

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI
MATERIALI

Tesi di Laurea Magistrale

**PROGETTO E SVILUPPO DI UN CONTENITORE
BATTERIE PER UNA VETTURA ELETTRICA FORMULA
SAE**

Relatore: Prof. Giovanni Meneghetti

Laureando: Giulio Di Vittorio

ANNO ACCADEMICO 2018 – 2019

INDICE

1.	INTRODUZIONE.....	2
1.1.	Progetto Formula Sae	2
1.1.1.	Eventi Formula Sae: Regolamento e valutazione delle vetture.....	3
2.	DESCRIZIONE DEL COMPONENTE.....	6
2.1.	Requisiti generali.....	6
2.2.	Regolamento.....	6
2.3.	SES: Structural Equivalence Spreadsheet.....	7
3.	PROGETTAZIONE DEL LAMINATO.....	9
3.1.	Interpretazione SES.....	9
3.2.	Materiali.....	15
3.2.1.	Criterio di selezione.....	15
3.3.	Design del laminato.....	24
3.4.	Realizzazioni campioni e prove meccaniche	24
3.4.1.	Risultati prove meccaniche.....	27
3.5.	Selezione del layup ottimale.....	30
4.	SCELTE PROGETTUALI E REALIZZAZIONE.....	32
4.1.	Geometria.....	32
4.2.	Processo produttivo e realizzazione.....	34
4.2.1.	Realizzazione stampi.....	34
4.2.2.	Laminazione e cottura.....	36
4.2.3.	Rifinitura parti.....	37
4.2.4.	Realizzazione dei supporti.....	38
4.2.5.	Assemblaggio: Metodi e giunzioni.....	39
4.3.	Test e conclusioni.....	43
4.4.	Futuri sviluppi.....	45
	APPENDICI.....	46
A.	Teoria dei laminati.....	46
A1:	La lamina unidirezionale a fibre lunghe.....	47
A2:	Comportamento della lamina sottoposta a sollecitazioni generiche.....	49
B.	Materiali compositi Fire Resistant	50
B1.	Tipologie e meccanismi di azione dei ritardanti di fiamma.....	52
B2.	Test di infiammabilità.....	54
	BIBLIOGRAFIA.....	59

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi nasce con la partecipazione dell'Università degli Studi di Padova ai Progetti Formula SAE e Formula Student.

Oggetto del presente lavoro di tesi è la progettazione, la realizzazione e la messa in opera del contenitore batterie per la seconda vettura elettrica realizzata dal team Race Up.

Obiettivo è stata la realizzazione di un componente in materiale composito in grado di eguagliare o superare le prestazioni strutturali della precedente versione in lega di alluminio in modo da realizzare un consistente risparmio in massa senza alterare sensibilmente le geometrie.

Le scelte effettuate nel corso delle diverse fasi del progetto sono state effettuate sulla base di progettazione ingegneristica, dati e conoscenze preesistenti e tenendo inoltre presente i limiti in termini di tempo e le scadenze imposte e naturalmente i costi e la disponibilità economica.

1.1 Il Progetto Formula Sae

Istituito nel 1981 dalla Society of Automotive Engineers (SAE), Il progetto Formula SAE e l'analogo progetto di proposizione tedesca Formula Student prevedono la progettazione, la produzione, la messa in opera e la promozione di vetture da competizione da parte di studenti universitari, i quali si troveranno non solo a sperimentare sul campo le conoscenze acquisite durante il percorso di studi, ma anche ad affrontare i diversi aspetti secondari di un progetto ingegneristico.

Le vetture prodotte vengono poi presentate e testate in appositi eventi, durante in quali ne vengono valutate non solo l'aderenza alle normative di regolamento e le prestazioni su pista ma anche le qualità di design, le scelte ingegneristiche e il business plan redatto per un'ipotetica messa sul mercato della vettura.

Le vetture proposte all'interno del progetto, tutte monoposto a ruote scoperte e abitacolo aperto, si classificano nelle tre categorie, *combustion* (classe 1C), a motore a combustione interna, *electric* (classe 1E) che impiegano motori elettrici, e *driverless* (classe 1D), vetture autonomamente pilotate da intelligenza artificiale. A queste categorie si aggiunge la categoria denominata *classe 3* nella quale rientrano le vetture presentate solo sottoforma di progetto e non partecipano pertanto agli eventi dinamici.

1.1.1 Eventi Formula Sae: Regolamento e valutazione delle vetture ^[1]

Le vetture proposte all'interno del progetto, tutte monoposto a ruote scoperte e abitacolo aperto, si classificano nelle tre categorie, *combustion* (classe 1C), a motore a combustione interna, *electric* (classe 1E) che impiegano motori elettrici, e *driverless* (classe 1D), vetture autonomamente pilotate da intelligenza artificiale. A queste categorie si aggiunge la categoria denominata *classe 3* nella quale rientrano le vetture presentate solo sotto forma di progetto e non partecipano pertanto agli eventi dinamici.

Eventi Statici:

- **Business plan presentation:**

Questo evento è volto a valutare la capacità del team di sviluppare un modello di business che illustri le possibilità della propria vettura di diventare un valido prodotto da commercializzare. La prova consiste in una presentazione orale del proprio business plan al cospetto di una giuria di esperti nelle vesti di potenziali investitori.

- **Cost and manufacturing event:**

Scopo di questo evento è la valutazione della comprensione dei membri del team dei costi di realizzazione del progetto e delle soluzioni adottate per realizzare la propria vettura a costi quanto più possibile contenuti in previsione di un'ipotetica messa in produzione del proprio prodotto.

In sede di evento saranno discusse il *Bill Of Material (BOM)*, una lista dettagliata di ogni componente presente in vettura e del relativo costo standard in materiali e lavorazioni, confrontato con l'effettivo costo del prototipo, e il *Cost Understanding*, ovvero la comprensione da parte dei membri del team di temi come costi di produzione, impatto ambientale e differenza tra costi di prototipo e di produzione di massa.

- **Engineering design event**

Nel corso di questo evento i membri del team hanno il compito di illustrare a una giuria di esperti le diverse scelte ingegneristiche effettuate, sia sulla base delle prestazioni che sulla base dei costi. Il team dovrà dare adeguata motivazione delle diverse soluzioni adottate e dimostrare adeguate conoscenze e adeguata competenza nel campo.

Technical Inspections

In questa fase, la vettura viene ispezionata per certificarne l'aderenza al regolamento, in particolare dal punto di vista delle norme di sicurezza. Ogni veicolo deve tassativamente superare tutte le ispezioni tecniche previste prima di poter essere ammesso agli eventi dinamici. Ciò implica il controllo di diversi dettagli della vettura, inclusi in una lista standard, più eventuali controlli aggiuntivi a discrezione degli ispettori. A seguito del superamento delle ispezioni tecniche, qualunque modifica o riparazione al veicolo richiederà un'ulteriore approvazione.

- **Pre – Ispezione:**

Ispezione dei dispositivi di sicurezza, abbigliamento e protezioni del pilota, gomme ed estintori.

- **Ispezione meccanica:**

In questa fase vengono ispezionati i componenti meccanici del veicolo e la sua aderenza alle norme dal punto di vista degli ingombri.

Il telaio tubolare o in monoscocca viene esaminato nelle diverse sezioni, così come il sistema sospensivo, il sistema frenante, lo sterzo e le giunzioni critiche.

Il sistema di trazione, motore a combustione per la classe *combustion* e motori elettrici per la classe *electric*, viene esaminato insieme a sistemi di raffreddamento e componenti relativi.

Viene inoltre richiesta la presenza del più alto fra i piloti designati per un controllo delle caratteristiche geometriche dell'abitacolo, guidabilità e visibilità, e per il test *egress*, che prevede che il pilota sia in grado, dalla posizione di guida, di abbandonare il veicolo in un tempo massimo di 5 secondi.

- **Ispezione dei componenti elettrici:**

Ispezione dell'impianto elettrico del veicolo, riservata alle vetture della classe *electric*. Oltre all'ispezione delle diverse parti elettroniche, viene in questa fase valutato anche il loro isolamento e l'efficacia della messa a terra dei diversi componenti del circuito ad alta tensione responsabile dell'alimentazione dei motori.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

- **Ispezione del contenitore batterie:**

Questa ispezione, particolarmente importante e delicata, riservata alle vetture della classe *electric*, viene condotta in un ambiente in sicurezza da rischio elettrico. Il contenitore batterie, i componenti all'interno e il dispositivo responsabile della carica degli accumulatori vengono ispezionati per certificarne l'aderenza al regolamento, sia dal punto di vista della configurazione elettrica che di quella meccanica.

- **Tilt test**

Questo test ha la funzione di valutare sia la stabilità laterale del veicolo e la sua resistenza al ribaltamento che la tenuta dei serbatoi contenenti fluidi, che per questa prova dovranno obbligatoriamente essere riempiti al massimo livello.

La prova di intende superata se:

- Inclinata la vettura con angolo di 45° sul fianco non si verificano perdite di fluidi.
- Inclinata la vettura con angolo di 60° tutte le 4 ruote rimangono in contatto con il piano ribaltato.

- **Pesatura del veicolo**

Il veicolo viene pesato a serbatoi pieni per determinarne la massa complessiva ufficiale per quanto riguarda le ispezioni tecniche.

- **Rain test**

Questa prova, riservata alle vetture della classe *electric*, mira a valutare la protezione e l'isolamento dei componenti elettrici da umidità o pioggia ed è eseguita solo sui veicoli che hanno superato l'ispezione dei componenti elettrici.

Il veicolo, in condizione *ready to race* salvo la rimozione delle ruote e con impianto di trazione attivato, verrà spruzzato di acqua da ogni possibile direzione, senza alta pressione diretta.

La prova di intende superata se non viene attivato il sistema di shutdown di emergenza e i sistemi si mantengono operativi per 120 secondi di spruzzatura e per i 120 secondi successivi.

- **Noise test**

Questa prova, riservata alle vetture della classe *combustion*, è volta a misurare il livello di rumore emesso dal veicolo in condizione di massima velocità dei pistoni. L'intensità del rumore emesso non potrà superare i 110 dB. In questa fase viene valutata anche l'efficienza delle prese d'aria.

- **Brake test**

Il test di frenata ha lo scopo di valutare la capacità del veicolo di arrestarsi completamente in una linea retta utilizzando il solo sistema di frenata meccanico.

- **Post event inspection**

L'aderenza alle norme può essere controllata, a discrezione dei giudici, oltre che prima anche durante o immediatamente dopo gli eventi dinamici. Modifiche o riparazioni non dichiarate preventivamente possono risultare in pesanti penalità al punteggio dei diversi eventi, se non in un annullamento della prova in presenza di violazioni particolarmente gravi.

Eventi dinamici

Agli eventi dinamici sono ammesse le sole vetture che abbiano superato le ispezioni tecniche.

Durante ogni evento è previsto un cambio di pilota, in modo da dare priorità alle prestazioni delle vetture piuttosto che all'abilità del singolo pilota.

- **Skidpad**

Volto a valutare l'aderenza e la tenuta del veicolo su strada, lo *Skidpad Event* consiste in un breve prova di velocità su un percorso a forma di "8" con un raggio di curvatura di circa 8 m.

Ogni team partecipa a 4 prove, 2 per ognuno dei piloti previsti.

- **Acceleration**

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Le prestazioni del veicolo in fase di accelerazione sono valutate mediante una prova di velocità con partenza a veicolo fermo su un tracciato rettilineo di 75 m.

Ogni team partecipa a 4 prove, 2 per ognuno dei piloti previsti

- **Autocross**

L'Autocross Event consiste in una prova di velocità su un singolo giro effettuata su un tracciato tortuoso delimitato da coni di lunghezza inferiore a 1.5 Km.

Ogni team partecipa a 4 prove, 2 per ognuno dei piloti previsti.

- **Endurance**

E' l'evento di maggiore importanza in quanto il suo contributo al punteggio è quasi pari a quello di tutte le altre prove previste.

Esso consiste in una prova di velocità su un tracciato approssimativo di 22 Km. Ogni team ha disposizione un unico tentativo durante il quale è previsto un cambio pilota, in un tempo massimo di 3 minuti una volta raggiunta la metà del numero di giri previsto.

Questa prova consente di valutare le prestazioni delle vetture sul lungo periodo.

CAPITOLO 2

DESCRIZIONE DEL COMPONENTE

2.1 Requisiti generali

Essendo il componente responsabile del contenimento e della protezione delle batterie al litio necessarie all'alimentazione di ogni altro componente ad alta e bassa tensione presente in vettura, il contenitore batterie deve rispettare precisi requisiti di sicurezza.

Requisiti principali per la realizzazione di un contenitore batterie regolamentare sono:

- Geometria adatta ad accogliere i diversi segmenti di celle, i componenti elettronici responsabili del controllo, gli alloggiamenti per i connettori esterni e interni e che consenta inoltre un efficace dispersione del calore sviluppato.
- Buone caratteristiche strutturali, necessarie alla protezione delle celle da urti e pressioni esterne e alla resistenza ai carichi dovuti alle fasi di accelerazione e decelerazione.
- Buone proprietà di isolamento elettrico, imprescindibili per la sicurezza del personale.
- Buone proprietà di resistenza al fuoco e autoestinguenza, necessarie in caso di incendio delle batterie a causa di danneggiamenti o avarie.

2.2 Regolamento^[2]

Per poter essere ammessa alle prove su pista, ogni vettura *Formula Sae* deve superare una lunga serie di controlli tecnici e di sicurezza. Di seguito vengono riportate le normative presenti nel regolamento *Formula Student Rules 2018 Version: 1.1* ^[2] relative alla configurazione meccanica e strutturale del contenitore batterie.

- EV 6.5.2 All accumulator container materials must be **fire resistant** according to UL94-V0, FAR25 or equivalent.
- EV6.5.4 The design of the accumulator must be **documented in the SES** including materials drawings, images, fastener locations, segment weight, cell and segment position.
- EV6.5.6 Composite accumulator containers must satisfy the following requirements:
 - Data obtained from the **laminated perimeter shear strength test and three-point bending test** (T2.6) should be used to prove adequate strength is provided.
 - Each attachment point requires **steel backing plates** with a minimum thickness of 2 mm. Alternate materials may be used for backing plates if equivalency is approved.
 - The calculations and physical test results must be included in the SES.
- EV6.5.13 All fasteners used within or to mount the accumulator container must comply with T9 [...]
- EV 6.5.14 The AIRs and the main fuse must be separated with an electrically insulated and fireproof material to UL94-V0 from the rest of the accumulator. Air is not considered to be a suitable insulation material in this case.
- EV6.5.15 Any **brackets** used to mount the accumulator container must be made of steel 1.6 mm thick or aluminium 4 mm thick and must have gussets to carry bending loads. Each attachment point including brackets, backing plates and inserts, must be able to withstand **20 kN** in any direction.
- EV6.5.20 Cell tabs must not carry mechanical loads.

La configurazione dei componenti elettrici non verrà trattata in questo lavoro di tesi.

Per norme di regolamento inerenti si rimanda a *Formula Student Rules 2018 Version: 1.1 > EV 6.4 Tractive System Accumulator – Electrical Configuration Design*.

2.3 SES: Structural Equivalence Spreadsheet^[3]

Redatto e aggiornato dai responsabili del *Progetto Formula Student*, il documento SES (Structural Equivalence Spreadsheet) è fornito ai team partecipanti sottoforma di foglio di calcolo Excel.

Il documento compilato, da presentare in sede di evento, costituirà quindi una documentazione completa delle caratteristiche costitutive dei componenti strutturali della vettura e una certificazione di aderenza al regolamento.

Il documento dovrà essere compilato con diversi parametri riguardanti il telaio della vettura e diversi altri componenti strutturali. Il sistema provvederà quindi, attraverso apposite formule, a confrontare le proprietà strutturali risultanti con quelle di particolari componenti di riferimento e a convalidare o meno l'aderenza alla normativa delle diverse scelte ingegneristiche.

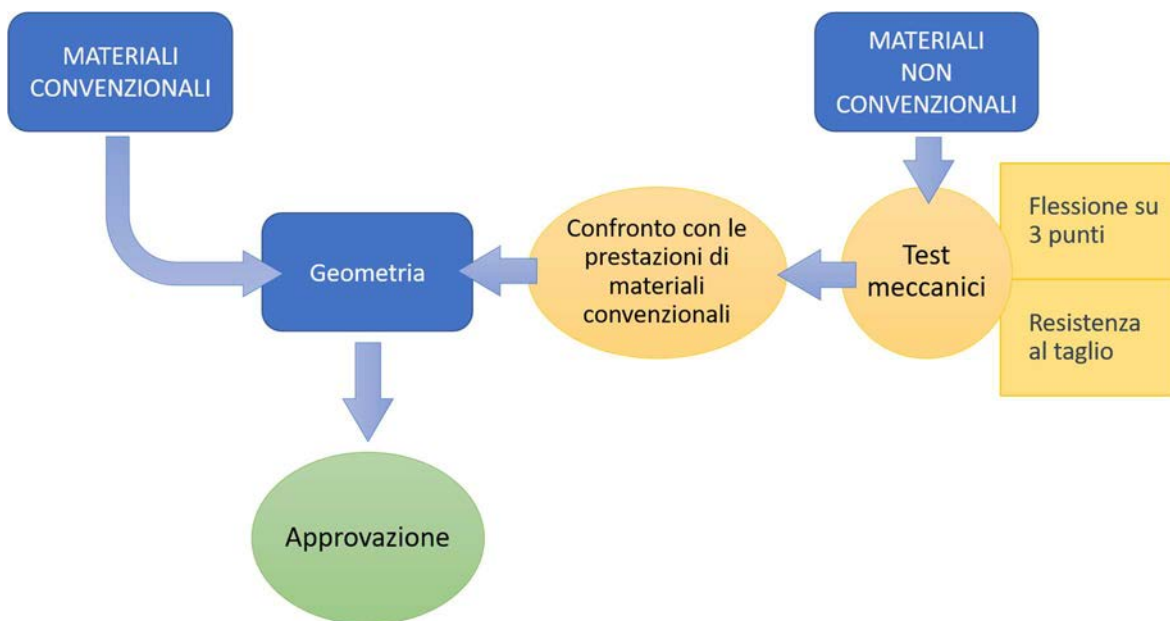


Figura 1: Struttura del documento SES. L'utilizzo di materiali non convenzionali come i compositi obbliga all'esecuzione di specifici test meccanici e alla comparazione delle prestazioni del materiale impiegato con quelle di materiali di confronto, nello specifico, acciaio.

I componenti che dovranno essere documentati nel S.E.S. sono in particolare:

- Le diverse sezioni del telaio tubolare o monoscocca.
- Main Hoop, Front Hoop e relativi supporti e punti di giunzione al telaio.
- Il Contenitore batterie (per le vetture elettriche)

Di ogni componente dovranno essere fornite informazioni riguardanti la configurazione geometrica, i materiali impiegati, le eventuali giunzioni e assemblaggi e gli eventuali dati specifici di ogni particolare situazione.

L'uso di leghe metalliche certificate consente l'approvazione automatica della configurazione componente seguendo semplicemente i limiti riguardanti la configurazione geometrica.

L'impiego di materiali non convenzionali, come materiali compositi o leghe metalliche speciali, o l'adozione di configurazioni geometriche non previste dal regolamento, richiedono una verifica più approfondita, la quale prevede, in particolare, l'esecuzione e il superamento di specifici test meccanici.

La realizzazione di un contenitore batterie in materiale composito ha portato a seguire appunto questa ultima strada. Nel prossimo capitolo si esaminerà nel dettaglio il documento S.E.S. nelle sue sezioni riguardanti il

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

contenitore batterie e si descriverà il procedimento seguito per selezionare la configurazione, il layout e i materiali ottimali.

Nei prossimi paragrafi esamineremo più nel dettaglio le diverse sezioni del documento SES riguardanti la descrizione e la verifica del contenitore batterie.

CAPITOLO 3

PROGETTAZIONE DEL LAMINATO

3.1 Interpretazione SES ^[3]

Il documento S.E.S. deve essere compilato nelle sue diverse sezioni con i dati richiesti sulla configurazione geometrica, i materiali e le caratteristiche dei diversi componenti.

Le sezioni riguardanti la configurazione meccanica del contenitore batterie sono:

EV3.4.6&7 Accumulator Container:

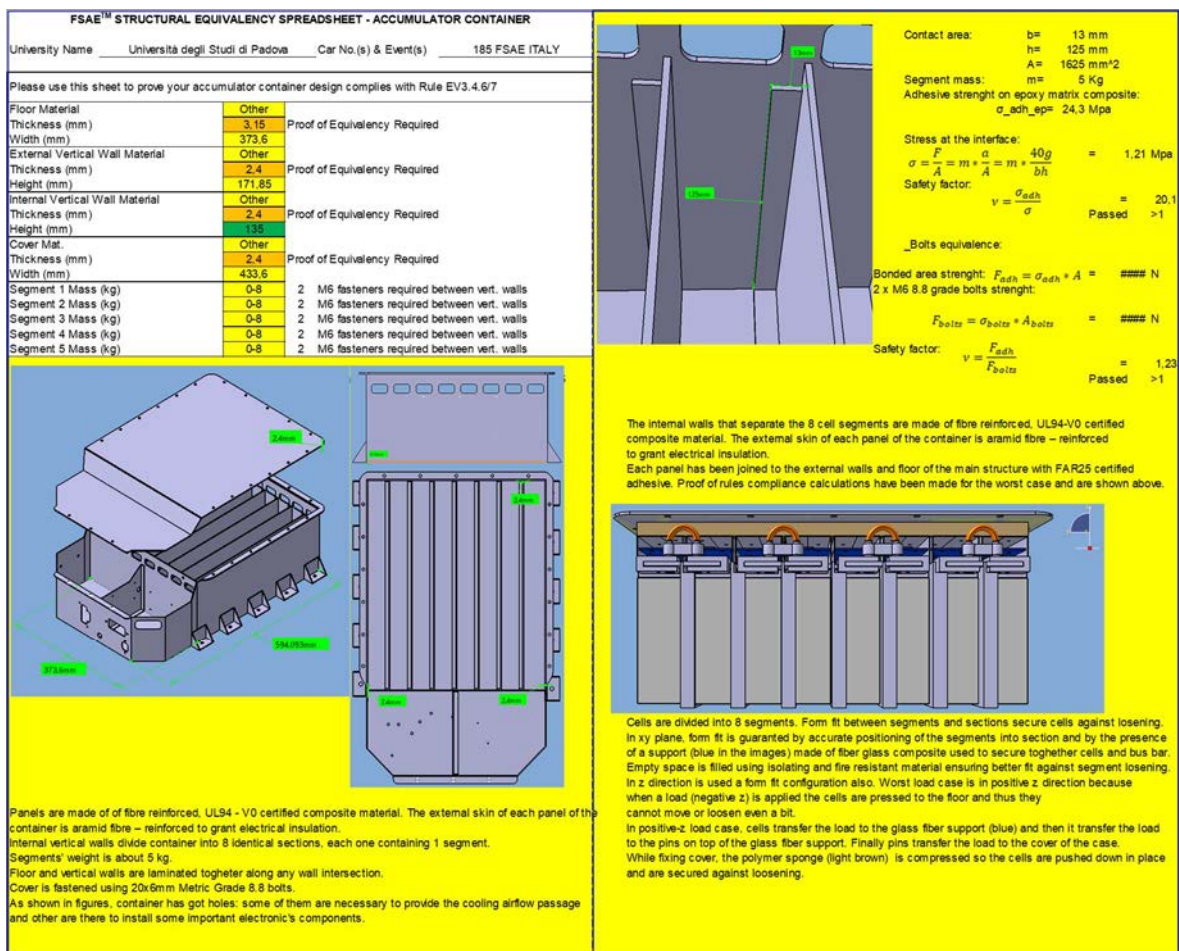


Figura 2: Sezione del S.E.S. riguardante la configurazione generale del contenitore batterie. ^[1]

- Elenco delle caratteristiche geometriche e dei materiali costituenti i diversi pannelli. Qualora, come in questo caso, vengano impiegati materiali diversi da acciaio o alluminio, il sistema evidenzierà la necessità di ulteriori verifiche strutturali.
- Breve descrizione discorsiva del componente e immagini da CAD di progetto.
- Dimostrazione dell'aderenza a normativa delle giunzioni tra pareti interne e struttura principale del componente.

Tenendo conto del carico massimo sopportabile dall'adesivo utilizzato sul tipo di superfici in questione, fornito nei dati del prodotto, e della superficie di incollaggio, l'equivalenza è dimostrabile come segue:

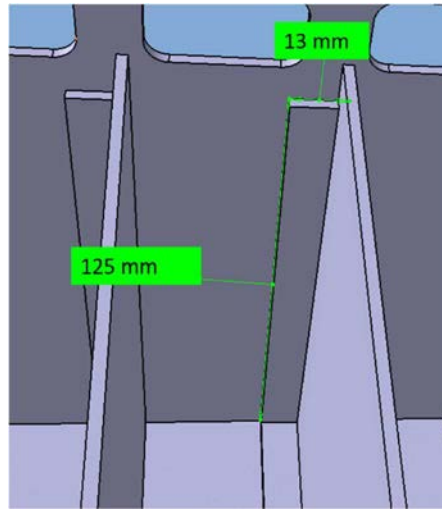


Figura 3: particolare della giunzione pareti interne - main box.

$$\sigma = \frac{F}{A} = m * \frac{a}{A} = m * \frac{40g}{bh} = 0.33 * m = 2.04 \text{ Mpa}$$

$$\rightarrow \text{Fattore sicurezza: } v = \frac{\sigma_{adh}}{\sigma} = 11.91$$

3.1

$$A = \text{superficie di contatto} = 125\text{mm} * 13\text{mm} = 1625\text{mm}^2$$

3.2

$$m = \text{massa segmenti celle} = 6.25 \text{ Kg}$$

$$\sigma_{ad} = \text{Carico massimo sopportabile dall'adesivo} = 24.3 \text{ Mpa}$$

- E' inoltre richiesta l'equivalenza della giunzione in questione a una realizzata con 2 bulloni M6 8.8:

$$F_{ad} = \sigma_{adh} * A = 39487.5 \text{ N}$$

$$F_{bolts} = \sigma_{bolts} * A_{bolts} = 2 * 800 * 20 = 32000 \text{ N}$$

3.3

$$\rightarrow \text{Fattore sicurezza: } v = \frac{F_{adh}}{F_{bolts}} = 1.2$$

3.4

$$A_{bolts} = \text{Sezione resistente vite (tabulata)} = 20 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{bolts} = \text{Tensione ammissibile vite (tabulata)} = 800 \text{ Mpa}$$

EV3.4.6j Alt Matl – Shear e EV3.4.6j Alt Matl - 3pt Bending:

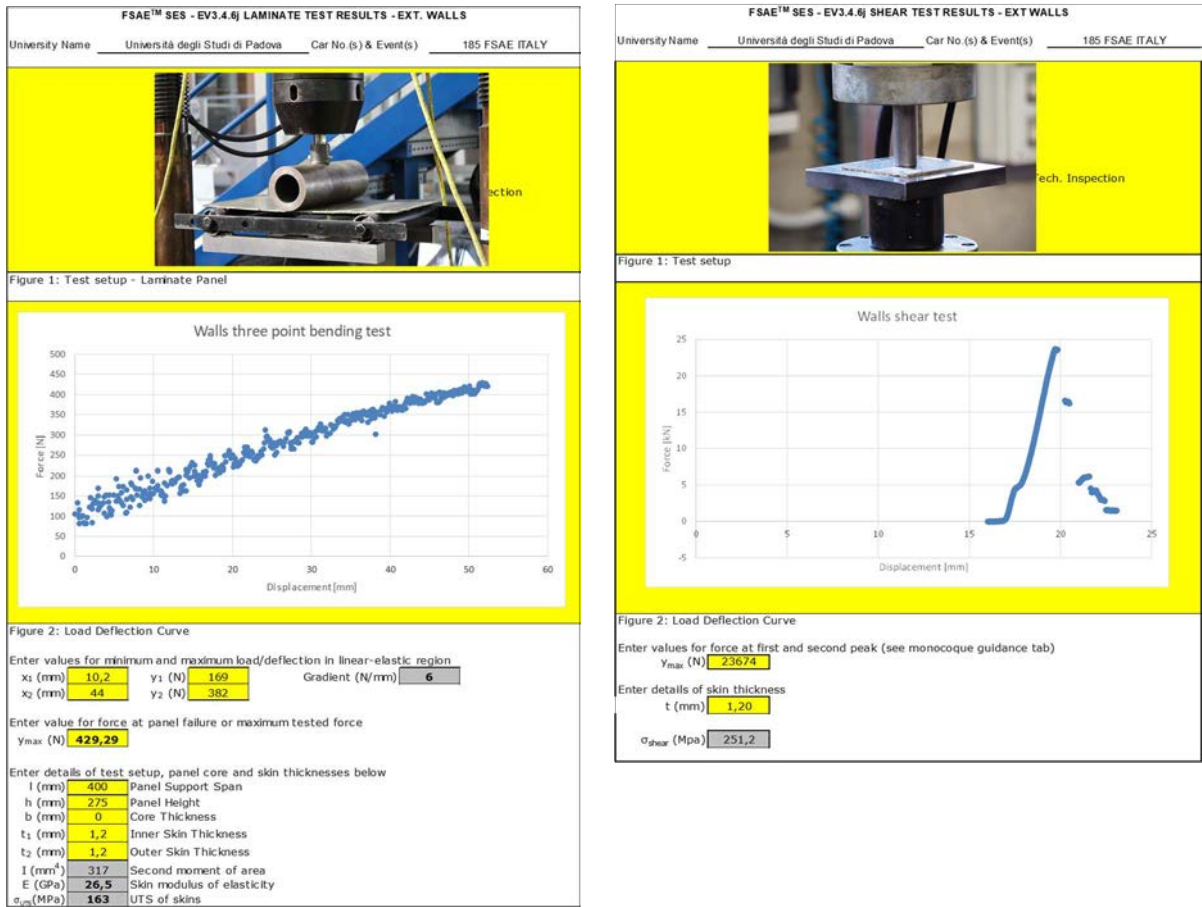


Figura 4: Sezioni del S.E.S. riguardanti (A) la prova di resistenza a taglio e (B) la prova di flessione a 3 punti. [1]

In queste due sezioni è richiesto di inserire i dati ricavati dalle prove meccaniche su provini rappresentativi dei pannelli impiegati per la realizzazione del componente.

Sono richiesti:

- Documentazione fotografica del setup della prova.
- Grafico complessivo *Spostamento [mm] – Forza [N]* della prova.
- Trascrizione dei dati numerici ricavati dalla prova.

Devono poi essere inseriti i dati necessari al calcolo delle proprietà meccaniche del pannello:

- Per la prova di *comportamento al taglio* sono richiesti i valori dei due picchi del grafico corrispondenti al cedimento delle pelli del pannello e lo spessore del pannello stesso. In questo caso, non trattandosi di pannelli sandwich, il picco è unico e corrisponde al cedimento definitivo del pannello.
- Per la prova di *flessione a te punti* sono richieste le coordinate dei due punti del grafico tra i quali si abbia la massima pendenza, il massimo valore di *Forza* registrato e i dati geometrici del pannello. In questo caso, essendo il pannello privo di *core*, lo spessore del *core* è stato considerato pari a 0 e quello delle pelli pari a metà dello spessore del pannello stesso.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Da questi dati il sistema ricava i valori di:

- *Resistenza al taglio: $\sigma_{shear} [Mpa] = \frac{F_{she}^{max}}{\pi * 25 * t}$* 3.5
- *Momento di inerzia: $I [mm^4] = h * \frac{(b+t_1+t_2)^3 - b^3}{12}$* 3.6
- *Modulo elastico: $E [Gpa] = Gradiente * \frac{(x_1-x_2) * L^3}{48 * I * (x_1-x_2)}$* 3.7
- *Tensione di rottura delle pelli: $\sigma_{UTS} = \frac{F_{3PB}^{max} * L * (b+t_1+t_2)}{2 * 4I}$* 3.8

EV3.4.6j Alt. Matls Summary:

In questa sezione vengono raccolti i dati dei pannelli in composito impiegati per la realizzazione del componente. In base ai valori forniti e calcolati nelle precedenti sezioni, il sistema effettua una comparazione con un pannello in acciaio di dimensioni predefinite. Se i valori di *resistenza a flessione, rigidezza flessionale e resistenza a taglio* risultano equivalenti o superiori a quelli del pannello campione in acciaio il sistema dichiara automaticamente il pannello come idoneo alla realizzazione di una particolare sezione del componente.

Alternative Material Proof of Equivalency

Material Property	Baseline Floor	Your Floor	Baseline Ext. Wall	Your Ext. Wall	Baseline Int. Wall	Your Ext Wall	Baseline Cover	Your Cover
Material type	Steel	Composite	Steel	Composite	Steel	Composite	Steel	Composite
Material name / grade	Steel	Your Floor	Steel	Your Ext. Walls	Steel	Your Int. Walls	Steel	Your Cover
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.94E+10	2.00E+11	2.85E+10	2.00E+11	2.85E+10	2.00E+11	2.85E+10
Yield strength, Pa	3.05E+08	2.15E+08	3.05E+08	1.83E+08	3.05E+08	1.83E+08	3.05E+08	1.83E+08
UTS, Pa	3.65E+08	2.15E+08	3.65E+08	1.83E+08	3.65E+08	1.83E+08	3.65E+08	1.83E+08
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	N/A	1.80E+08	N/A	1.80E+08	N/A	1.80E+08	N/A
UTS welded, Pa	3.00E+08	N/A	3.00E+08	N/A	3.00E+08	N/A	3.00E+08	N/A
UTS shear, Pa	2.19E+08	2.57E+08	2.19E+08	2.51E+08	2.19E+08	2.51E+08	2.19E+08	2.51E+08
Thickness of panel, mm	1.25	3.15	0.9	2.4	0.9	2.4	0.9	2.4
Thickness of inner skin, mm	N/A	1.575	N/A	1.2	N/A	1.2	N/A	1.2
Thickness of outer skin, mm	N/A	1.575	N/A	1.2	N/A	1.2	N/A	1.2
Panel height/width, mm	373,6	373,6	171,85	171,85	135	135	433,6	433,6
I, m ⁴	6.081E-11	9.731E-10	1.044E-11	1.980E-10	8.201E-12	1.555E-10	2.634E-11	4.995E-10
EI	1.22E+01	2.88E+01	2.09E+00	5.25E+00	1.84E+00	4.12E+00	5.27E+00	1.32E+01
Area, mm ²	467	1178,84	154,865	412,44	121,5	324	390,24	1040,64
UTS, N	1.70E+05	2.53E+05	5.65E+04	8.71E+04	4.43E+04	5.27E+04	1.42E+05	1.69E+05

Safety Factors				
Bending Strength		1.48	1.19	1.19
Flexural Rigidity		2.35	2.51	2.51
Shear		2.95	3.06	3.06
		PASS	PASS	PASS

CAD Screenshots / Images proving all panel thicknesses and any additional proof must be appended below



Figura 5: Sezione del S.E.S. di riepilogo delle caratteristiche dei pannelli e di convalida dei risultati. [1]

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

EV3.4.8&9 Acc. Attachments:

Accumulator Attachments

Accumulator Mass (kg)	42
No. of attachment required	10

Insert images of each attachment point & calculations proving the required properties:

Each of the following must be proved: The attachment of any brackets to the container is as at least as strong as 20kN x the number of fasteners per bracket. If brackets are bolted to the container, that there is sufficient shear area under the head of the bolts/washers so the perimeter shear strength is $\geq 20\text{kN} \times$ the number of fasteners per bracket. For monocoques, that each attachment point has $\geq 20\text{kN} \times$ the number of fasteners per bracket in any direction (please see the Comp IAD attachment calcs for an example). For monocoques, that the structure in the chassis the bracket attaches to can withstand $\geq 20\text{kN} \times$ the number of fasteners per bracket in any direction (calculations similar to tab T3.34)

Brackets are made of 25CrM04 steel with a minimum thickness of 2mm.

They are bonded to the accumulator container's external wall in a fashion that they are close to the accumulator container's center of gravity. The adhesive itself can withstand a stress of 24.3 Mpa on epoxy - based composite and of 15.9 Mpa on steel. The vertical surface of the bracket has been dimensioned to ensure the resulting stress under a 20000kN load does not exceed the strength of the adhesive. The calculations are included below.

Bonding area:	b=	50 mm	h=	40 mm	A=	2000 mm ²
Adhesive strength on steel:	σ_{adh_ep}			15.9 Mpa		
Stress on the bonded surface under a load: F=	20000 N		$\sigma = \frac{F}{A}$			10 Mpa
Safety factor:	$v = \frac{\sigma_{adh}}{\sigma}$			1.59		Passed

They are distributed symmetrically and each of them take part in withstanding any stress in positive/negative x, positive/negative y and positive/negative z.

We utilize the data from perimeter shear test to demonstrate that the insert, mounting brackets, backing plate have enough perimeter not to cut the laminate. The push/pull of the insert is the worst case direction. So from the page "*****Other Provino 6 Matl Shear= SCOCCA GENERALE we take the values for skin's shear strength and its thickness t

t (mm)	0,90
σ_{shear} (Mpa)	265,18
Bracket perimeter (mm)	180
Backing plate perimeter (mm)	94,2
Insert Perimeter (mm)	69,08
Fmax (kN)	20

PUSH CASE

$$F \text{ of brake (kN)} = \frac{\sigma_{steel} * t * (2p)_{bracket} + (2p)_{insert}}{1000} = 59,4459$$

$$\text{Coefficient of Safety} = v = \frac{F_{brake}}{F_{max}} = 2,9723 \text{ PASSED } > 1$$

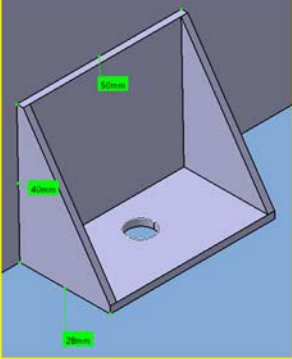
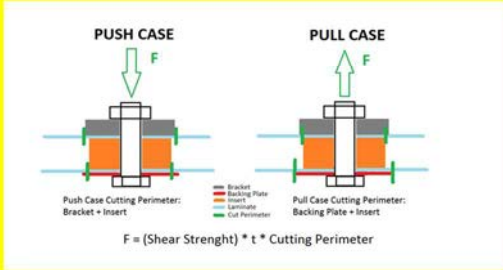
PULL CASE

$$F \text{ of brake (kN)} = \frac{\sigma_{steel} * t * (2p)_{plate} + (2p)_{insert}}{1000} = 38,9687$$

$$\text{Coefficient of Safety} = v = \frac{F_{brake}}{F_{max}} = 1,94844 \text{ PASSED } > 1$$

CUT OF THE BRACKET

Shear Strength steel [MPa]	190
Bracket thickness [mm]	2
F of brake (kN)	$\frac{T_{steel} * t_{bracket} * (2p)_{bracket}}{1000} = 68,4$
Coefficient of Safety	$v = \frac{F_{brake}}{F_{max}} = 3,42 \text{ PASSED } > 1$

$F = (\text{Shear Strength}) * t * \text{Cutting Perimeter}$

Figura 6: Sezione del S.E.S. riguardante il dimensionamento dei supporti del contenitore batterie. [1]

In questa ultima sezione viene richiesta una descrizione dei supporti dell' contenitore batterie. Viene inoltre richiesto di dimostrare:

- Che ogni giunzione supporto-contenitore sia in grado di sopportare un carico minimo di 20kN in ogni direzione. L'area di incollaggio di ogni supporto è stata appositamente dimensionata con un fattore di sicurezza di 1.5 tenendo conto del carico minimo richiesto e del massimo sforzo sopportabile dall'adesivo secondo la scheda del prodotto per una giunzione acciaio-acciaio.

$$A = \frac{F}{\sigma_{adhesiv}} * 1.5 \tag{3.9}$$

$$\rightarrow A = 2000 \text{ mm}^2$$

$$\rightarrow bh = 2000 \text{ mm}^2$$

$$\rightarrow b = 50 \text{ mm} ; h = 40 \text{ mm}$$

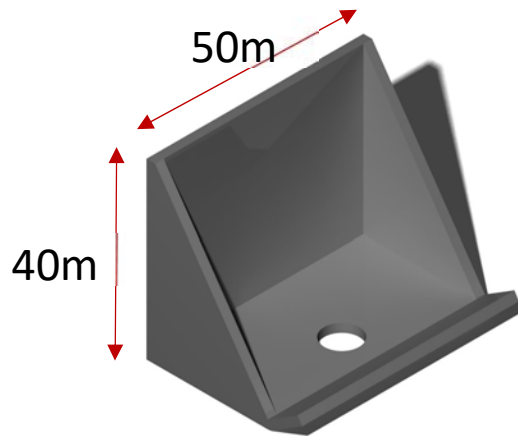


Figura 7: Rappresentazione da disegno CAD dei supporti. È quotata la superficie di incollaggio.

- Che il telaio in monoscocca sia in grado di supportare lo stesso carico nei punti di giunzione.

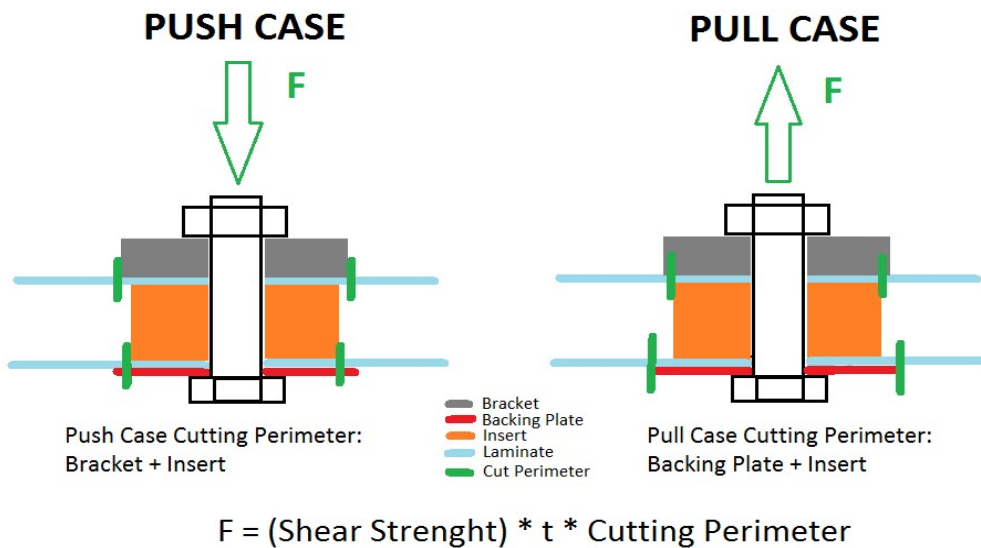


Figura 8: Rappresentazione schematica della giunzione dei supporti del contenitore batterie al telaio della vettura. Inserti in carbonio pieno costituiscono il core del pannello sandwich in corrispondenza della giunzione bullonata.

$$\text{Compressione: } F_{brake}^{push} = \frac{\sigma_{shear} * t * (2p)_{bracket} + (2p)_{insert}}{1000} = 59.44 \text{ N} \quad 3.10$$

$$v = \frac{F_{brake}^{pu}}{F_{max}} = \frac{59.44}{20000} = 2.97 \quad 3.11$$

$$\text{Trazione: } F_{brake}^{pull} = \frac{\sigma_{shear} * t * (2p)_{b.plate} + (2p)_{insert}}{1000} = 38.96 \text{ N} \quad 3.12$$

$$v = \frac{F_{brake}^{pull}}{F_{max}} = \frac{38.96}{20000} = 1.94 \quad 3.13$$

$$\text{Sforzo di taglio sul supporto: } F_{brake}^{cut} = \frac{\tau_{steel} * t_{bracket} * (2p)_{bracket}}{1000} = 68.4 \text{ N} \quad 3.14$$

$$v = \frac{F_{brake}^{cut}}{F_{max}} = \frac{68.4}{20000} = 3.42 \quad 3.15$$

3.2 Materiali

La normativa di regolamento per la realizzazione del contenitore batterie prevede che i materiali utilizzati soddisfino precise richieste:

- Proprietà strutturali sufficienti al superamento di precisi test meccanici. Nello specifico è necessario realizzare pannelli rigidi e resistenti.
- Buone proprietà di isolamento elettrico, imprescindibili per la sicurezza del personale.
- Buone proprietà di resistenza al fuoco e autoestinguenza, necessarie in caso di incendio delle batterie a causa di danneggiamenti o avarie.

Inoltre:

- Per realizzare un componente competitivo e migliorativo rispetto alla precedente versione in lamiera di alluminio è inoltre richiesto un materiale caratterizzato da bassa densità.
- Sono ovviamente preferiti materiali dal costo quanto più possibile contenuto.

Le proprietà termiche non vengono qui considerate in quanto il componente dispone di un sistema di raffreddamento attivo e non si osservano picchi di temperatura significativi durante il funzionamento.

Si è deciso di limitare la scelta ai soli materiali compositi a fibre lunghe, data la precedente esperienza e la disponibilità di appoggi esterni per lavorazione di questi materiali.

3.2.1 Criterio di selezione ^[5] [6]

La selezione dei materiali ottimali viene effettuata seguendo diversi passaggi successivi:

- Limitazione del database alle sole classi di materiali in esame.
- Definizione di *condizioni limite* per escludere materiali che non presentino minime caratteristiche di *resistenza al fuoco*, essendo queste caratteristiche imprescindibili per regolamento.
- Definizione di *indici di prestazione* che permettano di confrontare i materiali in base alla loro efficacia nella realizzazione di:
 - *Pannelli rigidi e leggeri.*
 - *Pannelli resistenti e leggeri.*
 - *Pannelli rigidi e dall' elevata resistenza elettrica.*
 - *Pannelli resistenti e dall' elevata resistenza elettrica.*
- Definizione di una *funzione di prestazione* che confronti in modo univoco i materiali in base ai dati raccolti sulle diverse proprietà.
- Definizione di una *figura di merito* che soppesi ulteriormente la funzione di prestazione di ogni materiale in esame in base al costo/massa dello stesso.

Limitazione database:

La scelta dei limiti imposti al database è stata determinata da diversi fattori, principalmente dettati da esperienza e disponibilità.

Come precedentemente accennato, l'esperienza maturata negli anni dal Team Race Up, oltre alle disponibilità offerte da sponsor e fornitori, hanno portato a limitare la scelta ai materiali compositi a fibre lunghe in matrice polimerica.

Vengono inoltre preferiti i materiali con layup biassiale dato che le sollecitazioni previste sul componente non presentano una direzione preferenziale e le proprietà meccaniche devono quindi essere ottimizzate lungo

entrambi gli assi del pannello.

Per comparazione si includono inoltre nel database la lega di alluminio 7075, costituente la precedente versione del componente, e la lega di titanio alfa-beta Ti-6Al-4V, largamente impiegata in ambiente automotive.

Vengono inclusi dal database così limitato solo i materiali che, per quanto riguarda le caratteristiche di *infiammabilità*, siano classificati come *autoestinguenti*. Come specificato nel *paragrafo 2.1*, tale proprietà dovrà essere poi documentata e la documentazione ufficiale obbligatoriamente presentata in sede di evento.

Definizione degli indici di prestazione:

Rigidezza, leggerezza, resistenza:

I minimi valori di massa, necessari per la realizzazione di *panelli leggeri, rigidi e resistenti*, sono dati rispettivamente dalle formule:

$$\text{Massa per rigidezza: } m_E = \sqrt[3]{S_{min} \frac{b^2}{C'} L^2 \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}\right)} \tag{3.16}$$

$$\text{Massa per resistenza: } m_\sigma = \sqrt{6 b M_f L \left(\frac{\rho}{\sigma^{\frac{1}{2}}}\right)} \tag{3.17}$$

Dove la *rigidezza minima*

$$S_{min} = \frac{CEJ}{L^3} \tag{3.18}$$

e il *momento flettente massimo*

$$M_f = \sigma_z W_x \tag{3.19}$$

sono calcolati in base a dimensioni e caratteristiche meccaniche del pannello di riferimento descritto nel documento *S.E.S.*, il quale corrisponde ad un pannello di dimensioni analoghe a quelle del pannello previsto nel componente e di spessore 1.25mm (*Figura 8*)

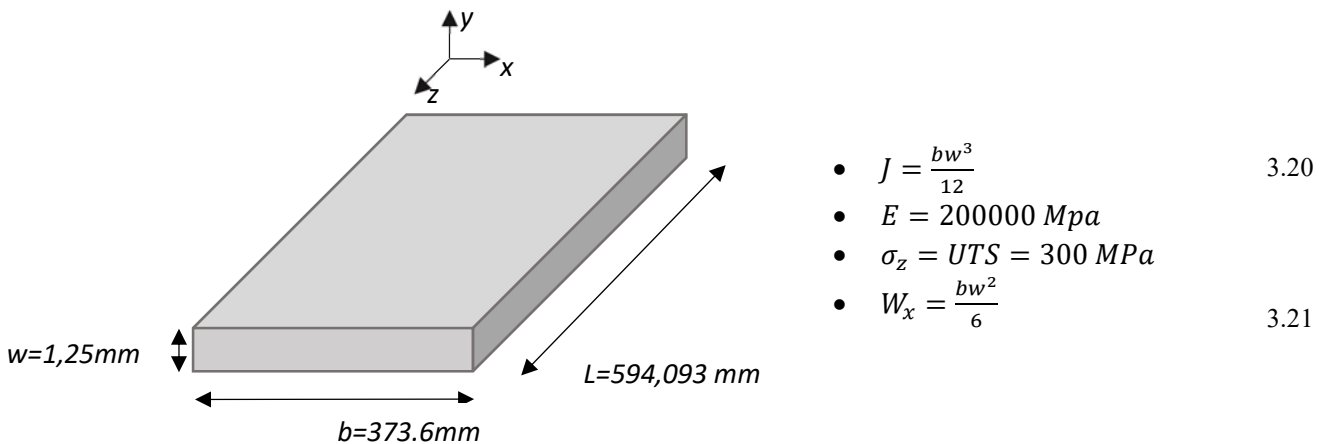


Figura 9: Figura 6: Rappresentazione schematica e proprietà meccaniche del pannello di riferimento in acciaio.

La costante numerica $C' = C/12$ dipende dalla *costante di vincolo* $C = 48$, selezionata in base alle condizioni di vincolo, che vedono il pannello come trave semplicemente appoggiata e caricata in mezzzeria, in base alle condizioni di prova imposte dal documento *S.E.S.*

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Imposta quindi l'uguaglianza tra le due masse, è quindi possibile definire i due indici di prestazione e la relativa *costante di accoppiamento CC*.

$$m_E = m_\sigma \quad 3.22$$

$$\sqrt[3]{S_{min} \frac{b^2}{C'} L^2 \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \right)} = \sqrt{6 b M_f L \left(\frac{\rho}{\sigma^{\frac{1}{2}}} \right)} \quad 3.23$$

$$\sqrt[3]{S_{min} \frac{b^2}{C'} L^2 (M_E)} = \sqrt{6 b M_f L (M_\sigma)}; M_E = \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \right); M_\sigma = \left(\frac{\rho}{\sigma^{\frac{1}{2}}} \right)$$

$$(M_\sigma) = \frac{\sqrt[3]{S_{min} \frac{b^2}{C'} L^2}}{\sqrt{6 b M_f L}} (M_E) \quad 3.24$$

$$(M_\sigma) = \frac{\sqrt[3]{S_{min} \frac{b^2}{C'} L}}{\sqrt{6 b M_f}} (M_E) \quad 3.25$$

$$CC = \frac{\sqrt[3]{S_{min} \frac{b^2}{C'} L}}{\sqrt{6 b M_f}} \quad 3.26$$

Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, sono quindi da massimizzare gli indici:

$$Rigidezza - leggerezza: I_E = \left(\frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho} \right) \quad 3.27$$

$$Resistenza - leggerezza: I_\sigma = \left(\frac{\sigma^{\frac{1}{2}}}{\rho} \right) \quad 3.28$$

In *Figura 10* è rappresentato il grafico indice-indice relativo alle proprietà meccaniche. Si può notare come i materiali compositi a base di carbonio e di fibra aramidica in matrice di resina epossidica siano inclusi in box selection notevolmente più ristrette rispetto alle leghe di alluminio e di titanio, confermando la migliore performance meccanica di queste classi di materiali.

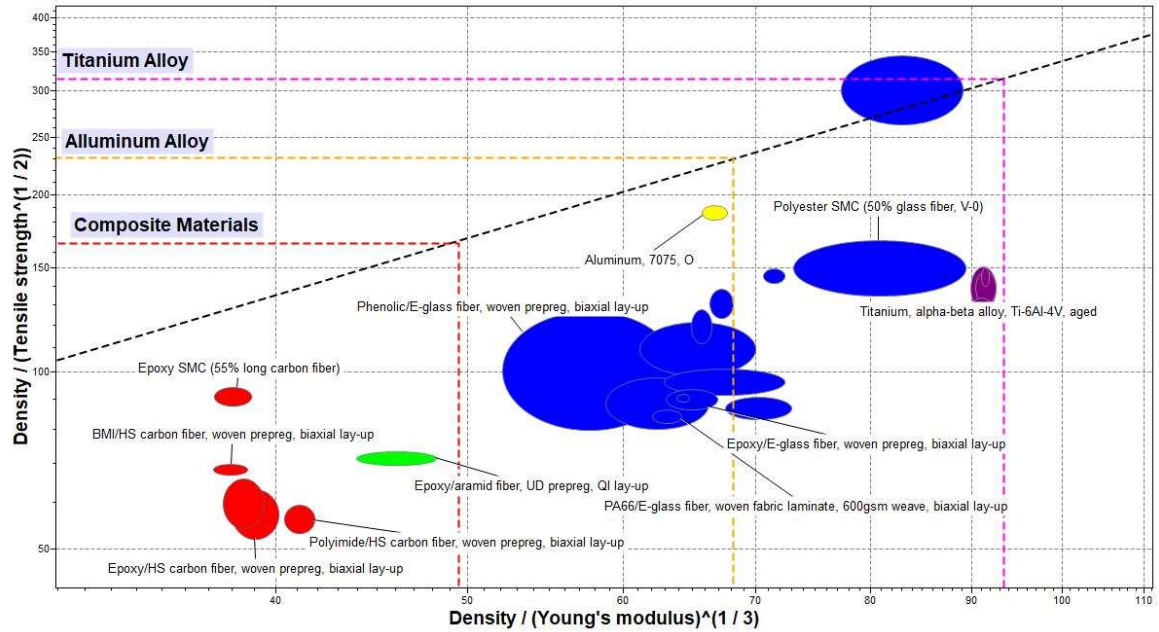


Figura 10: Grafico indice-indice relativo alle proprietà meccaniche dei materiali considerati. [7]

In particolare, si può notare come le performance del materiale rinforzato con fibra aramidica siano, come previsto, leggermente inferiori rispetto a quelle dei materiali in fibra di carbonio. Vedremo in seguito come l'impiego di questo materiale sarà reso conveniente da una combinazione di prestazioni meccaniche e di resistività elettrica.

Resistenza elettrica:

Data la *resistenza elettrica* del pannello, in questo caso data dalla formula

$$R = \frac{\rho_{el}W}{A} = \frac{\rho_{el}W}{bL} \quad 3.29$$

in quanto il flusso di corrente avviene in direzione perpendicolare alla superficie del pannello stesso, e dato che lo spessore minimo per mantenere le proprietà meccaniche richieste è rispettivamente:

$$\text{Spessore per rigidezza: } w_E = \sqrt[3]{\frac{S_{min}}{c'c}} L \left(\frac{1}{E^3} \right) \quad 3.30$$

$$\text{Spessore per resistenza: } w_R = \sqrt{\frac{M_f}{c}} \left(\frac{1}{\sigma^2} \right) \quad 3.31$$

Che, sostituendo, permettono il calcolo dei minimi valori di *resistenza elettrica*:

$$\text{Resistenza elettrica per rigidezza: } R_E = \frac{1}{b} \sqrt[3]{\frac{S_{min}}{c'c}} \left(\frac{\rho_{el}}{E^3} \right) \quad 3.32$$

$$\text{Resistenza elettrica per resistenza: } R_\sigma = \frac{1}{bL} \sqrt{\frac{M_f}{c}} \left(\frac{\rho_{el}}{\sigma^2} \right) \quad 3.33$$

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Imposta quindi l'uguaglianza tra le due espressioni, è quindi possibile definire i due indici di prestazione e la relativa *costante di accoppiamento CC*:

$$R_E = R_R \quad 3.34$$

$$\frac{1}{b} \sqrt[3]{\frac{S_{min}}{C'C}} L \left(\frac{\rho_{el}}{E^{\frac{1}{3}}} \right) = \frac{1}{bL} \sqrt{\frac{M_f}{C}} \left(\frac{\rho_{el}}{\sigma^2} \right) \quad 3.35$$

$$\frac{1}{b} \sqrt[3]{\frac{S_{min}}{C'C}} L (M_{\rho_{el}E}) = \frac{1}{bL} \sqrt{\frac{M_f}{C}} (M_{\rho_{el}R}) ; M_{\rho_{el}E} = \left(\frac{\rho_{el}}{E^{\frac{1}{3}}} \right) ; M_{\rho_{el}\sigma} = \left(\frac{\rho_{el}}{\sigma^2} \right)$$

$$(M_{\rho_{el}R}) = \frac{\frac{1}{b} \sqrt[3]{\frac{S_{min}}{C'C}} L}{\frac{1}{bL} \sqrt{\frac{M_f}{C}}} (M_{\rho_{el}E}) \quad 3.36$$

$$(M_{\rho_{el}R}) = \frac{\sqrt[3]{\frac{S_{min}}{C'} L^2}}{\sqrt{M_f}} (M_{\rho_{el}E}) \quad 3.37$$

$$CC_{\rho_{el}} = \frac{\sqrt[3]{\frac{S_{min}}{C'} L^2}}{\sqrt{M_f}} \quad 3.38$$

Dal punto di vista delle proprietà elettriche, sono quindi da massimizzare gli indici:

$$\text{Resistività} - \text{rigidezza}: I_E = \left(\frac{\rho_{el}}{E^{\frac{1}{3}}} \right) \quad 3.39$$

$$\text{Resistività} - \text{resistenza}: I_\sigma = \left(\frac{\rho_{el}}{\sigma^2} \right) \quad 3.40$$

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

In *Figura 10* è rappresentato il grafico indice-indice relativo alle proprietà meccaniche. Si può notare come i materiali compositi a base di fibra di vetro e aramidica abbiano prestazioni di isolamento elettrico notevolmente più elevate di quelle dei materiali in fibra di carbonio, oltre che delle leghe metalliche.

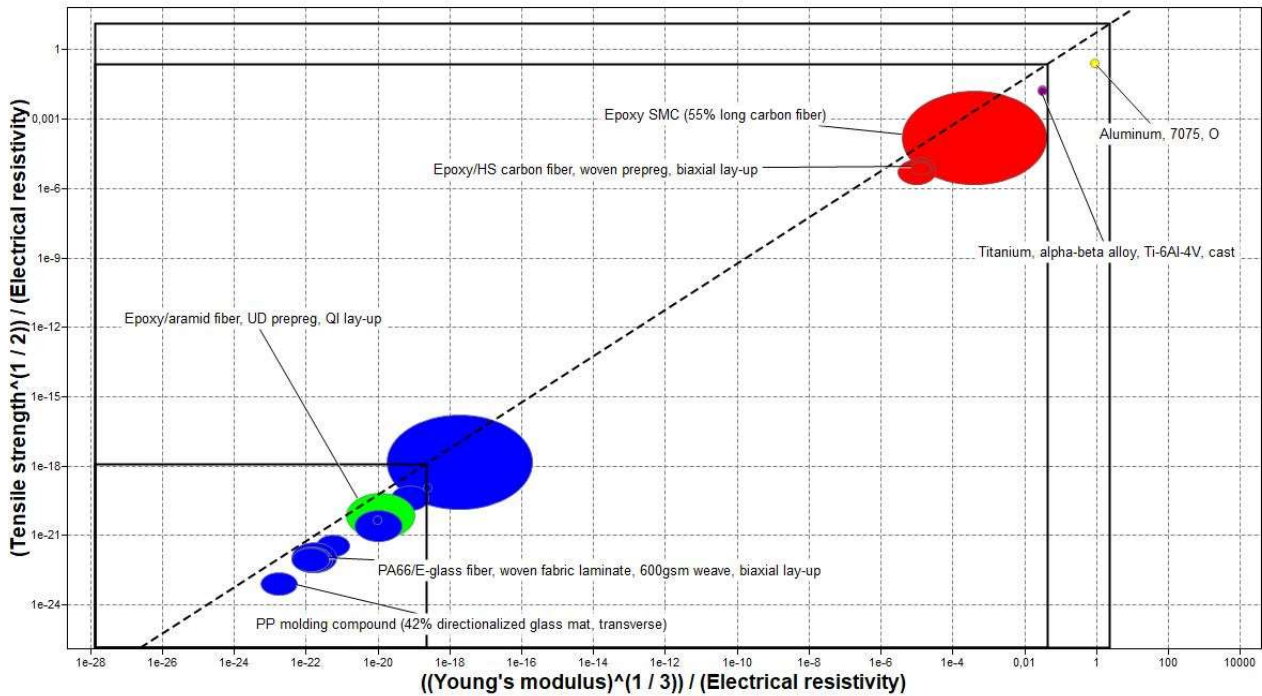


Figura 12: Grafico indice indice delle proprietà di resistività elettrica e proprietà meccaniche dei materiali considerati. [7]

Tenendo conto di entrambi i grafici in *Figura 9* e *10* e già possibile identificare il materiale a base di fibra aramidica come uno dei candidati più promettenti, data la sua ottima combinazione di proprietà meccaniche e di isolamento elettrico.

Vengono a questo punto inclusi nei successivi passaggi di selezione:

- I materiali compositi a base di fibra di carbonio.
- L'unico considerato tra i materiali compositi a base di fibra aramidica.
- I primi tre candidati tra i materiali compositi a base di fibra di vetro, quelli caratterizzati dalle migliori prestazioni meccaniche.

Vengono inoltre inserite per comparazione le leghe metalliche di Alluminio e Titanio considerate.

Definizione della Funzione di prestazione:

Per confrontare i diversi materiali in modo univoco soppesando le diverse proprietà, si ricorre ad una *funzione di prestazione*.

I parametri considerati sono, in ordine di importanza:

Indici di leggerezza/rigidezza e leggerezza/resistenza > Indici resistività/rigidezza e resistività/resistenza

Di ogni parametro verranno considerati i valori medi degli intervalli riportati nel database *CES Edupack 2018*.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Tabella 1: Valori medi delle proprietà considerate per i diversi materiali. [7]

Materiale:	ρ [Kg/mm ³]	E [Mpa]	UTS [MPa]	Resistività [μohm * mm]	Costo/massa [€/kg]
Epoxy/HS carbon fiber	1,58E-06	65700,00	769	3,68E+06	€ 47,15
Polyimide/HS carbon fiber	1,64E-06	60200,00	824	3,49E+06	€ 129,00
Epoxy SMC (55% long carbon fiber)	1,47E-06	57850,00	262	5,00E+06	€ 15,40
BMI/HS carbon fiber	1,54E-06	67000,00	507	7,27E+06	€ 133,50
Epoxy/aramid fiber	1,38E-06	27200,00	374	1,14E+22	€ 53,50
Phenolic/E-glass fiber	1,85E-06	33300,00	369	7,65E+20	€ 23,20
Epoxy/E-glass fiber	1,86E-06	26400,00	446	8,80E+22	€ 29,97
PA66/E-glass fiber	1,80E-06	23250,00	460	3,65E+23	€ 5,68
Alluminum 7075, O	2,80E-06	74000,00	225	5,10E+01	€ 3,54
Ti-6Al-4V	4,43E-06	115000,00	1185	1,69E+03	€ 17,95

Si calcolano innanzitutto i *coefficienti di peso* relativi alle diverse proprietà. La priorità è assegnata alle proprietà meccaniche, che in ognuno dei diversi giudizi ricevono quindi valore pari a 2, mentre alle proprietà di isolamento elettrico si assegna un valore pari a 1.

Tabella 2: Calcolo dei coefficienti di peso per le diverse proprietà dei materiali.

Proprietà:	G1	G2	G3	Decisioni positive	π
Leggerezza-rigidezza	2	2	2	6	0,33
Leggerezza-resistenza	2	2	2	6	0,33
Resistività-rigidezza	1	1	1	3	0,17
Resistività-resistenza	1	1	1	3	0,17
Totale:				18	1

I valori degli *indici di prestazione*, tutti da massimizzare, sono riassunti in Tabella 3:

Tabella 3: Valori degli indici di prestazione dei diversi materiali. [7]

Materiale:	I_{mE}	$I_{m\sigma}$	$I_{\rho E}$	$I_{\rho\sigma}$	Costo/massa [€/kg]
Epoxy/HS carbon fiber	2,56E+07	1,76E+07	9,11E+04	1,33E+05	€ 47,15
Polyimide/HS carbon fiber	2,39E+07	1,75E+07	8,89E+04	1,21E+05	€ 129,00
Epoxy SMC (55% long carbon fiber)	2,63E+07	1,10E+07	1,29E+05	3,09E+05	€ 15,40
BMI/HS carbon fiber	2,64E+07	1,46E+07	1,79E+05	3,23E+05	€ 133,50
Epoxy/aramid fiber	2,18E+07	1,40E+07	3,77E+20	5,87E+20	€ 53,50
Phenolic/E-glass fiber	1,74E+07	1,04E+07	2,38E+19	3,99E+19	€ 23,20
Epoxy/E-glass fiber	1,60E+07	1,13E+07	2,96E+21	4,17E+21	€ 29,97
PA66/E-glass fiber	1,59E+07	1,19E+07	1,28E+22	1,70E+22	€ 5,68
Alluminum 7075, O	1,50E+07	5,36E+06	1,21E+00	3,40E+00	€ 3,54
Ti-6Al-4V	1,10E+07	7,78E+06	3,48E+01	4,91E+01	€ 17,95

Degli indici di prestazione vengono poi ricavati i *valori normalizzati*. Dato che tutti gli indici sono scritti come proprietà *crescenti*, i valori normalizzati saranno dati dalla formula:

$$D_n = \frac{P}{P_{max}} \quad 3.41$$

È quindi possibile ricavare la *funzione di prestazione* relativa ad ogni candidato, data dalla formula:

$$Z = \sum_{i=1}^n \pi_i * D_i = (\pi_{I_{mE}} * D_{I_{mE}}) + (\pi_{I_{m\sigma}} * D_{I_{m\sigma}}) + (\pi_{I_{\rho E}} * D_{I_{\rho E}}) + (\pi_{I_{\rho\sigma}} * D_{I_{\rho\sigma}}) \quad 3.42$$

Tabella 4: Valori normalizzati delle proprietà e valore della Funzione di prestazione Z calcolato per i diversi materiali. [7]

Materiale:	$D_{I_{mE}}$	$D_{I_{m\sigma}}$	$D_{I_{\rho E}}$	$D_{I_{\rho\sigma}}$	Z
Epoxy/HS carbon fiber	9,71E-01	1,00E+00	7,13E-18	7,80E-18	0,6571
Polyimide/HS carbon fiber	9,06E-01	9,94E-01	6,96E-18	7,14E-18	0,6335
Epoxy SMC (55% long carbon fiber)	9,98E-01	6,25E-01	1,01E-17	1,82E-17	0,5409
BMI/HS carbon fiber	1,00E+00	8,31E-01	1,40E-17	1,90E-17	0,6102
Epoxy/aramid fiber	8,26E-01	7,96E-01	2,95E-02	3,45E-02	0,5513
Phenolic/E-glass fiber	6,59E-01	5,90E-01	1,86E-03	2,34E-03	0,4170
Epoxy/E-glass fiber	6,07E-01	6,45E-01	2,31E-01	2,45E-01	0,4967
PA66/E-glass fiber	6,01E-01	6,77E-01	1,00E+00	1,00E+00	0,7594
Alluminum 7075, O	5,69E-01	3,04E-01	9,51E-23	2,00E-22	0,2910
Ti-6Al-4V	4,17E-01	4,42E-01	2,72E-21	2,89E-21	0,2862
π	0,33	0,33	0,17	0,17	

Osservando i diversi valori della *funzione di prestazione*, si nota come il composito a base di fibra di vetro in matrice di Nylon66 sia caratterizzato da un valore visibilmente superiore agli altri candidati. Questa superiorità è tuttavia in gran parte dovuta alle sue elevatissime proprietà di resistività elettrica.

Escluso questo candidato, la *funzione di prestazione* di valore maggiore sono quelle corrispondenti ai compositi a base di fibre di carbonio ad alte prestazioni in matrice di resina epossidica e poliimmidica. Valore di poco inferiore è assegnato al composito a base di fibra aramidica in matrice di resina epossidica.

Tenuto conto della rilevanza delle proprietà meccaniche rispetto a quelle di isolamento elettrico, la scelta ricade quindi per il momento sui compositi a base di fibre di carbonio ad alte prestazioni e fibre aramidiche. Tra i compositi a base di fibra di carbonio si evidenzia in particolare quello in matrice di resina epossidica, sia per le precedenti esperienze del team Race Up nella lavorazione di questa tipologia di matrice, sia per la possibilità di combinare facilmente materiali compositi caratterizzati da matrici della stessa classe.

Definizione della Figura di Merito:

Si passa ora a confrontare tra loro i diversi materiali considerati sulla base del relativo costo. Le diverse funzioni di prestazione calcolate per i diversi materiali verranno ora soppesate, rapportandole al *costo per unità di volume* dei diversi materiali.

Per ogni materiale, la *figura di merito* è quindi data dalla formula:

$$FM = \frac{Z}{C_m \rho} \quad 3.43$$

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Tabella 5: Valori della Figura di merito FM calcolata per i diversi materiali. [7]

Materiale:	Z	Costo/massa [€/kg]	ρ [Kg/mm ³]	FM
Epoxy/HS carbon fiber	0,6571	€ 47,15	1,58E-06	8,85E+03
Polyimide/HS carbon fiber	0,6335	€ 129,00	1,64E-06	2,99E+03
Epoxy SMC (55% long carbon fiber)	0,5409	€ 15,40	1,47E-06	2,39E+04
BMI/HS carbon fiber	0,6102	€ 133,50	1,54E-06	2,97E+03
Epoxy/aramid fiber	0,5513	€ 53,50	1,38E-06	7,47E+03
Phenolic/E-glass fiber	0,4170	€ 23,20	1,85E-06	9,72E+03
Epoxy/E-glass fiber	0,4967	€ 29,97	1,86E-06	8,91E+03
PA66/E-glass fiber	0,7594	€ 5,68	1,80E-06	7,43E+04
Alluminum 7075, O	0,2910	€ 3,54	2,80E-06	2,94E+04
Ti-6Al-4V	0,2862	€ 17,95	4,43E-06	3,60E+03

Anche in questo caso, il costo relativamente basso del composito a base di fibra di vetro in matrice di Nylon66 porta questo materiale ad avere il più alto valore della figura di merito. Al contrario, i materiali che, non considerando i costi, risultano ottimali, ottengono con l'ultima analisi valori di figura di merito notevolmente bassi, come prevedibile dato il loro alto costo.

Conclusione:

Dovendo realizzare pannelli in materiale composito dotati di buone proprietà meccaniche e in grado di fornire un buon isolamento elettrico, si è deciso di ricorrere a laminati composti da lamine di **materiale composito a base di fibra aramidica** e lamine di **materiale composito a base di fibra di carbonio ad alte prestazioni**.

Nonostante i valori della *figura di merito* evidenzino come queste scelte non siano le migliori dal punto di vista dei costi, le elevate proprietà meccaniche di entrambi i materiali e la precedente esperienza maturata dal Team nella loro lavorazione ha portato a selezionarli e a stanziare per questo componente un budget adeguato. Gli stessi sono inoltre stati prodotti e forniti dall'azienda *Microtex* ad un prezzo inferiore a quello previsto. Questa correzione permette un leggero aumento del valore della *figura di merito* per questi materiali, per quanto insufficiente a modificare sostanzialmente i risultati dell'analisi.

Tabella 6: Valore della Figura di merito FM modificato in base al costo/massa dei materiali concordato con il fornitore. [7]

Materiale:	Z	Costo/massa [€/kg]	ρ [Kg/mm ³]	FM
Epoxy/HS carbon fiber	0,6571	€ 42,00	1,58E-06	9,93E+03
Polyimide/HS carbon fiber	0,6335	€ 129,00	1,64E-06	2,99E+03
Epoxy SMC (55% long carbon fiber)	0,5409	€ 15,40	1,47E-06	2,39E+04
BMI/HS carbon fiber	0,6102	€ 133,50	1,54E-06	2,97E+03
Epoxy/aramid fiber	0,5513	€ 47,00	1,38E-06	8,50E+03
Phenolic/E-glass fiber	0,4170	€ 23,20	1,85E-06	9,72E+03
Epoxy/E-glass fiber	0,4967	€ 29,97	1,86E-06	8,91E+03
PA66/E-glass fiber	0,7594	€ 5,68	1,80E-06	7,43E+04
Alluminum 7075, O	0,2910	€ 3,54	2,80E-06	2,94E+04
Ti-6Al-4V	0,2862	€ 17,95	4,43E-06	3,60E+03

Il layup selezionato per la realizzazione dei pannelli e la successiva validazione della scelta tramite le apposite prove meccaniche previste dal regolamento verrà trattato nei prossimi paragrafi.

3.3 Design del laminato

Il laminato è stato progettato impiegando lamine di compositi rinforzati con fibra aramidica e fibra di carbonio. Entrambi i materiali sono compositi a fibre lunghe con tessuto bidirezionale in matrice di resina epossidica e sono forniti sotto forma di preimpregnato.

I materiali sono stati forniti dall'azienda *Microtex Composites*, la quale ha realizzato i preimpregnati sulla base delle richieste effettuate.

Nello specifico, sono stati commissionati:

- Composito in fibra di carbonio ad alte prestazioni ($E = 70000 \text{ Gpa}$, $\sigma = 1000 \text{ Mpa}$) con tessuto bidirezionale in matrice di resina epossidica. I valori approssimativi richiesti sono stati scelti in modo da approssimare il comportamento del composito rinforzato con fibra di carbonio T1000 bidirezionale, già impiegato dal team in passato.
- Composito a base di fibra aramidica con tessuto bidirezionale in matrice di resina epossidica.
- Per entrambi i materiali è stata richiesta una certificazione delle proprietà di *resistenza al fuoco* da presentare obbligatoriamente in sede di evento.

La selezione del layup ottimale verrà trattata nei prossimi paragrafi.

3.4 Realizzazione dei campioni e prove meccaniche ^[2]

Come già menzionato nel paragrafo 3.1, i pannelli costituenti la parte strutturale del componente che non seguano le specifiche fornite devono essere sottoposti a prove meccaniche in condizioni definite dal regolamento.

Tali prove prevedono:

- Una prova di flessione a 3 punti lungo l'asse longitudinale su un provino 500x250 mm posto in semplice appoggio e con carico crescente applicato da un cilindro di diametro 100 mm.

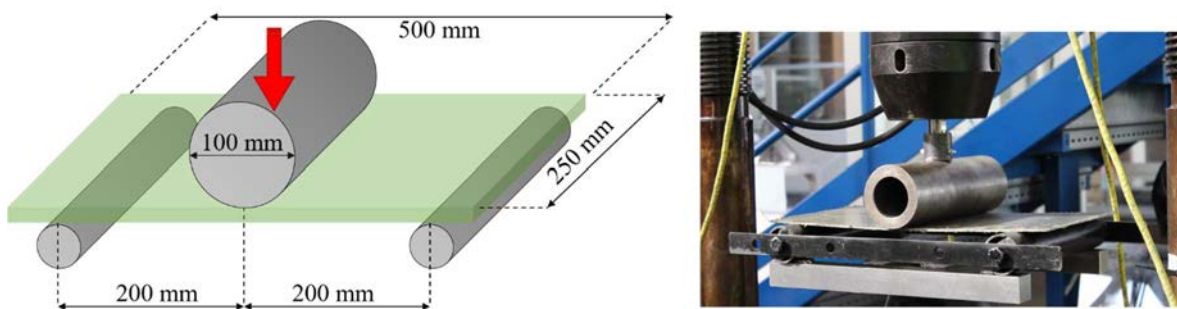


Figura 13: Rappresentazione schematica e fotografia dell'allestimento richiesto dal regolamento per prova di Flessione a 3 punti.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

- Una prova di resistenza al taglio su provino 100x100mm con carico applicato da un punzone cilindrico di diametro 25 mm coassiale a un foro di diametro 32 mm presente sulla superficie di supporto.

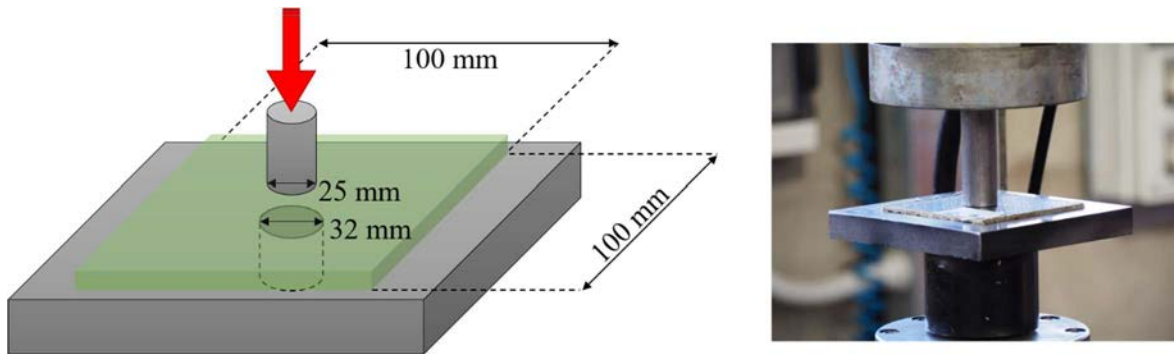


Figura 14: Rappresentazione schematica e fotografia dell'allestimento richiesto dal regolamento per prova di resistenza allo sforzo di taglio.

Di ogni prova dovranno essere presentati i dati numerici *sforzo-deformazione* e il relativo grafico.

Date le migliori prestazioni della fibra aramidica dal punto di vista dell'isolamento elettrico e del carbonio dal punto di vista delle proprietà meccaniche, è stato deciso di impiegare il primo materiale per costituire gli strati più esterni del laminato, per ottenere una superficie isolante, e il secondo per gli strati sottostanti, per massimizzare le proprietà meccaniche.

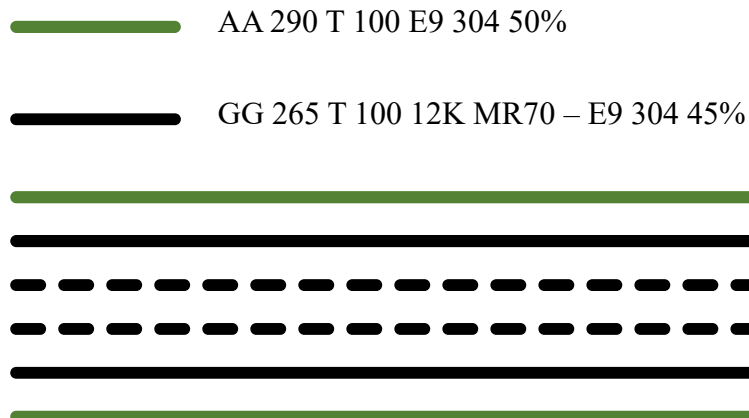


Figura 15: Ipotesi di layup. Si prevede di realizzare gli strati più esterni in materiale a base di fibra aramidica per garantire l'isolamento elettrico e gli strati interni in materiale a base di fibra di carbonio per ottenere buone proprietà meccaniche.

I diversi layup proposti, ideati per garantire proprietà sufficienti al superamento dei test meccanici e contemporaneamente minimizzare massa e consumo di materiali, sono stati analizzati tramite uno script di calcolo MATLAB ideato e realizzato dal Team Race Up.

Tale programma, sviluppato sulla base della teoria dei laminati (*Appendice A*) ha la funzione di calcolare le proprietà meccaniche del pannello e stimarne il comportamento nelle stesse condizioni di vincolo e carico imposte dai test meccanici richiesti dal regolamento.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Ricevuto come *input*:

- I dati relativi alle proprietà delle diverse lamine, inseriti in uno script separato che funge da d
- Il *layout* in esame, nello specifico, la successione delle diverse lamine e l'orientazione delle lamine stesse.

il programma sarà in grado di stimare:

- Il Modulo di elasticità E del pannello.
- Il *gradiente* ovvero la pendenza della curva sforzo deformazione del pannello.
- Il tipo di cedimento, al *core* o alle pelli del pannello e il relativo carico di rottura.
- L'energia di deformazione accumulata al momento del cedimento.
- La massa per unità di superficie del pannello

Questi valori, immessi nel foglio di calcolo *S.E.S.*, permetteranno di valutare, almeno teoricamente, l'aderenza del *layout* alle norme di regolamento per un particolare pannello.

Il programma ha quindi permesso di escludere a priori diverse proposte avanzate per il *layout* in questione, limitando quindi il numero dei test meccanici necessari ai soli provini ritenuti promettenti.

Sono stati quindi prodotti e sottoposti alle prove diversi provini rappresentativi dai *layout* che il programma ha evidenziato come teoricamente compatibili con le esigenze di regolamento. Le configurazioni dei provini testati sono riassunte in Figura 8.

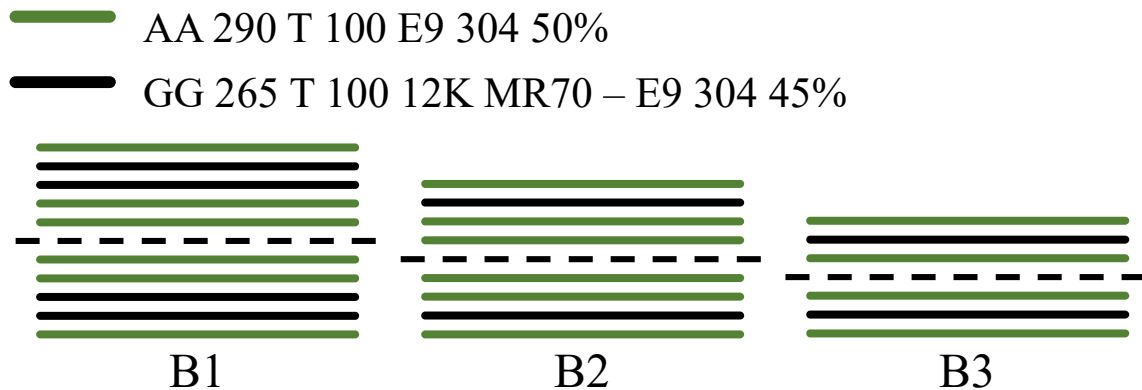


Figura 16: Rappresentazione schematica del *layout* dei provini testati. Dato il più elevato costo del materiale a base di fibra di carbonio si è preferito limitarne l'impiego a 1 o 2 strati immediatamente al di sotto della lamina superficiale. Questa scelta consente di minimizzare i costi mantenendo al contempo delle buone proprietà meccaniche.

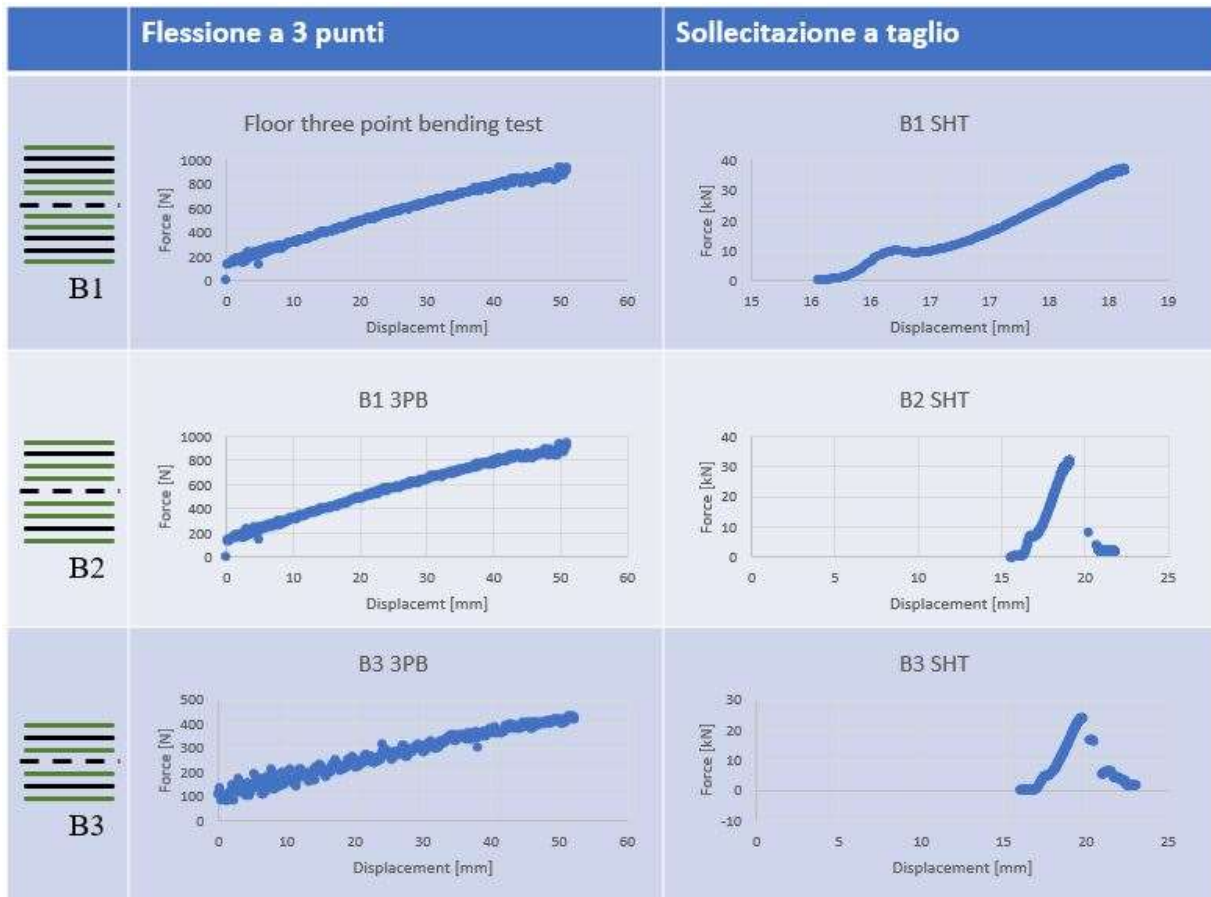
È stata introdotta una variante rispetto all'idea generale presentata in *Figura 11*: l'impiego del più costoso materiale rinforzato con fibra di carbonio sarà limitato ai layers immediatamente inferiori alla lamina superficiale.

Questa scelta ha permesso di ridurre il costo per unità di superficie dei pannelli e, al contempo, posizionare il materiale dotato delle caratteristiche meccaniche migliori in corrispondenza delle sezioni del pannello maggiormente sollecitate. Per contro, questa scelta ha richiesto un maggiore impiego di materiale a base di fibra aramidica, il che ha comportato un aumento dello spessore complessivo dei pannelli, obbligando a una parziale revisione della geometria complessiva del componente per rispettare gli ingombri massimi consentiti dallo spazio in vettura.

3.4.1 Risultati delle prove meccaniche

Sottoposti i campioni alle prove meccaniche precedentemente descritte ed elaborati i dati tramite foglio di calcolo *Excel*, sono stati ricavati i grafici *sforzo-deformazione* richiesti.

Tabella 7: Grafici sforzo-deformazione della prova a flessione a tre punti e sollecitazione a taglio eseguite su provini rappresentativi dei diversi layup.



Esaminando i provini sottoposti alla prova è possibile osservare come la superficie dei provini sottoposti a flessione non presenti in nessun caso segni di rottura, così come non si osservano rilevanti picchi nei grafici Forza – Spostamento corrispondenti. La ragione di questo comportamento è da ricercarsi nelle proprietà dei singoli materiali componenti il pannello, ma anche nella sua configurazione.

Nei normali pannelli sandwich, l'elevato spessore del core conferisce al pannello un elevato momento d'inerzia flessionale ma posiziona le superfici in materiale composito, dall'elevata resistenza a trazione, in corrispondenza dello sforzo di trazione – compressione più elevato, conferendo all'intero sistema un'elevata rigidità a flessione.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

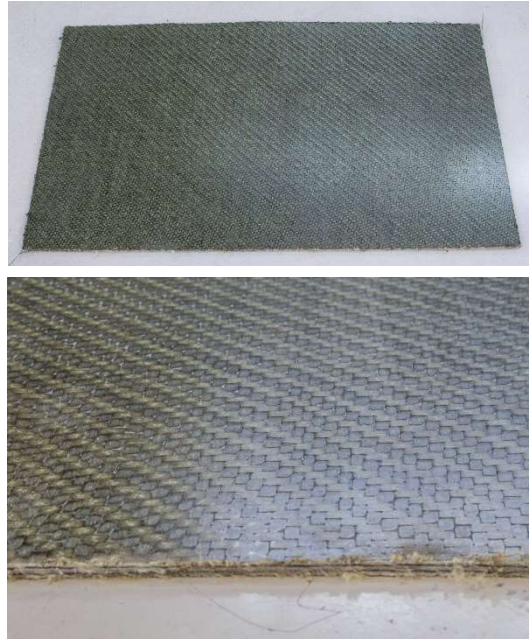


Figura 17: Provino per la prova 3PB e particolare della superficie di applicazione del carico

L'assenza di un *core* di spessore rilevante elimina questo vantaggio, avvicinando le superfici del pannello all'asse neutro della sezione, riducendo notevolmente la rigidità del pannello come visto all'equazione 3.18, aumentandone la deformabilità complessiva. Nel corso della prova si è potuto osservare come il pannello sia stato deformato fino ai limiti consentiti dall'attrezzatura senza mostrare segni di cedimento strutturale.

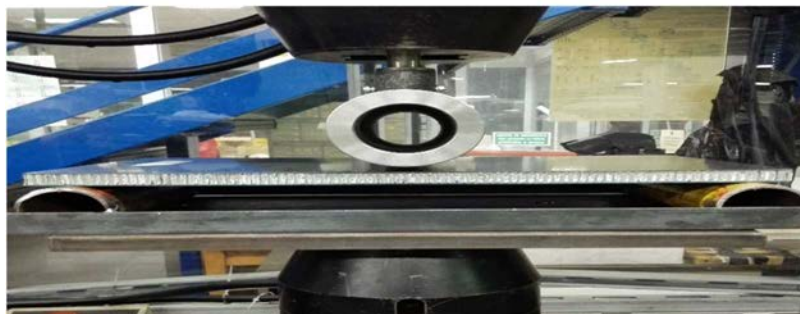
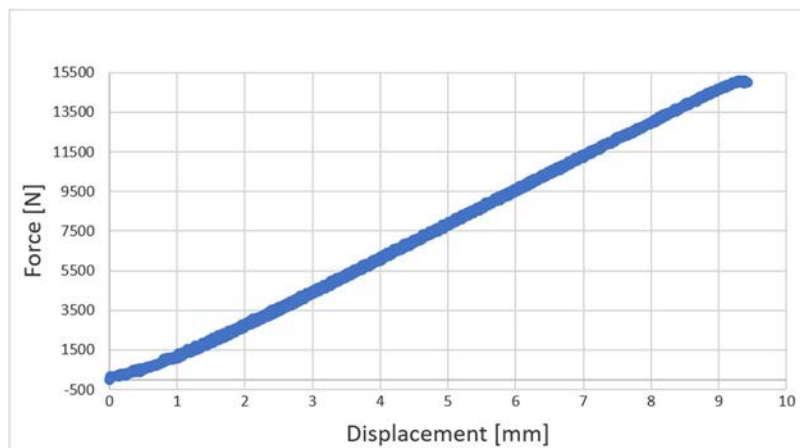


Figura 18: Grafico Forza - spostamento e allestimento di una prova di flessione su tre punti eseguita su un pannello sandwich.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Confrontando i grafici Forza – Spostamento ricavati dalle prove sui pannelli ideati per il contenitore batterie con i dati di una prova analoga eseguita su un pannello sandwich, possiamo notare la similitudine tra i grafici, entrambi assimilabili a curve crescenti con pendenza costante. È tuttavia da notare come il massimo sforzo misurato nei due casi sia più elevato di diversi ordini di grandezza per la prova su pannello sandwich, ad ulteriore riprova dell'incremento in rigidità che la presenza del core conferisce al pannello.

Per quanto riguarda i provini sottoposti a sforzo di taglio, il cedimento è avvenuto, come previsto, in corrispondenza del perimetro sollecitato. L'elevata resistenza del composito a base di fibra aramidica, dotato di eccellenti proprietà di resistenza al taglio, rende lo sforzo di cedimento di questi pannelli piuttosto elevato.



Figura 19: Superficie di applicazione dello sforzo [A] e retro [B] dei provini preparati per la prova di resistenza a taglio subito dopo la prova.

Da un confronto con i dati di un test analogo eseguito su un pannello sandwich costituito da facce di fibra di carbonio su un core di alveolare in alluminio, si può notare come, alle prove eseguite sui pannelli preparati per il contenitore batterie, privi di core, corrispondano un grafico caratterizzato da un solo picco (Tabella 7), mentre a quella eseguite su pannello sandwich corrisponda un grafico a due picchi.

Ciò è legato alla diversa densità e resistenza a taglio di core e facce del pannello sandwich: al cedimento di una faccia, il core sottostante, notevolmente più comprimibile e meno resistente a taglio, oppone una resistenza a penetrazione inferiore, richiedendo un sforzo di intensità inferiore per essere deformato.

Il primo picco corrisponde quindi al cedimento della faccia superiore del pannello e alla trasmissione del carico al core.

La curva ritorna ad essere crescente quando la compressione del core inizia a caricare la faccia inferiore del pannello sandwich, generando pertanto un secondo picco in corrispondenza del cedimento della stessa.

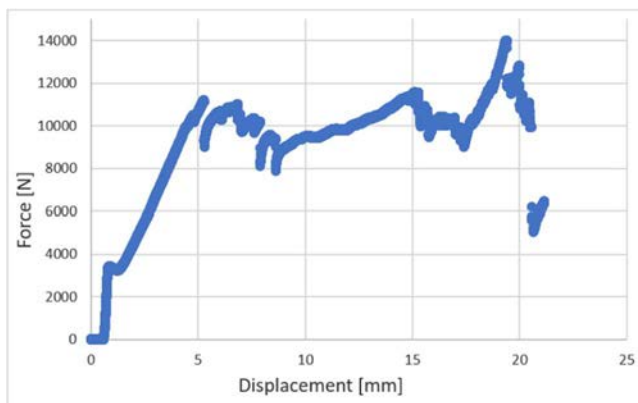


Figura 20: Grafico Forza - spostamento e allestimento di una prova di resistenza a taglio eseguita su un pannello sandwich.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Si può inoltre osservare come il picco massimo nei grafici corrispondenti alle prove sui pannelli preparati per il contenitore batterie sia posizionato ad un valore di forza di $20 \div 40$ kN, a fronte dei 14kN corrispondenti al picco massimo del grafico corrispondente alla prova eseguita su pannelli sandwich.

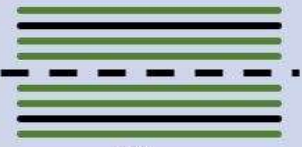
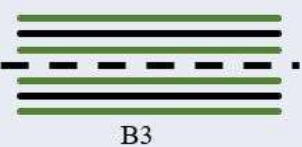
Questo effetto si può spiegare con la combinazione della maggiore resistenza a taglio e penetrazione del composito a base di fibra aramidica impiegato per questi pannelli e all'assenza di core che permette di caricare il pannello per tutto il suo spessore, invece di caricare alternativamente le diverse facce.

3.5 Selezione del layup ottimale:

Immessi i risultati numerici ricavati dai test nel foglio di calcolo S.E.S è stato possibile confrontare univocamente le prestazioni dei diversi layup.

Per il pannello costituente il fondo del contenitore batterie sono richieste proprietà meccaniche superiori rispetto a quelle richieste per le pareti esterne ed interne.

Tabella 8: Layup selezionati per le diverse sezioni del componente e relativi coefficienti di sicurezza calcolati dal foglio di calcolo S.E.S.

Layup	Sezioni realizzate	Coefficienti di sicurezza definiti dal foglio di calcolo S.E.S.	
 B2	<ul style="list-style-type: none">Fondo	Bending Strength	1,48
		Flexural Rigidity	2,35
		Shear	2,95
			PASS
 B3	<ul style="list-style-type: none">Pareti esternePareti interneCoperchio	Bending Strength	1,19
		Flexural Rigidity	2,51
		Shear	3,06
			PASS

— AA 290 T 100 E9 304 50%
— GG 265 T 100 12K MR70 – E9 304 45%

Come si può notare dalla *Figura 15*, il layup B1 risulta essere leggermente più prestazionale rispetto ai layup B2 e B3.

Esso è tuttavia risultato eccessivamente sovradimensionato rispetto agli altri due candidati, comportando un aumento di massa e costo complessivo a fronte di un miglioramento delle proprietà meccaniche non strettamente necessario a norma di regolamento.

È stato quindi selezionato il layup B2 per costituire il fondo del contenitore e il layup B3 per costituire le pareti.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

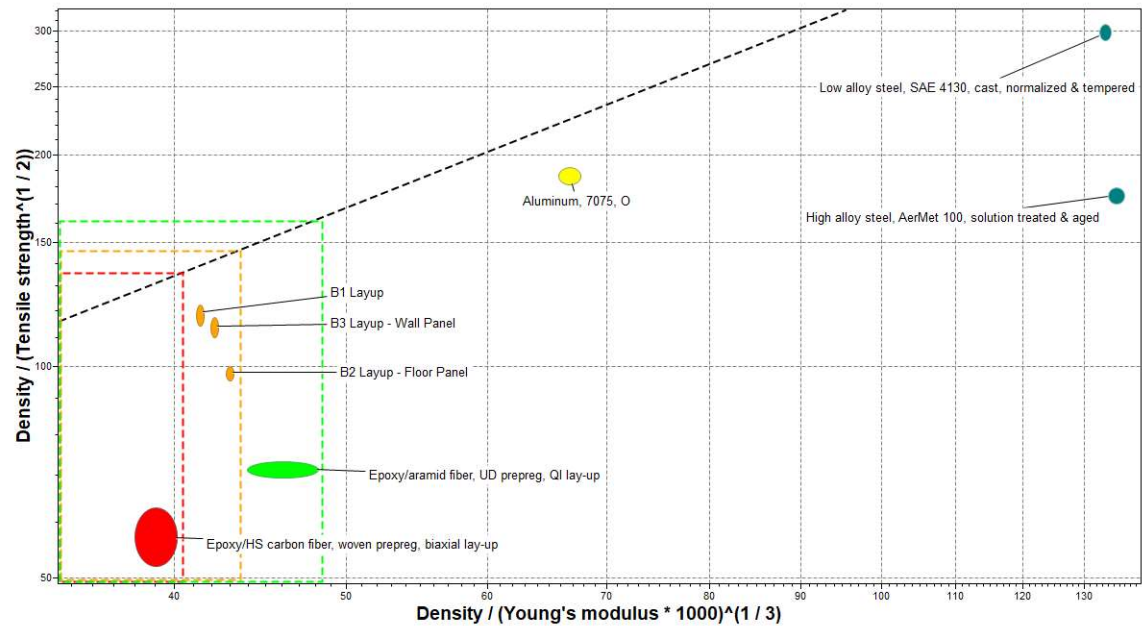


Figura 21: Grafico comparativo ^[3] delle proprietà meccaniche dei pannelli realizzati con i layup B1, B2 e B3, con i compositi costituenti, con la lega di alluminio della precedente versione e inoltre con acciaio alto e basso legato. ^[7]

Questa scelta ha permesso contemporaneamente di minimizzare la massa e lo spessore delle pareti, e quindi l'ingombro del componente, e di presentare i risultati di un unico test valido per i pannelli costituenti le pareti esterne, le pareti interne e il coperchio del componente. E' stato quindi possibile risparmiare il materiale necessario alla realizzazione di ulteriori provini, il cui costo è, come già accennato, non indifferente, e inoltre di ridurre le tempistiche di esecuzione dei test meccanici ed elaborazione dei dati.

CAPITOLO 4

SCELTE PROGETTUALI E REALIZZAZIONE

4.1 Geometria

La geometria del componente è stata sviluppata apportando alcune modifiche minori alla geometria della precedente versione del componente. I pannelli in materiale composito, di spessore maggiore rispetto alle controparti in lega di alluminio, hanno inevitabilmente aumentato il contributo dello spessore pareti all'ingombro, obbligando a una riduzione della dimensione degli alloggiamenti dei segmenti di celle e dei supporti per permettere l'assemblaggio in vettura.

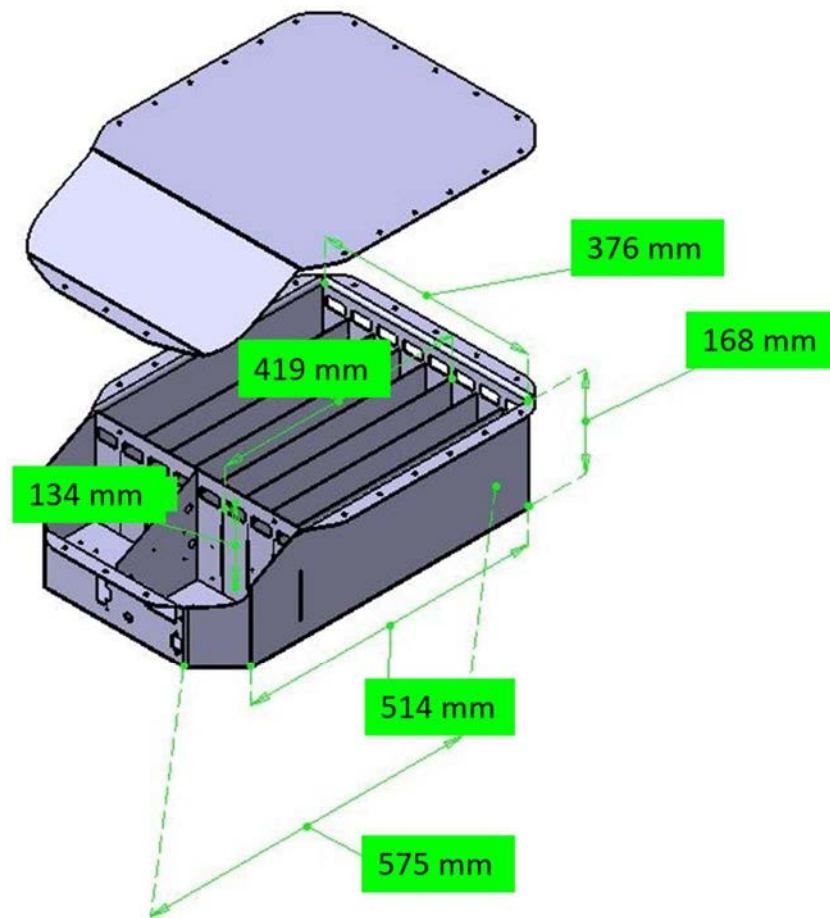
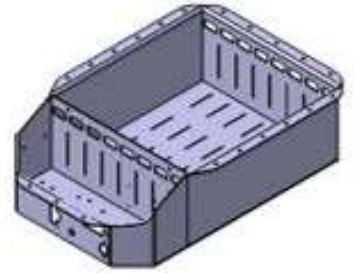


Figura 22: Geometria del componente da disegno di progettazione a CAD.

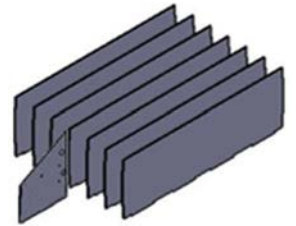
Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Il componente è stato realizzato in 4 parti separate che verranno poi assemblate per incollaggio con adesivo strutturale *fire resistant*:

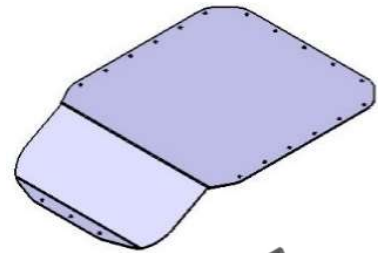
- **Main Box:** La struttura principale del componente. La sezione contenente le celle sarà realizzata seguendo i layup B2 e B3 precedentemente selezionati secondo le norme di regolamento. Il compartimento frontale, che andrà ad accogliere i componenti elettronici necessari al controllo delle celle, non ha funzione strutturale e non ne è richiesta verifica delle proprietà meccaniche ed è pertanto realizzato con un layup non testato (Aramidico/Carbonio/Aramidico).



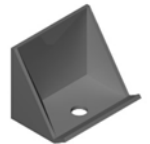
- **Internal Walls:** Le pareti interne, responsabili della separazione e dell'isolamento reciproco dei diversi segmenti di celle. Sono state realizzate con layup B3 e successivamente assemblate all'interno della *Main Box* utilizzando adesivo strutturale *fire resistant*. Il separatore da includere nella sezione frontale, analogamente alla sezione frontale stessa, non ha funzione strutturale e non è pertanto necessario impiegare un layup testato.



- **Cover:** Il coperchio del contenitore batterie, realizzato con layup B2 e assemblato alla *Main Box* mediante 20 viti M6 come prescritto da regolamento.



- **Supporti:** Responsabili della giunzione del componente al fondo del telaio in monoscocca della vettura. La necessità di ridurre gli ingombri ha portato a realizzarli in lamiera d'acciaio CrMo4 di spessore 2mm. Anche i supporti sono stati assemblati alla *Main Box* utilizzando adesivo strutturale *fire resistant*.



4.2 Processo produttivo e realizzazione

Il processo produttivo del componente si è articolato in diverse fasi successive, riassunte nel diagramma in Figura 17.

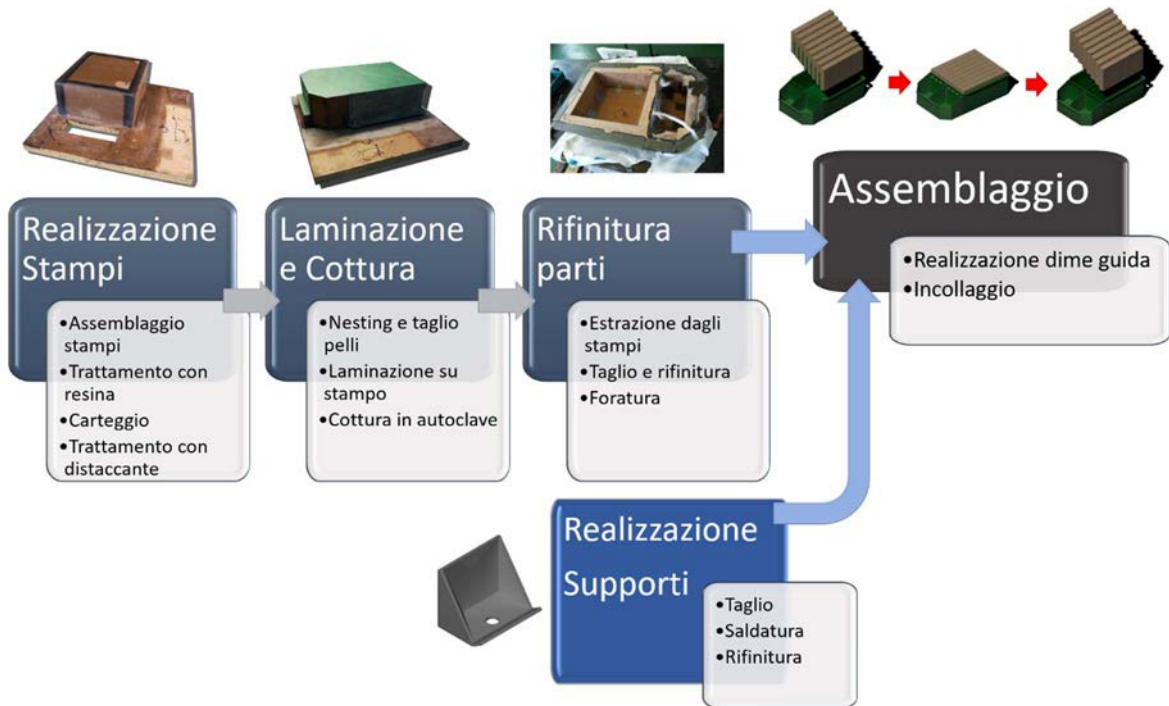


Figura 23: Schematizzazione del processo di realizzazione del contenitore batterie.

4.2.1 Realizzazione stampi:

La laminazione è stata effettuata su stampi maschio realizzati manualmente a partire da pannelli in MDF, materiale economico, di facile lavorazione e già precedentemente utilizzato dal Team per questo scopo.

Per realizzare il corpo principale del contenitore batterie stato ideato uno stampo composto da due sezioni differenti:

- La sezione principale, matrice della *Main box*.
- Una sezione secondaria, matrice del compartimento elettronica, che verrà, come vedremo, impiegata in una seconda fase della laminazione.

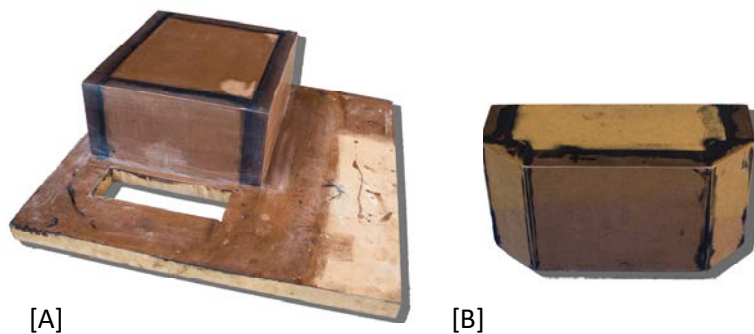


Figura 24: Stampi in MDF della Main Box [A] e del compartimento elettronica [B] già trattati con resina e carteggiati.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Per le pareti interne si sono impiegati dei semplici pannelli di MDF. Ciascun pannello è stato utilizzato come matrice di due componenti parete che, una volta trattati costituiscono un lavorato unico che deve pertanto essere diviso nei due componenti distinti.



Figura 25: Stampi in MDF dei componenti parete già trattati con resina e carteggiati. Ciascuno stampo fungerà da matrice a due componenti parete che verranno poi separati per taglio.

Analogamente, lo stampo del coperchio del contenitore è stato realizzato assemblando una struttura in pannelli di MDF.



Figura 26: Stampi in MDF del coperchio del contenitore, già trattato con resina e carteggiato.

Tutti gli stampi sono stati assemblati dove necessario per mezzo di semplici viti autofilettanti. La facilità di disassemblaggio degli stampi dopo la cottura del composito ha permesso una facile estrazione del componente, evitando l'inclusione di angolo di sformo, ottenendo quindi pareti perfettamente perpendicolari al fondo. Per contro, stampi di questo tipo vengono irrimediabilmente danneggiati dopo l'estrazione e difficilmente possono essere utilizzati nuovamente.

Gli stampi grezzi sono stati quindi ricoperti con 3 strati successivi di resina fenolica bicomponente, avente la doppia funzione di omogeneizzare la superficie e minimizzare l'aderenza della matrice del composito allo stampo.

Dopo un accurato carteggio della superficie con carte di grana progressivamente più fine, ottenuta la migliore finitura superficiale possibile, ogni stampo è stato trattato con distaccante HP7, a base di resina polimerica diluita con un idrocarburo alifatico. Questo agente distaccante, largamente impiegato nel campo dei compositi, è caratterizzato dalla facilità di applicazione e dall'efficacia nel prevenire adesioni della resina allo stampo, senza per questo alterare il manufatto finale ^[4]

4.2.2 Laminazione e cottura:

Data la configurazione geometrica piuttosto semplice del componente il taglio delle diverse pelli da laminare è stato effettuato manualmente, senza ricorrere a software per *nesting* o a taglio automatizzato.

Ogni pelle è stata applicata allo stampo manualmente e compressa per eliminare sacche d'aria in grado di causare difetti nel prodotto finito.

Il laminato è stato quindi avvolto in tessuto non tessuto, utilizzato per facilitare il passaggio dell'aria nel sacco a vuoto, sigillato con nastro di butilene.

Ogni cottura è stata effettuata a $T = 130^{\circ}C$ e $P = 2 \text{ bar}$ per un tempo di 90 minuti come raccomandato dal fornitore.

Il processo di laminazione del corpo principale del componente, costituito da *Main Box* e compartimento elettronica, è stato articolato in due fasi successive con una cottura intermedia.

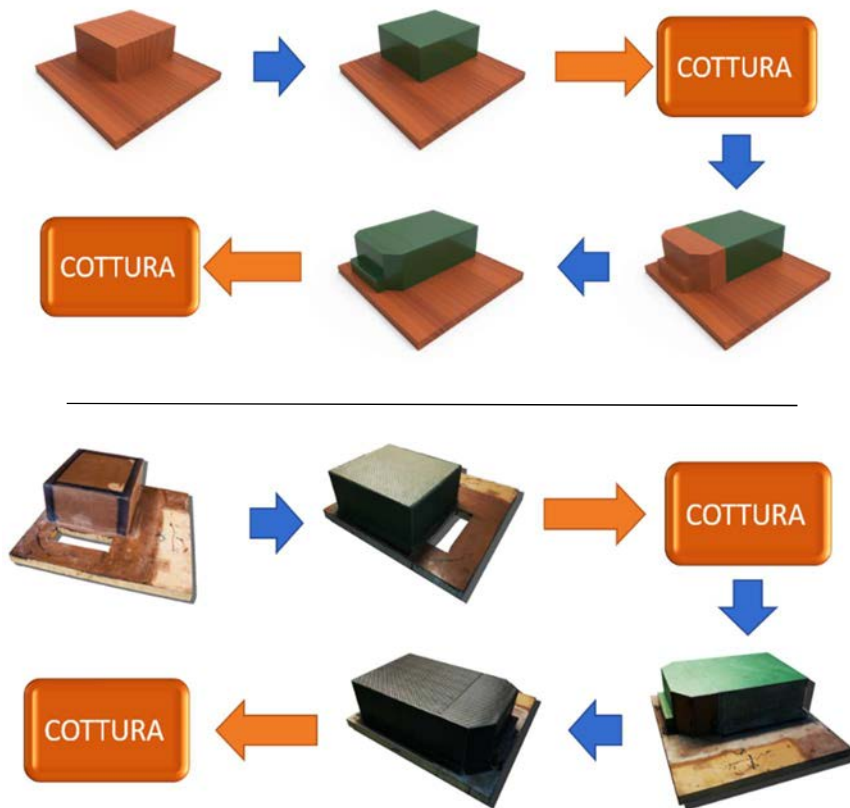


Figura 27: Processo di laminazione e cottura del corpo principale del contenitore batterie.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Sono stati laminati i primi 5 layers della *Main Box* sulla porzione di stampo predisposta e l'intero sistema è stato inviato al trattamento in autoclave. A cottura terminata lo stampo non è stato rimosso e ed è stata aggiunta la seconda porzione di stampo, matrice del compartimento elettronica. Sigillate le fessure grazie a nastro adesivo apposto, si è proceduto a laminare i rimanenti layers costituenti il layup della *main box* su tutta la superficie del sistema, andando quindi a completare il layup della *main box* e a costituire il layup del compartimento elettronica, per poi inviare nuovamente il sistema in autoclave per una seconda cottura.

Il risultato è un componente monolitico, senza interruzioni o giunzioni tra la *Main Box* e il compartimento elettronica.

La semplice geometria degli stampi utilizzati per le pareti e il coperchio del contenitore batterie hanno consentito una laminazione semplice e rapida e una cottura unica.

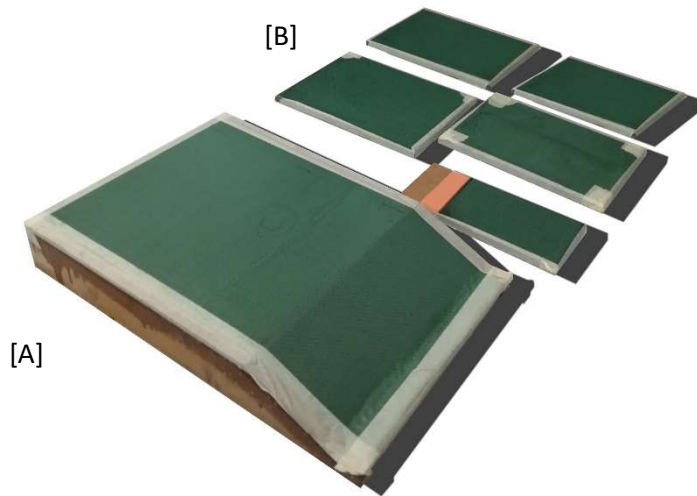


Figura 28: Laminati non trattati del coperchio [A] e dei componenti parete [B] del contenitore batterie.

4.2.3 Rifinitura parti:

Data l'assenza di angoli di sforno, l'estrazione dallo stampo è stata possibile solo deassemblando o rompendo gli stampi stessi, appositamente concepiti come stampi monouso, non riutilizzabili per un eventuale secondo pezzo.



Figura 29: Il corpo principale del contenitore batterie nel sacco a vuoto.

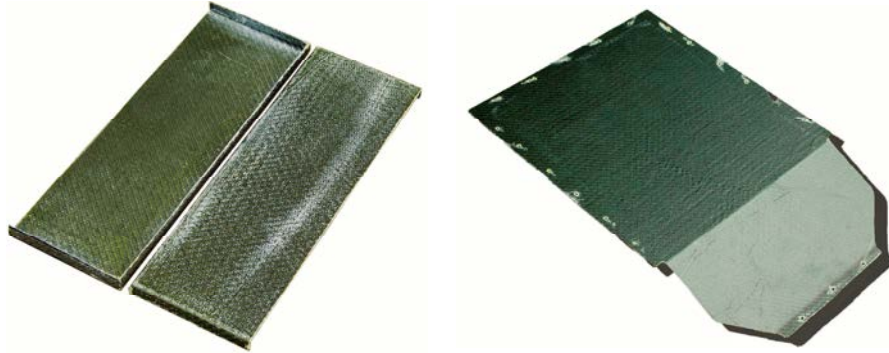


Figura 28: Due componenti parete e coperchio del contenitore batterie durante le fasi di rifinitura.



Figura 29: Visuale dello stampo del sistema Main Box + compartimento elettronica dopo la rimozione della base dello stampo.

Ogni pezzo è stato quindi rifinito per mezzo di una lama a disco per adattarsi alla geometria prevista. E la superficie dei componenti parete non a contatto con lo stampo è stata accuratamente carteggiata per ridurre al minimo l'attrito delle celle al litio contro le pareti interne. I residui di lavorazione sono stati quindi eliminati con carta vetrata e l'intero componente è stato accuratamente ripulito con aria compressa prima dell'assemblaggio con adesivo *fire resistant*.

4.2.4 Realizzazione dei supporti:

Il regolamento ^[1] prevede tre possibili vie per il design dei supporti:

- Realizzare i supporti in acciaio di spessore minimo 1.6 mm.
- Realizzare i supporti in lega di alluminio di spessore minimo 4 mm.
- Realizzare i supporti in materiale alternativo, comprovandone le equivalenti prestazioni mediante calcoli numerici e prove meccaniche.

La necessità di realizzare i componenti in tempi brevi, unita a quella di ridurre l'ingombro complessivo del contenitore batterie per rispettare gli spazi in vettura, ha portato a seguire la prima strada.

I supporti, 10 in tutto, sono stati realizzati a partire da lamiera di acciaio 42CrMo4. Il dimensionamento della superficie di incollaggio è stato trattato nel *paragrafo 3.1*. Per quanto riguarda il dimensionamento complessivo, il regolamento prescrive di rispettare specifiche caratteristiche geometriche e non è pertanto risultato necessario ricorrere a ulteriori studi.

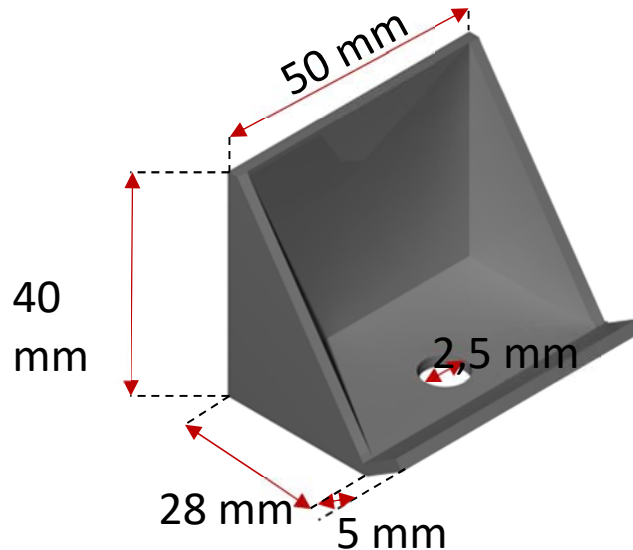


Figura 30: Rappresentazione da disegno a CAD dei supporti del contenitore batterie.

Tagliati i diversi componenti del pezzo, questi sono stati assemblati mediante saldatura a TIG, forati e rifiniti.

4.2.5 Assemblaggio: Metodi e giunzioni

Ogni giunzione presente nel componente è stata realizzata per incollaggio con adesivo strutturale *fire resistant*, fatto salvo per il coperchio, a giunzioni bullonate. È stato necessario realizzare delle dime guida in MDF per assicurarsi di rispettare i precisi spazi consentiti sia per l'inserimento delle celle nel contenitore che per l'assemblaggio in vettura.

Dime di spessore e numero pari ai segmenti di celle al litio sono state impiegate per il montaggio delle pareti interne del contenitore mentre per l'incollaggio dei supporti esterni è stata impiegato un pannello forato in modo tale da riprodurre le posizioni dei fori vite sul fondo della scocca.

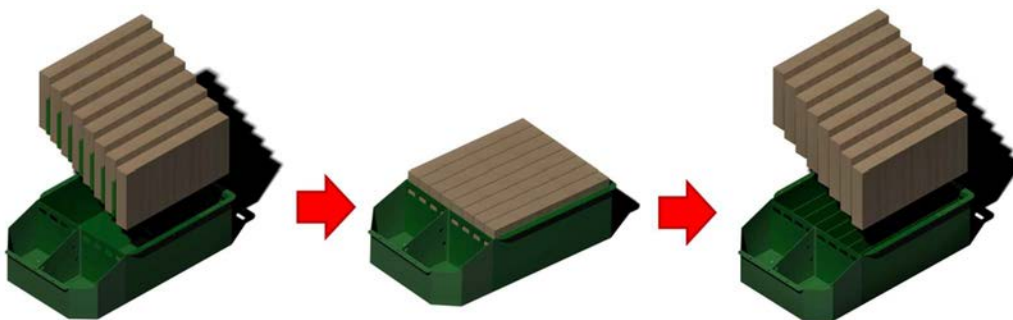


Figura 31: schematizzazione dell'operazione di incollaggio delle pareti interne: pareti e dime vengono disposte nel corretto ordine e, applicato l'adesivo strutturale sulle superfici di incollaggio, l'intero sistema viene inserito nel contenitore.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae



Terminato l'incollaggio e verificati gli ingombri e l'allineamento dei fori vite in vettura, sono state effettuate le ultime rifiniture prima della messa in opera del contenitore batterie.

Eventuali residui di adesivo sono stati asportati ed eventuali angoli o spigoli vivi sono stati smussati tramite carta abrasiva. Sono quindi stati praticati i fori necessari alla circolazione dell'aria, l'installazione dei componenti elettronici e i fori vite per il fissaggio del coperchio.

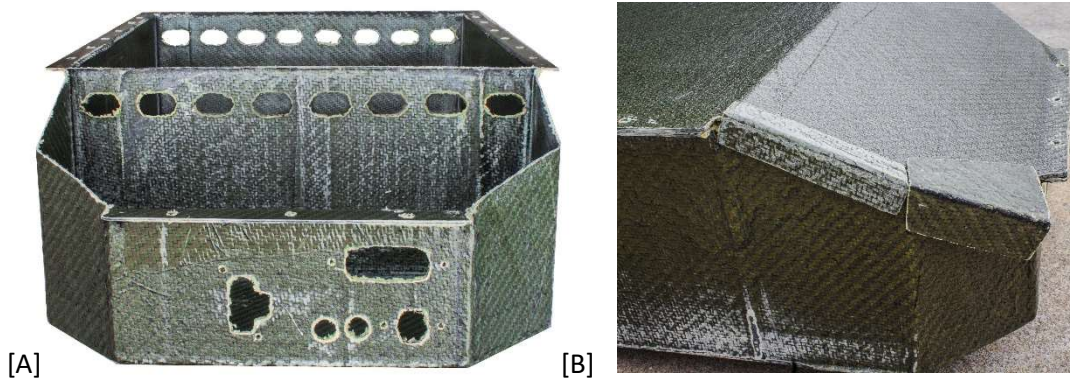


Figura 33: [A] Vista frontale del contenitore batterie: visibili i fori necessari all'installazione dei componenti elettronici e alla circolazione dell'aria di raffreddamento. [B] Coperture protettive installate sul coperchio in corrispondenza delle prese d'aria anteriori del contenitore batterie.

Sono state montate, sempre per incollaggio con adesivo *fire resistant*, in corrispondenza delle prese d'aria anteriori, delle coperture sul coperchio, per scongiurare la penetrazione di acqua dall'alto durante il *rain test*, e delle reti in materiale polimerico per evitare la penetrazione di corpi estranei durante il trasporto, il montaggio o l'utilizzo del componente.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Effettuata un'accurata pulizia dell'intero componente per eliminare residui di lavorazione e polvere, il contenitore batterie può ritenersi ultimato e pronto per l'installazione delle celle al litio e della



Figura 34: Il contenitore batterie ultimato e pronto per l'installazione delle celle al litio e dei componenti elettronici.



Figura 35: Rendering del contenitore batterie completamente assemblato.



Figura 36: Vista frontale del contenitore batterie assemblato e del carrello adibito al trasporto del componente e dell'attrezzatura necessaria alla manutenzione e alla carica delle batterie.

4.3 Test e conclusioni

Prima dell'installazione dei segmenti di celle al litio e componenti elettronici, si è proceduto a una pesatura del componente e a un confronto con la precedente versione in lega di alluminio.



Figura 37: Pesatura delle due versioni del componente.

- **Confronto in base alla massa complessiva:**

A fronte dei 9.70 Kg della versione in alluminio, la nuova versione in materiale composito è risultata avere una massa di 5.50 Kg, pari al 56.7% del peso della precedente versione, per un riduzione complessiva della massa del 43.3%.

- **Confronto in base alle proprietà di isolamento elettrico:**

La precedente versione del componente, realizzata in materiale conduttivo, ha reso necessario isolare le celle al litio dal contenitore rivestendole di carta aramidica isolante. La nuova versione in materiale composito, impiegando materiale plastico rinforzato con fibra aramidica per costituire le superfici interne ed esterne, ha eliminato la necessità di ulteriore isolamento, riducendo inoltre il rischio di cortocircuiti durante le fasi di montaggio e manutenzione. La nuova versione risulta pertanto più sicura per quanto riguarda l'aspetto del rischio elettrico.

- **Confronto in base al costo complessivo:**

Considerando il costo/massa medio della lega di alluminio impiegata (*paragrafo 3.2*), il costo delle operazioni di taglio e considerate come gratuite le operazioni di saldatura, eseguite dal personale di Oz Racing, il costo complessivo della versione in lega di alluminio si attesta attorno ai 250€. La nuova versione in materiale composito, con un costo finale complessivo di 1340€, risulta notevolmente più costosa.

- **Confronto in base ai tempi di lavorazione e alle problematiche emerse:**

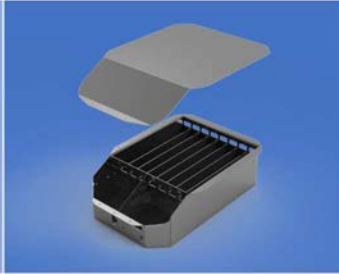
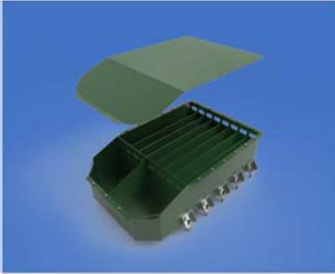
La realizzazione della versione in lega di alluminio ha richiesto naturalmente un'accurata progettazione della geometria. La realizzazione pratica è consistita, tuttavia, in operazioni prevalentemente commissionabili a soggetti esterni al team e di esecuzione relativamente rapida.

Come si può evincere dalla trattazione dei paragrafi precedenti, la realizzazione della nuova versione del contenitore batterie, richiedendo diverse operazioni preliminari, come la costruzione degli stampi, sia successive alla realizzazione del componente stesso, risultando pertanto notevolmente più complessa e articolata.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

- **Confronto in base all'ingombro in vettura:** La revisione della geometria del componente ha permesso, riducendo gli spazi predisposti ad accogliere i segmenti di celle al litio, di ridurre la larghezza del componente, risparmiando spazio in vettura e facilitando l'operazione di assemblaggio.

Tabella 9: Confronto tra le versioni del contenitore batterie sulla base di costi, processo produttivo, massa complessiva e sicurezza.

		
COSTO COMPLESSIVO	250 €	1340 €
REALIZZAZIONE	Relativamente semplice	Complessa e articolata
MASSA COMPLESSIVA	9,70 Kg	5,50 Kg
ISOLAMENTO ELETTRICO	Materiale conduttivo: Necessario l'impiego di materiale isolante aggiuntivo.	Materiale non conduttivo: Non è necessario ulteriore isolamento.

Nel complesso, la realizzazione della versione in materiale composito del contenitore batterie risulta più costosa, più complessa e più lunga. Questi difetti sono tuttavia compensati dalla maggiore sicurezza del componente e soprattutto dal consistente risparmio sulla massa complessiva, entrambi fattori determinanti in una scelta ingegneristica nell'ambito della realizzazione di vetture da competizione.

4.4 Futuri sviluppi

Durante la progettazione e la realizzazione del contenitore batterie sono state avanzate diverse ipotesi che potrebbero consentire di ottenere una futura versione del componente con prestazioni migliori o facilitarne e accelerarne il processo di realizzazione.

- **Maggiore impiego di materiale a base di fibra di carbonio:**

Qui impiegato in quantità limitata, principalmente per questioni economiche, le migliori caratteristiche meccaniche dei materiali a base di fibra di carbonio consentono di ottenere pannelli laminati con prestazioni equivalenti impiegando un numero minore di layers.

Questa soluzione, oltre a rendere l'intero sistema più leggero, consentirebbe di ridurre gli spessori, per un minore ingombro in vettura e una più facile installazione dei segmenti di celle al litio negli alloggiamenti e del contenitore stesso all'interno della scocca.

Il maggiore costo/unità di volume di questi materiali farebbe naturalmente crescere il costo complessivo del componente.

- **Laminazione a doppio stampo per pareti interne e coperchio:**

Laminando i componenti piani del contenitore batterie tra due piastre ad alta finitura superficiale si otterrebbero componenti con alta finitura superficiale a loro volta.

Questa soluzione, di realizzazione piuttosto semplice, consentirebbe di migliorare la finitura delle superfici interne degli alloggiamenti per le celle al litio in modo decisamente più semplice ed efficace rispetto alla levigatura manuale.

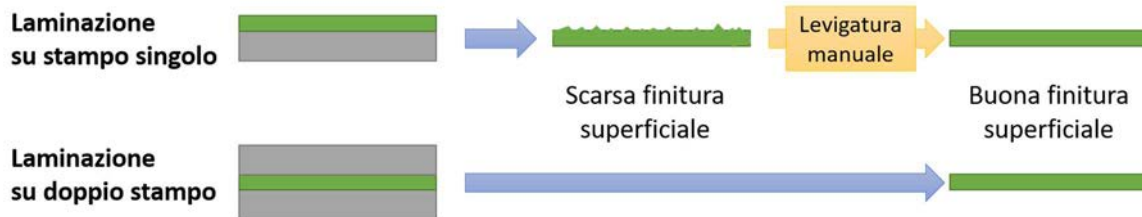


Figura 38: Differenza tra la laminazione su stampo singolo o su doppio stampo. La seconda scelta consente di ottenere un migliore finitura superficiale eliminando la necessità di levigature manuali.

- **Modifiche alla geometria dei provini:**

I provini sottoposti ai test meccanici, costituiti da piastre piane e regolari, presentano delle proprietà meccaniche inferiori rispetto a quelli reali che, per consentire l'assemblaggio, presentano dei profili angolari lungo 3 lati del perimetro, i quali hanno il duplice effetto di fungere da superficie di incollaggio e di incrementare notevolmente la resistenza a flessione del pannello.

Sottoposti a test, i provini con questa particolare configurazione risulterebbero certamente avere proprietà meccaniche superiori ai semplici provini piani, consentendo di ridurre notevolmente spessori e massa senza per questo diminuire le proprietà meccaniche o costituire ingombro.

APPENDICI

A. Teoria dei Laminati ^[5]

Dal punto di vista funzionale, un composito può essere definito come un materiale ottenuto combinando materiali diversi in modo tale da offrire migliori proprietà complessive rispetto ai singoli componenti. Un composito è tipicamente costituito da una fase continua, detta *matrice*, e da una fase di *rinforzo*, tipicamente composta da fibre corte o lunghe o da particelle, disperse in essa.

In questa appendice verranno discusse le proprietà dei compositi a fibre lunghe e il procedimento matematico per stimare le proprietà a partire dai dati di fibre e matrice.

Vantaggi e svantaggi dei materiali compositi:

Le proprietà meccaniche dei materiali compositi dipendono in genere principalmente dalle proprietà della fase di rinforzo, mentre la matrice ha lo scopo di contenere e proteggere le fibre o le particelle. Un materiale *fibrorinforzato* è pertanto un materiale ortotropo che presenta ottime proprietà meccaniche lungo la direzione di principale orientazione delle fibre e proprietà piuttosto scarse in direzione ortogonale alle fibre.

Per massimizzare le prestazioni meccaniche di un componente in materiale composito è pertanto necessario:

- Determinare gli sforzi ai quali il componente sarà sottoposto e lo stato di tensione derivante.
- Progettare opportunamente la geometria del componente e la disposizione del rinforzo in esso.

Caratteristico vantaggio dei materiali compositi rispetto ad altre classi di materiali è il rapporto *proprietà meccaniche/densità* generalmente elevato, permettendo la realizzazione di componenti con buone proprietà meccaniche a fronte di una massa complessiva relativamente contenuta.

Principali svantaggi dei materiali compositi sono, d'altra parte, costi di produzione e lavorazione piuttosto alti, processi produttivi difficilmente automatizzabili e la difficile o impossibile riparazione di un componente danneggiato.

A1: La lamina unidirezionale a fibre lunghe

Il modello della lamina unidirezionale a fibre lunghe consente di studiare il comportamento di questo particolare tipo di compositi.

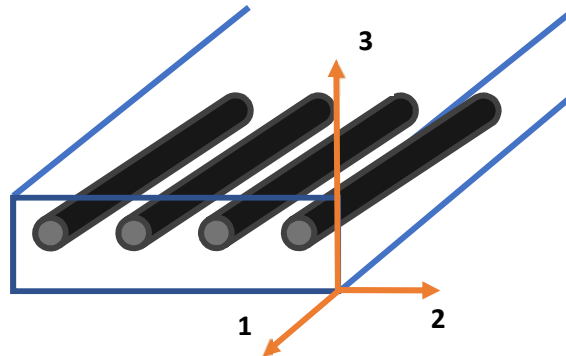


Figura 39: Sistema di riferimento convenzionale per il modello della lamina unidirezionale a fibre lunghe.

Le ipotesi sulle quali il modello è basato sono:

- Fibre:
 - A comportamento elastico.
 - Continue per tutta la lunghezza considerata.
 - Di diametro costante.
 - Disposte uniformemente nella matrice.
 - Tra loro parallele.
- Matrice a comportamento elastico.
- Perfetta interfaccia fibra-matrice.
- $\nu_{fibre} \approx \nu_{matrice}$

Date le suddette ipotesi, le proprietà meccaniche del composito possono essere stimate conoscendo quelle di fibre e matrice costituenti e la frazione volumetrica e la disposizione delle fibre nella matrice. Di seguito verranno trattati i modelli considerati più attendibili per lo studio delle proprietà meccaniche di questa classe di materiali, sui quali sono stati basati i calcoli eseguiti per questo lavoro di tesi.

Calcolo del modulo elastico in direzione parallela e perpendicolare alle fibre:

- *Relazione di Maxwell:* $E_1 = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$ A.1
- *Formula di Halpin – Tsai:* $\frac{E_2}{E_m} = (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f) \rightarrow E_2 = \frac{(1 + \xi \eta V_f) E_m}{(1 - \eta V_f)}$ A.2
 - $E_{f/m}$ = Modulo elastico delle fibre/della matrice.
 - $V_{f/m}$ = Frazione volumetrica delle fibre/della matrice.
 - $\eta = (\frac{E_f}{E_m} - 1) / (\frac{E_f}{E_m} + \xi)$ A.3
 - ξ = Costante derivante da dati sperimentali (≈ 2)

Calcolo del modulo di Poisson:

- $\nu_1 = \nu_f V_f + \nu_m V_m = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$ A.4
- *Relazione di Maxwell:* $\nu_{21} = \nu_{12} E_2 / E_1$ A.5

Calcolo del modulo a Taglio:

- *Formula di Halpin – Tsai:* $\frac{G_{12}}{G_m} = (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f) \rightarrow G_{12} = \frac{(1 + \xi \eta V_f) G_m}{(1 - \eta V_f)}$ A.6

Calcolo del coefficiente di espansione termica:

- $\alpha_1 = \frac{\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m (1 - V_f)}{E_f V_f + E_m (1 - V_f)}$ A.7
- $\alpha_2 = (1 + \nu_m) \alpha_m (1 + V_f) + (1 + \nu_f) \alpha_f V_f - \alpha_1 [\nu_f V_f + \nu_m (1 + V_f)]$ A.8

Lamina unidirezionale e comportamento elastico:

Considerando la *Legge di Hooke*, espresso in termini matriciali,

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad \text{A.9}$$

E assumendo la lamina come ortotropa (simmetrica rispetto a 3 piani), e lo *stato di tensione* come piano, abbiamo:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}; \quad \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{A.10}$$

dove [S] e [Q] sono rispettivamente:

$$\text{la Matrice di flessibilità ridotta } [S] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad \text{A.11}$$

$$\text{e la Matrice di Rigidezza ridotta } [Q] = \begin{bmatrix} E_1/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) & \nu_{21}E_1/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) & 0 \\ \nu_{12}E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) & E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad \text{A.12}$$

E' quindi possibile studiare il comportamento meccanico della lamina sollecitata lungo le direzioni 1 e 2 del sistema di riferimento. Vedremo ora come sulla base di queste informazioni sia possibile studiare il comportamento meccanico della lamina sottoposta ad uno stato di tensione piano di orientazione generica.

A2: Comportamento della lamina sottoposta a sollecitazioni generiche

Consideriamo il Sistema di riferimento (x;y), ruotato dell'angolo θ rispetto al sistema originario (1;2). Nel sistema (x;y) I tensori di sforzo e deformazione saranno:

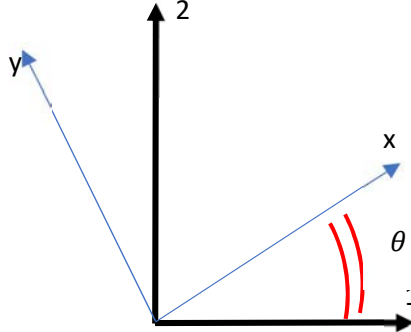


Figura 40: sistema di riferimento originale (1;2) e ruotato (x;y)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = [R] \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad \text{A.13}$$

$$\text{Matrice di deformazione: } [R] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad \text{A.14}$$

$$\text{Matrice di trasformazione: } [T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad \text{A.15}$$

La Matrice di Rigidity ridotta della lamina nel nuovo Sistema di riferimento è quindi:

$$[Q]^\theta = [T][Q][R]^{-1} \quad \text{A.16}$$

Calcolati I coefficienti di $[Q]^\theta$, è possibile calcolare quelli di E_1, E_2, ν_1, ν_2 e G_{12} mediante semplici inversioni delle formule.

Comportamento del laminato sottoposto a sollecitazioni generiche:

Il comportamento del laminato può essere previsto conoscendo proprietà, orientazione e distribuzione delle diverse lamine.

È innanzitutto necessario fissare il Sistema di riferimento desiderato e calcolare quindi la matrice $[Q]^\theta$ per ogni lamina, ruotata dell'appropriato angolo θ rispetto al sistema selezionato.

La formula

$$Q_{ij}^L = \sum_{K=1}^n Q_{ij}^k V_k \quad \text{A.17}$$

Ci fornisce pertanto i coefficienti della matrice $[Q]^L$ e consente di calcolare le proprietà e prevedere il comportamento sotto sforzo del laminato in modo del tutto analogo a quanto visto per la singola lamina.

B. Materiali compositi Fire Resistant

Come specificato nei primi paragrafi di questo lavoro di tesi, per i materiali alternativi impiegati per il contenitore batterie viene obbligatoriamente richiesta certificazione delle proprietà di *autoestinguenza*. L'intento è di evitare che un piccolo innesco, derivante da eventuali cortocircuiti, malfunzionamenti o lesioni alle celle al litio, propaghi a tutto il componente, deteriorando segmenti di celle isolate e dando origine a pericolose reazioni a catena.

Criteri di sicurezza per un materiale polimerico, dal punto di vista del comportamento al fuoco sono:

- Elevate proprietà di autoestinguenza.
- Basso contributo termico.
- Fumi poco densi.
- Prodotti di combustione non tossici.

La combustione di un materiale polimerico avviene tipicamente a causa della decomposizione termica dello stesso e alla conseguente produzione di composti infiammabili e volatili, i quali, esposti al calore possono raggiungere la temperatura di innesco, incendiandosi e producendo ulteriore calore.

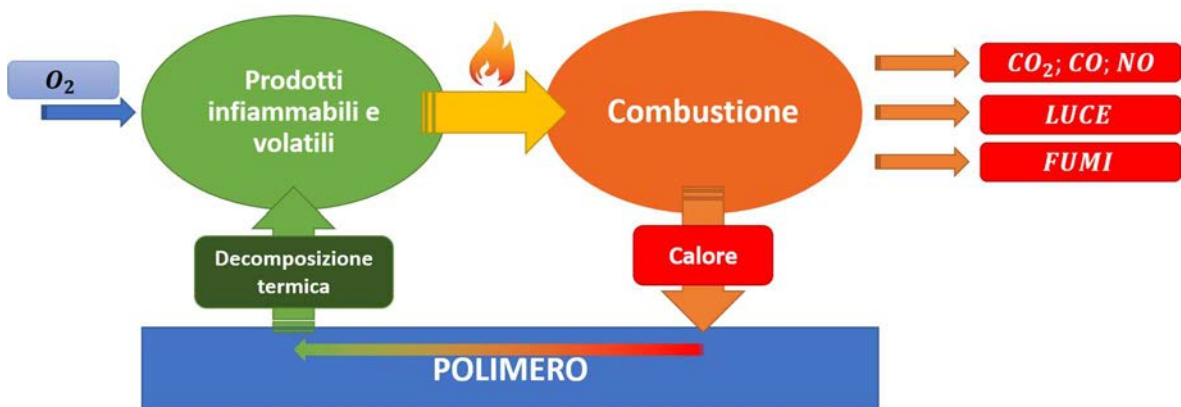


Figura 41: Processo ciclico di combustione di un materiale polimerico [6].

La combustione è un processo di tipo radicalico, altamente esotermico, nel quale si distinguono 4 fasi:

- Ignizione.
- Crescita
- Combustione
- Decadimento

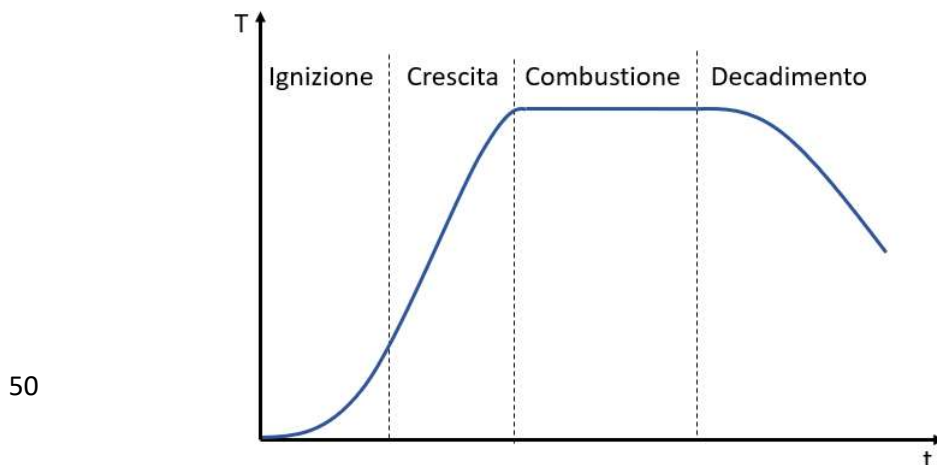


Figura 42: Fasi del processo di combustione di un materiale polimerico.

S. Farris et al. / Polymer 51 (2010) 3591–3605

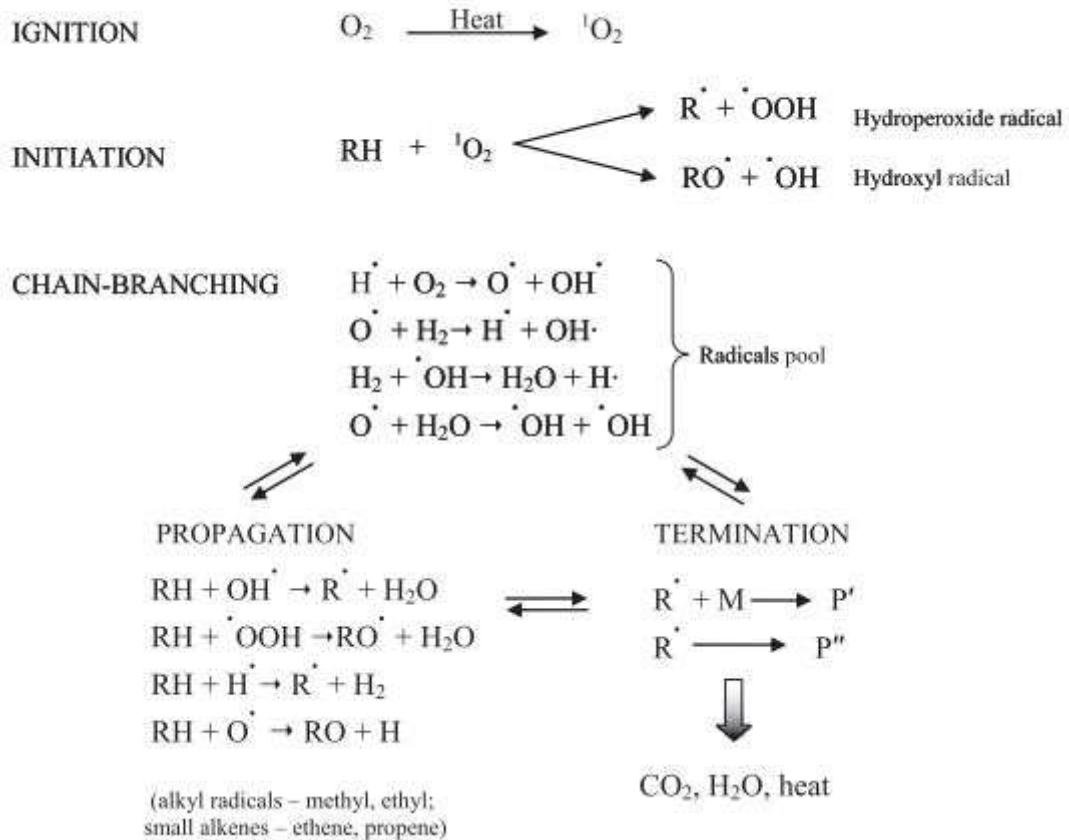


Figura 43: Schema riassuntivo delle reazioni chimiche costituenti il processo di combustione. ^[10]

Per ostacolare il processo di combustione vengono aggiunti al polimero additivi noti come *ritardanti di fiamma*. Essi hanno la funzione di annullare o mitigare le condizioni necessarie all'ignizione o alla propagazione della reazione mediante diversi meccanismi sia fisici che chimici.

- *Diluizione della fase gas* con gas inerti fino a portare la miscela fuori dai limiti di infiammabilità.
- *Sviluppo di prodotti reattivi (radicalici) in fase gas* che inibiscono le reazioni di propagazione.
- *Raffreddamento della fase solida* con sostanze che si decompongono endotermicamente: ho un raffreddamento con una diminuzione della velocità di decomposizione.
- *Formazione di CHAR (carboni)*: i residui di combustione creano una barriera superficiale sul polimero non combusto e quindi ostacolano la diffusione dei prodotti gassosi di decomposizione verso la superficie. Formano anche da barriera termica per il materiale sottostante.
- *Materiali intumescenti*: creano una barriera termica tra la fiamma e il polimero e riducono il processo degradativo.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

- *Modificatori di fusione (per i termoplastici)*: riducono la combustione favorendo la fusione del polimero che, se ne ha la possibilità, fluisce via e si sottrae alla fiamma.

Principali problemi dei ritardanti di fiamma sono:

- Limitata stabilità termica, che riduce la processabilità del polimero di base.
- Possibili problemi in fase di riciclo.
- Possibili necessità di additivi sinergici.

B1: Tipologie e meccanismi di azione dei ritardanti di fiamma:

Antifiamma a base di alogeni:

Si tratta dei ritardanti di fiamma più utilizzati. Essi agiscono catturando i radicali liberi presenti nel gas di combustione, in genere impiegati insieme a composti sinergici con la funzione di ostacolare il rifornimento di ossigeno e produrre residui incombustibili. Per contro, gli antifiamma appartenenti a questa tipologia hanno il difetto di aumentare la densità del polimero e di peggiorarne le proprietà meccaniche se impiegati in grande quantità.

L'azione di ritardo di fiamma degli acidi alogenidrici si basa sulla reazione con i radicali responsabili della propagazione della fiamma secondo la reazione:



L'acido alogenidrico consumato viene inoltre rigenerato mediante la reazione:



Questi additivi, introducendo una reazione secondaria, sottraggono i reagenti necessari alla reazione di combustione, inibendo pertanto il processo.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Antifiamma a base di derivati del fosforo:

La funzione di questi additivi è di produrre, con la combustione, un residuo carbonioso spugnoso che ostacoli il trasferimento di calore e la diffusione di ossigeno alla superficie del materiale non combusto.

All'interno di questa tipologia si possono distinguere:

- Additivi solidi, come il *polifosfato di ammonio* in combinazione con la *melammina*, principalmente utilizzati per le resine poliolefiniche (PP, PE e PU).
- Additivi liquidi, *fosfati* e *fosfonati*, impiegati su blend polimerici ABS/PC, PU espanso e PC.

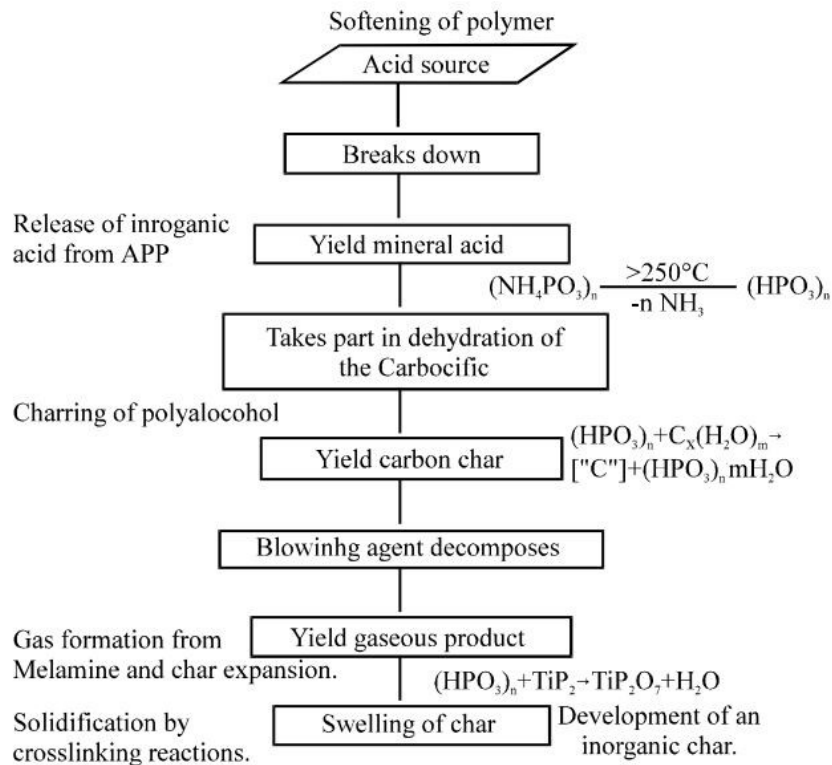


Figura 44: Schema riassuntivo delle reazioni chimiche costituenti il processo inibizione della combustione da parte del polifosfato di ammonio [11]

Antifiamma a base di grafite espandibile:

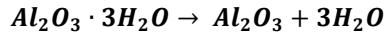
Questi particolari additivi sono costituiti da grafite cristallina, costituita da piani paralleli di atomi carbonio disposti secondo una struttura esagonale. Depositato circa il 20% in peso della grafite in acido solforico, presente come anione fosfato tra i diversi strati, la sua decomposizione termica genera gas che dà luogo ad un'espansione della grafite stessa. L'espansione, dell'ordine di 100 volte le dimensioni iniziali, genera sulla superficie del materiale *grafite espansa*, che rallenterà la propagazione della fiamma e il trasferimento di calore.

Questa tipologia di additivi è particolarmente adatta agli elastomeri termoplastici e ai poliuretani bicomponente.

Antifiamma a base di idrossidi metallici:

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Esposti ad alte temperature, gli idrossidi metallici possono decomporsi, rilasciando vapore acqueo con il doppio scopo di diluire la fase gas e raffreddare la fase solida, prevenendo o rallentando la degradazione termica del materiale non combusto.



B.3

Principali vantaggi di questa tipologia di additivi è la loro sicurezza, essendo non corrosivi e privi di alogeni nocivi, oltre alla buona processabilità e alle buone caratteristiche estetiche che conferiscono al prodotto. Per contro, essi aumentano notevolmente la densità del materiale, riducendone inoltre la resilienza.

B2: Test di infiammabilità [12]

La normativa più ampiamente utilizzata e accettata per la classificazione delle proprietà di resistenza al fuoco di un materiale polimerico è la *UL94*, la quale prevede una classificazione dei materiali in base alle loro proprietà di autoestinguenza, ovvero alla capacità di estinguere una fiamma una volta incendiati.

Parametri considerati sono la velocità di combustione, il tempo di estinguenza, la maggiore o minore presenza di gocciolamento di materiale fuso e se le eventuali gocce siano o meno infuocate e quindi potenzialmente in grado di propagare l'incendio.

Le categorie sotto cui ricade il materiale testato sono riassunte in *Tabella 10*:

Tabella 10: Classificazione secondo normativa UL94 e relativi parametri.

UL94	TIPO DI TEST	TEMPO DI ESTINGUENZA	ULTERIORI REQUISITI
5VA	Bruciatura superficiale	< 60 s	Nessun <i>burn-through</i> (foro) consentito.
5VB	Bruciatura superficiale	< 60 s	<i>Burn-through</i> (foro) consentito.
V-0	Bruciatura verticale	< 10 s	Non sono ammessi gocciolamenti di fiamma.
V-1	Bruciatura verticale	< 60 s	Non sono ammessi gocciolamenti di fiamma.
V-2	Bruciatura verticale	< 60 s	Sono ammessi gocciolamenti di fiamma.
HB	Bruciatura orizzontale	Velocità di combustione <76 mm/min (spessore<3mm) <38 mm/min (spessore>3mm)	

UL 94 HB: Test di bruciatura orizzontale:

I materiali che rientrano in questa categoria sono generalmente consentiti per le applicazioni che richiedono margine di sicurezza in caso di esposizione al fuoco e sono in genere impiegati solo per scopo estetico o per componenti non strutturali.

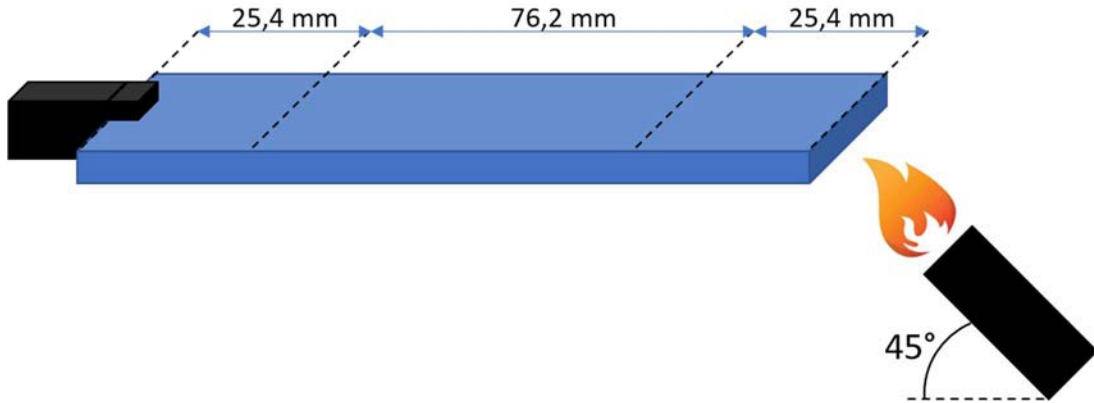


Figura 45: Rappresentazione schematica dell'allestimento per l'esecuzione del test di bruciatura orizzontale secondo normativa UL94.

UL 94 V0, V1, V2: Test di bruciatura verticale:

Il test di bruciatura verticale, più severo di quello orizzontale, è effettuato su provini analoghi al precedente posti in posizione verticale ed esposti per un preciso periodo di tempo ad una fiamma di altezza definita posta a una distanza definita.

Il materiale viene classificato, come precedentemente descritto, in base al tempo di estinguenza, alla presenza o assenza di gocciolamento e all'effetto che le gocce hanno sul cotone sottostante al provino.

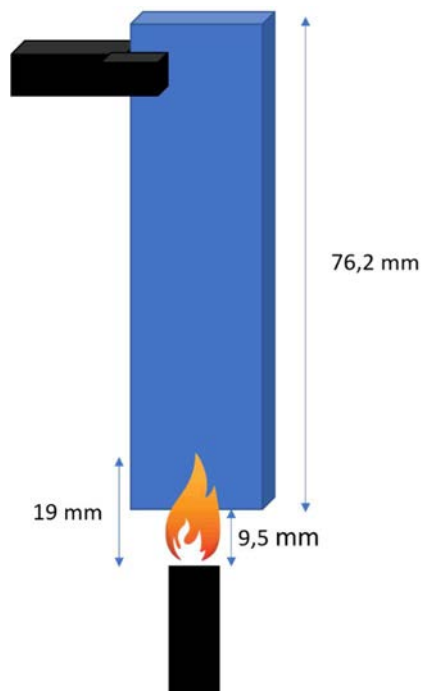


Figura 46: Rappresentazione schematica dell'allestimento per l'esecuzione del test di bruciatura verticale secondo normativa UL94.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

UL 94 5VA, 5VB: Test di bruciatura verticale:

Il test di maggiore severità previsto dalla normativa, si divide in due fasi distinte:

- Bruciatura verticale con fiamma di altezza e a distanza definite, inclinata di 20°.
- Bruciatura su placca orizzontale. Questa parte del test consentirà in particolare la distinzione tra categoria 5VA, per la quale è richiesto che la fiamma non pratichi fori passanti sul provino, e 5VB, che ammette la presenza di fori.

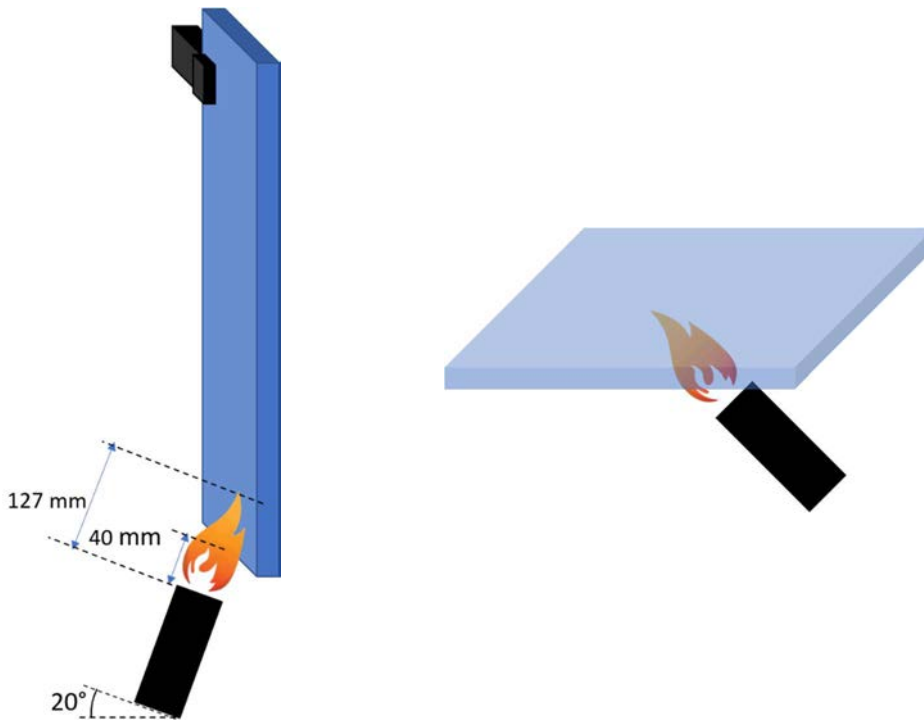


Figura 47: Rappresentazione schematica dell'allestimento per l'esecuzione del test di bruciatura verticale e su placca secondo normativa UL94.

CSA Flammability CSA C22.2 NO 0.6, Test A:

Simile al test standard per la classificazione UL94 5V, e ad esso equivalente, è il test di infiammabilità previsto dalla Canadian Standard Association. Esso prevede 5 applicazioni di fiamma di 15 secondi con estinzione in 30 secondi per le prime 4, in 60 secondi per la quinta.

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

Limited Oxygen Index ASTM D 2863, ISO 4589:

Test in ambiente controllato, volto a stabilire il Limited Oxygen Index, ovvero la minima concentrazione di ossigeno necessaria a sostenere la combustione. Essa è fissata al livello tale da mantenere il campione in combustione per un tempo minimo di 3 minuti dopo l'applicazione di una fiamma pilota.

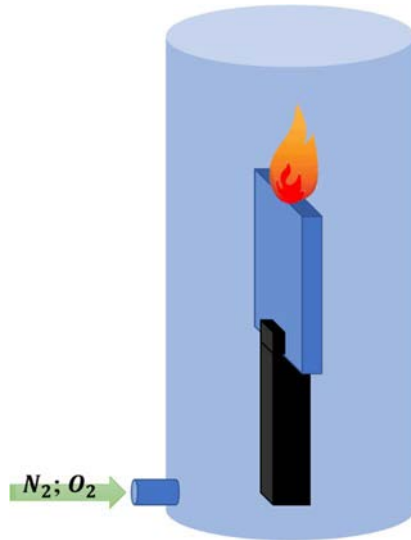


Figura 48: Rappresentazione schematica dell'allestimento per l'esecuzione del test di Limited Oxygen Index.

Glow Wire IEC 695-2-1

Questo test è volto a simulare il comportamento dei materiali sotto stress termico e meccanico, come può verificarsi al contatto con resistori surriscaldati.

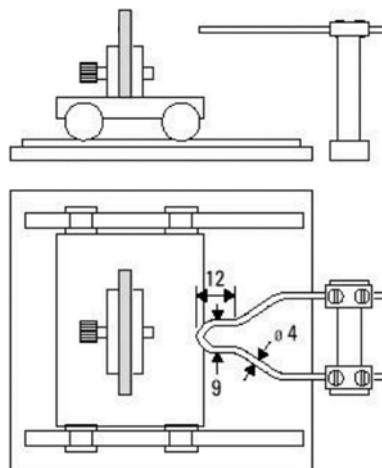


Figura 49: Rappresentazione schematica dell'allestimento per l'esecuzione del test Glow wire.

Il campione viene premuto con forza pari a 1 N contro un filo elettricamente riscaldato, formato con geometria definita per 30 secondi. Alla rimozione del campione, esso viene classificato in base al tempo di estinguenza e all'eventuale gocciolamento di materiale fuso.

Il test si intende superato se si verifica una delle seguenti condizioni:

Progetto e sviluppo di un contenitore batterie per una vettura elettrica Formula Sae

- Non si sviluppano fiamme o incandescenza.
- Eventuali fiamme o incandescenze si estinguono entro 30 secondi dalla rimozione del filo.

La temperatura del filo dovrà essere stabilita in base alle condizioni in cui il materiale si troverà a operare, e alla sua funzione e al rischio costituito dall'incendio o dal cedimento termico del componente.

Needle Flame IEC 695-2-2

Questo test è utilizzato per determinare il comportamento del materiale esposti a fiamme di piccole dimensioni, derivanti per esempio da cortocircuiti in applicazioni elettriche.

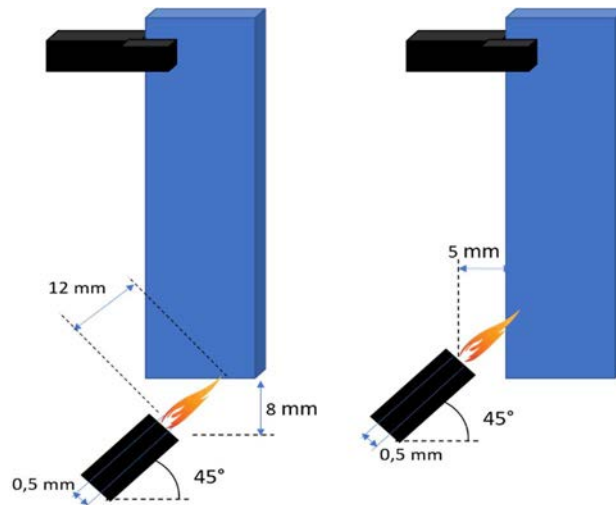


Figura 50: Rappresentazione schematica dell'allestimento per l'esecuzione del test Needle flame.

Il test si intende superato se si verifica una delle seguenti condizioni:

- Non si ha ignizione del provino.
- Alla rimozione della fiamma non permangono fiamme o incandescenza sul provino e non si ha gocciolamento di materiale infuocato.
- Il tempo di estinguenza si mantiene al di sotto dei 30 secondi.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. 2019 FSAE: *TECHNICAL INSPECTION*
- [2]. *Formula Student Rules 2018 Version: 1.1*
- [3]. 2018 FS Structural Equivalency Spreadsheet
- [4]. 2016 FS Structural Equivalency Spreadsheet
- [5]. Enrico Bernardo: “*Dispense del corso di Selezione dei Materiali – 2016*”
- [6]. M.F. Ashby: “*Material Selection in Mechanical Design*” Elsevier, Oxford 2015
- [7]. CES EduPack 2018 version: 18.1.1, Copyright © Granta Design Limited
- [8]. Marbocote Release Technology: “*Technical data sheet: HP7 Release System*”
- [9]. Paolo Vannucci: “*Calcolo dei laminati secondo la teoria classica*”
- [10]. Emad Sobhy, Kuk Ro Yoon, Shimaa H. El-sayed, Sang Eun Hong: “*Halloysite nanotubes as smart flame retardant and economic reinforcing materials: A review*”
- [11]. N.Amir, F. Ahmad and P.S.M. Megat-Yusoff: “*Study of the fibre reinforced Epoxy-based Intumescent Coating Formulations and their Char Characteristics*”
- [12]. Stefano Farris; Simone Pozzoli; Paolo Biagioni; Luciano Piergiovanni: “*The Fundamentals of Flame Treatment for the Surface Activation of Polyolefin Polymers – A Review*”
- [13]. 1997-2002 General Electric Company: “*GE Plastics – Test Methods*”