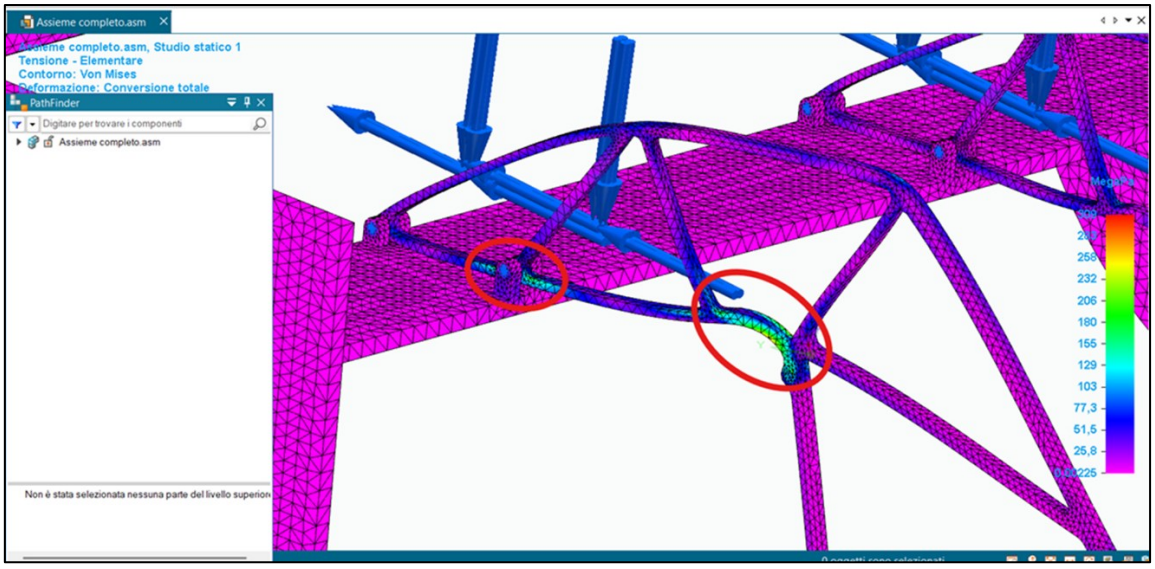


Figura 54 - Vista 2 rappresentante le zone con i più alti valori di tensione equivalente

La zona più critica fra tutte quelle evidenziate in *Figura 53* e in *Figura 54* resta quella limitrofa al punto di ancoraggio del tirante (*Figura 55*).

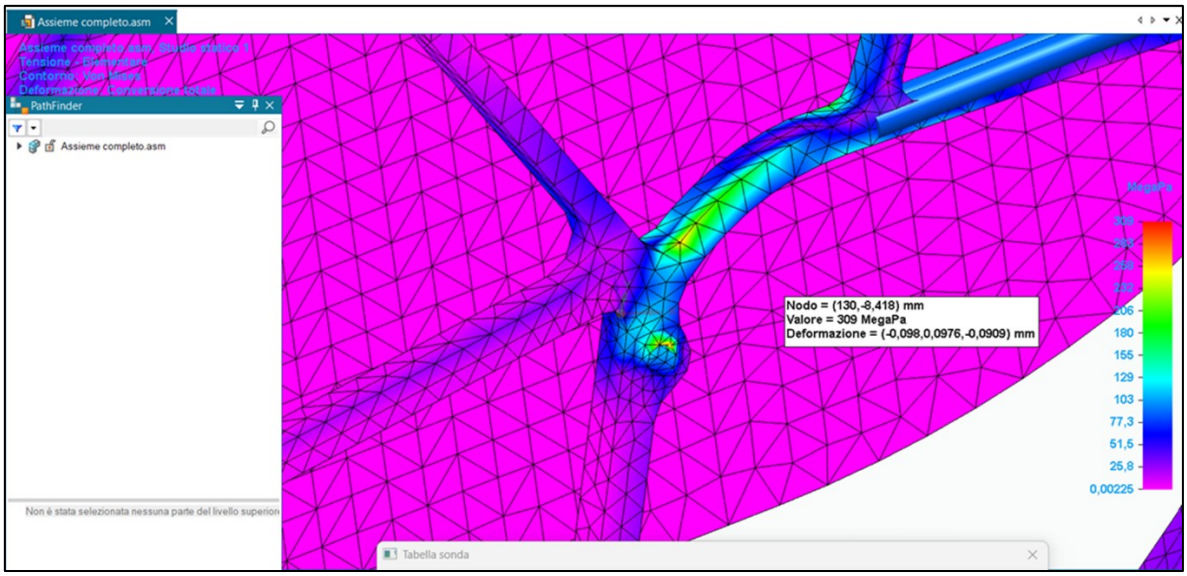


Figura 55 - Sonda nella zona di ancoraggio del tirante a seguito di tutti gli alleggerimenti

Come si può osservare dalla *Figura 55*, in tale punto si arriva ad una tensione equivalente che supera addirittura quella di snervamento del materiale. Si può osservare inoltre che, nella zona posteriore del supporto (limitrofa alla regione sede dell'ultimo alleggerimento), non si ha una tensione particolarmente elevata. Tale considerazione poteva anche essere dedotta intuitivamente osservando la disposizione dei carichi e dei vincoli.

A seguito di scambi di idee con il Team si è deciso di alleggerire ulteriormente la parte posteriore finale del supporto e di rimodellare la parte limitrofa al punto di ancoraggio del tirante.

Lo spostamento dei singoli punti del supporto è stato analizzato attraverso l'analisi della *Figura 56*.

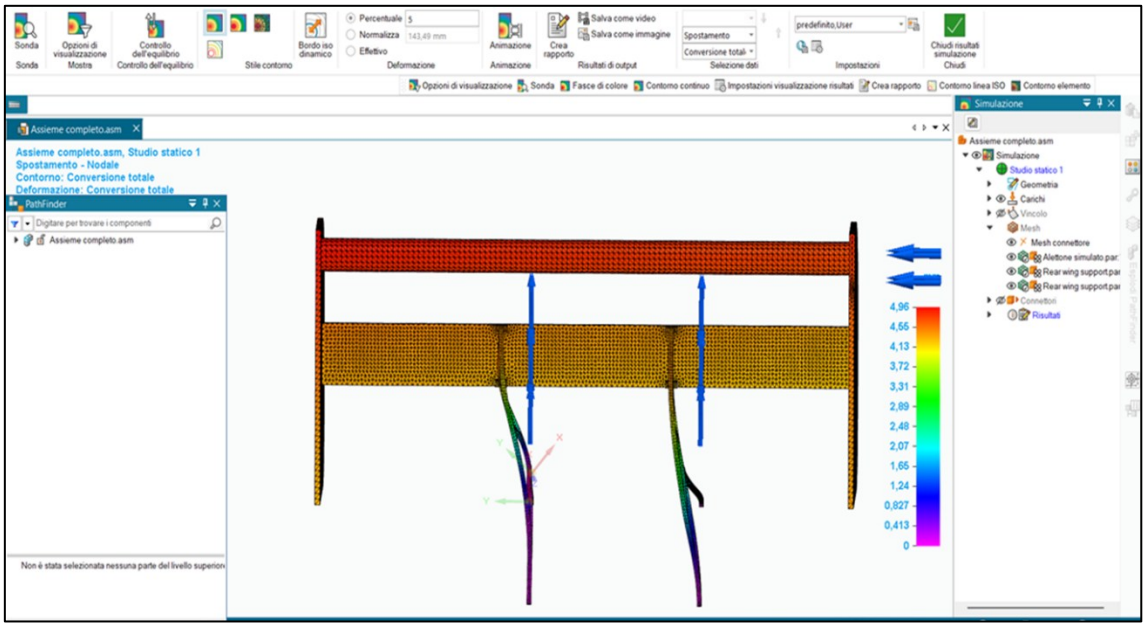


Figura 56 - Risultati simulazione FEM a seguito dell'ultimo alleggerimento – Deformazione

Come mostrato in *Figura 56*, la zona che manifesta lo spostamento maggiore lungo l'asse Y risulta essere la parte posteriore finale in cui sono presenti i fori di ancoraggio dell'ala posteriore.

Passando infatti ad una descrizione quantitativa attraverso lo strumento Sonda, si ottiene quanto mostrato in *Figura 57*.

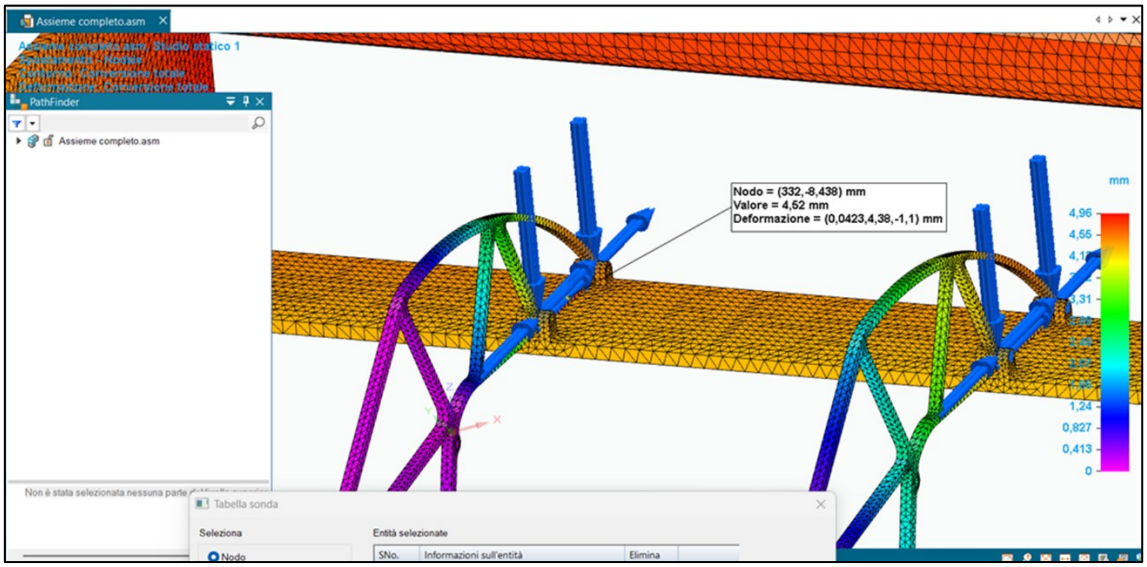


Figura 57 - Sonda nel punto maggiormente soggetto a spostamento a causa dell'applicazione dei carichi esterni

Dalla *Figura 57* si nota infatti che la maggiore deformazione in termini di spostamento puntuale massimo per il supporto alla destra del pilota (oggetto dell'intera analisi in questione) si ha nel punto mostrato. Lo spostamento lungo l'asse Y relativo a tale punto è pari a 4,96mm, valore ben al di sotto del limite consentito dal Regolamento (max. 10mm).

Per quanto riguarda la massa invece, come mostrato in *Figura 58*, in tale configurazione, si è arrivati ad una massa pari a 280g.

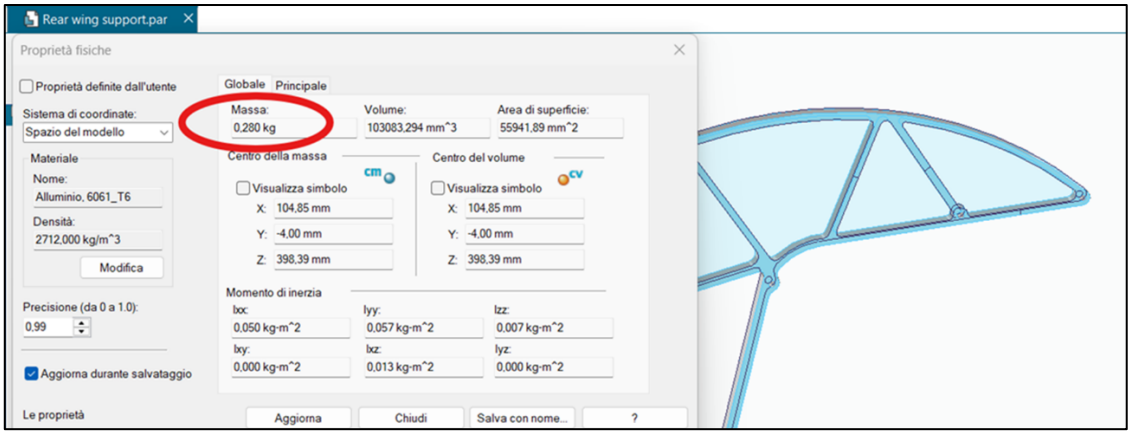


Figura 58 - Massa del singolo supporto nella configurazione quasi definitiva

8. Rimodellazione generale

Partendo dalle considerazioni svolte nei capitoli precedenti si è andati a rimodellare leggermente il profilo (come mostrato in *Figura* 59, *60*, *61* facendo uso delle quote inserite precedentemente di volta in volta.

Si è colto dunque l'occasione per:

- abbassare di 7mm la parte superiore dei supporti (principalmente al fine di limitare ulteriormente la massa);
- irrigidire la zona limitrofa al foro di ancoraggio del tirante aggiungendo materiale;
- rimuovere materiale dalla zona finale del supporto in cui lo stato tensionale era irrisorio.

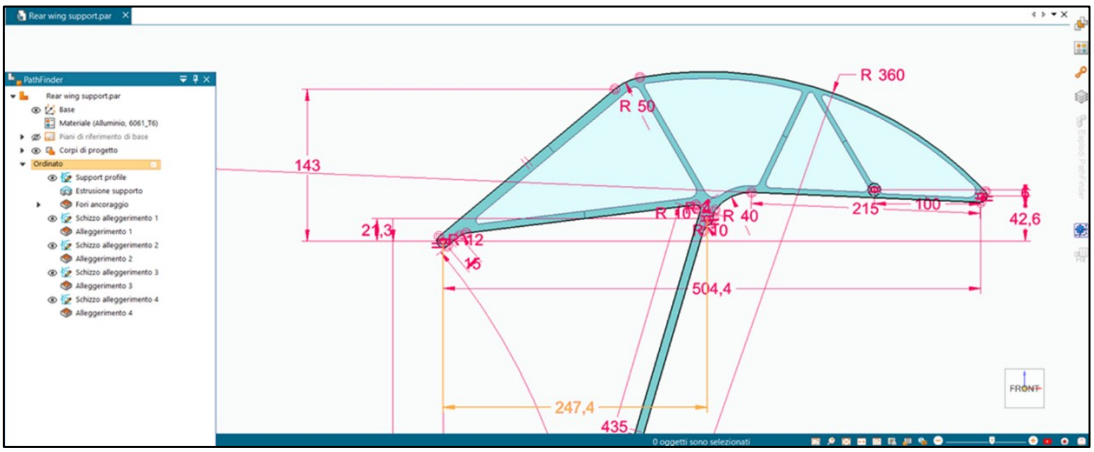


Figura 59 - Quote rimodellazione generale

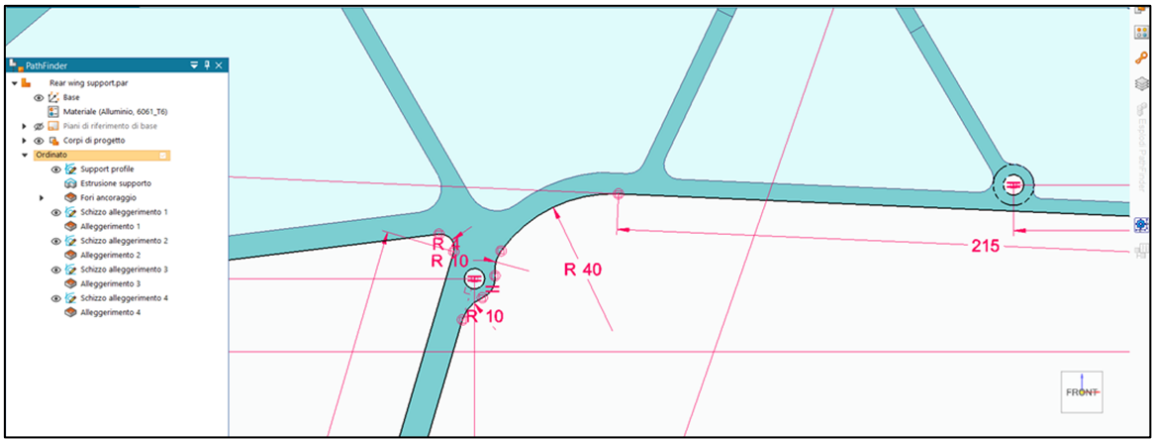


Figura 60 - Ingrandimento 1 quote rimodellazione generale

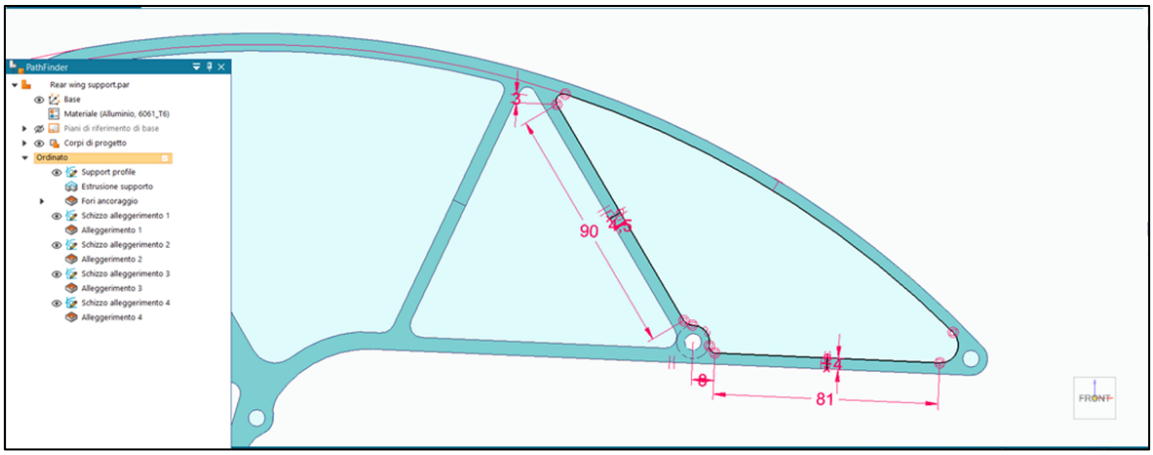


Figura 61 - Ingrandimento 2 quote rimodellazione generale

Eseguendo una simulazione FEM con i medesimi carichi e con la configurazione appena descritta dalle 3 figure soprastanti si ottiene il risultato mostrato in *Figura 62*.

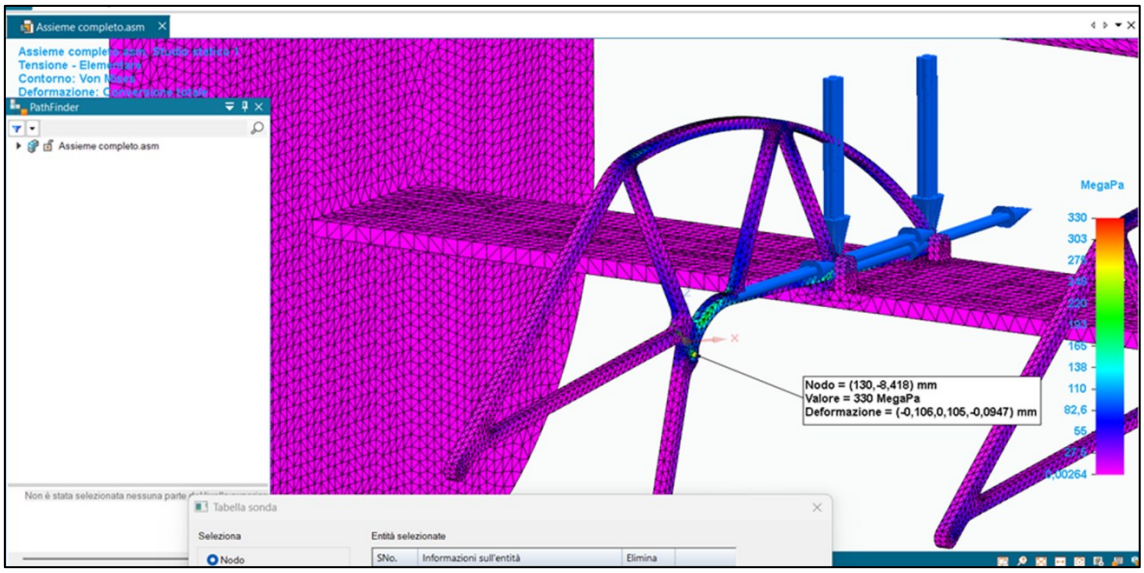


Figura 62 - Risultati simulazione FEM a seguito della rimodellazione generale

Osservando i risultati di tale simulazione, si nota che lo stato tensionale della parte posteriore è rimasto pressoché costante anche rimodellando il supporto. Si è aggravato tuttavia lo stato tensionale del solito punto in corrispondenza del foro di ancoraggio del tirante. Anche lo spostamento massimo in punta è rimasto pressoché invariato. Analogamente la massa è rimasta invariata attestandosi a 280g; va ricordato che si è alleggerita la parte finale del supporto ed irrobustita la parte più critica.

Dopo un confronto con il Team, si è deciso di intervenire in maniera più significativa sulla geometria del supporto mantenendo invariate le coordinate relative a tutti i punti di ancoraggio sia dell'ala posteriore sia del telaio.

Rieseguendo numerose simulazioni ed ottenendo risultati simili, si è deciso di alleggerire la parte "verticale bassa" del supporto che rimane sempre poco sollecitata e di aggiungere ulteriore materiale attorno la zona critica.

9. Considerazioni finali

Modificando ulteriormente la geometria del supporto in maniera piuttosto significativa (agendo sulle quote inserite di volta in volta) in base alle considerazioni fatte nei precedenti capitoli, si è arrivati alla geometria finale. Simulando tale geometria si è ottenuto il risultato mostrato in *Figura 63*.

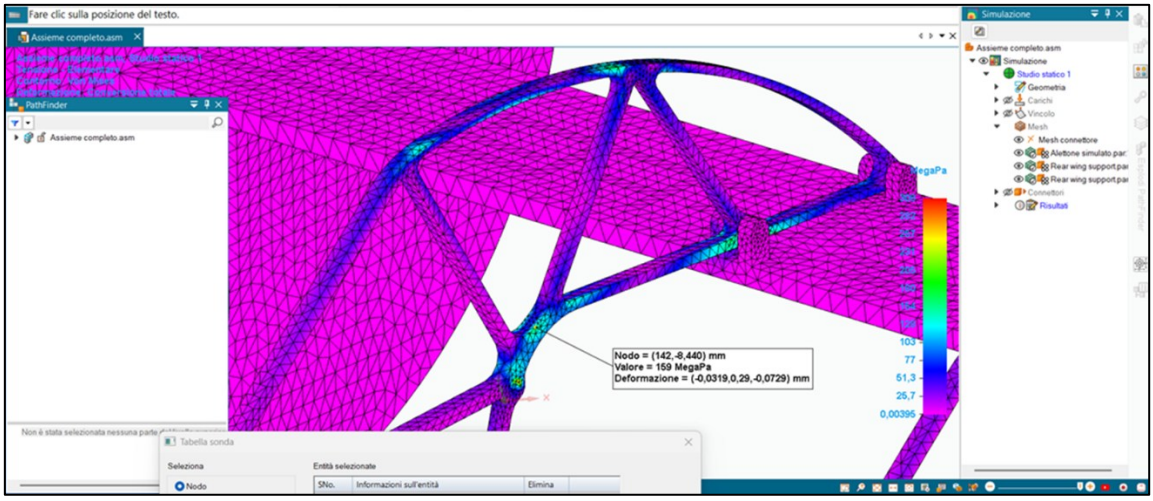


Figura 63 - Simulazioni FEM geometria molto prossima a quella finale

Osservando la *Figura 63* si nota che la quasi totalità del supporto è di colore blu/viola quindi presenta una tensione equivalente nell'ordine dei 50MPa al massimo. Sono tuttavia presenti zone di piccola estensione in cui la tensione equivalente si alza raggiungendo il valore massimo di 159MPa. Tale valore non sarebbe in sicurezza se dovessi rispettare un coefficiente di sicurezza X=2 , il quale prevederebbe una tensione massima di 138MPa. È importante tuttavia ricordare che nello sviluppo del progetto si è più volte scelto di mettersi nelle condizioni più sfavorevoli possibili. Infatti:

- nell'applicazione della forza laterale sull'endplate si è scelto di posizionare il quadratino di dimensioni 15cm x 15 cm nella regione con il più grande braccio possibile rispetto al supporto (nell'angolo in alto a destra dell'endplate);

- il vincolo “Definito dall’utente”, che rappresentava il vincolo imposto dal tirante, è stato applicato solo su uno dei due supporti (solo su quello alla destra del pilota). In tale configurazione, infatti, la forza di drag (pari a 74N per ogni foro di attacco dell’ala posteriore al supporto) viene contrastata solo ed esclusivamente dal tirante posizionato alla destra del pilota (relativo al supporto che si sta progettando). Ciò giustifica un aumento dello stato tensionale equivalente nella zona limitrofa al foro di attacco per il collegamento del tirante.
- l’ala posteriore è stata simulata in modo da renderla il più rigida possibile; in tale configurazione infatti, gli endplates si deformano molto poco aggravando quindi lo stato tensionale del supporto in analisi.

Ai fini di tale Tesi, tali valori sono ritenuti accettabili per i motrivi sopra citati.

Rimane tuttavia il problema relativo alla solita piccola area coincidente con lo spigolo del foro in cui va collegato il tirante. In tale zona si continuano a raggiungere valori di tensione molto elevati. Anche in questo caso valgono le tre considerazioni appena fatte. Va aggiunto inoltre che il vincolo “Definito dell’utente” che modella il vincolo rappresentato dal tirante è un’approssimazione molto più estrema di ciò che avviene nella realtà infatti, come precedentemente spiegato, tale vincolo blocca completamente le rotazioni attorno ai tre assi (terna ortogonale) della superficie interna del foro di fissaggio del tirante. Nel caso reale infatti, alla superficie interna del foro è concesso quantomeno il grado di libertà relativo alla rotazione attorno l’asse del foro.

Da un’analisi visiva dei risultati della simuazione (*Figura 65*) si potrebbe supporre che in tale zona possa aver luogo una concentrazione numerica tale da rendere molto elevato il valore della tensione equivalente. Una strategia per aggirare tale problema potrebbe essere quella di affinare la mesh. Secondo l’autore di tale Tesi tuttavia, al fine di rendere efficace tale strategia, risulta necessario procedere con un altro software di simulazione FEM molto più avanzato di SolidEdge. Quest’ultimo infatti non permette né di decidere in maniera diretta ed esplicita le dimensione degli elementi della mesh, né di rendere più precisa la mesh solo in alcune parti del file *.asm* caricato. SolidEdge, come precedentemente spiegato, permette di regolare in maniera indiretta la dimensione degli elementi della mesh attraverso un cursore senza tuttavia fornire valori numerici precisi riguardo la dimensione degli elementi costituenti la mesh. Da considerazioni fatte con il

Team si è concluso che SolidEdge è in grado, tuttavia, di rimpicciolire in automatico la dimensione degli elementi della mesh laddove necesssario senza allungare esponenzialmente i tempi necessari ad eseguire una simulazione. Tale grado di approssimazione è stato ritenuto sufficiente ai fini di tale progetto.

Come mostrato in *Figura 64*, si è provato ad inserire un raccordo di raggio r = 1,5 mm al fine di ridurre la tensione equivalente massima raggiunta in tale zona.

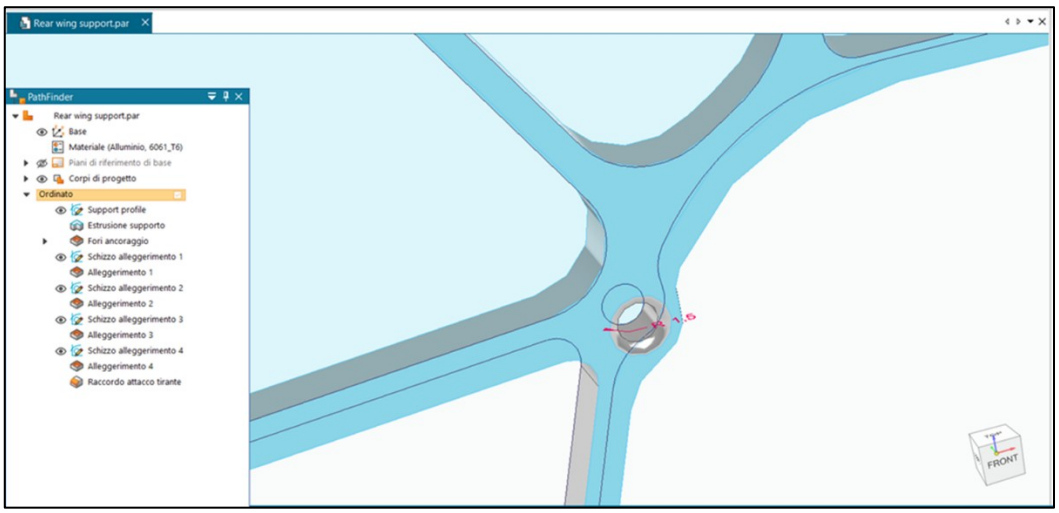


Figura 64 - Raccordo inserito nel tentativo di abbassare la tensione equivalente

Procedendo con la simulazione è emerso che tale soluzione sembra peggiorare il problema come mostrato in *Figura 65*.

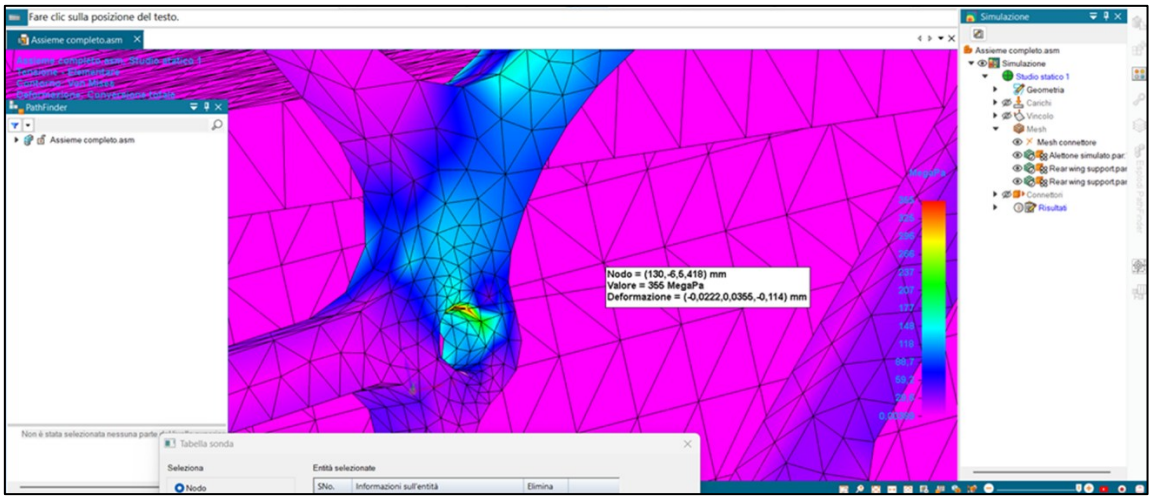


Figura 65 - Sonda in corrispondenza del foro di fissaggio del tirante in presenza del raccordo

Il dato mostrato in *Figura 65* può essere giustificato riflettendo sul fatto che, sebbene il raccordo serva a non far concentrare la tensione negli spigoli, in questo caso, inserendo un raccordo, si sta togliendo materiale nella regione caratterizzata da tensione equivalente maggiore.

Tuttavia, come si può notare sempre da *Figura 65*, la zona rossa in cui la tensione equivalente supera i 350 MPa è molto piccola e ben delineata, le sue dimensioni sono dunque trascurabili rispetto alle zone limitrofe in cui la tensione è molto bassa.

Da un confronto con il Polimarche Racing Team si è concluso che la presenza di tale zona è dovuta al tipo di vincolo imposto. Nelle simulazioni oggetto di tale Tesi infatti, come precedentemente spiegato in maniera più approfondita, il vincolo imposto dal tirante è stato applicato impedendo alla superficie interna del foro di fissaggio di traslare lungo la direzione imposta dal tirante e di ruotare attorno ai tre assi. Le simulazioni presenti nel report fornitomi dal Polimarche Racing Team riguardo lo sviluppo del pezzo precedente erano state eseguite con NX ed il vincolo rappresentato dal tirante era stato simulato imponendo costante la distanza tra il punto di fissaggio del tirante al supporto e il punto di fissaggio del tirante al telaio. Viene consentita dunque, in tal modo, una rotazione di piccoli angoli, la quale tende a far abbassare in maniera significativa tale valore di tensione equivalente.

10. Verifiche finali delle richieste progettuali

In questo capitolo, l'autore di tale Tesi ha deciso di riportare, una volta per tutte, le verifiche eseguite nel corso della progettazione del supporto per assicurarsi che tale soddisfacesse le specifiche imposte da Regolamento e le richieste avanzate dal Polimarche Racing Team.

Per quanto concerne il vincolo imposto dal Regolamento riguardo il massimo spostamento orizzontale dell'ala posteriore si faccia riferimento ai risultati della simulazione FEM mostrati in *Figura 66*.

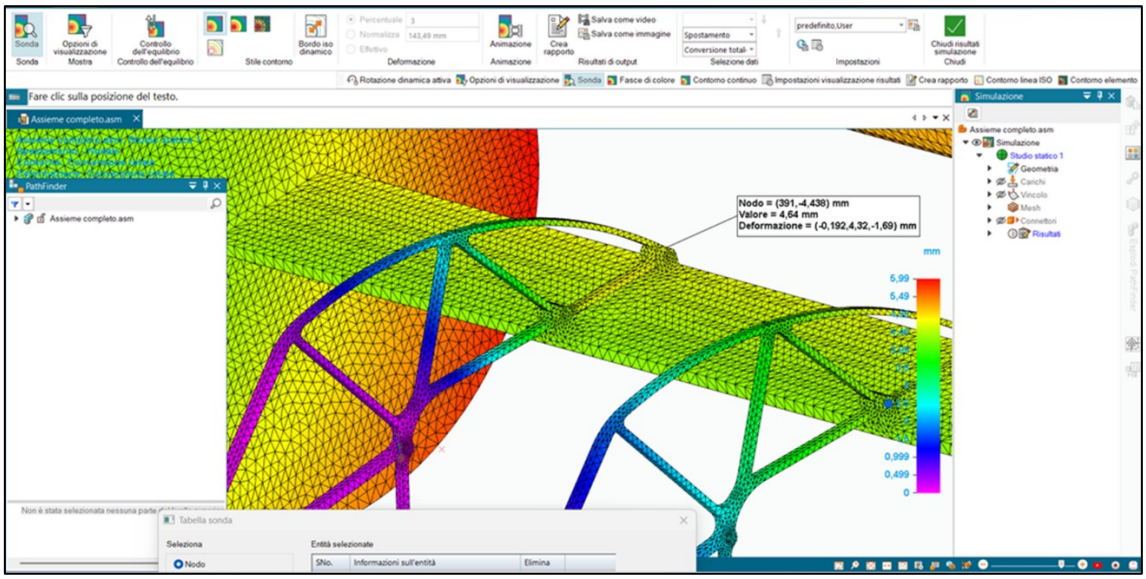


Figura 66 – Verifica traslazione orizzontale massima ala posteriore

Come si può notare dalla *Figura 66*, il punto che subisce il massimo spostamento si trova nella punta del supporto (parte posteriore finale) e manifesta uno spostamento massimo pari a 4,32 mm lungo l'asse Y, quindi ampiamente sotto il limite consentito di 10 mm.

Per quanto riguarda la massa, invece, si è riusciti ad ottenere una riduzione pari a 24g per singolo supporto. Il nuovo supporto ha, infatti, una massa pari a 226g, come mostrato in *Figura 67*.

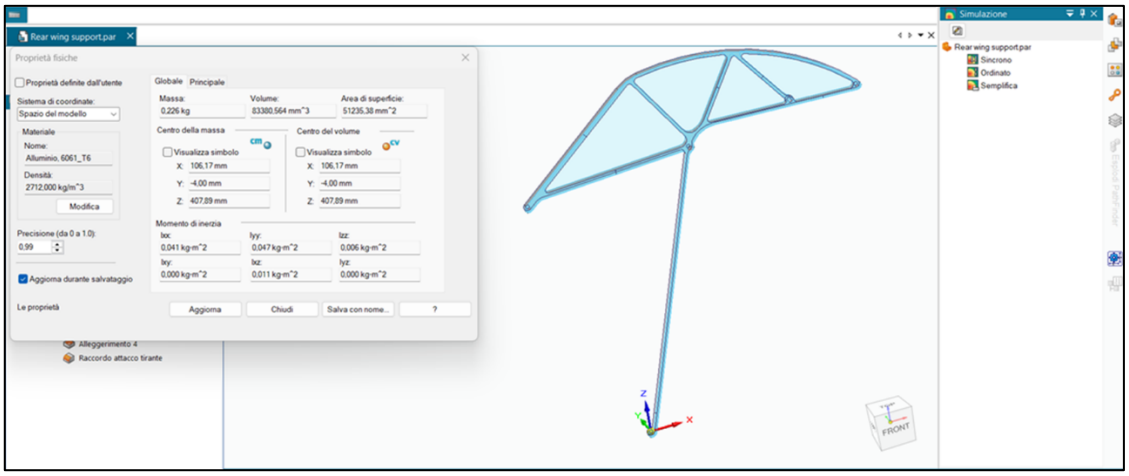


Figura 67 – Massa supporto nella configurazione definitiva

11. Conclusioni e sviluppi futuri

Attraverso tale Tesi, l'autore ha cercato di illustrare l'intero procedimento e tutte le considerazioni che hanno portato alla realizzazione dei nuovi supporti di sostegno per l'ala posteriore della vettura di Formula SAE del Polimarche Racing Team nella configurazione definitiva rappresentata graficamente nelle tavole tecniche riportate in Appendice A.

Tali supporti sono ora adeguati al nuovo Regolamento e alle richieste progettuali avanzate dal Polimarche Racing Team essendo inoltre più leggeri dei precedenti.

Tale Tesi si è basata interamente su simulazioni FEM. Tali simulazioni, per quanto precise ed affidabili non potranno mai sostituire una verifica reale del comportamento di tali supporti nelle effettive condizioni di esercizio della vettura in quanto si dovranno tenere in considerazione numerose variabili, le cui analisi non rientravano fra gli scopi di tale Tesi.

È essenziale inoltre ricordare che tali simulazioni FEM sono state eseguite utilizzando SolidEdge. Risultati differenti potrebbero essere ottenuti utilizzando un software differente. Anche i vincoli impostati si sono dovuti adeguare ad una semplificazione del problema reale, il quale presenta un maggiore grado di complessità.

Sviluppi futuri potrebbero portare a considerazioni differenti da quelle mostrate in tale Tesi ragionando, ad esempio, su una riduzione o su un aumento dello spessore di tali supporti oppure su una diversa posizione del punto di ancoraggio del tirante di collegamento fra i supporti e il telaio della vettura.

12. Bibliografia

- Shigley "*Progetto e costruzione di macchine*", 5ª edizione, J. Keith Nisbett, Richard G. Budyna, McGraw-Hill;
- FR.RW.2cm , Report fornito dal PoliMarche Racing Team;
- "*Concepts and Applications of Finite Element Analysis*", fourth edition, Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, Robert J. Wift.

13. Sitografia

- https://docs.sw.siemens.com/it-IT/doc/246738425/PL20240823435823841.user_interface/xid1816059
- https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx

Appendice A – Tavola tecnica del singolo supporto

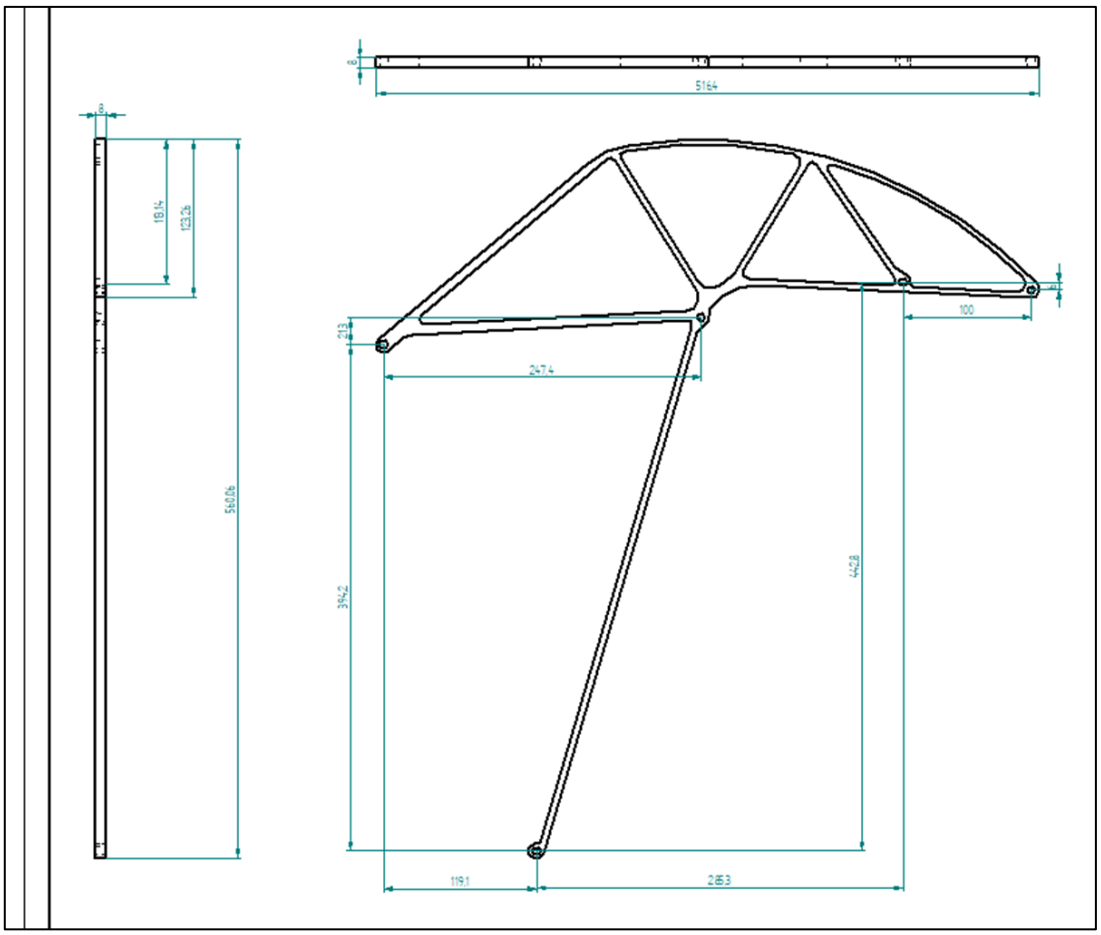


Figura 68 - Tavola tecnica supporto ala posteriore

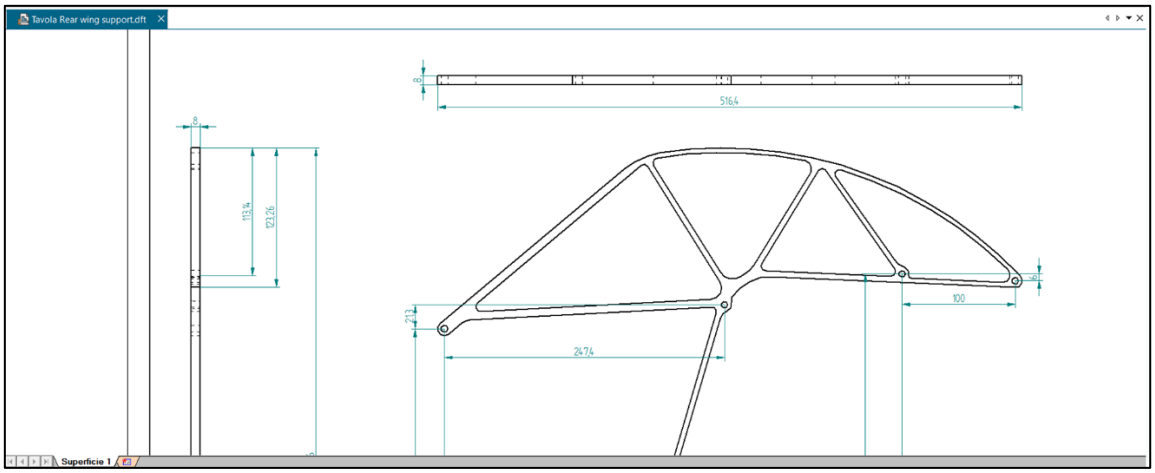


Figura 69 - Ingrandimento 1 - Tavola tecnica supporto ala posteriore

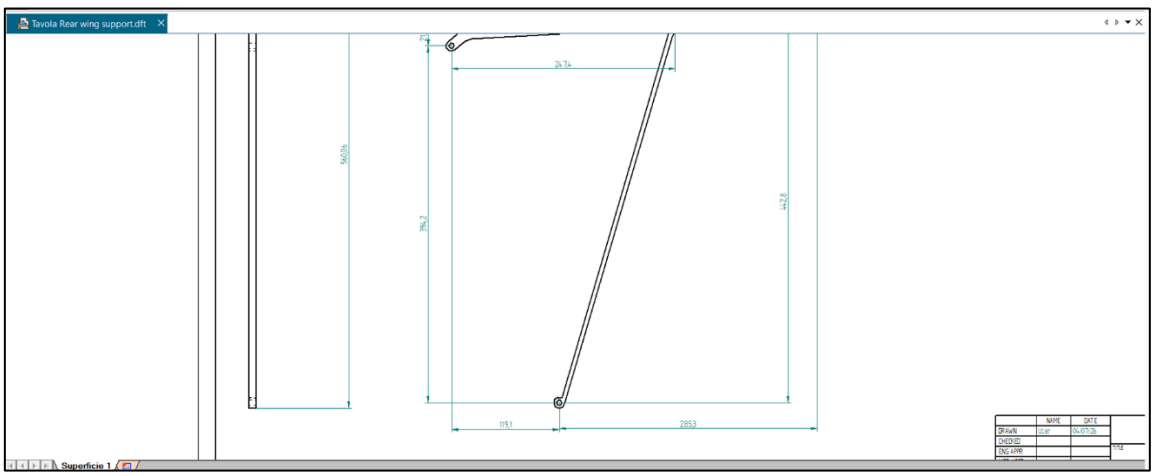


Figura 70 - Ingrandimento 2 - Tavola tecnica supporto ala posteriore