



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Progettazione di un telaio monoscocca in composito per una vettura Formula SAE

Design of a composite monocoque chassis for a Formula SAE car

Candidato:
Federico Fanini

Relatore:
Prof. Marco Sasso

Anno Accademico 2023-2024

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Sommario

Questa tesi tratta la progettazione di una monoscocca in fibra di carbonio per una vettura Formula Student. L'obiettivo è quello di sviluppare un progetto che segua tutti i requisiti tecnici e di sicurezza richiesti dall'organizzazione SAE, per le rispettive competizioni, e che tenga conto di tutte le specifiche fatte dal team per la realizzazione del progetto.

L'elaborato inizia con una breve introduzione alla competizione e al ruolo della monoscocca nell'insieme complessivo del veicolo, oltre a una panoramica sui compositi per dare un quadro del contesto in cui viene sviluppato il progetto. Successivamente vengono presentate tutte le linee guida tecniche stabilite dal regolamento FSG¹, dal team e dall'azienda nella quale la monoscocca verrà prodotta. La progettazione della monoscocca viene quindi presentata in dettaglio spiegando tutto il processo dietro il disegno CAD dal teo ai stampi per la sua realizzazione, i conti effettuati per la verifica della rigidità torsionale e un confronto con i risultati ottenuti al FEM.

Infine vengono mostrate le fasi della produzione e discussi i risultati messi a confronto con i precedenti progetti, terminando con i potenziali percorsi per i futuri sviluppi del progetto.

¹Formula student rules FSG 2024

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Formula Student	1
1.1.1	Eventi Statici	2
1.1.2	Eventi dinamici	2
1.2	Polimarche racing team	4
1.2.1	Il nuovo progetto P5	4
1.3	Definizione della monoscocca e il suo ruolo nell'assieme della vettura	5
1.4	Materiali compositi in fibra di carbonio	6
1.4.1	Matrici PMC	7
1.4.2	Fibre di rinforzo	7
1.4.3	Strutture Sandwich	12
1.4.4	Processo di produzione dei compositi	13
2	Requisiti geometria monoscocca	15
2.1	Regolamento FSG	15
2.1.1	Carrozzeria	18
2.1.2	Sistema sterzante	18
2.1.3	Design generale del telaio	18
2.1.4	Materiali alternativi	18
2.1.5	Strutture composite	18
2.1.6	Documentazione strutturale	19
2.1.7	Roll hoops	19
2.1.8	Front Bulkhead	20
2.1.9	Struttura di impatto	20
2.1.10	Collegamenti bullonati alla struttura primaria	21
2.1.11	Impact attenuator	22
2.1.12	Cockpit	23
2.1.13	Percy (95th percentile male)	24
2.1.14	Attacco dell'imbracatura del conducente	25
2.1.15	Seduta del pilota	25
2.1.16	Firewall	25
2.1.17	Shoulder harness	25
2.1.18	Poggiatesta	26
2.2	SES (Structural Equivalency spreadsheet)	26
2.3	Guidance del team	28

3	Progettazione	29
3.1	Progettazione della monoscocca	29
3.1.1	Scelte progettuali	29
3.1.2	Telaio in traliccio	29
3.1.3	Telaio monoscocca	30
3.1.4	Telaio Ibrido	30
3.1.5	Programma utilizzato per la progettazione CAD	32
3.1.6	Ingombri principali	34
3.1.7	Design CAD della monoscocca	39
3.2	Dimensionamento degli inserti	51
3.3	Rigidezza del telaio e risultati FEM	53
3.3.1	Importanza della rigidezza in un telaio	53
3.3.2	Teoria sulla rigidezza torsionale	53
3.3.3	Rigidezza del telaio e FEM	56
3.4	Stampi	60
3.4.1	Tipologia degli stampi	60
3.4.2	Progettazione degli stampi	63
3.5	Studio e scelta dei materiali	66
3.6	P5 interamente progettata e realizzata da noi	67
4	Conclusioni	71
4.1	Confronto con vecchio progetto P4	71
4.2	Sviluppi futuri	72

Elenco delle figure

1.1	Formula student events map	1
1.2	Grafico a torta punteggio eventi gare	3
1.3	Rendering P5	4
1.4	Monoscocca Lotus 25	5
1.5	Monoscocca MP4-1	5
1.6	Struttura di un materiale composito rinforzato con fibre.	6
1.7	Carbon fiber grades Toray [®] [1]	8
1.8	Esploso laminazione	9
1.9	Trama e ordito nella direzione di svolgimento del rotolo	10
1.10	Schema Plain	10
1.11	Tessuto Plain	10
1.12	Schema Twill	11
1.13	Tessuto Twill	11
1.14	Schema Satin	11
1.15	Tessuto Satin	11
1.16	Struttura a sandwich	12
2.1	Rollover protection envelope	17
2.2	Surface envelope	17
2.3	Richieste dei supporti del main hoop e dela posizione volante	19
2.4	Richieste laminazione front hoop	20
2.5	Side Impact structure monoscocca (SIS)	21
2.6	Imbullonatura bracci di supporto dei roll hoop	21
2.7	Cockpit opening template	23
2.8	Cockpit internal cross section template	23
2.9	Distanza minima dal casco	24
2.10	Posizionamento Percy	24
2.11	Montaggio del lap belt e dello shoulder harness	26
2.12	Structural Equivalency Spreadsheet, equivalenza front bulkhead	27
3.1	Telaio in traliccio	29
3.2	Telaio P4 laminato su stampi	30
3.3	Telaio ibrido traliccio-monoscocca	30
3.4	Grafico radar per tipologie di telaio	31
3.5	Interfaccia principale di NX	32
3.6	Sezione curve	33

Elenco delle figure

3.7	Sezione superfici	33
3.8	Sezione assieme	34
3.9	Altezza muso del telaio	34
3.10	Ingombro TSAC	35
3.11	TSAC	35
3.12	Percy posizionato nella PX con misure angol	36
3.13	Dima	36
3.14	Posizionamento Pedalbox e Piano dei non crushable objects	37
3.15	Posizionamento IA	39
3.16	CAD Posizionamento ingombri	40
3.17	Sketch sul piano verticale	40
3.18	Estrusione superfici orizzontali e verticali	41
3.19	Inviluppo della dash sulla circonferenza del volante	42
3.20	Bozza delle superfici esterne	43
3.21	Raggi di curvatura honeycomb	44
3.22	Inspessimento delle superfici	45
3.23	Sezione front hoop	46
3.24	Curva guida	46
3.25	Inclinazione Front Hoop	46
3.26	Firewall	47
3.27	Posizionamento Firewall	47
3.28	Anello	48
3.29	Posizionamento Anello	48
3.30	Main hoop	49
3.31	Posizionamento main hoop	49
3.32	Sezione laterale	50
3.33	CAD Completo	51
3.34	Inserto	52
3.35	Laminazione inserto + Keensert	52
3.36	Momento trocente	54
3.37	Tensione tangenziale su sezione circolare	54
3.38	Sezione circolare cava	55
3.39	Schema tre molle in serie	56
3.40	Grafico $K_{eq}(K_{Chassis})$	57
3.41	Gradico $dK_{eq}/dK_{Chassis}$	58
3.42	Immagine FEM telaio	59
3.43	Grezzo MDF	61
3.44	Stampi MDF P4/EVO	61
3.45	Stampi in acciaio	61
3.46	Stampo in Raku-Tool	62
3.47	Grezzo MDF	63
3.48	Stampi MDF P4/EVO	63

3.49	Tappo con battuta	64
3.50	Sezione stampi laminato	64
3.51	Esploso stampi	65
3.52	Controstampo in Ureol	65
3.53	Semistampo sinistro del telaio	66
3.54	Zone del telaio nel SES	66
3.55	Laminazione prima pelle	67
3.56	Chiusura stampi	68
3.57	Inserimento Core	68
3.58	Telaio P5	68
3.59	Telaio P5	69
3.60	P5 at Formula Student Portugal	69
4.1	Confronto pesi	71
4.2	Confronto rigidzze	71
4.3	Grafico rigidzza specifica	72

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Formula Student

La formula Student¹ è una competizione universitaria internazionale di design ingegneristico, organizzata inizialmente dalla Society of Automotive Engineers (SAE²) con lo scopo di far competere studenti universitari nella progettazione e realizzazione di prototipi da corsa stile formula.

Istituita nel 1981, è stata concepita come un esempio pratico del concetto di "learning by doing". L'obiettivo è quello di permettere agli studenti di applicare le competenze acquisite durante il loro percorso di studi in un contesto che simula la struttura di un'azienda in modo da prepararli al mondo del lavoro.

Ogni team è organizzato come una scuderia con il compito di gestire l'intero ciclo di vita del progetto. Questo include la progettazione, la produzione e i test del veicolo, in parallelo all'analisi economica e promozione del progetto.

La competizione conta ad oggi circa 950 team da tutto il mondo con 18 eventi sparsi tra Europa, America ed Asia.



Figura 1.1: Formula student events map

La valutazione del progetto avviene attraverso una serie di prove che possono essere suddivise in due categorie principali: eventi statici e dinamici.

¹Formula Student

²SAE

1.1.1 Eventi Statici

Engineering design:

In questo evento gli studenti espongono tutte le scelte tecniche fatte durante la progettazione e le soluzioni costruttive utilizzate per la realizzazione della vettura. L'esposizione è accompagnata da un documento di 8 pagine appositamente preparato dal team (Design report) da consegnare ai giudici che al contempo pongono domande sul progetto e ispezionano la vettura.

Cost and manufacturing:

Il cost event è composto da un'esposizione accompagnata da documenti come il Cost report e la BOM, che contiene una lista di tutti i componenti con relativi costi di produzione o di acquisto nel caso di componenti di terze parti. L'obiettivo di questo evento è valutare il grado di comprensione del team riguardante il processo di produzione e il costo associato alla produzione del prototipo. Questo implica l'illustrazione delle decisioni appropriate prese considerando il compromesso tra il contenuto, il costo e le scelte impiegate per minimizzazione dei costi.

Business plan presentation:

L'obiettivo di questo evento è presentare un modello di business incentrato sulla vettura o su un suo componente e presentarlo ad una platea di giudici in veste di potenziali investitori. Bisogna dimostrare che l'opportunità di business sia in grado di generare profitto e assicurare la producibilità e scalabilità della vettura.

1.1.2 Eventi dinamici

Per poter partecipare agli eventi dinamici la vettura deve prima passare una serie di test e scrupolose verifiche tecniche atte a verificare la conformità al regolamento. Solamente dopo aver superato tutte le verifiche si può accedere agli eventi dinamici che permettono di mettere alla prova la vettura su dei circuiti molto tecnici per valutarne l'accelerazione, agilità ed efficienza.

Acceleration:

La prova di accelerazione si svolge su un rettilineo di 75 m con partenza da fermo e permette di dimostrare il grip della vettura e la coppia massima che è in grado di esprimere.

Skidpad:

Questo test è pensato per mettere alla prova la capacità di sterzata della vettura rispetto alle accelerazioni laterali che è in grado di sostenere. Il tutto si svolge su un circuito a forma di otto con a disposizione due giri di cui viene cronometrato solamente il secondo.

Autocross:

L'autocross consiste in un giro cronometrato su di un circuito con brevi rettilinei, slalom, curve veloci e lunghezza non maggiore di 1.5 km. Con i tempi registrati viene fissato l'ordine di partenza per l'evento finale di endurance.

Endurance and efficiency:

L'endurance è l'evento principale di tutta la competizione nonchè il più impegnativo, bisogna percorrere più giri su un circuito simile a quello dell'Autocross per un totale di 22 km, con un pit stop per il cambio pilota a metà gara. Durante questo evento si valutano tutti gli aspetti principali del veicolo come la velocità, la dinamica, l'affidabilità e i consumi che vengono rilevati a fine prova.

La competizione è suddivisa in tre classi Combustion Engine Vehicle (CV), Electric Vehicle (EV) e la Driverless Cup (DC), per ognuna delle quali ci sono prove specifiche. Per ogni prova terminata viene attribuito un punteggio che contribuisce a un totale massimo di 1000 punti. Questi punti sono distribuiti in modo diverso tra i vari eventi, in base a specifici pesi assegnati alle prove.

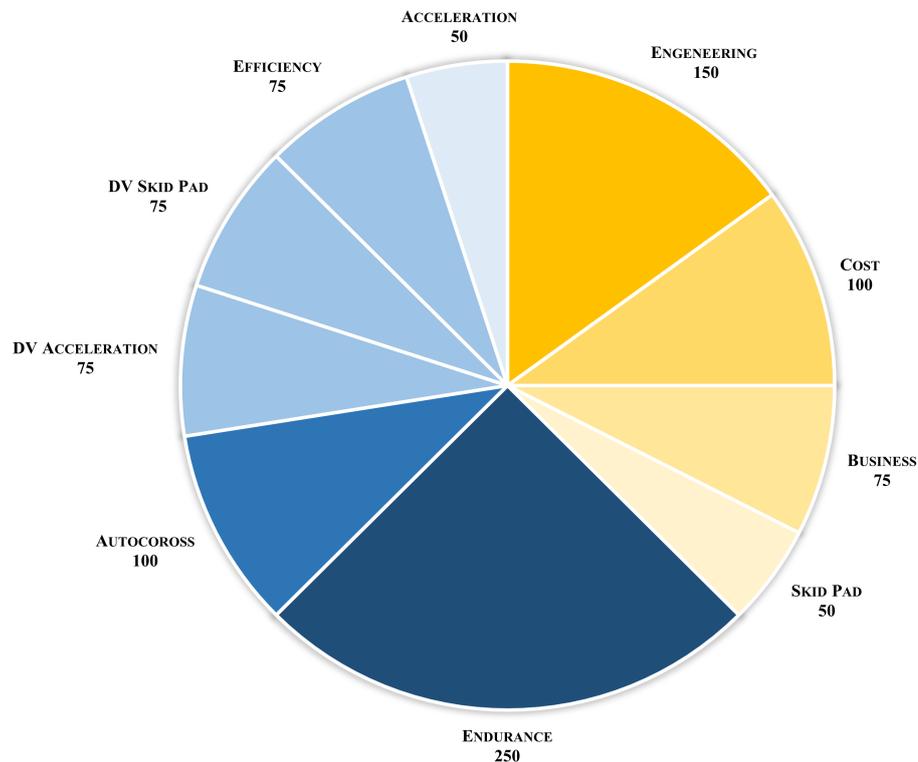


Figura 1.2: Grafico a torta punteggio eventi gare

Alla fine della competizione si proclama vincitore il team che ha totalizzato il maggior numero di punti, i quali sono utilizzati anche per stilare la classifica internazionale.

1.2 Polimarche racing team

Il Polimarche racing team è la squadra Formula SAE dell'università politecnica delle Marche che nasce nel novembre 2013 e da allora ha prodotto cinque vetture, tre con il telaio in traliccio di acciaio e le ultime due in monoscocca di fibra di carbonio, con le quali ha partecipato a diverse competizioni in Europa. Gli studenti che partecipano al progetto provengono dalle varie facoltà di ingegneria (meccanica, elettronica, biomedica...) e di economia, ad oggi conta circa 70 membri attivi impegnati nel nuovo progetto.



Il team è strutturato come una scuderia con reparti dedicati come chassis, aerodynamics, dynamics, battery pack, controls, electronics e static events a capo dei quali ci sono i rispettivi responsabili. Questi insieme al team leader e ai capi tecnici formano il Consiglio di amministrazione (CDA) che prende le decisioni strategiche per il team.

1.2.1 Il nuovo progetto P5

Il nuovo progetto rappresenta il secondo grande step del team, poiché si passerà per la prima volta alla propulsione elettrica, ciò ha permesso l'elaborazione di un progetto completamente nuovo partendo da un foglio bianco.

Le prime fasi della progettazione sono partite nel 2023 fissando le principali scelte tecniche che sono scaturite in un nuovo telaio monoscocca in fibra di carbonio, un pacco batterie prodotto internamente dal team, due motori elettrici posti fuoribordo sulle masse non sospese, un nuovo apparato sospensivo e un nuovo pacchetto aerodinamico.



Figura 1.3: Rendering P5

1.3 Definizione della monoscocca e il suo ruolo nell'assieme della vettura

La monoscocca è una tipologia di telaio caratterizzato da una struttura portante unica e rigida che svolge una funzione di supporto basilare, è stata utilizzata per la prima volta dal team Lotus F1 nel 1961 con la Lotus 25 realizzata da un'unica struttura in alluminio. Ad introdurre poi l'uso dei materiali compositi per la monoscocca è stata la McLaren con la MP4-1, con questa nuova tecnologia si sono raggiunti un livello di sicurezza, performance e leggerezza dei telai talmente alto che tuttoggi è ancora alla base dei moderni telai di Formula 1.

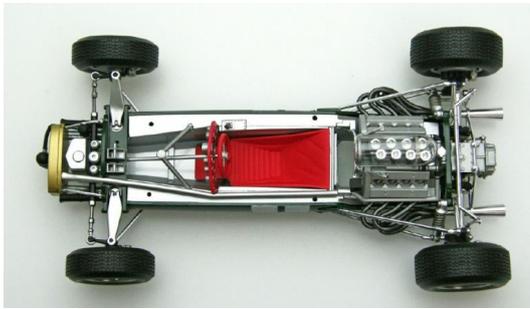


Figura 1.4: Monoscocca Lotus 25



Figura 1.5: Monoscocca MP4-1

Il telaio ricopre un ruolo centrale nel veicolo e assolve tre funzioni principali: quella funzionale, quella legata alla sicurezza e quella orientata alle performance. La struttura deve tenere assieme tutte le componenti della vettura, conciliare le necessità tecniche per un corretto funzionamento e resistere ai carichi esterni provenienti dall'interazione tra pneumatici e terreno trasmessi al telaio tramite i bracci delle sospensioni, inoltre ha lo scopo di trasferire i carichi aerodinamici alle ruote.

Il telaio rappresenta la cellula protettiva che avvolge il pilota, proteggendolo dagli urti laterali, anteriori e posteriori. Questo, in combinazione con i roll hoops, protegge anche dai ribaltamenti del veicolo.

A causa della connessione con il sistema delle sospensioni, la rigidità con cui il telaio risponde ai carichi è di grande importanza nella progettazione, soprattutto in ambito racing. In particolare, la rigidità torsionale del telaio è quella che maggiormente influenza la dinamica del veicolo durante la fase di sterzata.

Un altro aspetto importante è il peso del telaio che insieme al pilota, al pacco batterie e ai motori rappresenta uno dei maggiori contributi alla massa finale del veicolo. Questo peso deve essere ridotto al minimo per aumentare le prestazioni della vettura, ridurre i consumi e aumentare l'autonomia.

1.4 Materiali compositi in fibra di carbonio

I materiali compositi[2] sono materiali eterogenei, costituiti da due o più fasi chimicamente distinte e con proprietà fisiche differenti. Le proprietà finali del materiale composito sono generalmente superiori rispetto a quelle delle singole fasi che lo compongono.

Le fasi si distinguono in:

- **Matrice:** costituita da una fase considerata continua e omogenea ed ha le funzioni di mantenere in posizione e coeso il rinforzo proteggendolo dagli agenti esterni.
- **Rinforzo:** rappresenta la fase dispersa nella matrice ed avendo proprietà meccaniche superiori ha il compito di fornire la rigidità e la resistenza meccanica al composito.

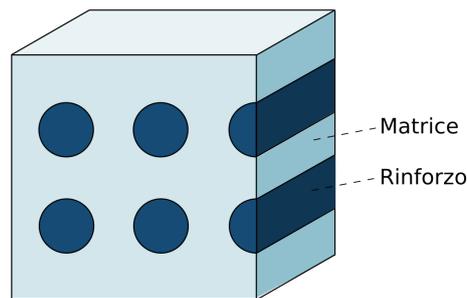


Figura 1.6: Struttura di un materiale composito rinforzato con fibre.

Questa struttura ha come risultato un'elevata resistenza del materiale e al contempo una notevole leggerezza, paragonando i compositi rinforzati in fibra di carbonio con un metallo si ha che a parità di resistenza possono essere fino all'80% più leggeri di un acciaio e circa il 50% più leggeri rispetto all'alluminio.

Esistono varie tipologie di materiale composito e si differenziano in base alla famiglia di materiali usata nella matrice, i principali sono:

- PMC: Compositi a matrice polimerica, sono i più comunemente usati;
- MMC: Compositi a matrice metallica;
- CMC: Compositi a matrice ceramica;

I compositi PMC sono quelli largamente usati in ambito aerospaziale e nelle vetture da competizione pertanto sono quelli che saranno approfonditi in questa tesi.

1.4.1 Matrici PMC

Le matrici polimeriche sono resine sintetiche con il quale vengono impregnati i rinforzi, esse si suddividono a loro volta in due tipologie principali:

- **Termoindurenti:** Le resine termoindurenti, come epossidiche, fenoliche e amidiche, sono allo stato liquido durante la lavorazione del composito per poi essere solidificate attraverso un processo di reticolazione dopo il quale non possono più essere rimodellate o fuse;
- **Termoplastiche:** A temperatura ambiente sono allo stato solido e somministrando calore esse fluidificano, questo comportamento reversibile permette il loro riutilizzo;

Le resine termoindurenti sono quelle più utilizzate poiché possiedono maggiori proprietà meccaniche pure avendo un maggior costo e impatto ambientale.

1.4.2 Fibre di rinforzo

Ci sono diversi materiali usati per il rinforzo e a seconda di quello utilizzato le proprietà del laminato cambiano notevolmente in termini di resistenza meccanica, modulo di Young, densità relativa, durezza, conducibilità, resistenza al calore e costi. La scelta del materiale ha quindi un ruolo fondamentale e dipende dalle necessità tecniche richieste nelle varie zone della monoscocca.

I materiali più utilizzati sono:

- **Vetro:** con proprietà meccaniche medie, relativamente pesante rispetto alle altre e un costo medio-basso;
- **Carbonio:** alte proprietà meccaniche, una delle fibre più leggere con un costo elevato;
- **Zylon®:** ha le maggiori proprietà meccaniche, è leggero, ma meno rispetto al carbonio e ha il maggior costo;
- **Aramidiche:** come ad esempio il Kevlar® che ha buone proprietà meccaniche come resistenza agli urti e alle abrasioni, leggerezza simile al carbonio con un costo medio-alto;
- **Naturali:** come il lino che ha basse proprietà meccaniche, un peso moderato e un costo basso ma con la caratteristica di un minor impatto ambientale.

Tutte le fibre sopra citate sono utilizzate in ambito motorsport ma quando si tratta della parte strutturale di una vettura da competizione i materiali utilizzati sono il Kevlar, ma soprattutto il carbonio. Di queste ultime esistono tre principali categorie

distinte in base alla loro rigidezza: Standard Modulus (ST), Intermediate Modulus (IM) e High Modulus (HM).

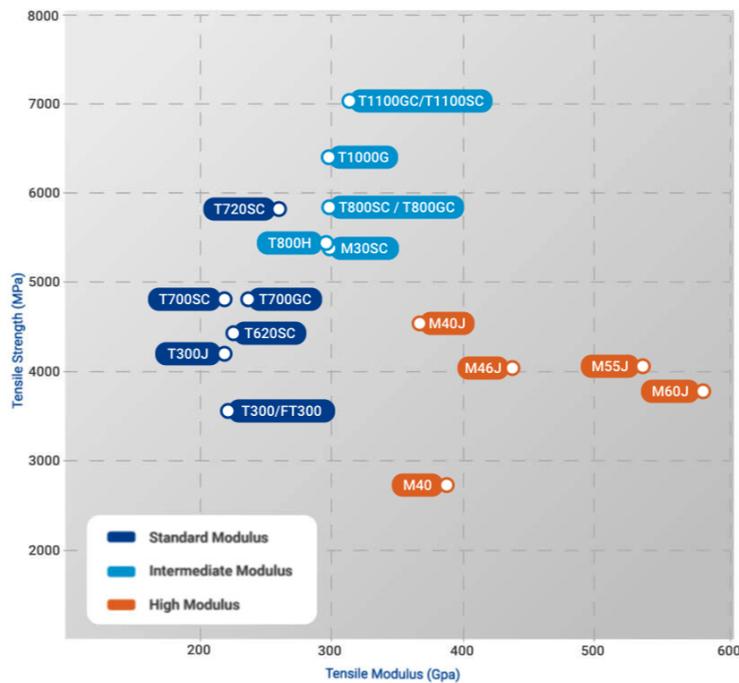


Figura 1.7: Carbon fiber grades Toray[®][1]

Un'ulteriore classificazione delle fibre è basata sulla loro lunghezza:

- Fibre corte: le fibre sono disperse in maniera aleatoria nella matrice, questo conferisce un comportamento meccanico del laminato macroscopico isotropo.
- Fibre lunghe: le fibre sono disposte in modo ordinato e orientato nella matrice e questo conferisce un comportamento meccanico macroscopico anisotropo.

Le proprietà meccaniche finali del laminato dipendono dal modo in cui matrice e rinforzo trasmettono l'un l'altro gli sforzi che ricevono e si ha che per un'interfaccia maggiore di queste due fasi c'è un miglior trasferimento dei carichi. Per questo motivo i materiali compositi a fibra lunga hanno migliori performance e sono quelli che saranno trattati maggiormente nello specifico.

Il materiale compositi a fibra lunga maggiormente utilizzati sono quelli rinforzati con fibra di carbonio e vengono denominati CFRP (Carbon fiber reinforced polimer). Le proprietà meccaniche sono ulteriormente dipendenti dalla forma, dimensione, distribuzione e orientamento delle singole fibre lunghe, sono stati creati quindi diversi tipi di tessiture biassiali che differiscono per proprietà di distribuzione della forza nelle diverse direzioni in cui sono poste le fibre a seconda della trama. La maggior parte dei compositi viene prodotta tramite laminazione, ovvero il processo di unione di differenti strati di tessuto ognuno con una propria orientazione delle fibre. Con

questo processo si riesce a direzionare e concentrare il verso in cui la resistenza del composito deve essere maggiore la quale coincide con la direzione longitudinale delle fibre.

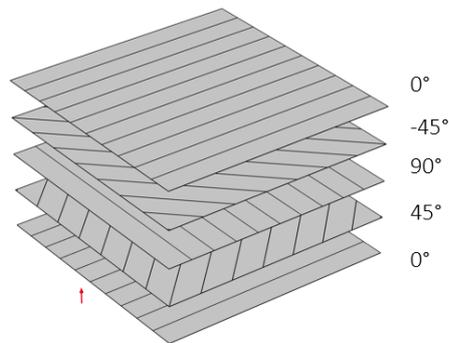


Figura 1.8: Esplosione laminazione

Le lamine sono ottenute tramite "tessitura" delle fibre che possono essere di carbonio, vetro, Kevlar o una combinazione di queste. Le principali tipologie di tessuto sono:

- Unidirezionale (UD)
- Biassiale
- Intrecciato
- Multiassiale
- MAT
- Altro

In questo elaborato sono trattati principalmente i tessuti UD e biassiali, per quanto riguarda i tessuti unidirezionali come dice la parola stessa le fibre di rinforzo sono tutte orientate nella stessa direzione, questo permette al materiale di sfruttare le massime proprietà della fibra in quella direzione.

I tessuti biassiali invece sono costituiti da un intreccio di fasci di fibre nelle due direzioni ortogonali tra loro rispettivamente di 0° "Ordito" che è la direzione coincidente con la lunghezza del tessuto nel suo verso di svolgimento e 90° "Trama" è invece la larghezza del rotolo.

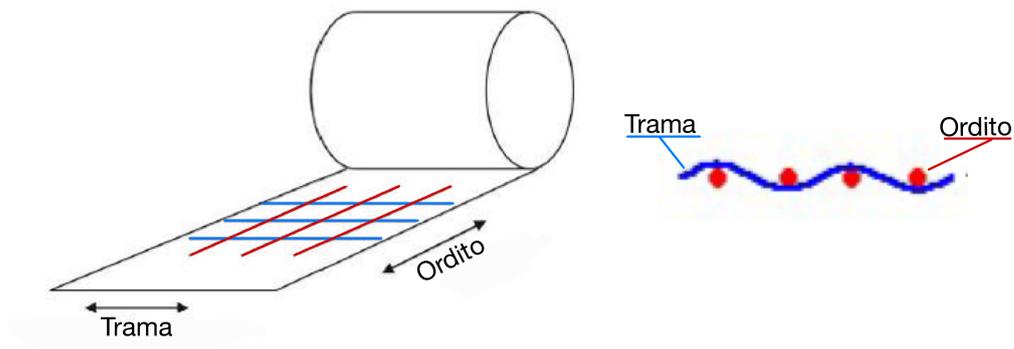


Figura 1.9: Trama e ordito nella direzione di svolgimento del rotolo

Il tipo di trama influisce su alcune sue proprietà come la **drappabilità**, cioè la capacità del tessuto di seguire le forme complesse dello stampo, la **stabilità** delle fibre durante il processo di laminazione sugli stampi e il **disallineamento** ovvero l'ondulazione delle fibre che avviene sul piano del tessuto e determina una diminuzione delle proprietà del laminato. Le proprietà come peso e porosità del tessuto invece sono determinate dalla quantità di fibre per centimetro quadrato. Le principali tramature utilizzate oggi in ambito industriale sono:

1. **Plain:** È caratterizzato da un intreccio base in cui ogni filo di trama passa alternativamente sopra e sotto ogni filo di ordito così da generare una superficie uniforme con un disallineamento moderato. Questo influisce negativamente sulle prestazioni meccaniche con minor resistenza e rigidità rispetto alle altre trame oltre ad avere una bassa drappabilità.

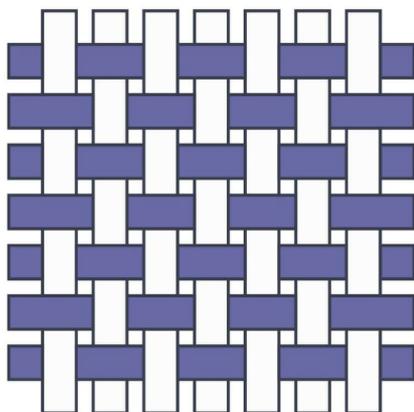


Figura 1.10: Schema Plain

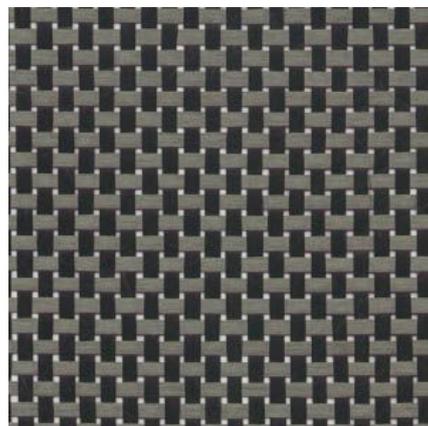


Figura 1.11: Tessuto Plain

2. **Twill:** Il tessuto è caratterizzato dalla trama diagonale nel quale intreccio vengono alternati uno o più fili di trama con due o più fili di ordito. Ciò comporta una maggior drappabilità, una riduzione della stabilità della fibra e un minor disallineamento che garantisce maggiori proprietà meccaniche rispetto al tessuto plain.

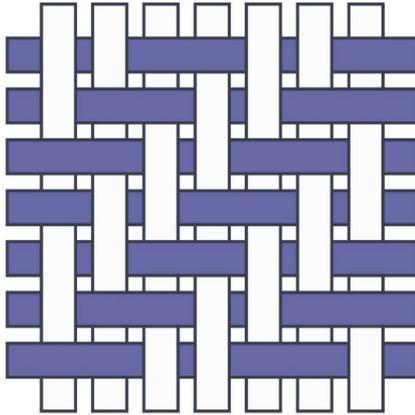


Figura 1.12: Schema Twill



Figura 1.13: Tessuto Twill

3. **Satin:** É caratterizzato da una superficie molto liscia ottenuta facendo passare il filo di trama sopra quattro o più fili di ordito e poi sotto uno, questo decrementa notevolmente il disallineamento e quindi da le migliori proprietà meccaniche ma a risentirne molto è la stabilità del tessuto e la drappabilità.

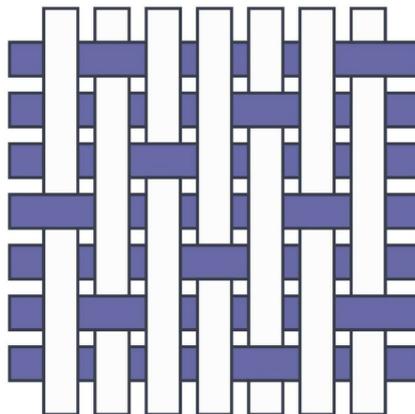


Figura 1.14: Schema Satin



Figura 1.15: Tessuto Satin

1.4.3 Strutture Sandwich

Le strutture a sandwich sono così denominate perchè formate da strati di materiale che si ripetono a specchio. Nella parte esterna si trovano le pelli formate da un certo numero di ply di materiale composito fibrorinforzato, questo ha la funzione principale di resistere ai carichi di tensione e compressione a cui viene sottoposta la struttura. Per far si che le alte proprietà meccaniche del materiale composito siano sfruttate al meglio le due pelli sono distanziate da un riempitivo, il core della struttura a sandwich, il quale è caratterizzato da basse proprietà meccaniche e da una elevata leggerezza, il tutto è tenuto assieme da due strati di adesivo.

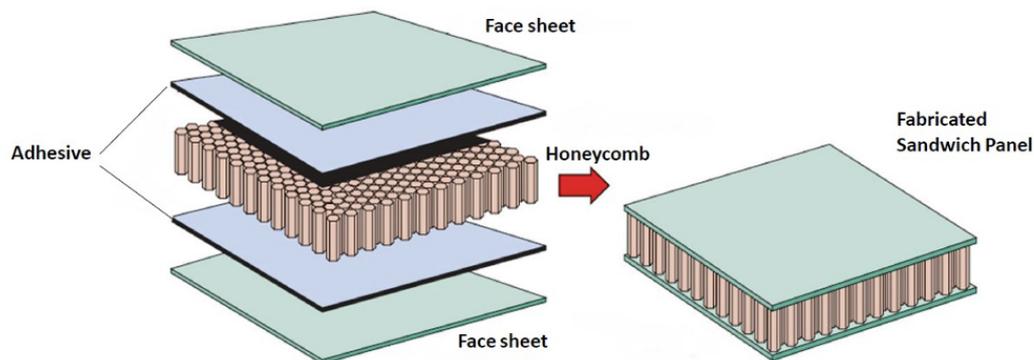


Figura 1.16: Struttura a sandwich

Questa struttura è assimilabile ad una trave a doppio T dove le pelli di materiale composito sono le ali della trave mentre il core fa da anima, questo permette di distanziare il materiale composito dall'asse neutro in modo da aumentare la rigidità e la resistenza a flessione della struttura e al contempo mantenere un peso contenuto grazie alla bassa densità del core che è sottoposto a carichi di taglio.

Ci sono diverse tipologie di core, le principali sono queste:

- Schiume: le schiume maggiormente utilizzate sono PVC espanso (Polivinilcloruro), Rohacell[®] PMI (polimetacrilimmide) resina con elevate proprietà meccaniche e termiche.
- Fibre naturali: come il legno di balsa
- Fibre minerali
- Honeycomb (strutture alveolari): costituito da celle alveolari generalmente realizzate in alluminio o Nomex che è una fibra aramidica derivante dal Kevlar.

La scelta tra le varie tipologie di core viene fatta in base alle esigenze tecniche e tenendo conto dell'aspetto economico poiché tra i diversi tipi può variare di molto.

1.4.4 Processo di produzione dei compositi

Fissati i parametri meccanici richiesti da progetto si procede con la laminazione dei vari strati di carbonio sugli stampi, ogni strato deve essere posizionato con una ben precisa direzione delle fibre che è dettata dal plybook (fascicolo con istruzioni per le direzioni delle fibre) redatto durante la progettazione. I tessuti utilizzati per la produzione dei compositi possono essere differenti, i principali sono tessuti con fibra secca e tessuti prepreg (preimpregnati), e il loro uso dipende dalla geometria, dalle caratteristiche meccaniche e dal numero di manufatti da realizzare. Si possono usare diverse processi di produzione a seconda delle caratteristiche sopra citate, i principali processi sono:

- Laminazione a freddo: il materiale secco viene adagiato sullo stampo e successivamente impregnato manualmente con la resina;
- Laminazione e polimerizzazione in autoclave: Viene utilizzato un tessuto prepreg che una volta laminato viene messo sotto vuoto in un sacco e fatto curare in autoclave con pressione e temperature controllate;
- Filament winding: Prevede l'avvolgimento di fili preimpregnati attorno ad uno stampo rotante, viene usato per la produzione di tubi e serbatoi;
- Infusione di resina: il tessuto in fibra di carbonio sullo stampo viene impregnato attraverso il vuoto fatto tramite un sacco, questo permette una maggior uniformità nella distribuzione della resina;
- RTM (Resin transfer molding): La resina viene iniettata in uno stampo chiuso contenente la fibra di carbonio.

La sua produzione tramite laminazione prettamente manuale implica che i tempi di produzione siano lunghi e complessi, ciò fa aumentare i costi e limita la produzione alle piccole serie e prototipi. Per questi motivi i materiali compositi rinforzati in fibra di carbonio sono utilizzati nel settore aerospaziale, in quello automotive per vetture ad alte prestazioni, in quello sportivo per attrezzature di alto livello e in quello medico per la produzione di protesi.

Capitolo 2

Requisiti geometria monoscocca

Prima di partire con la progettazione si è passati per un dettagliato processo di scelte tecniche che sono servite come linee guida durante tutti i processi successivi fino al montaggio della vettura. Per prendere le scelte tecniche si è tenuto conto di tre macroguide che definiscono le principali limitazioni tecniche-progettuali, ovvero il regolamento FSG, le linee guida del team e le specifiche di produzione dell'azienda. Una volta fissate tutte le scelte tecniche si è passati alla stesura delle "specifiche", documenti nei quali vi sono scritte tutte le caratteristiche da seguire per la realizzazione o acquisto di ogni componente della vettura.

2.1 Regolamento FSG

Il regolamento[3] a cui fanno riferimento tutte le competizioni formula student europee è quello redatto dall'ente Formula Student Germany (FSG¹), questo racchiude tutte le richieste tecniche e regolamentari per progettare e costruire una vettura formula student. Il regolamento si concentra sull'aspetto della sicurezza del pilota normando l'uso dei materiali, l'equipaggiamento di sicurezza, lo svolgimento della competizione e limitando la potenza che possono sviluppare i motori. Per tutto il resto si lasciano ampi margini per le forme geometriche da sviluppare e per le scelte tecniche da applicare in modo tale da permettere ai vari team di presentare le più variegata soluzioni tecniche a seconda della loro interpretazione del regolamento.



Di seguito si illustrano le parti principali del regolamento che interessano la progettazione della monoscocca, si inizia dando delle definizioni delle parti principali del telaio:

Chassis - l'assieme strutturale che supporta tutti i sistemi funzionali del veicolo. Questo assieme può essere una singola struttura saldata, molteplici strutture saldate o una combinazione di materiali compositi e strutture saldate.

¹FSG

Cockpit - la porzione di volume che occupa il pilota definita dalla sommità del veicolo, dalla chiusura del fondo, dalla parte interna della carrozzeria, dal front bulkhead e dal firewall.

Front bulkhead - è la struttura planare che definisce la parte anteriore del telaio che con l'anti intrusion plate (AIP) protegge i piedi del pilota.

Front hoop - un roll bar posizionato sopra le gambe del pilota in prossimità del volante.

Front bulkhead support - la struttura che definisce la parte laterale del telaio dal front bulkhead fino alla parte superiore del side impact structure (SIS) e il fondo del front hoop.

Impact attenuator (IA) - un dispositivo in grado di deformarsi per assorbire energia posizionato davanti al front bulkhead.

Anti intrusion plate (AIP) - piastra collegata al front bulkhead che lo sigilla e impedisce l'entrata di oggetti nell'abitacolo.

Main hoop - un roll hoop che può essere posizionato di fianco o appena dietro il torso del pilota.

Monocoque - un telaio fatto da materiali compositi.

Primary structure - la struttura primaria formata dai seguenti elementi:

- Main hoop
- Front hoop
- Roll hoop braces and supports
- Impact structures
- Front bulkhead
- Front bulkhead support systems
- Tutte le parti del telaio che trasferiscono carichi dal sistema di ritegno del pilota ai sopra menzionati componenti della *primary structure*

Roll hoops - è l'insieme di front hoop e main hoop.

Roll hoop bracing - la struttura tra un roll hoop e il roll hoop bracing support.

Roll hoop bracing support - la struttura dalla parte più bassa del roll hoop bracing indietro fino ai roll hoops.

Rollover protection envelope - è l'unione della primary structure, del piano formato dalla sommità del main hoop alla sommità del front hoop e dal piano formato dalla sommità del main hoop alla parte più arretrata della struttura.

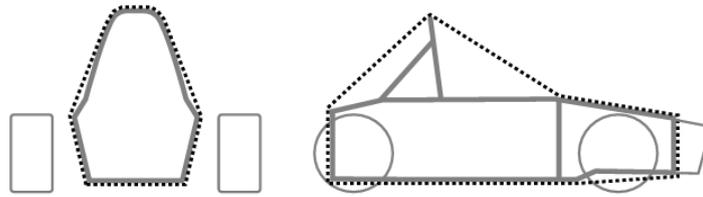


Figura 2.1: Rollover protection envelope

Shoulder harness bar - parte di superficie del telaio dove si attaccano le cinture del pilota e posizionata alle sue spalle.

Side impact structure (SIS) - l'area di tutta la parte laterale del telaio tra il front hoop e il main hoop e dal pavimento del telaio fino a 320 mm da quest'ultimo piano. Questa si divide a sua volta in due sottoparti:

- **Vertical side impact structure (SISV)** - le pareti laterali del cockpit.
- **Horizontal side impact (SISH)** - la superficie orizzontale del cockpit (il fondo della monoscocca).

Surface envelope - la superficie ottenuta dall'unione della rollover protection envelope e del volume definito da:

- la sommità del main hoop e gli spigoli esterni degli pneumatici
- un piano che va dalla sommità del main hoop alla sommità del front bulkhead
- un piano formato dalla sommità del main hoop fino alla parte più arretrata della struttura
- una proiezione in vista laterale dei limiti inferiori dell'rollover protection envelope

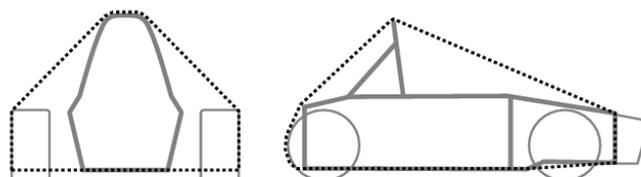


Figura 2.2: Surface envelope

2.1.1 Carrozzeria

Non devono essere presenti aperture nella carrozzeria se non quella dell'apertura del cockpit e altre minime aperture per il fissaggio delle sospensioni frontali e del sistema sterzante.

I telai chiusi devono avere due fori di almeno 25 *mm* di diametro nella parte più bassa della struttura per prevenire l'accumulo di liquidi.

2.1.2 Sistema sterzante

Il volante deve essere posizionato non più di 250 *mm* dietro il front hoop misurato orizzontalmente dalla linea centrale del veicolo dalla parte più posteriore del front hoop fino alla parte più avanti del volante in ogni posizione. In ogni posizione angolare la sommità del volante non deve superare la parte più alta del front hoop.

2.1.3 Design generale del telaio

Richieste generali

Assieme alle altre richieste la struttura del veicolo deve includere:

- Due roll hoop con i relativi supporti
- Un front bulkhead con sistema di supporti e anti intrusion plate
- Side impact structure

2.1.4 Materiali alternativi

Materiali alternativi ai metalli consentiti possono essere usati per tutte le parti della primary structure e della TSAC con le seguenti eccezioni:

- Il main hoop e il suo supporto devono essere di acciaio
- Il front hoop deve essere di acciaio o alluminio
- Ogni struttura saldata della primary structure deve essere di acciaio

Se nella struttura primaria o nel TSAC vengono utilizzati materiali diversi dai tubi in acciaio, sono necessari test fisici per dimostrare l'equivalenza alle proprietà minime del materiale per l'acciaio.

2.1.5 Strutture composite

Se vengono utilizzate strutture composite nella struttura primaria o nel TSAC, la rigidità flessionale (EI) deve essere calcolata con gli strumenti e le formule nel SES. Quest'ultimo deve includere dettagli sui materiali compositi utilizzati, come il tipo di materiale, il peso del tessuto, il tipo di resina, l'orientamento delle fibre, il numero

di strati, il materiale del nucleo, la tecnica di stratificazione e i dati del test. Per qualsiasi laminato nella struttura primaria o nel TSAC, il contenuto massimo di fibre parallele è del 50%.

2.1.6 Documentazione strutturale

Tutti i team devono inviare il SES (Structural Equivalency Spreadsheet) un foglio di calcolo per l'equivalenza strutturale e il SE3D (Structural Equivalency 3D Model) un'equivalenza strutturale del modello 3D.

2.1.7 Roll hoops

I roll hoops devono essere fissati alla primary structure usando una triangolazione nodo per nodo o un metodo di fissaggio equivalente.

Il raggio minimo di curvatura dall'asse del tubo deve essere almeno tre volte il diametro esterno del tubo.

Nessuna parte della primary structure deve essere al di sotto di 30 mm dalla fine dei roll hoops.

I roll hoops devono essere fissati meccanicamente alla primary structure dalla parte più alta alla parte più bassa, con la distanza degli attacchi non maggiore di 50 mm dalla fine dei roll hoops.

Main hoop

Il main hoop deve essere costituito da un unico pezzo continuo senza tagli di tubo d'acciaio.

Da una vista laterale il main hoop non deve essere inclinato più di 10° dalla verticale. Il main hoop deve avere dei supporti dritti che siano o davanti o dietro per entrambi i lati. Questi supporti devono essere collegati al main hoop non al di sotto di 160 mm dalla sommità di quest'ultimo e l'angolo interno formato da main hoop e supporti deve essere minimo di 30°.

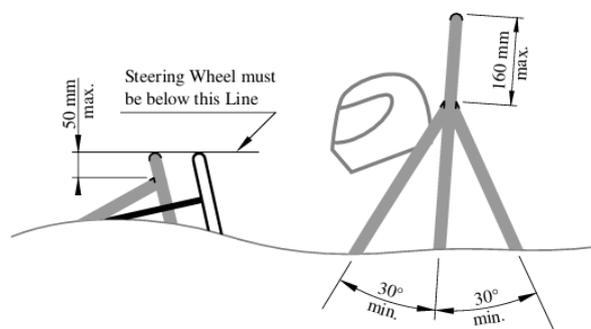


Figura 2.3: Richieste dei supporti del main hoop e della posizione volante

Front hoop

Il front hoop deve essere costituito da una sezione di tubo chiusa e continua.

Da una vista laterale nessuna parte del front hoop può essere inclinata più di 20° dalla verticale.

È accettato un front hoop completamente laminato nella primary structure al posto di fissaggi meccanici, purchè per completamente laminato si intende il front hoop completamente avvolto sulla sua intera circonferenza e si abbia un overlap² di almeno 25 mm da ogni parte.

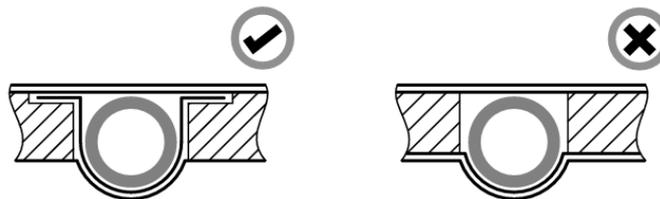


Figura 2.4: Richieste laminazione front hoop

2.1.8 Front Bulkhead

Qualunque materiale usato per il front bulkhead deve avere una resistenza al taglio perimetrale equivalente a 1.5 mm di spessore di piastra d'acciaio.

Se il front bulkhead fa parte di una struttura composita ed è modellata a forma di "L", l'EI del front bulkhead rispetto all'asse verticale e all'asse laterale deve essere equivalente ad un tubo d'acciaio che soddisfa i requisiti. La lunghezza della sezione perpendicolare al front bulkhead può avere una distanza massima di 25 mm misurata dalla faccia più arretrata.

2.1.9 Struttura di impatto

Se la struttura di impatto fa parte di una struttura in composito allora sono richieste le seguenti cose:

- La regione della struttura che arriva fino a 320 mm dalla parte più bassa del telaio tra front hoop e main hoop deve avere la EI equivalente a tre tubi di acciaio.

²Per overlap si intende la sovrapposizione di due pelli di materiale composito per creare un fissaggio tra i due strati

- La struttura di impatto verticale deve avere la EI equivalente a due tubi di acciaio di riferimento e metà del pavimento orizzontale deve essere equivalente a un tubo di acciaio di riferimento.
- La struttura di impatto verticale deve avere un'energia di assorbimento equivalente a due tubi di acciaio di riferimento, eccedente $65 J$.
- La resistenza a taglio perimetrale deve essere almeno di $7.5 kN$.

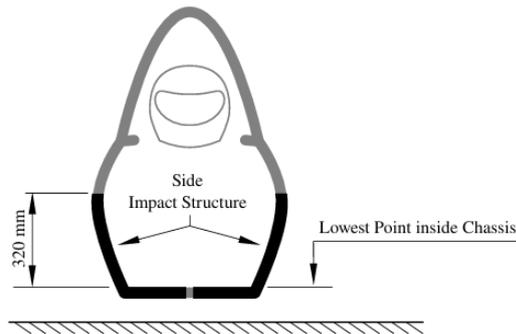


Figura 2.5: Side Impact structure monoscocca (SIS)

2.1.10 Collegamenti bullonati alla struttura primaria

Se due parti della struttura primaria sono imbullonate assieme, ogni collegamento tra le due parti deve essere in grado di sostenere un carico di $30 kN$ in ogni direzione. Ogni collegamento richiede come minimo due bulloni di $8 mm$ grado 8.8 e piastre di supporto con uno spessore minimo di $2 mm$.

Per i collegamenti dei supporti degli hoop sono richiesti collegamenti con bulloni di $10 mm$ di grado 8.8 montati come in figura.

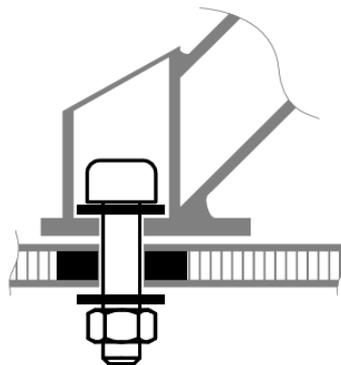


Figura 2.6: Imbullonatura bracci di supporto dei roll hoop

Quando si usano giunzioni bullonate sulla primary structure non è permesso lo schiacciamento del core del laminato.

Per il collegamento tra l'AIP (Anti Intrusion Plate) e il front bulkhead e se due pannelli/piastre della primary structure sono collegate assieme, per ogni 200 mm di perimetro di riferimento devono essere usate un minimo di 8 bulloni di 8 mm di grado 8.8 arrotondato per eccesso al numero intero successivo. Si possono usare bulloni più piccoli ma in numero maggiore con una dimostrazione dell'equivalenza.

2.1.11 Impact attenuator

Ogni veicolo deve essere equipaggiato con un assieme IA contenete un IA (Impact Attenuator) e un AIP (Anti intrusion Plate).

L'IA deve:

- Essere installato davanti al front bulkhead.
- Essere almeno 100 mm alto e 200 mm largo per una lunghezza minima di 200 mm davanti al front bulkhead.
- Essere posizionato non più in alto di 350 mm dal terreno, per ogni parte del volume di 100 x 200 x 200 mm³.
- Non essere in grado di penetrare il front bulkhead in caso di impatto.
- Essere collegato in modo sicuro all'AIP.
- Non essere parte di una porzione non strutturale della carrozzeria.
- Essere disegnati con una sezione frontale chiusa.
- Non essere più largo o più alto dell'AIP.

Il Design di base per l'AIP è una piastra di acciaio spessa 1.5 mm o 4.0 mm in alluminio. Deve avere lo stesso perimetro esterno del front bulkhead al quale è collegata.

L'IA deve essere collegato all'AIP con un minimo di quattro bulloni 8 mm grado 8.8 oppure incollato usando un adesivo capace di sostenere carichi di 60 kN in ogni direzione.

Non-Crushable objects

Tutti i non crushable objects, come pedaliera, cilindri e serbatoi dei freni, devono essere posizionati almeno a 25 mm dall'AIP

2.1.12 Cockpit

Cockpit opening

Le dimensioni della cockpit devono essere sufficienti a far passare i template in modo che si possano muovere liberamente sia in una direzione che in quella inversa.

Se la zona della side impact structure non è fatta di tubi allora il template deve passare verticalmente fino a 320 mm dal punto più basso del telaio tra il front hoop e il main hoop. Il volante e i padding del sedile possono essere rimossi per il posizionamento del template, ogni altra parte può essere rimossa solamente se sono integrati con il volante.

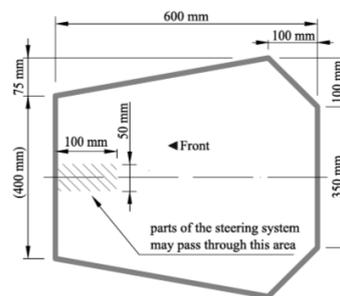


Figura 2.7: Cockpit opening template

Cockpit internal cross section

Il cockpit deve prevedere una sezione trasversale interna capace di far passare il template fino a 100 mm dal pedale in posizione non operativa e con pedaliera nel punto più avanzato nel caso questa fosse regolabile.

I piedi e le gambe del pilota devono essere completamente contenute nel cockpit e da una vista laterale e frontale nessuna parte dei piedi e delle gambe del pilota deve essere fuori da questa struttura.

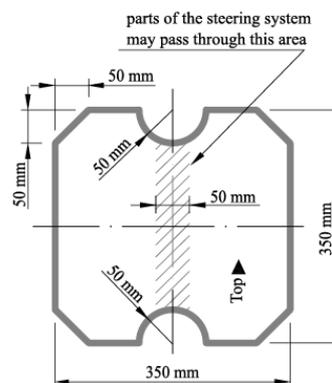


Figura 2.8: Cockpit internal cross section template

2.1.13 Percy (95th percentile male)

Quando seduto normalmente e trattenuto dal sistema di ritenuta (Cinture di sicurezza) del pilota, il casco del 95th percentile maschile e di tutti i piloti del team devono:

- Essere almeno a 50 mm da una linea dritta tracciata dalla sommità del main hoop alla sommità del Front hoop.
- Essere almeno a 50 mm da una linea dritta tracciata dalla sommità del main hoop alla parte più bassa dell'estremità del braccio di supporto del main hoop se si estende verso la parte posteriore.
- Essere non oltre il piano posteriore del main hoop se i suoi bracci di supporto si estendono nella parte anteriore.

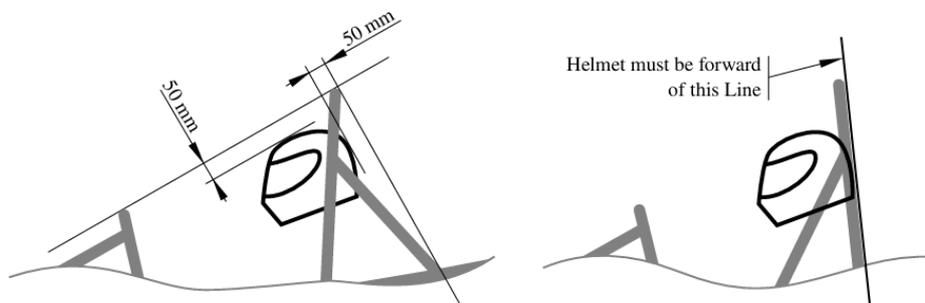


Figura 2.9: Distanza minima dal casco

La posizione del pilota è rappresentata dal 95th percentile con le dimensioni rappresentate in figura.

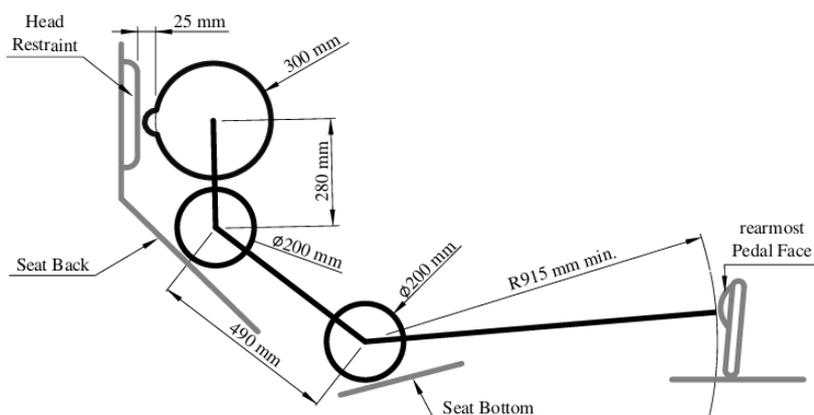


Figure 14: Percy placement

Figura 2.10: Posizionamento Percy

2.1.14 Attacco dell'imbracatura del conducente

Ogni collegamento alla monoscocca deve usare un bullone 10 *mm* di grado 8.8 o due 8 *mm* di grado 8.8 e piastre di supporto con uno spessore minimo di 2 *mm*.

2.1.15 Seduta del pilota

Il punto più basso del sedile del conducente, visto di lato, non deve estendersi al di sotto della parte superiore della struttura laterale di impatto più bassa. Deve essere fornito un isolamento termico adeguato per garantire che il conducente non possa entrare in contatto con parti del veicolo con una temperatura superficiale superiore a 60°C. L'isolamento può essere esterno all'abitacolo o incorporato nel sedile del conducente o nella paratia.

2.1.16 Firewall

Un Firewall deve separare l'abitacolo da tutti i componenti del sistema di alimentazione del carburante, fluidi idraulici (eccetto il sistema frenante e gli ammortizzatori), liquidi infiammabili, batteria LV e qualsiasi componente del TS (Traction System). La paratia deve coprire qualsiasi linea retta tra le parti menzionate e qualsiasi parte del conducente più alto sotto un piano a 100 *mm* sopra il fondo del casco. Deve essere una superficie non permeabile fatta di materiale rigido e resistente al fuoco, montata rigidamente alla struttura del veicolo. Deve sigillare completamente contro il passaggio di fluidi, specialmente ai lati e sul pavimento dell'abitacolo. Sono permessi passaggi per cavi e fili se sigillati con guarnizioni.

Il firewall deve essere composto da due strati: uno strato solido di alluminio di almeno 0,5 *mm* di spessore e uno strato isolante elettrico e ritardante di fiamma. Le parti conduttive non devono sporgere attraverso il firewall o devono essere adeguatamente isolate.

2.1.17 Shoulder harness

L'imbracatura delle spalle deve essere montata dietro il conducente su una struttura che soddisfi i requisiti della struttura primaria. Non può essere montata sul rinforzo principale senza ulteriori rinforzi per prevenire il trasferimento di carichi. La resistenza del fissaggio dell'imbracatura deve essere dimostrata sul SES. I punti di montaggio dell'imbracatura devono essere distanti tra 180 *mm* e 230 *mm*, misurati da centro a centro. L'imbracatura deve essere tra 10° sopra l'orizzontale e 20° sotto l'orizzontale.

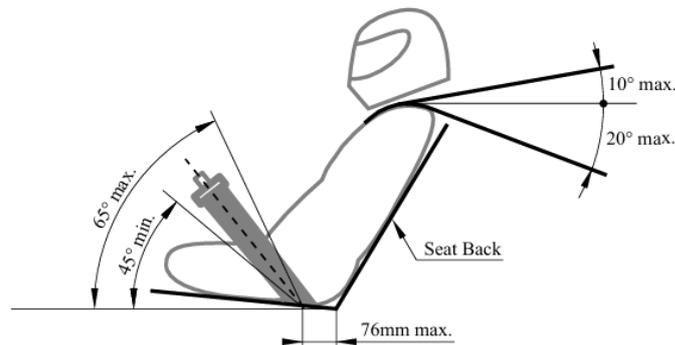


Figure 15: Lap belt and shoulder harness mounting

Figura 2.11: Montaggio del lap belt e dello shoulder harness

2.1.18 Poggiatesta

Sul veicolo deve essere montato un poggiatesta che limiti l'escursione in dietro della testa del pilota. Questo poggiatesta deve:

- Essere verticale o quasi verticale dalla vista laterale.
- Essere imbottito con un materiale in grado di assorbire energia e spesso almeno 40 *mm* conforme allo standard SFI 45.2 o elencato nella lista tecnica FIA n°17 come materiale di tipo B per auto monoposto.
- Avere una larghezza e un'altezza minima di 150 *mm*.
- Essere posizionato in modo che per ogni conducente il poggiatesta sia a non più di 25 *mm* dalla parte posteriore del casco del conducente, quando quest'ultimo è nella sua normale posizione di guida.

2.2 SES (Structural Equivalency spreadsheet)

È un foglio di calcolo tecnico fornito dall'ente FSG³ essenziale nelle competizioni di Formula Student, volto a garantire che i progetti del telaio e delle strutture generali del veicolo rispettino le norme di sicurezza e i requisiti tecnici stabiliti dalla competizione. Ogni team partecipante è tenuto a compilare con dettagli dei materiali per la produzione del telaio ottenuti durante gli studi e i test fatti in laboratorio, le

³FSG

2.2 SES (Structural Equivalency spreadsheet)

relative dimensioni e configurazioni strutturali. Il metodo di calcolo e validazione dei dati presente sul SES si basa su dei parametri di riferimento dati da strutture tubolari d'acciaio standard normati dal regolamento. Inserendo i dati dei materiali utilizzati per la produzione del telaio il foglio di calcolo confronta principalmente le EI per valutarne la rigidezza a flessione, lo snervamento della resistenza a trazione, la resistenza a rottura, l'energia assorbita e la resistenza perimetrale al taglio.

Una volta presentato il SES deve essere approvato da un revisore terzo o da un'organizzazione che sia conforme al regolamento FSG, assicurando così che il veicolo sia sicuro e conforme agli standard richiesti prima di poter partecipare alle gare. Questo processo di revisione è cruciale per garantire la sicurezza e l'integrità strutturale dei veicoli, e permettere l'accesso alle competizioni europee.

Questo strumento è molto utile non solo per validare il progetto finale ma anche per dimensionare alcune parti durante la fase di progettazione in modo tale da non sovradimensionare determinate parti del telaio con materiale non necessario e quindi per ridurre il peso.

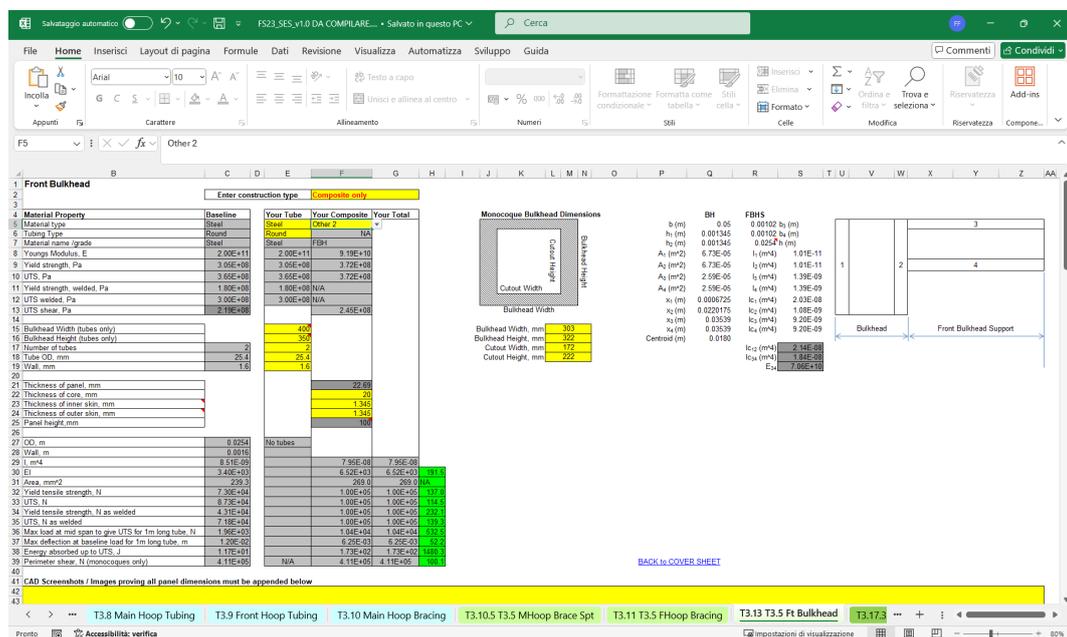


Figura 2.12: Structural Equivalency Spreadsheet, equivalenza front bulkhead

2.3 Guidance del team

Prima di iniziare la progettazione si sono tenute diverse riunioni con i vari reparti del team e con l'azienda produttrice ARSTech⁴ per fissare dei punti comuni affinché a progetto ultimato tutte le componenti della vettura fossero producibili e montabili correttamente tra di loro. Per la scelta tra la monoscocca, il traliccio o un ibrido di questi è stata condotta una analisi basata sul know how maturato con i precedenti progetti, le prestazioni delle varie tipologie di telaio e i loro costi, tenendo conto dei materiali ed attrezzature fornite dalle varie aziende che sponsorizzano il team.

Si è optato per avere una vettura con il muso alto frutto delle scelte fatte con il reparto Aerodynamics, allo scopo di gestire meglio i flussi verso il fondo della vettura che assieme alle pareti laterali inferiori del telaio posizionate in modo parallelo e verticale migliorano le prestazioni aerodinamiche complessive.

Dal reparto Vehicle Dynamics sono state richieste delle superfici inclinate a 45° sia all'anteriore che al posteriore per avere un miglior posizionamento di alcuni componenti del sistema sospensivo della vettura e è stato fissato un passo vettura di 1580 mm.

Dal reparto Battery Pack sono state fornite le dimensioni generali del pacco batterie e del relativo sistema di raffreddamento, mentre il reparto Electronics ha espresso le preferenze per posizionare alcune schede di controllo in vari punti della vettura.

⁴ARSTech.com

Capitolo 3

Progettazione

3.1 Progettazione della monoscocca

3.1.1 Scelte progettuali

Fissate le scelte tecniche si è passati alla valutazione della tipologia di telaio da produrre che meglio conciliasse tutte le necessità del team. Il regolamento permette di sviluppare tre tipologie di telaio, uno standard realizzato in traliccio di tubi d'acciaio, un telaio monoscocca prodotto con materiali compositi oppure un ibrido tra queste due soluzioni.

3.1.2 Telaio in traliccio

Il telaio in traliccio è realizzato mediante la saldatura di diversi tubi d'acciaio, sia rettilinei che piegati, posizionati su un'apposita maschera. Questo tipo di telaio consente di apportare modifiche al progetto, permettendo di riutilizzare gran parte della struttura. In generale, il telaio in traliccio garantisce una buona rigidità strutturale, sebbene presenti un peso maggiore rispetto ad altre soluzioni e un costo di produzione contenuto.

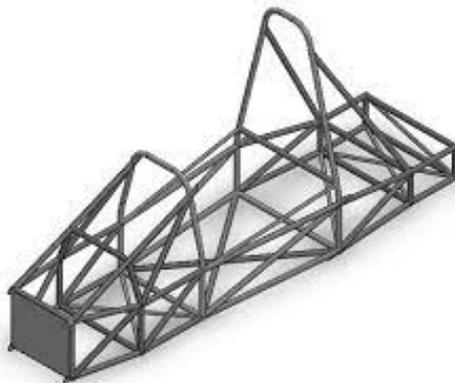


Figura 3.1: Telaio in traliccio

3.1.3 Telaio monoscocca

Il telaio monoscocca in materiali compositi è ampiamente utilizzato nelle competizioni moderne per le sue elevate prestazioni. Offre la massima rigidità meccanica a un peso contenuto, ma ha il costo di produzione più elevato rispetto alle altre tipologie. Esistono due principali tecnologie produttive per la sua realizzazione: il cut and fold (taglio e piegatura) di un pannello piano con le parti che vengono poi incollate tra di loro tramite una resina epossidica, oppure la laminazione diretta sullo stampo. Queste due tecnologie differiscono per tempi e costi di produzione, inferiori nella prima tecnologia produttiva che però presenta una minore resistenza strutturale rispetto alla seconda.



Figura 3.2: Telaio P4 laminato su stampi

3.1.4 Telaio Ibrido

Il telaio ibrido tra il traliccio e la monoscocca rappresenta un compromesso tra le due soluzioni, consentendo di modificare la parte posteriore in caso di nuovi sviluppi. Tuttavia, questo compromesso comporta una minore rigidità a causa della discontinuità nella zona di collegamento tra le due parti.

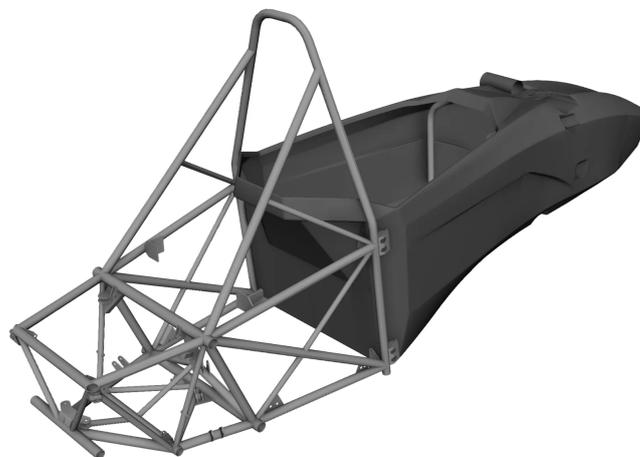


Figura 3.3: Telaio ibrido traliccio-monoscocca

3.1 Progettazione della monoscocca

La soluzione del telaio interamente in traliccio è stata scartata a priori per l'elevato peso e la presenza dello sponsor che permettesse la produzione del telaio in composito. Quindi le due opzioni valutate sono state il telaio in monoscocca per le sue elevate prestazioni e il telaio ibrido per la sua versatilità nel poter modificare la parte posteriore in traliccio negli anni successivi mantenendo invariata la monoscocca anteriore. Gli aspetti che hanno influenzato la scelta sono la disponibilità dell'azienda nell'offrire la produzione completa della monoscocca con gli stampi in composito, il che ha messo sullo stesso piano l'aspetto economico tra le due scelte, e la maggior copertura offerta all'apparato elettronico e alle batterie dal telaio in monoscocca. Infatti questa soluzione offre una quasi completa stagnatura alle parti elettroniche semplificando un aspetto fondamentale per una vettura elettrica. Quindi si è giunti alla scelta di realizzare un telaio in monoscocca in quanto avrebbe garantito le massime prestazioni meccaniche al minor peso e una maggior protezione del comparto elettronico, il tutto supportato dalla disponibilità dell'azienda nel fornire al team la completa produzione e lavorazione.

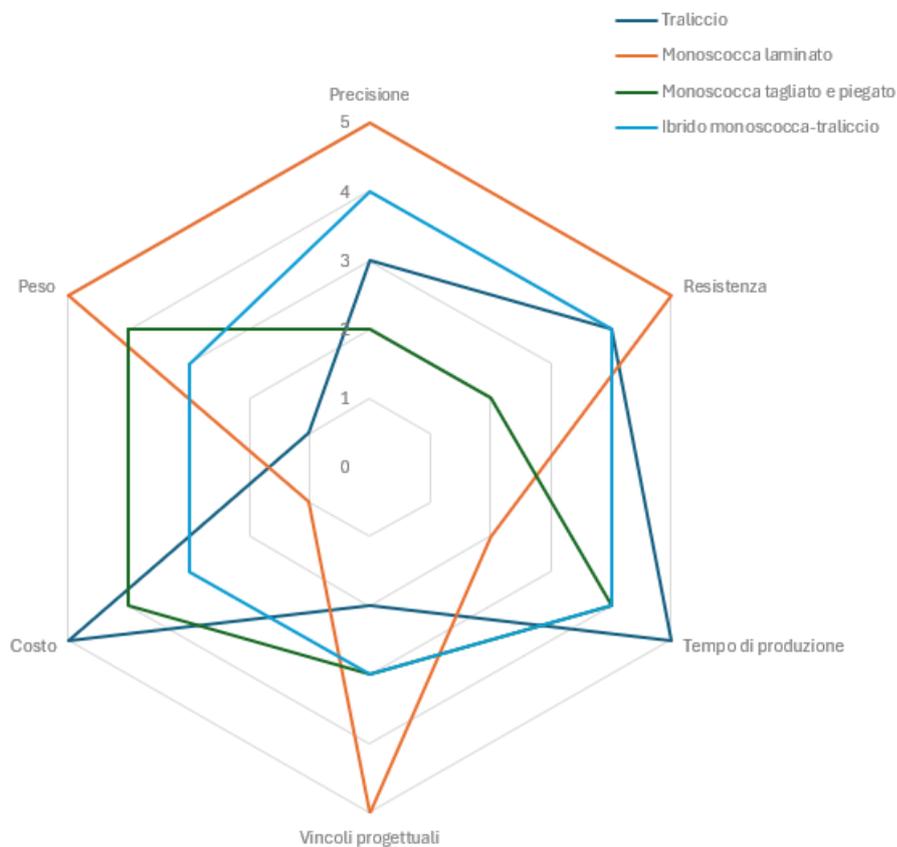


Figura 3.4: Grafico radar per tipologie di telaio

3.1.5 Programma utilizzato per la progettazione CAD

Per la progettazione CAD di tutte le parti della vettura è stato usato il software NX fornito dallo sponsor del team Siemens che oltre a ciò ha fornito i pacchetti software per l'analisi FEM e il sistema cloud Siemens Connector. Tutto questo ha permesso al team di lavorare all'unisono sul progetto dell'intera vettura semplificando la comunicazione tra reparti nelle aree di integrazione tra le diverse componenti della vettura. Per quanto concerne la progettazione del telaio è stato utilizzato il software per realizzare le superfici della monoscocca e le componenti come inserti, sistema sterzante e la pedaliera.

Ambiente di disegno NX

L'utilizzo di questo software ha permesso di sviluppare il progetto con gli strumenti più avanzati in campo automotive nello specifico per la realizzazione delle superfici complesse.

Viene ora mostrata l'interfaccia principale del software e i comandi principali utilizzati durante la progettazione.

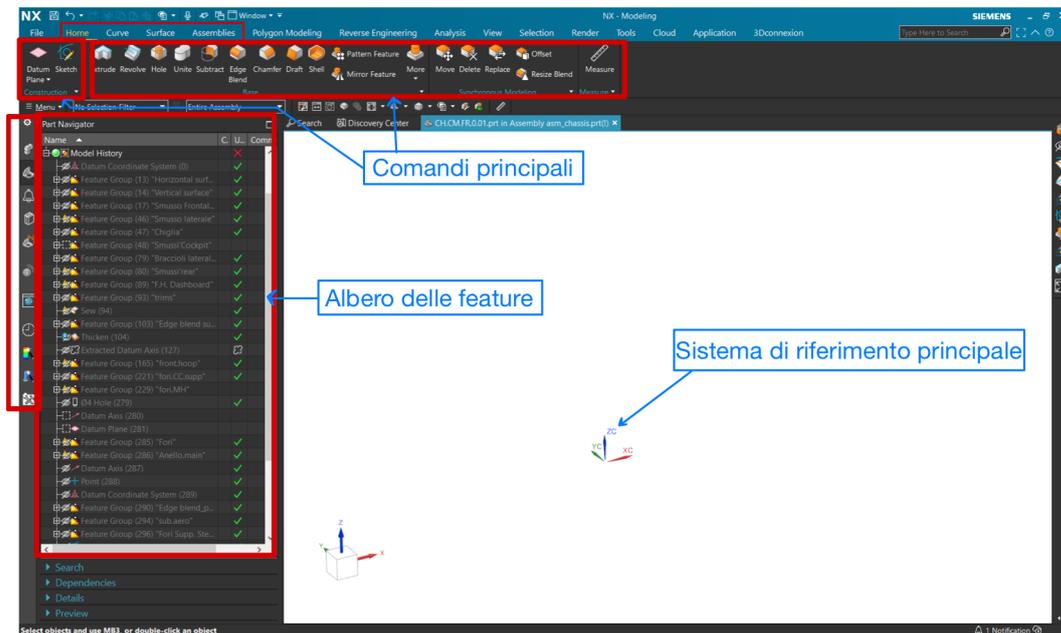


Figura 3.5: Interfaccia principale di NX

Questa è la schermata iniziale dove sono presenti la barra dei comandi principali in alto a sinistra dove è posizionato il comando "Sketch" che abbinato al comando "Datum planes" permette di posizionare ed iniziare il disegno tecnico del progetto.

3.1 Progettazione della monoscocca

Gli altri comandi sono specifici per la tipologia di componente su cui si sta lavorando e verrà approfondito di seguito.

Le due colonne a sinistra sono rispettivamente l'albero delle feature e la colonna degli ambienti di lavoro. L'albero delle feature è uno strumento fondamentale per tenere traccia di tutti i comandi eseguiti e strutturare in modo consono ed ordinato il progetto, infatti è qui dove si vanno a trovare le parti da modificare man mano che vengono richieste variazioni dai vari reparti del team. Per questo motivo è fondamentale realizzare un design robusto che sia in grado di rigenerare tutto il progetto in seguito ad ogni modifica applicata, questo è stato ottenuto impostando le misure principali tramite il comando "formule" che assegna dei nomi ad una tabella di valori in modo che possano essere semplicemente modificati; una volta aggiornato, il progetto si ricostruisce senza il dover riaprire le singole feature e modificare il comando.

Disegnati i primi sketch sui diversi piani posizionati nell'ambiente di lavoro si è passati all'ambiente Curves che permette di disegnare curve nello spazio per integrare tra loro questi ambienti bidimensionali, questa sezione deve essere usata molto attentamente poiché non è totalmente parametrica e si corre il rischio di dover ridisegnare le curve ogni volta che si applica una modifica, tuttavia ci sono dei casi in cui non si può fare a meno di questa sezione maneggiando oggetti tridimensionali.

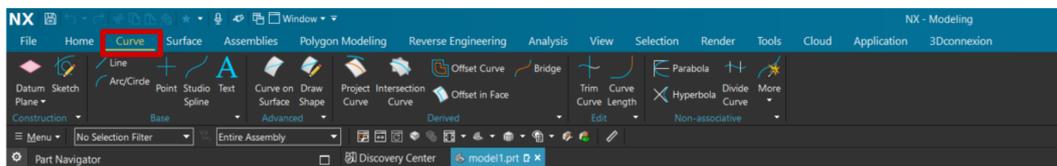


Figura 3.6: Sezione curve

Una volta finiti gli sketch che formano lo "scheletro" del solido si passa alla sezione superfici dove attraverso una serie di comandi molto specifici per le varie casistiche si realizzano le prime superfici grezze, le quali man mano verranno rifinite con l'uso di diversi comandi come taglio e raccordi vari.

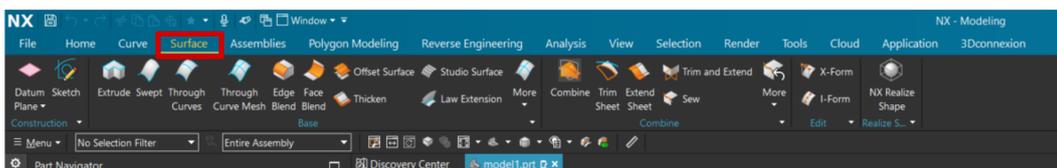


Figura 3.7: Sezione superfici

Una volta realizzate i solidi principali si può iniziare ad assemblarle nell'ambiente

virtuale dell'Assembly, qui vengono posti i principali vincoli meccanici per tenere in posizione i vari componenti, ognuno con i propri gradi di libertà. Questo ambiente è molto importante perché è qui che si aggiungono le componenti progettate dagli altri reparti e si verifica il corretto posizionamento e montaggio. Inoltre una volta completato l'assieme si può tornare alle sezioni precedenti e realizzare le parti che hanno bisogno di riferimenti dati dall'assieme, questo permette di realizzare parti molto complesse in maniera precisa e che risultino conformi al momento del montaggio.

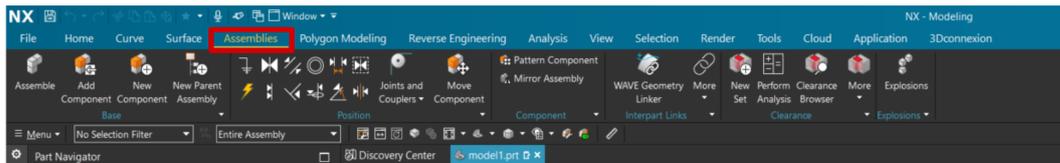


Figura 3.8: Sezione assiemi

3.1.6 Ingombri principali

Per partire con la progettazione bisogna prima posizionare un arrangiamento iniziale dei principali ingombri che alloggeranno nel telaio e tenere conto di alcune dimensioni iniziali che sono state fissate durante le riunioni preliminari dei vari reparti. Bisogna considerare che alcuni degli ingombri possono essere soggetti a variazioni poiché rappresentano oggetti in fase di progettazione e quindi con forme ancora non totalmente fissate. Di seguito sono elencati i principali ingombri:

Dimensioni base

Queste sono le dimensioni derivate dalle prime riunioni con il reparto dinamica ed aerodinamica, il primo ha fissato un passo della vettura di 1580 mm tenendo però in conto che questo valore sarebbe potuto cambiare nel corso del progetto ma rimane pur sempre un dato rilevante per dare una stima sulla lunghezza del veicolo. Per quanto riguarda il reparto aerodinamica è stato fissato assieme l'altezza della parte frontale rispetto al fondo del telaio a 150 mm , questo per permettere un flusso il più pulito possibile al nuovo fondo della vettura, il tutto tenendo conto dell'altezza dell'IA imposta da regolamento.



Figura 3.9: Altezza muso del telaio

Altre due dimensioni fissate a partire dai primi confronti con gli altri reparti sono state la ground clearance del telaio dal terreno di 40 mm e lo spessore del laminato del telaio fissato a 20 mm , questo valore è stato stimato con la scelta iniziale di usare un core da 15 mm e una media di 3 ply per pelle.

TSAC (Tractive System Accumulator Container)

Uno degli ingombri principali che influenzano maggiormente le dimensioni del telaio è il pacco batterie, le quali dimensioni iniziali di $320\times 820\times 260\text{ mm}$ sono state fornite dal reparto Battery Pack. Questo componente deve essere posizionato nella parte posteriore della vettura dietro la schiena del pilota con due possibili soluzioni per la progettazione della sua estrazione, una dal posteriore della vettura e l'altra attraverso il firewall. La scelta è ricaduta sull'estrazione posteriore del pacco batterie per le scelte prese sulla parte riguardante il firewall e la seduta del pilota che sarà approfondita successivamente.

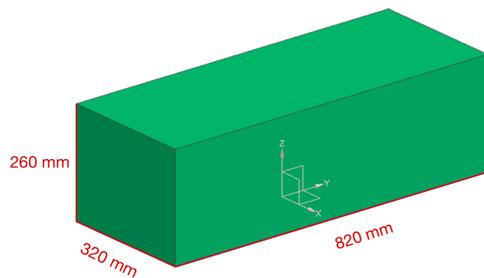


Figura 3.10: Ingombro TSAC

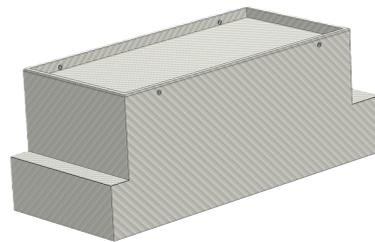


Figura 3.11: TSAC

Questo componente è stato ridimensionato più volte durante il corso del progetto per via di diverse criticità intrinseche della sua complessità, questi ridimensionamenti sono scaturiti a loro volta in diverse modifiche del telaio come allargamenti e allungamenti dello stesso che saranno approfonditi in seguito.

Ingombri elettronica

Le schede elettroniche non costituiscono un grande ingombro ma alle volte devono essere posizionate in determinate zone che hanno uno spazio limitato quindi il loro arrangiamento diventa complicato. In generale la maggior parte delle schede elettroniche sono posizionate vicino al pacco batterie in cui gli spazi sono molto limitati, ciò ha fatto posizionare alcune schede nella TSAC assieme alle batterie per ottimizzare gli spazi. Altre schede sono state posizionate sulla superficie orizzontale di fronte alla dashboard dove sono posizionate le componenti delle sospensioni frontali, mentre altre in uno spazio ricavato sotto le gambe del pilota nella zona della chiglia.

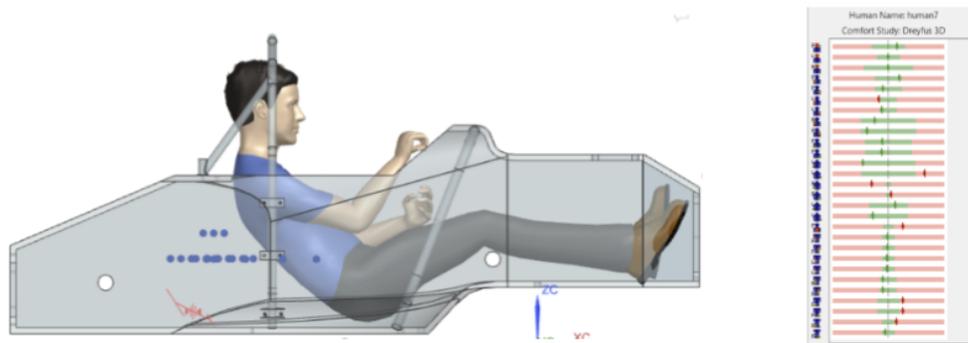


Figura 3.12: Percy posizionato nella PX con misure angol

Posizione del pilota

Si può dire che l'ingombro principale per la progettazione del telaio è quello del pilota, il suo posizionamento è iniziato con il progetto della PX dove i colleghi del reparto telaio hanno condotto un studio approfondito sull'ergonomia della posizione del modello umano nella vettura e sulla visibilità all'interno dell'abitacolo. Questi studi sono scaturiti dalle problematiche del vecchio progetto della P4 come la difficoltà del pilota nel rimanere ben saldo nella corretta posizione di guida e la difficoltà nello sterzare per via dell'inadeguato posizionamento di braccia e volante che obbligavano il pilota ad applicare una forza molto elevata per far sterzare la vettura.

Per il nuovo progetto è stato usato il Percy con il valore limite coincidente con il pilota più alto del team (190 cm) corrispondente al 95° percentile, una volta importato il modello in NX sono stati raccolti i valori base come inclinazione di gambe, gomiti, collo ect. Da queste misurazioni si è potuto valutare più o meno quanto si distaccavano dalla posizione di riposo per poi svolgere un'analisi sul software Technomatics per valutare le forze applicate sul volante. Il tutto è stato validato mediante la realizzazione di una Dima in legno in cui abbiamo verificato fisicamente gli studi eseguiti.



Figura 3.13: Dima

Pedalbox

Una volta posizionato Percy e bloccata la posizione delle sue gambe si è passati al gruppo pedalbox che comprende il blocco del pedale del freno e dell'acceleratore con tanto di sensori e pompe freno. Il tutto è stato posizionato a ridosso dei piedi di Percy e ciò ha permesso di fissare il piano della non crushable objects, zona che delimita una distanza minima tra la precedentemente nominata categoria di componenti e il front bulkhead. Questo ha permesso di avere un riferimento generale per la lunghezza della parte frontale del telaio.

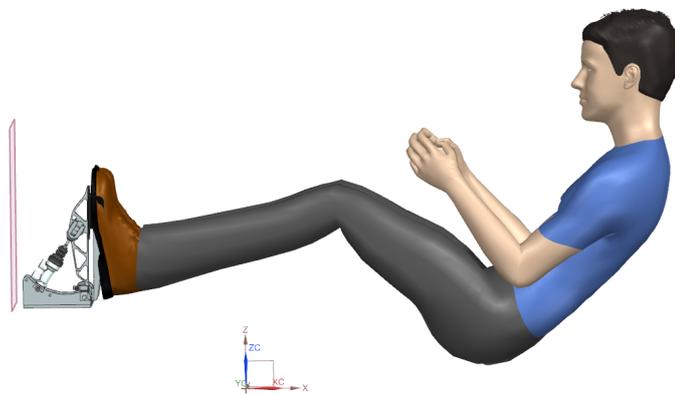


Figura 3.14: Posizionamento Pedalbox e Piano dei non crushable objects

Inverter

Per la disposizione dello scatolato dell'inverter si è pensato a due possibili soluzioni, la prima è di posizionarlo mantenendo le dimensioni originali nella parte posteriore della vettura, sopra il pacco batterie dietro la schiena del pilota. La seconda soluzione prevede lo smontaggio dell'inverter per riassemblarlo in un nuovo arrangemento customizzato affinché potesse essere posizionato sotto le gambe del pilota, in modo da tenere le masse il più in basso possibile e tenere basso il baricentro della vettura.

Cooling system

Il cooling system è l'apparato che si occupa del raffreddamento dei motori ed è composto da una pompa gestita da una scheda che fa circolare il fluido di raffreddamento attraverso le tubazioni e i radiatori fino ai due motori fuoribordo. Per ridurre al minimo la quantità di fluido necessario questo apparato deve essere posizionato il più vicino possibile ai motori, quindi è stato deciso di disporlo nella parte posteriore della vettura con i due radiatori posizionati fuoribordo.

Steering system

Lo steering system comprende il volante con i relativi supporti, la coppia conica, il piantone di sterzo e la scatola sterzo. Il volante e i relativi supporti sono stati posizionati in base alle misure determinate dalla posizione delle mani di Percy, fissata attraverso lo studio condotto negli anni precedenti. Successivamente dopo la realizzazione di una prima bozza delle superfici del telaio si è potuti posizionare la coppia conica, facendo sempre attenzione agli ingombri affinché non ostruissero il passaggio dei template della cross section, della cockpit opening e della scatola sterzo. Per quest'ultima si è pensato a tre soluzioni per la sua disposizione, una esterna al telaio montata a ridosso della chiglia, la seconda montata all'interno del telaio sul fondo e la terza sempre all'interno del telaio ma sulla superficie superiore. L'ultima soluzione permette di eliminare la coppia conica ma il sollevamento della massa della scatola sterzo oltre ai limiti imposti dal reparto dinamico hanno fatto scartare questa scelta.

Posizionamento hoop

Per fissare la posizione degli hoop è stata necessaria prima la realizzazione delle superfici del telaio. Per quanto riguarda il front hoop si è dovuto tenere conto di tutte le disposizioni del regolamento come l'inclinazione massima e il rollover envelope ma anche che permettesse il corretto passaggio dei template della cross section. Per quanto riguarda il main hoop sono state valutate due possibili configurazioni della sua posizione, la prima esterna alla monoscocca con i vari supporti per il fissaggio posizionati sulla superficie esterna e la seconda invece con il main hoop supporti interni alla monoscocca. Questa configurazione permette una minore dimensione del main hoop e di conseguenza una diminuzione del peso oltre che a mantenere pulite le superfici esterne per non disturbare i flussi del fondo in quei punti.

Impact attenuator

Inizialmente è stata valutata la possibilità di utilizzare un impact attenuator custom realizzato da noi, ma per una questione di budget e tempistiche necessarie per la progettazione produzione ed omologazione si è optato per l'utilizzo di quello standard fornito dal regolamento. Il posizionamento di questo oggetto, seppur esterno alla monoscocca, ne ha influenzato molto la geometria per via della sua altezza normata dal nuovo regolamento e fissata a 350 mm dal terreno. Questo ha limitato l'altezza massima della parte frontale che è stata poi fissata assieme al reparto aerodinamica a 150 mm dal fondo della vettura.

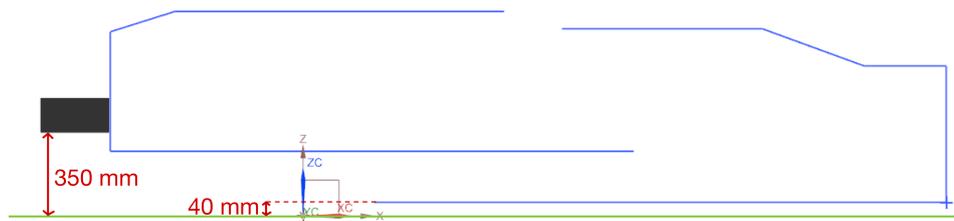


Figura 3.15: Posizionamento IA

3.1.7 Design CAD della monoscocca

Fissati tutti i parametri e le geometrie dei capitoli precedenti si è giunti al punto di avviare la progettazione effettiva del telaio, nel procedere si è usato l'approccio del concurrent engineering, un metodo di progettazione che integra simultaneamente diverse fasi del ciclo di progettazione del prodotto, dalla concezione alla produzione, in modo da ottimizzare i tempi di progettazione.

A questo punto per decidere quali superfici di riferimento si dovessero usare durante la progettazione si sono ascoltate le richieste degli altri reparti e si è giunti alla scelta di realizzare il progetto CAD della monoscocca con le superfici esterne, per il fatto che con queste si interfacciano la maggior parte dei componenti dell'assieme dinamica e dell'aerodinamica. Mentre per tenere le giuste distanze dagli ingombri interni si è considerato un offset di 20 mm verso l'interno per considerare lo spessore del laminato del telaio. Questo valore è stato fissato a seguito degli studi condotti dai colleghi del reparto telaio sui materiali, alcuni dei quali saranno riportati di seguito, i quali hanno portato alla scelta di utilizzare un core in honeycomb di alluminio da 15 mm di spessore, che con i vari strati di play tra prima e seconda pelle porta l'approssimazione dello spessore per il composito a 20 mm .

Creato il file principale sul programma NX si è stabilito che il sistema di riferimento principale fosse posizionato a livello del terreno, nella zona dell'asse anteriore del veicolo con asse x rivolto verso il posteriore e l'asse z verso l'alto, questo sistema di riferimento è fondamentale perché è stato usato da tutti i membri del team per posizionare le componenti della vettura nel file di assieme finale. Si è poi passati al posizionamento di alcuni piani di riferimento fondamentali per delineare in linea di massima i limiti della geometria come il fondo del telaio posto 40 mm sopra il sistema di riferimento. Questo per tener conto dei 30 mm di clearance richiesti dal regolamento e un margine di sicurezza di 10 mm per considerare eventuali giunzioni bullonate che durante il progetto potrebbero sporgere dalla superficie inferiore del telaio. Un altro piano per delimitare la superficie della parte frontale del telaio è stato posizionato a 150 mm da quello precedente, come stabilito assieme al reparto aerodinamica.

Si è proseguito con il posizionamento nello spazio di tutti gli ingombri nominati nel capitolo precedente in modo da dare una dimensione di massima di quello che sarebbe stato il telaio e poter iniziare a tracciare i primi sketch che abbozzassero la silhouette del telaio.

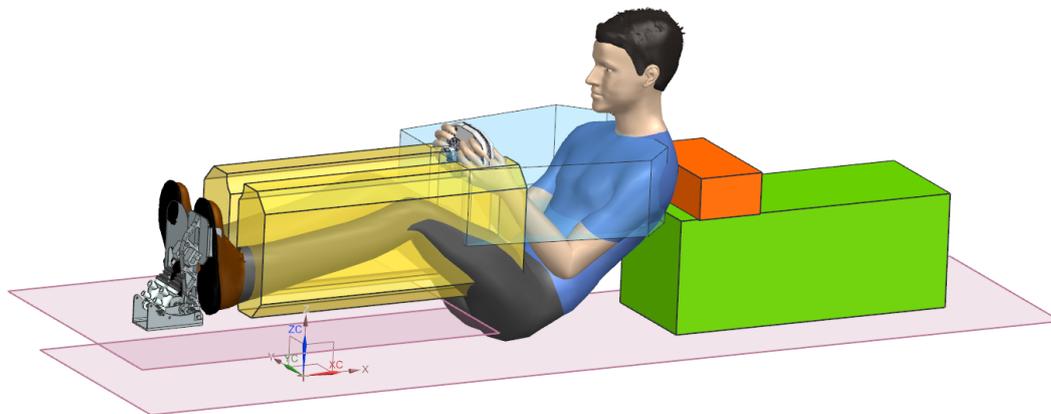


Figura 3.16: CAD Posizionamento ingombri

Fissati gli ingombri si è partiti con il disegnare gli sketch sul piano verticale, che saranno usati per generare le superfici orizzontali del telaio. Lo stesso processo è stato utilizzato per realizzare sketch e superfici verticali.

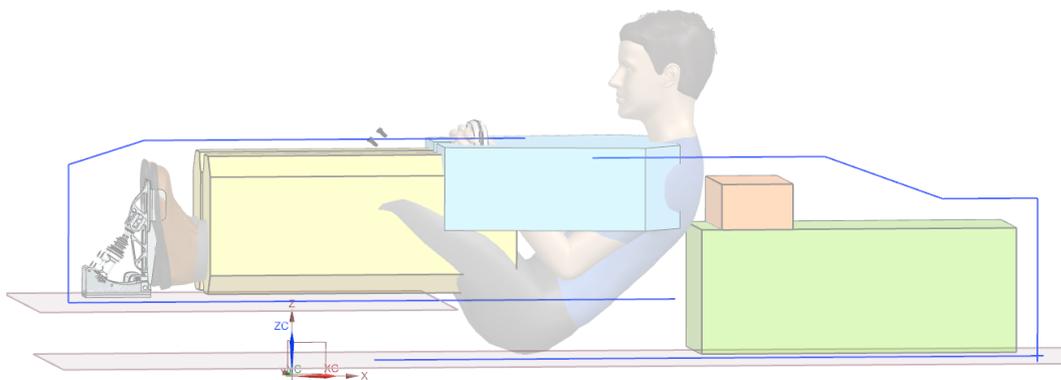


Figura 3.17: Sketch sul piano verticale

Sebbene sembri che si sia tracciato semplicemente un contorno lungo gli ingombri tenendo un gap di sicurezza, alcune zone di queste linee hanno richiesto diversi studi ed iterazioni per giungere a questo risultato. Ad esempio per quanto riguarda la zona frontale si è condotto uno studio per portare al minimo la sezione del front bulkehead, questa infatti essendo una parte critica per la sicurezza viene prodotta con una delle stratificazioni più pesanti del telaio, quindi anche una piccola riduzione di questa sezione implica delle diminuzioni di peso non trascurabili. Oltre a ciò la

superficie del front bulkhead deve alloggiare l'AIP che deve avere pari perimetro, e anche per questo essendo una piastra d'acciaio con lo spessore di 1.5 mm , ogni sua riduzione di area comporta una notevole riduzione di peso. Quindi la sezione è stata ridotta tenendo a mente che, come previsto da regolamento, dalla vista frontale l'AIP e di conseguenza anche il front bulkhead devono coprire interamente i piedi del pilota e sono stati posizionati a 45 mm dalla pedaliera, dei quali 20 mm per tener conto dello spessore del laminato e 25 mm per la distanza minima dai non crushable objects di cui la pedaliera fa parte.

Un'altra zona che ha richiesto particolare attenzione nel disegnare è quella del piano dietro le spalle del pilota, qui infatti sono collocati gli attacchi superiori del sistema di ritenuta del pilota che possono avere un angolazione massima di 20° dall'orizzontale. Anche qui si è cercato di abbassare il più possibile l'altezza di questa zona sempre nell'ottica di diminuire la sezione e quindi il materiale in modo da ridurre il più possibile il peso.

Finita la realizzazione degli sketch si è usato il comando "extrude" per generare le superfici che hanno dato come risultato uno scatolato con le superfici che si intersecano le une con le altre nei punti di giunzione.

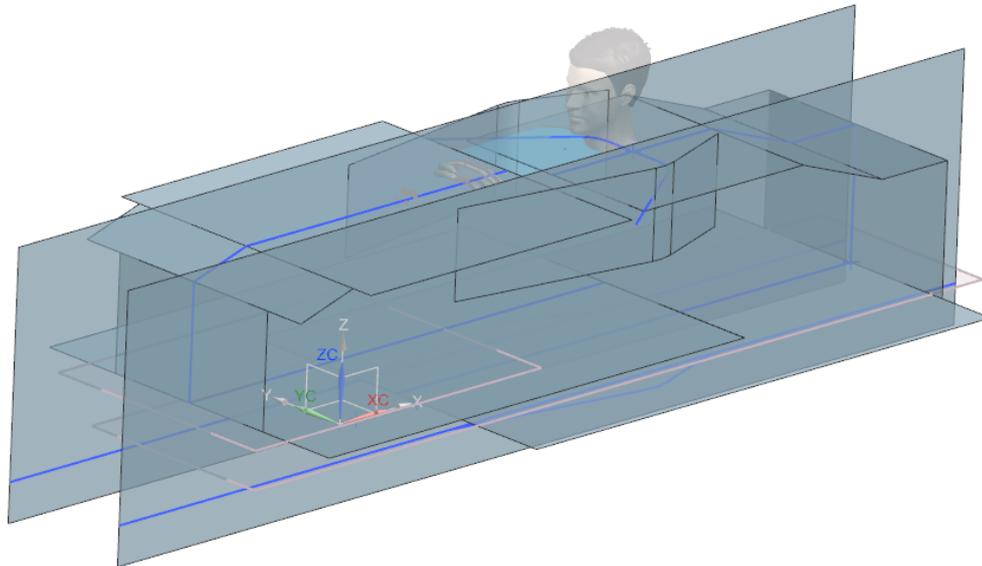


Figura 3.18: Estrusione superfici orizzontali e verticali

Dall'immagine precedente si nota che le superfici laterali del telaio sono formate da due piani rettilinei e paralleli tenuti il più vicino possibile tra loro lasciando dei gap tra la parete e gli ingombri interni. La scelta di procedere con queste superfici strette è stata presa assieme al reparto Aerodinamica poiché necessitavano di questa configurazione per non disturbare i flussi dell'aria che sarebbero dovuti passare

nel fondo vettura. Ma con le pareti così strette si sarebbe stati fuori omologa per via del passaggio del template della cockpit opening ostruito, oltre all'ambiente troppo stretto per permettere al pilota di sterzare agevolmente. Per ovviare a questo problema è stata allargata la parte superiore del telaio nella zona del cockpit fino all'altezza di 320 mm dal fondo, come richiesto dal regolamento per passare l'omologa per la cockpit opening.

A questo punto si è passati a disegnare i piani inclinati che devono alloggiare i supporti per i Roker della dinamica sia nella parte anteriore che nella parte posteriore. L'inclinazione di questi piani è stata fornita dal reparto Vehicle Dynamics e nel corso del progetto sono stati cambiati più volte, queste variazioni hanno reso fondamentale la robustezza del design del CAD che ha permesso di ricostruire la geometria ad ogni modifica, dovendo apportare solo piccole modifiche. Oltre a ciò sono state disegnate le superfici di raccordo tra l'allargamento dell cockpit e le superfici laterali, la chiglia è stata sviluppata con una forma che avvolgesse la seduta inferiore del pilota. Per questa parte è stato valutato con il reparto aerodinamico se disegnarla come superficie aerodinamica o come un raccordo che sarebbe poi stato coperto da una cover aerodinamica, arrivando a scegliere la seconda soluzione poiché la prima sarebbe stata troppo limitante per i futuri sviluppi aerodinamici che in questo modo possono essere implementati semplicemente riprogettando la cover, anche se questa costituisce un peso in più valutato accettabile come compromesso. Queste tre parti del telaio sono state generate tramite il comando "sweep" che genera una estrusione di una sezione vincolata a scorrere lungo una curva specificata detta "binario".

Da qui si è proseguito verso una delle superfici più critiche dell'intero progetto che è la zona della dashboard che copre la parte superiore del front hoop, per la quale sono state necessarie decine di iterazioni poiché la sua forma deve tenere in considerazione molti vincoli. Partendo dal posizionamento del front hoop e il relativo raggio di curvatura, che deve fare da involucro per la circonferenza data dalla rivoluzione dello volante sul piantone fino ad avere una forma il più rastremata possibile ai lati per non coprire il campo visivo del pilota. Tutto questo generando un'ulteriore porzione di raccordo tra il telaio e la dashboard per la quale sono state richieste l'uso di superfici complesse dal punto di vista delle tangenze.

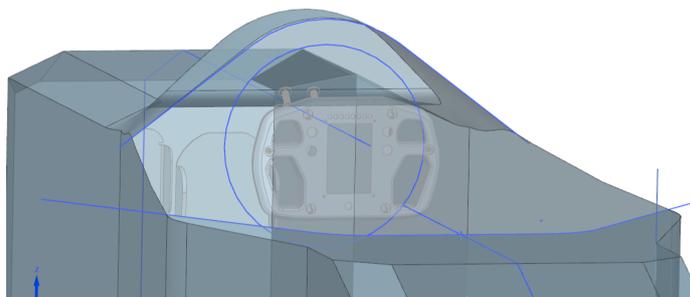


Figura 3.19: Involuppo della dash sulla circonferenza del volante

3.1 Progettazione della monoscocca

Si sono dovuti tenere in considerazione ulteriori aspetti tecnici per la realizzazione della dashboard tra cui il minimo raggio di curvatura del front hoop, che deve essere alloggiato all'interno di questa superficie e quindi ricalcarne il perimetro, l'altezza minima tale per cui l'involuppo della completa rotazione del volante rimanga al di sotto del front hoop e allo stesso tempo non essere troppo distante dal pilota poiché il regolamento impone una distanza massima di 250 mm tra volante e front hoop. Inoltre si è deciso che uno dei supporti del volante sarebbe stato fissato sulla parete della dashboard rivolta verso il pilota, quindi è stata aggiunta questa superficie da poter laminare assieme al telaio in modo che potesse reggere ai carichi verticali del supporto del volante.

Una volta realizzate tutte le superfici principali si è proseguito con il taglio di tutte le parti in eccesso tramite il comando "trim surface" ottenendo a questo punto una bozza molto squadrata di quello che sarebbero state le superfici esterne del telaio.

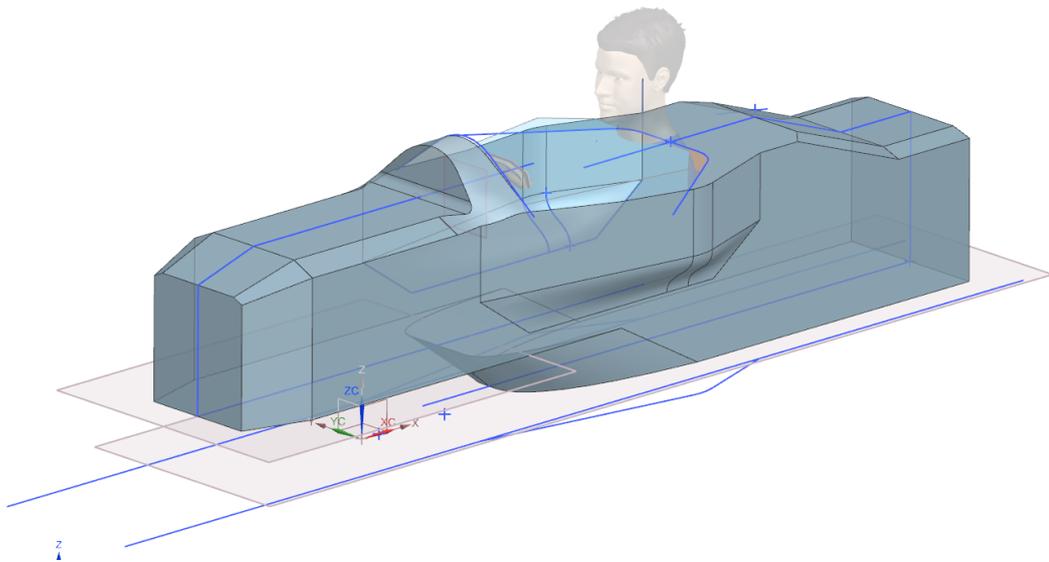


Figura 3.20: Bozza delle superfici esterne

A questo stadio è stato usato il comando "saw" per "cucire" tra loro le superfici e crearne una unica in modo da poter passare al prossimo step che è quello di raccordare tutti gli spigoli vivi della superficie esterna del telaio. I raccordi sulla superficie del telaio hanno molteplici funzioni, come il distribuire meglio i carichi sulla superficie evitando che si concentrino in punti angolosi ma anche per una questione di producibilità poiché essendo laminato in degli stampi queste superfici

raccordate permettono una migliore estrazione del telaio una volta completato il ciclo di cura. Il fattore che però influenza maggiormente la curvatura dei raccordi è il raggio di curvatura minimo per cui il core riesce a seguire le superfici del telaio, questo se troppo incurvato crea delle zone di schiacciamento che durante la cottura sotto pressione del telaio possono espandersi creando delle grandi zone di fragilità del telaio. Per evitare questo fenomeno ci è stato fornito dal costruttore un raggio di piegatura interno minimo di 30 mm per le zone in cui i pannelli curvano a 90° e poiché sul CAD si sta lavorando con le superfici esterne i raggi di raccordo nelle zone in cui la curvatura dei pannelli raggiunge i 90° sono stati fatti con un raggio minimo di 50 mm . Questo perché in previsione del passaggio successivo in cui verrà dato volume alla superficie trasformandola in solido, la superficie interna del telaio in cui è presente la curvatura di 90° raggiungerà un raggio di raccordo di 30 mm .

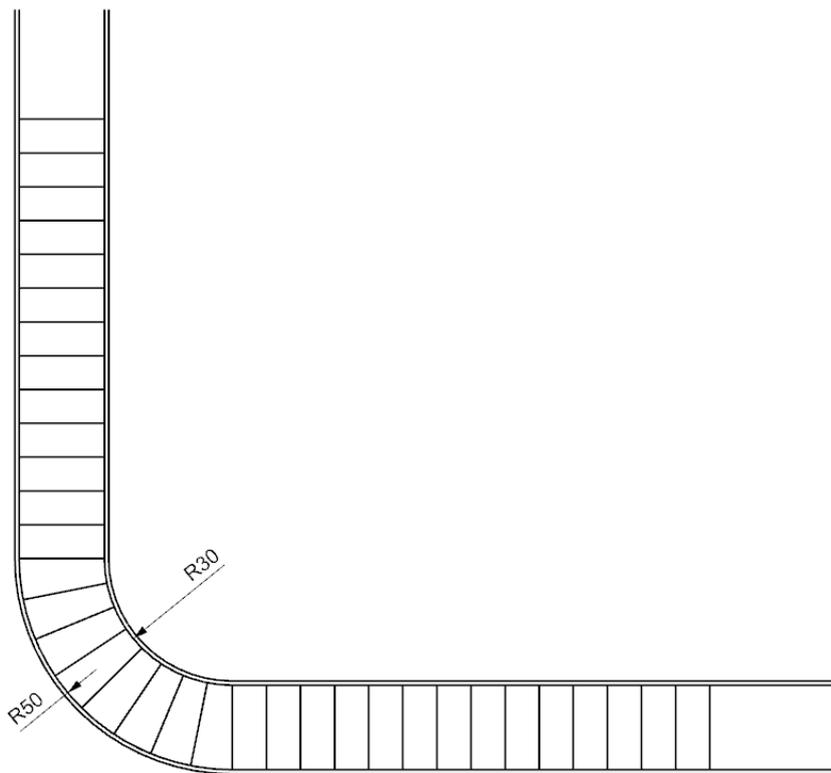


Figura 3.21: Raggi di curvatura honeycomb

Completati tutti i raccordi dei vari spigoli sulla vettura è stato applicato il comando "thicken" che genera un solido dall'ispessimento della superficie con spessore posto a 20 mm verso l'interno per le ragioni discusse in precedenza.

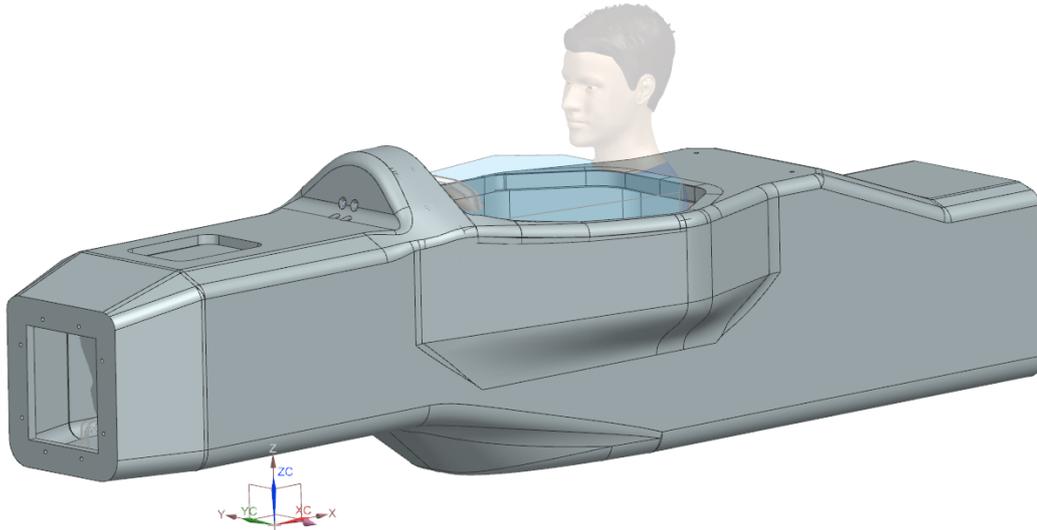


Figura 3.22: Ispessimento delle superfici

Finita la realizzazione di questa prima bozza del solido del telaio si è potuto procedere con il disegno e posizionamento del front hoop, componente fondamentale per la sicurezza del pilota e per ottenere l'omologazione del progetto. Il regolamento permette due possibili soluzioni per il fissaggio di questo componente all'interno della monoscocca, lo si può ancorare al telaio tramite giunzioni bullonate e relativi brackets oppure laminarlo all'interno del composito stesso. Il know how consolidato con il precedente progetto ha permesso di optare per la seconda soluzione che garantisce un elevato risparmio di peso.

Per la sua rilevanza nella sicurezza del pilota questo componente è strettamente regolamentato sia nei parametri per la sua realizzazione sia nel corretto posizionamento che deve avere all'interno del telaio. È stato scelto di usare un unico componente tubolare in alluminio 2024 T3 con diametro esterno di 35 mm e spessore di 2.5 mm e con questi dati alla mano si è iniziato a disegnare il componente. Si è partiti dal ricavare la sezione della superficie sulla quale deve appoggiare il front hoop tramite l'intersezione di un piano inclinato a 19° rispetto alla verticale visto che da regolamento il front hoop può avere un'inclinazione massima di 20° , ricavata la curva si è proseguito applicando un offset verso l'interno pari al raggio della sezione scelta per la sua realizzazione. Così facendo si è ottenuta la curva che farà da base per la

realizzazione del front hoop e successivamente si è controllato che i raggi di curvatura presenti sulla linea rispettassero la normativa per la piegatura del tubo in alluminio, per cui il raggio minimo di curva, misurato al centro del tubo, deve essere almeno tre volte il diametro esterno del tubo. Per il diametro del tubo scelto per la realizzazione il raggio minimo di curvatura deve essere di 105 mm .

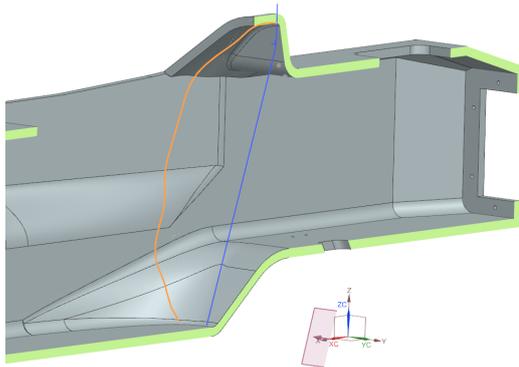


Figura 3.23: Sezione front hoop

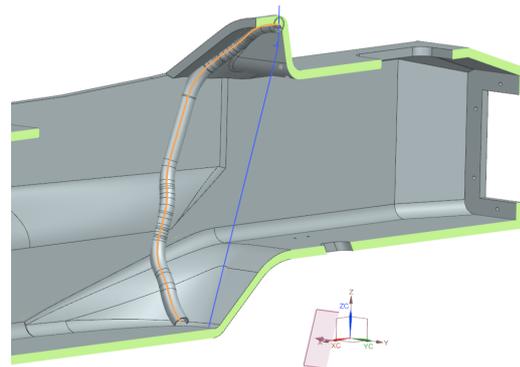


Figura 3.24: Curva guida

Per poterlo posizionare correttamente sono state effettuate diverse modifiche come la chiglia che è stata allungata affinché l'inclinazione dell'hoop non superasse i 20° mentre la parte superiore è stata piegata verso il pilota per far diminuire le dimensioni della dash e poter spostare in avanti di qualche *cm* l'hoop affinché ci fosse abbastanza spazio per l'anello di rinforzo che corre lungo tutta la circonferenza della cockpit opening.

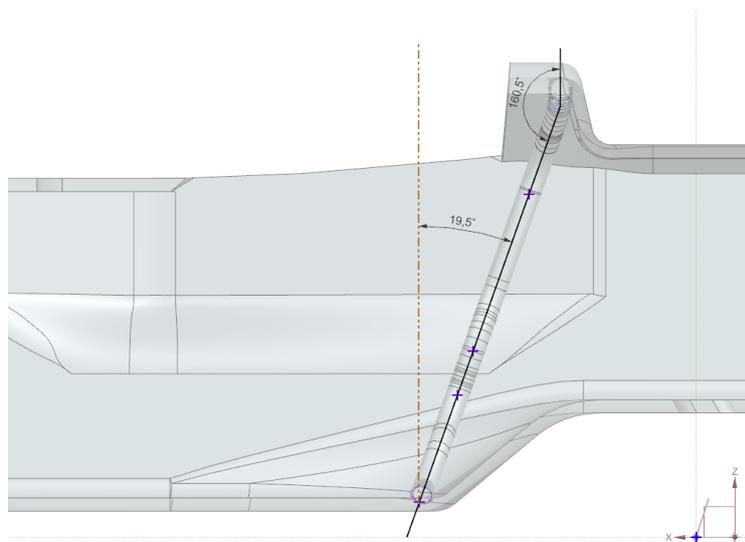


Figura 3.25: Inclinazione Front Hoop

Per quanto riguarda il Firewall e il sedile della vettura con il nuovo progetto si è deciso di integrare queste due parti in un unico componente, pertanto il firewall è stato realizzato seguendo la forma del modello umano fissato nel CAD. Poiché questo componente fa da scudo tra la zona in cui è alloggiato il pacco batterie e l'abitacolo esso deve essere in grado sia di sorreggere il peso del pilota durante le manovre di accelerazione ma anche isolarlo termicamente ed elettricamente. Pertanto si è deciso di usare il Kevlar che è un materiale molto resistente e allo stesso tempo isolante elettricamente grazie allo speciale tipo di resina che questo composito utilizza. Questa soluzione ha permesso di risparmiare il peso del sedile eliminando direttamente il componente mentre per ovviare all'assenza del comfort dato dalla seduta in schiuma espansa, utilizzata nei precedenti modelli, sono stati sviluppati dai colleghi del reparto telaio dei paddings in struttura lattice¹ stampati in 3D che posizionati in determinati punti del sedile permettono di fissare la posizione del pilota in maniera confortevole oltre a tenerlo ben saldo durante le prove dinamiche. Al centro del Firewall è stato ricavato un foro con relativo tappo affinché ci fosse un accesso alla parte interna posteriore della vettura per agevolare le operazioni di manutenzione come richiesto dai colleghi dei reparti Battery Pack ed Electronics.

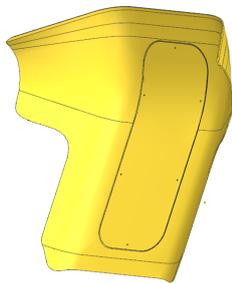


Figura 3.26: Firewall

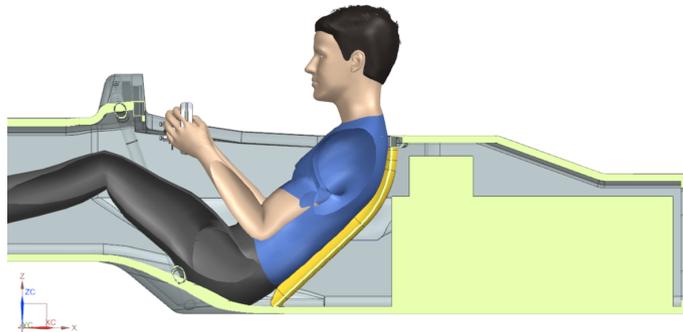


Figura 3.27: Posizionamento Firewall

Ora che sono presenti tutti gli ingombri del cockpit opening è possibile passare alla realizzazione dell'anello di rinforzo, questo componente consente di irrigidire la parte del cockpit che rappresenta il punto di debolezza del telaio per quanto riguarda la rigidità. La soluzione dell'anello consiste nel far correre una fascia in rohocell avvolta tutt'intorno da uno strato di carbonio in fibra unidirezionale che viene laminato tra i due pelli del telaio al posto del core e con una dimensione leggermente maggiore rispetto a questo. Per essere realizzato questo componente necessita di una geometria al CAD per essere lavorato da una macchina CNC per poi essere laminato

¹Una struttura in lattice è un sistema leggero e rigido di elementi lineari che distribuisce i carichi in modo efficiente.

nel telaio, per la realizzazione del CAD si è disegnata una sezione variabile lungo la circonferenza della cockpit opening. Per far sì che questa si adattasse alle superfici di questa zona è stato usato il comando "sweep" assieme al comando "trough curves" che permette appunto di variare la sezione del solido lungo il bordo.

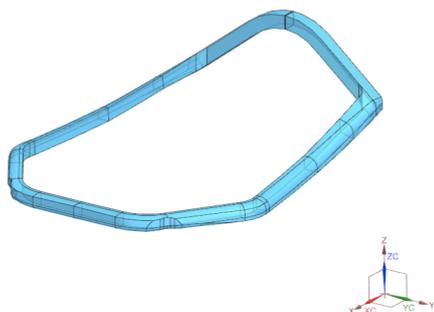


Figura 3.28: Anello

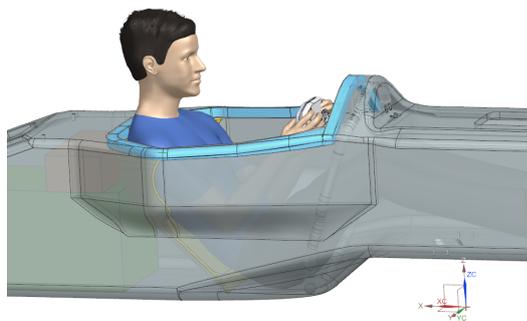


Figura 3.29: Posizionamento Anello

Continuando la progettazione è stato realizzato il main hoop che come normato da regolamento deve essere costituito da un tubo continuo in acciaio con diametro di 30 *mm* e spessore di 2 *mm* e con le misure dettate in base ai riferimenti del telaio e dal regolamento. Le misure in questione sono l'involuppo tra front hoop e main hoop che deve arrivare almeno a 50 *mm* sopra al casco del pilota, gli angoli di inclinazione massima del main hoop posto a 10° dalla verticale e l'angolo tra il main hoop e il bracing support che deve essere minimo di 30°, anche il main hoop come il front deve avere i raggi di piegatura che siano almeno tre volte il diametro esterno della sezione tubolare usata. Passando al posizionamento del main hoop si hanno due possibilità, fissarlo all'esterno del telaio oppure al suo interno, la seconda, che è quella che è stata scelta, permette di mantenere la superficie esterna più pulita per le appendici aerodinamiche e un minor peso visto che in questo modo la larghezza dell'hoop è minore, il che ne riduce il peso. I contro di questa soluzione sono l'ingombro interno che riduce gli spazi a disposizione e il montaggio complicato, questo aspetto infatti è stato complesso da sviluppare in quanto ha richiesto grande attenzione nella progettazione trovandosi in una zona molto delicata, dato che sono presenti numerose componenti come il pacco batterie, le schede elettroniche, l'anello di rinforzo e il firewall che per rispettare il vincolo dell'isolamento non può essere attraversato dal main hoop.

I fori realizzati per il montaggio sono stati progettati tenendo conto delle staffe per il fissaggio che sono saldate direttamente sulla parte inferiore del tubo, per i quali è stato necessario rimodellare il firewall e l'assottigliare leggermente la sezione dell'anello in quella zona affinché il montaggio avvenisse senza interferenze. Come il front hoop questo componente è stato realizzato tramite una linea che fa da guida per il comando "tube" e realizzare la sezione tubolare, tenendo conto sempre dei

raggi di raccordo minimi che per la sezione con diametro da 30 mm è pari a 90 mm.

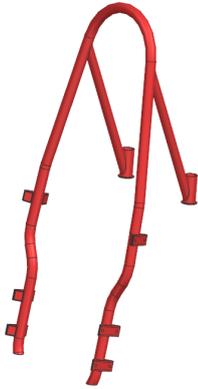


Figura 3.30: Main hoop

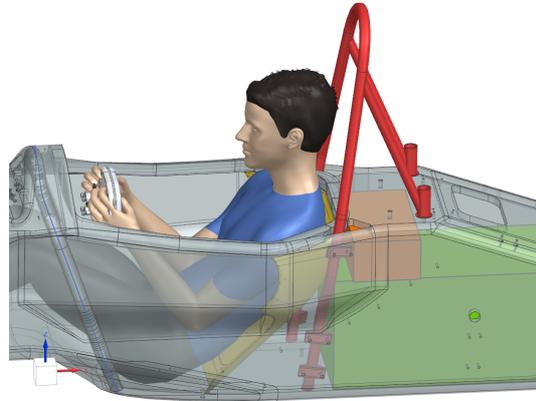


Figura 3.31: Posizionamento main hoop

Arrivati a questo punto e controllato che tutto l'assieme sia correttamente posizionato con assenza di interferenza tra le varie componenti si è congelata la geometria principale del telaio. Questo ha permesso di portare avanti altri progetti come lo studio FEM della monoscocca e il disegno di tutte le componenti dinamiche e aerodinamiche che si interfacciano con esso.

Una volta fissata la posizione di tutte queste componenti si è potuto usare l'assieme generale per posizionare tutti i fori presenti sul telaio che permettono il montaggio di tutte le componenti della vettura. Per la disposizione dei fori si è cercato di posizionarli il più lontano dagli spigoli del telaio e dove questo non è stato possibile, come su alcuni degli attacchi dei braccetti anteriori delle sospensioni, si sono attuate soluzioni per aumentare localmente la superficie di appoggio per il supporto. Particolare attenzione è stata posta nel posizionamento dei fori del front bulkhead e della piastra posteriore che sono strettamente normati dal SES per numero e distanze dai bordi, questi infatti devono avere una distanza pari o maggiore di $\frac{E}{D} > 1.5$ dove E sta per edge distance e D sta per diameter riferito alla vite utilizzata per il fissaggio. A seguire sono stati disegnate due aperture per permettere la manutenzione e l'ispezione da parte dei giudici, anche questi sono previsti da regolamento sotto il nominativo "inspection hole" e sono stati posizionati sulla parte frontale, sopra la pedaliera e sul posteriore sopra la zona che ospita il pacco batterie.

Per i fori che devono sostenere carichi strutturali rilevanti sono stati progettati degli inseriti che hanno il compito di non far schiacciare il composito localmente nel fissaggio bullonato durante l'operazione di serraggio della giunzione.

Come operazione finale sono stati disegnati degli scassi per portare in tangenza con il telaio le superfici aerodinamiche delle cover anteriore e del fondo vettura, in modo da ottenere delle superfici più regolari possibile per i flussi aerodinamici.

Capitolo 3 Progettazione

Terminata la progettazione CAD della geometria si è ottenuto un telaio con le seguenti caratteristiche:

Misura	Dimensioni
Lunghezza	2450 <i>mm</i>
Larghezza cockpit	645 <i>mm</i>
Larghezza inf.	430 <i>mm</i>
Altezza	686 <i>mm</i>
Altezza COG	313.7 <i>mm</i>
Peso stimato	24.647 <i>kg</i>

Tabella 3.1: Dimensioni principali del telaio

Il peso stimato è stato ottenuto moltiplicando il volume del CAD per la densità ricavata dal progetto del telaio della P4, visto che i materiali usati sono comparabili.

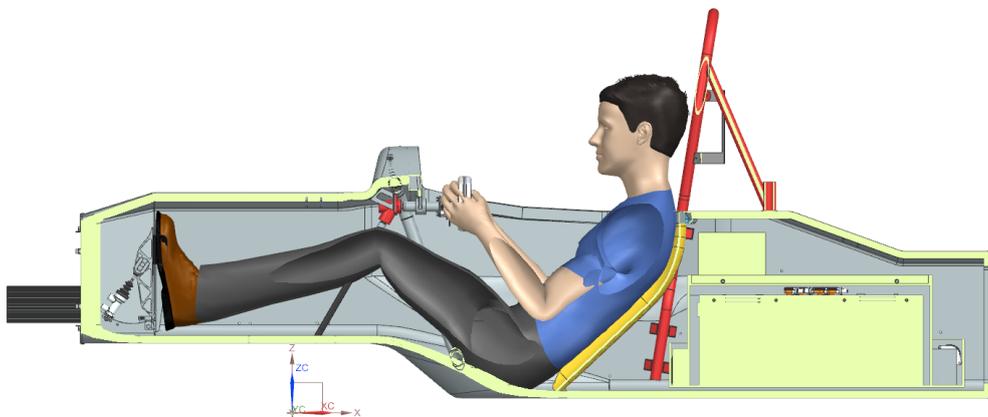


Figura 3.32: Sezione laterale

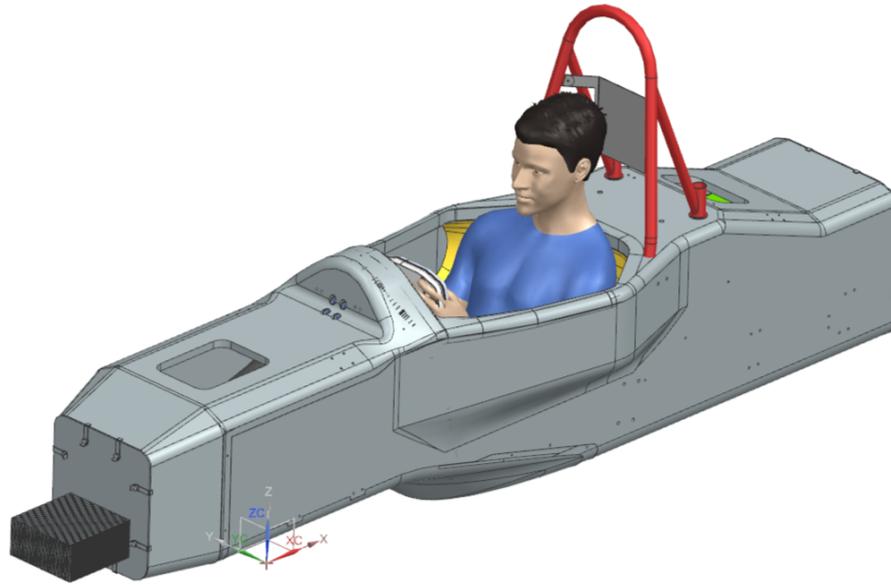


Figura 3.33: CAD Completo

3.2 Dimensionamento degli inserti

Gli inserti sono rinforzi strutturali posizionati localmente nei punti critici del laminato in cui vi sono fissaggi che devono sostenere carichi elevati ed elevate coppie di serraggio dei giunti bullonati. Questi vengono disposti durante la laminazione tra le due pelli e a fine produzione della monoscocca vengono lavorati dalle macchine a controllo numerico per effettuare i fori dove alloggeranno le giunzioni. Il loro compito è evitare lo schiacciamento locale del core e distribuire i carichi su un'area maggiore del laminato.

Gli inserti possono essere di diverse forme e materiali, i più comuni sono in materiale metallico oppure ricavati da blocchetti di carbonio, che è il caso di quelli usati per questo progetto, e le loro forme e dimensioni dipendono dai carichi a cui sono sottoposti.

Da regolamento è imposto l'utilizzo degli inserti sulle componenti che riguardano la sicurezza del pilota come i fissaggi dei roll hoops, delle cinture di sicurezza e dell'AIP e vengono dimensionati tramite i risultati delle prove a trazione, eseguite su dei pannelli di prova, e inseriti nel SES per la validazione.

Mentre per le zone non regolamentate ma soggette a carichi significativi (attacchi

sospensioni, pacco batterie, appendici aerodinamiche), gli inserti sono stati dimensionati individualmente attraverso un calcolo della resistenza a taglio delle pelli[4], adattato al carico specifico di ogni collegamento tramite la seguente formula.

$$P_{inserts} = \frac{\text{Carico}[N]}{T_{skin} \cdot \sigma_{shear}} \quad (3.1)$$

Dove $P_{inserts}$ indica il perimetro del bordo dell'inserto, T_{skin} è lo spessore delle pelli e σ_{shear} è la tensione di taglio. Una volta dimensionato il perimetro si è potuto disegnare l'inserto con i relativi fori e uno spessore di 15 mm pari all'altezza del core che sostituisce nella zona di rinforzo.

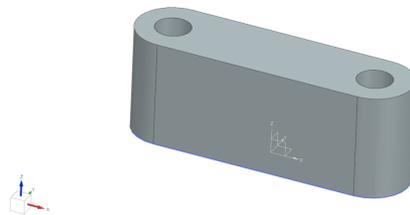


Figura 3.34: Inserto

Negli anni precedenti per le giunzioni si utilizzava un collegamento bullonato fissato direttamente nel foro dell'inserto per unire le varie componenti al telaio. Quest'anno, invece, sono stati impiegati i keensert, speciali inserti filettati che vengono avvitati e fissati tramite pin all'interno di un inserto in carbonio prefilettato. Questi inserti, dotati di filettatura sia interna che esterna, eliminano la necessità di utilizzare dadi per il fissaggio delle viti. Questa soluzione permette di risparmiare il peso di tutti i dadi e rondelle che erano necessari per le giunzioni bullonate, ma anche un minore ingombro interno dato dall'assenza dello spazio per i dadi e rondelle, oltre che una maggior facilità di montaggio.

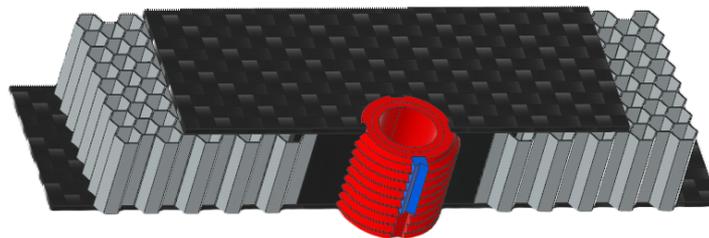


Figura 3.35: Laminazione inserto + Keensert

3.3 Rigidezza del telaio e risultati FEM

3.3.1 Importanza della rigidezza in un telaio

Il comportamento statico di un telaio automobilistico[5] si riferisce alla sua capacità di sostenere i carichi applicati da sospensioni, sistema propulsivo, della carrozzeria e del pilota. Questo è legato alla resistenza statica flessionale della struttura stessa che risulta molto elevata rispetto alle sollecitazioni a cui è sottoposta. L'elevato sovradimensionamento è da ricercare anche nel fatto che lo studio della rigidezza torsionale, che è molto più restrittivo e severo, garantisce automaticamente una buona resistenza flessionale.

Il comportamento dinamico, invece, è influenzato dai valori della rigidezza torsionale della struttura. La deformazione torsionale provoca rotazioni intorno all'asse longitudinale del veicolo (asse istantaneo di rollio) che sommata a quella delle sospensioni interferiscono con il controllo dell'assetto. Infatti una maggiore rigidezza del telaio migliora la tenuta di strada permettendo alle sospensioni di controllare meglio la cinematica del veicolo e semplificarne la prevedibilità dinamica che sfocia in una migliore precisione del controllo, fondamentale per un veicolo da competizione che viene guidato sempre al limite dell'aderenza.

Si può schematizzare il telaio come una grande molla in serie con le sospensioni anteriori e posteriori, se questa molla non è sufficientemente rigida alla torsione ogni tentativo di controllare i trasferimenti di carico tra lato sinistro e destro (bilanciamento della vettura) risulterà molto difficile. Con un telaio rigido può essere prevenuto più facilmente il comportamento della vettura tanto che i calcoli classici per calcolare il comportamento di una vettura hanno come ipotesi che il telaio sia perfettamente rigido. La torsione troppo elevata del telaio potrebbe dare luce a fenomeni di fatica e nel peggiore dei casi cedere. Quindi si può dire che la rigidezza torsionale è un fattore fondamentale per una vettura, tuttavia definire cosa significhi avere un telaio rigido non è semplice visto che non esiste un valore universale. Questo parametro varia in base alla tipologia di veicolo e al suo uso, ma per una monoposto Formula Student è lecito stimare una rigidezza torsionale inferiore di un ordine di grandezza ad una vettura da Formula Uno.

3.3.2 Teoria sulla rigidezza torsionale

Per una migliore comprensione delle scelte tecniche effettuate e dell'argomento trattato in questo capitolo viene data una breve trattazione della torsione semplice. Si verifica la torsione semplice[6] quando la risultante delle forze esterne relativa a qualunque sezione è nulla e le forze esterne si riducono a una coppia giacente nel piano della sezione considerata. Le forze che precedono la sezione considerata

appartengono a un piano α non contenete l'asse geometrico z del solido, per cui hanno un momento rispetto all'asse stesso, detto **momento torcente**, $M_t = P \cdot d$

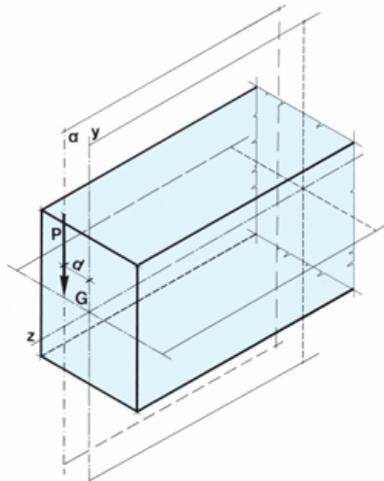


Figura 3.36: Momento torcente

Considerando un solido cilindrico sulle cui estremità è applicata una coppia con momento M_t , questo induce alla deformazione delle fibre sul piano della sezione circolare in cui ogni sezione ruota rispetto alla precedente di un certo angolo ϕ detto angolo di torsione. Limitandosi a considerare due sezioni adiacenti, la rotazione di una di queste rispetto all'altra è dovuta alle tensioni tangenziali τ , determinate dalle forze esterne applicate, normali alle fibre longitudinali della trave e giacenti nel piano delle sezioni. Le tensioni tangenziali variano con legge lineare, finché si rimane nel dominio della deformazione elastica, da un valore nullo in corrispondenza del centro della trave O a quello massimo nelle fibre più lontane a distanza R .

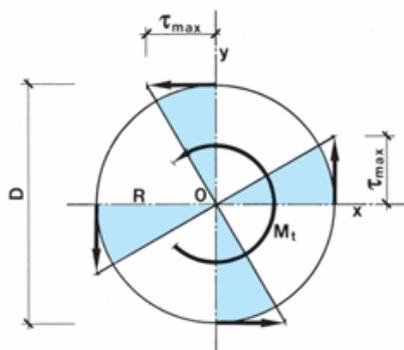


Figura 3.37: Tensione tangenziale su sezione circolare

Poiché la struttura della monoscocca è assimilabile ad una sezione circolare cava si espongono le formule che regolano la tensione tangenziale di questa sezione, che segue quanto esposte per la sezione circolare piena ma con l'aggiunta del parametro del diametro interno.

Momento polare di inerzia:

$$I_p = \frac{\pi \cdot (D_e^4 - D_i^4)}{32} \quad (3.2)$$

Modulo di resistenza a torsione:

$$W_t = \frac{\pi \cdot (D_e^4 - D_i^4)}{16} \quad (3.3)$$

Tensione tangenziale massima al contorno:

$$\tau_{max} = \frac{M_t}{W_t} = \frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot (D_e^4 - D_i^4)} \quad (3.4)$$

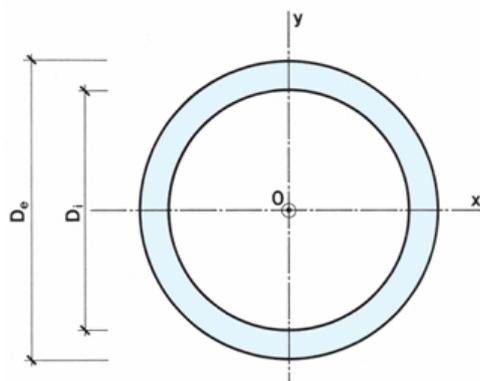


Figura 3.38: Sezione circolare cava

Si può notare quindi che più il materiale è disposto all'esterno e più questo sarà sottoposto a una maggiore tensione tangenziale, quindi per sfruttare al meglio il materiale questo deve essere disposto il più all'esterno possibile.

Queste considerazioni hanno portato alla scelta di utilizzare un core da 15 mm al posto di quello da 20 mm poiché così facendo si porta la prima pelle, quella interna la telaio, più verso l'esterno quindi più lontana dal centro di torsione del telaio. Questo ha permesso di ottenere una maggiore rigidezza torsionale a fronte di una diminuzione di peso dato dalla diminuzione dell'altezza del core, tutto questo assieme alla validazione dei pannelli sul SES.

3.3.3 Rigidezza del telaio e FEM

Partendo da una prima stratifica dei materiali per le varie zone della monoscocca che soddisfi il SES si può calcolare una stima della rigidezza del telaio.

Come anticipato nel paragrafo precedente è possibile schematizzare il telaio come una molla che è collegata in serie con le sospensioni anteriori e posteriori, a loro volta schematizzabili con delle molle, e calcolare la rigidezza globale del sistema[7].

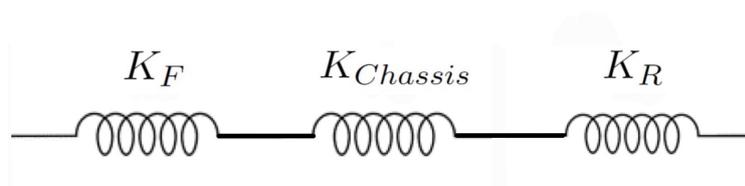


Figura 3.39: Schema tre molle in serie

La formula per calcolare la rigidezza equivalente delle molle in serie è:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_F} + \frac{1}{K_{Chassis}} + \frac{1}{K_R} \quad (3.5)$$

dove K_{eq} è la rigidezza equivalente, K_F è la rigidezza del sistema sospensivo anteriore (Front), $K_{Chassis}$ è la rigidezza del telaio e K_R è la rigidezza del sistema sospensivo posteriore (Rear).

Dalla quale si ricava facilmente

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{K_F} + \frac{1}{K_{Chassis}} + \frac{1}{K_R}}. \quad (3.6)$$

Dal reparto Vehicle Dynamics sono stati forniti i dati per eseguire i calcoli e un valore massimo accettabile per la derivata della rigidezza globale del sistema rispetto a quella del telaio, che permette di dare un valore alla sensibilità della rigidezza globale in base a quella del telaio.

3.3 Rigidezza del telaio e risultati FEM

Coefficienti	Valori
K'_{eq}	0.002
K_F	235.44 Nm/deg
K_R	274.14 Nm/deg

Tabella 3.2: Dati rigidezze

Date queste equazioni e valori è stata creata una stringa di dati facendo variare la $K_{Chassis}$ con un delta incrementale di 0.1 con la quale è stato poi tracciato questo grafico.

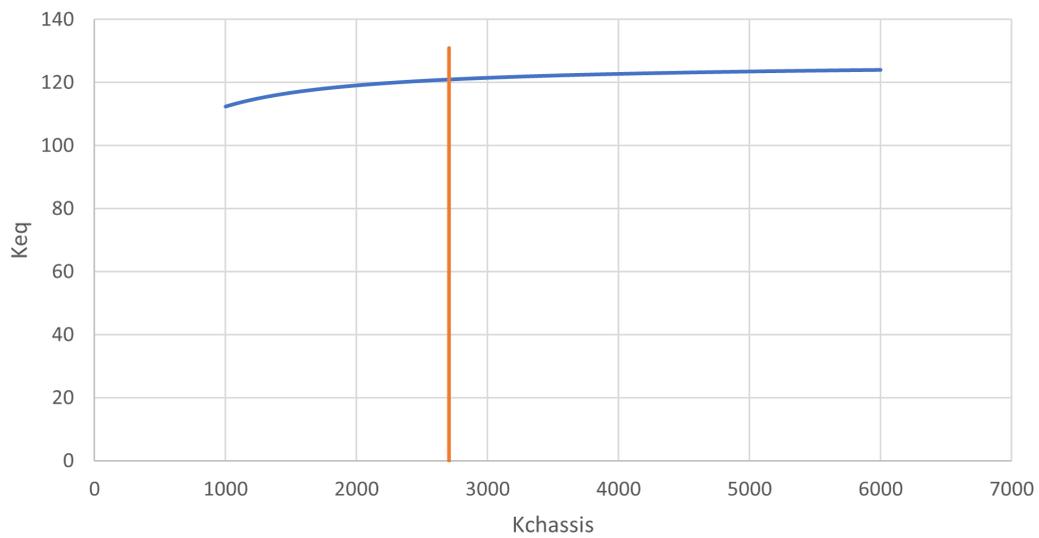


Figura 3.40: Grafico $K_{eq}(K_{Chassis})$

Dagli stessi valori precedentemente calcolati si è poi ricavata la derivata della rigidezza del sistema rispetto a quella del telaio e generato un secondo grafico.

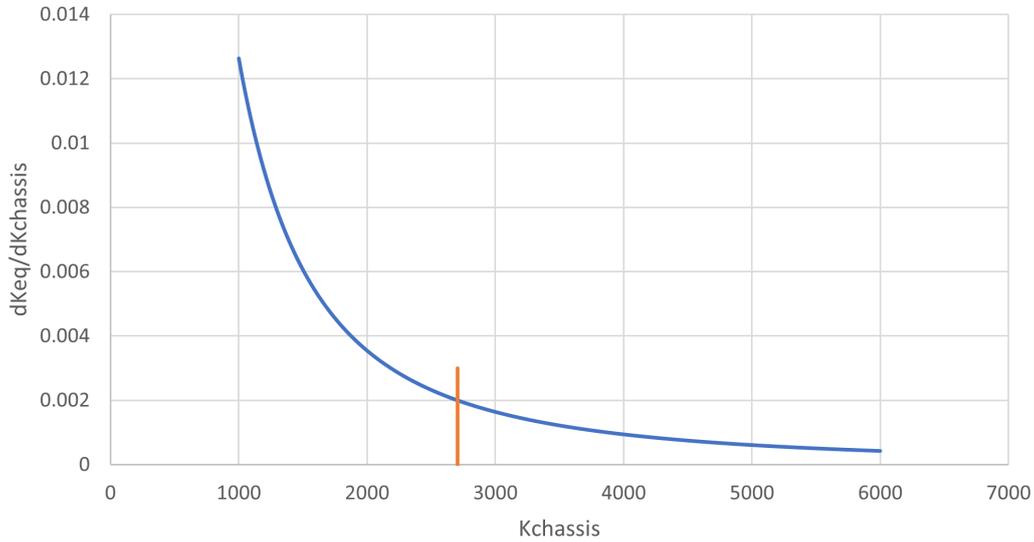


Figura 3.41: Gradico $dK_{eq}/dK_{Chassis}$

Analizzando i grafici della rigidezza del sistema in funzione di quella del telaio, si è individuato, attraverso la derivata della rigidezza del sistema, il valore di soglia oltre il quale un ulteriore incremento della rigidezza del telaio non comporta un aumento significativo della rigidezza complessiva. Ottenendo così il valore di rigidezza minima del telaio secondo le richieste del reparto Vehicle Dynamics.

$$K_{Chassis} = 2705.4 \text{ Nm/deg} \quad (3.7)$$

Con questo valore fissato come limite inferiore sotto il quale non scendere i colleghi del reparto hanno svolto un'analisi FEM[8] del telaio sottoposto a una prova di torsione, le quali modalità nello specifico non saranno trattate in questa tesi e di cui ci limitiamo a riportare i risultati ottenuti. Per l'analisi è stato usato il software simcenter NX nel quale è stata importata la mesh della geometria della monoscocca singola, senza front hoop ed anello, vincolandola sulla parete posteriore con tutti i gradi di libertà bloccati, mentre la parete anteriore, il front bulckhead, è stata vincolata lasciando libera la rotazione sull'asse x (asse longitudinale del telaio). Posti questi vincoli con i dati della stratifica minima validata dal SES si è applicato un momento distribuito sulla superficie del Front bulckhead di 1000 Nm .

3.3 Rigidezza del telaio e risultati FEM

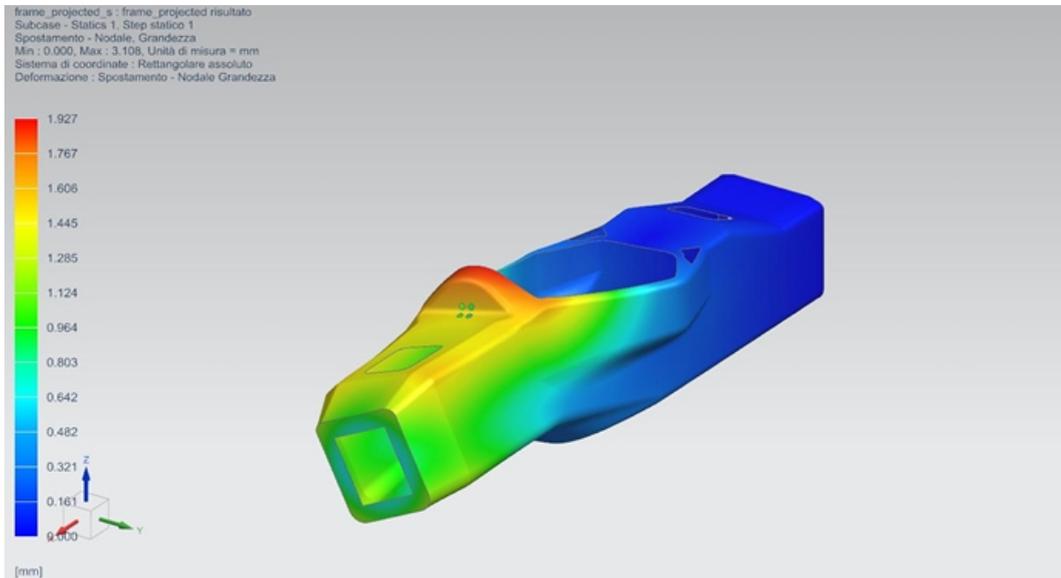


Figura 3.42: Immagine FEM telaio

I risultati ottenuti sono:

$$\frac{\text{Momento applicato}}{\text{Rotazione x in gradi}} \left| \begin{array}{l} 1000 \text{ Nm} \\ 0.233 \text{ deg} \end{array} \right.$$

$$\text{Rigidezza torsionale} = \frac{\text{Momento applicato}}{\text{Rotazione x in gradi}} = \frac{1000 \text{ Nm}}{0.233 \text{ deg}} = 4278 \text{ Nm/deg} \quad (3.8)$$

Con questo risultato la rigidezza torsionale è ampiamente sopra le richieste date dal reparto Vehicle Dynamics, oltre a questo sono state ripetute ulteriori simulazioni della rigidezza torsionale inserendo nello studio il front hoop e l'anello per analizzare la loro influenza nella rigidezza globale del sistema monoscocca ottenendo i seguenti risultati.

Configurazione	Rigidezza torsionale [Nm/deg]
Monoscocca	4278
Monoscocca + FH	4601
Monoscocca + FH + Anello	4747

Tabella 3.3: Risultati FEM

É possibile notare come la presenza del front hoop abbia aumentato considerevolmente la rigidezza della monoscocca, mentre l'anello genera un aumento trascurabile della rigidezza, che come detto in precedenza si trova già ampiamente sopra le richieste. Alla luce di questi risultati si è deciso di non inserire l'anello durante la produzione per risparmiare peso ed è stato rimandato per ulteriori sviluppi futuri. Per la validazione di questi dati occorre attendere la prova fisica, che al tempo di stesura di questa tesi, per ragioni al di fuori del nostro controllo, non è stata effettuata.

3.4 Stampi

3.4.1 Tipologia degli stampi

Finita definitivamente la fase progettuale e bloccata l'ultima geometria della monoscocca si è passati alla progettazione degli stampi necessari per la produzione. Come è stato fatto per la monoscocca si è passati prima attraverso un processo decisionale in cui si sono valutate le varie tipologie di stampi tenendo in considerazione che la tecnologia di produzione scelta è quella di laminazione e polimerizzazione in autoclave, dove il tessuto preimpregnato viene laminato sugli stampi messo sotto vuoto in un sacco e fatto curare in autoclave a pressioni e temperature controllate.

Le tipologie di stampi considerate sono:

- MDF (Medium Density Fiberboard)[4]:
Questi stampi vengono prodotti mediante l'incollaggio di pannelli a base di fibre di legno e resina epossidica che vengono poi lavorate tramite macchine al controllo numerico per ottenere la geometrie desiderata. Questa tecnologia permette di ottenere una buona finitura superficiale ad un costo contenuto e possono essere utilizzati sia per produrre il maschio per poi produrre lo stampo in carbonio sia come veri e propri stampi. Quest'ultima soluzione presenta

delle limitazioni in fase di produzione per quanto riguarda le temperature e le pressioni che può sopportare influenzando sulle proprietà meccaniche della monoscocca, inoltre per questi motivi la ripetibilità del processo è limitata ad alcune unità. Questa tecnologia è stata usata per la produzione delle vetture precedenti, la P4 e la P4 EVO ottenendo comunque dei buoni risultati.

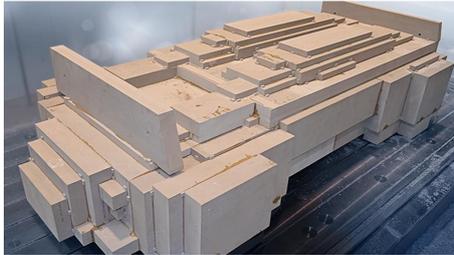


Figura 3.43: Grezzo MDF

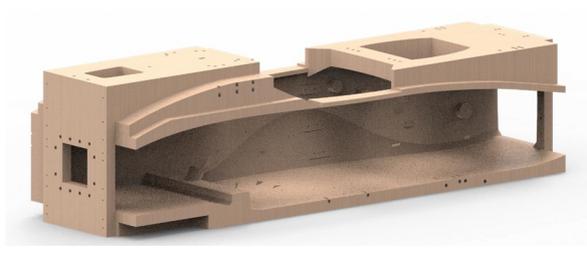


Figura 3.44: Stampi MDF P4/EVO

- Lamiera acciaio piegata:

Questa tipologia di stampi è più semplice e veloce da realizzare e per questo ha un costo contenuto, adatta per la produzione di prototipi e di medio volume. Realizzati mediante la piegatura e sagomatura di lamiere di acciaio, questi stampi offrono una buona resistenza strutturale, garantendo stabilità e precisione accettabili nella formatura del composito, anche sotto temperature e pressioni elevate. Questo tipo di stampo è particolarmente indicato per telai in composito con geometrie meno complesse, poiché non permette geometrie molto curvilinee.



Figura 3.45: Stampi in acciaio

- Raku-Tool:

Gli stampi in Raku-Tool rappresentano una soluzione avanzata per la realizzazione di telai in materiale composito, grazie alle loro eccellenti proprietà termomeccaniche. Il Raku-Tool è un materiale poliuretano specificamente progettato per la costruzione di stampi, apprezzato per la sua stabilità dimensionale, resistenza alle alte temperature e facilità di lavorazione. Questi stampi offrono una combinazione ideale di leggerezza e rigidità, rendendoli perfetti per applicazioni che richiedono precisione e una superficie liscia, essenziale per garantire la qualità del composito finale. Questa tipologia di stampi può essere utilizzata sia per realizzare il maschio dello stampo sia per fare proprio da stampi, hanno un elevato costo per via del materiale e una ripetibilità non troppo elevata se sottoposti a continui cicli in autoclave.



Figura 3.46: Stampo in Raku-Tool

- Carbonio:

Gli stampi in carbonio rappresentano la soluzione di fascia più alta solitamente utilizzata per le vetture ad alte prestazioni dove è richiesta la massima precisione e leggerezza. Sono realizzati in due step, il primo è la creazione del controstampo (maschio) tramite un modello in resina o MDF e poi la realizzazione dello stampo vero e proprio (femmina) tramite laminazione degli strati in fibra di carbonio e cura in autoclave. Questi stampi garantiscono un'elevata stabilità termica e resistenza meccanica che danno come risultato un'elevata qualità superficiale e dimensionale oltre a garantire un'elevata ripetibilità della produzione della monoscocca. Tutto questo ha un costo molto elevato e tra i tempi di realizzazione maggiori rispetto alle altre soluzioni.

La scelta della tipologia di stampi per la realizzazione di questo progetto è ricaduta sugli stampi in carbonio visto la sponsorizzazione offerta dell'azienda ARSTech che ha coperto tutti i costi e per le loro maggiori prestazioni rispetto alle altre soluzioni.

3.4.2 Progettazione degli stampi

Per quanto riguarda la progettazione degli stampi si è partiti dalla preparazione della geometria del CAD rimuovendo tutti i fori presenti sul telaio lasciando solamente le aperture del cockpit, del front bulckhead e del foro posteriore, questo perché tutti i fori rimossi verranno praticati successivamente alla produzione della monoscocca tramite lavorazioni a macchine CNC. Fatto ciò si è estratta la matematica della superficie esterna del telaio poi suddivisa a metà sul piano longitudinale verticale della vettura (xz), questa suddivisione degli stampi è nata dalla necessità di dover inserire il front hoop durante la laminazione. Per il fissaggio tra i due semistampi appena realizzati è stata prevista una flangia verticale che corre lungo tutto il perimetro del semistampo sulla quale sono posizionati dei pin di centraggio e fissaggio. Oltre ai due semistampi principali sono previsti due tappi forati per la parte anteriore e posteriore, oltre a una scomposizione in quattro parti per la battuta interna del giroabitacolo, anche questi dotati di flange e pin per il centraggio.

A questo punto si è passati allo studio dello sforno affinché nella direzione di estrazione degli stampi non ci fossero sottosquadri che provocherebbero un danneggiamento loro ma anche della monoscocca.

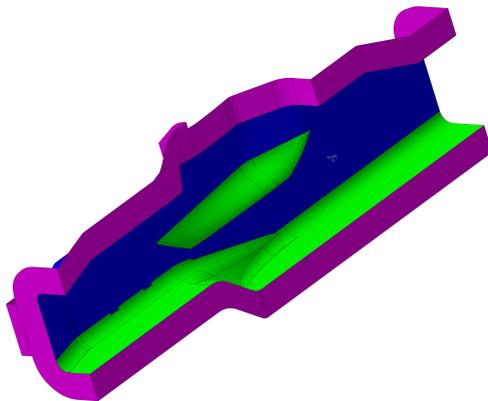


Figura 3.47: Grezzo MDF

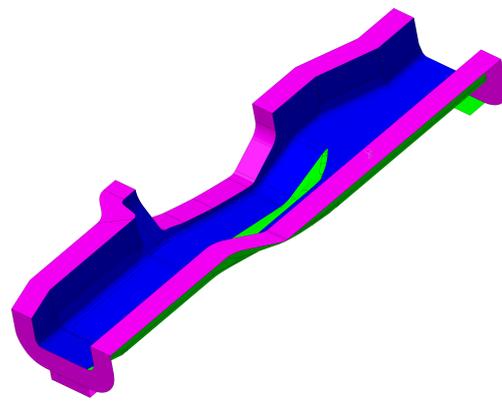


Figura 3.48: Stampi MDF P4/EVO

Queste due immagini restituiscono i risultati sullo studio dello sforno condotto in direzione ortogonale alle flange, dove le zone colorate in blu rappresentano un angolo di sforno $> 0^\circ$ mentre le zone in verde rappresentano un angolo di sforno pari a 0° (ovvero superfici parallele alla direzione di estrazione). Da ciò si evidenzia che non ci sono zone di sottosquadro, cioè superfici con angolo di sforno negativo che non permettono la corretta estrazione del pezzo, che sarebbero state evidenziate in rosso.

Per quanto riguarda i due semistampi dei tappi sono state necessarie delle battute in acciaio per impedire alla pressione del sacco di schiacciare il rohacell, utilizzato al posto del core in alluminio, sul lato visto che questo si trova in posizione parallela al

bordo dei fori.

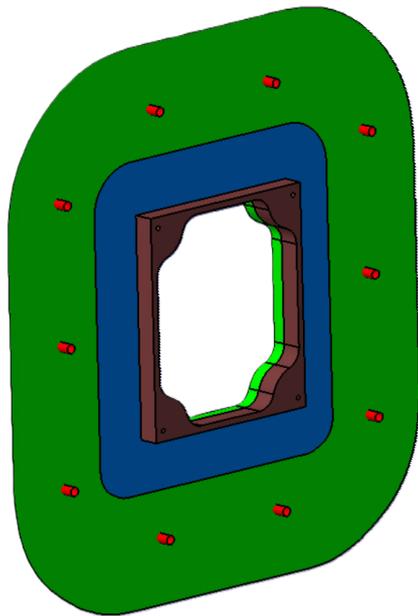


Figura 3.49: Tappo con battuta

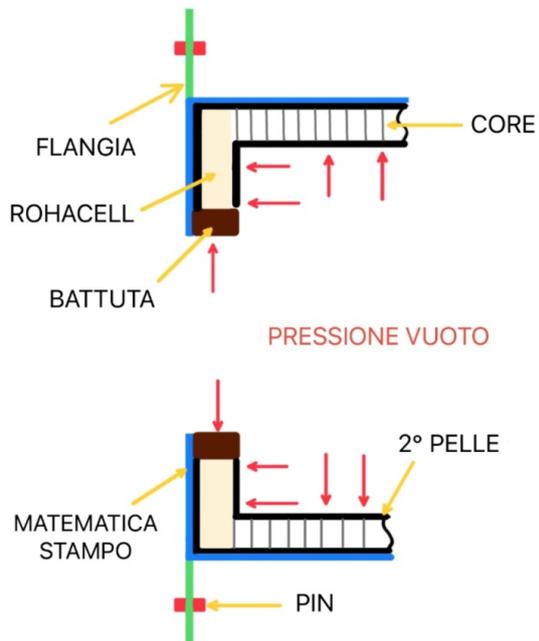


Figura 3.50: Sezione stampi laminato

In questa zona è stato necessario utilizzare il rohacell al posto del core in honeycomb di alluminio poiché questo non riesce a distribuire in maniera efficiente le pressioni negli angoli dove è necessario posizionare il core con battuta in testa, dato che tale instabilità potrebbe causare uno schiacciamento del core per via della pressione laterale.

Riguardo ai fori sui tappi sono stati previsti anche in ottica di laminazione, per semplificare l'accesso all'interno degli stampi durante la produzione.

Terminata la geometria principale e inserita sull'assieme generale si sono disegnati i pin di centraggio da 3 mm di diametro per il corretto posizionamento degli inserti sugli stampi durante la laminazione. Di questi se ne sono posizionati due per ogni inserto in modo da vincolarli anche sulla rotazione, mentre per alcuni inserti posizionati in prossimità degli angoli sono state previste delle asole in modo tale che durante le operazioni di vuoto questi avessero un minimo movimento per poter trasmettere la pressione alle pelli.

Sono stati inseriti ulteriori pin per il posizionamento del firewall che viene incollato all'interno della monoscocca una volta terminata la sua produzione. Terminate tutte le geometrie i modelli sono stati esportati su file compatibili con i software usati dall'azienda e colorati secondo un codice cromatico sempre richiesto dall'azienda per la produzione degli stampi, dove la matematica dello stampo è azzurra, le flange sono verdi e i pin rossi.

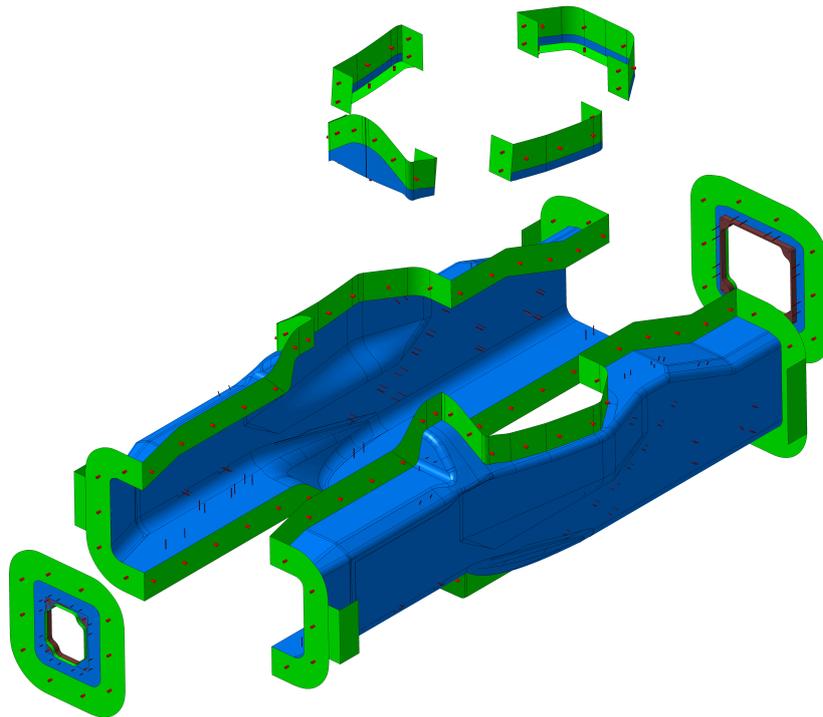


Figura 3.51: Esploso stampi

Con lo stesso procedimento sono stati progettati anche gli stampi per il firewall e altre componenti della vettura.

Queste geometrie sono state utilizzate per produrre i controstampi, realizzati in ureol attraverso la lavorazione a macchina, sulle quali poi sono stati laminati gli stampi utili per la produzione del telaio.



Figura 3.52: Controstampo in Ureol



Figura 3.53: Semistampo sinistro del telaio

3.5 Studio e scelta dei materiali

In parallelo alla progettazione è stato portato avanti lo studio dei materiali in particolare sul modo in cui ridurre al minimo le stratifiche per ottenere le prestazioni desiderate al minor peso. Queste devono soddisfare le richieste meccaniche del SES che divide il telaio in varie zone, ognuna con diverse richieste strutturali.

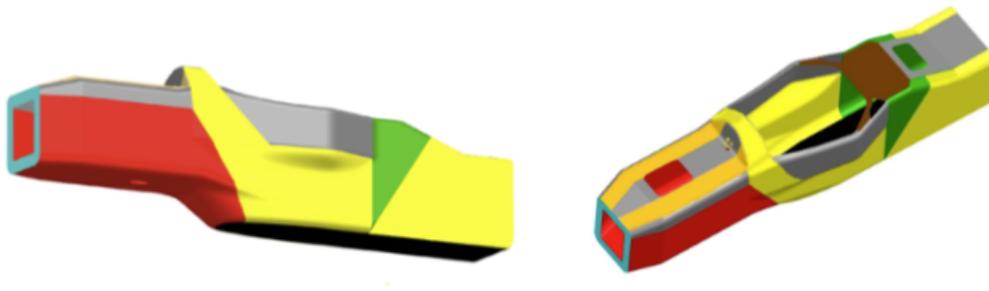


Figura 3.54: Zone del telaio nel SES

In base ad ogni zona sono state valutate stratifiche che soddisfacessero l'equivalenza tra il materiale composito e i tubi d'acciaio standard come normato da SES, per far questo si è passati tramite studi FEM e test fisici condotti su dei pannelli di prova sottoposti a prove di shear e three poin bending che hanno permesso di ricavare dei dati e validare gli studi fatti a monte. Oltre a ciò sono state dimostrate le equivalenze per l'uso dei keensert per sostituire le giunzioni bullonate per le quali sono state richieste delle prove fisiche. Trovate le stratifiche che soddisfacessero tutte le richieste è stato redatto il plybook per la produzione della monoscocca.

Per approfondire meglio questo argomento rimando alla lettura della tesi del collega di reparto Matteo Armiento che si è occupato in prima persona di questo tema.

3.6 P5 interamente progettata e realizzata da noi

Terminata la fase di progettazione è iniziata la produzione della monoscocca presso l'azienda sponsor ARSTech che ci ha fornito spazi, materiali e attrezzature per poter produrre il telaio.

Partendo dal taglio pelli realizzato da un macchinario apposito che ritaglia le forme del telaio su di un rotolo di prepreg vengono contemporaneamente preparati gli stampi con del distaccante. Così si è potuto iniziare con la laminazione della prima pelle sui semistampi separati e proseguire con il posizionamento degli inserti con le relative patch, ricoprendo il tutto con uno strato di peel-ply, uno speciale pellicola plastica che una volta rimossa dopo il ciclo di cura permette di avere la superficie interna della prima pelle ruvida in modo da far aderire lo strato di adesivo necessario per incollare l'honeycomb a questa.



Figura 3.55: Laminazione prima pelle

Finito il primo ciclo di cura e spellicolato il peel-ply si è posizionato l'honeycomb sulle superfici e lo si è deformato in modo tale da fargli prendere la forma delle varie curvature forandolo in prossimità degli inserti per farlo incassare correttamente. Dopodiché si è rimosso l'honeycomb formato e disposto l'adesivo, a questo punto si sono uniti i due semistampi e posizionate le fasce di overlap della prima pelle lungo tutta la linea di giunzione dei due semistampi. Fatto ciò si è riposizionato il core all'interno e applicato il vuoto per fissare saldamente il core all'adesivo della prima pelle, si è poi proseguito posizionando il secondo strato di adesivo sulla faccia interna del core e la seconda pelle terminando così la laminazione e mandando il tutto nel secondo ciclo di cura all'interno dell'autoclave.



Figura 3.56: Chiusura stampi



Figura 3.57: Inserimento Core

Finito l'ultimo ciclo di cura la monoscocca è stata estratta e questo è il risultato

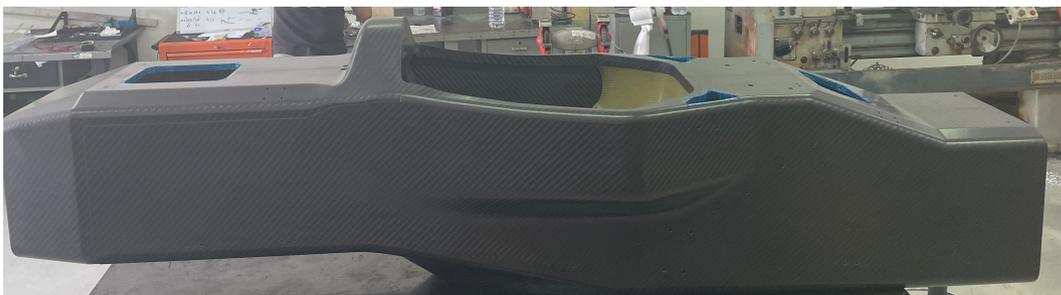


Figura 3.58: Telaio P5

3.6 P5 interamente progettata e realizzata da noi

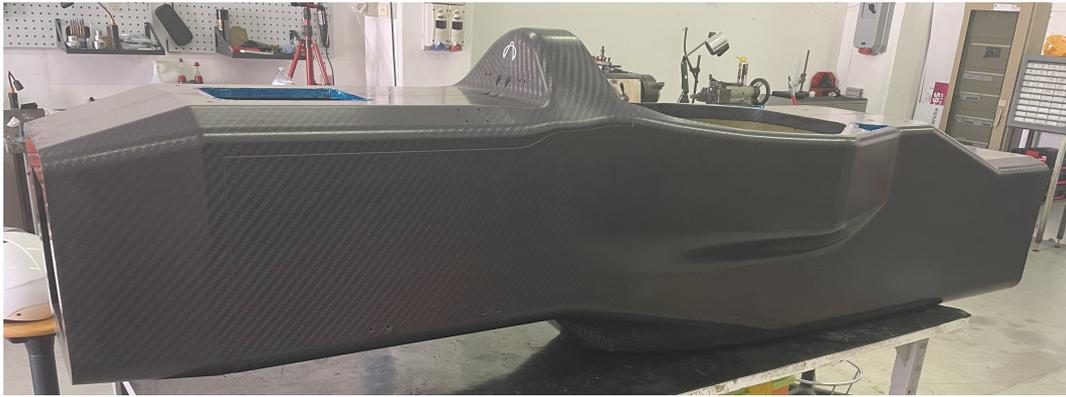


Figura 3.59: Telaio P5



Figura 3.60: P5 at Formula Student Portugal

Capitolo 4

Conclusioni

4.1 Confronto con vecchio progetto P4

Terminata la produzione si possono esporre i risultati ottenuti con questo nuovo progetto e per avere un metro di paragone sono stati confrontati con i precedenti progetti dei telai in monoscocca del team, P4 e P4 EVO.

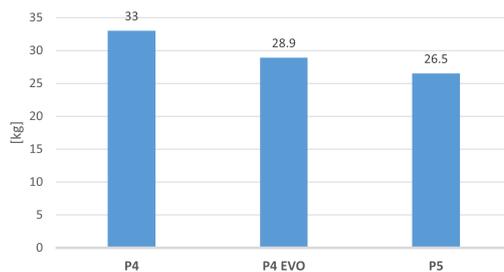


Figura 4.1: Confronto pesi

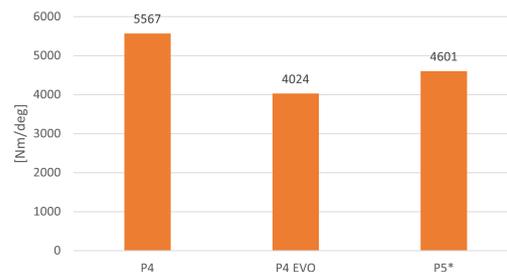


Figura 4.2: Confronto rigidzze

Il progetto in questione ha ottimizzato le geometrie portando le dimensioni del telaio ai limiti consentiti dal regolamento, che assieme agli studi condotti sui materiali ha reso possibile ridurre il peso di 2.4 kg rispetto al precedente progetto della P4 EVO pari ad una riduzione dell'8 %, con un aumento della rigidzza torsionale (stimata dal FEM) del 14 %. Questo confronto però non è una buona cartina tornasole dei risultati ottenuti poiché c'è una differenza non trascurabile sulla tipologia di fibra usata nel precedente progetto, la T800, che ha rigidzza superiore anche del 20% rispetto a quella usata. Sarebbe più consono infatti confrontare i dati con il progetto della P4 che condivide la stessa geometria con la P4 EVO ma è stata prodotta usando una T700 comparabile con la tipologia di fibra usata per la P5. Messe a confronto si vede che c'è stata una riduzione di peso di 6.5 kg pari al 20 % a fronte di una riduzione della rigidzza torsionale (stimata al FEM) del 17 %, questa rimane comunque ampiamente superiore alle richieste.

Un ulteriore confronto che permette una migliore analisi del rapporto tra il peso e la rigidzza dei tre progetti è dato dal grafico della rigidzza specifica.

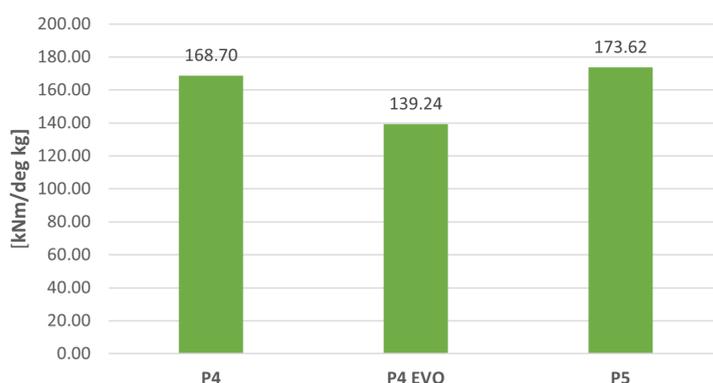


Figura 4.3: Grafico rigidezza specifica

L'efficacia del nuovo progetto è evidente dall'aumento della rigidità specifica rispetto ai telai precedenti, riuscendo a mantenere una rigidezza torsionale elevata pur riducendo il peso complessivo.

Questi risultati hanno un impatto significativo se si considera che anche solo 1 *kg* può comportare la variazione di decimi sul tempo del giro oltre alle nuove geometrie volte all'integrazione e sviluppo dell'aerodinamica del veicolo e al nuovo posizionamento del pilota nell'abitacolo che ne ha migliorato il comfort di guida pur integrando il sedile con il firewall.

4.2 Sviluppi futuri

Con questo progetto si sono stabilite le geometrie per i prossimi anni lasciando una solida base con un ampio margine di miglioramento per gli sviluppi futuri. Una parte significativa del budget destinato agli stampi, ora completati, potrà essere riassegnata all'uso di fibre più performanti, che assieme alla possibile integrazione dell'anello di rinforzo per il cockpit potrà puntare a una maggiore riduzione del peso, mantenendo elevate prestazioni in termini di rigidità del telaio. Lo sviluppo degli inserti può essere portato avanti con la laminazione diretta dei supporti dei rocker nel telaio, che elimina così la necessità di inserti separati, assieme all'uso della tecnologia di stampa 3D dei metalli che offre la possibilità di ottimizzare la struttura, superando i vincoli geometrici imposti dalle tecnologie produttive tradizionali. Inoltre, la possibile adozione di materiali compositi per l'AIP e la rear plate, insieme alla realizzazione di un IA custom, contribuiranno ulteriormente alla riduzione del peso, migliorando l'efficienza complessiva e puntando all'obiettivo di avere un peso intorno ai 20 *kg*, avvicinandosi così alle performance dei top team.

Bibliografia

- [1] Toray Carbon Fibers America. Carbon-fiber-selector-datasheet.
- [2] Amos Zallocco. Studio del processo di realizzazione di un volante in materiale composito per vetture da competizione. UNIVPM Thesis 2020-21.
- [3] FSG. Formula student rules. 1.1, 2023-24.
- [4] Enrico Marziali. Progettazione e produzione di un telaio monoscocca in fibra di carbonio per una monoposto di formula student. UNIVPM Thesis 2019-20.
- [5] Polimarche Racing Team. Polimarche racing team. 2021-2024.
- [6] Università degli studi di Ferrara. Teoria sulla torsione semplice.
- [7] Luca Verdecchia. Progettazione di un telaio monoscocca in composito per formula sae. UNIVPM Thesis 2022-23.
- [8] Luca Galli. Stima della rigidità torsionale di un telaio monoscocca in fibra di carbonio tramite analisi agli elementi finiti. UNIVPM Term paper 2023-24.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare i miei genitori che mi hanno permesso affrontare questo percorso di studi senza farmi mai sentire sotto pressione, lasciandomi libero di prendere le mie scelte e seguire le mie passioni. Loro assieme a mio fratello Francesco mi hanno supportato e sopportato nei momenti più difficili di questi anni, accogliendomi ogni volta al mio ritorno con un affetto che, anche se non sempre mostravo esplicitamente, ho profondamente apprezzato e che mi ha dato la forza per proseguire .

Mia nonna Franceschina che sin da piccolo mi ha incoraggiato a coltivare la mia passione per la tecnologia e l'ingegneria.

Andrea il mio amico di sempre, con il quale seppur ci siamo trovati a vivere in diverse città dall'inizio degli studi universitari, ho continuato a condividere i miei timori e i miei traguardi accademici e con il quale ho passato le faticose sessioni estive a preparare gli esami facendoci forza l'un l'altro.

Giuseppe, che mi ha sempre aiutato a prendere una pausa dallo studio, incoraggiandomi ad alzarmi dalla scrivania anche solo per fare due chiacchiere in compagnia fino a tarda notte discutendo della nostra passione per i motori.

Sono grato di aver conosciuto Matteo, Arnas, Leidi, Riccardo, Giuseppe e Davide con i quali ho condiviso lezioni, studio, esami e quel poco tempo libero che gli studi ci lasciavano. A loro, che da compagni di corso sono diventati la compagnia degli amici di merenda, devo il raggiungimento di questo traguardo. Loro hanno fatto tutta la differenza, trasformando tre anni di studi in un percorso pieno di momenti memorabili che mi accompagneranno per sempre.

Ringrazio anche tutti i miei amici e i miei parenti che mi hanno accompagnato per tutto questi anni sostenendomi e rendendomi felice anche solo strappandomi un semplice sorriso.

Vorrei infine ringraziare il mio relatore il prof. Marco Sasso che mi ha permesso la stesura di questo elaborato, l'azienda ARSTech e tutti i ragazzi del Polimarche Racing team, in particolar modo Manuel che mi ha affiancato durante questo lavoro, con i quali abbiamo sviluppato e portato a termine questo progetto.

Ancona, Ottobre 2024

Federico Fanini