

Cerchio lenticolare **in fibra** di carbonio



1. Modello CAD del cerchio:
vista complessiva.

Nella realizzazione di prototipi di veicoli per competizioni finalizzate al basso consumo, quali la Shell Eco Marathon [1], uno dei fattori determinanti - a fianco dell'aerodinamica, della riduzione degli attriti e dell'efficienza della propulsione - è la riduzione delle masse. L'obiettivo a cui si mira (massa a vuoto del veicolo dell'ordine di 30-35 kg) è sufficientemente sofisticato da giustificare la ricerca della minima massa non

solo per le parti maggiori, come il telaio e la scocca, ma anche per componenti di minore dimensione come i cerchi ruota. La soluzione costruttiva adottata per questi ultimi deve essere efficiente anche dal punto di vista aerodinamico; in quest'ottica, un'architettura a raggi non sarebbe adeguata, mentre risulta ottimale la soluzione lenticolare.

Questa geometria si presta bene alla realiz-

Destinato a un prototipo di veicolo a fuel cell a idrogeno per la partecipazione a competizioni internazionali di bassi consumi, particolare attenzione è stata posta alla progettazione degli stampi necessari alla realizzazione e al processo produttivo, in termini di temperature e tempi. Con ottimi risultati

zazione con materiali compositi in fibra di carbonio che, a fronte delle leghe leggere, presentano densità inferiori e caratteristiche meccaniche anche superiori [2].

Nel settore automotive l'utilizzo della fibra di carbonio trova impiego soprattutto in applicazioni di alto livello, dalle granturismo alla Formula 1, ove la necessità di avere elevate caratteristiche strutturali è abbinata a quella di ottenere un'ottima superficie "a vista" e il fattore negativo legato al costo elevato di questo prodotto è decisamente meno importante.

Un sistema utilizzato per la realizzazione di manufatti in fibra di carbonio che necessitano anche di una buona finitura superficiale è quello che prevede l'utilizzo di preimpregnati (pregreg), cioè tessuti già cosparsi di resina che vengono conservati a temperatura più bassa di quella di polimerizzazione.

I preimpregnati sono sagomati a mano su stampi, o utilizzati per produrre lastre stratificate, e poi sono polimerizzati in autoclave, eventualmente in sacchi a vuoto. Essi hanno il vantaggio di garantire un'elevata uniformità del prodotto, soprattutto per quanto riguarda la quantità di resina rispetto al tessuto di fibra di carbonio.

Per queste ragioni, nella costruzione del prototipo IDRA (partecipante alla Shell Eco Marathon 2008 e 2009 - categoria prototipi con propulsione a fuel cell) il Team H2poliO ha optato per la realizzazione in fibra di carbonio dei cerchi, progettati ad hoc per accogliere lo specifico pneumatico a bassissimo coefficiente di rotolamento da utilizzare per la gara, fornito da Michelin.

La principale innovazione fornita dalla soluzione costruttiva presentata è l'architettura monolitica del cerchio, che, fra l'altro, non necessita dell'uso di camera d'aria all'interno dello pneumatico.

La progettazione del cerchio

I punti di partenza per disegnare, progettare, verificare la resistenza strutturale e infine realizzare il cerchio sono stati:

- profilo e dimensioni del canale per lo pneumatico Michelin 45-75R1 (diametro esterno

478 mm e larghezza 45 mm);

- dimensioni e forma del mozzo della ruota;

- realizzazione monoscocca;

- soluzione lenticolare.

Una vista complessiva del modello CAD del cerchio è riportata in figura 1. In figura 2 è invece riportata una sezione diametrale del cerchio, in cui è possibile osservare la particolare complessità del canale dello pneumatico. In entrambe le figure è possibile osservare, nella parte più vicina all'asse della ruota, la sede per il mozzo e i fori per le sue viti di fissaggio.

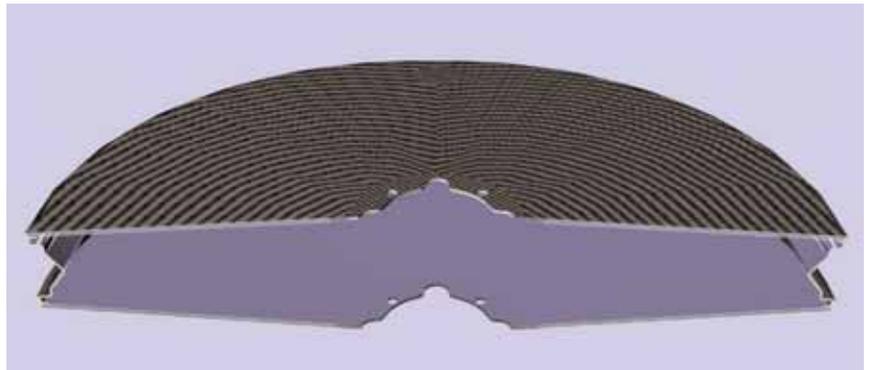
Il processo produttivo

La costruzione di un cerchio in carbonio lenticolare monoscocca, di forma complessa come quello realizzato, avente caratteristiche di elevata resistenza in diverse condizioni di ca-

sposti i diversi strati di fibre di carbonio preimpregnate è posto in autoclave, è necessario garantire un rapido e uniforme riscaldamento delle fibre, che avviene principalmente per conduzione, e occorre evitare l'insorgere di sollecitazioni dovute a dilatazioni di volume non uniformi dovute alla variazione della temperatura dei differenti materiali utilizzati.

L'attrezzatura realizzata è costituita da due semi-gusci e due semi-corone al fine di agevolare la fase di estrazione del cerchio dopo la fase di laminazione a polimerizzazione avvenuta.

Per la costruzione del cerchio sono state utilizzate esclusivamente fibre preimpregnate con ciclo in autoclave sottovuoto e in pressione, associando strati di fibre e tessuti con trame opportunamente orientate e disposte



2. Modello CAD del cerchio:
sezione diametrale.

rico, rigidità, tenuta alla pressione e peso contenuto, ha richiesto in fase progettuale una particolare accuratezza sia nella concezione e progettazione del manufatto in carbonio che nella fase di progettazione e realizzazione dell'attrezzatura, appositamente realizzata.

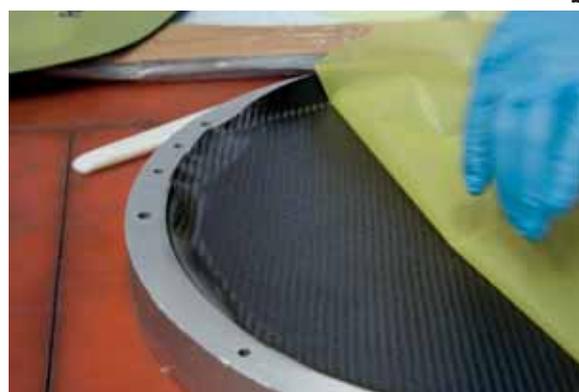
Per quest'ultima è stata utilizzata una lega di alluminio anticorodal 6082 ponendo particolare attenzione al corretto dimensionamento dei diversi spessori, e quindi della massa complessiva.

Infatti, quando lo stampo in cui sono stati di-

simmetricamente rispetto all'asse verticale del cerchio, racchiudendo a sandwich i rinforzi strutturali in rohacell (schiuma polimetacrilimmidica).

La struttura "monoscocca" del cerchio consente di evitare l'uso di adesivi strutturali, generalmente con peso specifico elevato, garantendo migliore tenuta e maggiori resistenza e rigidità della struttura finale, senza trascurare un peso complessivo del manufatto minore.

Al fine di agevolare la laminazione si è adottata la procedura ad attrezzo aperto deponendo su entrambi i gusci lo stesso numero di strati di fibra, procedendo con la sistemazione del primo strato in tessuto di carbonio orientato a 0° avente funzione di finitura su-



3. Fasi di deposizione dei prepreg nei semistampi.

perficiale. In figura 3 sono riportate due immagini di questa fase di deposizione degli strati di prepreg, in particolare: a) nel semi-stampo inferiore e b) nel semi-stampo superiore.

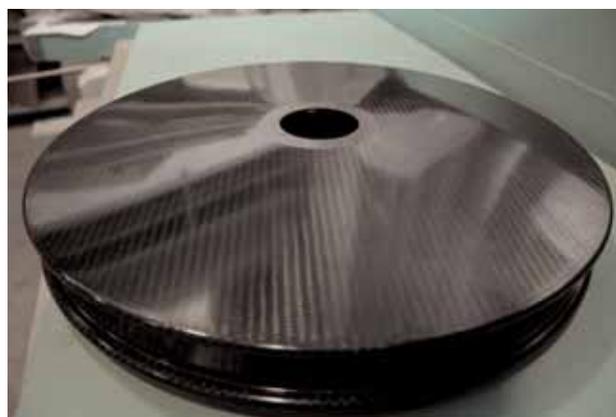
Tale tessuto è ricoperto da uno strato a forma di corona in fibra unidirezionale di carbonio orientato a 45° rinforzato da una bacchetta a sezione circolare disposta circolarmente al bordo esterno del cerchio. Sopra l'unidirezionale è disposto un rinforzo strutturale realizzato con una corona in rohacell completamente avvolto da uno strato di adesivo. Al fine di equilibrare la struttura nonché le tensioni generate durante la fase di polimerizzazione viene posizionata sulla corona di rohacell rispettivamente una corona di unidirezionale (orientata a -45°) e un tessuto in carbonio uguale a quello del primo strato. La laminazione si conclude con quattro rinforzi in carbonio orientati a 90° aventi larghezza crescente al fine di ottimizzare la distribuzione delle sollecitazioni e di consentire l'integrazione con gli strati del semi guscio opposto.

Quindi si isola il laminato ponendo un film distaccante e uno strato di assorbente/aeratore (tessu-



4. Preparazione del sacco a vuoto.

5. Il cerchio lenticolare finito.



to/non tessuto di poliestere) che ha lo scopo di favorire l'estrazione dell'aria e l'assorbimento degli eccessi di resina che fuoriescono dai tessuti durante la fase di polimerizzazione e per effetto della pressione applicata durante il processo in autoclave.

Si predispone il sacco a vuoto utilizzando un apposito film tubolare in nylon, suddiviso in due porzioni, da confezionare a forma di corona che avvolge completamente sia la parte interna che quella esterna dell'attrezzatura, sistemando dapprima la porzione che avvolge la parte interna e poi procedendo alla chiusura dell'attrezzatura.

Si termina la confezione del sacco adagiandone la rimanente porzione, inserendo le termocoppie (posizionate nelle aree in cui ha lo scambio termico più lento), le valvole per il collegamento della pompa a vuoto e sigillando accuratamente il sacco con del mastice butilico.

In figura 4 è riportata un'immagine della fase finale della preparazione del sacco a vuoto.

Si verifica infine la tenuta del sacco a vuoto con un vacuometro, ricorrendo eventualmente ad un rilevatore di perdite ad ultrasuoni che ne consente la localizzazione, per poterle eventualmen-

te sigillare, ottenendo così le condizioni necessarie poter procedere alla realizzazione del ciclo di polimerizzazione in autoclave.

Il ciclo di polimerizzazione in autoclave è a controllo computerizzato, occorre pertanto impostare alcuni parametri fondamentali quali: l'apporto di calore in funzione della temperatura interna del laminato (misurata con le termocoppie), pressione, il tempo di permanenza (stasi) ad una determinata temperatura, la depressurizzazione ed il raffreddamento. Al fine di ottenere un flusso di re-

gressiva depressurizzazione sino allo scarico totale dalla pressione.

Si procede quindi all'estrazione del manufatto polimerizzato dall'attrezzatura rimuovendo i vari strati di film distaccante (fep) ed assorbenti ed ultimando il ciclo produttivo con operazioni di rifilatura e finitura manuali.

In figura 5 è riportato il cerchio lenticolare finito, che ha una massa finale di 0,7 kg, e uno spessore medio di circa 2 mm e di 2,5 mm rispettivamente nelle pareti lenticolari e nel-



6. L'applicazione del cerchio per Idra.

sina ottimale in fase di riscaldamento e per evitare la formazione di micro porosità superficiali che comprometterebbero la tenuta alla pressione del cerchio e causerebbero micro cricche nella struttura, occorre che la pressione sia applicata in condizione di bassa viscosità, verificando che il laminato raggiunga in ogni sua parte la temperatura prefissata prima di poter avviare la fase successiva.

Si ottiene la completa polimerizzazione dopo 60 minuti e la stabilizzazione nei successivi 60 minuti, trascorsi i quali si avvia la fase di raffreddamento controllato sino al raggiungimento della temperatura di 80 °C e la

parte di collegamento di queste ultime con il canale.

Conclusioni

Il presente lavoro presenta un cerchio lenticolare innovativo monoscocca in fibra di carbonio destinato a un prototipo di veicolo a fuel cell a idrogeno per la partecipazione a competizioni internazionali di bassi consumi.

Particolare attenzione è stata posta alla progettazione degli stampi necessari alla realizzazione poiché la loro finitura e spessore nelle diverse zone possono influenzare fortemente sia la precisione che la forma finale del manufatto.

Di particolare importanza è stata l'assenza dell'uso di collanti strutturali, che ha consentito un'ottimizzazione del peso.

Il processo produttivo, in termini di temperature e tempi, è stato accuratamente predisposto in modo da avere la polimerizzazione del manufatto in tutte le zone, al fine di garantire non solo un ottimo aspetto visivo, ma soprattutto un'adeguata resistenza strutturale.

Le prestazioni del cerchio sono state verificate "sul campo" durante le competizioni a cui ha partecipato il veicolo, riportato in figura 6, su cui è stato montato.

Le prove di endurance e di handling superate brillantemente non hanno evidenziato, su tutti i cerchi montati, alcun segno di cedimento o danno strutturale, naturalmente nel campo di velocità (massimo 45 km/h) per cui il prototipo è stato concepito.

M. Carello, Politecnico di Torino, Dipartimento di Meccanica, e-mail:

massimiliana.carello@polito.it

D. Accomo, EXP, Venaria (Torino)

e-mail: danilo.accomo @expcompositi.it

Ringraziamenti

Si ringrazia il Team H2polito - molecole da corsa (www.polito.it/h2polito) senza il quale il presente lavoro non sarebbe stato realizzato.

readerservice@fieramilanoeditore.it n.72

Bibliografia

[1] www.shell.com/eco-marathon.

[2] J. Halpin, *Primer on Composite Materials: analysis*, Technomic Publishing Co. Inc, Usa, 1984.

[3] J.J. Santin, C. H. Onder, J. Bernard, D. Isler, P. Kobler, F. Kolb, N. Weidmann, L. Guzzella, *The world's most fuel efficient vehicle*, 2007.

[4] M. Marchetti, D. Cutolo, *Tecnologie dei materiali compositi*, editoriale Esa Milano, 1991.