

ALMA MATER STUDIORUM·UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA - CAMPUS DI FORLÍ  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica  
Codice 0949 - Classe L-9

**PROGETTO CONCETTUALE DI UN  
SEDILE IN MATERIALI COMPOSITI  
PER VEICOLI SOLARI**

Tesi di Laurea in Laboratorio di Costruzioni Aeronautiche

**Relatore:**  
Chiar.mo Prof.  
**ENRICO TROIANI**  
**Correlatore:**  
**ALEX LEARDINI**

**Presentata da:**  
**MICHELE LIVERANI**

**Parole chiave:** Cinture, Compositi, Sedile, Solare, Veicolo

**Anno Accademico 2015/2016**  
**II Sessione**

*a Veronica e ai miei genitori*

# Sommario

Il seguente elaborato è la conclusione dell'esperienza di tesi volta alla progettazione di componenti, nello specifico sedili e punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza, per il cruiser Emilia 4, veicolo solare che gareggerà contro le più importanti università mondiali nella 2017 World Solar Challenge in Australia. L'attività compiuta risulta essere il punto di arrivo dell'ottimizzazione strutturale degli elementi, attribuendo fondamentale importanza al peso delle strutture; l'obiettivo è stato raggiunto mediante l'adozione della fibra di carbonio, nel rispetto del regolamento della corsa e delle norme stradali australiane. Gran parte delle attività sono state svolte a Castel San Pietro nell'azienda Metal Tig, impresa specializzata nella lavorazione dei laminati in composito; qui si sono tenute riunioni settimanali per discutere dei progressi del progetto e delle modifiche da apportare. Il lavoro di tesi si conclude con la quarta revisione dei componenti affidatomi: essa probabilmente non sarà la versione definitiva, ma sicuramente sarà un punto di riferimento per i prossimi progettisti impegnati nell'impresa.

# Abstract

The following paper is the conclusion of my experience in the design some components, in particular seats and anchorage points for seat belts, for the cruiser Emilia 4, the solar vehicle that will compete against the world's major universities in the 2017 World Solar Challenge in Australia. The activities appear to be the culmination of structural optimization of the elements, giving paramount importance to the weight of the structures; the goal has been achieved through the adoption of carbon fiber, in accordance with the race rules and the Australian road rules. Most of the activities were carried out in Castel San Pietro in company Metal Tig, which is specialized in the manufacturing of composite laminates; here we were held weekly meetings to discuss the progress of the project and of the changes to be made. The thesis concludes with the fourth revision of the components: it probably will not be the final version, but it will be a landmark for the next designers engaged in the enterprise.

# Ringraziamenti

Questo testo è il coronamento di un progetto che mi ha appassionato fin dalle prime battute. Desidero ringraziare tutti coloro che hanno reso possibile tutto questo:

- Alex Leardini: persona incaricata alla definizione della scocca; non ha mai esitato ad aiutarmi e a darmi consigli utili di cui farò tesoro;
- Mauro Sassatelli: grande conoscitore della fibra di carbonio; mi ha trasmesso molte nozioni sui materiali compositi difficilmente ottenibili all'università;
- il team di Onda Solare: ragazzi fantastici che non smettono di seguire i propri sogni;
- Valerio Polini: il mio compagno di corso che ha deciso di intraprendere questa avventura e con cui si è creata una forte sinergia durante la progettazione;
- infine, il mio relatore Enrico Troiani: colui che mi ha trasmesso un fervente entusiasmo per il progetto.

Grazie, è stato un piacere lavorare con voi.

# Indice

<b>1</b>	<b>2017 Bridgestone World Solar Challenge</b>	<b>1</b>
1.1	Regolamento . . . . .	1
1.1.1	Norme per la progettazione . . . . .	1
1.1.2	Norme della corsa . . . . .	8
1.2	Breve storia di Emilia . . . . .	10
1.3	Analisi dei Cruiser avversari . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Direttive per la progettazione</b>	<b>14</b>
2.1	Quality Function Deployment (QFD) . . . . .	16
2.1.1	Descrizione del metodo QFD . . . . .	16
2.1.2	Applicazione del metodo al caso dei sedili . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Progettazione</b>	<b>20</b>
3.1	Materiali compositi . . . . .	20
3.1.1	Le fibre . . . . .	21
3.1.2	Lo stampaggio della fibra di carbonio . . . . .	22
3.1.3	Le proprietà degli strati . . . . .	26
3.1.4	I tessuti . . . . .	28
3.1.5	Strutture a sandwich . . . . .	29
3.1.6	Progettare e disegnare . . . . .	33
3.1.7	I laminati . . . . .	34
3.1.8	Fissaggio e incollaggio . . . . .	35
3.2	Elaborazione degli elementi . . . . .	37
3.2.1	Le fasi del progetto . . . . .	38
3.2.2	Costruzione di un modello in legno . . . . .	39
3.2.3	Creazione del disegno CAD . . . . .	40
3.2.4	Realizzazione esecutiva degli elementi . . . . .	43
3.3	Analisi agli elementi finiti . . . . .	44
3.3.1	Generalità sul metodo . . . . .	44
3.3.2	Applicazione della teoria al modello . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>52</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>54</b>

# Elenco delle figure

1.1	Il logo della manifestazione. . . . .	1
1.2	Il percorso di gara. . . . .	2
1.3	Le classi di veicolo in gara. . . . .	2
1.4	Schematizzazione del sedile dell'automobile. . . . .	5
1.5	Lo spazio presente nell'abitacolo. . . . .	6
1.6	Visione posteriore che deve essere garantita al pilota. . . . .	7
1.7	Il circuito necessario per verificare la stabilità del mezzo. . . . .	7
1.8	Lo slalom necessario per verificare la stabilità del mezzo. . . . .	8
1.9	Emilia 1. . . . .	10
1.10	Emilia 2. . . . .	11
1.11	Emilia 3. . . . .	11
1.12	OWL. . . . .	12
1.13	Sunswift-eVe. . . . .	12
1.14	ThyssenKrupp SunRiser. . . . .	13
1.15	Stella Lux. . . . .	13
2.1	Applicazione del metodo QFD alla progettazione dei sedili. . . . .	19
3.1	Contact molding. . . . .	23
3.2	Compression molding. . . . .	24
3.3	Vacuum molding. . . . .	24
3.4	Resin injection molding. . . . .	25
3.5	Injection molding with prepreg. . . . .	25
3.6	Foam injection. . . . .	25
3.7	Centrifugal molding. . . . .	26
3.8	Due processi di filament winding. . . . .	26
3.9	Le diverse deformazioni per materiale isotropo e anisotropo. . . . .	27
3.10	Geometrie dei tessuti. . . . .	28
3.11	Una struttura di composito sandwich. . . . .	29
3.12	Rappresentazione della flessione in una struttura sandwich. . . . .	30
3.13	Tensioni in una struttura sandwich. . . . .	30
3.14	Trave sandwich sollecitata a flessione. . . . .	31
3.15	Deformazione del honeycomb su un cilindro. . . . .	32
3.16	L'adattamento dell'honeycomb alle curvature. . . . .	33
3.17	Formatura con struttura a sandwich per piccoli raggi di raccordo. . . . .	33
3.18	Gli orientamenti standard. . . . .	35
3.19	Differenti tipi di rottura. . . . .	35
3.20	Modalità di danneggiamento. . . . .	36

3.21	Esempi di giunti incollati per la trasmissione dei carichi. . . . .	37
3.22	Il metodo di lavoro utilizzato nella progettazione degli elementi. .	37
3.23	Il design di Emilia 4 progettato da Marko Lukovic. . . . .	39
3.24	Il modello in legno per verificare l'abitabilità del cruiser. . . . .	39
3.25	Trasposizione delle direttive al modello CAD. . . . .	40
3.26	Il modello CAD di Emilia 4 disegnato da Marko Lukovic. . . . .	41
3.27	Le principali novità introdotte nella revisione 02. . . . .	41
3.28	Le principali modifiche apportate dalla revisione 03. . . . .	42
3.29	Il sedile anteriore destro del cruiser Emilia 4. . . . .	44
3.30	Il porta-zavorra del sedile anteriore destro. . . . .	45
3.31	Il sedile posteriore destro del cruiser Emilia 4. . . . .	45
3.32	Esempio di applicazione di una mesh su un componente meccanico. .	47
3.33	Esempio di affinamento di una mesh. . . . .	48
3.34	La mesh generata sul sedile da Ansys®. . . . .	49
3.35	La distribuzione delle tensioni generata da Ansys®. . . . .	50
3.36	La deformata generata da Ansys®. . . . .	50
4.1	Io a bordo del challenger Emilia 3. . . . .	53

# Capitolo 1

## 2017 Bridgestone World Solar Challenge

La Bridgestone World Solar Challenge è una corsa che coinvolge università e società da tutto il mondo e che ha come obiettivo la promozione della ricerca sulle auto ad energia solare; essa è una gara a cui vi possono partecipare esclusivamente veicoli alimentati dalla sola irradiazione e si svolge ogni due anni in Australia, coprendo 3.022 km attraverso l'Outback, da Darwin, Northern Territory, ad Adelaide, nella costa meridionale (figura 1.2).



Figura 1.1: Il logo della manifestazione.

### 1.1 Regolamento

Nella seguente sezione si riportano gli estratti del regolamento della competizione necessari per la progettazione dei sedili e dei punti di ancoraggio delle cinture di sicurezza.

#### 1.1.1 Norme per la progettazione

##### Le classi

La Bridgestone World Solar Challenge del 2017 prevede tre classi di auto solare (figura 1.3):



Figura 1.2: Il percorso di gara.

- **Challenger:** auto solare monoposto progettata per essere veloce;
- **Cruiser:** auto solare efficiente, pratica e avente due o più posti;
- **Adventure:** auto solare progettata per gli eventi passati, ma non idonea per le classi precedentemente descritte; la classe Adventure è non competitiva.



Figura 1.3: Le classi di veicolo in gara.

Il progetto "Emilia 4" riguarda la costruzione di un veicolo appartenente alla classe Cruiser.

### Le dimensioni

Quando è su un rettilineo, l'auto solare deve occupare un volume pari ad un parallelepipedo lungo 5000 mm, largo 2200 mm e alto 1600 mm, con la base del solido coincidente con il terreno.

Gli occhi del pilota devono essere ad una altezza superiore a 70 mm dal suolo.

A pieno carico il veicolo deve essere in grado di attraversare una strada avente un ostacolo alto 50 mm senza che nessuna parte del telaio lo colpisca.

Tabella 1.1: Aree dei collettori permesse.

Class	PV Cell Chemistry	Allowable Total Cell Area (m <sup>2</sup> )
Challenger	Si	4.000
	thin film GaAs	3.560
	multijunction	2.640
Cruiser	Si	5.000
	thin film GaAs	4.440
	multijunction	3.300

Tabella 1.2: Peso totale permesso delle batterie.

Electrochemical Cell Chemistry	Allowable Total Cell Mass (kg)
Li-S	15.00
Li-ion	20.00
Li-polymer	20.00
LiFePO <sub>4</sub>	40.00

### Le ruote

I Challenger e i Cruiser dovranno essere sostenuti da quattro ruote: due anteriori e due posteriori. I punti di contatto degli pneumatici e asfalto dovranno essere simmetrici rispetto all'asse longitudinale del veicolo.

Per i Challenger e i Cruiser, la distanza tra l'asse delle ruote anteriori e quello delle posteriori deve essere maggiore della metà della larghezza della macchina.

### I collettori solari

La fonte di energia primaria per l'auto è l'irradiazione solare accumulata dalla stessa.

Se il collettore comprende celle fotovoltaiche della medesima composizione chimica e impiegate senza concentratori come riflettori o lenti, allora l'area totale del pannello, calcolata sommando la superfici esposte delle celle, non deve eccedere i valori permessi (vedi tabella 1.1.).

Ogni squadra deve fornire i calcoli per dimostrare di rispettare le norme.

Tutti gli strumenti necessari per la ricarica delle batterie devono essere trasportati sulla macchina, inclusi i supporti e i cavi.

### L'accumulo di energia

Un'auto solare può immagazzinare energia. I sistemi di accumulo utilizzano celle elettrochimiche; la massa totale delle batterie, per le categorie Challenger e Adventure, deve rispettare i valori imposti dal regolamento (vedi tabella 1.2). Non vi è alcuna restrizione per quanto riguarda la classe Cruiser.

Le celle elettrochimiche non devono, in nessun caso, operare al di fuori dei range di tensione, corrente e temperatura stabiliti dal fornitore.

Le batterie presenti all'interno di strumenti come radio, videocamere o cellulari, trasportati dal pilota, non sono considerati come facenti parte del sistema

di accumulo, assicurando però che essi non siano connessi in alcun modo al veicolo.

Se le batterie comprendono liquidi pericolosi o tendono ad emettere gas nocivi, occorre separare l'abitacolo da esse e provvedere ad un adeguato sistema di ventilazione.

### **La zavorra**

Gli organizzatori forniranno una zavorra ad ogni team avente densità pari a 5 kg per litro. La massa combinata di singolo occupante e zavorra dovrà essere almeno pari a 80 kg.

La macchina solare deve disporre di uno spazio per assicurare la zavorra entro 300 mm dall'anca di ciascun occupante, in una posizione accessibile dall'osservatore.

### **Il tracker**

Ogni macchina dovrà trasportare un indicatore di posizione fornito dall'organizzazione. La scatola sarà lunga al massimo 200 mm, larga 150 mm e alta 100 mm. La superficie della scatola sarà marchiata con una finestra circolare di diametro 125 mm. L'indicatore di posizione avrà un'alimentazione propria, dunque non è necessario un collegamento con il veicolo. La massa del tracker non eccederà i 5 kg.

### **L'abitacolo**

I passeggeri all'interno dell'auto solare devono sedere all'interno di un abitacolo progettato per proteggerli da eventuali infortuni. Quando gli occupanti sono seduti normalmente con cinture di sicurezza e casco, nessuna parte del passeggero o del casco deve toccare la scocca. Nessun punto del casco deve trovarsi a meno di 50 mm dal tetto del veicolo.

Ogni squadra dovrà fornire calcoli, certificati da un team di ingegneri, per dimostrare che la cella dei passeggeri non si deformerà di più di 25 mm e non cederà in nessun punto quando soggetta alle seguenti forze con l'auto a pieno carico:

- impatto frontale: carico di 5 g, opposto alla direzione di marcia, applicato all'anteriore dell'abitacolo in un'area avente altezza e base minori rispettivamente di 250 e 600 mm;
- impatto laterale: carico di 5 g sulla superficie laterale della cella, applicato in direzione adiacente al busto del pilota in un'area equivalente alla precedente;
- impatto superiore: carico di 5 g verso il basso, 1.5 g di lato e 4 g all'indietro, applicato contemporaneamente ad ogni area di contatto tra abitacolo e terreno quando il veicolo è capovolto; l'area di carico dovrà essere minore di 150 mm.

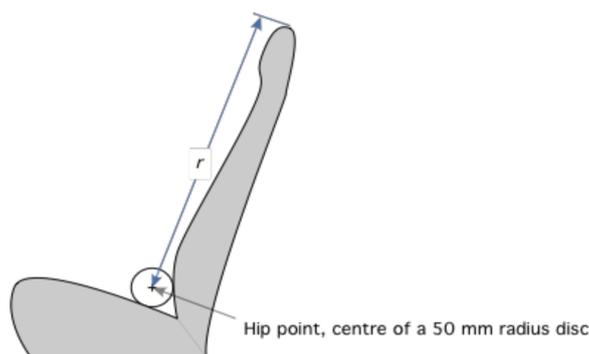


Figura 1.4: Schematizzazione del sedile dell'automobile.

### I sedili

Ogni occupante dell'automobile solare deve essere provvisto di un sedile che si affaccia in avanti con un angolo inferiore a  $10^\circ$  rispetto alla direzione di avanzamento. Ogni sedile deve avere uno schienale e un poggiatesta. La distanza dal punto dell'anca alla parte superiore del poggiatesta deve essere di almeno 800 mm per i sedili anteriori e di almeno 750 mm per i sedili posteriori (regolamenti UNECE 17 e 25). Il punto dell'anca può essere approssimato come una circonferenza avente raggio pari a 50 mm (vedi figura 1.4).

I talloni di ogni occupante devono essere ad una quota inferiore rispetto all'anca.

L'angolo compreso tra spalle, anca e ginocchia deve essere maggiore di  $90^\circ$ .

### Lo spazio per i passeggeri

Lo spazio per gli occupanti deve essere conforme alla sezione LK dell'Australian National Code of Practice for Light Vehicle Construction and Modification, come mostrato nella figura 1.5.

Il braccio radiale di 835 millimetri deve essere in grado di spostarsi di  $45^\circ$  in avanti,  $25^\circ$  all'indietro e  $7^\circ$  in ciascun lato verticale. La struttura dell'auto solare, compreso il parabrezza, deve trovarsi interamente al di fuori dello spazio degli occupanti. Il volante, specchi, schienali dei sedili e poggiatesta possono essere all'interno dello spazio degli occupanti, ma devono essere progettati per ridurre al minimo il rischio di lesioni in caso di incidente.

### Le cinture di sicurezza

Le cinture di sicurezza devono rispettare la norma UNECE 14. In particolare:

- gli ancoraggi superiori per ogni sedile devono resistere ad una forza pari a 13.5 kN applicata alla cinghia;
- gli ancoraggi inferiori per ogni sedile devono resistere ad una forza pari a 13.5 kN applicata alla cinghia;
- i punti di ancoraggio devono rispettare la norma UNECE 14 allegato 3 o le istruzioni del fornitore.

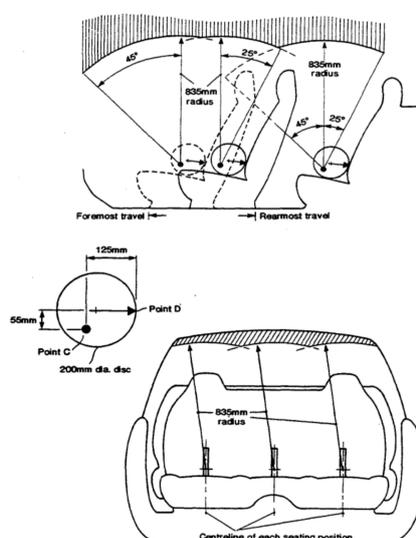


Figura 1.5: Lo spazio presente nell'abitacolo.

### Le uscite

Occorre dimostrare che l'uscita dei passeggeri dal veicolo avvenga in un tempo inferiore a 15 secondi senza aiuti. L'accesso alle aperture deve avvenire sia dall'interno che dall'esterno e i varchi per le emergenze devono essere chiaramente indicati all'esterno del veicolo e visibili ai servizi di emergenza.

### Condizionamento e idratazione

Il veicolo deve garantire agli occupanti condizioni accettabili di temperatura mediante ventilazione o raffreddamento. La squadra deve descrivere il sistema che dovrà essere approvato successivamente da un ingegnere certificato.

La scorta d'acqua per ogni occupante deve essere almeno pari a due litri all'inizio della giornata e dopo ogni ripartenza.

### Visione anteriore e laterale

Ogni pilota, quando seduto in posizione normale con cinture di sicurezza allacciate e indossando il casco, deve essere in grado di identificare lettere alte 75 mm in ogni punto nella direzione di marcia:

- 4 m dagli occhi del pilota, e
- tra 0.4 m sotto il livello degli occhi e 0.7 sopra il livello degli occhi, e
- tra 100° a sinistra e 100° a destra nella direzione del moto.

La visione frontale e laterale deve essere realizzata senza l'ausilio di specchi, lenti o sistemi elettronici. Il vetro del parabrezza e dei finestrini laterali deve possedere una trasmissibilità ottica maggiore del 75%.

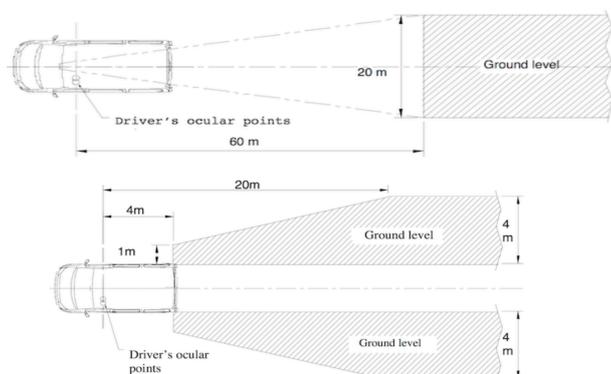


Figura 1.6: Visione posteriore che deve essere garantita al pilota.

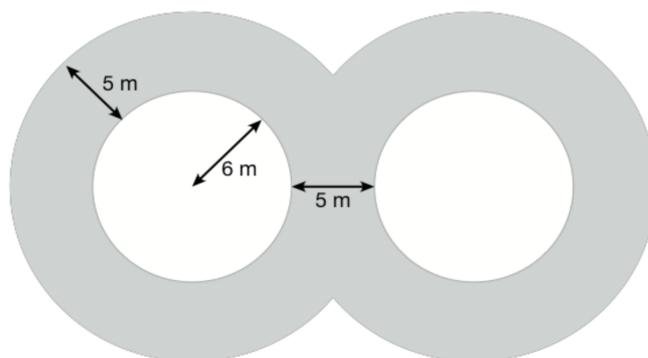


Figura 1.7: Il circuito necessario per verificare la stabilità del mezzo.

### La visione posteriore

L'auto solare deve disporre di un sistema di visione posteriore che permetta al pilota, seduto nella posizione normale di guida, di vedere il terreno nella zona ombreggiata rappresentata nella figura 1.6. Il sistema può essere elettronico, realizzato mediante specchi o lenti e deve operare in ogni caso quando la macchina è in marcia mediante l'energia fornita dalle batterie.

### Stabilità

Il veicolo deve essere in grado di percorrere il circuito in figura 1.7 in meno di 9 secondi per lato e in meno di 18 secondi in tutto. Inoltre, deve attraversare uno slalom come quello nell'immagine 1.8 in meno di 11.5 secondi. La macchina solare deve essere stabile in ogni condizione di velocità e vento trasversale.

### La retromarcia

L'auto deve essere in grado di procedere in retromarcia, con il pilota seduto in posizione di guida, solo grazie all'energia accumulata nelle batterie.

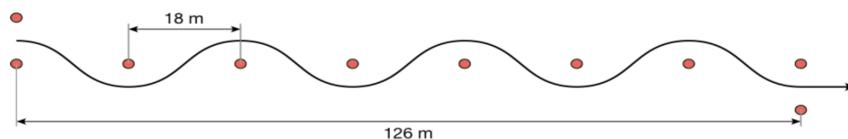


Figura 1.8: Lo slalom necessario per verificare la stabilità del mezzo.

### La strumentazione

Devono essere forniti al pilota i seguenti dati:

- la velocità della macchina;
- se gli indicatori di direzione sono in funzione;
- se gli indicatori di emergenza sono attivi;
- gli avvisi riguardo l'energia interna alle batterie;
- la visione posteriore elettronica (se prevista da progetto).

La strumentazione deve essere alimentata con l'energia del veicolo.

### 1.1.2 Norme della corsa

#### La strada e i tempi

L'evento si svolgerà nelle maggiori autostrade tra Darwin e Adelaide, per una distanza di circa 3000 km. Saranno presenti fermate di controllo obbligatorie lungo il percorso.

La partenza dell'evento avrà luogo alle 8:30 per tutte le squadre, mentre la partenza per i giorni successivi al primo sarà fissata alle 8:00. La giornata di gara si interrompe alle 17:00.

Sarà imposta una penalità di un minuto per ogni minuto passato dopo le 17:00, fino al decimo minuto successivo. Al di là dei 10 minuti, ogni minuto aggiuntivo porterà ad una penalità di due minuti. Le penalità di tempo sostenute in questo modo determineranno un adeguamento dell'inizio ufficiale il giorno successivo<sup>1</sup>.

Una partenza anticipata rispetto all'orario ufficiale porterà ad una penalità di due minuti per ogni minuto trasgredito.

#### Punteggio nella classe Cruiser

L'obiettivo di un Cruiser è quello di trasportare gli occupanti da Darwin a Adelaide ed arrivare a quest'ultima nella specifica finestra temporale. Nella Bridgestone World Solar Challenge del 2017 le squadre devono giungere a Adelaide tra le 11:00 e 14:00 del sesto giorno.

I veicoli appartenenti alla classe Cruiser sono valutati per efficienza e praticabilità.

<sup>1</sup>Esempio: se una squadra termina la corsa alle 17:07 al secondo giorno, la partenza ufficiale del terzo giorno sarà corretta alle 8:07. Se una squadra termina la corsa alle 17:13 al secondo giorno, la partenza ufficiale del terzo giorno sarà corretta alle 8:16

La coppa sarà assegnata alla squadra che completa il percorso, arriva alla destinazione finale all'interno della finestra temporale, e ha il punteggio più alto,  $S$ , secondo il calcolo:

$$S = 80 \frac{E}{E^*} + 20 \frac{P}{P^*}$$

dove  $E$  è il punteggio dell'efficienza energetica della squadra,  $E^*$  è il più alto punteggio di efficienza energetica tra tutti i team,  $P$  è il punteggio della praticabilità della squadra, e  $P^*$  è il più alto punteggio di praticabilità tra tutti i team che hanno completato il viaggio e sono giunti ad Adelaide all'interno della finestra temporale.

Le auto che completano l'itinerario e giungono a destinazione nei tempi previsti saranno classificate in una graduatoria. Il punteggio di efficienza energetica sarà attribuito mediante la seguente formula:

$$\text{energy efficiency} = \frac{\text{person-kilometre distance}}{\text{nominal external energy use}}$$

L'energia nominale esterna usata sarà calcolata con la formula  $(n + 1)Q$ , dove  $n$  è il numero di volte che il sistema di accumulo è stato ricaricato da una fonte energetica esterna tra l'inizio e la fine del percorso, e  $Q$  è la capacità nominale delle batterie. La capacità nominale delle batterie è la somma delle masse delle celle in kg moltiplicata per:

- $330 \frac{Wh}{kg}$  per le celle Li-S;
- $250 \frac{Wh}{kg}$  per le celle Li-ion;
- $250 \frac{Wh}{kg}$  per le celle Li-polymer;
- $125 \frac{Wh}{kg}$  per le celle LiFePO<sub>4</sub>.

Il valore *person-kilometre distance* è la somma di tutte le distanze percorse da ogni viaggiatore nella macchina solare tra la partenza e l'arrivo della corsa. I chilometri per persona saranno contati per ogni sedile occupato per ogni tratto tra due fermate di controllo consecutive.

Il punteggio di praticabilità viene attribuito dalla giuria dell'evento in base a queste caratteristiche:

- facilità di accesso e uscita;
- spazio per i passeggeri e comfort;
- facilità nell'eseguire le operazioni di guida e carico;
- versatilità;
- design;
- idoneità per gli scopi dichiarati.[1]

## 1.2 Breve storia di Emilia

### La carrera

È una gara nata a Castel San Pietro Terme negli anni '50 che vede competere piccoli veicoli senza motore spinti dagli atleti. La competizione, da semplice contesa paesana tra i giovani del paese, si è progressivamente evoluta arrivando all'utilizzo della fibra di carbonio per le scocche dei veicoli. Dalla passione per l'evento tradizionale nasce la voglia di applicare le nozioni acquisite nell'ambito dei materiali compositi in un progetto di maggior rilievo: un veicolo che prenderà parte alla World Solar Challenge in Australia.

### Emilia 1

In occasione della Bridgestone World Solar Challenge del 2005 viene progettata, nella sede della Metal Tig a Castel San Pietro, Emilia 1, un veicolo solare a pedalata assistita da un motore elettrico alimentato da pannelli fotovoltaici. Durante la gara quattro cicliste si sono alternate alla guida del prototipo, ottenendo un eccellente risultato: la conquista del podio classificandosi terze nella gara.



Figura 1.9: Emilia 1.

### Emilia 2

Memori dei successi ottenuti, i tecnici decisero di progettare una nuova macchina solare, Emilia 2, un'auto elettrica ricoperta da 401 celle fotovoltaiche con un corpo in carbonio, nomex e kevlar. Essa ha partecipato al World Solar Challenge del 2011 confrontandosi con 40 team provenienti da 22 nazioni. Onda Solare è l'unico team italiano a percorrere la Stuart Highway, la strada che taglia da Nord a Sud il continente australiano.

### Emilia 3

Iscritti alla WSC 2013, nuovamente unico team italiano, si decide di progettare un nuovo prototipo con telaio strutturale in carbonio. Il veicolo solare mono-



Figura 1.10: Emilia 2.



Figura 1.11: Emilia 3.

posto Emilia 3 è lungo 4,5 metri, largo 1,80 metri e pesa circa 200 kg; può raggiungere una velocità massima di 110 km/h ed è completamente ricoperto di moduli solari fotovoltaici (potenza totale di 1.368 Watt in 6 m<sup>2</sup>). L'energia elettrica prodotta dai moduli è stoccata in 21 kg di batterie agli ioni di litio, che garantiscono 300 km di autonomia in una giornata nuvolosa con una velocità di crociera di 80 km/h.

Dopo le esperienze maturate nelle precedenti competizioni e nella progettazione di tre veicoli, si decide di affrontare una nuova sfida e mettersi in gioco nella costruzione di un cruiser solare per partecipare alla World Solar Challenge del 2017; l'auto si chiamerà Emilia 4.

### 1.3 Analisi dei Cruiser avversari

Per la categoria Cruiser, come evidente dal regolamento, sono fondamentali parametri come numero di persone trasportate e abitabilità. Inoltre, questa

classe riscuote successo a livello di sponsorizzazioni poiché pone le basi per una futura trazione stradale ad energia solare anche per i veicoli di serie. La categoria Cruiser è quindi la più attesa per la competizione del 2017, attirando l'attenzione dei principali costruttori. Tra i concorrenti più quotati si possono citare:

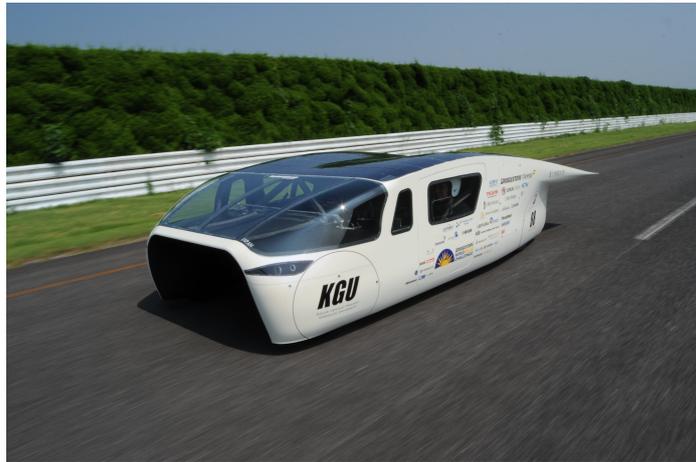


Figura 1.12: OWL.

- **Kogakuin University - OWL:** questo team si è classificato secondo nella gara del 2015 e vanta importanti sponsor come Bridgestone, Clenergy e Teijin. OWL può pregiarsi di una elevata velocità di crociera e di un peso ridotto. L'abitabilità e il confort sono sacrificati per dare spazio al tunnel centrale, avente la funzione di ridurre drasticamente il coefficiente CX;



Figura 1.13: Sunswift-eVe.

- **UNSW/Sunswift-eVe:** il Cruiser progettato dal team australiano è dotato di un design simile a quello di un'auto sportiva di serie. La *Sunswift-eVe* possiede una monoscocca in carbonio con rinforzi strutturali in presenza dei punti critici ed utilizza un sistema di freni rigenerativi in grado di recuperare energia in frenata con una efficienza dell'80%;

- **HS Bochum-ThyssenKrupp SunRiser:** SunRiser a differenza delle altre Cruiser utilizza celle fotovoltaiche all'arseniuro di gallio che garantiscono rendimenti elevatissimi (superiori al 34% e meno sensibili alla temperatura) ma per regolamento hanno un'area limitata a tre metri quadri a differenza dei cinque metri quadri possibili con i classici pannelli al silicio monocristallino. Anche nei materiali impiegati presenta una particolarità perché presenta un telaio in leghe di alluminio e titanio con alcune parti in lega di magnesio e solo le parti non strutturali in materiali compositi;



Figura 1.14: ThyssenKrupp SunRiser.

- **Solar Team Eindhoven-Stella Lux:** veicolo del Solar Team Eindhoven vincitore del WSC 2015. Pur essendo arrivata sul traguardo quarantotto minuti dopo il Cruiser Giapponese OWL, ha guadagnato molti punti per il fatto che ha trasportato quattro persone durante tutto il percorso e vanta un'abitabilità paragonabile ad una ammiraglia da strada.[2]



Figura 1.15: Stella Lux.

## Capitolo 2

# Direttive per la progettazione

Sulla base delle precedenti analisi svolte sui cruiser avversari, si è pensato di procedere con un progetto preliminare di Emilia 4. Come già detto, nella presente tesi sono stati elaborati sedili e punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza del cruiser, utilizzando come riferimento i disegni sviluppati da Marko Lukovic, professore all'Università delle Arti di Belgrado.

Gli obiettivi che i sedili di Emilia 4 devono soddisfare sono:

### 1. Valori d'uso:

- **sicurezza:** garantita dal rispetto delle norme del regolamento della World Solar Challenge del 2017, nello specifico:
  - essere affacciati in avanti con un angolo inferiore a  $10^\circ$  rispetto alla direzione di avanzamento;
  - possedere un appoggiatesta ad una distanza dalla circonferenza rappresentante l'anca del passeggero di 800 mm per i sedili anteriori e di 750 mm per quelli posteriori;
  - permettere lo spostamento di un braccio radiale di 835 mm di  $45^\circ$  in avanti,  $25^\circ$  all'indietro e di  $7^\circ$  a destra e a sinistra;
  - garantire una buona visuale al pilota conforme alla norma del regolamento;
  - possedimento di un vano porta-zavorra nel sedile anteriore e posteriore per conferire maggior rigidità agli elementi e per posizionare la zavorra entro una distanza di 300 mm dall'anca come richiesto da regolamento.
- **rigidità:** i sedili fungono da vere e proprie cinte del veicolo e devono conferirgli un certo grado di rigidità strutturale (soprattutto nella zone in cui il roll-bar è assente);
- **flessibilità:** ossia rendere il progetto adattabile ad ogni situazione (ad es. accomodante ad ogni tipo di corporatura) ed originale, trovando soluzioni legate al componente che permettano di ottenere un elevato punteggio nella sezione praticabilità;
- **manutenibilità e facilità di intervento:** considerando la funzione del componente, tali caratteristiche non dovrebbero essere necessarie se nella fase di progettazione sono state valutate correttamente tensioni e deformazioni.

## 2. Valori di produzione:

- facilità di produzione e di montaggio: caratteristica legata inevitabilmente ai costi di produzione; necessaria per garantire una buona estrazione del laminato dallo stampo e il successivo assemblaggio all'interno del cruiser.

## 3. Valori di forma:

- coerenza: il progetto fonda le proprie radici sul concetto di leggerezza e, per tal ragione, appare ovvio che i sedili debbano seguire tale caratteristica (il peso previsto nel progetto preliminare è pari a 1,32 kg per sedile, per un totale di 5,29 kg); l'accorgimento è atto a migliorare l'autonomia del veicolo per ottenere un punteggio elevato nella sezione efficienza;
- caratteristica delle superfici: il design del sedile si deve integrare perfettamente con la struttura disegnata da Marko Lukovic;
- estetica: caratteristica gradita poiché il design è valutato nella parte di punteggio dedicata alla praticabilità;
- ergonomia: proprietà fondamentale per garantire un viaggio gradevole ad ogni passeggero.

Gli obiettivi che i punti di ancoraggio delle cinture di sicurezza di Emilia 4 devono soddisfare sono:

## 1. Valori d'uso:

- sicurezza: garantita dal rispetto delle norme del regolamento della World Solar Challenge del 2017, nello specifico:
  - gli ancoraggi superiori ed inferiori per ogni sedile devono resistere ad una forza pari a 13.5 kN applicata alla cinghia;
  - i punti di ancoraggio devono rispettare la norma UNECE 14 allegato 3 o le istruzioni del fornitore;per la particolare applicazione si è scelto di utilizzare una cintura a quattro punti di ancoraggio;
- manutenibilità e facilità di intervento: considerando la funzione del componente, tali caratteristiche non dovrebbero essere necessarie se nella fase di progettazione sono state valutate correttamente tensioni e deformazioni;

## 2. Valori di produzione:

- facilità di produzione e di montaggio: caratteristica legata inevitabilmente ai costi di produzione; in questo caso occorre determinare un punto della struttura del cruiser capace di sopportare i carichi previsti dal regolamento, mantenendo una struttura semplice e leggera.[3]

## 2.1 Quality Function Deployment (QFD)

Nella progettazione di un particolare importante come un sedile occorre concentrarsi sulle caratteristiche che il prodotto deve possedere; vi è la necessità di riflettere sulle proprietà funzionali e tecniche che dovrà disporre l'oggetto ed infine concepire un progetto concettuale per ottenerne poi la realizzazione fisica. Per l'analisi della progettazione è opportuno utilizzare strumenti come il QFD (Quality Function Deployment) per passare dalle idee alle specifiche. Esso è un metodo che permette di mettere in relazione i bisogni del cliente con le caratteristiche tecniche del prodotto stesso. L'obiettivo finale è soddisfare le richieste del consumatore e per realizzare ciò, è necessario rispondere alle seguenti domande:

1. a chi si rivolge?;
2. quali sono i problemi del cliente?;
3. quali vantaggi si possono offrire rispetto alle soluzioni già disponibili?;
4. il cliente come valuterà i nuovi prodotti?;
5. su quali basi il cliente giudica il prodotto?

I punti centrali dello strumento sono le cosiddette "case della qualità", ognuna rappresentazione schematica delle relazioni esistenti fra diversi tipi di informazioni. Attraverso l'utilizzo di matrici e di pesi, le case della qualità traducono i dati in ingresso in un altro tipo di informazione, lasciando inalterato il grado di priorità. Nella matrice delle relazioni la somma delle colonne indicherà la specifica tecnica più d'impatto, mentre la somma delle righe moltiplicata per il relativo coefficiente di importanza indicherà la caratteristica più dipendente.

### 2.1.1 Descrizione del metodo QFD

Il metodo QFD è composto da una tabella, contenente varie informazioni, che riporta come risultato le caratteristiche tecniche più importanti per il progettista. La tabella è composta da queste aree principali:

1. necessità del cliente: nella quale sono riportati tutti gli attributi che il prodotto deve possedere per soddisfare il consumatore finale;
2. colonne importanza ed importanza percentuale: sono due colonne in cui vengono riportati alcuni numeri: nella prima colonna viene immesso nella cella un valore compreso tra 1 e 5 a secondo del rilievo dell'attributo (più è alto più è rilevante); nella seconda colonna si divide il peso per la somma dei valori introdotti e si moltiplica per cento per giungere al peso percentuale;
3. specifiche tecniche richieste: si tratta di colonne in cui gli attributi richiesti dal cliente vengono tradotti in parametri ingegneristici misurabili;
4. riga up&down: è una riga composta da frecce che definisce se è conveniente o meno aumentare la specifica tecnica sottostante;
5. tabella delle relazioni tra le specifiche: è una matrice che evidenzia le correlazioni tra i parametri progettuali (vedi tabella 2.1);

Tabella 2.1: Relazioni tra i parametri ingegneristici

Simbolo immesso	Descrizione
++	relazione forte positiva
+	relazione debole positiva
	nessuna relazione
-	relazione debole negativa
--	relazione forte negativa

6. tabella delle inter-relazioni: definisce le correlazioni esistenti tra attributi richiesti dal cliente e specifiche progettuali (vedi tabella 2.2);

Tabella 2.2: Relazioni tra attributi e specifiche tecniche

Simbolo immesso	Valore corrispondente	Descrizione
⊙	9	forte relazione
○	3	media relazione
△	1	debole relazione
	0	nessuna relazione

7. colonne importanza ed importanza percentuale (per caratteristiche dipendenti): nella prima colonna (dipendenza) viene riportato un valore somma dei numeri immessi nelle della tabella delle inter-relazioni; infine la seconda colonna definisce la dipendenza percentuale della rispettiva specifica commissionata, e dunque, le caratteristiche del prodotto più dipendenti dai parametri ingegneristici;
8. righe importanza ed importanza percentuale (per caratteristiche indipendenti): nella prima riga (importanza) viene riportato un valore somma dei numeri immessi nella tabella delle inter-relazioni moltiplicati per la rispettiva importanza percentuale; infine la seconda riga definisce l'importanza percentuale della rispettiva specifica tecnica, e dunque, le caratteristiche del prodotto nelle quali il progettista deve concentrarsi.[4]

### 2.1.2 Applicazione del metodo al caso dei sedili

Nell'applicazione del QFD al caso specifico, sono state considerate come richieste del cliente:

- leggerezza;
- sicurezza;
- facilità d'intervento;
- facilità d'accesso;
- ergonomia;
- estetica;

- abitabilità;
- visibilità.

e come specifiche progettuali:

- massa;
- costo di produzione;
- vita attesa;
- integrazione strutturale;
- comportamento rispetto alle sollecitazioni;
- dimensione;
- difficoltà progettuale.

Osservando i risultati del metodo (vedi figura 2.1), si nota immediatamente che la caratteristica più importante da considerare è la *massa*, poiché il veicolo deve essere il più leggero possibile per possedere una buona autonomia in gara, seguita dai *costi di produzione*, siccome è stato fissato un budget per il progetto e sarebbe benaccetto un risparmio di risorse da dedicare ad altri elementi del cruiser. È evidente che i due aspetti sono legati con una proporzione diretta, giacché un minore quantitativo del materiale utilizzato (per ridurre il peso del sedile), porta conseguentemente ad una diminuzione dei costi. Infine, la caratteristica qualitativa più dipendente dai parametri ingegneristici è la leggerezza, a cui il cliente attribuisce fondamentale importanza.

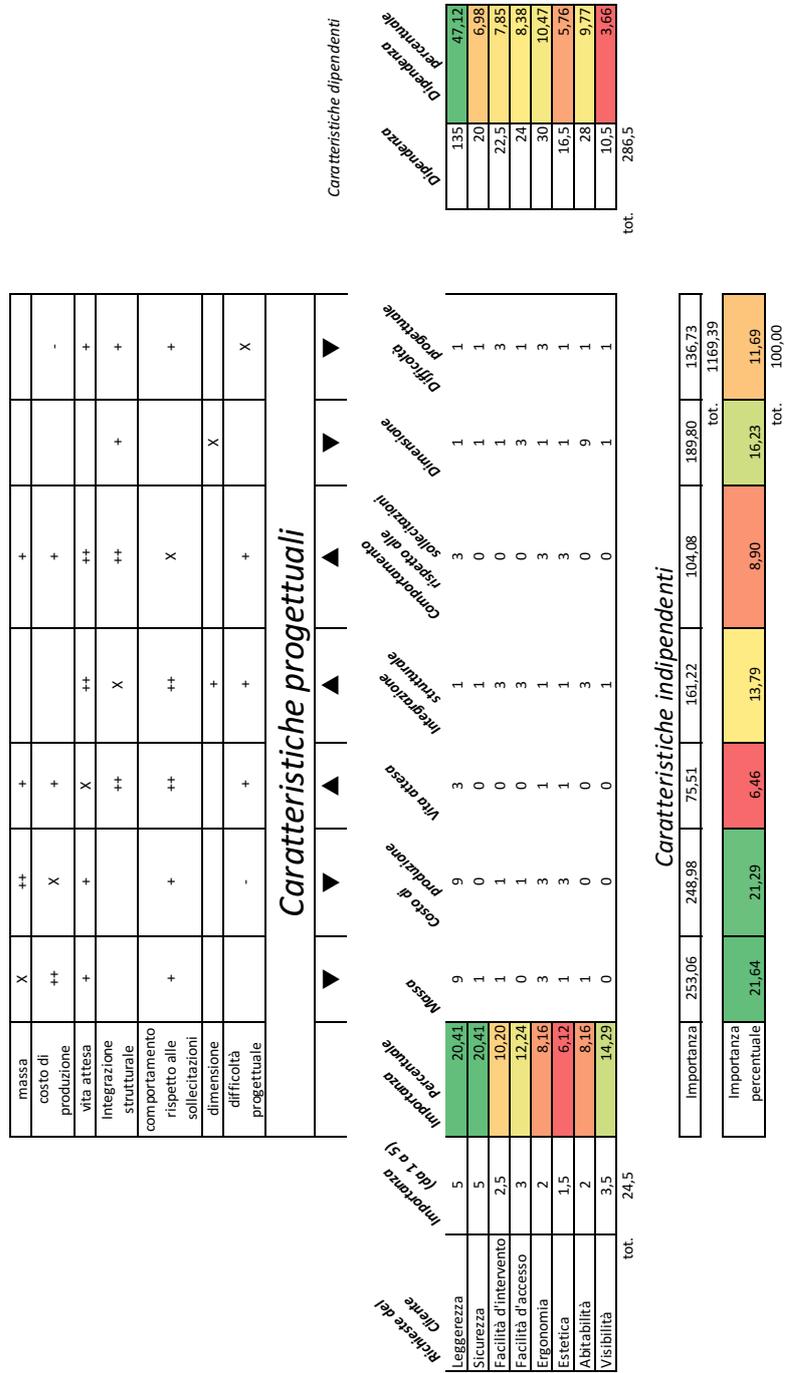


Figura 2.1: Applicazione del metodo QFD alla progettazione dei sedili.

## Capitolo 3

# Progettazione

L'analisi QFD del capitolo precedente pone le basi per la progettazione esecutiva degli elementi. La *leggerezza* è la caratteristica qualitativa a cui il cliente attribuisce maggior importanza: per tale ragione, si è scelto come materiale per la struttura dei sedili e dei punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza la fibra di carbonio associata all'impiego di un elemento con schema a celle esagonali (Nomex<sup>®</sup>) per migliorarne il comportamento rispetto alle sollecitazioni.

### 3.1 Materiali compositi

Un materiale composito può essere definito come un materiale costituito da due o più componenti, chiaramente identificabili, i quali conferiscono al prodotto finito delle proprietà diverse da quelle caratteristiche dei singoli componenti. Esso si riferisce ad un prodotto contenente fibre, continue o non continue, incorporate in una sostanza meno resistente o matrice. La matrice mantiene fissa la disposizione geometrica delle fibre e trasmette a queste ultime i carichi applicati al componente in materiale composito. Il risultato finale è un composto avente caratteristiche intermedie tra quelle della matrice e quelle delle fibre.

In natura, un esempio di materiale composito è il legno del fusto di un albero: esso è costituito da fibre lunghe di cellulosa tenute insieme dalla lignina, una sostanza simile a una proteina; l'orientamento delle fibre, tipico del legno ma anche di molti altri materiali, conferisce anisotropia alle proprietà meccaniche, mentre i materiali metallici presentano un comportamento praticamente isotropo. Per questo motivo è comune affermare che nel caso dei materiali compositi il progetto della struttura procede simultaneamente al **progetto del materiale**, mentre per la struttura metallica questa fase è assente.

Gli aspetti positivi riguardo ai compositi:

- sono **anisotropi**: ciò significa che le proprietà meccaniche del materiale dipendono dalla direzione del carico, dunque se la direzione del carico è chiaramente identificata è possibile orientare le fibre lungo essa, creando una struttura molto resistente e leggera;
- possiedono buone **proprietà a fatica** (nettamente superiori ai metalli);
- godono di elevata **resistenza a corrosione**;

- vi è la possibilità di una maggior **integrazione delle strutture**, con una conseguente riduzione del numero di componenti e delle relative giunzioni.

Mentre gli aspetti negativi associati ai compositi:

- possiedono una **resistenza a compressione** generalmente più bassa;
- risentono negativamente dell'**assorbimento di umidità**, che può anche modificarne la stabilità dimensionale;
- soffrono di possibile attacco da parte di **batteri**;
- sono molto sensibili a danneggiamento di **impatto**;
- è più difficile effettuare **riparazioni** rispetto ai materiali convenzionali;
- sono generalmente **costosi**.

### 3.1.1 Le fibre

Le fibre sono assemblate da centinaia o migliaia di filamenti, ognuno dei quali avente un diametro tra i 5 e 15  $\mu\text{m}$ , tali da poter essere lavorate da macchine tessili. Esse sono composte generalmente da materiali aventi bassa densità ed elevata resistenza. Fibre leggere si ottengono generalmente da elementi con basso numero atomico, come carbonio, azoto, ossigeno, berillio, boro e silicio; fra queste le fibre di vetro (principalmente silicio e ossigeno), sono considerate pesanti.

#### Le fibre di vetro

Le fibre di vetro sono caratterizzate da basso costo, alta resistenza, rigidità relativamente alta e ottima resistenza agli agenti chimici. Le proprietà delle fibre di vetro sono molto diverse rispetto alle proprietà del materiale base in virtù della elevata velocità con cui il vetro viene raffreddato. Ne esistono di vari tipi:

- **vetro A**: il più economico, sono tipicamente prodotte bottiglie, bicchieri, vetri per finestre, ecc. L'elemento di partenza è sempre sabbia di silice, con l'aggiunta di ossidi di calcio, sodio, boro, ferro ed altri elementi;
- **vetro E**: composto da silice, allumina, acido borico e carbonato di calcio. Ha buona resistenza meccanica e resiste molto bene in ambiente umido; circa la metà delle fibre di vetro sono costruite con questo materiale;
- **vetro S**: composto da silice, allumina e magnesio; questo vetro presenta una resistenza statica più alta di circa il 30% rispetto al vetro E, è più resistente a fatica e ad alta temperatura.
- **vetro D**: presenta proprietà meccaniche più basse rispetto ai vetri E e S; il suo uso è limitato in aeronautica alla costruzione dei radomes;
- **vetro T**: presenta proprietà meccaniche elevate e basso coefficiente di dilatazione.

### Le fibre di carbonio

Sono generalmente molto costose e presentano alcuni inconvenienti dal punto di vista meccanico e chimico:

- sono **fragili**; questa caratteristica si accentua quando la fibra è associata alla matrice (ad es. resina epossidica), poiché anche quest'ultima è alquanto delicata;
- presentano una bassa resistenza all'**impatto**;
- la fibra di carbonio è un conduttore elettrico, dunque esiste la possibilità di **corrosione galvanica** nel contatto con un metallo;
- infine, presenta un valore negativo del **CTE** (coefficiente di dilatazione termica lineare); orientando opportunamente le fibre è possibile ottenere un valore nullo.

Tuttavia sono caratterizzate da una bassa densità, un'alta resistenza ed un modulo elevato per sollecitazioni a trazione.

### I materiali adottati per le matrici

Molti materiali sono utilizzati per le matrici:

- **matrici polimeriche**:
- **matrici minerali**: possono essere adottate ad elevate temperature;
- **matrici metalliche**.

Le fibre possono essere fornite sia asciutte che pre-impregnate con resina, la quale facilita la lavorazione del composito. L'inconveniente principale dei pre-impregnati (con resina termoindurente) è un ciclo di vita limitato, anche se mantenuti a bassa temperatura, tipicamente  $-18^{\circ}\text{C}$ , poiché la resina tende a completare la polimerizzazione. A temperatura ambiente la vita del pre-impregnato è breve, ma non può comunque essere inferiore 3-6 settimane, poiché nel caso di strutture molto complesse, questo può essere il tempo necessario per l'allestimento.

Il grosso vantaggio nell'uso dei pre-impregnati risiede nella resina, infatti il pre-impregnato contiene tutta la sostanza necessaria per la fabbricazione, per cui la produzione procede sovrapponendo diversi strati, senza dover aggiungere liquido supplementare. In realtà un pre-impregnato contiene circa un 15% di resina in eccesso, necessaria per garantire l'assenza di difetti; è quindi opportuno prevedere dei sistemi per il drenaggio del fluido in eccesso.

#### 3.1.2 Lo stampaggio della fibra di carbonio

L'insieme di rinforzi e resina porta ad un componente in composito alla fine dell'ultimo stadio di produzione, ossia l'indurimento della matrice. In seguito a questa fase non è più possibile modificare il materiale.

La formatura mediante processi di stampaggio varia a seconda della natura della parte, il numero di elementi e il costo. Il materiale dello stampo può essere di metallo (acciaio, alluminio, invar), polimeri, legno, o anche gesso. Le principali fasi della formatura sono:

1. l'impregnamento (mescolamento) di rinforzo e resina;
2. il posizionamento del composto sullo stampo;
3. la compattazione;
4. la polimerizzazione;
5. la sformatura;
6. la finitura.

### Contact molding

È un processo di stampaggio aperto (c'è un solo stampo, maschio o femmina). Gli strati di fibre impregnate di resina e catalizzatore sono posizionati sullo stampo. La compattazione viene effettuata utilizzando un rullo o il vuoto per spremere le bolle d'aria (vedi figura 3.1). La durata dell'indurimento della resina varia, a seconda della quantità di catalizzatore e temperatura, da pochi minuti ad alcune ore. In questo modo, le parti di grandi dimensioni possono essere prodotte al ritmo di circa 2-4 al giorno e per stampo, a seconda della loro complessità nella fase lay-up.

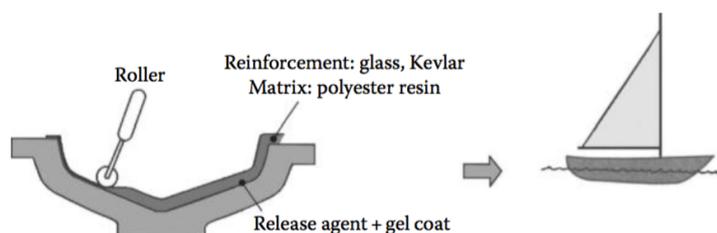


Figura 3.1: Contact molding.

### Compression molding

Con lo stampaggio a compressione (figura 3.2), un controstampo chiuderà lo stampo dopo che i rinforzi impregnati sono stati collocati in esso. Il tutto è posizionato in una pressa in grado di applicare una pressione di 1-2 bar. La polimerizzazione avviene a temperatura ambiente o superiore. Il processo è ideale per medie serie: possono essere fabbricate decine di parti al giorno (fino a 200 con riscaldamento, a seconda della loro complessità in fase di lay-up). Questo processo è usato per le parti secondarie in ambito automobilistico e aerospaziale.

### Vacuum molding

Come nel caso del *contact molding*, uno stampo aperto sul quale vengono posizionati i rinforzi impregnati viene utilizzato per questo processo. Un foglio di plastica è utilizzato per sigillare: esso è incollato lungo il perimetro dello stampo

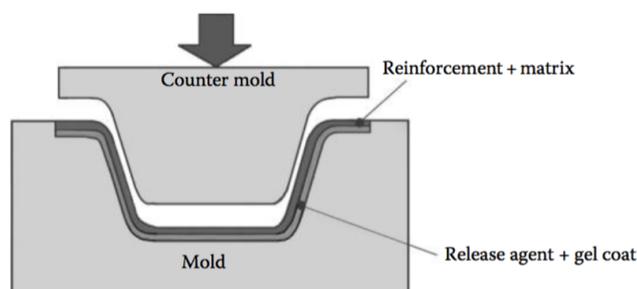


Figura 3.2: Compression molding.

mediante un mastice di tenuta. Il vuoto viene applicato sotto il foglio di plastica (vedere figura 3.3). La parte viene quindi compattata grazie all'azione della pressione atmosferica, e le bolle d'aria vengono eliminate. Tutto il materiale viene polimerizzato in un forno o autoclave sotto pressione (7 bar nel caso di carbonio/resina epossidica per ottenere migliori proprietà meccaniche), o con calore, o con fascio di elettroni, o raggi X. Questo processo ha applicazioni per strutture di aeromobili, con il tasso di poche parti per giorno (a seconda della loro complessità in fase di lay-up).

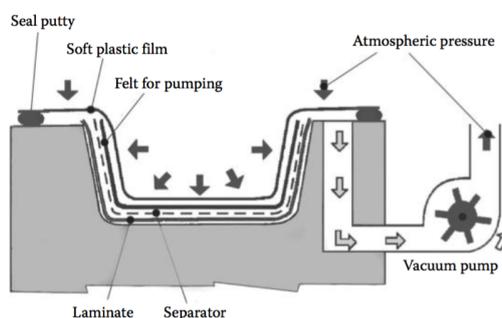


Figura 3.3: Vacuum molding.

### Resin injection molding

Con lo stampaggio ad iniezione di resina (si veda la figura 3.4), i rinforzi (stuoie, tessuti) sono collocati tra stampo e controstampo. La resina (poliestere o fenolica) viene iniettata. La pressione di stampaggio è bassa. Questo processo può produrre fino a 30 pezzi al giorno, a seconda della loro complessità. L'investimento è meno costoso e ha applicazioni per componenti di automobili.

### Injection Molding with Prepreg

Il processo di stampaggio per iniezione di prepreg permette l'automazione del ciclo di fabbricazione (tasso di produzione fino a 300 pezzi al giorno).

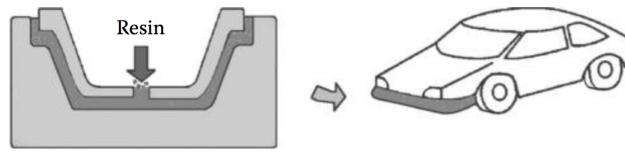


Figura 3.4: Resin injection molding.

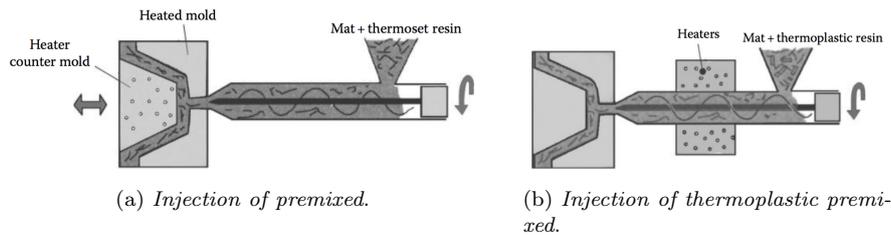


Figura 3.5: Injection molding with prepreg.

- resine termoindurenti: possono essere utilizzate per realizzare componenti della carrozzeria;
- resine termoplastiche: possono essere usate per realizzare componenti meccanici con resistenza a temperatura elevata.

### Foam injection molding

Lo stampaggio per iniezione di schiuma (figura 3.6) permette la lavorazione di pezzi di dimensioni piuttosto grandi in schiuma poliuretanica rinforzata con fibre di vetro. Questi pezzi rimangono stabili nel tempo, con buone condizioni della superficie, e hanno soddisfacenti proprietà meccaniche e termiche.

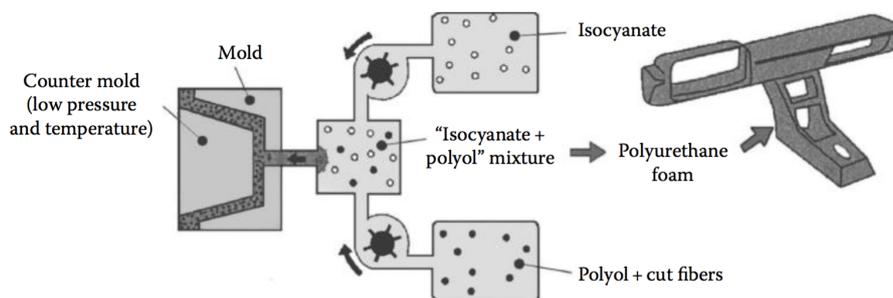


Figura 3.6: Foam injection.

### Molding of hollow axisymmetric components

Il processo di colata centrifuga (vedi figura 3.7) è utilizzato per la fabbricazione di tubi e tubazioni. Esso consente la distribuzione omogenea della resina con

buona finitura superficiale, compresa la superficie interna del tubo. La lunghezza del tubo dipende dalla lunghezza dello stampo. La velocità di produzione varia con il diametro e la lunghezza dei tubi (fino a 500 kg di composito al giorno).

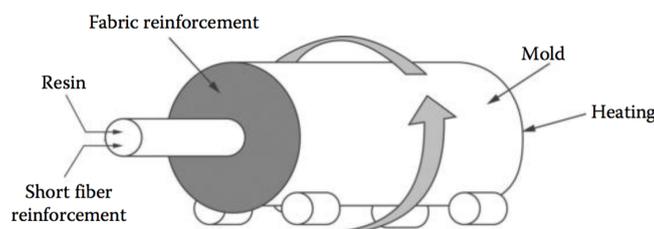


Figura 3.7: Centrifugal molding.

### Filament winding

Il processo per avvolgimento come descritto nella figura 3.8(a) può essere integrato in una catena continua di produzione e può fabbricare tubi di grande lunghezza. La velocità di produzione può essere fino a 500 kg di composito al giorno.

Per i pezzi di rivoluzione può essere applicato mediante l'utilizzo di mandrini di rivoluzione con geometrie adatte. Il composito è curato e il mandrino viene rimosso (si veda la figura 3.8(b)). La percentuale in volume di fibra è elevata (fino al 85%). Questo processo viene utilizzato per la lavorazione di componenti concepiti per elevate pressioni interne, quali serbatoi e ugelli di propulsione.

### 3.1.3 Le proprietà degli strati

Nella teoria dell'elasticità, valida per corpi elastici sotto carico meccanico, vengono effettuate le seguenti ipotesi:

- un corpo elastico soggetto a stress si deforma in maniera reversibile;
- in ciascun punto all'interno del corpo, i piani principali sono i piani su cui agisce solo lo sforzo normale;

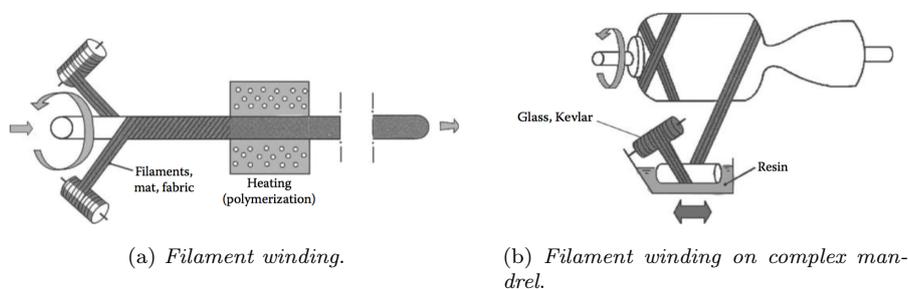


Figura 3.8: Due processi di filament winding.

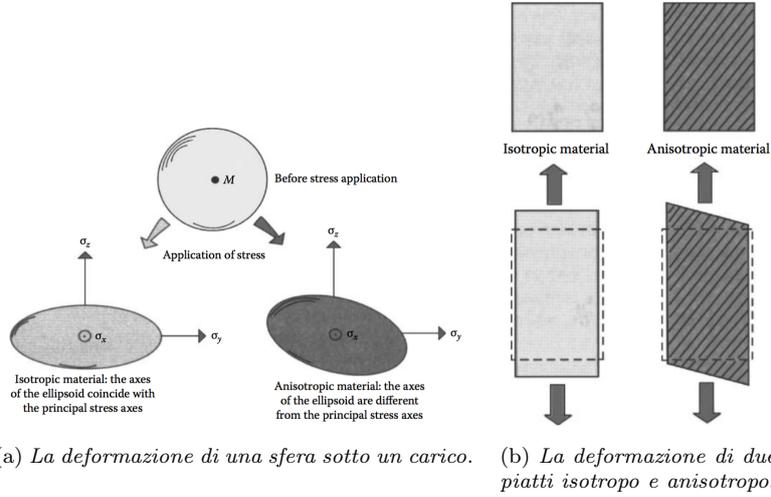


Figura 3.9: Le diverse deformazioni per materiale isotropo e anisotropo.

- le direzioni normali a questi piani sono denominate direzioni principali di tensione;
- all'interno del corpo, una piccola sfera di materiale circostante ad un punto diventa un ellissoide dopo l'applicazione del carico.

La posizione spaziale relativa dell'ellissoide rispetto alle direzioni principali di tensione consente di determinare se il materiale in fase di studio è isotropo o anisotropo (figura 3.9(a)). Un modo semplice per vedere gli effetti dell'anisotropia sulla deformazione di un campione consiste nel caricare una lastra di materiale anisotropo; la figura 3.9(b) illustra le deformazioni sotto carico, rispettivamente, di una piastra isotropa e anisotropa. In quest'ultimo caso, le linee oblique rappresentano le fibre di rinforzo. Va ricordato che un carico longitudinale applicato alla piastra isotropa crea una estensione in senso longitudinale ed una contrazione in direzione trasversale; lo stesso carico applicato ad una piastra anisotropa crea una distorsione angolare, oltre alla classica longitudinale e trasversale di estensione e contrazione.

Per i materiali isotropi le relazioni che legano tensioni e deformazioni possono essere scritte in forma matriciale:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

si può notare che vi sono tre costanti elastiche:  $E, \nu, G$ . La relazione tra queste è:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

quindi le precedenti relazioni mostrano che per i materiali isotropi ed elastici esistono solo due variabili elastiche indipendenti:  $E$  e  $\nu$ .

Per quanto riguarda i materiali anisotropi:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

si possono notare cinque costanti elastiche:

- due moduli di elasticità:  $E_x$  e  $E_y$ ;
- due coefficienti di Poisson:  $\nu_{yx}$  e  $\nu_{xy}$ ;
- un modulo di taglio:  $G_{xy}$ .

Le cinque costanti elastiche si possono ottenere dalle altre usando la relazione di simmetria:

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} \frac{E_x}{E_y}$$

### 3.1.4 I tessuti

La terminologia utilizzata per le fibre deriva dalla tradizione tessile:

1. una singola fibra è un "filament";
2. un insieme di fibre prodotte simultaneamente viene denominato "end" o "strand";
3. diversi strands paralleli possono essere arrotolati come un nastro, "roving" o "tow", oppure attorcigliati, "yarn", e uniti a trefolo.[5]

I tessuti sono formati da fibre disposte lungo due direzioni mutuamente perpendicolari: una è detta direzione dell'ordito (la direzione di lunghezza del rotolo di tessuto) e l'altra è detta direzione di trama. Le fibre sono tessute insieme, il che significa che i fili di trama passano sopra e sotto alcuni filati di ordito, secondo un percorso predeterminato. Il modo in cui i fili di ordito e fili di trama si incrociano definisce il tipo di trama del tessuto. Le trame in figura 3.10 sono in ordine crescente di capacità di drappaggio superfici complesse, forza, rigidità, e costo.

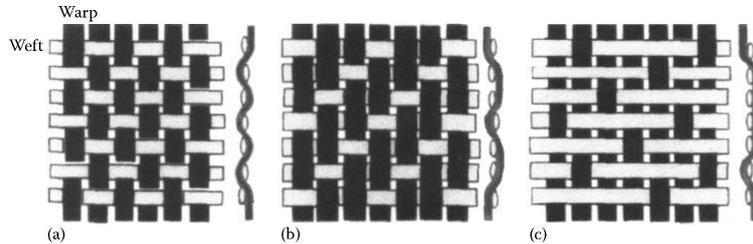


Figura 3.10: Geometrie dei tessuti: (a) tessuto plain, (b) tessuto twill, e (c) tessuto satin.

La figura 3.10(a) mostra un tessuto plain in cui ogni filo di trama passa alternativamente sopra e sotto i fili di ordito successivi. La figura 3.10(b) mostra

un tessuto twill: qui, un filo di trama passa sopra un filo di ordito (1) e sotto i due che seguono (2, 3); nel passaggio successivo, la spoletta del telaio passa sotto i fili di ordito 1 e 2 e sopra il terzo. Facendo riferimento alla 3.10(b), vediamo come la spoletta si sposta durante i passaggi successivi. Un effetto a diagonale si forma quindi sulla faccia del tessuto. La figura 3.10(c) mostra una trama del tessuto satin: ogni filo di trama sovrasta quattro fili di ordito prima di andare sotto il quinto.

### 3.1.5 Strutture a sandwich

Le strutture sandwich occupano un ruolo importante nella fabbricazione di parti composite. Esse appaiono in quasi tutti i campi di applicazione. Nella maggior parte dei casi, esse devono essere progettati per uno scopo specifico.

Una struttura a sandwich è il risultato dell'adesione o saldatura di due rivestimenti sottili o pelli su un nucleo più leggero che mantiene una distanza prefissata tra i due pelli (vedi figura 3.11). Le proprietà di questa particolare struttura sono sorprendenti:

- un peso molto leggero; a titolo di confronto, la massa per unità di superficie della cupola della Basilica di San Pietro a Roma (45 m di diametro) è di  $2600 \text{ kg/m}^2$ , mentre la massa per superficie di una cupola simile in schiuma sandwich d'acciaio/poliuretano ad Hannover è solo  $33 \text{ kg/m}^2$ .
- una elevata rigidità flessionale a causa della distanza tra le pelli superficiali, che aumenta il momento flettente di inerzia;
- eccellenti proprietà di isolamento termico.

Tuttavia:

- le strutture sandwich hanno scarse proprietà di smorzamento (isolamento acustico);
- alcune categorie di nuclei hanno una bassa resistenza al fuoco;
- il rischio di instabilità del nucleo per frantumazione deve essere verificato con adeguati metodi di dimensionamento.

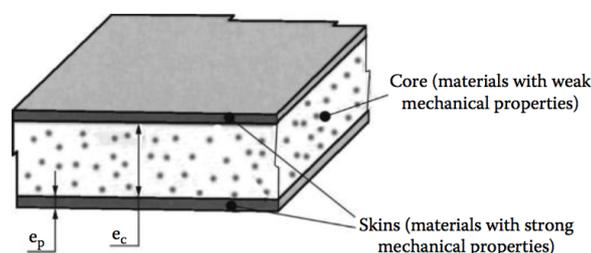


Figura 3.11: Una struttura di composito sandwich.

**Flessione semplificata**

Nella figura 3.12, si evidenzia in modo semplificato le principali sollecitazioni che sorgono quando una trave sandwich è soggetta a flessione. La trave viene fissata alla sua estremità sinistra e sottoposta ad un carico trasversale  $T$  alla sua estremità destra. Si può isolare una porzione elementare  $dx$  di trave ed aumentare la deformazione per studiare il fenomeno. Quindi, possiamo osservare in ogni sezione una forza di taglio risultante  $T$  ed un momento risultante  $M$  in accordo con le regole classiche della meccanica.. La forza di taglio  $T$  è il risultato di una distribuzione di tensioni  $\tau$ . Il momento flettente  $M$  è il risultato di una distribuzione di sforzi normali  $\sigma$ . Al fine di valutare  $\sigma$  e  $\tau$ , le seguenti semplificazioni possono essere suggerite:

- la tensione normale  $\sigma$  si verifica solo nelle pelli ed è uniforme considerando lo spessore di quest'ultime;
- lo sforzo di taglio  $\tau$  si verifica solo nel nucleo ed è uniforme in tutto il suo spessore.

Si ottengono quindi le espressioni indicate nella figura 3.13.

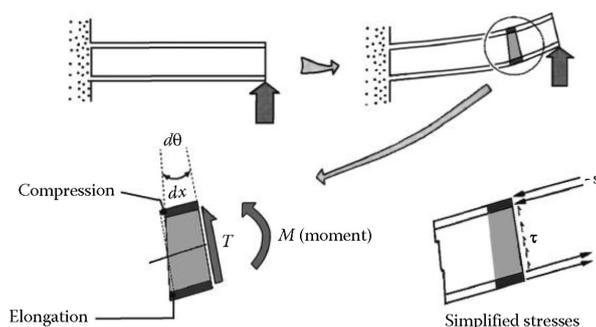


Figura 3.12: Rappresentazione della flessione in una struttura sandwich.

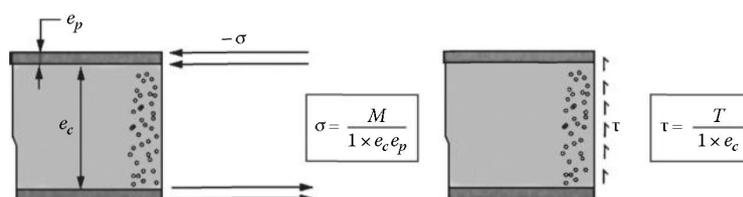


Figura 3.13: Tensioni in una struttura sandwich.

**Le deformazioni**

La figura 3.14 mostra una trave sandwich soggetta a flessione. Qui, lo spostamento  $\Delta$  è conseguenza di:

- la deformazione dovuta allo sforzo normale  $\sigma$ ;
- la deformazione creata dallo sforzo di taglio  $\tau$ .

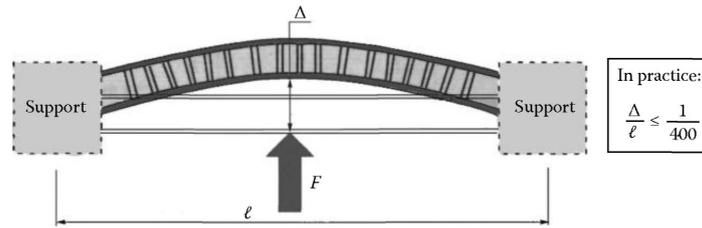


Figura 3.14: Trave sandwich sollecitata a flessione.

Per valutare  $\Delta$  si può utilizzare il teorema di Castigliano:  
 il lavoro di deformazione generato dalla flessione è pari a:

$$dL = \frac{1}{2} \frac{M^2}{EI} dx$$

il lavoro di deformazione generato dal taglio è pari a:

$$dL = \frac{1}{2} \frac{k}{GS} T^2 dx$$

quindi l'energia elastica è pari a:

$$W = \frac{1}{2} \int \frac{M^2}{EI} dx + \frac{1}{2} \int \frac{k}{GS} T^2 dx$$

e per il teorema di Castigliano:

$$\Delta = \frac{\partial W}{\partial F}$$

dove:

- $M$  è il momento flettente;
- $T$  è lo sforzo di taglio;
- $E_p$  è il modulo di elasticità della pelle della struttura;
- $G_c$  è il modulo di taglio del nucleo della struttura.

$$EI \approx E_p e_p \cdot 1 \cdot \frac{(e_c + e_p)^2}{2}; \quad \frac{k}{GS} = \frac{1}{G_c (e_c + 2e_p) \cdot 1}$$

**Danneggiamento da "buckling" nelle strutture sandwich**

La resistenza a compressione di tutta o parte di una struttura a sandwich è limitata dai cosiddetti valori critici del carico applicato, dal quale le deformazioni diventano grandi e incontrollabili. Questo fenomeno è chiamato "buckling" della struttura. A seconda del tipo di carico, si possono distinguere diversi tipi di instabilità, che possono essere globali o locali.

Tabella 3.1: Proprietà di alcuni tipi di honeycomb.

	Nomex <sup>®</sup>	AA5154A	A92024
Diametro del circolo inscritto, $D$ (mm)	5	4	6
Spessore, $e$ (mm)	0.08	0.05	0.04
Densità, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	64	80	46
Tensione di rottura, $\tau_{xz}$ (MPa)	2.5	3.2	1.5
Modulo di taglio, $G_{xz}$ (MPa) $\approx 1.5 \cdot G_{mat} \cdot (e/D)$	70	520	280
Tensione di rottura, $\tau_{xy}$ (Mpa)	1.1	2	0.9
Modulo di taglio, $G_{xy}$ (MPa)	35	250	140
Tensione di compressione, $\sigma_z$ (MPa)	3.8	4.4	2

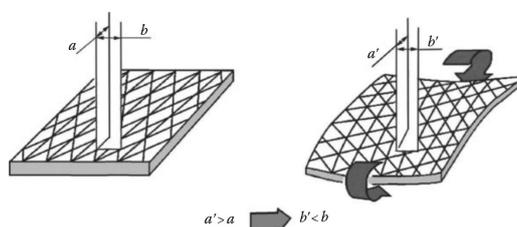


Figura 3.15: Deformazione del honeycomb su un cilindro.

### Honeycomb

Questi materiali di base sono costituiti da celle esagonali distanziate in maniera regolare come quelle di un alveare, da cui il nome a nido d'ape. Il materiale costituente l'honeycomb può essere metallico (lega leggera, acciaio) o non metallico (cartone impregnato con resina fenolica, fogli poliammide, o tessuti di vetro impregnati):

- i materiali non metallici sono resistenti alla corrosione e sono buoni isolanti termici;
- i materiali metallici sono meno costosi e più resistenti, ma più pesanti rispetto ai non metallici.

La tabella 3.1 mostra le proprietà meccaniche e geometriche di alcuni tipi di honeycomb.

### Processi di formatura

È importante mantenere l'honeycomb saldamente in posizione per ottenere la modellazione desiderata, perché il comportamento di deformazione naturale è complessa. Ad esempio, un pannello di honeycomb in flessione cilindrica mostra due curvatures, come illustrato nella figura 3.15. Il processo di formatura è facilitato dalla capacità sovraespansione del nido d'ape, che cambia la forma delle celle esagonali, come mostrato nella figura 3.16(a). Tuttavia vi sono delle limitazioni sulla curvatura; esse sono mostrate nella figura 3.16(b), dove  $R$  è il raggio di curvatura e  $e$  è lo spessore del foglio costituente l'honeycomb. Nel caso di piccoli raggi di curvatura è possibile piegare l'honeycomb come nella figura 3.17.

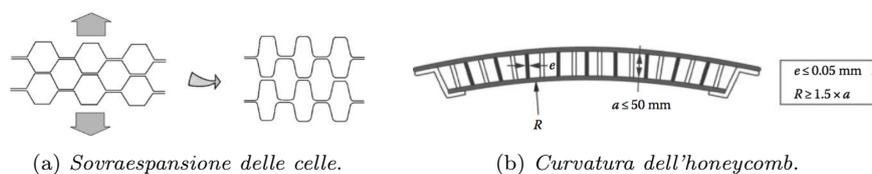


Figura 3.16: L'adattamento dell'honeycomb alle curvature.

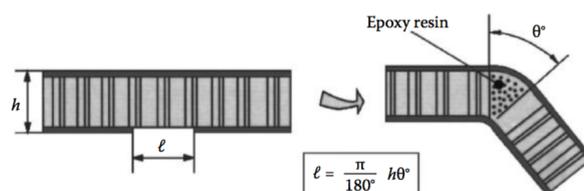


Figura 3.17: Formatura con struttura a sandwich per piccoli raggi di raccordo.

### 3.1.6 Progettare e disegnare

Per un materiale isotropo, l'approccio convenzionale del progettista consiste nella selezione di un materiale esistente e, in seguito, dimensionare la parte. Per una parte in composito, il progettista costruisce il materiale in accordo ai fini funzionali del componente. Il progettista definisce i seguenti:

- rinforzi;
- matrici;
- processo di formatura.

Le seguenti proprietà sono fondamentali nel momento della progettazione:

- l'orientamento delle fibre permette l'ottimizzazione del comportamento meccanico lungo quella specifica direzione;
- il materiale è elastico fino alla rottura; non si rilassa in seguito ad uno snervamento locale come avverrebbe nel caso di un classico materiale metallico;
- la resistenza a fatica è eccellente.

La resistenza specifica a fatica è definita come il rapporto  $(\sigma/\rho)$ , dove  $\sigma$  è la tensione e  $\rho$  è la densità. Per i materiali compositi, la resistenza specifica è tre volte superiore a quella dell'alluminio e due volte superiore a quella degli acciai ad alta resistenza e del titanio. Ciò deriva dal fatto che la forza fatica è pari al 90% del carico di rottura statico per un composito invece del 35% per le leghe di alluminio o il 50% per gli acciai e leghe di titanio.

Inoltre, i coefficienti di dilatazione termica sono differenti da quelli dei metalli, dunque occorre prestare attenzione quando si uniscono un metallo e un composito, ma soprattutto questo fenomeno deve essere considerato nel processo di formatura del laminato se lo stampo è in metallo.

### 3.1.7 I laminati

I laminati sono il risultato della sovrapposizione di una serie di strati unidirezionali o non, aventi ognuno il proprio orientamento.

#### Tessuto unidirezionale

I vantaggi di strati unidirezionali sono i seguenti:

- dopo la polimerizzazione, prevedono una elevata rigidità lungo la direzione delle fibre;
- permettono il lay-up lungo la lunghezza: la continuità di trasmissione dei carichi è così assicurata;
- nel processo di formatura vi sono meno scarti.

Tuttavia gli svantaggi sono i seguenti:

- la sequenza lay-up può essere lunga, a seconda della sua complessità;
- il lay-up non può seguire forme aventi un piccolo raggio di curvatura (vi è il rischio che si formino delle rughe).

#### Tessuto "fabric"

I tessuti sono in forma di rotoli, secchi o preimpregnati con resina. I vantaggi sono:

- riduzione dei tempi di lay-up;
- possibilità di produrre forme complesse utilizzando la deformabilità del tessuto;
- possibilità di combinare diversi tipi di fibre nello stesso tessuto.

Gli svantaggi:

- modulo di elasticità e tensione di rottura inferiore rispetto agli unidirezionali;
- maggiore quantità di materiale di scarto dopo il taglio;
- necessità di connessioni per pezzi di grandi dimensioni.

#### Il corretto orientamento degli strati

Uno dei vantaggi fondamentali dei laminati è la loro capacità di adattarsi e il corretto orientamento delle fibre permette una maggiore resistenza ai carichi. È quindi importante conoscere come i tessuti contribuiscono alla resistenza del laminato, considerando il loro orientamento relativo rispetto alla direzione di carico. Nella figura 3.18 sono rappresentati gli orientamenti standard.

Durante la produzione di un laminato, i successivi strati impregnati sono impilati a temperatura ambiente. Poi sono posti all'interno di una autoclave per la polimerizzazione. Alla temperatura elevata polimerizzazione, la dilatazione termica del complesso laminato avviene senza pieghe o deformazioni. Tuttavia,

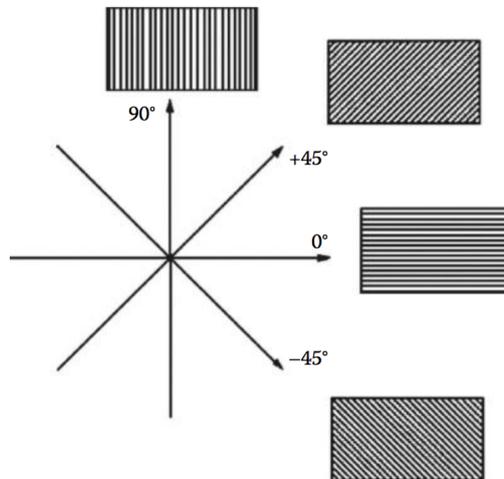


Figura 3.18: Gli orientamenti standard.

durante il raffreddamento, mentre la resina è polimerizzata, gli strati hanno una tendenza a contrarsi in modo diverso a seconda della direzione delle fibre o la direzione perpendicolare ad esse (direzione trasversale). Si possono verificare tensioni residue in seguito a questo processo. Sfruttando la simmetria della struttura si può impedire la deformazione complessiva del componente.

### Rottura dei laminati

La figura 3.19 mostra schematicamente differenti tipi di rottura che portano al danneggiamento del laminato. Quando il carico eccede i livelli critici, le modalità di danneggiamento sono illustrate nella figura 3.20.

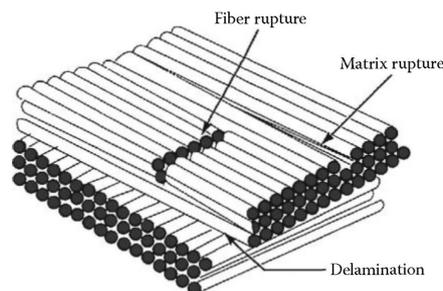


Figura 3.19: Differenti tipi di rottura.

### 3.1.8 Fissaggio e incollaggio

Si è visto precedentemente come progettare un laminato in modo da sostenere i carichi complessivi. Ancora più critico per il progettista di una parte composita è l'accurata progettazione dei fissaggi e degli incollaggi delle parti tra

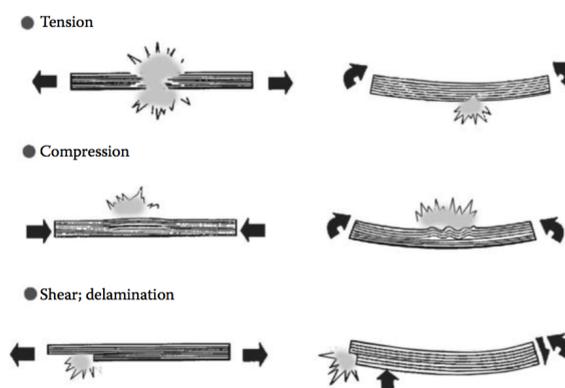


Figura 3.20: Modalità di danneggiamento.

loro. Qui, sono esaminate le soluzioni di montaggio che coinvolgono rivettatura, bullonatura, e incollaggio di:

- una parte in composito ad un'altra parte in composito;
- una parte composita ad una parte metallica.

In questo paragrafo viene attribuita importanza agli incollaggi piuttosto che alla rivettatura e alla bullonatura, poiché è la pratica che sarà adottata nella realizzazione dei sedili.

### Incollaggio

Questa tecnica di giunzione si basa sulla adesione per attrazione molecolare tra due parti (i substrati da incollare) ed un adesivo che deve essere in grado di trasferire i carichi. Possiamo elencare i principali vantaggi di questa tecnica di fissaggio:

- distribuzione delle sollecitazioni lungo una grande superficie;
- possibilità di ottimizzare la geometria e le dimensioni di zona di incollaggio;
- più leggero del collegamento meccanico;
- l'isolamento e la tenuta sono proprietà caratteristiche degli adesivi.

I tipi di adesivi utilizzati comprendono generalmente gli epossidici, i poliesteri, i poliuretani o i metacrilati e sono per lo più resistenti alle alte temperature ( $>180^{\circ}\text{C}$ ), all'umidità e a molti agenti chimici.

### Geometria delle giunzioni

Per quanto possibile, le parti incollate dovrebbero soddisfare le seguenti specifiche:

- lo strato di adesivo deve essere sollecitato a taglio nel proprio piano;

- uno stato di tensione nello strato adesivo deve essere evitato.

Di conseguenza, la trasmissione del carico sarà effettuata in condizioni più o meno favorevoli a seconda della geometria del giunto, come mostrato nella figura 3.21(a). La trasmissione della coppia è illustrata nella figura 3.21(b).

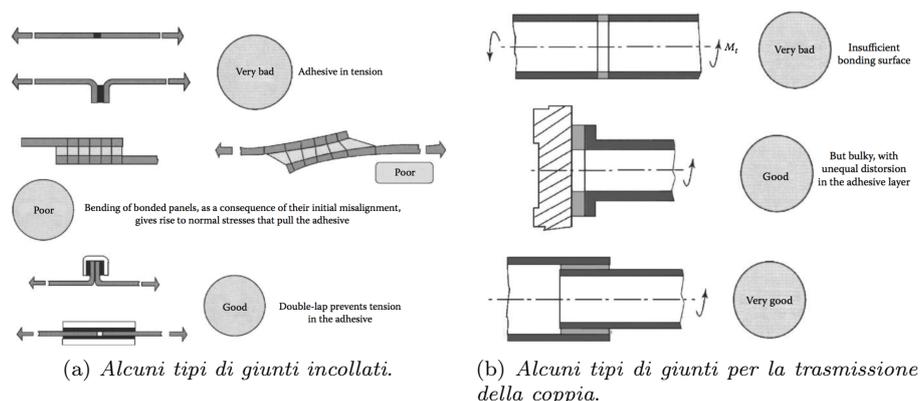


Figura 3.21: Esempi di giunti incollati per la trasmissione dei carichi.

I tipici valori per lo spessore dello strato adesivo sono  $0.11\text{mm} \leq e \leq 0.3\text{mm}$ . [6]

### 3.2 Elaborazione degli elementi

In tutto il percorso di ricerca è stato utilizzato un metodo iterativo che ci ha permesso di raggiungere il risultato sperato (vedi figura 3.22).

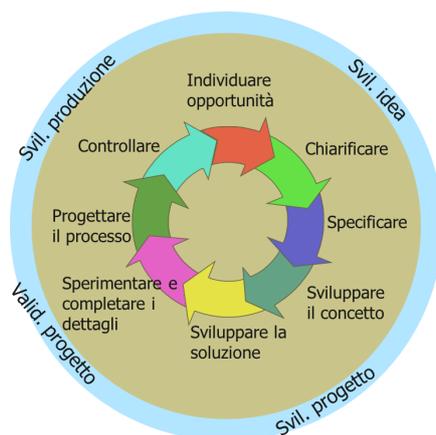


Figura 3.22: Il metodo di lavoro utilizzato nella progettazione degli elementi.

Si è così creata una sinergia tra i vari gruppi di lavoro, ovvero una cooperazione contemporanea di più persone che ha reso possibile il raggiungimento

del risultato in tempi più brevi rispetto all'attività ottenuta dai vari elementi separati.

La metodologia di lavoro è stata così definita:

1. **individuazione di un'opportunità:** evidentemente corrisponde alla possibilità di accedere alla competizione;
2. **chiarificare:** questa fase corrisponde alla creazione di un modello in legno per verificare l'attinenza del progetto al regolamento;
3. **specificare:** in tal stadio sono state individuate le quote di riferimento dal modello in legno da trasportare poi sul modello CAD;
4. **sviluppare il concetto:** la quarta tappa del progetto è dedicata all'ideare una corretta integrazione del prodotto con gli altri elementi componenti il cruiser, per giungere in seguito allo **sviluppo del concetto**, ossia la trasposizione delle idee nel disegno CAD;
5. **sperimentare e completare i dettagli:** questa è la fase del confronto con gli altri gruppi di lavoro ed è proprio in questo momento in cui può avvenire l'iterazione, cioè il ritorno allo stadio *sviluppare la soluzione* se le varie attività non sono in armonia, oppure il passaggio al livello successivo;
6. **progettare il processo:** in questo momento vengono studiate le soluzioni che porteranno poi alla costruzione dei prodotti finali (studi tecnologici);
7. **controllare:** controllo dei risultati ottenuti e realizzazione delle parti che andranno a comporre il cruiser.

### 3.2.1 Le fasi del progetto

Il progetto ha preso avvio ad aprile 2016.

Il design del cruiser è stato dettato da Marko Lukovic e dai suoi studenti, rispettando i punti del regolamento riguardo dimensioni, abitabilità, visione, ecc. . . Inoltre, nel modello sono stati integrati, fin da subito, alcuni accorgimenti aerodinamici per migliorare l'efficienza del veicolo in gara:

- **presenza di un tunnel centrale:** ha la funzione di ridurre drasticamente l'area frontale del veicolo (che determina il  $CX^1$ ) e di permettere al flusso che passa sotto il cruiser di raccordarsi in maniera più dolce con il flusso proveniente da sopra al veicolo;
- **boat-tailing:** si ottiene raccordando in maniera più dolce i flussi e permette di minimizzare la turbolenza dannosa che si crea nella coda del veicolo (vedi figura 3.23).

---

<sup>1</sup>Il coefficiente di resistenza aerodinamica è un coefficiente adimensionale utilizzato per misurare la resistenza aerodinamica di un corpo in moto in un fluido. Comprende, per un corpo generico, i contributi di due tipi di resistenza fluidodinamica, la resistenza di attrito e la resistenza di forma.[7]



Figura 3.23: Il design di Emilia 4 progettato da Marko Lukovic.

### 3.2.2 Costruzione di un modello in legno

Il progetto è proseguito con la costruzione di un modello in legno (figura 3.24) per verificare l'attinenza del veicolo al regolamento. Nel caso della progettazione dei sedili ciò è stato un passo fondamentale: in questa fase sono stati infatti definiti gli angoli di inclinazione dello schienale e della seduta, le varie altezze delle superfici rispetto all'origine del sistema di riferimento e il posizionamento dei componenti nella direzione longitudinale del veicolo. Infine si è accertata la regolarità dello spazio dell'abitacolo, in particolare, nel caso dei sedili:

- distanza tra anca e poggiatesta;
- angolo compreso tra spalle, anche e ginocchia;
- lo spazio per i passeggeri, approssimato dal volume occupato da un braccio radiale;
- la distanza tra casco e tetto dell'abitacolo.



Figura 3.24: Il modello in legno per verificare l'abitabilità del cruiser.

### 3.2.3 Creazione del disegno CAD

Nello sviluppo del sedile si è proceduto ad una serie di revisioni intermedie che hanno consentito di arrivare al modello finale, risolvendo le varie problematiche emerse durante il lavoro.

#### Revisione 01

In questo stadio del progetto sono state trasposte tutte le nozioni acquisite dal modello di abitabilità al disegno CAD, creando una prima geometria dei sedili.

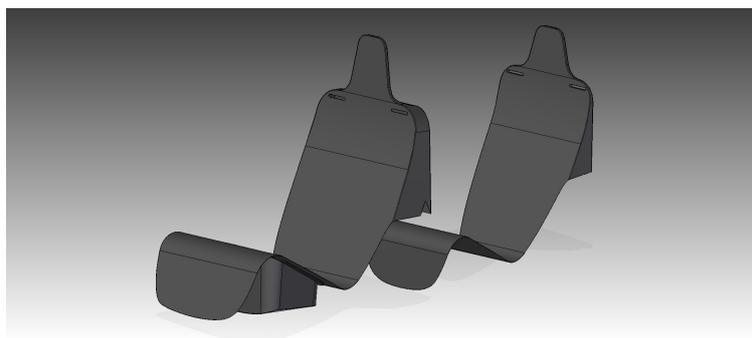


Figura 3.25: Trasposizione delle direttive al modello CAD.

#### Revisione 02

La seconda revisione del progetto ha portato come modifiche fondamentali:

1. l'integrazione dei sedili con la geometria disegnata da Marko Lukovic;
2. l'aggiunta di un vano porta-zavorra nel sedile anteriore avente la duplice funzione di irrobustire la struttura e di assicurare la massa della zavorra a 300 mm dall'anca del passeggero e valutazione della massa trasportabile (circa 52 kg);
3. il disegno preliminare del roll-bar centrale del veicolo a sezione triangolare da integrare successivamente con i sedili anteriori e avente funzione di punto di ancoraggio per gli attacchi superiori delle cinture di sicurezza dei sedili anteriori;

#### Revisione 03

Essa porta molte novità ed un deciso affinamento dei componenti:

1. viene fissato lo spessore dei sedili a 6 mm (la struttura scelta è di tipo "sandwich", ovvero costituita da due laminati di carbonio ed uno strato di Nomex aventi spessore rispettivamente di 0,5 mm e 5 mm). Questi spessori derivano dalle esperienze di progettazione precedenti;
2. il profilo dei sedili posteriori viene eliminato per dare luogo ad una parete unica che divide il vano dell'abitacolo dall'appendice aerodinamica;

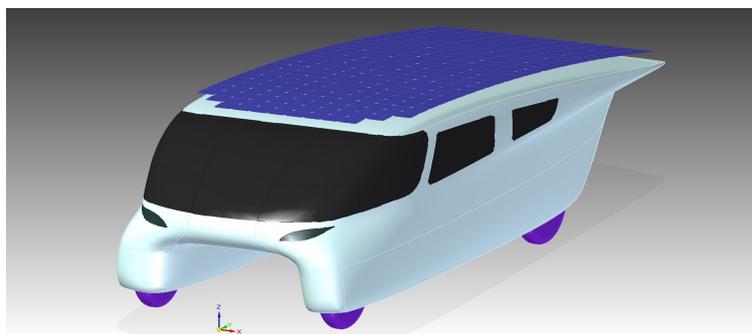


Figura 3.26: Il modello CAD di Emilia 4 disegnato da Marko Lukovic.

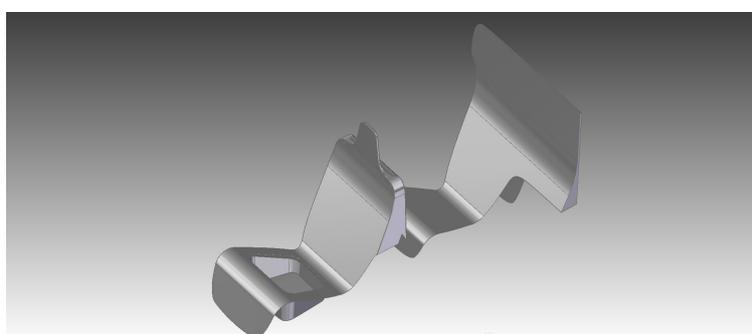
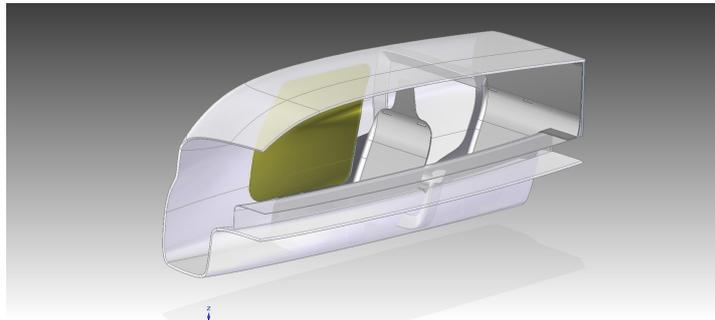
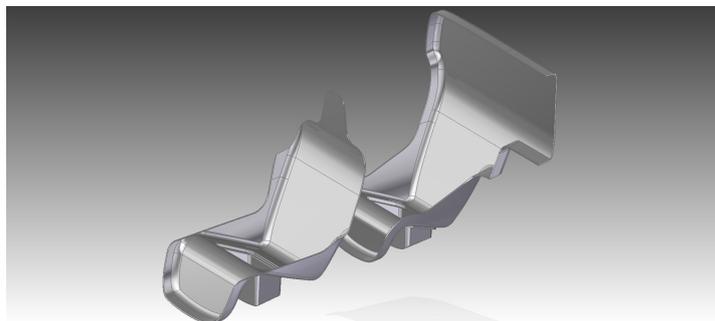


Figura 3.27: Le principali novità introdotte nella revisione 02.

3. il disegno del vano batterie per valutare gli ingombri, considerando le dimensioni del pacco batterie (40x120x10 cm) e degli inverter (30x30x8 cm);
4. l'introduzione dei lembi per l'incollaggio dei sedili alla struttura del cruiser;
5. l'integrazione della portiera disegnata da Valerio Polini (tesista incaricato al disegno di porte e cerniere per la chiusura) al modello per il taglio delle superfici di incollaggio;
6. il supplemento di una trave a sezione ellittica sostenuta dai due estremi del roll-bar per realizzare i punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza;
7. l'inserimento di un porta-zavorra anche per i sedili posteriori e la rivisitazione della geometria per quest'ultimo per entrambi (anteriori e posteriori): viene ridotto il vano perché evidentemente sovradimensionato nella revisione 02 e si creano geometrie uguali per entrambi; questa soluzione porta ad una maggiore semplicità (intercambiabilità) e risulta essere anche più economica poiché diventa possibile realizzare il coperchio per il vano per tutti sedili con un unico stampo;
8. la valutazione delle masse delle zavorre anteriore e posteriore, rispettivamente 30,8 kg e 22,1 kg;



(a) Una vista dell'insieme.



(b) I particolari dei sedili.

Figura 3.28: Le principali modifiche apportate dalla revisione 03.

9. la valutazione del peso dei sedili partendo dai seguenti dati:

$$\rho_{nomex} = 29 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{sup. \text{ fibra}} = 950 \text{ g/m}^2$$

$$\rho_{fibra} = \frac{950 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2}{0.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 1900 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{media} = \frac{1900 \cdot 1 + 29 \cdot 5}{6} = 340.83 \text{ kg/m}^3$$

essa risulta 1.989 kg per il sedile anteriore e 2.520 kg per quello posteriore.

#### Revisione 04

Le modifiche apportate da questa versione sono:

1. Il roll-bar centrale viene fatto terminare all'altezza delle spalle dei sedili anteriori per le seguenti ragioni:
  - (a) **peso**: viene valutata la parte inferiore della struttura già abbastanza strutturale (per essa è prevista una struttura sandwich di 12 mm) e dunque il roll-bar va a sostenere il tetto del cruiser di spessore minore;
  - (b) **abitabilità**: dalla revisione 03 risulta chiaro che la struttura esaminata è di intralcio ai passeggeri dei sedili posteriori;

2. i punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza anteriori vengono ottenuti direttamente dalla struttura del sedile, ripiegando su se stesse le lamine che vanno a definire la forma dell'appoggiatesta (per maggiori chiarimenti guardare la figura 3.29);
3. la struttura del sedile anteriore si protende fino al vano batteria per poi collegarsi a quest'ultimo tramite incollaggio;
4. aumento dei raggi di raccordo dei sedili in prossimità dei lembi per il collegamento alla scocca.

### 3.2.4 Realizzazione esecutiva degli elementi

Lo stampaggio degli elementi avverrà con tutta probabilità entro l'anno; per tale operazione si utilizzerà la tecnica del *vacuum molding*, descritta precedentemente.

I materiali utilizzati per la realizzazione dei sedili e dei punti di ancoraggio delle cinture di sicurezza sono mostrati nella tabella 3.2. Nello specifico, il

Tabella 3.2: Materiali e strutture previste per i componenti

Componente	Parte	Struttura	Materiali
Sedili	Seduta	Sandwich	Twill e Nomex <sup>®</sup>
	Porta-zavorra	Pelli sovrapposte	Twill
	Schienale	Sandwich	Twill e Nomex <sup>®</sup>
	Poggiatesta	Pelli sovrapposte	Twill
Punti di ancoraggio		Pelli sovrapposte	Twill

tessuto twill ha uno spessore di 0.5 mm ed una densità superficiale pari a 950 g/m<sup>2</sup>, mentre il Nomex<sup>®</sup>, se utilizzato, ha uno spessore di 5 mm ed una densità di 29 kg/m<sup>3</sup>.

Nelle strutture sandwich dovrebbero essere utilizzate due laminati e honeycomb, mentre nelle parti in cui non è prevista tale configurazione sono adottate più pelli di carbonio sovrapposte. Per entrambe le conformazioni devono essere ancora stabiliti gli spessori, e dunque il numero di pelli adoperate; quest'ultima fase della progettazione sarà effettuata nel momento in cui le geometrie saranno definite con un'analisi agli elementi finiti (FEA).

### Stampaggio

Tale operazione sarà effettuata mediante la lavorazione a macchina utensile di tavole di resina epossidica; il risultato di questo processo permetterà la formazione degli stampi in fibra di carbonio in tessuto bidirezionale twill con disposizione 0/90, quest'ultimo caratterizzato da una elevata stabilità dimensionale e catalizzazione a bassa temperatura. Dagli stampi sarà possibile ottenere i componenti desiderati per mezzo della tecnica *vacuum molding*. Nella tabella 3.3 sono riportate le caratteristiche delle lavorazioni.

In seguito sono riportati i rendering dei sedili appartenenti alla revisione 04 del progetto.

Tabella 3.3: Specifiche per lo stampaggio.

	Stampi	Componenti
Pressione (bar)	6	6 (3.5 se la struttura contiene Nomex <sup>®</sup> )
Temperatura (°C)	55/60	125
Durata (h)	6/8	1.5/2



Figura 3.29: Il sedile anteriore destro del cruiser Emilia 4.

### 3.3 Analisi agli elementi finiti

I componenti meccanici di forme semplici, quali barre, travi ecc..., possono essere analizzati piuttosto facilmente con i metodi di base della meccanica che forniscono soluzioni in forma chiusa. Tuttavia i componenti reali raramente risultano così semplici, perciò il progettista è costretto ad accontentarsi di approssimazioni delle soluzioni in forma chiusa, o ricorrere a metodi numerici o addirittura alla sperimentazione. Esistono numerose tecniche numeriche usate in ingegneria per le quali risulta molto utile l'impiego dei computer. Nella progettazione meccanica, dove sono ampiamente utilizzati i programmi di disegno assistito dal calcolatore (CAD), il metodo di calcolo che meglio si integra con tali sistemi CAD è *l'analisi agli elementi finiti* (FEA). Gli aspetti matematici e applicativi di questo metodo sono molto vasti; oggi sono inoltre disponibili numerosi software commerciali per analisi agli elementi finiti, quali ANSYS, ABAQUS, MARC ecc.

#### 3.3.1 Generalità sul metodo

Un componente meccanico reale è una struttura elastica continua. Il FEA divide (discretizza) la struttura intera in sottostrutture (elementi) elastiche di dimensioni piccole ma finite. Per mezzo di funzioni di approssimazione polinomiale

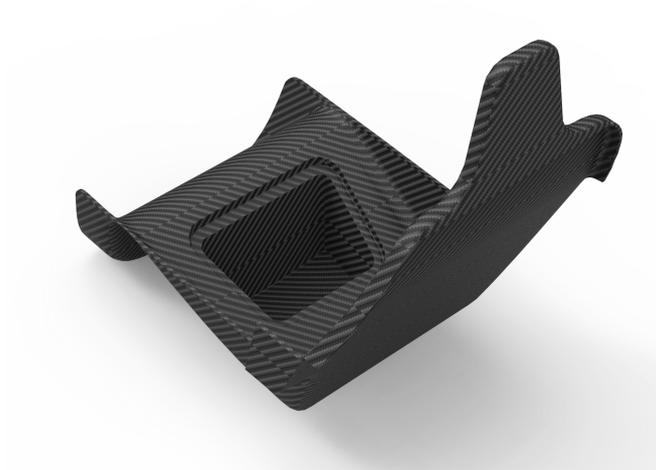


Figura 3.30: Il porta-zavorra del sedile anteriore destro.



Figura 3.31: Il sedile posteriore destro del cruiser Emilia 4.

del campo degli spostamenti, e sfruttando opportunamente il calcolo matriciale, il comportamento elastico continuo di ogni elemento viene determinato in funzione delle proprietà geometriche e del materiale dell'elemento stesso. Si possono applicare carichi interni all'elemento (gravitazionali, dinamici, termici ecc.), sulla superficie (pressione) o sui nodi dell'elemento (forze concentrate o spostamenti imposti). I nodi sono le vere entità fondamentali che caratterizzano gli elementi; infatti è ai nodi che gli elementi si collegano tra loro garantendo la congruenza del continuo elastico, che vengono assegnate le condizioni al contorno o di vincolo, e che vengono realmente applicate in ultima analisi tutte le forze (di contatto, interne, concentrate e distribuite ecc.). Inoltre sono i nodi a possedere i gradi di libertà (GdL). Un nodo può possedere al massimo tre gradi di libertà di traslazione e tre di rotazione. Una volta che ciascun elemento all'interno di una struttura sia stato definito localmente in forma matriciale, tutti gli elementi vengono successivamente assemblati globalmente attraverso i nodi comuni (o meglio attraverso i loro GdL comuni) in un'unica matrice complessiva del sistema. A questo punto vengono specificati i carichi applicati e le condizioni al contorno, e attraverso operazioni di tipo matriciale si calcolano tutti gli spostamenti incogniti relativi ai GdL non vincolati. Infine, non è difficile utilizzare gli spostamenti appena determinati per calcolare gli stati di deformazione e sforzo in base alle equazioni costitutive elastiche del materiale.

### Errori introdotti nella tecnica numerica

Poiché il metodo degli elementi finiti è una tecnica numerica che si basa sulla discretizzazione di una struttura in realtà continua, vengono introdotti inevitabilmente alcuni errori:

1. **Errori di discretizzazione.** La geometria e la distribuzione degli spostamenti in una struttura reale variano con continuità. L'utilizzo di un numero finito di elementi per modellare il componente introduce errori a causa dall'intrinseca limitazione matematica degli elementi stessi, non permettendo una perfetta sovrapposizione con la geometria e con gli spostamenti della struttura vera.
2. **Errori di modellazione.** Sebbene molto spesso al giorno d'oggi la geometria sia importata da sistemi CAD e sia molto aderente al componente reale, nel modello FEM il più delle volte le condizioni di vincolo e di carico debbono per forza essere schematizzate e semplificate, comportando un ulteriore grado di incertezza nel risultato finale, soprattutto localmente.

Come esempio di errore di discretizzazione, si consideri la piastra sottile a spessore costante illustrata nella figura 3.32. La figura 3.32 mostra il modello a elementi finiti della struttura realizzato con elementi semplici triangolari a tre nodi in condizione di stato piano di tensione. Le forze e i vincoli possono essere imposti soltanto in corrispondenza dei nodi. I nodi degli elementi triangolari semplici in stato di tensione piano hanno come soli gradi di libertà le due traslazioni nel piano; perciò i supporti semplici, indicati con triangoli neri sul lato sinistro, rappresentano il supporto fisso (incastro) della piastra. Si nota inoltre che l'unico modo per rappresentare il carico distribuito è quello di applicare forze concentrate ai nodi, in modo che tale sistema di forze concentrate sia staticamente equivalente al carico effettivo.

La qualità dei risultati può essere migliorata aumentando il numero degli elementi (con una maggiore densità di mesh); in alternativa, si può anche migliorare la qualità degli elementi adottando elementi quadrangolari a 4 o 8 nodi, i quali risultano più adatti all'applicazione qui considerata: per esempio l'elemento quadrangolare a 8 nodi, grazie a funzioni di interpolazione di ordine più elevato, è in grado di modellare bordi curvi e di fornire distribuzioni di deformazione di grado più elevato.

### Generazione della mesh

La rete di nodi ed elementi che discretizzano una regione è indicata con il nome di mesh. Una volta definiti completamente i contorni della struttura, senza che siano necessarie troppe operazioni da parte dell'utilizzatore, diversi schemi sono disponibili per discretizzare la struttura se si utilizza un solo tipo di elemento.

La densità della mesh aumenta se una stessa regione viene modellata con più elementi; si parla invece di raffinamento della mesh quando la densità viene modificata da un'analisi FEM per fornire risultati più accurati in un'analisi successiva. Generalmente si ottengono risultati migliori se si aumenta la densità di mesh nelle zone con elevati gradienti di tensione o se le variazioni geometriche vengono modellate dolcemente. Il più delle volte i risultati di analisi FEM convergono al valore esatto se si affina gradualmente la mesh. Per questo, si possono effettuare più prove aumentando la densità di mesh nelle zone con elevati gradienti di tensione, finché non si ottiene una sostanziale stabilizzazione del valore massimo di tensione, e questo può essere ragionevolmente considerato come il risultato più attendibile (vedi figura 3.33).

### Applicazione dei carichi

Esistono due modi fondamentali per specificare i carichi agenti su una struttura: sui nodi e sugli elementi. In ultima analisi, i carichi sugli elementi sono sempre applicati ai nodi, attraverso carichi nodali equivalenti. Un aspetto dell'applicazione dei carichi è collegato al principio di de Saint-Venant: se non c'è particolare interesse nel conoscere precisamente lo stato di tensione vicino ai punti di applicazione delle forze, non è necessario distribuire le forze in modo molto preciso.

I carichi associati agli elementi includono il carico statico dovuto alla gravità, gli effetti termici, le forze di superficie come la pressione uniforme e idrostatica nonché i carichi dinamici dovuti ad accelerazioni costanti e a velocità angolari

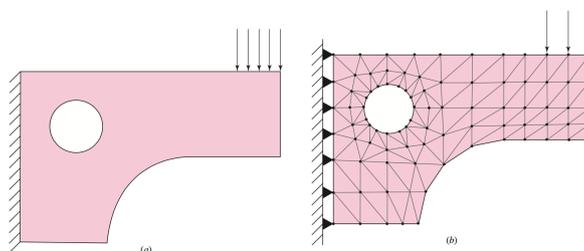


Figura 3.32: Esempio di applicazione di una mesh su un componente meccanico.

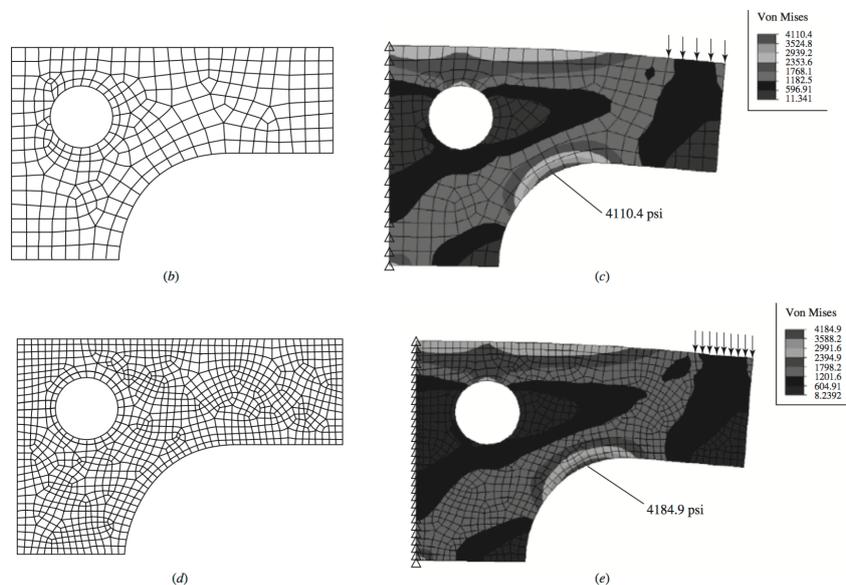


Figura 3.33: Esempio di affinamento di una mesh, ottenuto aumentando il numero di elementi e di nodi.

costanti (accelerazione centrifuga). Come già anticipato, questi carichi vengono convertiti dai software in carichi nodali equivalenti e in ultima analisi sono trattati come forze concentrate ai nodi.

### Condizioni al contorno

Simulare correttamente le condizioni al contorno e altre forme di vincolo rappresenta probabilmente la parte più difficile nel modellare una struttura con il metodo degli elementi finiti. Quando si specificano i vincoli è piuttosto facile commettere errori di omissione o di imperfetta rappresentazione della realtà.[8]

### 3.3.2 Applicazione della teoria al modello

Per eseguire il controllo strutturale dei sedili e dei punti di ancoraggio delle cinture di sicurezza si è effettuata un'analisi statica mediante l'utilizzo di Ansys<sup>®</sup>. In particolare, si è verificato la bontà delle soluzioni adottate per i punti di ancoraggio superiori dei sedili anteriori (da ricavare nella zona terminale dello schienale); non si è fatto lo stesso per i posteriori poiché quest'ultimi si trovano in zone caratterizzate da elevata rigidità strutturale e non sarà un problema realizzare un perno per l'alloggiamento delle cinghie.

Si è utilizzato l'ambiente *Static structural* interno al software e si è ottenuto un risultato accettabile seguendo i passaggi:

1. **importazione della geometria:** è stata importata una geometria semplificata dei sedili da Solid Edge<sup>®</sup> per ottenere più agevolmente una mesh in grado di fornire risultati attendibili;

2. **assegnamento del materiale:** al fine di verificare le prestazioni della modellazione, si è deciso di assegnare alla struttura un materiale isotropo equivalente, ossia una lega di alluminio avente le proprietà meccaniche mostrate nella tabella 3.4;

Tabella 3.4: Proprietà meccaniche del materiale adottato nell'analisi FEM.

densità ( $\text{kg/m}^3$ )	2770
modulo di Young (MPa)	71000
coefficiente di Poisson	0.33
tensione di snervamento (MPa)	280
tensione di rottura (MPa)	310

3. **generazione della mesh:** per la generazione della mesh sono stati adottati 20360 nodi e 10206 elementi come mostrato nella figura 3.34.

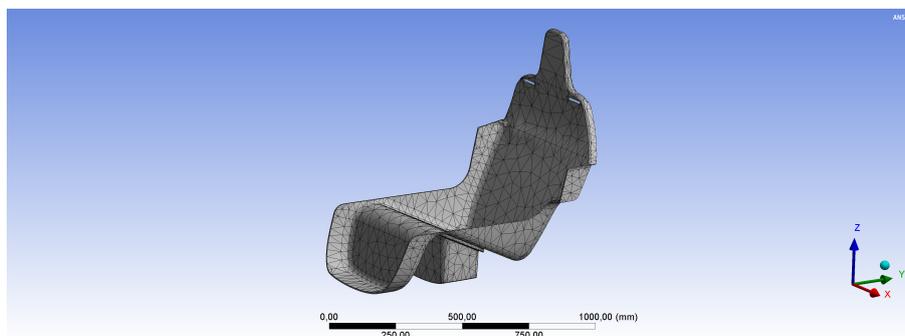


Figura 3.34: La mesh generata sul sedile da Ansys®.

4. **applicazione dei carichi:** per regolamento, i punti di ancoraggio delle cinture di sicurezza, in questo caso ricavati direttamente dalla struttura del sedile, devono resistere all'applicazione di un carico pari a 13.5 kN nella direzione delle cinghie. In questo caso si è scelto di fare uso della situazione più gravosa, ovvero esercitare le forze nella direzione Y; questa preferenza porta al massimo valore del braccio del momento flettente (rispetto ai lembi di incollaggio) e, dunque, al massimo modulo di quest'ultimo;
5. **applicazione delle condizioni al contorno:** le uniche condizioni al contorno imposte sono gli incastrati sui lembi di incollaggio; essa non rappresenta una situazione del tutto reale, dal momento che viene trascurata l'elasticità dei vincoli, tuttavia per valutazioni preliminari può essere ritenuta accettabile;
6. **immissione dei goal richiesti:** in questo caso i risultati richiesti dal software sono:
- la tensione equivalente con il criterio di Von Mises;
  - la deformazione totale.

### Analisi dei risultati

I risultati ottenuti dal software non sono incoraggianti come evidente dalla figura 3.35: la tensione massima causata dall'applicazione dei carichi è pari a 4204.4 MPa, valore inaccettabile anche per acciai altolegati. Questo fenomeno può essere originato da varie cause:

- si può evincere dalla figura 3.35 che la zona di massima sollecitazione è situata in una zona caratterizzata da una evidente discontinuità geometrica (punto di giunzione tra lembi di incollaggio e appoggiatesta) che dà luogo ad una zona in cui sono concentrate le tensioni;
- potrebbe essere necessaria una mesh più densa in prossimità delle discontinuità geometriche per ottenere dei risultati più attendibili;
- sarebbe doveroso aumentare i raggi di raccordo tra schienale e lembi di incollaggio.

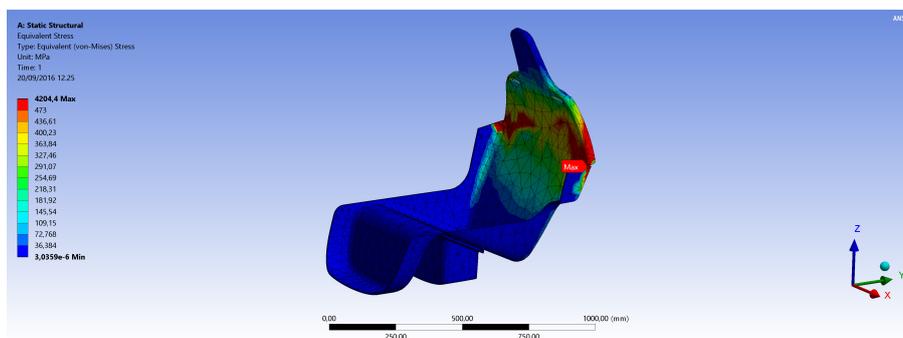


Figura 3.35: La distribuzione delle tensioni generata da Ansys®.

Per quel che riguarda gli spostamenti, essi sono massimi in corrispondenza della cima dell'appoggiatesta, come pronosticabile (figura 3.36).

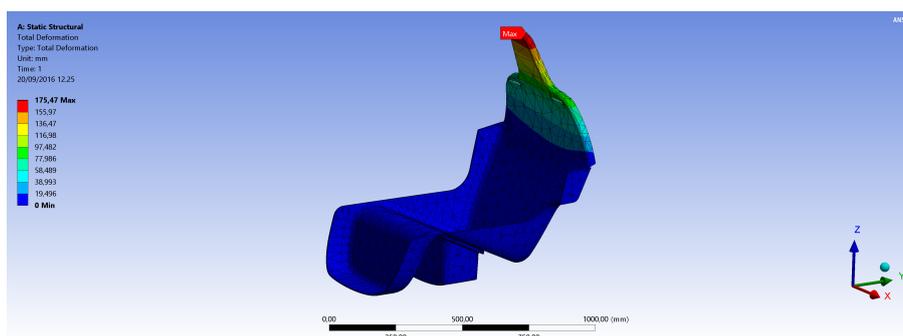


Figura 3.36: La deformata generata da Ansys®.

Pertanto il risultato dell'analisi agli elementi finiti preliminare ha fornito informazioni interessanti riguardo i futuri sviluppi:

1. sarà necessaria una rivalutazione delle geometrie per evitare zone di concentrazione delle tensioni;
2. è auspicabile vincolare la zona terminale dello schienale del sedile con una struttura caratterizzata da elevata rigidità (ad. es roll-bar o scocca del cruiser).

## Capitolo 4

# Conclusioni e sviluppi futuri

Il seguente elaborato riporta, dunque, i passaggi progettuali che hanno permesso di giungere ad un modello dei sedili per il cruiser solare Emilia 4 partendo ex novo. Nella parte preliminare si è verificata l'attinenza della geometria al regolamento; successivamente, sono stati sviluppati i modelli CAD dei componenti, procedendo ad un affinamento delle forme in seguito ad ogni riunione del team. Infine, sono state verificate le strutture progettate applicando i carichi previsti dal regolamento.

La revisione 04 è l'ultima sviluppata nel mio lavoro di tesi, ma non sarà per certo la definitiva; devono essere ancora affinati molti aspetti del progetto:

- raggi di raccordo per i lembi di incollaggio: occorre ancora definire l'entità dei raggi di raccordo per garantire una buona estraibilità dallo stampo, una buona distensione delle pelli ed una buona resistenza alle tensioni;
- spessori dei punti di ancoraggio delle cinture: essi sono da determinare verso la fine del progetto, inserendo in un programma per analisi ad elementi finiti l'intera struttura del cruiser;
- integrazione dei sedili con il roll-bar centrale: è necessario prevedere dei lembi di incollaggio per rendere solidali roll-bar e sedili per rendere più robusti quest'ultimi;
- progettazione dei punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza anteriori: sarebbe opportuno rivedere la soluzione adottata nella revisione 04 e migliorarla dal punto di vista strutturale;
- progettazione dei punti di ancoraggio per le cinture di sicurezza posteriori: essi sono ancora da progettare, ma sono prossimi a punti della carrozzeria caratterizzati da elevata rigidità, dunque non dovrebbe essere complicato collocarli.

Questa esperienza mi ha permesso di ampliare le mie conoscenze nell'uso di software CAD (Solid Edge®) e di simulazione (Ansys®). Nelle giornate passate nella sede della Metal Tig ho acquisito competenze riguardo la produzione e l'utilizzo dei materiali compositi e, non meno importante, ho imparato a lavorare all'interno di un team con persone competenti. Infine, ho provato l'emozione di guidare il challenger Emilia 3 all'interporto di Bologna.



Figura 4.1: Io a bordo del challenger Emilia 3.

# Bibliografia

- [1] *2017 Bridgestone World Solar Challenge Regulations Release V1.1*, in [http://www.worldsolarchallenge.org/event-information/2017\\_regulations](http://www.worldsolarchallenge.org/event-information/2017_regulations).
- [2] Emilio Frugieri, *Studio Concettuale di un Veicolo ad Energia Solare*, Scuola di Ingegneria e Architettura, Università di Bologna.
- [3] D. Croccolo, C. Fragassa, A. Freddi, *Metodologie di progettazione dei prodotti industriali*, DIEM Bologna.
- [4] MIT OpenCourseWare, *Quality Function Deployment (QFD) and House of Quality*, in <https://www.youtube.com/watch?v=u9bvzE5Qhjk>.
- [5] E. Troiani, S. Taddia, *Materiali compositi*, MaSTeR Lab, Aerospace Engineering, University of Bologna.
- [6] D. Gay, *Composite Materials, Design and Applications*, Third Edition, CRC Press-Taylor & Francis Group.
- [7] Wikipedia, *Coefficiente di resistenza aerodinamica*, in [https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente\\_di\\_resistenza\\_aerodinamica](https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente_di_resistenza_aerodinamica).
- [8] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, *Shigley, Progetto e Costruzione di Macchine*, III edizione, Mc-Graw Hill Education.