



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA  
CURRICULUM PROGETTAZIONE MECCANICA E MODELLAZIONE**

# **PROGETTAZIONE E PRODUZIONE DI UN SEDILE IN FIBRA DI CARBONIO PER LA VETTURA DI FORMULA SAE DEL TEAM UNIBO MOTORSPORT**

**Relatore**

**Prof. Tommaso Maria Brugo**

**Presentata da**

**Filippo Giusti**

**Correlatore**

**Prof. Nicolò Cavina**

---

**Sessione V**

**Anno Accademico 2025/2026**



***La leggerezza non è un obiettivo tecnico, è una filosofia***

***-Horatio Pagani***

## Abstract

La riduzione del peso di una vettura, di qualsiasi categoria, è fondamentale per ridurre consumi, aumentare prestazioni e migliorare la dinamica di guida.

Questo è ancora più accentuato nelle auto da competizione, per questo l'utilizzo di **componenti realizzati in fibra di carbonio** è molto diffuso perché permette di avere prestazioni meccaniche migliori con una riduzione significativa di peso.

Normalmente quando si parla di materiali compositi, si può parlare anche di **pannelli sandwich**: quindi l'utilizzo di un core di un materiale anche non composito tra due strati di polimero rinforzato; questa tecnica permette di migliorare la resistenza meccanica del componente e, essendo il core estremamente leggero, di ridurlo ulteriormente il peso.

Questa tesi mira ad approfondire questo argomento ed ha come obiettivo quello di **progettare e produrre un sedile** che sia il più comodo e versatile possibile anche per piloti di diversa statura, che permetta un corretto packaging di tutti i componenti in macchina e che sia leggero per ridurre il peso totale della formula ed aumentarne quindi le prestazioni in pista.

Per raggiungere questi obiettivi si è partito studiando il sedile degli anni scorsi e parlando con i piloti per capire come si poteva migliorare, si è quindi assemblato un **mockup**, ossia un cockpit fittizio regolabile per simulare una posizione di guida anche senza che il prototipo fosse pronto con l'obiettivo di comprendere le dimensioni di massima del componente da progettare.



Dopo aver delineato la forma migliore si è passato al disegno al **CAD**, successivamente a capire come montare il pezzo in macchina e infine si è svolta e **risolta una simulazione** per cercare di utilizzare meno materiale possibile raggiungendo comunque gli obiettivi che erano stati prefissati ossia quindi una certa resistenza a carichi statici, durevole nel tempo, e deformazioni massime ridotte.

Come ultimo step si è passati alla produzione di tutta la **documentazione** necessaria per poi **produrre fisicamente** il pezzo.

Il risultato è stato un sedile di circa quattrocento grammi più leggero rispetto a quello precedente, con una **riduzione di peso del 29%**.

Il nuovo componente, montato in macchina senza interferenze, ha inoltre ricevuto un riscontro molto positivo da parte dei piloti e dai giudici specializzati in ergonomia di guida delle varie competizioni in cui si è preso parte.

## Sommario

Abstract.....	4
1 Introduzione e stato dell'arte.....	9
1.1 Cos'è la formula student.....	11
1.2 Generalità sui materiali compositi.....	12
1.3 Programmi utilizzati.....	16
2 Progettazione.....	18
2.1 Costruzione mockup piloti.....	19
2.1 Excel riassuntivo e cenni di regolamento.....	21
2.2 Modalità di progettazione.....	24
2.2 Versioni precedenti.....	29
2.3 Attacchi cinture.....	30
2.4 progettazione stampo.....	32
3 Simulazione e layup.....	38
3.1 Obiettivi simulazione.....	38
3.2 Forze e vincoli.....	39
3.3 Materiali utilizzati.....	43
3.4 Impostazione simulazione.....	44
3.5 Mesh.....	48
3.5.1 Impostazioni preliminari.....	48
3.5.2 Analisi a convergenza.....	49
3.5.3 Qualità della mesh.....	52
3.6 Calcolo del peso finale e dei materiali richiesti.....	58
4 Stesura documentazione tecnica.....	59
4.1 Redazione plybook e simulazione stendimento pelli.....	59
5 Produzione.....	64
6 Validazione fisica componente.....	69

7 Conclusioni .....	70
8 Bibliografia .....	72



# 1 Introduzione e stato dell'arte

L'obiettivo di questa tesi è quello di progettare e realizzare un sedile in fibra di carbonio per una vettura di formula student.

I principali obiettivi che questo componente deve garantire sono quelli di essere il più leggero possibile e di rispettare il regolamento della competizione, altre caratteristiche fondamentali sono il corretto montaggio in macchina, senza interferire con altri componenti e quello di garantire una posizione di guida che sia il più comoda possibile per i piloti.

Per questioni di budget il sedile della formula student di UniBo Motorsport è unico anche se i piloti sono cinque, ciò significa che è richiesto realizzare una seduta che possa essere corretta per persone di stazze ed altezze diverse.

Normalmente nelle vetture ordinarie vengono prediletti il basso costo dei componenti e il comfort rispetto alle prestazioni: i sedili sono solitamente realizzati con una struttura interna, un'imbottitura ed un rivestimento esterno. Per quel che riguarda i materiali utilizzati per la struttura normalmente si parla di metallo, l'imbottitura è invece realizzata con schiuma poliuretanic a celle aperte o fibre sintetiche e il rivestimento esterno invece tessuto o PVC (chiamata successivamente ecopelle).

Il risultato è sicuramente un sedile comodo ma estremamente pesante: di media 15 kg e circa la metà per un sedile racing ma comunque non da competizione.

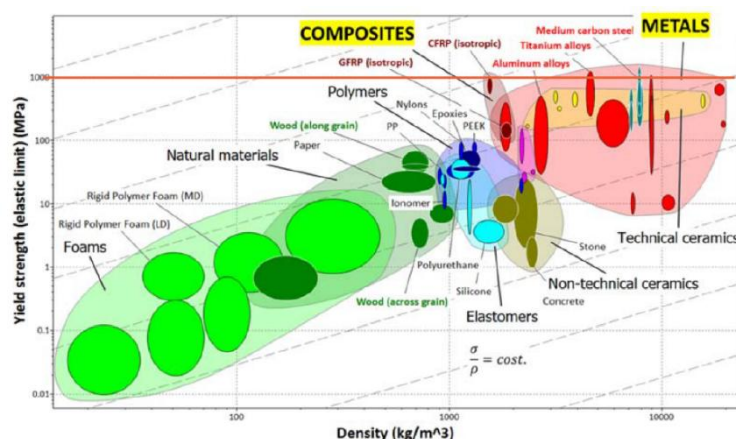


Figura 1 Caratteristiche di alcuni materiali, dalle dispense del corso tenuto dal professor Giorgini

Nelle auto da competizione invece il costo delle materie prime e il comfort sono secondari, si predilige infatti il peso totale della vettura, che deve essere il più basso possibile.

Come materiali nei campionati sono estremamente diffusi i materiali compositi ed in particolare la fibra di carbonio, materiale con il quale è stato realizzato l'oggetto di questa tesi.

Proprietà	Nomex (a)	Kevlar (a)	Nylon 6	PET	Rayon (b)	Vetro	Acciaio
Densità (g / cm <sup>3</sup> )	1.38	1.44	1.14	1.38	1.52	2.49-2.55	7.75-7.89
Punto di fusione (°C)	375	-	228	265	306	-	1450-1595
Punto di rammollimento (°C)	-	550	-	-	-	750-800	-
T <sub>g</sub> (°C)	280	-	50	69	157	-	-
Carico di rottura (10 <sup>3</sup> kg / cm <sup>2</sup> )	28	25-32	9-9.8	11.2	7.0	14-21	24-28
Allungamento a rottura (%)	14-17	2.8-4	18.3	14.5	10	3.5	2.2

*Figura 2 Comparazione tra le caratteristiche di un composito e l'acciaio, dalle dispense del corso del professor Giorgini*

Il vantaggio principale della fibra di carbonio è l'elevatissima resistenza specifica.

Il sedile oggetto di questa tesi è stato realizzato con un unico pannello sandwich in fibra di carbonio per cercare di ridurre il più possibile il peso.

## 1.1 Cos'è la formula student

La Formula SAE è una competizione ingegneristica universitaria istituita dalla Society of Automotive Engineers nel 1981 in cui diverse squadre delle università di tutto il mondo si affrontano in gare con i loro prototipi.

Le squadre sono composte da studenti iscritti ad uno stesso ateneo e hanno il compito di portare in gara un veicolo monoposto conforme ad un preciso regolamento.

L'intera fase di progettazione, produzione e messa in pista del veicolo è svolta dai soli studenti e sono previste diverse prove che vanno a valutare il progetto proposto dalle singole università sotto ogni tipo di aspetto: sia tecnico (con prove statiche e dinamiche) che economico che commerciale.

Le prove dinamiche, come suggerisce il nome, implicano la messa in pista del veicolo e sono divise in skip pad, acceleration ed endurance.

Il team è diviso in vari reparti, questo progetto è stato svolto in collaborazione con il reparto di telaio e compositi.

Compito della divisione è progettare e realizzare una serie di componenti in materiale composito e occuparsi di tutta la parte di ergonomia del pilota.

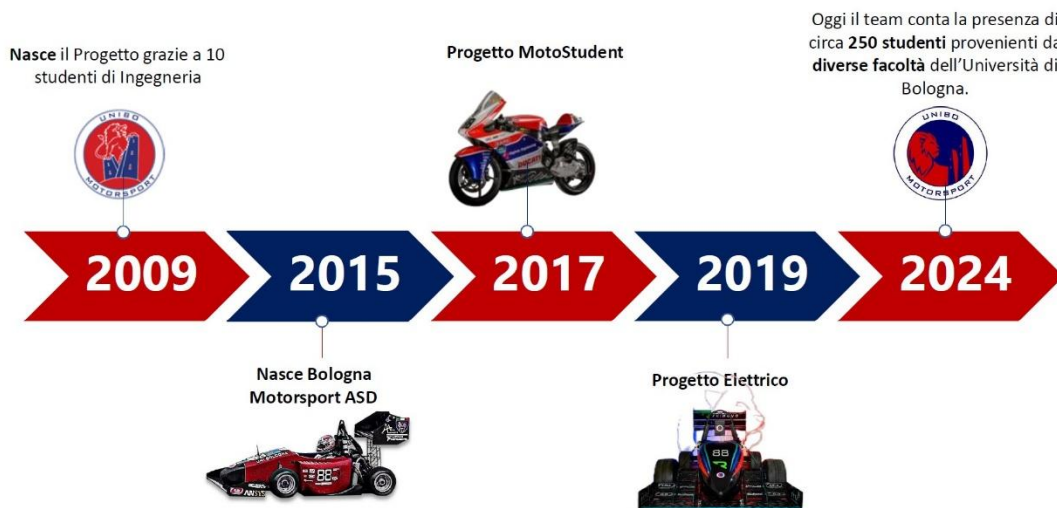


Figura 3 Linea temporale del team UniBo Motorsport, dalla presentazione ufficiale di UniBo Motorsport

## 1.2 Generalità sui materiali compositi

Un materiale composito è un particolare tipo di materiale costituito da due o più componenti eterogenei, nella fibra di carbonio questi componenti sono di norma una matrice plastica termoindurente e un materiale di rinforzo, la fibra di carbonio appunto.

La matrice è presente in fase continua ed ha il compito di fornire una geometria definita dal materiale e di proteggere e legare il rinforzo, presente invece in fase discontinua e fornisce al materiale le proprietà meccaniche di resistenza ed elasticità.

Di norma per i materiali compositi si possono distinguere tre diverse tipologie di rinforzo: a particelle, a fibre corte e a fibre lunghe.

Per quanto riguarda il componente in oggetto è stata utilizzata esclusivamente la fibra lunga, visto che di fatto garantisce migliori proprietà meccaniche.

Questi vengono solitamente prodotti sotto forma di tessuti (prepreg o meno, quindi pre-impregnati con la matrice o no), i quali si differenziano per:

- Drapeability o drappeggiabilità, ossia la capacità di essere piegati per adattarsi alle superfici con doppia curvatura;
- Crimp o piegatura, ossia la quantità di piegatura della singola fibra all'interno della trama del tessuto (con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche);
- Grado K, ossia il numero di fibre di carbonio puro che vanno a comporre un filamento di trama e ordito.

I tessuti solitamente più utilizzati sono:

- Unidirezionale: tutte le fibre sono affiancate ed orientate secondo una direzione specifica e vengono unite unicamente dalla matrice (non sono quindi intrecciate). Questo permette di ottenere un valore del crimp pari a 0, con conseguenti proprietà meccaniche massimizzate, ma allo stesso tempo la drapeability di questo tessuto non si presta particolarmente a geometrie complesse, soprattutto con doppia curvatura;
- Plain: ordito e trama si alternano regolarmente 1 sopra - 1 sotto. I numerosi alternarsi di fibre ne comportano una maggiore piegatura, con conseguente alto valore di crimp e bassa drapeability;

- 4-5-8 Harness Satin: la trama passa sopra all'ordito 3, 4 oppure 7 volte prima di passargli sotto una volta sola. Questo garantisce un valore medio di drapeability e un basso crimp, garantendo valori di resistenza e rigidità elevati;
- 2x2 e 4x4 Twill: l'ordito e la trama si alternano 2 sopra - 2 sotto oppure 4 sopra - 4 sotto, fornendo valori medi di drapeability e crimp. È la tramatura più comune e quella che si è utilizzato per il componente di interesse.

Il laminato finale viene realizzato sovrapponendo (e incollando) diverse lamine, che possono presentare anche diversa tramatura e/o diversa orientazione delle fibre tra loro.

Un altro tipo di laminazione, non usato però nel componente in oggetto, è detto laminazione in wet: questa tecnica consiste nell'utilizzare un tessuto non pre-impregnato di resina, stenderlo sullo stampo desiderato e, solo successivamente, inserire, tramite vuoto o pompa, la resina per impregnare il tessuto. Questa tecnica è più semplice da attuare ma garantisce proprietà meccaniche peggiori vista la presenza di più resina nel componente a parità di fibra e più vuoti.

Per studiare il comportamento del laminato viene utilizzata una teoria matematica in grado di analizzare situazioni anche complesse e dare risultati attendibili.

Su questa teoria si basano anche i criteri di resistenza dei materiali compositi: come per i materiali isotropi esistono criteri (come quelli di Von Mises e Tresca) che determinano quando il materiale arriva a rottura, sono stati sviluppati vari criteri anche per i materiali anisotropi (e ortotropi, come nel nostro caso, dato che il comportamento di ogni lamina di carbonio è assimilabile a quello di un materiale ortotropo, essendo intrecciata con filamenti a 90°).

Questi criteri devono comprendere tutte le componenti di sforzo ed essere in linea con i dati sperimentali.

È importante specificare che le tensioni  $\sigma_i$  variano linearmente all'interno della singola lamina e possono essere discontinue all'interno di lamine adiacenti.

Nasce quindi il criterio quadratico di Tsai-Hill, poi migliorato nel criterio polinomiale di Tsai-Wu.

Il criterio generico per materiali anisotropi può essere espresso come:

$$f(\sigma) = \sum_{i=1}^6 f(\sigma_i) = \sum_{i=1}^6 \left( F_i \cdot \sigma_i + \sum_{j=1}^6 F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \right)$$

Si ha rottura quando  $f(\sigma)$  è maggiore di 1.

Per materiali ortotropi e condizioni di carico planari, la relazione può essere semplificata riducendo il numero di parametri di resistenza  $F_{ij}$  da conoscere:

$$f(\sigma) = F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{66} \cdot \sigma_6^2 + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \geq 1$$

Per ricavare le costanti  $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{66}, F_{12}$  si ricorre a stati di tensione e compressione mono-assiali, ponendo le singole  $\sigma_i$  pari alla tensione di snervamento:

- Trazione lungo 1:  $\sigma_1 = X_T$
- Compressione lungo 1:  $\sigma_1 = X_C$
- Trazione lungo 2:  $\sigma_2 = Y_T$
- Compressione lungo 2:  $\sigma_2 = Y_C$
- Taglio nel piano 12:  $\sigma_6 = \tau_{12} = S$

Da queste prove in casi semplici è possibile determinare i seguenti valori:

$$F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_T \cdot X_C}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_T \cdot Y_C}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

tensione bi-assiale e la risoluzione risulterebbe particolarmente complicata; per questo motivo viene solitamente utilizzato uno dei seguenti approcci:

- Il termine  $F_{12}$  viene trascurato, poiché a rottura questo stato di tensione ha poca influenza sul risultato del criterio;
- Il termine viene espresso come:  $F_{12} = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}$ .

Dato che la matrice di rigidità dipende dall'orientazione della  $k$ -esima lamina, variando l'angolo di orientazione della lamina  $\theta_k$  è possibile ottenere un grafico che mostra l'andamento della resistenza di Tsai-Wu al variare di quest'ultima.

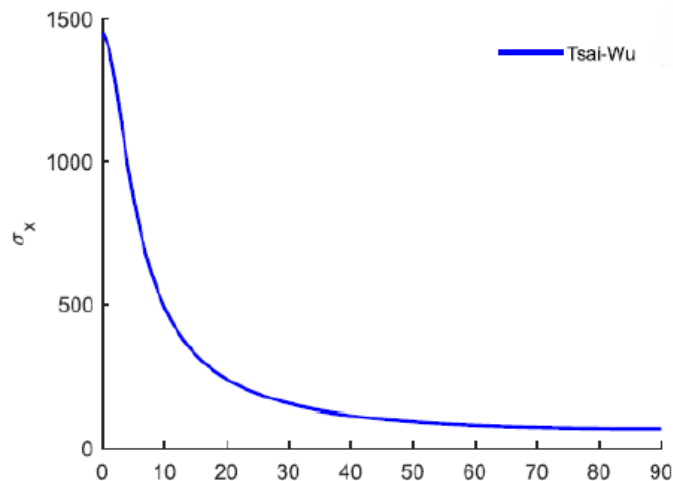


Figura 4 Andamento Tsai-Wu, dalla tesi di Derek Biagini, progettazione e analisi di un collegamento bullonato per un cerchione in fibra di carbonio

Nella figura soprastante si può vedere il grafico che mostra l'andamento della resistenza a rottura  $\sigma_x$  in funzione dell'angolo di orientazione della k-esima lamina  $\theta_k$ .

Come accennato in precedenza per quel che riguarda il sedile è stato realizzato con un unico pannello sandwich; i pannelli sandwich sono costituiti da tre elementi principali:

Skin esterne: possono essere realizzate alluminio, acciaio o CFRP. Sono sottili, rigide e resistenti e agiscono insieme per contrastare il carico di flessione esterno.

Sono quindi caratterizzate da elevata rigidità ed elevata resistenza a trazione e compressione.

Core interno: è formato da celle esagonali e solitamente è realizzato in alluminio o Nomex. A differenza delle skin esterne è spesso, leggero e cedevole.

Per questo le sue proprietà principali sono: bassa densità, elevata rigidità e resistenza solamente a taglio, le caratteristiche di resistenza a tensione, se comparate con le pelli esterne di carbonio, sono approssimabili a zero.

Adesivo: lega tra loro le skin e il core per consentire il trasferimento del carico tra le skin.

Il vantaggio principale dei pannelli sandwich è il momento di inerzia estremamente più alto a parità di quantità di carbonio utilizzata, essendo infatti la maggior parte del materiale lontana dall'asse principale di inerzia la rigidità totale del pannello è molto più elevata.

### 1.3 Programmi utilizzati

Il software che è stato utilizzato per la progettazione e per la validazione dei materiali compositi è un CAD della Siemens, NX, al suo interno ha integrato Fibersim che ha permesso di simulare con precisione lo stendimento delle pelli sulle superfici più disparate e di creare il plybook.

Un altro vantaggio di NX è la possibilità di lavorare con discreta semplicità con il design delle superfici, fondamentale per i materiali compositi.

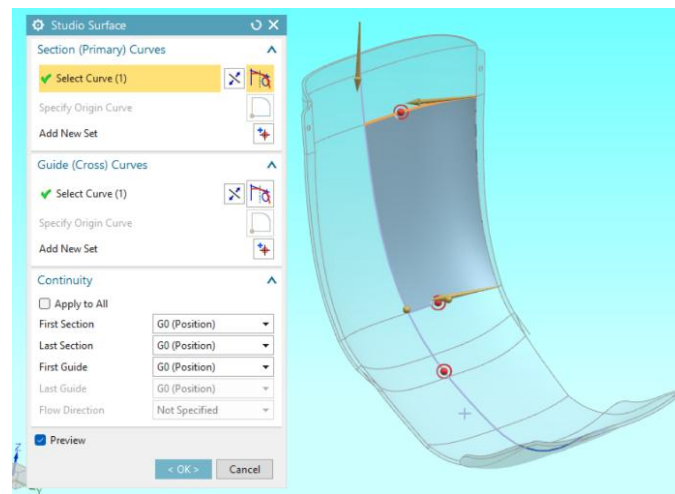


Figura 5 Applicazione del comando Studio surface di NX

Per quel che riguarda la modellazione dei componenti in generale e quindi anche per il sedile in oggetto, normalmente si parte da un pezzo solo in superficie per poi andare a solidificarlo in un secondo momento, cercando anche di sfruttare eventuali simmetrie. A tal proposito, una feature molto utilizzata è stata “studio surface” (shortcut “n” da tastiera); questo comando permette di unire due linee disegnate precedentemente con una superficie calcolata automaticamente dal software.

Per componenti disegnati stile stampa 3D, come il componente in oggetto, questo permette, partendo da una serie di sketch, di arrivare al risultato finale ed utilizzare superfici a doppia curvatura senza problemi.

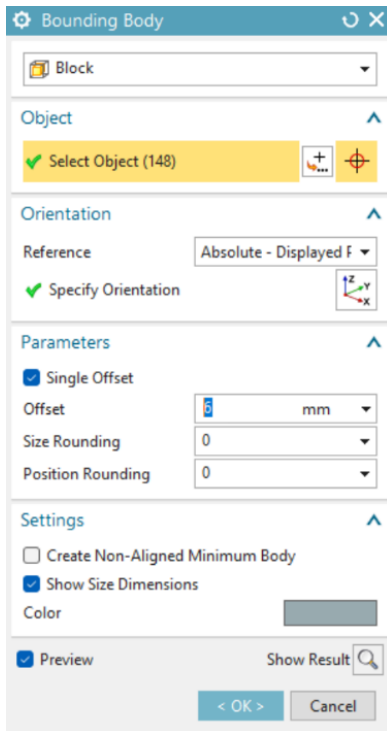


Figura 6 Applicazione del comando Bounding body di NX

Una feature che è stata fondamentale per il design dello stampo è stato il comando “bounding body”. Questa permette, partendo da una superficie chiusa, di creare automaticamente un solido che si posiziona all’interno di essa e che sarà poi tagliato per prendere la forma dello stampo finale sfruttando la geometria in superficie del componente che si vuole disegnare.

Come detto, NX ha integrato Fibersim, con il quale si può simulare la stendibilità di una pelle su una generica superficie, prendendo come input le proprietà del carbonio crudo come obiettivo finale di creare un plybook in cui ogni singola pelle potrà essere laminata senza problemi.

Un plybook è un documento nel quale sono riportate tutte le pelli da stendere in ordine e con la zona, materiale e orientamento corretto per garantire una laminazione identica rispetto a quella che è stata prevista da simulazioni (sequenza di laminazione). Argomento che sarà poi approfondito nell’apposito capitolo.

Oltre a NX e Fibersim sono stati utilizzati Autocad 2025, un software per disegno 2D, per definire ed ottimizzare il layout delle pelli che saranno poi tagliate con un plotter o a mano.

Per quel che riguarda invece tutta la parte di simulazione è stato utilizzato Ansys 2021, in particolare il pacchetto ACP e static structural, ma anche questo sarà approfondito nell’apposito capitolo.

## 2 Progettazione

La progettazione del sedile è partita con l'assemblaggio (non ci si è occupati della progettazione) di un mockup per la posizione di guida dei piloti.

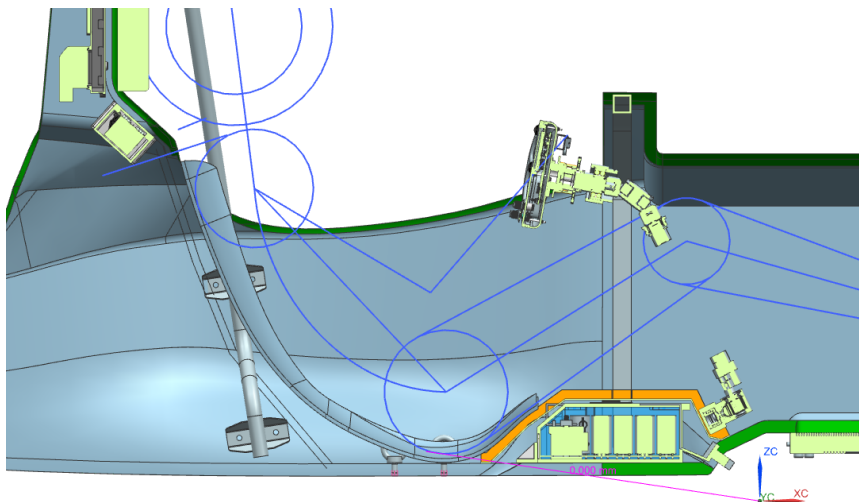
Dopo aver assemblato la struttura si è organizzata una riunione con tutti i piloti nella quale si è definita la posizione di guida definitiva, le misure sono state salvate su un file Excel che è stato poi il punto di partenza per il disegno al CAD.

Come detto l'obiettivo principale è stato quello di ottimizzare il più possibile il sedile, per ridurre peso e soprattutto le dimensioni.

Essendo il primo anno in cui si realizza un prototipo ibrido, infatti, la gestione degli spazi e del packaging interno della vettura è cruciale.

La forma del sedile deve anche permettere un alloggiamento di un pacco batterie sotto la zona adibita ad ospitare le gambe del pilota.

A differenza degli scorsi anni la geometria in vista laterale deve essere più complessa e avere una curvatura importante in quest'ultima zona.



*Figura 7 Packaging della vettura*

Il problema principale di questa geometria è quello della gestione della flessione indotta dal pilota durante la normale guida del prototipo, questione che sarà approfondita nel capitolo delle simulazioni strutturali.

## 2.1 Costruzione mockup piloti

Lo scopo principale di questa prova è quello di simulare un telaio modificabile in attesa della laminazione di quello definitivo, fondamentale sia per il sedile ma anche per il design del telaio stesso.

Come anticipato si è prodotto un sedile unico per più piloti, è stato quindi necessario trovare una posizione di guida in cui ognuno potesse stare il più comodo possibile e al tempo stesso vedere correttamente fuori dalla vettura, è molto importante per i piloti sportivi avere costantemente in vista la ruota anteriore interna alla curva che si deve impostare.

La struttura del mockup è composta da profilati di alluminio a quattro gole e tavole di legno, le viti utilizzate sono specifiche per questi profilati e permettono, diminuendo la coppia di serraggio, lo scorrimento dei componenti in cui sono alloggiati, rendendo quindi la struttura regolabile.

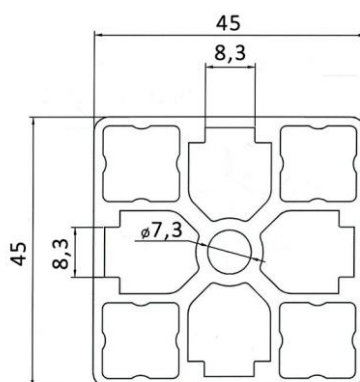


Figura 8 Dimensioni tubolari utilizzati, da [profilialluminio.milper.it](http://profilialluminio.milper.it)

Una volta assemblato il mockup si è organizzata una riunione con tutti (cinque) i piloti per decidere la posizione di guida ideale, l'obiettivo era quello di capire angoli e dimensioni di massima del sedile.

Come anticipato, anche il discorso packaging è molto importante: una delle prime iterazioni del sedile prevedeva uno schienale dritto, con lo sviluppo del progetto si è deciso di incurvare lo schienale, limitatamente al comfort dei piloti, per permettere l'alloggiamento della batteria low voltage dietro di essa.

Un altro vincolo importante è stato dato dal pacco batterie, che di fatto rende ibrida la vettura.

Dopo diverse iterazioni si è deciso di posizionarlo sotto le gambe del pilota, era quindi necessario rialzare l'ultima parte della seduta per permettere l'alloggiamento di quest'ultimo.

Una volta stabiliti e riprodotti questi vincoli sulla struttura, utilizzando piastre aggiuntive e un foam di poliuretano per simulare il pacco batterie, si è passati alle prove di seduta con i vari piloti, partendo dal più alto, quello che realisticamente avrebbe introdotto più vincoli alla seduta.

La semplificazione della struttura è rappresentata dalla seguente immagine, per ogni misura è stato chiesto ai piloti quale ritenessero essere la più comoda, la più alta (valida soprattutto per i piloti piccoli) e la più bassa (per i piloti grandi).

L'obiettivo era quello di trovare delle misure comuni a tutti i range che i piloti avrebbero comunicato e che sarebbero diventate poi le misure effettive del sedile.

Tutte le misure utilizzate infatti erano nel range di tutti i piloti a parte uno, il più piccolo, per il quale è stato realizzato un sovra sedile in resina poliuretano a celle aperte.

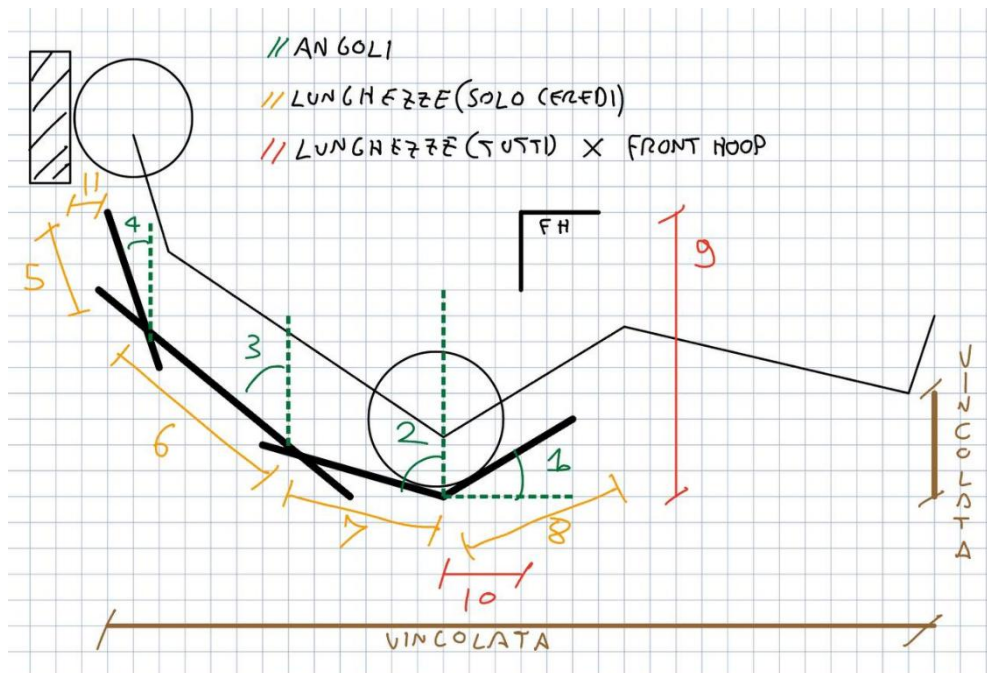


Figura 9 Sketch delle misure del mockup



Figura 11 Pilota più grande



Figura 10 Pilota più piccolo



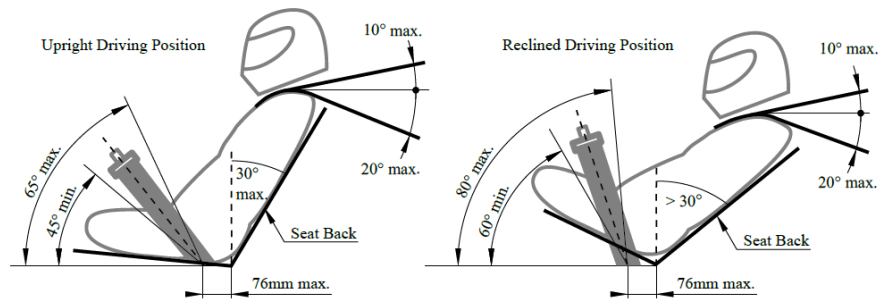


Figure 13: Lap belt and shoulder harness mounting

*Figura 13 Regola specifica per le cinture, dal regolamento ufficiale della formula student germany*

Le regole sopra elencate vincolano la posizione del pilota in macchina in modo tale per cui la sua sicurezza non possa essere messa in discussione in nessuna condizione, in particolare durante un ribaltamento di 180 gradi della macchina.


Il sedile deve far sedere il pilota conseguentemente a queste regole.

In particolare, devono esserci sempre almeno cinquanta millimetri di clearance tra il casco del pilota più alto e di un fantoccio (un uomo di dimensioni che coprono il 95% della popolazione) e due tubi con specifiche caratteristiche vincolati al telaio e considerati non distruttibili, in caso di ribaltamento del veicolo il pilota sarà quindi protetto contro l'asfalto.

Ci sono poi alcune regole sul corretto montaggio delle cinture, che si devono applicare a tutti i piloti e che sono state particolarmente vincolanti per quel che riguarda la definizione di alcune parti di geometria del sedile.

Il regolamento formula student non imposta nessun tipo di vincolo per quel che riguarda la resistenza meccanica e la flessione massima del sedile, come detto l'obiettivo rimane quello di progettare una seduta durevole nel tempo, per non dover investire tempo e denaro in questo aspetto nei prossimi anni e non disperdere troppa energia in fase di frenata.

Una volta controllato il regolamento e definite tutte le dimensioni di massima del sedile si è potuta iniziare con il disegno al CAD.

Peeno	Inclinazione sedile	Pedali			Altezza fronthoop			Distanza volante			Altezza schienale	Larghezza punto più alto schienale	Larghezza rif. Paracolpi schienale	Larghezza rif. Paracolpi gambe	Altezza rif. Paracolpi gambe	Profondità seduta		
		Ideal	Min	Max	Ideal	Min	Max	Ideal	Min	Max								
	47°	88	80	92	70.5	64.5	72	34.5	32.5	36.5	34		25		29	40	1	14
	47°+cuscino							40.5		38.5	43.5							

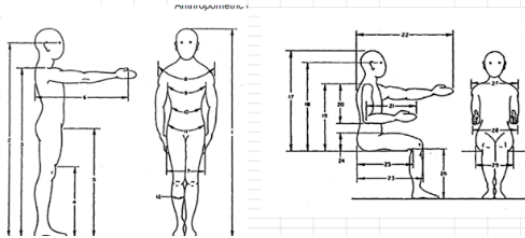


Figura 14 Escel riassuntivo misure dei piloti Come si evince dall'immagine per ogni pilota, a parte le dimensioni corporee, le misura più importanti sono la distanza dai pedali, altezza del front hoop, e la distanza dal volante.

- Distanza dai pedali: essendo la posizione del sedile fissa in macchina, ogni pilota deve essere in grado di premere al 100% i pedali del freno e dell'acceleratore. Questo vincolo non è stato un problema per nessuno dei piloti;
- Altezza del front hoop (FH) per regolamento il volante, girato di 90 gradi, deve essere al di sotto, in vista laterale, del punto più alto del front hoop, un tubolare in alluminio piegato e colaminato nel telaio, richiesto dal regolamento, per irrigidire e rinforzare una zona della monoscocca che è considerata critica dai giudici della competizione. Il sedile non deve essere d'intralcio a nessun pilota che deve essere in grado di arrivare al volante, la cui altezza di montaggio è disaccoppiata dall'altezza del sedile in macchina visti gli spessori ridotti del componente;
- Distanza dal volante: ogni pilota deve essere in grado di muovere il volante di 180 gradi senza affaticarsi troppo e senza che i gomiti vadano in interferenza con altri parti del cockpit ostacolando così la guida.

## 2.2 Modalità di progettazione

Per disegnare il sedile al CAD si è seguito uno stile di disegno simile ad uno schema che una stampante 3D segue per realizzare un pezzo.

Una caratteristica tipica del sedile è infatti quella di possedere superfici a doppia curvatura.

Lavorando esclusivamente con il design delle superfici, per realizzare una doppia curvatura servono almeno due vincoli spaziali.

Un altro aspetto fondamentale da tenere in considerazione per disegnare il componente è il fatto che deve essere parametrico: così facendo si potrà utilizzare lo stesso file per anni diversi, questo faciliterà molto la progettazione dei sedili futuri e si potrà modificare facilmente durante la progettazione del telaio per adattarsi il più possibile alle geometrie di quest'ultimo, che cambiano spesso e rapidamente (il sedile in oggetto è la quattordicesima versione del componente).

Progettare in maniera parametrica significa tenere uno stile consistente, per far sì che, modificando dei parametri specifici, si modifichino tutte le features figlie di quei parametri, senza che si perdano delle relazioni e che nascano errori nel componente finale.

In particolare, in questo componente, tutte le features sono legate al primo sketch dell'albero (sketch 81) dell'immagine a fianco.

Come si vede nella seguente figura, tramite delle linee di costruzione si è andato a riprodurre in sezione il mockup con dimensioni e angoli scelti dai vari piloti, di fatto il risultato dell'excel, successivamente queste linee sono state unite con un'unica spline vincolata che interseca le linee di costruzione nei punti di intersezione.

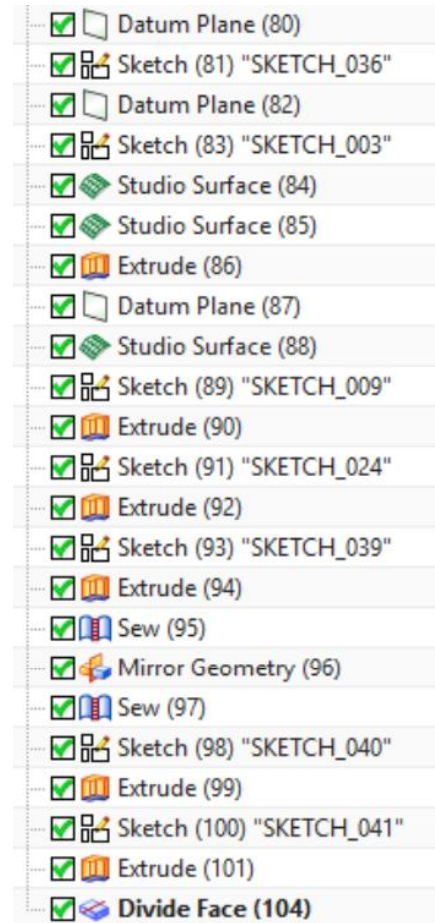


Figura 15 Parte dell'albero di progettazione del sedile

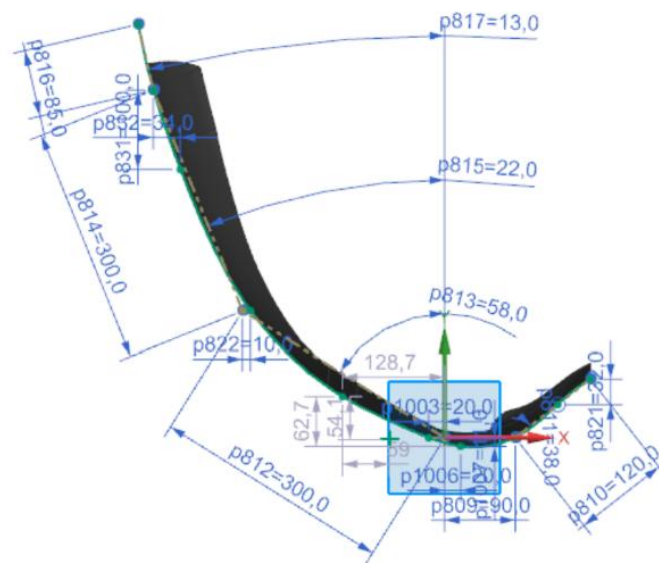


Figura 16 Sketch 81

Modificando questo sketch, per esempio se futuri piloti richiederanno una diversa inclinazione, superfici più grandi o contenitive, si andrà facilmente ad influenzare tutte le superfici successive e quindi anche il componente finale.

Infatti, nella formula student, un sedile è progettato per fare sì che più piloti (come detto cinque per quello 2024/2025), riescano a sedersi in maniera confortevole in macchina.

I piloti però cambiano ogni anno, di conseguenza cambiano gli stili di guida e le corporature, il sedile si deve adattare di conseguenza.

Oltre la progettazione parametrica è molto importante che nell'assembly totale della macchina il sedile sia in posizione corretta, gli spazi devono essere più ampi possibile per facilitare la progettazione e il posizionamento di altri componenti.

Per far sì che la posizione del sedile fosse corretta è stato creato un sistema di riferimento all'interno della parte solidale con il telaio (comando "generate CSYS") e posizionato in modo tale che, se la posizione di quest'ultimo dovesse essere modificata nell'assembly, il sedile si sarebbe spostato e adattato di conseguenza.

La creazione dell'assembly della formula non è infatti compiuta del reparto di materiali compositi, è però importante che tutti i componenti siano posizionati in maniera corretta.

Un altro accorgimento che è stato preso per progettare questa parte è rappresentato dalla decisione, prima di iniziare a disegnare, che il sedile dovesse essere simmetrico, si è quindi

disegnato solamente un lato (quello destro guardando il sedile dal front verso il rear della vettura). In questo modo le features utilizzate sono state molte meno, l'albero risulta più pulito e c'è meno rischio che, modificando alcuni parametri, nascano errori di aggiornamento automatico della parte.

Definiti tutti questi concetti basilari si è iniziata con la progettazione di quello che è il sedile vero e proprio.

Il comando più importante che è stato utilizzato sicuramente "Studio Surface".

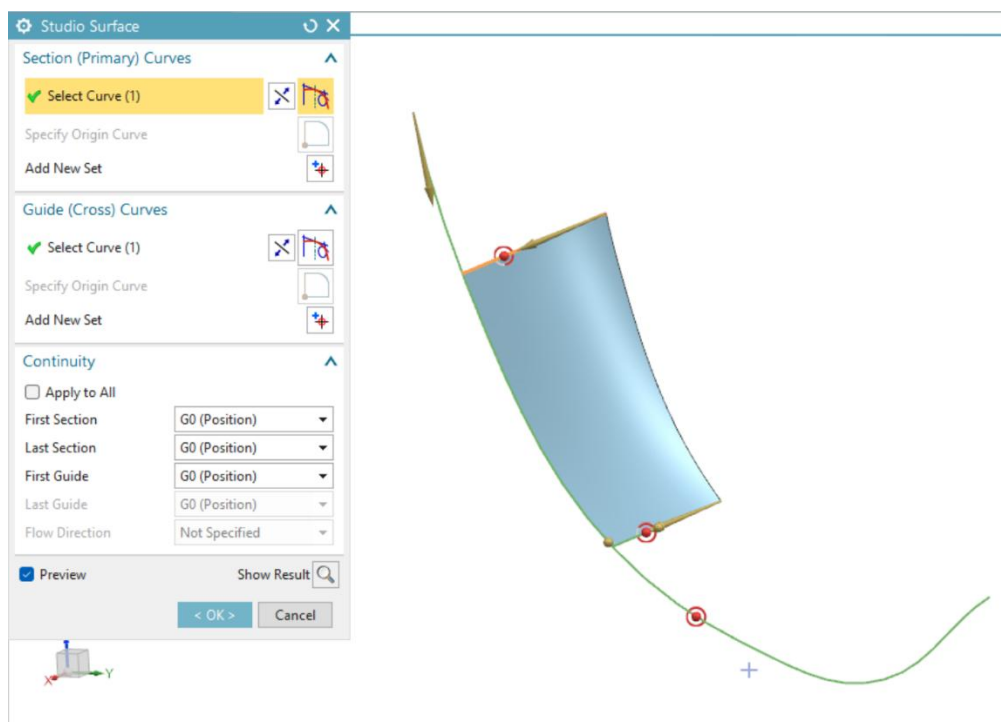


Figura 17 Comando Studio Surface

Questo comando permette di creare una superficie a partire da due sketch posizionati nello spazio e crearla seguendo un altro sketch che intersechi questi due, quest'ultimo è chiamato "guide curve" mentre gli altri sono visti da NX come "section curves".

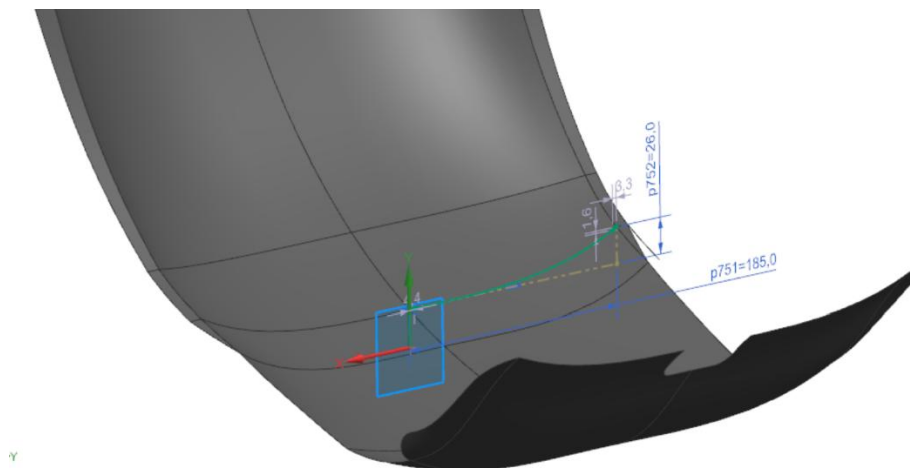
Per il comando "guide curve" è sempre stato utilizzato lo sketch 81, per un discorso di parametricità. È infatti molto comodo legare tutte le features alla stessa curva, in modo tale che quest'ultima sia l'unico parametro da modificare se si vuole intervenire sugli angoli di inclinazione, controllati come visto da rette di costruzione.

Per quel che riguarda le curve primarie invece l'iter che è stato seguito è il seguente:

Dapprima si crea un punto, sempre lungo lo sketch 81, vincolato tramite la distanza da uno dei due estremi della curva, successivamente si crea un piano, inclinato o di offset al piano yz, utilizzando il punto appena creato.

Successivamente, grazie alle misure presenti nell'Excel, si creava uno sketch nel piano appena costruito e vincolato sempre alla curva 81.

Solitamente questi sketch erano delle spline che andavano a creare la curvatura del sedile in vista frontale.

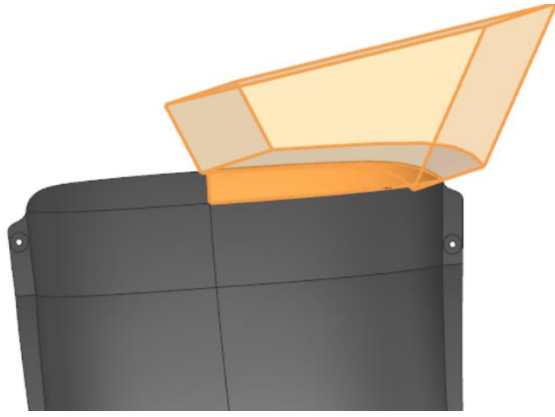


*Figura 18 Spline di sezione del sedile*

Una volta create tutte le superfici necessarie per formare il sedile, si è iniziato a rimuovere materiale per avere un controllo completo delle superfici create.

Avendo infatti utilizzato una curva guida e due curve di riferimento, si ha un controllo solamente su tre dei quattro lati di ciascuna superficie, se si volesse approssimare il risultato di ciascuna studio surface ad un rettangolo.

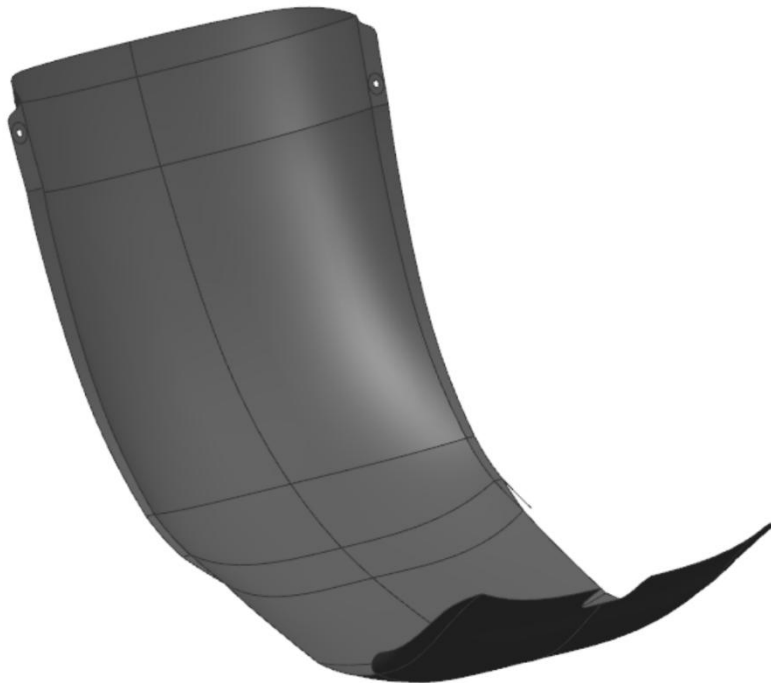
Per avere un controllo completo si sono creati una serie di sketch su piani esterni a quelli utilizzati per le superfici e sono stato poi estrusi con effetto di taglio verso il sedile, per dare forma a tutte le superficie che necessitavano di rifilatura.



*Figura 19 Estrusioni di taglio per controllo superfici esterne del sedile*

Successivamente sono stati realizzati lo scasso per le cinture, i fori di accoppiamento con il telaio (asimmetrici per un discorso strutturale) e si è cercato di eliminare ogni spigolo vivo, sia per un discorso di sicurezza sia per il fatto che in ogni caso in natura gli spigoli vivi sono impossibili da realizzare.

Come ultimo step è stata specchiata la geometria utilizzando il piano xy e, tramite il comando “thicken”, è stato dato uno spessore al sedile, per passare da superficie a solido e poterlo inserire nell’assembly del veicolo con gli ingombri effettivi.



*Figura 20 Risultato finale in superficie*

## 2.2 Versioni precedenti

Come detto il sedile in oggetto è il risultato di diverse iterazioni di versioni precedenti, in particolare quella definitiva è la quattordicesima.

Si è reso necessario compiere così tanti cambiamenti per due motivi principali: ingombri e risultati di simulazioni.

Tutte le prime versioni, infatti, sono state disegnate unicamente per cercare di minimizzare gli ingombri del sedile e abbassare il più possibile il centro di massa del pilota, andando ad agire sulla forma della seduta.

Inizialmente il sedile aveva una forma molto più rettilinea vista in sezione, era più grande ed erano presenti dei paracolpi laterali per dare una forma più contenitiva.

Procedendo con l'avanzamento della progettazione della vettura è stato chiaro che il sedile avrebbe avuto un ruolo importante per quel che riguarda l'obiettivo di accorciare l'interasse tra le ruote anteriori e le posteriori, si è quindi deciso di procedere con una forma più curvilinea per diminuire l'ingombro in X vettura (direzione longitudinale al moto).

Una volta bloccata la geometria e inserite gli ingombri generali nell'assieme si è passati all'ottimizzazione della geometria che mirava a migliorare il più possibile i risultati delle simulazioni, cercando di abbassare l'IRF e deformazioni.

Le zone più critiche erano sicuramente quella dei paracolpi e l'estremo anteriore della seduta.

Per come era stato disegnato il sedile, infatti, la parte più verso il front della macchina era molto sporgente in avanti, fungendo di fatto come una trave incastrata erano presenti sollecitazioni molto importanti nel punto di contatto con il telaio, grazie alla simulazione è stato infatti chiaro che accorciando questa zona gli stress sarebbero diminuiti, e così è stato fatto, con risultati in linea con la teoria.

Altra zona critica perché estremamente sollecitata si trattava della zona dei paracolpi laterali, questo problema sarebbe stato eliminato da un'aggiunta di carbonio in queste aree. Sono state fatte diverse riunioni con i piloti su questo e alla fine si è deciso di ridurre la zona, visto che di fatto ad una piccola diminuzione nel confort di guida sarebbe seguita una grande riduzione in termine di peso e quindi di performance.

## 2.3 Attacchi cinture

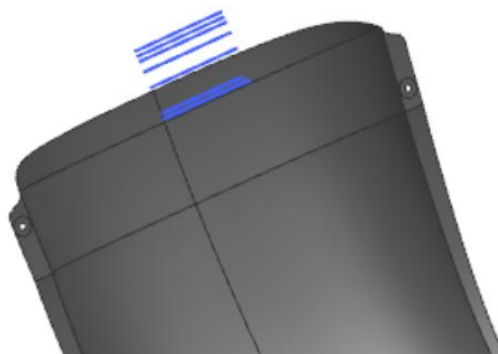
Dalla regola T5.5.5 del regolamento FSG: "From the driver's shoulders rearwards to the mounting point or structural guide, the shoulder harness must be between 10 degrees above the horizontal and 20 degrees below the horizontal as in figure 13."

Compito di chi progetta il sedile è anche quello di posizionare correttamente gli attacchi per le cinture, sia superiori che inferiori. Come citato nell'apposito capitolo, infatti, da regolamento il pilota deve essere legato in macchina seguendo precisi vincoli dimensionali.

Per quel che riguarda gli attacchi superiori, infatti, ogni pilota deve avere le cinture inclinate con un massimo di 10 gradi rispetto all'orizzontale in alto e massimo 20 gradi in basso.

Il regolamento fornisce un range abbastanza ampio (30 gradi) proprio perché la competizione è consapevole che, dato il budget ridotto di quasi tutti i team, non si è spesso in grado di realizzare un sedile per ogni pilota, come accade invece in competizioni più importanti.

Per essere sicuri che questa regola fosse rispettata sono stati segnati gli estremi di ogni pilota sul mockup di cui sopra, successivamente si sono creati degli sketch sul CAD rappresentativi di queste dimensioni e come ultimo step si è trovata una posizione che fosse corretta e conforme alle regole per ogni pilota.



*Figura 22 Sketch per le misure delle cinture dei vari piloti*

Importante sottolineare che, causa importanti differenza di altezza, un pilota sarebbe stato fuori regolamento per qualsiasi posizione degli attacchi cinture si fosse trovata.

È stato quindi creato un sedile rialzato in schiuma poliuretana a celle aperte apposta per questo pilota, con lo scopo di alzare la posizione delle sue spalle in macchina e rendere le inclinazioni delle cinture nuovamente a regolamento.

Un altro vantaggio di avere un rialzo è che il pilota poteva vedere molto meglio la pista e quindi migliorare la qualità della sua guida.



*Figura 23 Foto del sedile e cinture montato in macchina prima di una competizione*

Una volta decisa la posizione definitiva degli attacchi cinture in macchina si è sagomato il sedile in modo tale che non si fosse interferenza con questi ultimi una volta assemblata la vettura.

Per quel che riguarda gli attacchi inferiori invece la competizione lascia più libertà, sono stati utilizzati dei golfari di grado 8.8 e montati direttamente al telaio con degli inserti in carbonio.

## 2.4 progettazione stampo

Per questioni di budget si è deciso di utilizzare un unico stampo diretto maschio in resina epossidica.

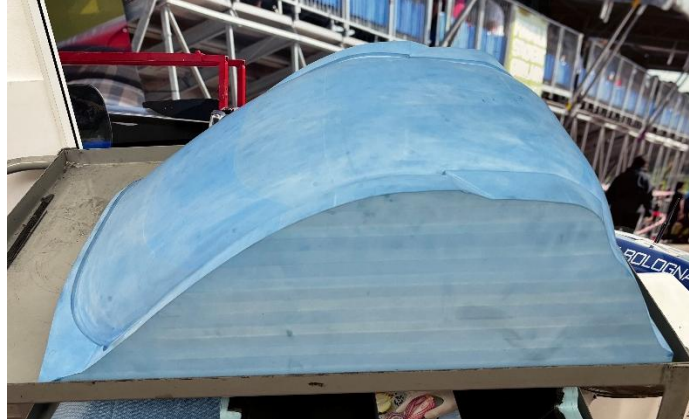


Figura 24 Stampo utilizzato

Per la realizzazione degli stampi tramite software CAD solitamente si parte dal pezzo modellato in un'unica superficie, nelle prime fasi lo spessore non è importante, per questo è necessario che sia da subito chiaro se lo stampo debba essere "maschio" o "femmina".



Figura 25 Differenza tra stampo maschio e femmina dal sito ansini.co.uk

Come si evince dall'immagine soprastante, in uno stampo maschio il componente viene laminato attorno allo stesso, femmina il contrario. Di fatto uno stampo femmina, accogliendo il pezzo dentro di sé, fa sì che sia la pelle più esterna direttamente sullo stampo e quindi sia quella con il miglior controllo dimensionale, questo non in presenza di controstampi.

Deciso quindi la tipologia dello stampo che si intende creare, si considera la pelle corrispondente e si isola quella come superficie.

In componenti più complessi, il pezzo finale può essere diviso in sotto-aree e creato con più stampi accoppiati, questo aumenta notevolmente il prezzo ma si eliminano problemi dati da eventuali sottosquadri.

Utilizzando un unico stampo la geometria è stata modificata eliminando tutti i sottosquadri che sarebbero diventati un grosso problema in fase di estrazione.

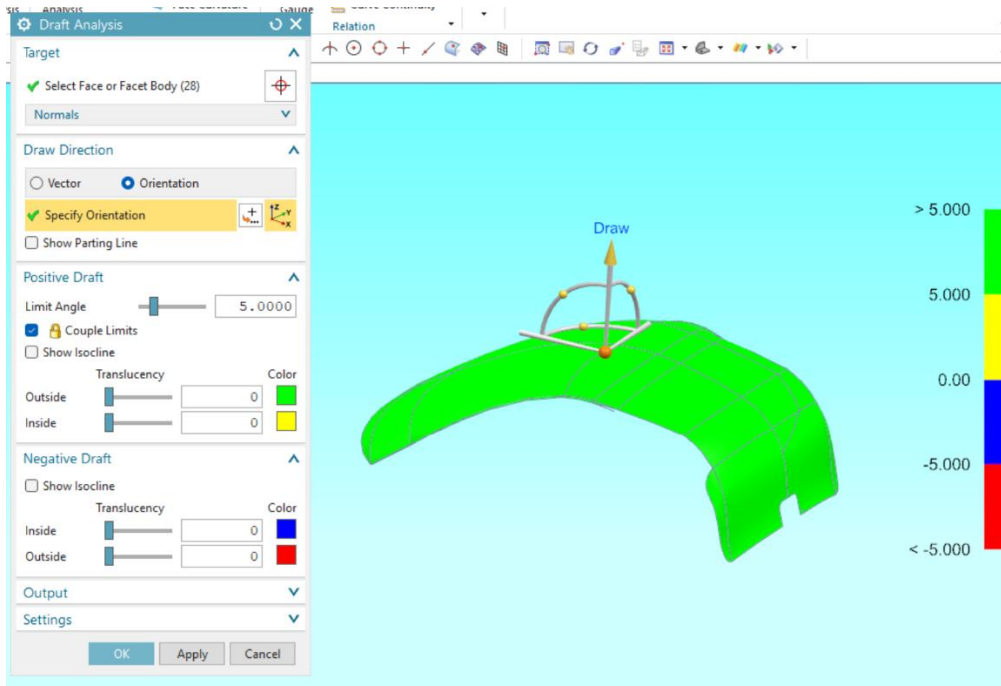


Figura 26 Simulazione di estrazione per la superficie di stampo del sedile

Un'altra feature importante per questo stampo è stata creare uno scalino in corrispondenza del fuori figura, alto 6mm.

Questo fondamentale nei pezzi realizzati con una struttura a sandwich per evitare che la pressione durante la cura in autoclave danneggi il core facendolo scorrere verso l'interno del pezzo (core crashing).



Figura 27 Esempio di core crashato

Una volta definite le superfici e il fuori figura si può iniziare a lavorare in solido e disegnare effettivamente lo stampo.

Per l'inizio della parte solida è stato utilizzato il comando "Bounding body", questa feature crea un solido grossolano che, utilizzando superfici e fuori figura, viene tagliato e definisce stampo finale vero e proprio.

Da questo momento si tratta solo di modellazione solida per definire fori di eventuali spine e finiture finali, non presenti in questo caso.

Come ultimo step, prima di mandare uno stampo in produzione, è necessario scalare l'intera geometria per bilanciare l'espansione termica del materiale in autoclave.

Un ciclo di cura tipico è a 130 gradi.

Di seguito i calcoli riportati per calcolare l'indice di riscaldamento degli stampi (desmos.com):

Considerando come dimensione iniziale la dimensione espansa dello stampo calcolo la restrizione dovuta al raffreddamento del carbonio	$T_2 = 130$
	$\leq T_2 \leq$ Incrementi: _____
$d_{ICFRP} = -s_f(1 + T \cdot c_{teTB})T \cdot c_{teCFRP}$	$T_1 = 22$
$= -0.000486236310847$	-10 <input type="range"/> 22
La lunghezza finale del componente è:	$c_{teTB} = 40 \cdot 10^{-6}$
	$= 0.00004$
$l_{final} = s_f + d_{ITB} + d_{ICFRP}$	$c_{teCFRP} = 4.5 \cdot 10^{-6}$
$= 1$	$= 0.0000045$
Per far si che la lunghezza finale sia quella voluta devo scalare il componente di un fattore pari a:	$T = T_2 - T_1$
	$= 108$
$s_f = \frac{1}{1 + T \cdot c_{teTB} - (1 + T \cdot c_{teTB})T \cdot c_{teCFRP}}$	Considerando una lunghezza iniziale unitaria calcolo l'espansione dello stampo dovuta a T
$= 0.996182726931$	$d_{ITB} = s_f T \cdot c_{teTB}$
	$= 0.00430350938034$

Nelle immagini precedenti si vede che il fattore di scala per stampi creati per produrre un pezzo che cura a 130 gradi è 0.996183 circa, questo significa che lo stampo da mandare in produzione deve essere più piccolo dello 0.004% rispetto a quello disegnato al CAD.

Per i calcoli si parte da un delta di temperatura (130-22=108 gradi), e, conoscendo l'indice di dilatazione termica di resina epossidica e del carbonio, si arriva al risultato finale.

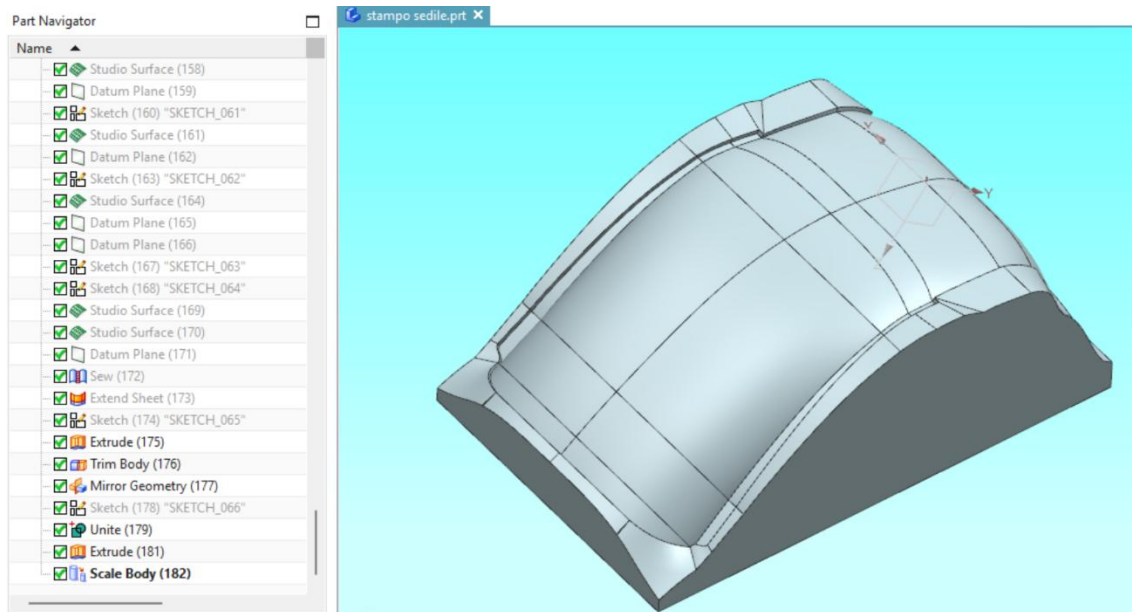


Figura 28 Risultato del CAD dello stampo solido su NX

Una feature che può essere utilizzata è quella delle trimline, ovvero dei canali, esterni nel caso di stampi in carbonio (laminati su master) e interni (estrusi internamente) nel caso di stampi diretti, che servono per far da canale di scolo di resina e che hanno l'obiettivo di lasciare un segno nel componente finale per far sì che questo, durante il processo di finitura, possa essere tagliato e sagomato con più precisione.

Nel caso dello stampo del sedile questa feature non è stata utilizzata visto che l'intera figura era inclusa all'interno delle pareti per non fare crashare il core.

La realizzazione degli stampi è stata fatta con il supporto dell'azienda Blacks s.r.l. di Faenza, Emilia-Romagna.

L'azienda si è occupata di fresare la matematica partendo da tavole di resina epossidica incollate tra di loro.

Normalmente gli stampi per dei componenti in fibra di carbonio possono essere realizzati in resina epossidica, poliuretana o MDF.

Abbiamo optato per la resina epossidica perché, anche se più costosa, garantisce migliori prestazioni a livello di precisione dimensionale visto che è caratterizzata da una minore espansione termica e da una lavorabilità più precisa.

Una volta prodotti gli stampi è necessario prepararli per accogliere le pelli durante il processo di laminazione.

Il primo passo per rendere degli stampi, come detto in questo caso in resina epossidica, pronti per la laminazione, è quello di cartarli.

Il processo di carteggiatura è necessario a causa di una qualità superficiale non perfetta visto che si è cercato di spendere il meno possibile per produrre questi stampi, che comunque rappresenta l'esborso principale per un singolo item nell'anno di produzione del team.

Per far sì che la superficie sia pronta si è cartato prima con la carta vetrata di grana 320 e successivamente, per non lasciare asperità, con la 800.

L'obiettivo è quello che togliere in primo luogo i residui di lavorazione per poi successivamente spianare la superficie.

Una volta finita la carteggiatura gli stampi sono stati puliti con del semplice detergente in preparazione delle fasi successive per eliminare ogni residuo di lavorazione; polvere e detriti, infatti, possono danneggiare anche in modo grave lo stampo se non rimossi in questa fase.

Dopo averli puliti sono stati portati in una clean room (camera in cui temperatura e aspirazione sono controllate per fare in modo che non entrino particelle indesiderate) per iniziare la seconda fase di preparazione degli stampi: quella con il trattamento con turapori e distaccante.

Sono entrambi prodotti chimici della marca Creamlease. Il turapori, come suggerisce il nome, serve per rendere la superficie dello stampo perfettamente liscia, in questo modo, durante la cottura, si evita che la resina delle pelli entri all'interno dello stampo e che peggiori la qualità superficiale del componente.

Passando al distaccante invece è necessario per garantire un'estrazione ottimale del componente una volta curato.

Questi infatti, durante la cura, tenderà ad attaccarsi allo stampo e a fondersi con la resina di cui è costituito.

Da datasheet sia di turapori che di distaccante va stesa una mano ogni venti minuti circa, come tecnica di stendimento abbiamo versato i prodotti (prima turapori successivamente distaccante) su uno straccio in microfibra per poi passarlo linearmente su tutta la superficie del componente, senza mai tornare indietro.

In questo modo i prodotti sono stesi in maniera omogenea e senza lasciare accumuli da nessuna parte che porterebbero alla creazione di asperità nel componente finale.

Abbiamo dato in totale prima 8 mani di turapori e 6 mani di distaccante.



*Figura 29 Sedile curato posizionato sopra il suo stampo*

Per capire quando fermarsi con turapori e distaccante è stata usata la seguente tecnica: il turapori da dato fino a quando lo stampo non diventa del colore dell'immagine soprastante, mentre per quel che riguarda il distaccante abbiamo usato, alla fine di ogni mano, uno straccio pulito. Quando questo è risultato molto facile da spostare allora significa che lo stampo era correttamente distaccato e quindi pronto per la laminazione vera e propria.

## 3 Simulazione e layup

### 3.1 Obiettivi simulazione

Come obiettivi della simulazione sono stati fissati un IRF (inverse reserve factor) massimo di 0.33 e una massima deformazione durante la frenata di 3mm.

Un IRF di 0.33 corrisponde ad un coefficiente di sicurezza di circa 3, questo per cercare di rendere longevo il componente e soprattutto considerando il fatto che il sedile è montato su un prototipo mosso da un monocilindrico montato senza silents blocks su un monoscocca di carbonio, che produce grandi vibrazioni che con il tempo possono danneggiare in maniera non trascurabile tutti i componenti.

Per quel che riguarda i 3mm sono stati invece decisi con il reparto di dinamica, per cercare di tenere costante il CoG e con i piloti, per non perdere troppa forza durante la frenata che sarebbe stata dispersa in energia di deformazione sul sedile stesso.

Come detto, dopo aver eseguito una prima bozza di design del sedile si è passati alla fase di simulazione tramite metodo degli elementi finiti (FEM) tramite il programma Ansys 2021 R2.

L'obiettivo principale per cui si decide di fare una serie di simulazioni prima di realizzare fisicamente il componente è quello di utilizzare meno materiale possibile ma comunque far sì che il componente resista alle sollecitazioni applicate, senza dover produrre più iterazioni del pezzo interessato e quindi perdere tempo, materiale e quindi denaro.

Usando una quantità di materiale ridotta, oltre che a diminuire i prezzi, si rende il componente il più leggero possibile. Nel caso del sedile questo è particolarmente importante trattandosi di una componente grande e che si sviluppa in verticale e ridurre il peso significa abbassare il COG della vettura, aumentandone le prestazioni dinamiche.

Nel caso del sedile le simulazioni sono state molto importanti anche per ottimizzare la geometria del componente, questione che verrà approfondita nei prossimi capitoli.

Anche lo spessore del componente era molto importante, per ogni millimetro tra il pilota e il telaio infatti il Main Hoop (barra antirollio principale) sarebbe pesato circa 6 grammi in più, ma soprattutto il CoG si sarebbe spostato verso l'alto.

## 3.2 Forze e vincoli

Prima di partire con una simulazione è molto importante essere a conoscenza dei carichi che saranno applicati a quel componente e come questi sia montato; quindi quali e come siano vincolate le varie zone dello stesso.

Per quel che riguarda le forze c'è stato un confronto con il reparto di dinamica e si è deciso di considerare tre scenari principali, di cui uno in particolare che avrebbe sollecitato il componente in maniera molto maggiore rispetto agli altri due.

I tre scenari sono stati:

- Accelerazione longitudinale da fermo;
- Frenata;
- Accelerazione laterale in una curva in combinato (freno e sterzo) a 80km/h.

Dopo un'attenta analisi e alcune simulazioni è stato chiaro che il caso più importante, quello che di fatto andava a sollecitare maggiormente il componente, era quello di accelerazione longitudinale da fermo, per cui al sedile arrivava una forza, nella parte dello schienale di:

$$85kg * \frac{9.81N}{kg} * 1.8 * 0.75 = 1126N$$

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	12 Faces
Definition	
Type	Force
Define By	Components
Applied By	Surface Effect
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	-1126, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No

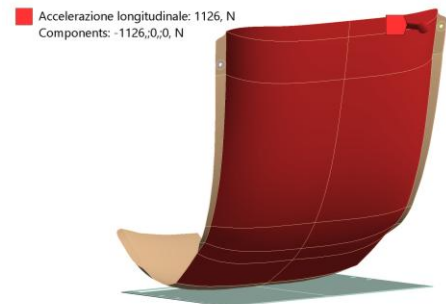


Figura 30 Impostazione forza a seguito di un'accelerazione longitudinale su Ansys

Per questo calcolo si è considerato un pilota di 85kg, un'accelerazione puramente longitudinale, come per esempio quella che si sviluppa durante un test di accelerazione, di 1.8g e il 75% del peso totale che si riversa sul sedile, escludendo quindi le mani e braccia del pilota, attaccate al volante, il piede e la gamba destra, che premono sull'acceleratore.

Per quel che riguarda invece la forza in frenata il reparto strutture meccaniche ha chiesto di verificare che il sedile reggesse una forza di 800N (conoscendo la forza esercitata dai pistoncini dei freni sul disco per conoscere la forza di spinta sul pedano sono andati a ritroso

nell'impianto di frenata) nella parte superiore dello schienale, i piloti infatti durante frenate forti tendono ad alzarsi dal sedile e ad aiutarsi con la schiena per esercitare una forza frenante più alta possibile.

<input type="checkbox"/> Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
<input type="checkbox"/> Definition	
Type	Force
Define By	Components
Applied By	Surface Effect
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	-800, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No

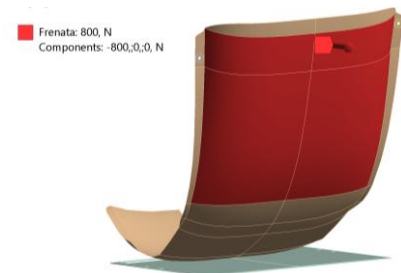


Figura 21 Forza a seguito della frenata su Ansys

La forza di accelerazione trasversale (terzo caso) invece è stata trascurata visto che di fatto i piloti in curva di appoggiano direttamente al telaio che è stato dimensionato per carichi molto maggiori.

Il sedile è montato in macchina tramite due viti passanti situate nella parte alto dello schienale, montate asimmetriche per far si che l'asse di rotazione tra le viti non fosse perpendicolare al telaio.

Per quel che riguarda invece la parte basse del sedile, questi è semplicemente appoggiato al telaio, l'assenza di fissaggi nella parte inferiore è sicuramente peggiorativo per il componente in esame ma fondamentale per una maggiore rapidità di montaggio e smontaggio, cruciali in situazioni di gara in cui i guidici possono chiedere di ispezionare motore e batterie, posizionati subito dietro il sedile.

Per quel che riguarda i vincoli invece è stato utilizzato un coefficiente di attrito carbonio-carbonio di 0.3 tra la parte inferiore del sedile e il telaio, considerato infinitamente rigido e messo a terra.

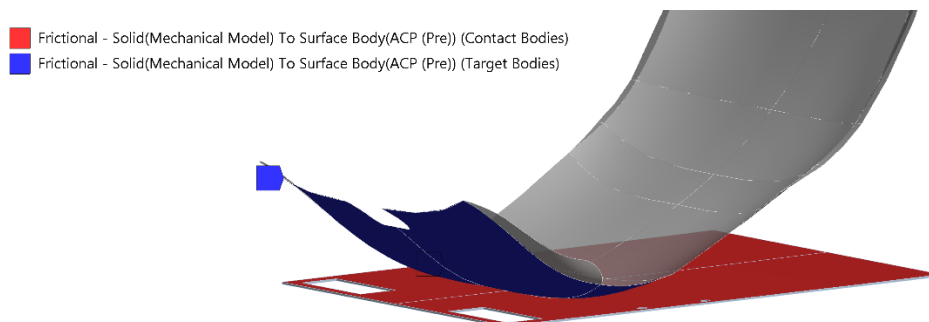


Figura 32 Vincolo di attrito

Un altro vincolo è stato quello di creare dei remote point (deformabili) prendendo come centro il centro del foro e come faccia la proiezione della rondella (larga) sul sedile.

Questi remote point sono stati poi centrati su un sistema di riferimento il cui asse X coincideva con l'asse della vite e sono stati poi creati dei remote displacement riferiti ai remote point in cui sono state bloccati spostamenti e rotazioni.

Le rotazioni in particolare sono state bloccate per migliorare la convergenza della simulazione.

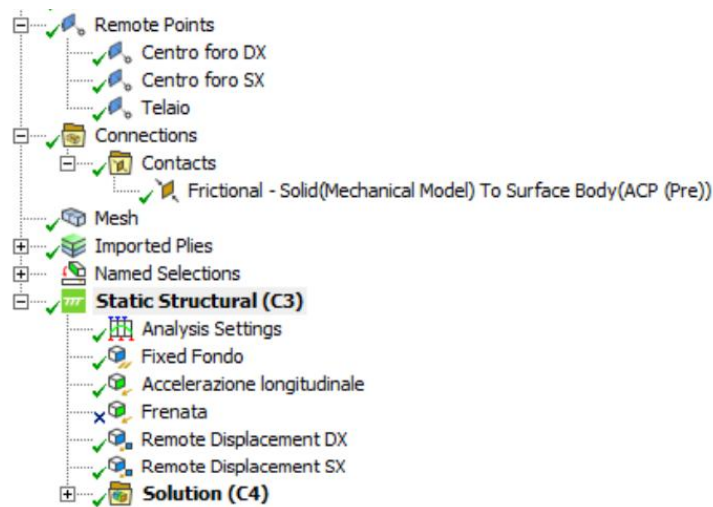


Figura 33 Vincoli totali della FEM

Si è deciso infatti di tenere questo vincolo per simulare il montaggio tra il sedile e i suoi attacchi perché spesso capita, soprattutto in gara, che il sedile venga montato e smontato più volte in poco tempo e non sempre in maniera corretta. Di fatto questo tipo di vincolo, peggiorativo, va a simulare un montaggio frettoloso e imperfetto del sedile in macchina. Storicamente infatti capita che nei sedili dei prototipi la zona che si rompe è proprio quella degli attacchi a telaio.

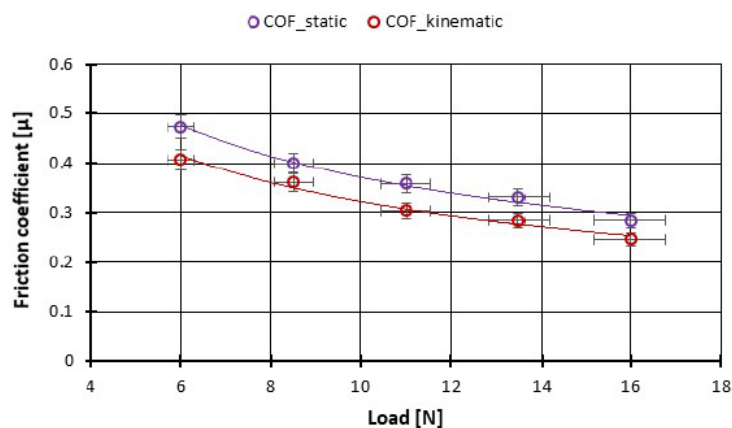
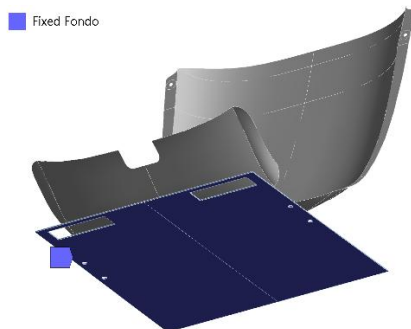


Figura 34 Andamento del coefficiente di attrito CFRP-CFRP; <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/18/3716>

Il telaio invece è stato considerato infinitamente rigido (structural steel come materiale di Ansys) e vincolato completamente a terra nella sua parte inferiore.



*Figura 35 Fondo incastrato*

### 3.3 Materiali utilizzati

Per una questione di risparmio economico per produrre il sedile sono stati utilizzati esclusivamente tipologie di carbonio che erano già state acquistate per la produzione del telaio e un honeycomb che era già presente nel magazzino dell'officina di UniBo Motorsport.

Come tipologie di carbonio erano disponibili M46J, T700UD, T800, T300UD e TR33S di diversa grammatura.

Dopo diverse simulazioni si è deciso di utilizzare tre tipi di carbonio diversi e un layup non simmetrico, in particolare si è utilizzato M46J, T800 e T700UD. Il T800 per il suo alto coefficiente a rottura, l'M46J per la tenacità e il T700UD in particolare zone che risultavano sollecitate prevalentemente in una direzione e per aumentare la rigidità complessiva del componente.

L'honeycomb è stato scelto un nomex di altezza 5mm con celle piccole e un raggio di curvatura congruo alla geometria del componente finale.

Si è cercato di utilizzare un honeycomb il più sottile possibile per abbassare il pilota e il dispositivo di protezione superiore (Main Hoop) che per regolamento deve essere di S235JR.

Tutto il carbonio è stato acquistato da Delta Preg Spa.

FIBER TYPE	Number of Filaments	Sizing Type	Tensile Strength* (ksi) (MPa)		Tensile Modulus* (Msi) (GPa)		Elongation (%)	Yield (g/1000m)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Standard Spool Size** (kg)	
STANDARD MODULUS	T300	1,000	4,5	512	3,530	33.4	230	1.5	1.76	1.0	
		3,000	4,5							2.0	
		6,000	4,5							2.0	
	T400H	3,000	4	640	4,410	36.3	250	1.8	1.80	2.0	
		6,000	4							2.0	
		12,000	4							2.0	
T700S	6,000	5	711	4,900	33.4	230	2.1	1.80	2.0		
	12,000	5, 6, F							4.0, 6.0, 8.0		
	24,000	5, 6, F							6.0, 8.0		
T700G	12,000	3, 4, 5	711	4,900	34.8	240	2.0	1.80	6.0		
INTERMEDIATE MODULUS	T800H	6,000	4	796	5,490	42.7	294	1.9	1.81	2.0	
		12,000	4,5							4.0	
	T830H	6,000	4	774	5,340	42.7	294	1.8	1.81	2.0	
	T800S	12,000	5	853	5,880	42.7	294	2.0	1.80	4.0	
		24,000	1							4.0	
	T910S	36,000	5	880	6,070	40.2	278	2.2	1.615	1.80	4.0
	T1000G	12,000	4	924	6,370	42.7	294	2.2	485	1.80	4.0
	T1100S	12,000	5	1,017	7,000	47.0	324	2.0	1.79	2.0	
		24,000	5							2.0, 4.0	
		12,000	7							2.0	
T1100G	24,000	7	1,017	7,000	47.0	324	2.0	1.79	2.0, 4.0		
HIGH MODULUS	M35J	6,000	5	654	4,510	49.8	343	1.3	1.75	1.0	
		12,000	5	683	4,700	49.8	343	1.4	1.75	2.0	
	M40J	6,000	5	640	4,400	54.7	377	1.2	1.77	1.0	
		12,000	5							2.0	
	M46J	6,000	5	609	4,200	63.3	436	1.0	1.84	1.0	
		12,000	5	583	4,020	63.3	436	0.9	1.84	2.0	
M55J	6,000	5	583	4,020	78.2	540	0.8	1.91	0.5		
M60J	3,000	5	554	3,820	85.3	588	0.7	1.93	0.25		
	6,000	5							0.4		

Figura 36 Materiali utilizzati, dal documento di Toray "Carbon fiber selector guide" <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/Carbon-Fiber-Selector-Guide.pdf>

### 3.4 Impostazione simulazione

Per impostare correttamente la simulazione si è partiti dal convertire la geometria del CAD (assieme sedile e telaio) in un file di tipo step (.stp) che solitamente crea meno errori quando si effettuano modifiche alla struttura della simulazione stessa.

Una volta acquisite le geometrie si crea poi una mesh, ossia una discretizzazione dei componenti in un numero n di elementi, si assegna il materiale e, tramite il pacchetto static structural, si assegnano le forze per arrivare ai risultati richiesti.

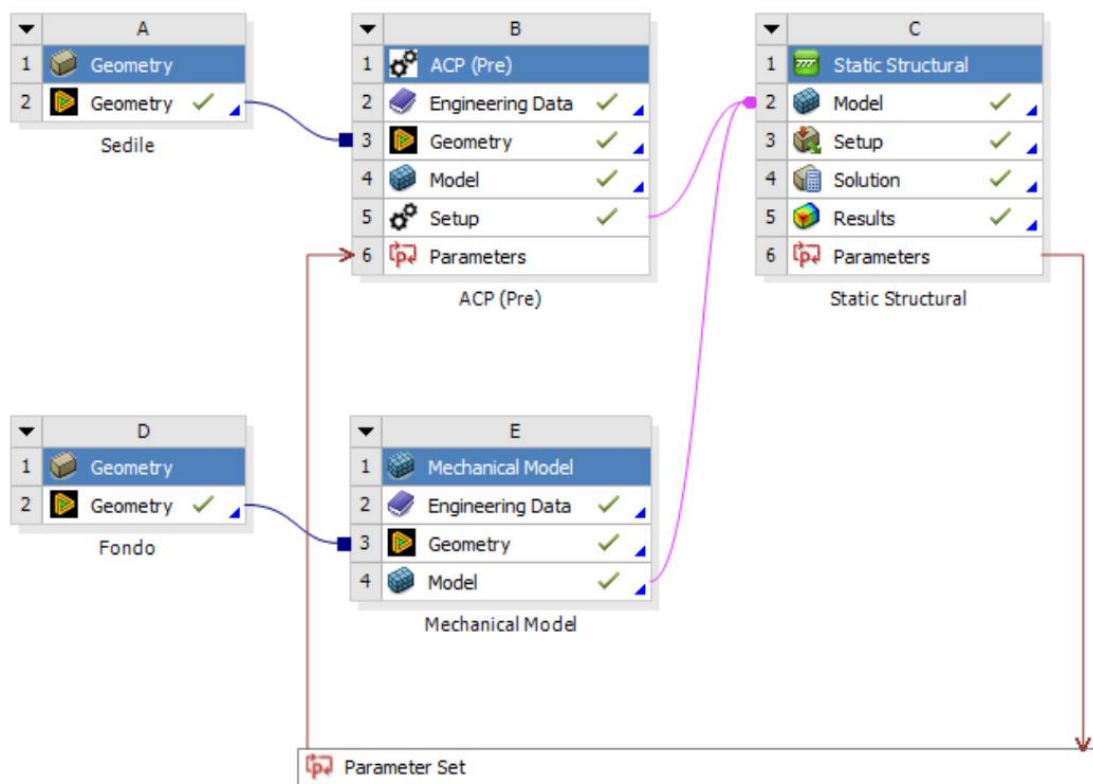


Figura 37 Workbench popolato di Ansys

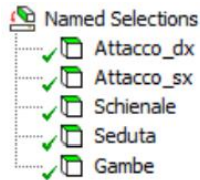
Come detto, dopo aver inserito i file parte nella box “Geometry” di Ansys Workbench è necessario generare le mesh.

Innanzitutto sono state svolte diverse simulazioni meno fini, con parametri che verranno approfonditi in seguito, per cercare di compiere un’ottimizzazione di massima del layup, tenendo in considerazione gli obiettivi sopra citati e soprattutto per cercare di ottimizzare la geometria: eliminando o modificando zone critiche per cercare di non inspessire troppo il laminato e quindi aumentare il peso dei componenti.

La prima simulazione in assoluto è stata svolta inserendo come laminato un pannello sandwich di 6mm con una sola pelle per lato di M46J, l’obiettivo era quello di investigare le

zone più sollecitate e quindi dividere la geometria in aree di layup diversi, per aggiungere carbonio solamente dove serviva.

Sono state individuate 5 zone diverse, ognuna delle quali con un diverso layup:



*Figura 38 Named selection set in Ansys*

Le zone degli attacchi, le uniche senza honeycomb, rappresentano quelle in cui sarebbero state inserite le viti per vincolare il sedile al telaio, lo schienale va dall'estremo inferiore del sedile fino alla zona lombare, la seduta è la zona inferiore, quella a contatto con il telaio e la zona nominata "gambe" indica la zona più in X nella vista laterale della macchina.

Le simulazioni preliminari hanno permesso di correggere tutte le parti critiche della geometria e di avere un'idea di massima del layup da utilizzare.

Per quel che riguarda l'honeycomb invece nel sedile vero e proprio, per mancanza di fornitori, è stato inserito un sandwich di nomex da 5mm a celle piccole, le simulazioni più fini hanno tenuto questo in considerazione anche se quello da 6mm sarebbe stato migliore.

Una volta perfezionata la FEM di massima (che impiegava circa 6min a compilare ogni iterazione) si è passati alla simulazione definitiva (circa 25min ad iterazione).

A questo punto la geometria del sedile era definitiva e si aveva un'idea di massima del layup, si è quindi deciso di complicare la simulazione, soprattutto andando ad agire sui parametri della mesh.

In generale, tornando all'impostazione della FEM, il secondo passo è stato quello di assegnare il laminato al sedile, per questa operazione è stata utilizzata la box di Ansys ACP pre.

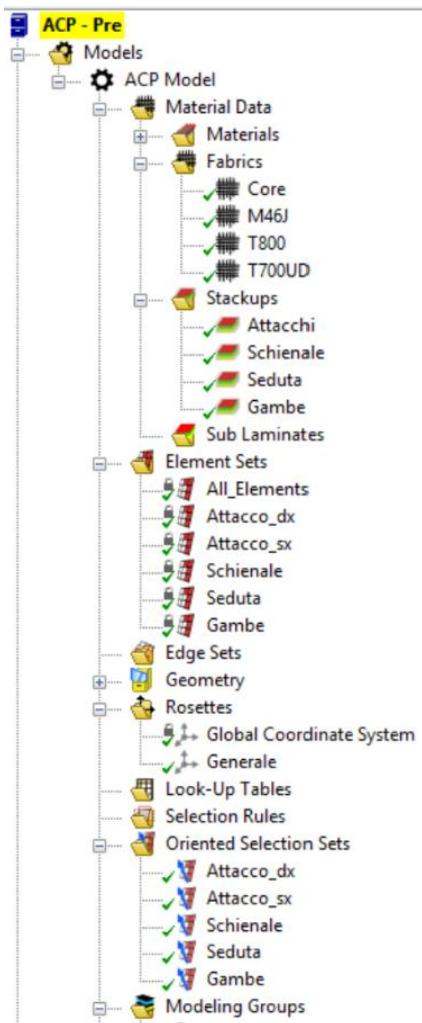


Figura 39 Screenshot del setup di ACP pre popolato

Questa box consente di creare dei laminati e di assegnarli alle aree geometriche di cui si è parlato in precedenza.

Come primo passo si scelgono i materiali dalle librerie disponibili, successivamente si creano delle “Fabrics” inserendo anche lo spessore dei materiali curati, si creano gli “Stackup”; quindi, degli insiemi di laminati generici e si assegnano alle aree gli “Element Sets” che erano state precedentemente assegnate alla geometria del pezzo.

Successivamente si devono creare le “Rosette”, per geometrie relativamente semplici come questa con una unica rosetta si è coperta l’intera superficie del pezzo, per geometrie estremamente complesse, per assicurarsi che il programma simuli il cammino delle fibre sulla superficie in maniera ottimale, può essere necessario utilizzare più rosette.

La sezione “Oriented Selection Sets” serve per associare ogni rosetta all’area interessata, dando per ogni zona in input una rosetta e un punto.

Si può controllare il cammino delle fibre tramite un particolare comando, che mostra a video la direzione principale delle fibre e come sono disposte nello spazio, molto utile per accertarsi che la simulazione posizioni le fibre come si vuole.

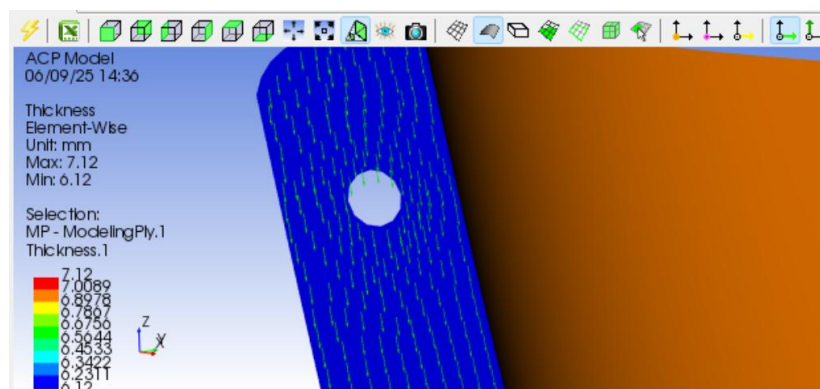


Figura 40 Esempio visivo di disposizione delle fibre nel setup di ACP pre di Ansys

Come ultimo passaggio vengono creati i “Modeling Group”, questi associano ciascun laminato ad ogni zona geometrica andando di fatto a creare il layout sul componente, è necessario anche dichiarare la direzione secondo la quale crescerà il laminato; quindi, di fatto se si tratta di stampo maschio o femmina.

Una volta terminate queste operazioni, il programma è pronto per creare il componente con il nostro layout personalizzato, con il comando “Update” creerà anche lo spessore in automatico del componente.

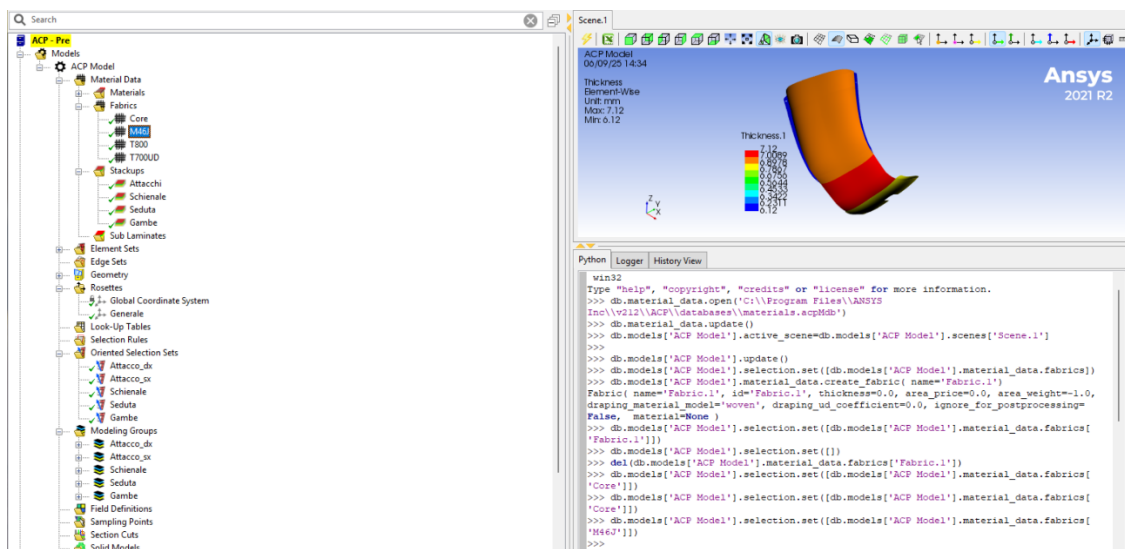


Figura 41 Setup completo di ACP pre in Ansys con zoom sugli spessori finali del sedile

Da questa immagine si può apprezzare la differenza di spessore data dalle differenze dei layout nelle varie zone.

Dopo aver assegnato tutti i materiali si inseriscono le geometrie nella sezione “Model” della box “Static Structural” e si può procedere ad impostare la simulazione come descritto nel capitolo 3.2.

Importante sottolineare che, per facilitare questa parte della simulazione è bene, se si usa un assieme di componenti come in questo caso, che questi vengano convertiti in step direttamente dentro l’assieme, in questo modo i componenti manterranno la posizione reciproca anche all’interno della FEM.

## 3.5 Mesh

### 3.5.1 Impostazioni preliminari

Per quel che riguarda la mesh innanzitutto si è partiti analizzando la situazione in cui ci si trovava: si è in presenza di una geometria relativamente semplice con delle curvature importanti e si lavora in composito, quindi in superfici.

Molto importante sottolineare la presenza di un coefficiente di attrito di 0.3, questo è fondamentale perché rende il problema non lineare, è quindi necessario attivare o disattivare specifici comandi all'interno del programma utilizzato per non avere risultati che non rispecchiano il comportamento effettivo dei componenti.

Sapendo che sarebbe stata implementata un'analisi a convergenza su diversi parametri della mesh si è deciso di utilizzare dei sub steps e di mettere "off" il parametro di "finite sliding" (nell'analisi in static structural) considerando lo scorrimento relativo tra sedile e telaio e la presenza di attrito.

Un altro comando fondamentale per il caso in cui ci si trova è quello di usare Newton Rapson "unsymmetric", in questo modo la matrice di rigidità sarebbe stata aggiornata ad ogni iterazione.

Per quel che riguarda invece il comando "large deflection" è stato tenuto spento per risparmiare tempo computazionale durante le analisi a convergenza per poi attivarlo nelle FEM finali, più fini e definitive.

Per la prima mesh si è tenuto un "grow rate" di 1.2 e una "capture curvature" della metà della grandezza degli elementi.

Come parametri invece che sono rimasti invariati per tutte le simulazioni ci sono:

- "Defeature size" di 1mm per eliminare eventuali imperfezioni date dall'utilizzo di superfici, come tangenze mancate o piccoli avvallamenti nei cambi di curvatura;
- "Curvature normal" di 10 gradi, data la geometria;
- "Capture proximity" è stato invece impostato tenuto spento visto che nel sedile non sono presenti cambi repentini di sezione;
- Elementi di tipo SHELL 281, quindi quadratici. Questo tipo di elementi hanno infatti 8 nodi a differenza dei 4 degli elementi di tipo SHELL 181, sono tipici dell'utilizzo con i compositi e permettono un'accuratezza e un'approssimazione di curvatura elevata.

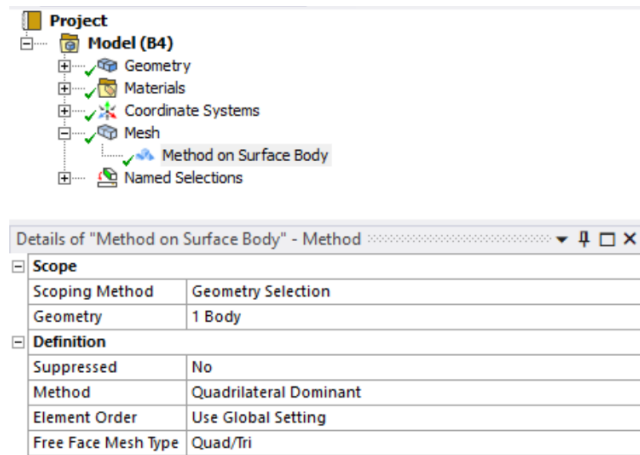


Figura 22 Method utilizzato nelle simulazioni

### 3.5.2 Analisi a convergenza

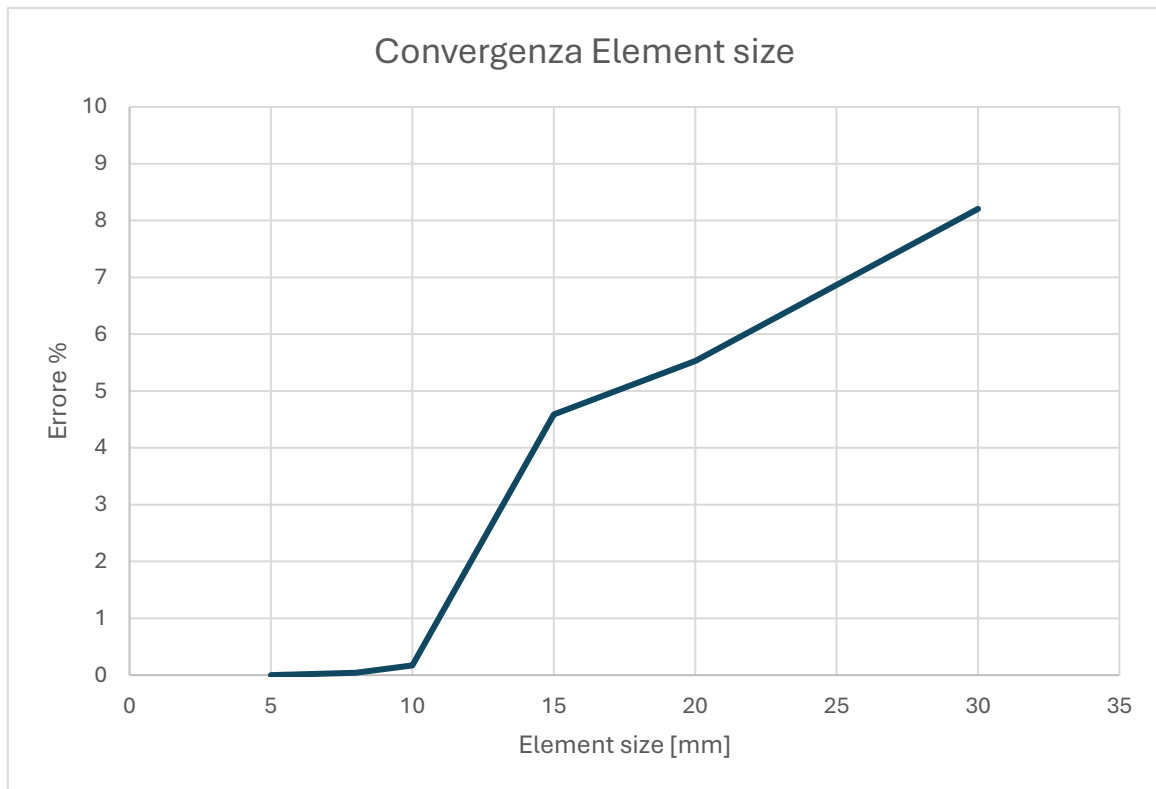
Per essere sicuri sulla bontà della simulazione è stata condotta un'analisi a convergenza sulla "element size", sul "growth rate" e sulla "curvature minimum size".

La prima analisi condotta è stata quella sulla element size, quindi di fatto sulla grandezza e in cascata sul numero di elementi presenti nella mesh.

Come valori di riferimento si sono presi gli errori percentuali sull'IRF e sull'energia di deformazione totale; quest'ultima è infatti particolarmente indicata per i materiali compositi perché si tratta di un valore globale, meno sensibili a picchi locali e che non diverge in presenza di singolarità, a differenza dell'IRF.

Di seguito i risultati:

Element size [mm]	IRF	Errore %
30	0.36209	8.206078
20	0.35313	5.528494
15	0.34999	4.590144
10	0.33521	0.173326
8	0.33476	0.038849
5	0.33463	0

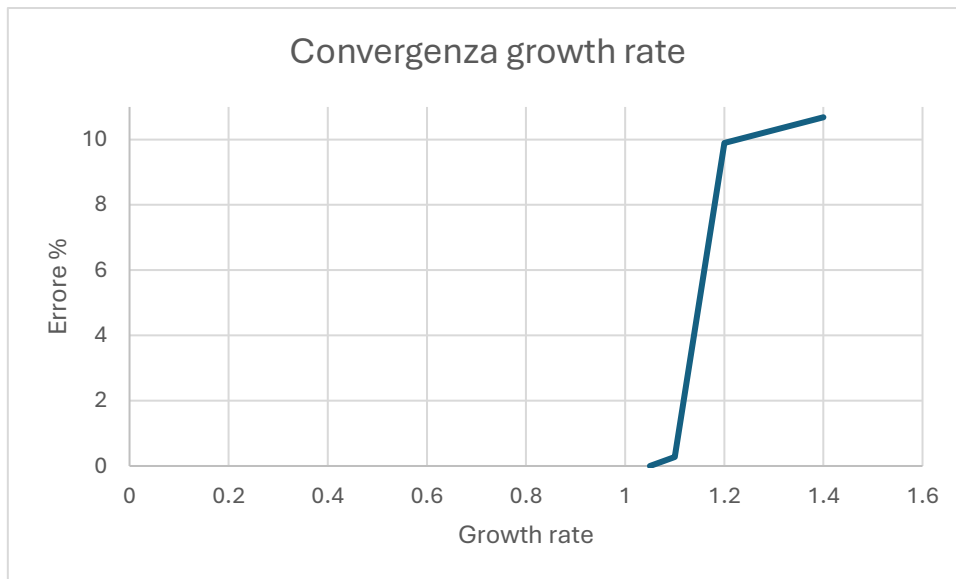


Come si vede dai grafici l'errore si abbassa notevolmente da un "element size" pari a 10mm, per le successive iterazioni si è quindi scelto 10mm come "element size" e 5mm come "curvature minimum size" per le successive analisi a convergenza.

Avendo quindi deciso la grandezza degli elementi si è poi passati ad analizzare la convergenza del "growth rate", quindi della differenza percentuale tra dimensione di due elementi adiacenti, si sono usati gli stessi parametri dell'analisi precedente per verificare la bontà della convergenza.

Di seguito i risultati:

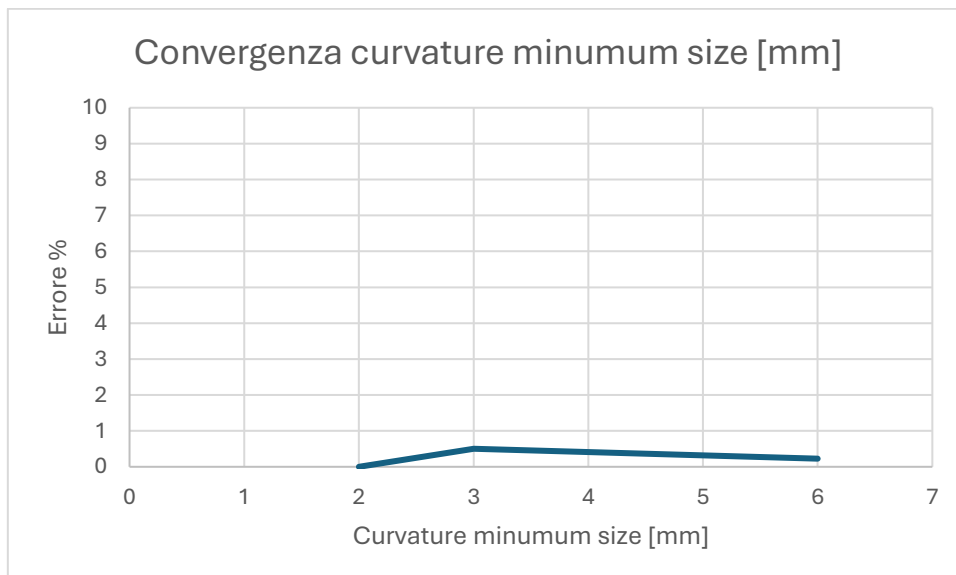
Growth rate	IRF	Errore %
1.4	0.34757	10.68403
1.2	0.34511	9.900643
1.1	0.31315	0.277052
1.05	0.31402	0



Analizzando i risultati si vede chiaramente che da un “growth rate” di 1.1 in giù l’errore cala. È stato quindi scelto questo valore per le future simulazioni.

Di seguito i risultati sull’analisi sul valore di curvature minimum size:

Curvature minimum size [mm]		errore
6	0.34607	0.224881
3	0.34511	0.501658
2	0.34685	0



Dal grafico soprastante si nota che questo valore influenza solo in parte il risultato in output della simulazione, è stato quindi scelto il valore di 3mm per discretizzare il meglio possibile i fori senza perdere troppo tempo computazionale.

Quindi, dall'analisi a convergenza, si sono scelti:

- Element size=10mm;
- Minimum curvature size=3mm;
- Growth rate=1.1;
- Initial time substep=50;
- Minimum time substep=20;
- Maximum time substep=100.

### 3.5.3 Qualità della mesh

Per verificare la qualità della mesh sono stati presi i seguenti valori come riferimento:

Parametro	Accettabile se	Da modificare se
Skewness	<0.4	>0.95
Ortogonal quality	>0.7	<0.1
Aspect ratio	<5:1	>100:1

Il parametro di "skewness" misura quanto un elemento è distorto rispetto alla sua forma ideale; quindi, per elementi triangolari si prende come riferimento un triangolo equilatero e per i quadrangolari un quadrato. Un indice alto di distorsione peggiora l'accuratezza delle funzioni di forma e può causare una mancata convergenza.

"Ortogonal quality" invece misura quanto di fatto gli elementi sono ortogonali alle facce originali e quanto sono regolare gli angoli interni. Anche questo parametro influenza la convergenza e rende meno accurata la matrice di rigidità.

"L'aspect ratio" invece è visto come il rapporto tra il lato più lungo e quello più corto degli elementi, se è alto può portare ad una scarsa rappresentazione del gradiente di stress e può dare errori nelle zone a forte curvatura.

La mesh data come output dall'analisi a convergenza aveva buoni valori dei parametri sopra citati ma si è deciso di cercare di migliorarli ulteriormente.

In particolare, si è deciso di portare a 1.1 il "growth rate" generale (per diminuire il tempo computazionale) e di inserire una "curvature minimum size" di 3mm per, come detto, simulare al meglio il foro.

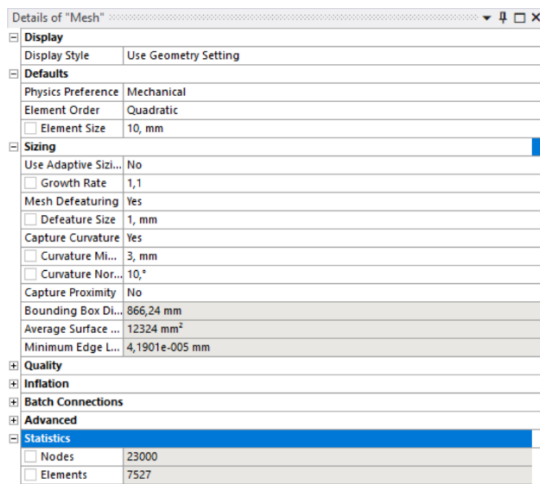


Figura 43 Mesh finale

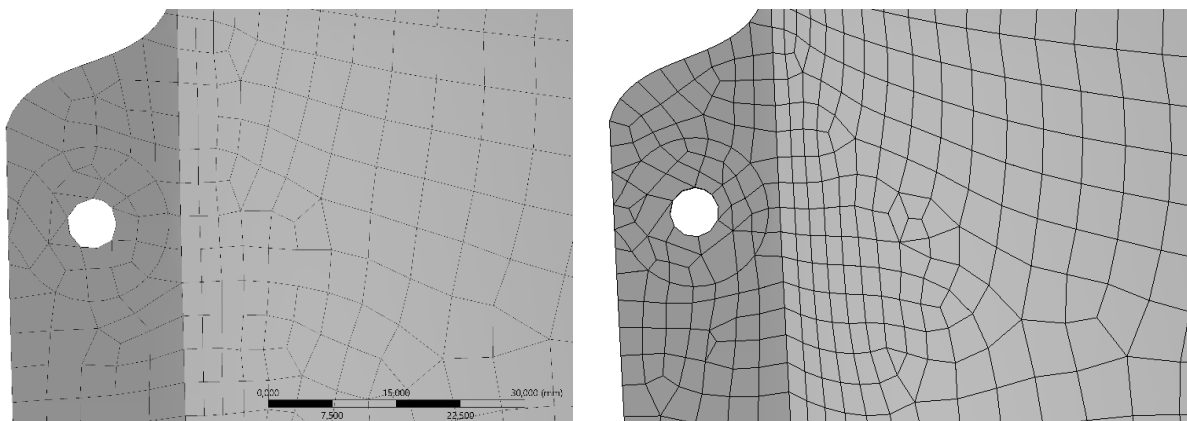


Figura 44 Differenza tra una curvature minimum size di 3mm e una di 5mm

Di seguito un'immagine della mesh definitiva che è stata utilizzata nelle FEM finali, portando il tempo computazionale totale a circa 24 min.

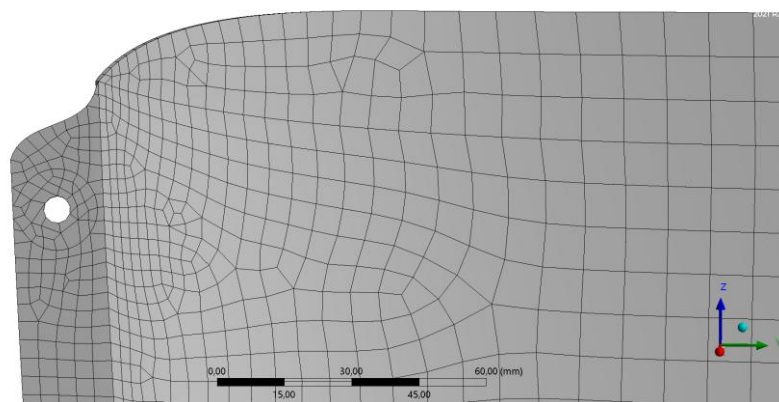


Figura 45 Mesh definitiva

Dopo aver terminato la mesh si sono verificati i parametri sopra citati, di seguiti i risultati.

Per quel che riguarda la “skewness”:

- Min=0.0003742
- Max=0.68351
- Media=0.11411

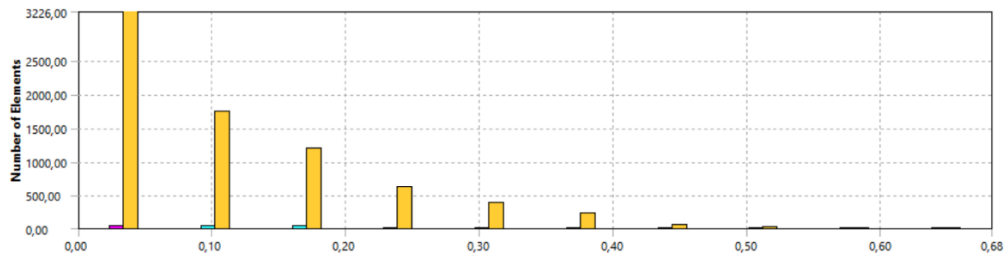


Figura 46 Grafico di Ansys sulla skewness



Figura 47 Elementi con una skewness maggiore di 0.4

Per quel che riguarda la “Ortogonal quality”:

- Min=0.40508
- Max=1
- Media=0.98109

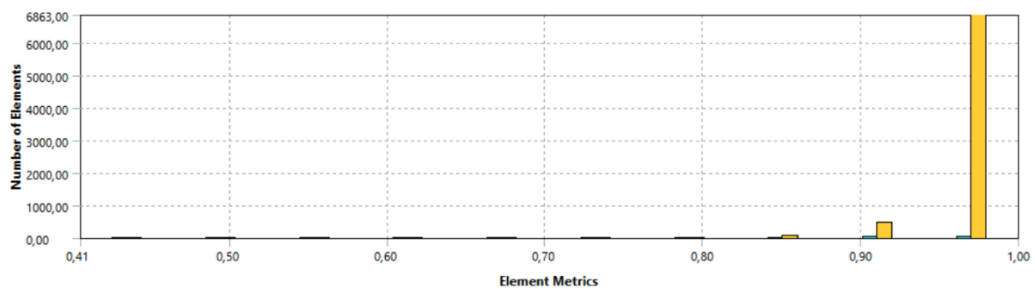


Figura 48 Grafico di Ansys sull'ortogonal quality



Figura 49 Elementi con un'ortogonal quality minore di 0.8

Per quel che riguarda “l’aspect ratio”:

- Min=1.0003
- Max=4.4952
- Media=1.1328

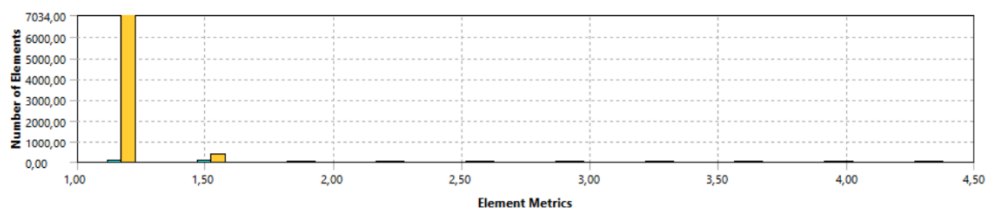


Figura 50 Grafico di Ansys sull'aspect ratio

In conclusione, la “skewness” presenta un valore medio pari a 0,114, con massimo 0,683. Questo indica che la maggior parte degli elementi è prossima alla forma ideale, mentre solo una piccola percentuale mostra una moderata distorsione. Poiché valori inferiori a 0,4 sono generalmente considerati ottimali, la mesh risulta globalmente molto regolare.

L’“orthogonal quality” mostra una media estremamente elevata (0,981), con un minimo di 0,405. Questo parametro, che misura la regolarità angolare e l’ortogonalità degli elementi, evidenzia una qualità molto alta e una distribuzione uniforme, come confermato dalla bassa deviazione standard. Tali valori garantiscono una buona condizione numerica della matrice di rigidezza e una maggiore robustezza nelle analisi non lineari come in questo caso.

Infine, l’“aspect ratio” presenta un valore medio di 1,13 e un massimo inferiore a 5. Ciò indica che gli elementi sono pressoché equidimensionali e non eccessivamente allungati, condizione favorevole per la corretta rappresentazione dei gradienti tensionali.

Complessivamente, l'insieme dei tre parametri conferma che la mesh possiede caratteristiche di elevata qualità, risultando adeguata all'analisi per cui è stata creata.

Per quel che riguarda "Jacobian ratio (Gauss Points)":

- Min=0.33198
- Max=1
- Media=0.90644

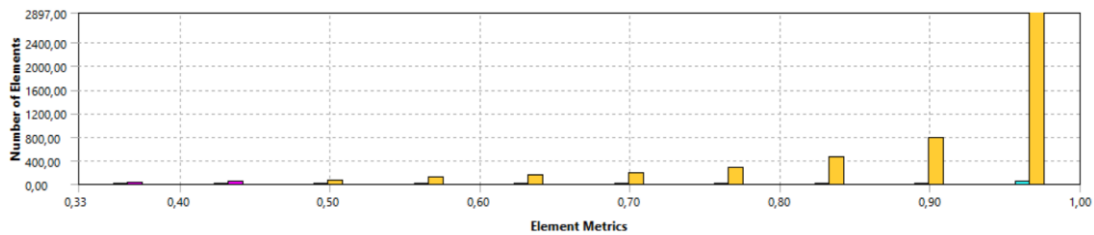


Figura 51 Grafico di Ansys sullo Jacobian ratio



Figura 52 Elementi con uno Jacobian ration minore di 0.5

Per quel che riguarda l'analisi dello jacobiano si è scelta, nell'area "Analisis" della mesh di Ansys, la sezione "Jacobian Ratio (Gauss Points)".

Ogni elemento viene infatti definito inizialmente in uno spazio di riferimento (coordinate naturali).

Durante l'analisi questo elemento viene trasformato nella sua forma reale nella geometria del modello. Questa trasformazione è descritta matematicamente dalla matrice Jacobiana. Il determinante della Jacobiana rappresenta il fattore di scala tra spazio naturale e spazio reale.

Questa metrica calcola lo Jacobiano nei punti di integrazione numerica effettivamente utilizzati dal solver (punti di Gauss). l'integrale finale è quindi la somma pesata di valori integrati in punti specifici.

In Ansys questo valore è normalizzato tra 0 e 1, valori vicini ad uno indicano elementi vicini alla forma ideale, mentre valori via via vicini a zero indicano elementi progressivamente più distorti.

in generale uno Jacobiano=0 indica un elemento degenerato e uno con valore minori di zero indica un elemento invertito, se  $<0$  infatti l'integrazione risulta negativa e produce risultati non fisici visto che di fatto il contributo dell'elemento alla matrice di rigidezza assume un segno errato, dando quindi per esempio contributi opposti alle tensioni.

Importante precisare che esiste una netta distinzione tra stress ai Gauss points (valori numericamente più diretti) e stress nodali mediati (valori più lisci ma leggermente filtrati).

Gli stress nodali sono utili per visualizzare il comportamento globale, mentre gli stress ai Gauss points sono più rappresentativi del calcolo numerico effettuato dal solver.

### 3.6 Calcolo del peso finale e dei materiali richiesti

Una volta validata la simulazione e quindi il layup definitivo è stato necessario fare una stima del carbonio che sarebbe servito e del peso totale del componente, la quantità di carbonio serviva infatti al reparto acquisti e il peso al reparto di dinamica, per la stima del CoG della vettura.

Per quel che riguarda la quantità di carbonio è stato sufficiente moltiplicare le aree delle diverse divisioni geometriche per la quantità di layer di ciascun tipo di carbonio, il valore delle aree era dato automaticamente in output da NX.

Per il peso invece si è partiti dalla quantità di carbonio di ciascun componente, si è moltiplicata per l'altezza di una singola pelle curata e si è moltiplicato tutto per la densità dei vari materiali data dai datasheet, stesso procedimento è stato eseguito per l'honeycomb e per l'adesivo.

$$Peso\ totale = \sum_{i=1}^5 n^{\circ}strati\_i * area\ singololo\ strato * altezza\ strato\_i * densità\_i$$

	Densità	Densità kg/mm <sup>3</sup>	Altezza mm	
M46J	1,52 g/cm <sup>3</sup>	0,00000152	0,26	
Honeycomb	29 kg/m <sup>3</sup>	0,00000029	3,2	
Peso honeycomb [kg]:	0,036592618			

Hexcel Honeycomb Designation	Compression			Plate Shear			
	Bare	Stabilised	Modulus MPa	L Direction		W Direction	
	Strength MPa	Strength MPa		Strength MPa	Modulus MPa	Strength MPa	Modulus MPa
Material - Cell Size - Density	typ	typ	typ	typ	typ	typ	typ
HRH-10-3.2-29	0.64	0.79	55	0.62	26	0.34	10

Zona geometrica	Aree mm <sup>2</sup>	Pelli	Peso parziale [kg]
Schienale	215047	7	0,594906021 090*2 (M46J)+UD*1(T700)+core+UD*1(T7000)+090*3(M46J)
Seduta	118430	10	0,46803536 090*4(M46J)+core+090*2(M46J)+UD*2(T700)+090*2(M46J)
Gambe	60840	8	0,192351744 090*1+4545*2+090*1+core+090+4545*2+090*1 (tutto M46J)
Attacchi	11888	16	0,075170202 090*16 (T800)
Totale	394317		
Peso totale stimato [kg]	1,367	(vecchio 1,9)	
Peso totale effettivo [kg]	1,55		

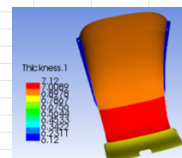


Figura 53 Excel creato per misurare peso e materiale necessario

Questo excel aggiorna peso e metri lineari dei materiali richiesti in maniera automatica andando ad agire nel numero delle pelli appunto sotto la colonna "Pelli".

Per semplicità, soprattutto nella creazione del plybook a fianco si ogni gruppo geometrico è stato inserito il layup corrispondente.

Come si vede dall'immagine soprastante, il peso effettivo del sedile, pesato dopo che è stato prodotto tramite l'uso di una bilancia, è leggermente superiore a quello che era stato stimato (1.55kg a front dei 1.37kg calcolati), questo è però perfettamente normale visto che i calcoli non tengono conto degli overlap che si usano in fase di laminazione. I valori sono comunque ampiamente all'interno del 20% di tolleranza positiva che si utilizza di solito in questi casi.

## 4 Stesura documentazione tecnica

### 4.1 Redazione plybook e simulazione stendimento pelli

L'ultimo passaggio prima di iniziare la produzione vera e propria di un componente in materiale composito è quello di redigere la documentazione tecnica, fondamentale per chi produrrà il pezzo fisico.

In questo caso, a parte le informazioni per il reparto acquisti e il reparto dinamica discusse nei precedenti capitoli, quindi peso del componente e materiali di acquistare, per il reparto di compositi è stato necessario creare un plybook del componente.

Un plybook è un documento che viene solitamente consegnato sotto forma di PDF ed è formato da una serie di tavole tecniche nelle quali sono presenti tutte le informazioni necessarie per la corretta manifattura del pezzo, in particolare:

- Nome della pelle: dopo aver creato il nesting (discusso nell'introduzione), solitamente si usa un plotter per tagliare le pelli di carbonio e, man mano che la macchina la lavora, queste si nominano. La denominazione solitamente avviene tramite l'uso di caratteri alfa-numeric, che vanno ad identificare lo strato in cui si trova la pelle e la zona in cui deve essere posizionata (ad esempio la pelle chiamata "SE-2 0-90" identifica la pelle appartenente al secondo layer, con un'orientazione a 0-90 gradi che deve essere posizionata in corrispondenza dello schienale del sedile);
- Orientazione: anche se di fatto dopo che è stata tagliata l'orientazione della pelle si vede ad occhio, è sempre bene specificarla visto che chi lamina il sedile può non sapere come orientare la stessa sul componente e in generale quale sia lo "zero pezzo" che è stato preso come riferimento;
- Lo zero pezzo: inserito nella prima pagina del plybook indica la direzione da prendere come riferimento per orientare le varie pelli, visto che quasi sempre chi lamina non coincide con chi ha progettato il layup del componente e può non sapere come questo pezzo debba lavorare;
- Materiale, di che materiale è la pelle: si è deciso di inserirlo nel plybook ma non nella denominazione delle pelli per risparmiare tempo e perché il tipo di carbonio in questo caso era chiaro guardando i colori degli strati del polietilene che proteggevano le pelli vere e proprie (viola sopra e sotto=M46J, verde e cartone= T700UD e viola e cartone=T800);

- Sequenza e step: per dare un ordine di lavoro a chi avrebbe dovuto laminare il sedile, anche se il documento era stato creato per essere sfogliato in ordine, aggiunge comunque chiarezza al plybook;
- Forma della pelle in 2D: per evitare fraintendimenti.

Come detto, è stato utilizzato il programma Fibersim per la generazione del plybook del sedile e di conseguenza del nesting delle pelli è stato perfezionato utilizzando AutoCAD con in input le pelli appena create.

Per redigere un plybook come prima cosa è necessario identificare nel componente CAD le varie zone in cui stendere le pelli, fondamentale che queste coincidano esattamente con le aree geometriche prese in considerazione dalle FEM, per far sì che il componente reale sia identico a quello simulato.

In questo caso, per delimitare il perimetro delle pelli, è stato utilizzato il comando “Composite curve”.

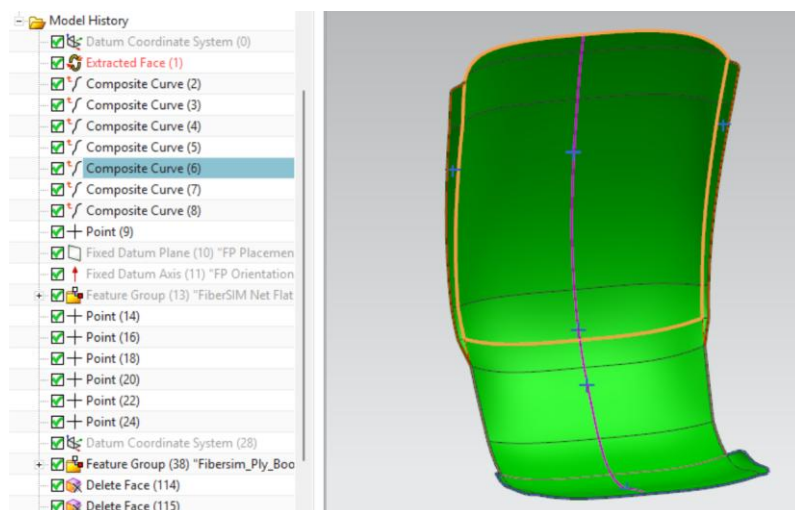


Figura 54 Risultati del comando Composite Curve in NX

Una volta delimitati tutti i confini delle varie tipologie di pelli si passa effettivamente a Fibersim e si crea un laminato; quindi un insieme di pelli che in questo caso costituirà il layup finale del componente.

Successivamente si procede in modo analogo al metodo utilizzato per creare il componente in carbonio su Ansys; quindi, si crea una rosetta e la si associa ad ogni area geometrica.

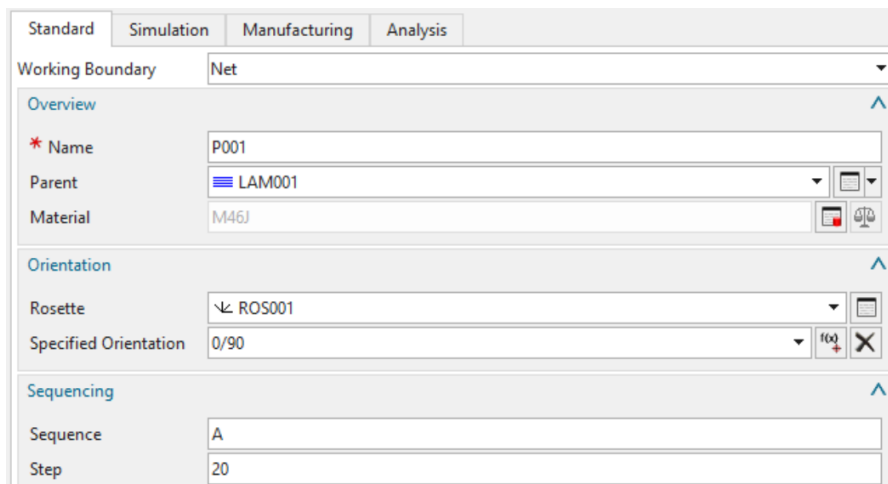


Figura 55 Screenshot di Fibersim in cui si vede una maschera necessaria per creare un plybook

Per ogni pelle si inseriscono tutte le informazioni citate precedentemente, in modo tale che il programma, quando genererà in automatico il plybook, conterrà già tutte le informazioni corrette e necessarie per la laminazione.

Sempre all'interno della pelle rimangono due passaggi fondamentali: la simulazione di stendimento e la creazione vera e propria.

Per quel che riguarda la simulazione di stendimento è necessario innanzitutto creare una mesh, per tutte le pelli è stata utilizzata una mesh con elementi quadrangolari di 5mm di lunghezza, preso in input materiale, geometria e mesh il programma è in grado di calcolare se questa pelle sarà stendibile oppure se ci saranno problemi ("Net producibility").

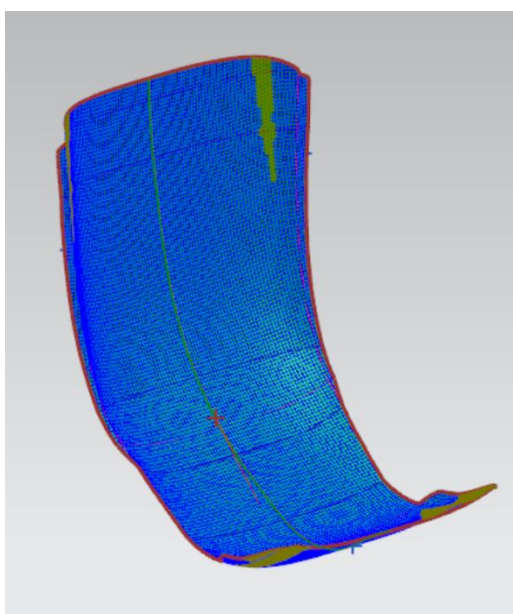


Figura 56 Risultato simulazione di stendibilità di una pelle che di fatto copre tutta la superficie del sedile

In questo caso il blu rappresenta le zone in cui la pelle si stende senza problemi, il giallo invece dove c'è potrebbe esserci eccesso di materiale; quindi dove sarà necessario stendere in maniera particolarmente accurata il carbonio per evitare accavallamenti non voluti.

Nel caso del sedile non ci sono stati particolari problemi di stendimento, se da simulazione fossero stati presenti a video delle zone di colore rosso allora sarebbe stato necessario prendere provvedimenti ed aggiornare la FEM con le nuove pelli.

Il rosso può essere causato da due fenomeni principali, o un eccesso estremo e una scarsità di carbonio, il primo è risolvibile creando del "Dart"; quindi, simulando il taglio con un cutter della pelle e il successivo stendimento con overlap controllato, il secondo invece non è risolvibile e si deve necessariamente dividere la pelle e aggiungere delle patch di carbonio, questo assumendo congelato il tipo di materiale da utilizzare, ovviamente diversi materiali danno output di stendibilità diversi.

Una volta completata la simulazione è necessario creare la pelle in 2D, il plotter infatti è costituito da un piano di appoggio e da un tagliente montato su un bi pattino, le pelli sono di fatto dei rotoli, quindi, è necessario ragionare in un ambiente bi-dimensionale.

Per questa operazione è sufficiente cliccare sul comando "Generate net flat pattern" per ciascuna pelle dopo aver effettuato l'analisi di stendibilità, il programma calcolerà automaticamente la forma della pelle e la posizionerà nel CAD tramite sketch 2D.

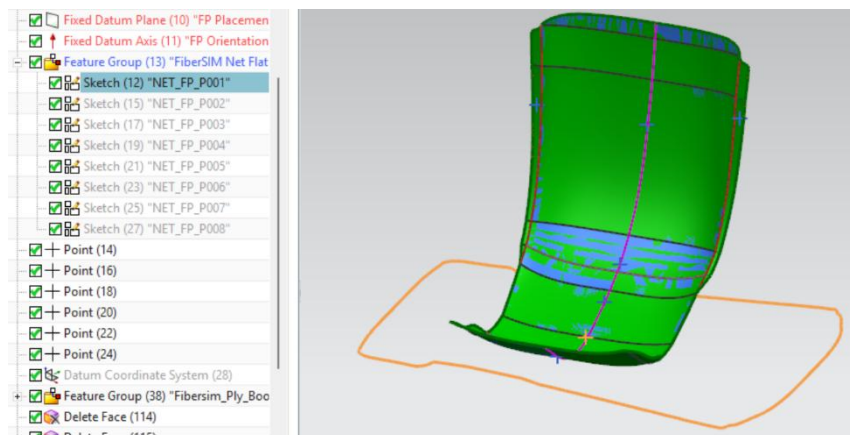


Figura 57 Risultato del comando flat pattern in fibersim come sketch 2D su NX

Una volta simulate tutte le pelli e crati tutti i flat pattern si passa alla sezione "Plybook" su Fibersim, si creano le viste e si mettono in ordine di laminazione i vari strati di carbonio, il programma genererà in automatico il documento che sarà poi convertito in PDF.

Per quel che riguarda il nesting invece, non avendo un plotter a disposizione, si è utilizzato AutoCad per generale delle dime, che sono poi state stampate a grandezza naturale e tagliate a mano con l'utilizzo di un semplice cutter.

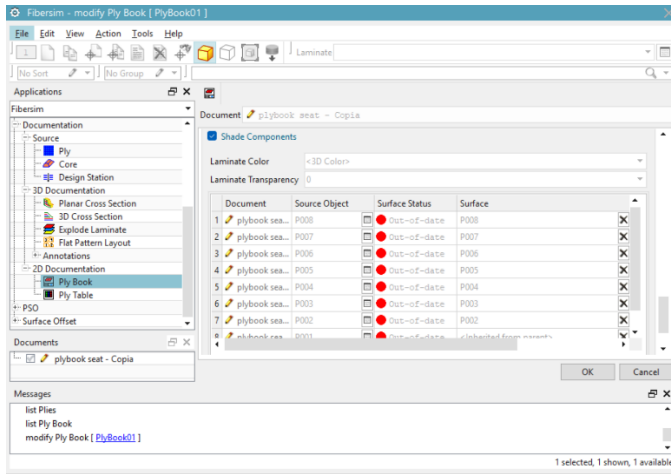


Figura 58 maschera di creazione final del plybook ion fibersim

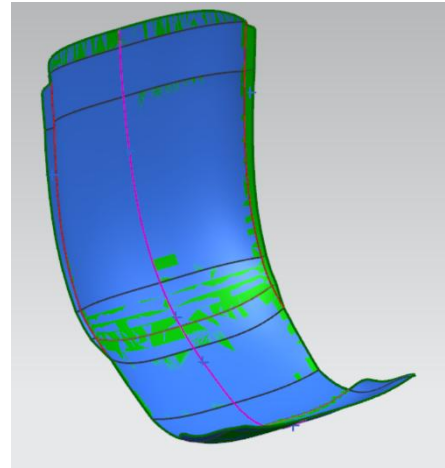


Figura 59 Risultato del plybook: tutte le pelli vengono inserite in automatico su NX da Fibersim come superfici sovrapposte

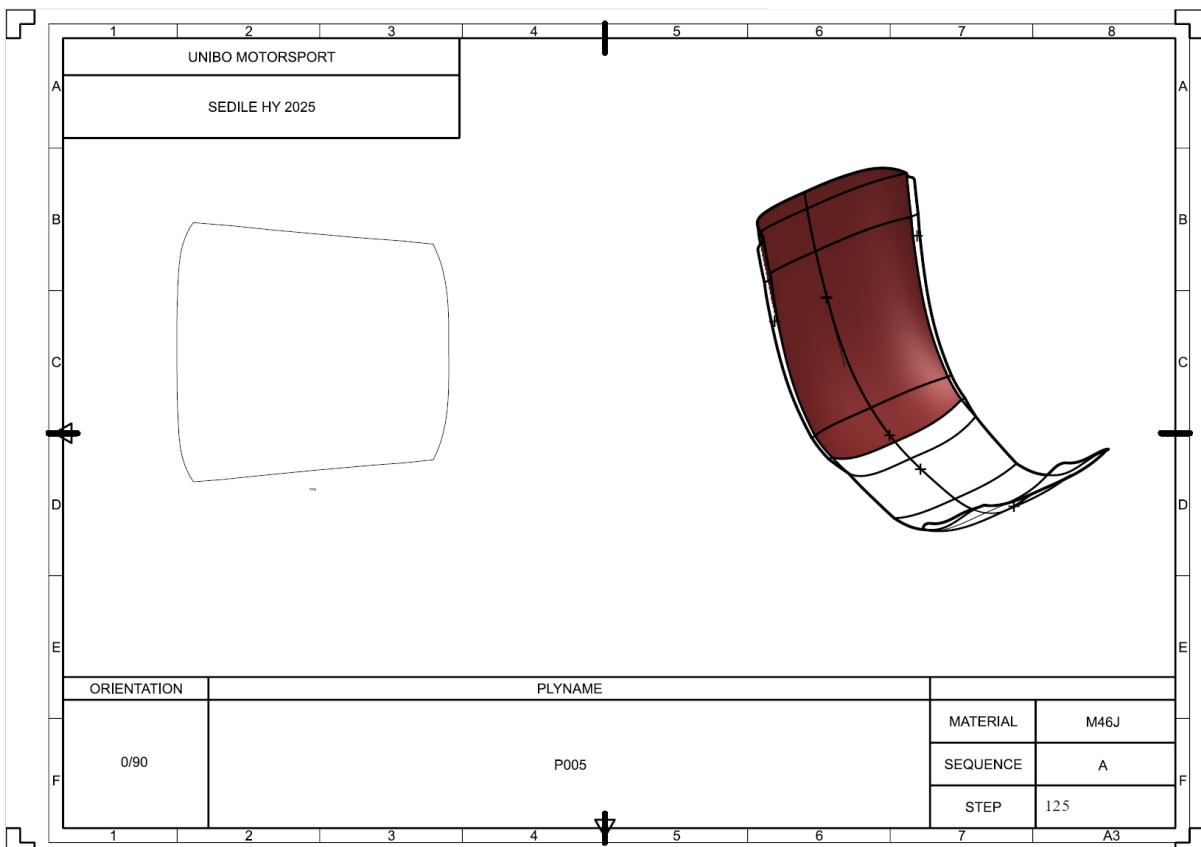


Figura 60 Esempio di una pagina completa del plybook definitivo

## 5 Produzione

Per realizzare un manufatto in materiale composito esistono diverse tecniche con l'obiettivo comune di sfruttare le proprietà della resina di cui il composito è impregnato, solitamente termoidurente, per far sì che, da crudo, il carbonio curi e dia vita ad un componente rigido e con specifiche proprietà meccaniche.

In questa trattazione verrà approfondito esclusivamente il processo utilizzato per laminare il sedile: laminazione manuale in autoclave.

Questa tecnica prevede l'utilizzo di carbonio di tipo pre-preg che sarà posizionato su uno stampo a mano e sarà poi inserito, all'interno di un sacco in cui sarà fatto il vuoto, in un'autoclave.

Questa tecnica ad oggi è quella che permette di avere componenti con le prestazioni meccaniche migliori in assoluto, dato dal fatto che i pre-preg hanno al loro interno una bassissima quantità di resina (con proprietà meccaniche molto peggiori rispetto al carbonio) e, grazie al vuoto e all'autoclave, nel manufatto finito saranno presenti vuoti in scarsissima (approssimabile a zero) quantità.

Il primo passo per la laminazione consiste nella preparazione dello stampo, in questo caso in resina epossidica (Ureol).

Come prima cosa è necessario cartare lo stampo per eliminare eventuali residui dati dalla fresatura delle tavole di resina.

Il processo di carteggiamento è necessario a causa di una qualità superficiale non perfetta visto che si è cercato di spendere il meno possibile per produrlo, che comunque rappresenta un esborso monetario importante, soprattutto visto che difficilmente laminando il componente direttamente sullo stampo in resina, si sarà in grado di produrne un altro con lo stesso stampo.

Come spiegato nell'introduzione, per far sì che la superficie sia pronta si è utilizzata prima con la carta vetrata di grana 320 e successivamente, per non lasciare asperità, con la 800.

L'obiettivo è quello di togliere in primo luogo i residui di lavorazione per poi successivamente spianare la superficie.

Una volta finita la carteggiatura, lo stampo è stato pulito con del semplice detergente in preparazione delle fasi successive per eliminare ogni residuo di lavorazione; polvere e

detriti, infatti, possono danneggiare anche in modo grave lo stampo se non rimossi in questa fase.

Essendo pronti gli stampi per la laminazione sono state tagliate le pelli a mano, dopo aver stampato delle dime per aiutare durante il taglio e per essere sicuri che le pelli utilizzate fossero della geometria corretta, e si è partiti con il processo di laminazione vero e proprio.

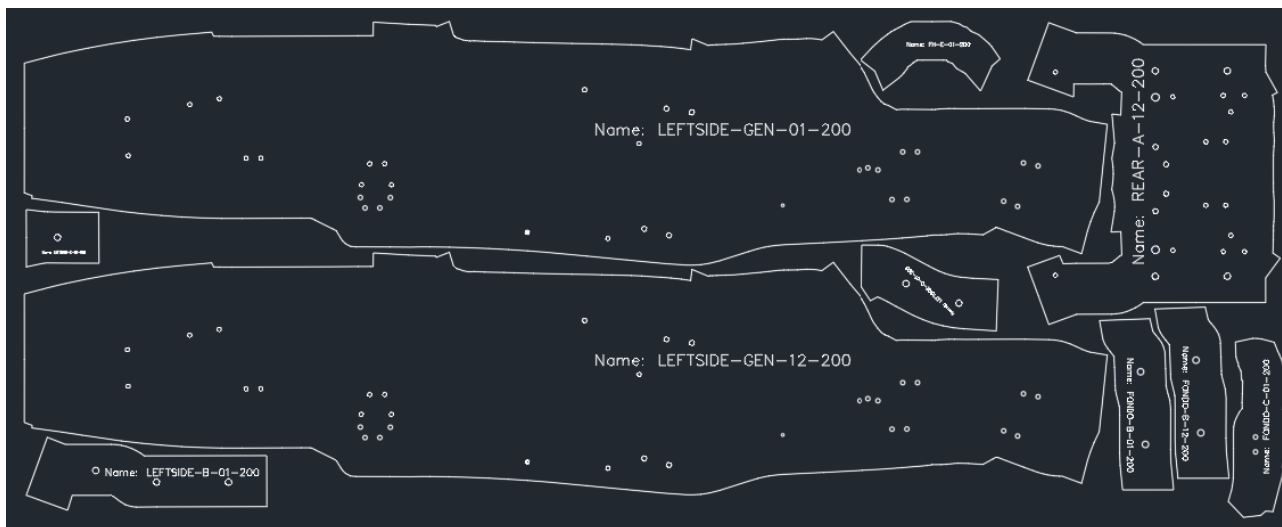
Se fosse stato usato un plotter, come vincolo progettuale, causa grandezza della macchina, si sarebbe dovuto necessariamente dividere ogni taglio in 3m lineari di lunghezza, visto che appunto il piatto in cui il bipattino situato sul plotter riesce ad agire è di 3m.

Si è quindi diviso e ottimizzato il taglio delle pelli per far sì di avere meno sfridi possibili.

Le pelli sono poi state rinominate a mano ogni singola pelle seguendo i disegni su AutoCAD e divise nei vari layer di laminazione per poi metterle in freezer e poterle scongelare solo quando strettamente necessario.

Il carbonio ha infatti vita breve, dodici mesi se mantenuto ad una temperatura di -18 gradi.

Di seguito una foto di una tipica divisione delle pelli nel plotter, in questo caso per il telaio sempre di UniBo Motorsport:



*Figura 61 Esempio di nesting*

Una volta tagliate e marcate le pelli è iniziato il processo di laminazione vero e proprio.

Importante specificare che, dopo la prima pelle e dopo ogni pelle dispari, si è fatto un cosiddetto “vuoto di compattazione”.

Il vuoto di compattazione consiste nel preparare un sacco da vuoto completo e creare il vuoto come per andare in autoclave ma senza effettivamente mandarlo in cura, lasciando il

componente in questo stato per trenta minuti. Con questa tecnica si fa in modo che il carbonio aderisca prima perfettamente allo stampo e successivamente aderiscano bene tra di loro i vari layer, questa tecnica è estremamente consigliata per tutti i pezzi di geometrie complesse e per i pezzi che richiedono molti layer uno sopra l'altro.

Una volta stese tutte le pelli della skin interna è stato laminato uno strato di adesivo strutturale (Deltapreg FA010) e posizionato il core fatto il vuoto, laminato un altro strato di adesivo strutturale seguito poi dalla skin esterna.

La laminazione era quindi conclusa.

L'ultimo passo per avere un componente in fibra di carbonio è quello di preparare il sacco per andare in autoclave.

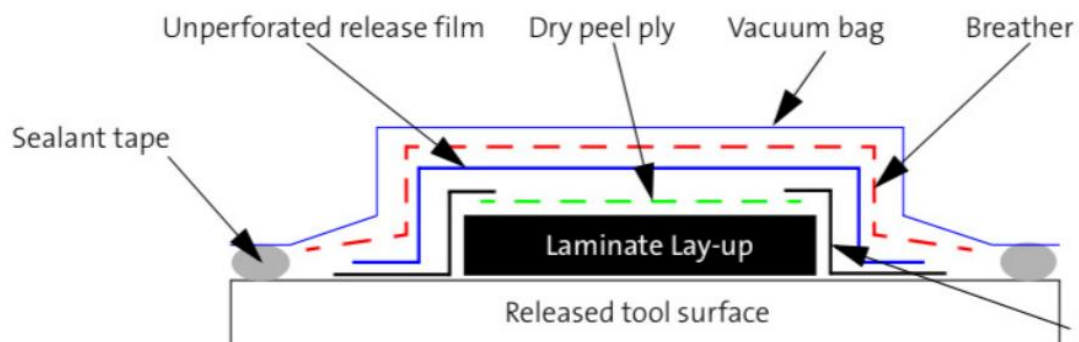


Figura 62 Schema di preparazione del sacco da autoclave, foto presa dalle slide di materiali compositi di UniBo Motorsport

Di seguito i passaggi principali:

a fine laminazione, dopo l'ultima pelle, è necessario inserire del film distaccante, in questo caso non forato. Il film distaccante infatti può essere sia forato che non forato, la differenza principale è che il primo lascia trafilare al suo interno la resina contenuta nel carbonio, viene solitamente utilizzato nella laminazione in wet vista la necessità di far evacuare più resina possibile visto che è presente in grandi quantità.

Sopra il film distaccante si posiziona l'aeratore, un film particolare, composto principalmente da aria, il cui scopo è far passare l'aria che viene aspirata dal componente durante il vuoto e il processo di cottura in generale.

Sopra l'aeratore si posizionano le valvole per aspirare l'aria e come ultimo passo il sacco finale, chiamato solitamente "vacuum bag".

Per chiudere il sacco ci sono due tecniche, o la termosaldatura o la chiusura con un adesivo, solitamente mastice.

Per il componente in esame è stato utilizzato il mastice, posizionandolo prima su un lembo e successivamente ripassando con le dita l'altro lembo per essere sicuri che non ci fossero fuoriuscite d'aria.

Una volta chiuso il sacco si inizia a creare il vuoto: prima poco alla volta, per far sì che il sacco aderisca al pezzo ma facendo sì che sia comunque ancora modificabile.

È molto importante che nel sacco, una volta entrato in autoclave, non siano presenti "ponti": un ponte è una zona nel sacco che è in tensione e che, con la pressione dell'autoclave, potrebbe rompersi e quindi compromettere la cura dell'intero componente.

Il processo di perfezionamento del sacco è molto lungo e importante, specialmente se nello stampo sono presenti spigoli vivi e/o spine, in questi casi è necessario portare più sacco possibile in quelle zone per far sì che, una volta che il carbonio inizi a calare di spessore e quindi curarsi, non si creino tensioni che possono portare a zone di scarsa compattazione oppure zone che possano rompere il sacco.



Figura 63 Esempio di sacco completo

Una volta pronto il componente e il sacco (senza perdite) è stato inserito autoclave per far sì che la resina, termoindurente, si indurisca e creasse il pezzo effettivo.

Per quel che riguarda il ciclo di cura ho seguito il datasheet della resina Deltapreg DT120:

Cure Process	Cure Conditions*
Autoclave	1.5 hours @120°C
	12 hours @80°C
	4 hours @100°C
	1.0 hour @135°C

\* To be optimized based on laminate shape, size and construction.

Figura 64 Cicli di cura suggeriti per resina DT120, dal DS della delta tech

Di seguito il ciclo dell'autoclave utilizzato, essendo presente del core si è deciso di curare a 2Bar per far in modo che il core non collassasse perpendicolarmente alla superficie del pezzo.

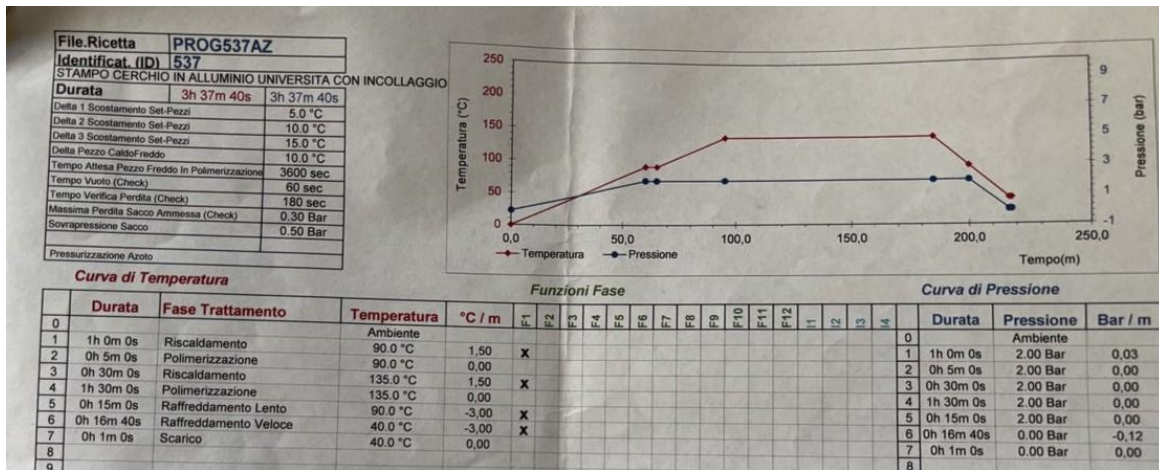


Figura 65 Report dell'autoclave del ciclo utilizzato

## 6 Validazione fisica componente

Dopo che è terminata la produzione è stato necessario validare fisicamente il sedile prima di montarlo in macchina ed iniziare i test in pista veri e propri con il prototipo ready to race.

Idealmente dopo aver prodotto un componente in fibra di carbonio si dovrebbero effettuare dei test di termografia ed ultrasuoni su di esso per essere sicuri che non ci siano cricche, inclusioni o vuoti interni allo stesso.

Purtroppo, in questo caso, non è stato possibile compiere questo tipo di test, causa budget, è stato quindi necessario verificare il componente in altri modi, più rudimentali.

Per quel che riguarda la tenacità dei laminati sono stati presi dei dati simili da alcuni pannelli sandwich che erano stati prodotti per prove a shear e three point bending per il pacco batteria, la competizione richiede infatti alcuni test fisici che di fatto approssimano il laminato ad isotropo prima di validare telaio e sistema powertrain elettrico.

Successivamente si è passati alla validazione in macchina: è infatti stato montato il sedile, cinture e il pilota è stato posizionato in macchina come se avesse dovuto effettivamente guidare, quindi anche con tutto l'equipaggiamento in conformità al regolamento, è stato poi chiesto ai piloti di simulare una forte frenata, anche se si sapeva che, come detto, non si trattava del worst case scenario per il sedile, per vedere effettivamente come avrebbe reagito il componente. Sotto il sedile era stato posta una scala graduata per vedere le deformazioni effettive.

Un'altra prova realizzata è stata tirare il sedile con gli stessi 800N, per questo è stato usato un dinamometro e, sempre con l'ausilio di una scala graduata, è stata misurata la deformazione lungo l'asse longitudinale della vettura.

Avendo il sedile superato queste prove ed essendo i risultati fisici comparabili a quelli della simulazione è stato deciso di validare il componente e di montarlo quindi sul prototipo ufficiale.

Il sedile ha superato tranquillamente la prima stagione di gare e test e sarà montato con tutta probabilità anche sul prototipo della stagione 2026/2027, soddisfacendo quindi uno degli obiettivi che era quello di utilizzarlo per più anni successivi.

## 7 Conclusioni



Figura 66 Sedile completo e pronto per essere montato

L'utilizzo di diversi software, CAD 3D, 2D e di FEM, ha permesso di creare un sedile costituito da un pannello sandwich di fibra di carbonio e Nomex.

Un'analisi a convergenza su element size, growth rate e numero di substeps ha permesso di ottimizzare una mesh con ottimi risultati di "Jacobian ratio", "skewness", "ortogonal quality", "aspect ratio".

Come risultati della simulazione si considera quindi un IRF di 0.31315 e una massima deformazione di 3.0549mm, rispettando i vincoli che erano stati prefissati.

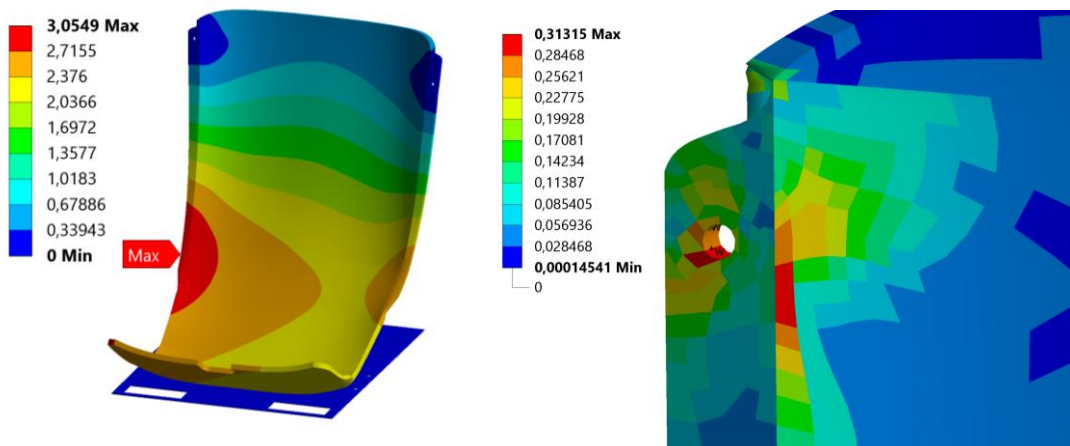


Figura 67 IRF e deformazione massima per i casi richiesti

Come anticipato il caso di frenata non è il più pesante dal punto di vista strutturale ma è il più importante dal punto di vista delle deformazioni.

I materiali utilizzati sono stati M46J, per il suo alto modulo aveva come obiettivo principale dare robustezza e tenacità al componente, T700UD, per casi in cui la direzione principale delle forze è singola, come in questo caso, il filamento unidirezionale permette di aumentare la rigidità e le caratteristiche meccaniche aggiungendo pochissimo peso e, infine, T800,

usato nella zona degli attacchi per le ottime caratteristiche di allungamento a rottura e resistenza agli impatti.

Come core, causa disponibilità di reperimento fisica, è stato scelto un honeycomb di Nomex a celle piccole alto 5mm, con un raggio minimo di curvatura conforme a quella che sarebbe stata la geometria del sedile, questo ha permesso di allontanare il carbonio dall'asse principale d'inerzia del pezzo e quindi di aumentare in maniera esponenziale il momento d'inerzia con un aumento quasi trascurabile del peso del componente.

Questo progetto si è partiti da un mockup per la posizione di guida dei piloti, che è stato convertito in una serie di misure che sono state inserite in un software CAD, la geometria e il layup sono state poi simulate ed ottimizzate, anche grazie all'utilizzo dei tre tipi diversi di carbonio citati e la divisione del sedile in aree geometriche con diverso layup per minimizzarne l'utilizzo.

Successivamente, con la stesura della documentazione tecnica, sono stati prodotti stampo, plybook e nesting e il sedile è stato realizzato tramite la tecnica di laminazione manuale in autoclave, come ciclo si è utilizzato uno a 135 gradi e 2 bar di pressione. La tecnica che ad oggi conferisce le migliori caratteristiche meccaniche a manufatti in materiale composito.

Come detto, come vincoli si è tenuto un coefficiente di sicurezza minimo di circa 3 e una massima deformazione inferiore ai 3mm.

Tutto questo ha permesso di realizzare un sedile di circa il 29% più leggero di quello precedentemente montato sul prototipo a parità di caratteristiche meccaniche, la sua forma inarcata ha anche reso possibile un miglior packaging dei componenti in macchina contribuendo a far diminuire l'interasse del veicolo e migliorandone quindi le prestazioni dinamiche.

Zona geometrica	Aree mm <sup>2</sup>	Pelli	Peso parziale [kg]
Schienale	215047	7	0,594906021 090*2 (M46J)+UD*1(T700)+core+UD*1(T7000)+090*3(M46J)
Seduta	118430	10	0,46803536 090*4(M46J)+core+090*2(M46J)+UD*2(T700)+090*2(M46J)
Gambe	60840	8	0,192351744 090*1+4545*2+090*1+core+090+4545*2+090*1 (tutto M46J)
Attacchi	11888	16	0,075170202 090*16 (T800)

Figura 68 Layup definitivo

## 8 Bibliografia

Brugo Tommaso Maria, dispense del corso: Laboratorio di progettazione meccanica con materiali compositi

Loris Giorgini, dispense del corso: Fondamenti di scienza dei polimeri e dei materiali compositi M

Massimiliano De Agostinis, dispense del corso: Chassis and body design and manufacturing

Daniel Gay, Composites materials, design and applications, CRC PRESS, third edition

Formula student Germany rules 2024-2025

<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/18/3716> Experimental Investigation of the Tribological Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites under Boundary Lubrication di Corlina Birleanu et Al.

Normative ASTM D790, D7264, D4762

Delta Tech DT 120 datasheet, DT120-MatrixDS-11

<https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/Carbon-Fiber-Selector-Guide.pdf> ,

Toray Composite Materials America, Inc., Carbon-Fiber-Selector-Guide,

Obomodulan® EP 5060 blue datasheet

Tesi di Derek Biagini, Progettazione e analisi di un collegamento bullonato per un cerchione in fibra di carbonio e alluminio

Tesi di Federico Minieri, Alleggerimento inserti telaio per la vettura Formula Sae del team UniBo Motorsport

Relazione Tirocinio di Andrea Monari, Composite Manufacturing

Presentazione di UniBo Motorsport

Sito dell'azienda Millper: [profillinalluminio.millper.it](http://profillinalluminio.millper.it)