



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Progettazione e realizzazione del case
dell'inverter per un'auto di Formula SAE**

*Design and manufacturing of the inverter enclosure for a
Formula SAE Car*

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Tesi di laurea di:

Travaglini Davide

Anno Accademico 2025-2026

Indice

Sommario

Introduzione	4
Capitolo 1 — La Formula SAE e il Polimarche Racing Team.....	5
1.1 La competizione Formula SAE.....	5
1.2 Il Polimarche Racing Team.....	6
1.3 La vettura elettrica e il sistema di propulsione	7
Capitolo 2 — L'inverter nella trazione elettrica.....	8
2.1 Funzione e principio di funzionamento.....	8
2.2 L'inverter nella Peacock 5 — specifiche tecniche e posizionamento.....	9
2.3 Vincoli imposti dal regolamento Formula SAE Electric	10
Capitolo 3 — Requisiti progettuali del case	12
3.1 Protezione meccanica.....	12
3.2 Gestione termica.....	13
3.3 Vincoli di peso e ingombro	13
Capitolo 4 — Materiali	15
4.1 Materiali compositi in fibra di carbonio	15
4.2 Leghe di alluminio.....	17
4.3 Confronto e scelta del materiale per il case	17
Capitolo 5 — Progettazione del case	19
5.1 Analisi delle soluzioni esistenti e stato dell'arte	19
5.2 Analisi accessibilità	20
5.3 Modellazione CAD	22
5.4 Analisi strutturale agli elementi finiti (FEA).....	25
5.5 Definizione del processo di fabbricazione.....	29
5.6 Integrazione nel telaio e sistema di fissaggio	30
Capitolo 6 — Risultati della validazione e confronto con i requisiti	32
6.1 Verifica strutturale	32
6.2 Gestione termica.....	32
6.3 Isolamento elettrico.....	33
6.4 Validazione del prototipo in alluminio.....	33
6.5 Sviluppi futuri	34
Conclusioni	36

Introduzione

La presente tesi descrive il processo di progettazione e sviluppo del case dell'inverter della vettura Peacock 5 (P5) del Polimarche Racing Team, la squadra corse dell'Università Politecnica delle Marche impegnata nella categoria Formula SAE Electric.

Il Capitolo 1 introduce la competizione Formula SAE, il Polimarche Racing Team e l'architettura del sistema di trazione elettrica adottato dalla vettura. Il Capitolo 2 approfondisce il ruolo dell'inverter nella catena di trazione elettrica, descrivendone il principio di funzionamento, le caratteristiche tecniche specifiche della P5 e i vincoli imposti dal regolamento. Il Capitolo 3 definisce i requisiti progettuali del case: protezione meccanica, gestione termica e vincoli di peso e ingombro. Il Capitolo 4 analizza i materiali candidati per la realizzazione del case, con particolare attenzione ai compositi in fibra di carbonio e alle leghe di alluminio, confrontandone le proprietà in relazione al contesto applicativo. Il Capitolo 5 illustra nel dettaglio il processo di progettazione: dalla modellazione CAD e analisi strutturali agli elementi finiti (FEM), alla definizione del processo di fabbricazione e del sistema di fissaggio al telaio. Il Capitolo 6 presenta i risultati della validazione e il confronto con i requisiti iniziali. Le Conclusioni sintetizzano i principali risultati ottenuti e indicano possibili sviluppi futuri del progetto.

Capitolo 1 — La Formula SAE e il Polimarche Racing Team

1.1 La competizione Formula SAE

La Formula SAE è una competizione universitaria internazionale promossa dalla Society of Automotive Engineers (SAE International), organizzazione tecnica fondata nel 1905 con sede negli Stati Uniti, punto di riferimento mondiale per la standardizzazione e la ricerca nei settori dell'automotive, dell'aerospazio e dei trasporti. La competizione nacque nel 1981 negli Stati Uniti con l'obiettivo di offrire agli studenti universitari un progetto didattico concreto: progettare, costruire e gareggiare con un prototipo di monoposto da corsa, affrontando le problematiche tipiche dell'ingegneria applicata prima del conseguimento della laurea. Nel corso dei decenni la competizione si è espansa a livello globale, con eventi annuali in Europa — tra cui Formula Student Germany (FSG), Formula Student Italy (FSI) e Formula Student East (FSEAST) — in Asia, in Australia e nelle Americhe, con la partecipazione di centinaia di team provenienti da altrettanti atenei.

Le vetture devono essere progettate e costruite interamente dagli studenti, nel rispetto di un regolamento tecnico aggiornato annualmente dalla commissione SAE. La valutazione avviene attraverso prove statiche e prove dinamiche. Le prime comprendono il Design Event, in cui una giuria di ingegneri dell'industria valuta le scelte progettuali e il livello di ingegnerizzazione del veicolo; il Cost Event, che premia la capacità di contenere i costi di produzione; e il Business Plan Presentation, in cui il team espone il progetto come se fosse destinato a un mercato commerciale. Le prove dinamiche comprendono invece l'Acceleration (rettilineo di 75 m), lo Skidpad (percorso a otto per la valutazione della tenuta laterale), l'Autocross (giro singolo su tracciato chiuso) e l'Endurance abbinato all'Efficiency Event, che si svolge su una distanza di circa 22 km e costituisce la prova più impegnativa per affidabilità ed efficienza energetica.

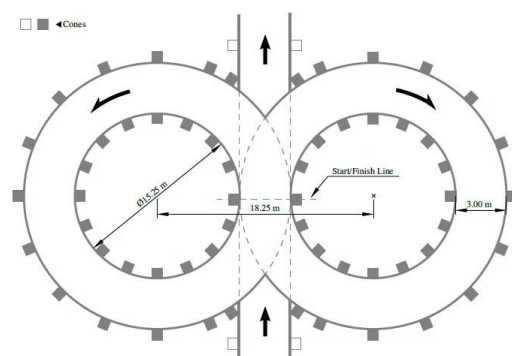


Figura 1.1: Tracciato dello skidpad

Con l'introduzione della categoria Formula SAE Electric — denominata FSE nelle competizioni europee — il regolamento è stato integrato con sezioni specifiche dedicate ai sistemi ad alta tensione. Tali sezioni coprono la progettazione del pacco accumulatori, degli inverter, del sistema di gestione della batteria (Battery Management System, BMS) e di tutte le protezioni elettriche e meccaniche obbligatorie per garantire l'incolumità del pilota e dei commissari tecnici. La partecipazione a questa categoria richiede pertanto competenze multidisciplinari che spaziano dall'elettrotecnica alla meccanica strutturale, dall'elettronica di potenza alla gestione termica, rendendo il percorso particolarmente formativo per i team coinvolti.

1.2 Il Polimarche Racing Team

Il Polimarche Racing Team è la squadra corse studentesca dell'Università Politecnica delle Marche (Univpm), fondata ad Ancona nel 2013. Il team è composto da studenti iscritti prevalentemente ai corsi di laurea in Ingegneria Meccanica, Elettronica e Informatica, organizzati in sottogruppi tecnici specializzati: Strutture e compositi, Aerodinamica, Dinamica, Elettronica (divisa in software e hardware) ed Eventi Statici. La prima vettura, denominata Peacock 1, fu completata in soli sei mesi e portata in gara alla Formula ATA Italy 2014, dove il team riuscì a completare tutti gli eventi dinamici incluso l'Endurance, risultato notevole per una prima partecipazione.

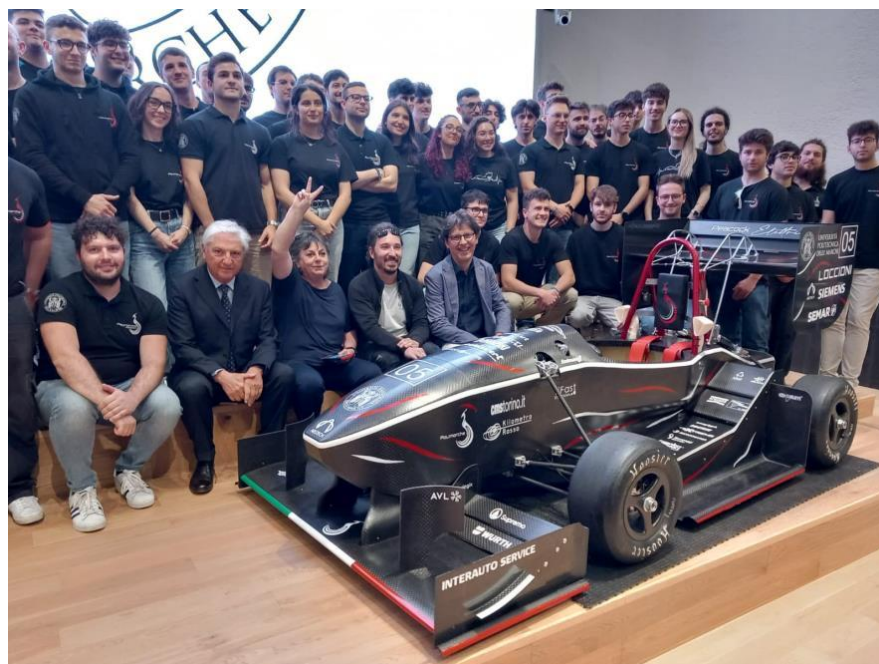


Figura 1.2: I membri del Polimarche Racing Team con la vettura Peacock 5

Negli anni successivi il progetto è stato sistematicamente evoluto. La Peacock 2 e la Peacock 3 hanno introdotto un pacchetto aerodinamico completo con alettoni anteriore e posteriore. La Peacock 4 ha segnato una svolta radicale con il passaggio dal telaio a traliccio in acciaio alla monoscocca in fibra di carbonio. La Peacock 4 EVO — evoluzione successiva della P4 — ha partecipato a Formula Student Italy e Formula Student East nel 2021. Il passo successivo ha rappresentato la transizione alla categoria elettrica con lo sviluppo della Peacock 5, prima vettura del team a trazione interamente elettrica.

1.3 La vettura elettrica e il sistema di propulsione

La P5 adotta un'architettura di trazione a due motori elettrici posteriori, uno per ciascuna ruota dell'asse posteriore. Per il power train è stato scelto l'AMK Racing Kit 4WD che comprende 4 inverter distinti —montati su un'unica piastra di raffreddamento— e 4 motori, un kit progettato appositamente per la Formula Student Electric. Al momento, come primo anno di auto elettrica, si è optato per utilizzare solamente 2 motori (quindi 2 inverter) dei 4 disponibili, mantenendo aperta la possibilità di un'evoluzione futura verso la trazione integrale con quattro motori.

La presenza di due motori indipendenti sull'asse posteriore consente di gestire in modo differenziato la coppia sui due lati, ottenendo un effetto di torque vectoring posteriore che migliora la manovrabilità in uscita di curva rispetto a una soluzione con differenziale meccanico convenzionale. Il controllo è affidato all'unità di controllo del veicolo (VCU), che comunica con i due inverter via CAN-Bus a 500 kbps [1][2].

Ciascun inverter riceve dalla batteria la corrente continua ad alta tensione e la converte in corrente alternata trifase, modulandone frequenza e ampiezza in funzione dei comandi della VCU, consentendo un controllo preciso di coppia e velocità del motore associato. La potenza in gioco, le sollecitazioni meccaniche tipiche del motorsport e le escursioni termiche imposte dal ciclo di gara rendono la protezione fisica dell'inverter un requisito progettuale critico, oggetto della presente tesi.

Capitolo 2 — L'inverter nella trazione elettrica

2.1 Funzione e principio di funzionamento

Nella trazione elettrica, l'inverter è il componente che converte la corrente continua (DC) fornita dal TSAC (Tractive System Accumulator Container) in corrente alternata trifase (AC), necessaria per alimentare i motori sincroni o asincroni tipicamente impiegati in questo tipo di applicazioni. In un veicolo elettrico a batteria, il pacco batterie eroga una tensione continua che, per ragioni di efficienza e di densità energetica, si colloca nella categoria dell'alta tensione (HV): nel contesto Formula SAE Electric i valori tipici di tensione di bus DC si situano tra 100 V e 600 V. La corrente alternata trifase prodotta dall'inverter ha frequenza e ampiezza variabili, in modo da controllare con precisione la coppia e la velocità del motore.

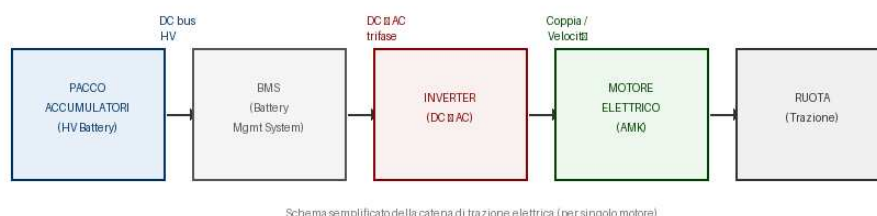


Figura 2.1: Schema della catena di trazione elettrica

Il cuore dell'inverter è un ponte H trifase, composto da sei interruttori a semiconduttore — tipicamente transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) o MOSFET al carburo di silicio (SiC-MOSFET) — disposti in tre rami, ciascuno corrispondente a una fase del motore [4]. Ogni ramo è formato da un interruttore sul lato alto (high-side) e uno sul lato basso (low-side), collegati rispettivamente al polo positivo e al polo negativo del bus DC. La commutazione controllata dei sei interruttori, governata da un segnale PWM (Pulse Width Modulation) generato dall'unità di controllo, produce sulle tre uscite tensioni alternate sfasate di 120° che, sommate vettorialmente, generano un campo magnetico rotante nel motore [4][5].

La tecnica di modulazione più diffusa nelle applicazioni ad alta dinamica, come quella automobilistica e motorsport, è la modulazione vettoriale di spazio (Space Vector Modulation, SVM), che ottimizza l'utilizzo del bus DC e riduce le armoniche di corrente

rispetto alla classica modulazione sinusoidale [5]. Il controllo della coppia e della velocità è implementato mediante la trasformata di Park (controllo in assi d-q), che consente di separare la componente di coppia da quella di flusso, semplificando il problema di controllo a quello di due variabili scalari indipendenti [5]. Questa architettura di controllo garantisce una risposta dinamica estremamente rapida, nell'ordine del millisecondo, indispensabile per le applicazioni di torque vectoring adottate dalla P5.

Le perdite di commutazione e di conduzione nei semiconduttori costituiscono la principale fonte di calore all'interno dell'inverter. Per applicazioni ad alta potenza specifica, come quelle motorsport, i semiconduttori SiC-MOSFET stanno progressivamente sostituendo i classici IGBT in silicio, grazie alla loro capacità di operare a frequenze di commutazione più elevate (con riduzione delle perdite e delle dimensioni dei componenti passivi) e a temperature di giunzione più alte, elemento critico in contesti dove la gestione termica è particolarmente sfidante [4].

2.2 L'inverter nella Peacock 5 — specifiche tecniche e posizionamento

La vettura P5 del Polimarche Racing Team adotta il sistema di azionamento AMK modello KW26-S5-FSE-4Q, progettato specificamente per la Formula Student Electric da AMK Arnold Müller GmbH & Co. KG [1].

Nella configurazione attuale della Peacock 5 sono presenti due motori AMK — uno per ciascuna ruota posteriore — con altrettanti inverter dedicati, lasciando aperta la possibilità di una futura evoluzione verso la trazione integrale. La comunicazione tra gli inverter e l'unità di controllo del veicolo (VCU) avviene tramite protocollo CAN-Bus a 500 kbps, come documentato nel repository tecnico del team [2]. Un ulteriore vincolo specifico della Peacock 5 riguarda il sistema di raffreddamento: l'inverter AMK è dotato di una piastra di raffreddamento a liquido che funge contemporaneamente da interfaccia termica e da punto di messa a terra sul telaio; il case deve pertanto prevedere due passaggi per i tubi dell'acqua di raffreddamento del diametro di circa 10 mm [1].



Figura 2.2: Il sistema di azionamento AMK KW26-S5-FSE-4Q impiegato sulla Peacock 5

Il posizionamento degli inverter all'interno della scocca è condizionato da molteplici vincoli: la prossimità ai motori (per minimizzare la lunghezza dei cavi HV e le relative perdite resistive), la necessità di accesso per la manutenzione e le ispezioni tecniche in gara, e il rispetto dei requisiti di isolamento imposti dal regolamento FSE, che vietano la vicinanza di componenti HV a elementi conduttivi non isolati del telaio [5]. Il case che protegge l'inverter deve quindi integrarsi coerentemente nel layout della vettura, rispettando i vincoli di ingombro derivanti dalla posizione assegnata dal team all'interno della monoscocca.

2.3 Vincoli imposti dal regolamento Formula SAE Electric

Il regolamento Formula SAE Electric definisce, nelle sezioni EV.4–EV.9, un insieme di requisiti tecnici obbligatori per tutti i componenti del sistema di trazione ad alta tensione, inclusi gli inverter. Tali requisiti hanno carattere vincolante: una vettura che non soddisfa anche uno solo di essi non può essere ammessa alle prove dinamiche, indipendentemente dalle sue caratteristiche prestazionali.

Il requisito di isolamento (sezione EV.6 del regolamento) stabilisce che la resistenza di isolamento tra qualsiasi conduttore ad alta tensione e la struttura del telaio (chassis) non deve essere inferiore a $500\ \Omega$ per volt di tensione nominale del sistema, misurata a veicolo fermo con un megaohmetro omologato. Questo requisito impone l'utilizzo di materiali con elevate proprietà di isolamento elettrico per le pareti del case o, in alternativa, l'adozione di un doppio isolamento certificato tra i componenti HV interni e la struttura portante del case.

Sul versante meccanico, il regolamento richiede che il contenitore dei componenti ad alta tensione resista, senza cedimenti strutturali né deformazioni permanenti che

compromettano l'isolamento, a forze statiche equivalenti a un'accelerazione di 40g in direzione longitudinale/laterale e 20g in direzione verticale. Questo requisito deriva dall'analisi degli scenari di impatto tipici di una vettura Formula SAE e costituisce il carico di progetto di riferimento per le analisi FEA strutturali condotte nel Capitolo 5. Ulteriori prescrizioni riguardano la presenza di un Tractive System Master Switch (TSMS) accessibile dall'esterno del veicolo, la protezione contro i sovraccarichi tramite fusibili HV certificati e la segnalazione luminosa dello stato di attivazione del sistema di trazione .

Dal punto di vista termico, nessuna superficie esterna accessibile del veicolo può raggiungere temperature superiori a 60°C durante il normale funzionamento. Poiché i moduli di potenza dell'inverter AMK raggiungono temperature operative significative in condizioni di pieno carico, il case deve garantire un'adeguata gestione del calore.

Capitolo 3 — Requisiti progettuali del case

La definizione dei requisiti costituisce la fase preliminare e fondante di qualsiasi processo di progettazione strutturata. Per il case dell'inverter della Peacock 5, i requisiti derivano da tre fonti distinte: il regolamento Formula SAE Electric, che fissa limiti inderogabili di natura meccanica, termica ed elettrica; le specifiche tecniche dell'inverter AMK, che determinano i flussi termici da gestire e gli ingombri da rispettare; e le esigenze prestazionali del team, che impongono vincoli di peso, accessibilità e integrazione nel layout della vettura. Nei paragrafi seguenti ciascuna categoria di requisito viene analizzata in dettaglio, con l'obiettivo di tradurla in grandezze quantitative utilizzabili come input per le analisi del Capitolo 5.

3.1 Protezione meccanica

Il requisito di protezione meccanica più stringente è quello imposto dalla sezione EV.7 del regolamento Formula SAE Electric, che prescrive che il contenitore di qualsiasi componente ad alta tensione debba resistere, senza cedimenti strutturali né deformazioni permanenti, a un carico statico equivalente a un'accelerazione di 40g applicata in direzione laterale e longitudinale, e 20g in direzione verticale. Questo valore di riferimento deriva dall'analisi statistica degli scenari di impatto tipici delle competizioni Formula Student e rappresenta il carico di progetto dimensionante per le verifiche strutturali.

Oltre al requisito di resistenza statica, il case deve garantire un'adeguata resistenza alle sollecitazioni dinamiche derivanti dall'utilizzo in gara.

Per contenere la massa senza rinunciare alla rigidità necessaria, il progetto deve ottimizzare geometria e spessori delle pareti in funzione del materiale scelto, come descritto nel Capitolo 5.

Un ulteriore aspetto meccanico riguarda il sistema di fissaggio del case al telaio della vettura. I punti di attacco devono essere progettati in modo da trasferire i carichi alla struttura della monoscocca senza concentrazioni di tensione localizzate, garantendo al contempo la possibilità di rimozione rapida del case per le operazioni di manutenzione e ispezione tecnica in gara. Il regolamento richiede che i componenti HV siano accessibili ai commissari tecnici in tempi compatibili con le procedure di scrutineering.

3.2 Gestione termica

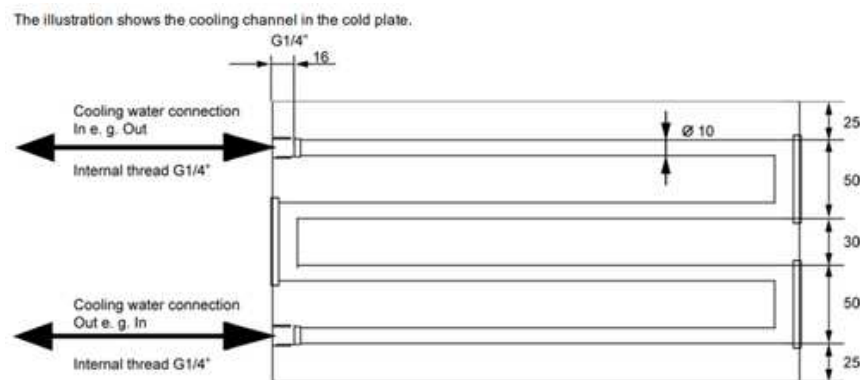


Figura 3.1: Canali di raffreddamento a liquido all'interno della piastra dell'inverter AMK

La gestione termica costituisce uno dei requisiti progettuali più critici per il case dell'inverter. Durante il funzionamento, i moduli di potenza dell'inverter AMK dissipano calore per effetto delle perdite di conduzione nei semiconduttori [7].

Il percorso di dissipazione del calore è gestito quasi interamente dal sistema di raffreddamento a liquido integrato nell'inverter AMK: il calore generato dai semiconduttori è trasferito per conduzione alla piastra interna dell'inverter, attraverso la quale scorre il fluido refrigerante del circuito della vettura. Tra la superficie esterna dell'inverter e le pareti del case è presente aria: il case non costituisce pertanto un elemento attivo del percorso di dissipazione termica, ma deve garantire che la temperatura superficiale esterna rimanga entro il limite di 60°C imposto dal regolamento FSE (sezione EV.9). Il datasheet dell'inverter AMK specifica la temperatura massima di giunzione ammissibile [1], che l'efficienza del raffreddamento a liquido deve garantire in ogni condizione di esercizio.

3.3 Vincoli di peso e ingombro

In una vettura da competizione, ogni grammo di massa aggiuntiva influisce negativamente sulle prestazioni dinamiche: accelerazione, frenata e manovrabilità migliorano al diminuire della massa complessiva e, in particolare, delle masse non sospese. Il case dell'inverter, pur essendo un componente ausiliario, contribuisce alla massa totale della vettura e deve quindi essere progettato adottando la filosofia di ottimizzazione strutturale tipica del motorsport: massima resistenza specifica (rapporto resistenza/peso), senza sovradimensionamenti non giustificati dall'analisi dei carichi [6][11].

Il vincolo di ingombro è imposto dal layout della monoscocca della P5: la posizione assegnata dal team agli inverter all'interno della scocca in fibra di carbonio definisce un volume di installazione con quote massime in lunghezza, larghezza e altezza che il case non può superare. Tali quote devono essere rispettate anche in fase di assemblaggio e smontaggio, tenendo conto degli spazi necessari per l'inserimento dei connettori HV, dei cavi di potenza e dei cavi di segnale CAN. Il rispetto contemporaneo dei vincoli di ingombro, peso, resistenza meccanica e gestione termica costituisce il problema di ottimizzazione affrontato nei capitoli successivi.

Capitolo 4 — Materiali

La scelta del materiale per il case dell'inverter è stata guidata da un processo iterativo che ha tenuto conto contemporaneamente dei requisiti meccanici, termici e di peso definiti nel Capitolo 3, della fattibilità produttiva in un contesto universitario con risorse limitate, e della necessità di realizzare un prototipo funzionale in tempi compatibili con il calendario della competizione. In questa fase sono stati analizzati due candidati principali: i compositi in fibra di carbonio, soluzione ideale per le prestazioni meccaniche specifiche ma più complessa da lavorare, e le leghe di alluminio, materiale più accessibile e lavorabile con le attrezzature disponibili nel laboratorio del team [6].

4.1 Materiali compositi in fibra di carbonio

I materiali compositi a matrice polimerica rinforzata con fibra di carbonio (Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP) sono ampiamente impiegati nelle strutture aerospaziali e motorsport per il loro eccezionale rapporto resistenza-peso e rigidità-peso. Le fibre di carbonio presentano un modulo elastico longitudinale compreso tra 230 GPa e 700 GPa e una resistenza a trazione che può superare i 3500 MPa, a fronte di una densità di circa 1750 kg/m³ — circa un terzo di quella dell'alluminio — conferendo ai laminati CFRP un rapporto resistenza specifica nettamente superiore a quello di qualsiasi lega metallica tradizionale [6][12].

Le proprietà meccaniche del laminato dipendono fortemente dall'orientazione delle fibre, dal numero e dalla sequenza degli strati (layup), e dalla qualità dell'impregnazione con la resina epossidica. In un laminato unidirezionale, le proprietà sono fortemente anisotrope: la resistenza è massima nella direzione delle fibre e molto ridotta in direzione trasversale. Per applicazioni strutturali come un contenitore sollecitato in più direzioni, si ricorre a laminati multidirezionali (quasi-isotropi) con sequenze tipiche del tipo $[0/\pm 45/90]_s$, che garantiscono proprietà più uniformi nel piano del pannello [12][13].

L'ipotesi progettuale iniziale del team prevedeva la realizzazione dell'intero case in fibra di carbonio. Per ridurre la complessità e i costi rispetto a uno stampo, si è optato per un approccio a pannelli: i singoli fogli di CFRP vengono tagliati a misura secondo le dimensioni di ciascuna faccia del case e successivamente incollati tra loro mediante piastrine angolate in composito, con adesivo strutturale epossidico bicomponente. Questa

tecnica permette di ottenere la geometria desiderata senza ricorrere a stampi complessi, pur mantenendo i vantaggi di leggerezza tipici del composito .

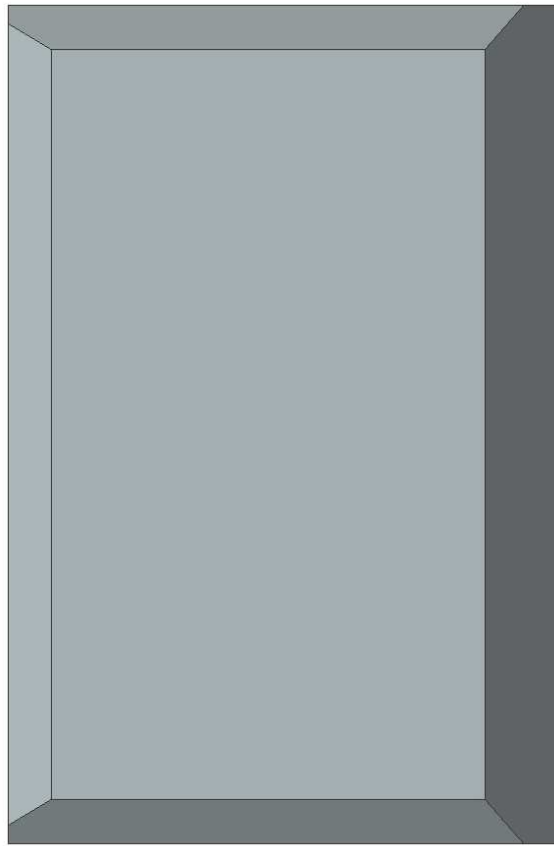


Figura 4.1: Schema della soluzione a pannelli in fibra di carbonio per il case — Vista superiore

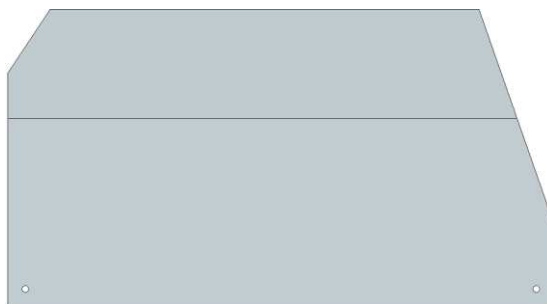


Figura 4.2: Schema dell'assemblaggio dei pannelli CFRP — Vista laterale

Dal punto di vista termico, la fibra di carbonio presenta una conducibilità termica nella direzione in-plane dell'ordine di 5–10 W/(m·K) per laminati standard in fibra T300/T700, e sensibilmente inferiore nella direzione trasversale (circa 1 W/(m·K)). Per applicazioni in cui è richiesta una conduzione termica elevata, si possono impiegare fibre ad alta conducibilità (pitch-based carbon fibre) con valori fino a 400 W/(m·K) in direzione assiale,

ma a costi nettamente superiori [12][7]. Sul fronte dell'isolamento elettrico, la matrice epossidica è intrinsecamente isolante (resistività $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$), ma le fibre di carbonio sono conduttive: la resistività del laminato dipende dall'orientazione degli strati e dalla continuità elettrica delle fibre, richiedendo una verifica specifica in funzione del requisito di isolamento FSE [13].

4.2 Leghe di alluminio

Le leghe di alluminio costituiscono il materiale strutturale più utilizzato nell'industria aeronautica e automobilistica dopo l'acciaio, grazie al favorevole compromesso tra densità (2700 kg/m^3), proprietà meccaniche, lavorabilità e costo [6]. Per applicazioni strutturali di precisione, le leghe più impiegate appartengono alle serie 6000 (Al-Mg-Si, ad esempio 6061-T6 e 6082-T6) e 7000 (Al-Zn-Mg-Cu, ad esempio 7075-T6). La lega 6082-T6 presenta un carico di snervamento di circa 250 MPa, una resistenza a trazione di circa 290 MPa e un modulo elastico di 70 GPa, con un'ottima saldabilità e resistenza alla corrosione [14]. La lega 7075-T6, pur avendo prestazioni meccaniche superiori (snervamento fino a 500 MPa), presenta una lavorabilità ridotta e una saldabilità più critica, rendendola meno adatta alla tecnica costruttiva a pannelli saldati adottata dal team.

L'alluminio presenta una conducibilità termica di circa $160\text{--}200 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ — un ordine di grandezza superiore a quella del CFRP standard — il che ne fa un materiale particolarmente adatto per applicazioni in cui il case deve fungere anche da elemento dissipatore del calore generato dall'inverter [7].

4.3 Confronto e scelta del materiale per il case

Il confronto tra i due materiali evidenzia un chiaro trade-off tra prestazioni meccaniche specifiche e praticabilità produttiva. Il CFRP offre una resistenza specifica (σ/ρ) superiore di un fattore 3–4 rispetto all'alluminio 6082, con conseguenti vantaggi in termini di peso del componente finito. Tuttavia, la lavorazione del CFRP richiede attrezzature dedicate (taglio a getto d'acqua o router CNC con utensili diamantati), procedure di incollaggio controllate e tempi di cura in autoclave o sottovuoto, che ne aumentano significativamente i costi e i tempi di produzione rispetto all'alluminio [6].

In considerazione di questi fattori, il team ha adottato una strategia a due fasi: nella prima fase è stato realizzato il prototipo funzionale in alluminio, utile per la validazione geometrica, le prove di montaggio e le verifiche FEA strutturali descritte nel Capitolo 5. I

risultati dell'analisi FEM mostrano che, sotto il carico di progetto (2940 N, corrispondenti a 15 kg soggetti a 20g verso il basso), alcune zone localizzate raggiungono livelli di sforzo prossimi al limite di snervamento della lega 6082 (circa 250 MPa), confermando che una versione in alluminio con spessori ottimizzati è strutturalmente ammissibile. Nella seconda fase, prevista per l'evoluzione successiva della vettura, il case sarà prodotto in CFRP con la tecnica a pannelli incollati, sfruttando l'esperienza acquisita con il prototipo metallico per definire con precisione le quote e gli spessori dei singoli pannelli prima di procedere con il composito.

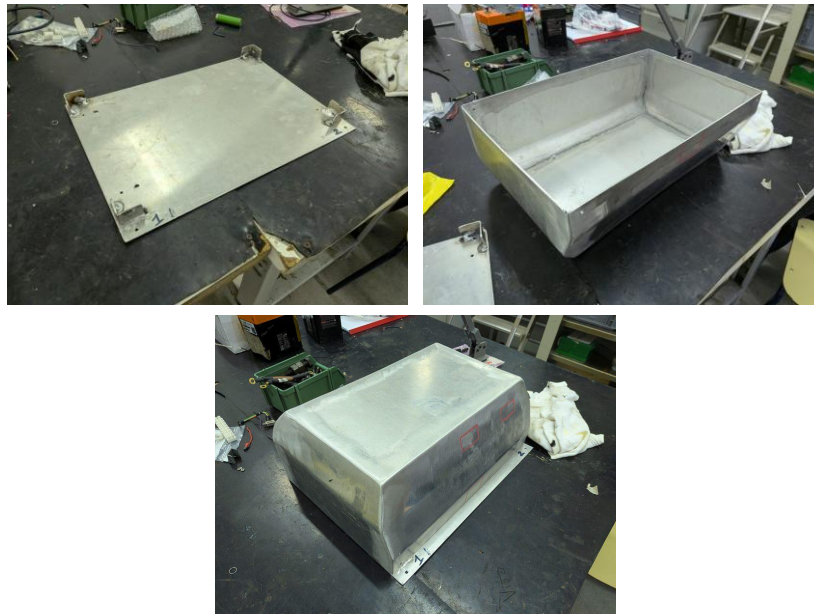


Figura 4.3: Case realizzato in alluminio

Capitolo 5 — Progettazione del case

Il presente capitolo descrive in dettaglio il processo di progettazione del contenitore (case) dell'inverter per la vettura Peacock 5 del Polimarche Racing Team. Il percorso progettuale ha seguito un approccio iterativo, partendo dall'analisi della situazione esistente e dei vincoli imposti dall'architettura della vettura, attraverso la modellazione geometrica CAD, le verifiche strutturali e termiche mediante simulazioni agli elementi finiti, fino alla definizione del processo di fabbricazione e del sistema di integrazione nel telaio.

5.1 Analisi delle soluzioni esistenti e stato dell'arte

Prima di avviare la fase creativa, è stata condotta un'analisi dello stato dell'arte relativo alle soluzioni adottate da altri team di Formula Student Electric per il contenimento e la protezione degli inverter ad alta tensione. La maggior parte dei team che partecipano a competizioni FSE adotta soluzioni personalizzate, non standardizzate, in quanto il posizionamento degli inverter è strettamente legato alla geometria del telaio specifico di ciascuna vettura [15]. Le soluzioni più diffuse si collocano in tre categorie: contenitori in lega di alluminio lavorata a CNC o ricavata da lamiera piegata e saldata; strutture ibride in alluminio e fibra di carbonio; contenitori realizzati interamente in pannelli di CFRP incollati. La scelta del materiale è generalmente influenzata dalle capacità manifatturiere del team e dalle priorità di leggerezza o di costo.

Nel caso della P5, la situazione di partenza era caratterizzata dall'assenza di qualsiasi struttura dedicata all'alloggiamento dell'inverter: la zona posteriore del telaio conteneva unicamente il pacco batterie e i condotti di raffreddamento. L'inverter AMK KW26-S5-FSE-4Q è fornito con una copertura metallica propria che ne protegge l'elettronica interna, ma tale copertura non è dimensionata per resistere ai carichi meccanici previsti dal regolamento FSE (40g). Era pertanto indispensabile progettare ex novo un contenitore esterno, in grado di svolgere funzioni di protezione meccanica, di isolamento elettrico e di gestione termica in modo integrato.

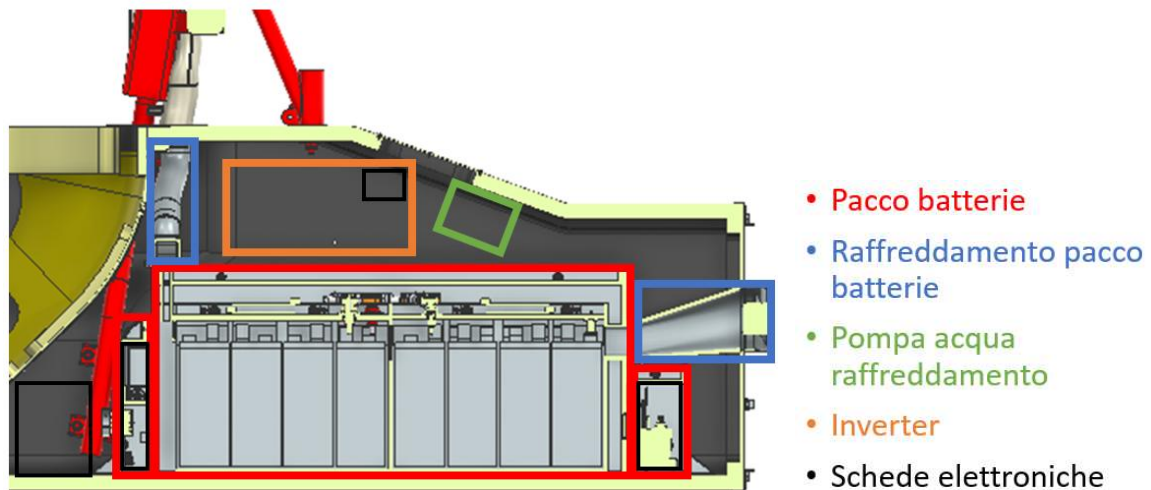
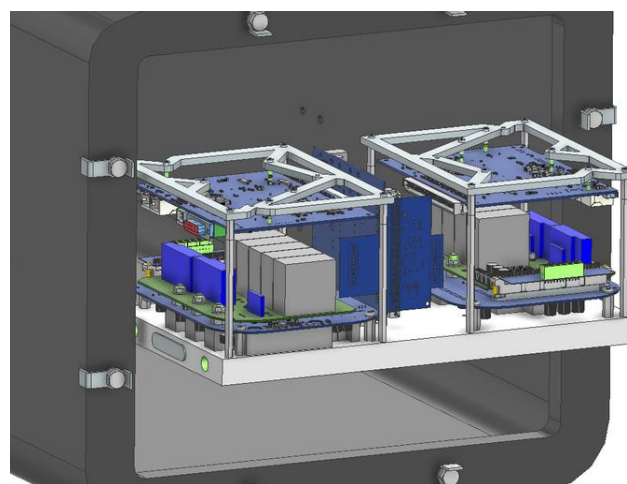


Figura 5.1: Zona posteriore del telaio della Peacock 5

5.2 Analisi accessibilità

La fase di modellazione CAD è stata preceduta da uno studio approfondito dei vincoli geometrici imposti dall'architettura della vettura. L'analisi degli spazi disponibili ha identificato due vincoli particolarmente restrittivi: la presenza del pacco batterie con i suoi condotti di raffreddamento e la geometria del telaio nella zona posteriore, che limitano significativamente lo spazio disponibile per il case dell'inverter. Il modello CAD completo è stato sviluppato tramite il software NX, integrando i modelli del telaio, del pacco batterie e degli altri componenti presenti nella zona posteriore.

Uno degli aspetti più critici emersi nella fase preliminare è stato lo studio della manutenibilità. La verifica ha evidenziato che l'inverter, anche nella sua configurazione senza protezione esterna, sarebbe potuto entrare nella zona prevista a malapena, rendendo qualsiasi operazione di smontaggio e rimontaggio estremamente difficoltosa nelle condizioni tipiche di un evento di gara.



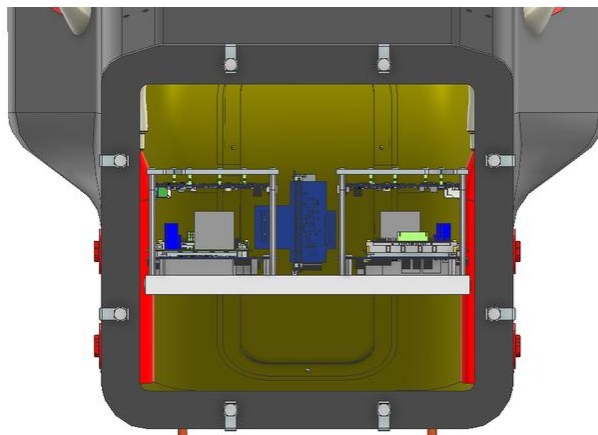


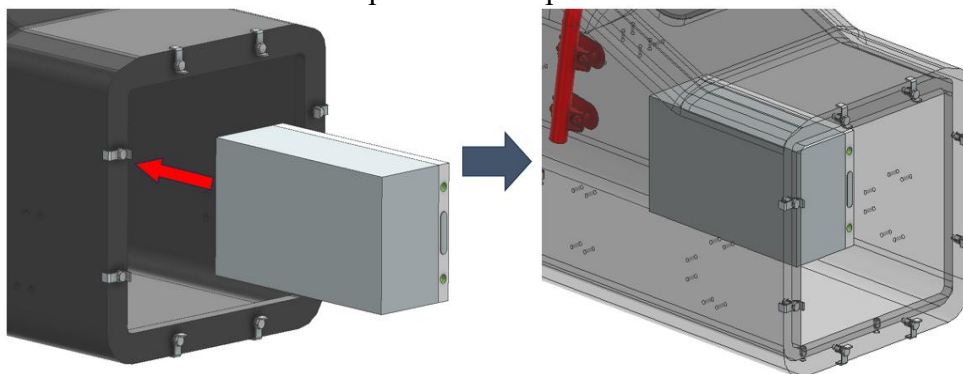
Figura 5.2 e 5.3: Analisi ingombri dell'inverter nel telaio

Per tale motivo, si è resa necessaria la progettazione di una soluzione che agevolasse l'installazione dell'inverter e del relativo involucro, garantendone al contempo una rapida estrazione durante le fasi di gara in caso di necessità.

Per fare ciò sono stati studiati degli step di montaggio, come mostrato in seguito.

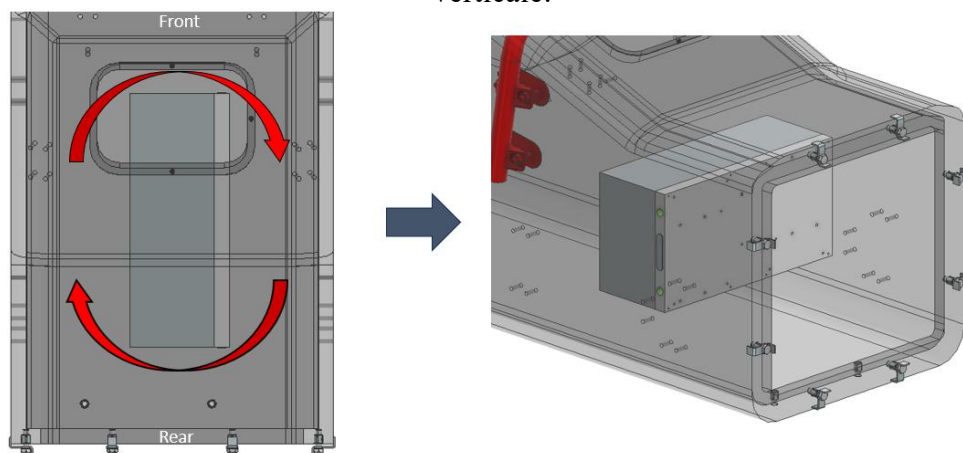
Step 1

L'inverter viene inserito dall'apertura posteriore del telaio con orientamento orizzontale, ruotato di 90° rispetto alla sua posizione di esercizio.



Step 2

Una volta all'interno del telaio, l'inverter viene ruotato di 90° attorno al proprio asse verticale.



Step 3

L'inverter viene poi ruotato nuovamente di 90° attorno al suo asse orizzontale e posizionato nella sede definitiva all'interno del vano posteriore.

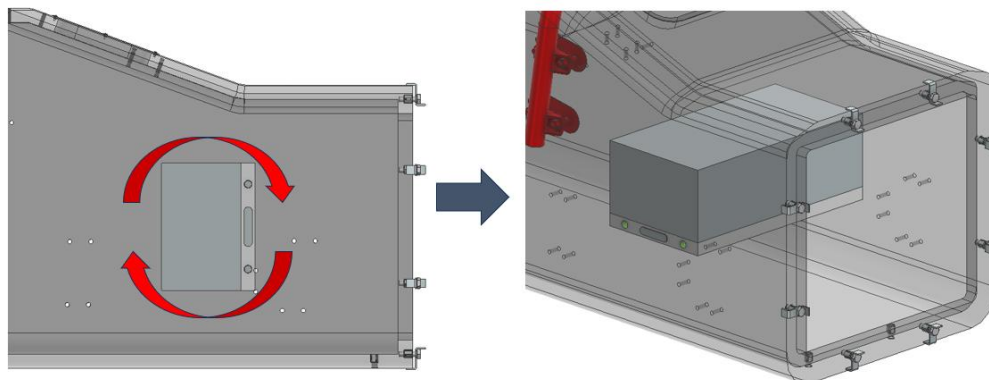


Figura 5.4, 5.5, 5.6: Step posizionamento dell'inverter all'interno del telaio

5.3 Modellazione CAD

Definite le modalità di inserimento dell'inverter attraverso l'apertura del telaio, si è proceduto alla modellazione CAD del case, progettandolo in modo tale da evitare qualsiasi interferenza con le strutture circostanti durante l'intera fase di montaggio.

Il modello CAD definitivo è diviso in due componenti: un coperchio superiore rimovibile e una base solidale alla piastra di raffreddamento.

Per il fissaggio al telaio sono state pensate 2 soluzioni, entrambe basate sull'uso di staffe ad L laterali fissate al telaio che vanno a sostenere la base inferiore.

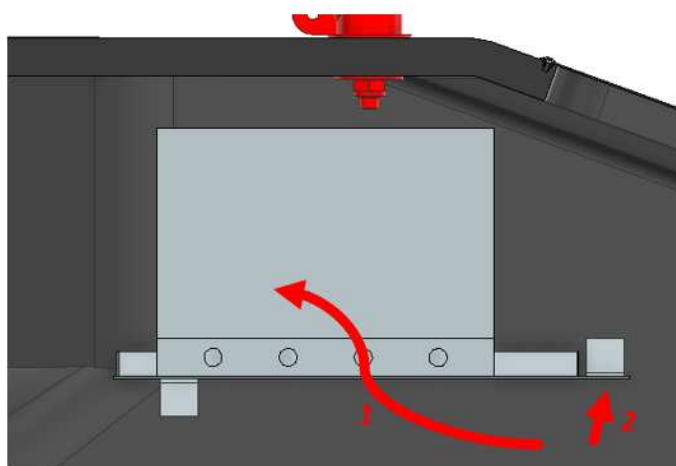


Figura 5.7: Prima soluzione per inserimento del case

La prima soluzione consisteva nell'inserimento del case dal basso, procedendo poi al fissaggio inferiore sulle due staffe ad L posteriori.

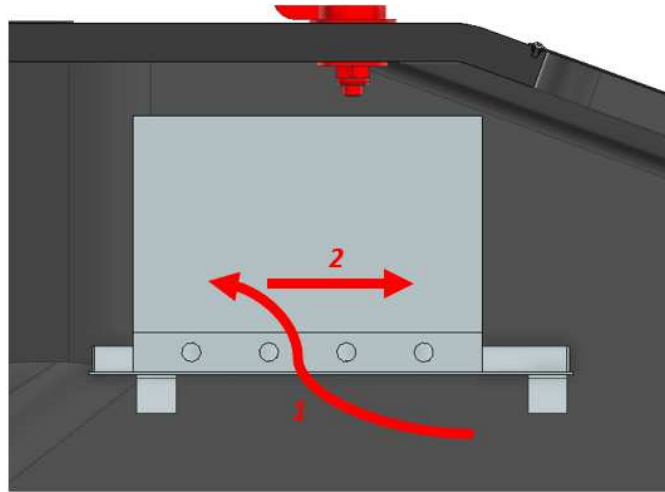


Figura 5.8: Seconda soluzione per inserimento del case

La seconda alternativa, pur mantenendo l'inserimento dal basso, prevedeva di oltrepassare i supporti posteriori per poi far traslare il case nella posizione definitiva, consentendone così il serraggio dall'alto.

Quest'ultima configurazione è risultata la più vantaggiosa: sebbene richiedesse un maggiore spazio libero anteriore per consentire lo scorrimento dell'involucro, essa garantiva una notevole semplificazione nelle operazioni di assemblaggio. Infatti, una volta raggiunta la posizione corretta, le quattro staffe ad L erano in grado di sorreggere autonomamente il peso dell'inverter.

Una volta definita la procedura di inserimento si è passati alla realizzazione del disegno tramite CAD del coperchio superiore. Il coperchio è stato disegnato tenendo in considerazione tutti gli aspetti visti precedentemente, come l'inserimento all'interno del telaio e le varie rotazioni che doveva compiere.

Una volta disegnato questo è stato il risultato:

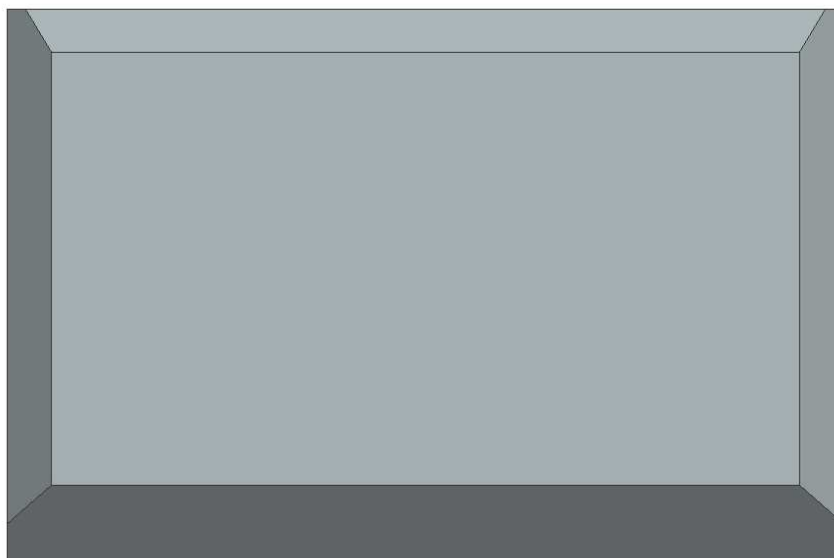


Figura 5.9: Vista superiore

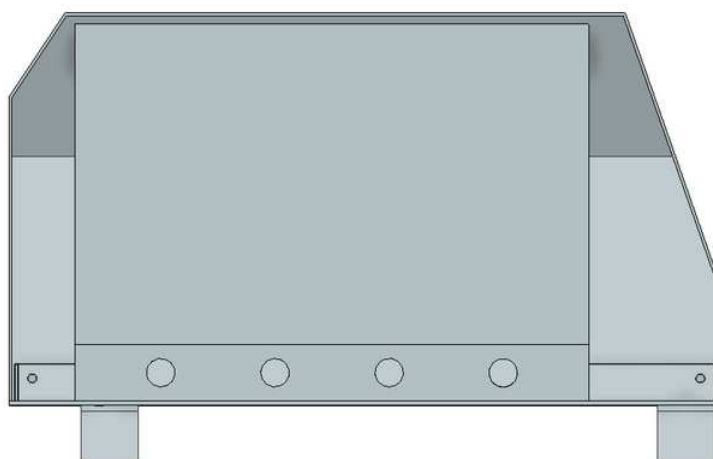


Figura 5.10: Vista laterale

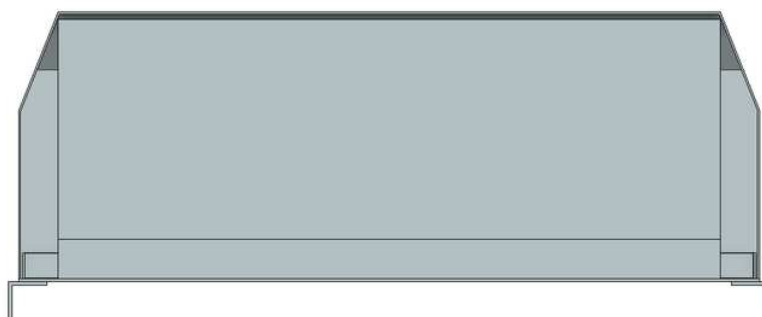


Figura 5.11: Vista frontale

Gli angoli superiori smussati permettevano tutte le rotazioni necessarie senza andare ad interferire con il telaio, ma lasciando tutto lo spazio laterale interno fondamentale per il passaggio dei cavi ed il passaggio dei tubi dell'acqua provenienti dalla piastra di raffreddamento. Ciò non sarebbe stato possibile avendo avuto pareti completamente verticali.

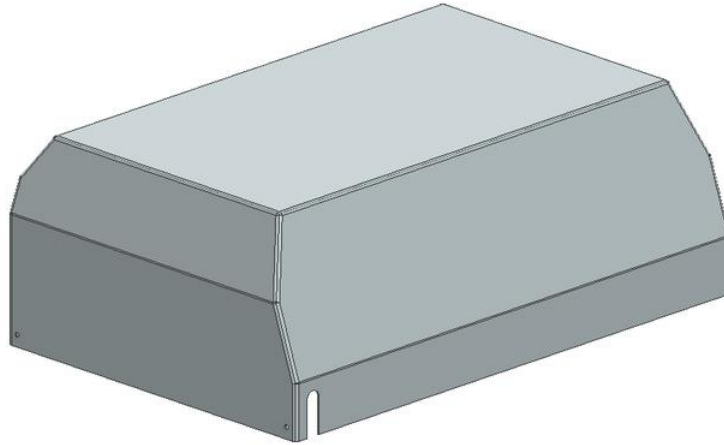


Figura 5.12: Coperchio superiore con fori per passaggi tubi dell'acqua

Questo design permetteva anche una relativa facilità di realizzazione dal momento che la superficie poteva essere divisa in pannelli distinti che poi sarebbero stati saldati insieme (nel caso di parte in alluminio) o incollati (in caso di carbonio).

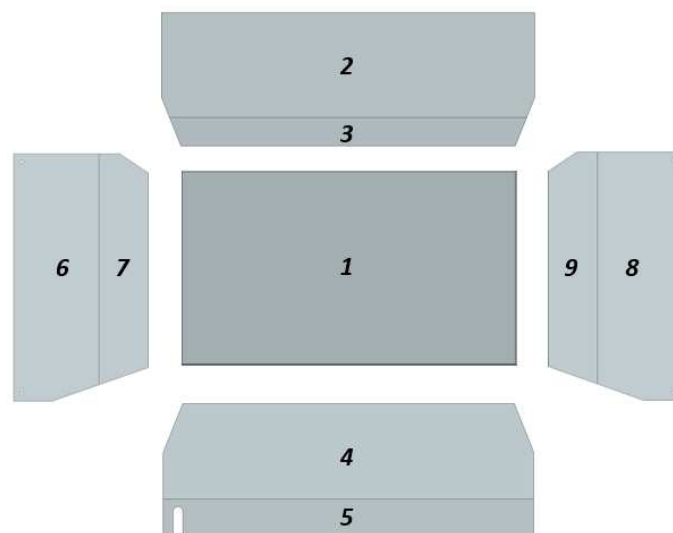


Figura 5.13: Coperchio superiore diviso nei vari pannelli

5.4 Analisi strutturale agli elementi finiti (FEA)

L'analisi strutturale è stata condotta mediante simulazione FEA (Finite Element Analysis) con l'obiettivo di verificare che il case in alluminio 6082 soddisfacesse il requisito regolamentare di resistenza a 40g in direzione laterale/longitudinale e 20g in direzione

verticale, previsto dalla sezione EV.7 del regolamento Formula SAE Electric. Il modello agli elementi finiti è stato sviluppato tramite il software NX, assegnando ai pannelli le proprietà meccaniche della lega di alluminio 6082 e alle staffe ad L le proprietà meccaniche della lega di alluminio 6060.

Sono state eseguite simulazioni nelle due direzioni di applicazione del carico. Poiché il caso peggiore si è verificato nella condizione di carico verticale di 20g, l'analisi si concentrerà su quest'ultima.

Per la mesh sono stati adottati due tipi di elementi differenti: per la base e le L-bracket è stata utilizzata una mesh CTETRA(4) con dimensione caratteristica di 1 mm, mentre per la piastra di raffreddamento è stata scelta una mesh CHEXA(8) di 8 mm, ottenendo un buon compromesso tra accuratezza e tempo di calcolo.

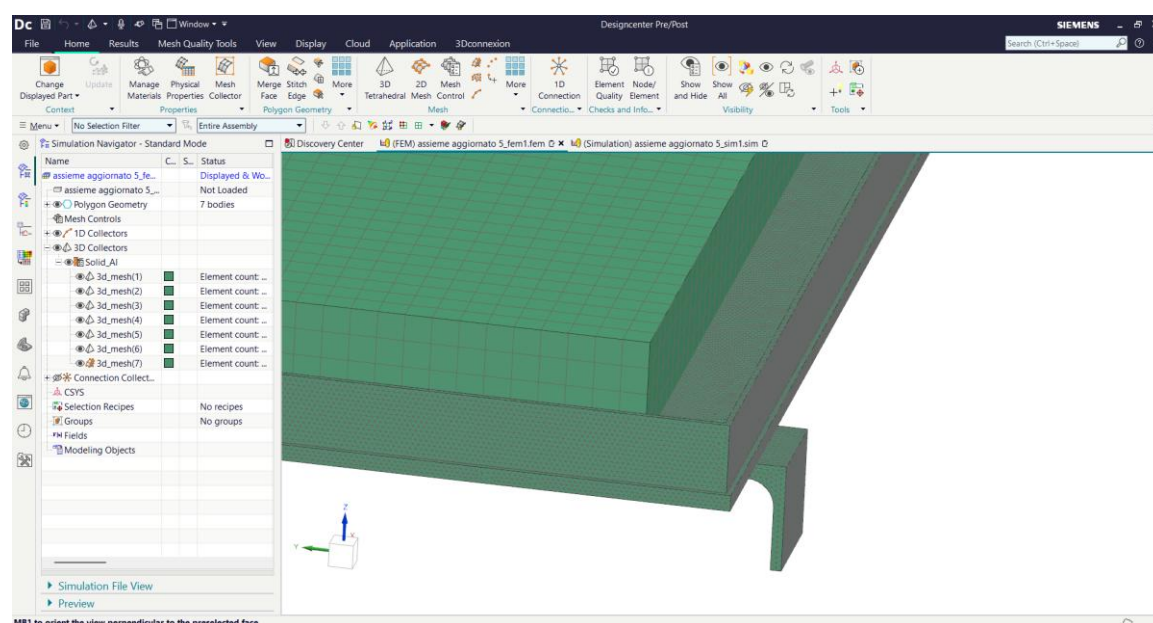


Figura 5.14: Definizione mesh in NX

Per la definizione dei contatti tra i componenti, è stato utilizzato il tipo *Face Contact* tra la base e le L-bracket, e *Face Gluing* tra la base, la piastra di raffreddamento e il bordo laterale.

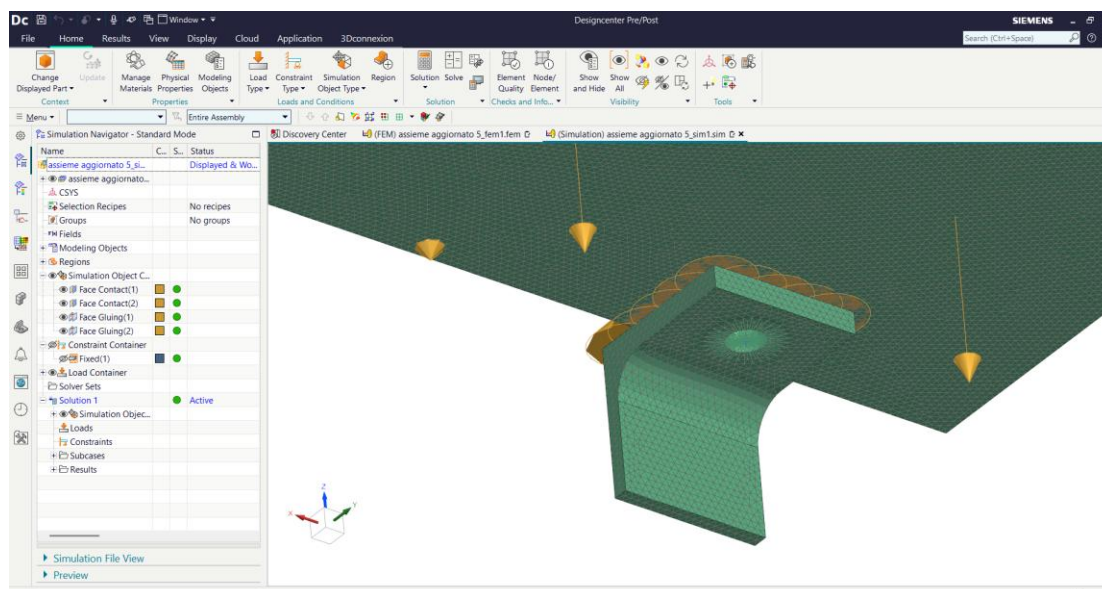


Figura 5.15: Definizione contatti in NX

Nel modello FEA le L-bracket sono state vincolate tramite un fixed constraint applicato alle facce laterali, che nella configurazione reale vengono fissate alla monoscocca tramite rivetti.

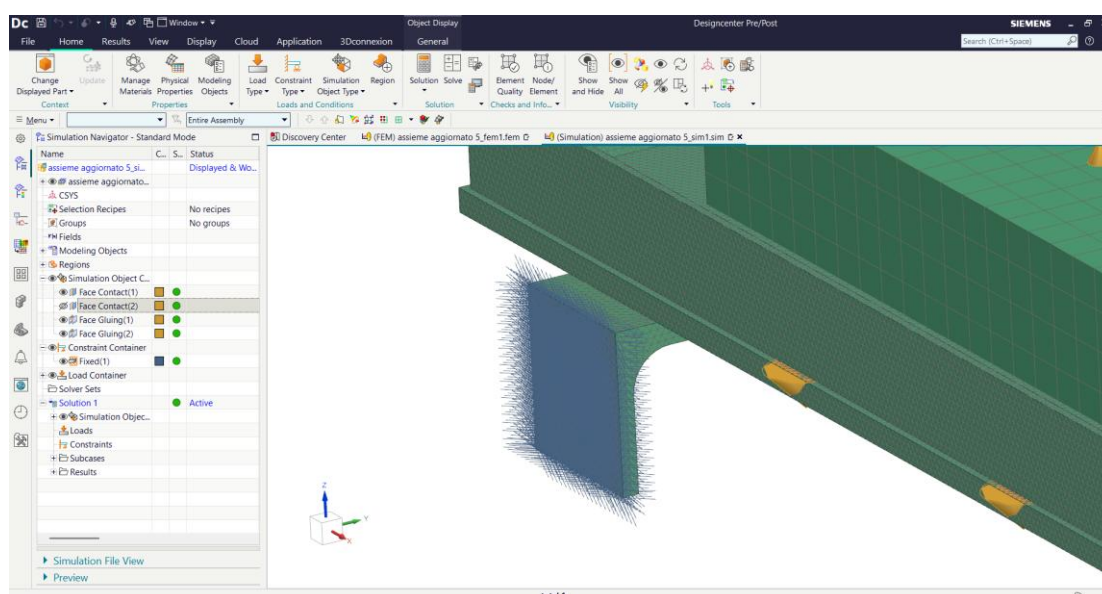


Figura 5.16: Definizione vincoli in NX

Il carico di progetto è stato definito applicando l'accelerazione di 20g a una massa di 15 kg, valore che include il peso proprio dell'inverter AMK (circa 8 kg) più un margine conservativo per tenere conto dei carichi associati ai cavi e ai connettori.

La forza di 2940 N ($20 \times 15 \times 9,8$) è stata distribuita uniformemente su tutta l'area della piastra di raffreddamento.

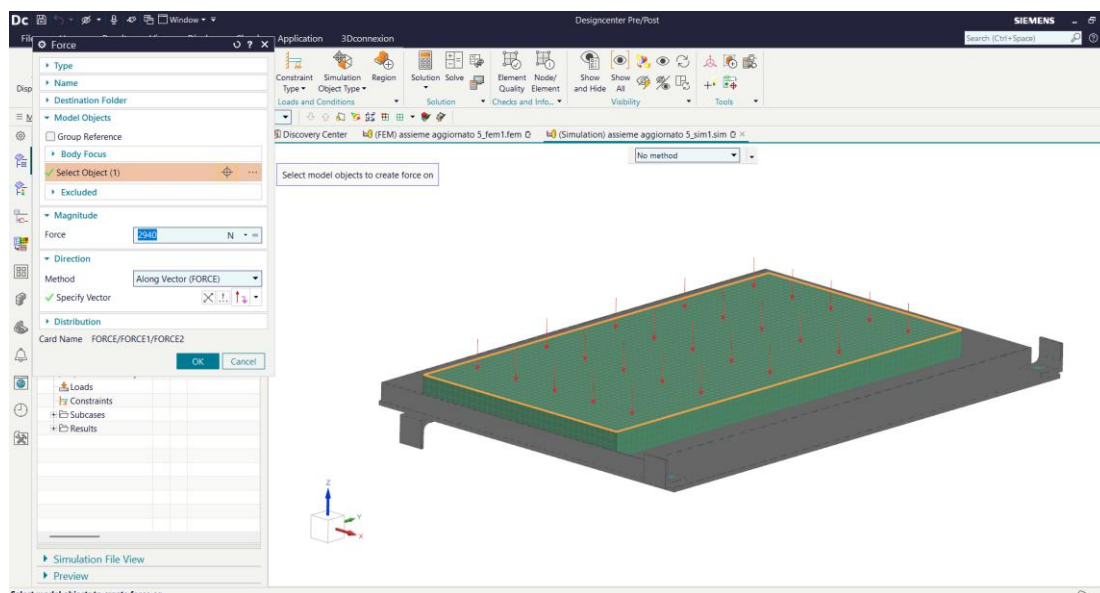


Figura 5.17: Definizione carichi in NX

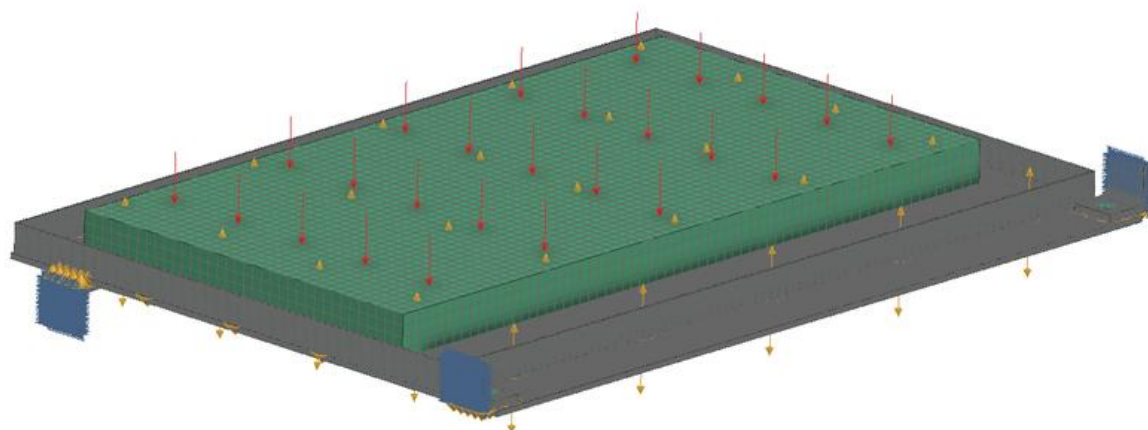


Figura 5.18: File di simulazione completo di contatti, carichi e vincoli

La condizione peggiore, come anticipato in precedenza, si è rivelata quella con il carico in direzione verticale in quanto le tensioni sugli spigoli delle staffe ad L superavano i 400 MPa, decisamente oltre il limite di snervamento per un alluminio 6082.

Per ridurre le tensioni di snervamento si sono inspessite le staffe ad L e creato un raccordo che ha contribuito moltissimo a ridurre le tensioni concentrate.

Solution 1 Result : assieme aggiornato 6_sim1
Subcase - Statics 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 262.07, Units = MPa
CSYS : Absolute Rectangular

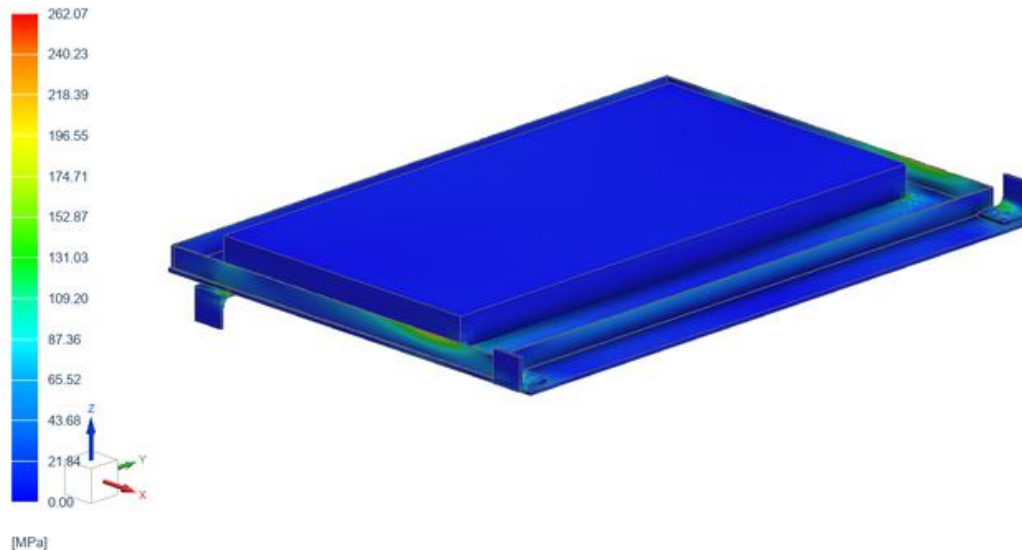


Figura 5.19: Distribuzione delle tensioni di Von Mises

Ripetendo la simulazione aggiornata, i risultati mostrano che le tensioni massime, ad un'accelerazione di 20g, raggiungono come picco i 260 MPa, valore limite per l'alluminio 6082.

Nonostante la severità di tale condizione limite, occorre sottolineare che è stato assunto un valore di massa ampiamente conservativo rispetto a quello nominale. Inoltre, un'accelerazione verticale pari a 20 g rappresenta un evento estremo, il cui verificarsi in gara risulta altamente improbabile.

Di conseguenza, il risultato conseguito è stato ritenuto idoneo ai fini della progettazione.

La deformazione massima rilevata dalla simulazione è dell'ordine di pochi decimi di millimetro, un valore che non compromette né la funzionalità dei connettori né l'isolamento elettrico dei componenti interni.

5.5 Definizione del processo di fabbricazione

Coerentemente con quanto anticipato nel Capitolo 4, il processo di fabbricazione del case è stato definito in due varianti: il prototipo in lega di alluminio 6082, realizzato per la campagna di prove di assemblaggio e verifica del routing dei cavi, e la versione successiva in pannelli di CFRP, prevista per la configurazione competitiva della vettura.

Per il prototipo in alluminio, il processo si articola nelle seguenti fasi. I singoli pannelli vengono sagomati tramite un taglialamiera a partire da lamiera 6082 di spessore 3 mm; le aperture per i connettori e i passacavi sono tagliati in una fase successiva. I pannelli vengono uniti mediante saldatura TIG seguendo il disegno del modello CAD. Il prototipo in alluminio è stato utilizzato per verificare l'assemblabilità del case in condizioni reali e per validare il percorso dei cavi HV e segnale prima di impegnare risorse nella realizzazione della versione in CFRP.

Per la versione in fibra di carbonio, i pannelli vengono ricavati tagliando a misura lastre di CFRP per poi essere incollati tramite adesivo epossidico bicomponente. Le aperture per i tubi del circuito di raffreddamento a liquido (diametro 10 mm) vengono realizzate per foratura dopo l'incollaggio, con bordi rifiniti da guarnizioni in gomma per prevenire l'infiltrazione di acqua all'interno del case.

La sequenza di assemblaggio definitiva prevede di fissare prima la base alla piastra di raffreddamento e poi inserire il coperchio avvitandolo alla base. Questo ordine di montaggio, determinato dallo studio di manutenibilità descritto nella sezione 5.2, è stato validato sperimentalmente sul prototipo in alluminio, confermando che l'operazione di installazione e rimozione dell'inverter può essere completata in meno di 15 minuti con utensili standard, rispettando i tempi tipici delle pause in pit durante un evento FSE.

5.6 Integrazione nel telaio e sistema di fissaggio

Il sistema di fissaggio del case al telaio della Peacock 5 ha richiesto uno sviluppo iterativo in due versioni successive, motivato dalla necessità di trovare un ancoraggio affidabile alla monoscocca in fibra di carbonio capace di soddisfare il requisito di resistenza a 40g imposto dalla sezione EV.7 del regolamento FSE , garantendo al contempo la smontabilità del case per le operazioni di manutenzione e ispezione tecnica.

La prima soluzione studiata prevedeva il fissaggio delle L-bracket alla monoscocca in fibra di carbonio mediante colla strutturale bicomponente epossidica. Il dimensionamento ha riguardato il calcolo dell'area minima di incollaggio necessaria per resistere al carico equivalente a 40g: nota la resistenza a taglio dell'adesivo e la forza totale agente sul sistema, l'area di incollaggio minima per ciascun bracket è stata ricavata dal rapporto tra la forza e la resistenza a taglio dell'adesivo, con un opportuno coefficiente di sicurezza [17]. Questa soluzione presentava il vantaggio di non richiedere forature nella monoscocca, ma è stata

scartata per la difficoltà di garantire in ambiente di officina la pulizia superficiale e la pressione di incollaggio uniforme necessarie a raggiungere le proprietà adesive di calcolo.

La soluzione definitivamente adottata prevede invece il fissaggio delle L-bracket alla monoscocca tramite inserti filettati. Gli inserti vengono inseriti attraverso la parete in fibra di carbonio della monoscocca in corrispondenza di zone non strutturalmente critiche. Una volta inseriti e bloccati gli inserti al telaio, le staffe ad L vengono fissate tramite viti, rendendo il sistema di ancoraggio smontabile lasciando le pareti del telaio libere. Questa soluzione garantisce una connessione meccanicamente affidabile, ripetibile e ispezionabile, e consente di rimuovere il case completo senza dover intervenire sulla monoscocca.

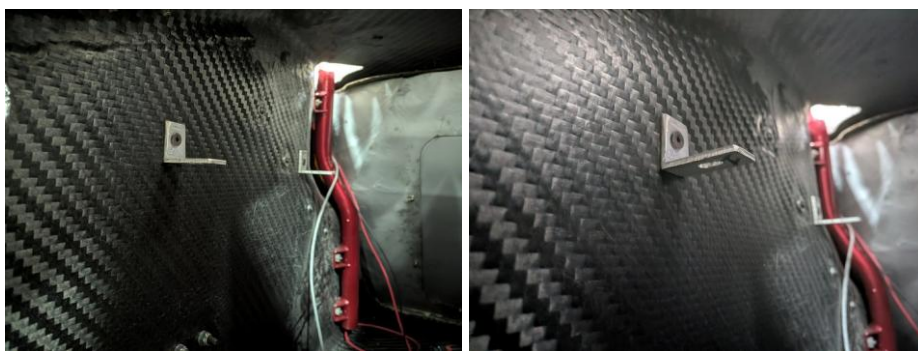


Figura 5.20: L-bracket realizzate in alluminio

Le L-bracket sono state realizzate in lega di alluminio 6060 tagliate da un profilato angolare, e poi forate per permettere il fissaggio sui due lati.

Un elemento caratteristico del sistema di fissaggio della Peacock 5 è la connessione diretta tra la base del case e la piastra di raffreddamento dell'inverter AMK. Poiché la piastra di raffreddamento è collegata alla massa del telaio (chassis ground) — eliminando la necessità di un isolamento galvanico tra l'inverter e la struttura della vettura — la base del case può essere avvitata direttamente alla piastra di raffreddamento, ottenendo un collegamento meccanico e termico diretto tra il case e l'inverter [1]. Questa soluzione semplifica il montaggio e assicura che il case sia sempre correttamente posizionato rispetto all'inverter, indipendentemente dalle tolleranze di posizionamento della monoscocca.

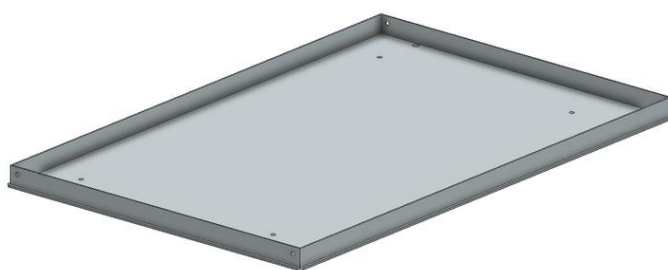


Figura 5.21: Base del case con fori di fissaggio

Capitolo 6 — Risultati della validazione e confronto con i requisiti

Il presente capitolo discute i principali risultati emersi nel corso del processo di progettazione e validazione del case dell'inverter per la Peacock 5, confrontandoli con i requisiti progettuali definiti nel Capitolo 3. Per ciascuna area vengono indicate le verifiche già eseguite e quelle che richiedono approfondimenti nelle fasi successive del progetto.

6.1 Verifica strutturale

L'analisi strutturale agli elementi finiti (FEA) è stata condotta sulla versione in alluminio 6082 del case, applicando un carico di 2940 N (corrispondente a $15 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 20$) ai punti di attacco al telaio. I risultati mostrano che le tensioni equivalenti di Von Mises rimangono al di sotto del limite di snervamento del materiale ($\sigma = 250\text{-}300 \text{ MPa}$) su tutta la struttura (tranne alcuni punti trascurabili), con valori massimi di circa 200 MPa concentrati nei raccordi delle L. La deformazione massima, dell'ordine di pochi decimi di millimetro, non compromette l'integrità dei connettori né il corretto accoppiamento della cover superiore.

Per la versione definitiva in CFRP la verifica strutturale dovrà essere ripetuta con le proprietà ortotrope del laminato scelto. La maggiore rigidità specifica del composito lascia prevedere margini di sicurezza superiori rispetto all'alluminio per i carichi nel piano dei pannelli.

6.2 Gestione termica

La gestione del calore generato dall'inverter AMK è affidata interamente al sistema di raffreddamento a liquido integrato nell'unità stessa. Il fluido refrigerante entra ed esce dall'inverter attraverso due tubi del diametro di circa 10 mm, i quali attraversano le pareti del case mediante apposite aperture dotate di guarnizioni in gomma siliconica che garantiscono la tenuta. Non è stato pertanto necessario progettare un percorso termico attraverso le pareti del case: il calore è smaltito direttamente dal circuito a liquido prima di raggiungere le pareti del contenitore. La verifica sperimentale delle temperature superficiali durante il funzionamento in pista costituisce uno sviluppo da completare nella fase successiva del progetto [1].

6.3 Isolamento elettrico

Un aspetto che distingue il case dell'inverter della Peacock 5 da molte soluzioni analoghe presenti in letteratura riguarda il requisito di isolamento elettrico. Il regolamento Formula SAE Electric (sezione EV.6) impone che la resistenza di isolamento tra qualsiasi conduttore ad alta tensione del Tractive System e il telaio del veicolo non sia inferiore a $500\ \Omega$ per volt di tensione nominale del sistema. Tuttavia, tale requisito si applica all'isolamento interno dei componenti HV, non alla struttura esterna del contenitore.

Nel caso dell'inverter AMK KW26-S5-FSE-4Q, la piastra di raffreddamento è progettata dal costruttore per essere collegata alla massa del telaio (chassis ground): essa costituisce il riferimento di potenziale di terra del sistema di trazione [1]. Poiché la base del case è avvitata direttamente alla piastra di raffreddamento, il case si trova anch'esso a potenziale di massa del telaio. In questa configurazione il case non è un componente che deve isolare i circuiti HV dall'esterno: tale isolamento è garantito internamente dall'AMK, tra i moduli di potenza e la piastra esterna. Il case, essendo parte della massa del telaio, è espressamente escluso dall'obbligo di isolamento previsto dalla sezione EV.6 del regolamento, che si riferisce ai conduttori e ai componenti HV non connessi a chassis ground. Questo consente l'impiego di materiali conduttivi come l'alluminio per il prototipo, senza alcun trattamento isolante aggiuntivo.

6.4 Validazione del prototipo in alluminio

Il prototipo in alluminio 6082 ha svolto un ruolo centrale nella validazione sperimentale del design, consentendo di verificare in condizioni reali la correttezza del modello CAD, la fattibilità della sequenza di assemblaggio e il routing dei cavi ad alta tensione e segnale. La realizzazione del prototipo ha coinvolto le operazioni di taglio dei pannelli, piegatura, saldatura TIG e foratura delle aperture per i connettori, con risultati sostanzialmente conformi al modello CAD.

Le prove di assemblaggio condotte sul prototipo hanno confermato che la sequenza di montaggio — identificata durante lo studio di manutenibilità descritto nel Capitolo 5 — consente di installare e rimuovere l'inverter AMK in maniera relativamente semplice per la posizione in cui si trova (richiede comunque di rimuovere precedentemente il pacco batterie). Il tempo necessario per la completa rimozione dell'inverter installato a bordo è

relativamente veloce (all'incirca 2-3min), in linea con l'obiettivo progettuale stabilito nei requisiti del Capitolo 3 .

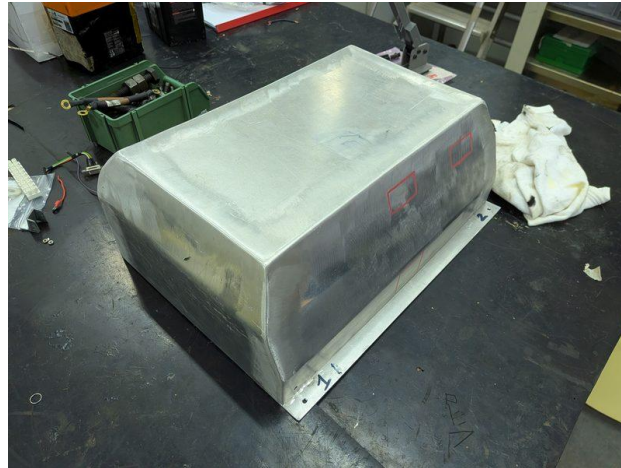


Figura 6.1: Case realizzato in alluminio

Le prove di assemblaggio hanno evidenziato alcune aree di miglioramento rispetto al modello CAD iniziale, in particolare riguardo allo spazio disponibile per il fissaggio dei connettori (in particolare quello proveniente dal pacco batteria) che può essere aumentato per facilitarne il fissaggio ed il collegamento una volta in macchina. Questa iterazione dimostra l'efficacia del prototipo in alluminio come strumento di validazione a basso costo, che ha permesso di identificare e correggere imprecisioni progettuali prima di impegnare risorse nella produzione della versione definitiva in CFRP.

6.5 Sviluppi futuri

I principali sviluppi successivi al lavoro presentato in questa tesi riguardano la produzione del case definitivo in CFRP a partire dal modello CAD aggiornato, la ripetizione della simulazione FEA strutturale con le proprietà ortotrope del laminato scelto per verificare la conformità al requisito di 40g e 20g, e la validazione sperimentale delle temperature superficiali durante le prove dinamiche della vettura.

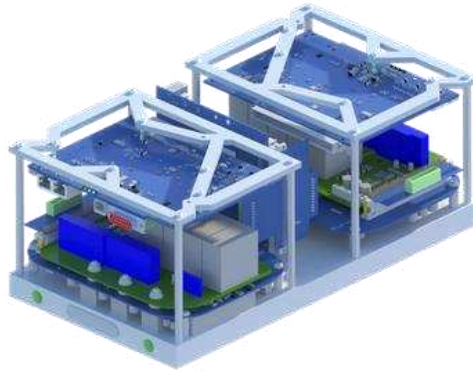


Figura 6.2: L'inverter AMK KW26-S5-FSE-4Q

Il passo immediatamente successivo consiste nella produzione della versione definitiva in CFRP, a partire dal modello CAD aggiornato a seguito delle osservazioni emerse durante la campagna di prove con il prototipo in alluminio.

Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi si è concentrato sulla progettazione del case per l'inverter della vettura Peacock 5 del Polimarche Racing Team. Inizialmente, all'interno della monoscocca in fibra di carbonio, non era previsto alcun sistema di contenimento.

Il progetto ha richiesto l'integrazione di diverse competenze: dalla verifica dei vincoli di spazio imposti dal layout della vettura, alla modellazione CAD, fino alle simulazioni strutturali mediante l'analisi agli elementi finiti (FEA). È stato inoltre necessario definire il processo di produzione e l'integrazione del componente nel telaio. La realizzazione iniziale di un primo prototipo in alluminio 6082 si è rivelata particolarmente utile, poiché ha permesso di evidenziare alcune criticità relative allo spazio disponibile e alla sequenza di montaggio.

I risultati della simulazione FEA sulla parte in alluminio hanno mostrato un margine di sicurezza (non troppo elevato) anche in condizioni critiche per l'incolumità del pilota e della vettura, con deformazioni minime. I test sul prototipo hanno confermato l'efficacia della sequenza di realizzazione e di montaggio, dimostrando che l'inverter può essere installato o rimosso in meno di 15 minuti utilizzando attrezzi standard.

Sono state sviluppate due versioni per il fissaggio al telaio, optando infine per staffe in alluminio angolate con asole regolabili. Questa soluzione permette di gestire le tipiche variazioni dimensionali del telaio e gli errori di posizionamento, inevitabili lavorando in zone strette come l'interno di un telaio. Il collegamento diretto tra la base del case e la piastra di raffreddamento dell'inverter ha semplificato ulteriormente il sistema, in virtù del cablaggio del modello AMK in cui la piastra è collegata alla massa del telaio.

La maggior parte dei requisiti originali è stata soddisfatta con la prima versione.

Per passare ad una futura versione in CFRP rimangono da completare alcuni passaggi, come la simulazione FEA e la modifica del CAD di eventuali variazioni di forma.

Questo approccio metodico – basato sulla verifica dei vincoli, la modellazione tramite CAD, l'analisi tramite software prima e test fisici poi – si dimostra efficace per i team studenteschi che si trovano ad affrontare specifiche stringenti con risorse limitate.

Le soluzioni adottate su questo componente fungeranno da base sia per quanto riguarda un futuro case in CFRP, sia per il case di un possibile nuovo inverter, in quanto i passaggi da

seguire per la realizzazione di ogni nuovo componente sono esattamente quelli mostrati in questa tesi.

Riferimenti bibliografici

- [1] AMK Arnold Müller GmbH & Co. KG, Motorsport Drive System for Formula Student — DD5 Series, documentazione tecnica prodotto, 2023.
- [2] Polimarche Racing Team, AmkCANControls repository, github.com/PolimarcheRacingTeam/AmkCANControls, 2024.
- [3] Lenzo B., De Filippis G., Hartavi A.E., Baronti F., Smet R., "Analysis of yaw rate performances of a four-wheel-drive fully electric vehicle with torque-vectoring", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, n. 3, pp. 1286-1296, 2017.
- [4] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3a ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [5] Holmes D.G., Lipo T.A., Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice, IEEE Press / Wiley-Interscience, 2003.
- [6] Ashby M.F., Materials Selection in Mechanical Design, 5a ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, 2017.
- [7] Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7a ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [8] Simons R.E., "Estimating the junction temperature of a transistor", Electronics Cooling, vol. 10, n. 2, 2004.
- [9] Paul C.R., Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2a ed., John Wiley & Sons, 2006.
- [10] IEC 61000-5-7:2001, Electromagnetic Compatibility (EMC) — Installation and mitigation guidelines — Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances, 2001.
- [11] Happian-Smith J. (ed.), An Introduction to Modern Vehicle Design, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001.
- [12] Daniel I.M., Ishai O., Engineering Mechanics of Composite Materials, 2a ed., Oxford University Press, 2006.
- [13] Gay D., Composite Materials: Design and Applications, 3a ed., CRC Press, 2014.
- [14] ASM International, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Metals Handbook, 10a ed., vol. 2, 1990.
- [15] Grimm D., Sehrt M., Zuletz T., "Design and manufacturing of a lightweight inverter housing for a Formula Student electric vehicle", Formula Student Germany Technical Report, FSG Event, 2022.
- [16] Electrical Racing Graz, Technical Report Formula Student Electric — Inverter packaging and thermal management, TU Graz, 2023.
- [17] Messler R.W., Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology, Elsevier, 2004.

