



The prototype IDRApegasus: a monocoque in carbon fiber

Massimiliana Carello
Mechanical and Aerospace Engineering
Department - Politecnico di Torino



Introduction

For prototypes designed to be used in international low consumption competitions, like the Shell Eco Marathon, one of the most important challenge is the weight reduction. For this reason the use of composite materials is very important: the targets are very sophisticated because the total vehicle's weight must be very low. The case study presented, explains how it was designed by the

students, the monocoque of the IDRApegasus low consumption racing prototype of the Team H2politO, from the Politecnico di Torino.

The start point of this work has been IDRA, a monocoque prototype with three wheels, two front steering wheels and one rear driving wheel powered by a brushed electric motor supplied by a fuel cell. The structural design of a new vehicle prototype IDRApegasus

presented instead three wheel, two front wheels (inside the body, to reduce the frontal area and improve the performance of the vehicle) and a rear steering driving wheel powered by a brushed electric motor supplied by a hydrogen fuel cell.

To minimize the equivalent consumption for the Shell Eco-marathon competition, expressed by the kilometres with a litre equivalent of fuel (calculated by Shell with the

hydrogen heating power), the most important key factors are: weight, aerodynamics resistance, friction of the wheels and of the bearings, and at last but not least power-train efficiency. The aim, for the chassis and the body, is to reach the lowest weight maintaining the structural resistance. The target vehicle's mass is about 30-35 kg, which is very sophisticated because one of the technical check before the competition is to test the



Il prototipo IDRApegasus: una monoscocca in fibra di carbonio

Massimiliana Carello, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale - Politecnico di Torino

Introduzione

Quando si tratta di prototipi realizzati per partecipare a competizioni internazionali dedicate ai veicoli a bassi consumi, come ad esempio la Shell Eco-marathon (SEM), una delle più importanti sfide consiste

nella riduzione complessiva delle masse. Per questo motivo, l'uso dei materiali compositi è fondamentale: l'obiettivo, difficile da raggiungere, consiste nell'ottenere la massa del veicolo più contenuta possibile. Il lavoro presentato

illustra come gli studenti del Team H2politO del Politecnico di Torino, hanno progettato la monoscocca di IDRApegasus per la categoria prototipi della SEM.

Il punto di inizio del progetto è stato il precedente veicolo IDRA,

un prototipo con un telaio in fibra di carbonio a tre ruote, di cui le due anteriori sterzanti e quella posteriore motrice, spinto da un motore elettrico brushed connesso ad una fuel-cell. La struttura principale del nuovo veicolo è composta sempre da tre ruote, di cui le due anteriori fisse ed incluse nella carrozzeria (per ridurre la sezione frontale) e la posteriore motrice e sterzante, spinta sempre da un motore elettrico brushed connesso ad una fuel cell. Per ridurre i consumi alla SEM, i quali sono espressi in chilometri per un litro equivalente di benzina (nel caso di IDRApegasus è calcolato attraverso una conversione energetica tramite il potere



resistance of the body which consists in applying a mass of 70 kg on the highest point of the vehicle (roll bar). The structure of the vehicle has not to deform permanently or to show ruptures during the application of the weight, otherwise, the technical judges do not allow the vehicle to run in the competition. For this reason, it is necessary to obtain the minimum weight to give the vehicle the most structural resistance but also to have a design with the most aerodynamic shape.

A good technological solution to obtain the body is to use carbon fibre composite materials, which have excellent performance in terms of low density and mechanical properties if compared to traditional materials used for mechanical constructions, like aluminium and steel. A typical manufacturing technology used to make carbon fibre components for automotive applications, is the

use of pre-pregs. These are fabric composite materials already impregnated with resin. The pre-pregs are shaped manually in moulds and then polymerized in an autoclave, using a vacuum bag around the mould.

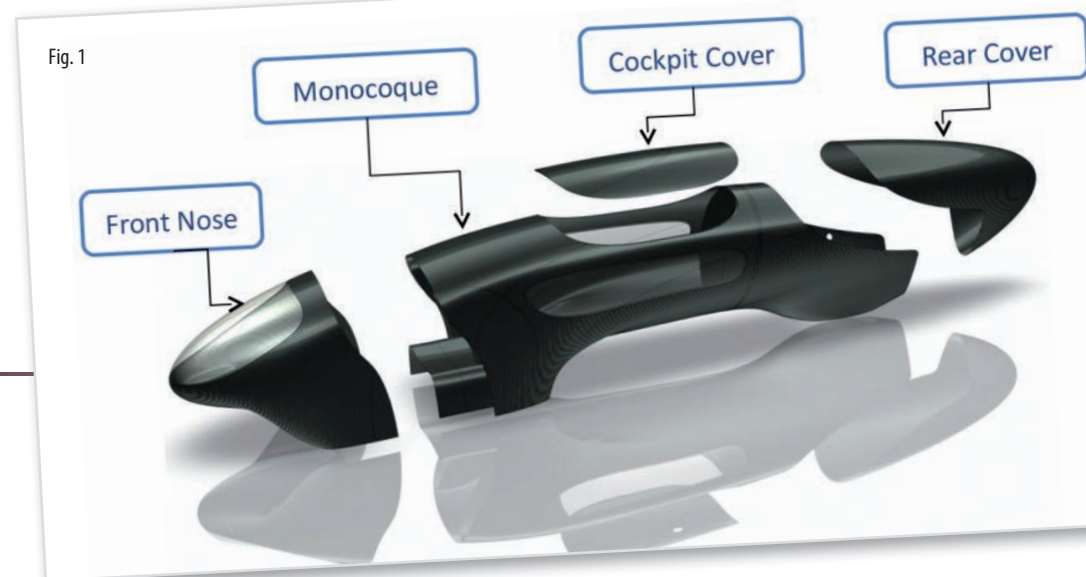
The main innovation of this monocoque, was the attention to all the details, for all the functions and the perfect integration of all sub-systems. The monocoque of IDRA Pegasus is not only resistant, light and well made, it also well combines all the parts, very high aerodynamic efficiency, style and function. After having defined the external shape from

an aerodynamic point of view, an analysis of the breakdown of the body was carried out, a necessary operation in order to guarantee both the manufacturability and ease of access to the cockpit and mechanical components. The breakdown of the different parts was done, also, in agreement with the structural analysis in such a way avoiding negative effects on the stiffness of the body itself. The vehicle (see Fig. 1) is divided into four parts: Front nose
Monocoque
Canopy
Rear cover

The monocoque is the only structural element of the whole vehicle because it is subject to the following loads:

- a) static: mass of the driver, installed mechanical components, and loads set by regulations in order to pass the technical checks;
- b) dynamic: rapid entrance and exit of the driver during the technical checks, braking of the vehicle, and the steering of the vehicle in curve.

For this reason, reinforcements by means of sandwiched honeycomb structures were adopted



calorifico dell'idrogeno), i fattori chiave su cui concentrarsi sono: massa, resistenza aerodinamica, attrito dei pneumatici e dei cuscinetti, e soprattutto l'efficienza del powertrain. L'obiettivo, per il telaio e la carrozzeria, è di raggiungere la massa più bassa possibile mantenendo un'elevata resistenza strutturale. Il target veicolo per la massa è di circa 30-35 kg, che rappresenta una vera sfida per gli studenti, in quanto uno dei principali check tecnici è quello di provare la resistenza della monoscocca attraverso l'applicazione di una massa di 70 kg sul punto più alto del roll-bar. La struttura del veicolo non deve presentare deformazioni permanenti o cedimenti, pena l'esclusione della partecipazione alla gara. Per questo motivo è necessario ottenere il minimo peso per dare

la necessaria rigidità strutturale senza trascurare la forma esterna del veicolo che deve essere la più aerodinamica possibile.

Una buona soluzione tecnologica per ottenere il miglior rapporto rigidità/massa, consiste nell'utilizzo dei materiali compositi, che garantiscono una performance eccellente in termini di massa e proprietà meccaniche rispetto alle leghe metalliche tradizionali, come acciaio o alluminio. Una tipica tecnologia impiegata per la produzione dei componenti in fibra di carbonio per applicazioni automobilistiche, è l'uso dei pre-pregs. Si tratta di un tessuto di

materiale composito già impregnato di resina. I pre-pregs sono disposti manualmente all'interno dello stampo e successivamente polimerizzati in autoclave attraverso le tecniche di sottovuoto.

La principale innovazione in questa monoscocca riguarda l'attenzione verso tutti i dettagli del veicolo, in modo da ottenere una perfetta integrazione di tutti i sotto-sistemi. La monoscocca di IDRA Pegasus non è soltanto resistente e leggera, ma è integrata con tutti gli altri componenti, come l'aerodinamica o lo stile. Dopo aver definito la forma esterna da un punto di vista aerodinamico, è

stata effettuata una analisi della suddivisione delle aperture per la monoscocca, in modo da garantire sia la producibilità sia un facile accesso del pilota all'interno dell'abitacolo. Questa operazione è stata effettuata in accordo con i risultati delle analisi strutturali, in modo da scongiurare effetti negativi dovuti ad una locale riduzione della rigidità della scocca. Il veicolo quindi è suddiviso in 4 parti: (Fig. 1)

- Musetto
- Monoscocca
- Cupolino
- Coda

La monoscocca è l'unico elemento strutturale di tutto il veicolo, poiché

to increase the mechanical resistance of the body.

The front nose does not have a structural function and therefore it is made up of only a few layers of carbon fiber, with the result of low mass. It allows for a quick and easy access to the front wheel assembly for maintenance and assembly.

The rear cover also does not have a structural function and it allows the access to the powertrain compartment, which contains the vehicle's steering mechanism and propulsion system. In particular, the steering mechanism is integral with the monocoque through a single structural arm made in carbon fiber and glued on the left side of the vehicle.

Lastly, the canopy allows the pilot to access the cockpit and therefore does not have a structural function.

Fig. 2 shows an internal view of the vehicle where it is possible to see the front wheels, the position of the drivers and the

rear steering wheel.

The high resistance materials used for the manufacturing of IDRApegasus have allowed to reduce the number of layers of carbon fiber and consequently the reduction of the overall mass of the vehicle. In particular, a high resistance bidirectional carbon fiber T-800 cloth and Nomex honeycomb was used for the monocoque, laid out in a "sandwich" structure in order to have an increase in stiffness due to an increase of the moment of inertia of the cross-section. In this way, the number of layers of carbon fiber is unaltered and the increment of mass is nearly negligible. The surface layer present on the entire

vehicle consists of Dynano Tex carbon fiber, consists in two layers of unidirectional carbon fiber joined with an adhesive compatible with epoxy resin. Its principal characteristic is a lower thickness (35% less with respect to traditional unidirectional carbon fiber) and the pattern of the fibers give the vehicle an aggressive look.

The finite element analyses were carried out through the application of a work flow of well-defined operations (Fig. 3). All of the finite element simulations were executed using the Radioss Linear v11.0 solver and the software Altair Hypermesh v11.0 for all of the preprocessing work. Initially a mixed mesh was

created, using "quads" and "trias" elements, and subsequently, the values of the two materials used for the manufacturing of the monocoque, the bi-directional T800 carbon fiber and the Nomex honeycomb, were assigned to the model. A lamination with a sandwich structure was assumed following a layup of the fibers at $0^\circ/+45^\circ/+45^\circ/0^\circ$ using only bi-directional fibers in order to have an homogenous distribution of the loads. The first global analysis of the model foresees a torsional verification, through which a first estimate of the number of plies necessary is established. Subsequently, the number of plies used and the thickness of the core became

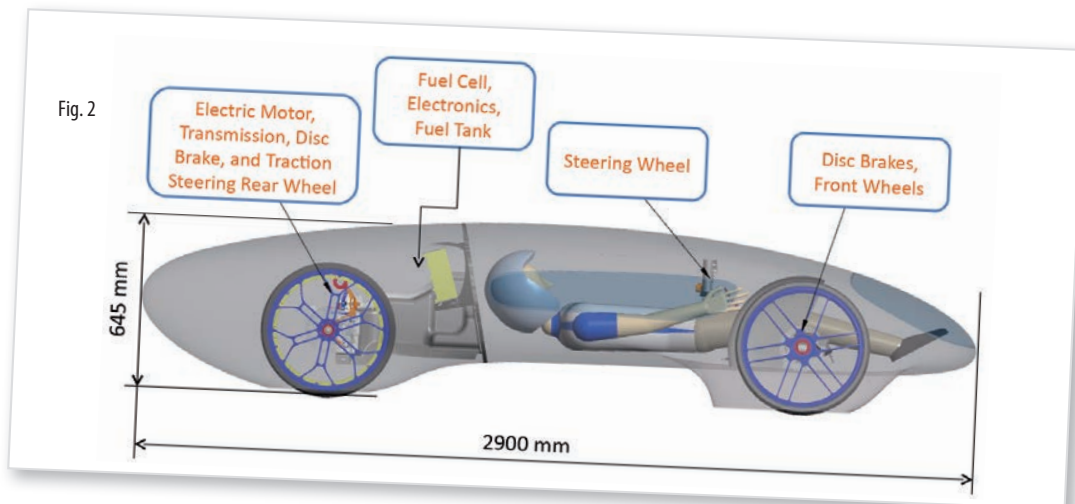


Fig. 2

è l'unico componente soggetto a carichi:

- a. Statici: massa del pilota, massa dei componenti installati ed i carichi a cui il veicolo è sottoposto in sede di check tecnici;
- b. Dinamici: entrata ed uscita del pilota durante la prova di evacuazione veicolo in sede di verifiche tecniche, carichi di frenata e carichi generati durante la marcia in curva.

Per questo motivo sono stati impiegati dei rinforzi strutturali composti da sandwich a nido d'ape per aumentare la resistenza della scocca nelle zone maggiormente sollecitate.

Il musetto non ha funzione strutturale, per cui è stato prodotto con soltanto alcuni layer di fibra di carbonio allo scopo di ridurre ulteriormente la massa. Consente

un accesso rapido al gruppo ruote anteriori utile per effettuare velocemente la manutenzione e l'assemblaggio delle parti meccaniche.

Anche la coda posteriore non possiede alcuna funzione strutturale e poiché funge esclusivamente come copertura dell'intero compartimento powertrain, all'interno del quale è racchiuso il meccanismo di sterzo e la trasmissione, insieme a tutto il sistema di propulsione. In particolare, il sistema di sterzo è integrato nella monoscocca attraverso un monobraccio strutturale realizzato in fibra di carbonio e incollato sul lato sinistro del veicolo. Infine, il cupolino consente l'accesso del pilota all'interno dell'abitacolo e quindi non svolge funzioni strutturali.

Nella Fig. 2 è mostrata una vista interna del veicolo: si notano le ruote

anteriori, la posizione del pilota e la ruota sterzante posteriore.

Il materiale ad alta resistenza usato per realizzare IDRApegasus consente di ridurre il numero di layer di carbonio, quindi la massa del veicolo. In particolare, per la monoscocca è stato utilizzato un tessuto di T800 bidirezionale ad alta resistenza e dell'honeycomb in Nomex, disposti in una struttura a sandwich. In questo modo è stato possibile incrementare la rigidità torsionale dovuta all'incremento del momento di inerzia nella sezione trasversale. Di conseguenza, il numero di layer di fibra di carbonio rimane inalterato e l'incremento di massa è quasi trascurabile. La superficie esterna dell'intero veicolo è rivestita da un tessuto di Dynano Tex, che consiste in due layer di carbonio unidirezionale uniti con

un adesivo compatibile e resina epossidica. La sua caratteristica principale è lo spessore sottile (circa il 35% in meno rispetto l'unidirezionale tradizionale) e la trama della fibra dona un aspetto aggressivo al veicolo.

L'analisi agli elementi finiti è stata condotta seguendo il workflow riportato in Fig. 3 in cui sono riportate in maniera chiara tutte le operazioni effettuate. Tutte le analisi sono state condotte usando il solutore Radioss Linear v11.0 ed il software Altair Hypermesh v11.0 per la fase di impostazione del modello. Inizialmente è stata creata una mesh di tipo misto, usando elementi quadrati e triangolari e successivamente sono state assegnate al modello le proprietà dei materiali usati per la produzione della scocca. La laminazione ipotizzata

design variables. These two modifiable conditions allow to have a dimension of the ideal laminate.

The objective target was to have the reduction of the mass without compromising the principal mechanical characteristics, as a consequence, the optimization constraint is represented by a maximum torsional stiffness of the vehicle in cornering.

Starting from these results, a further optimization of the geometry of each layer of carbon fiber is carried out, with the goal of reinforcing only the areas subject to higher loading using the minimum amount of material necessary thus minimizing the overall mass. Contemporaneous to the torsional test, other tests of loading on the vehicle were carried out. In particular the entrance/exit phase of the pilot in and out of the cockpit was simulated, where the pilot places his hands on the upper flank of the monocoque. The data

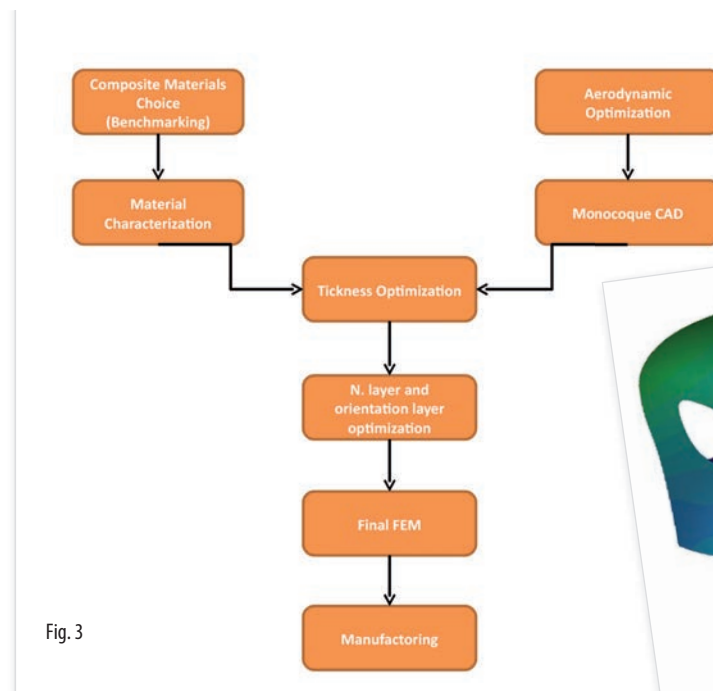


Fig. 3

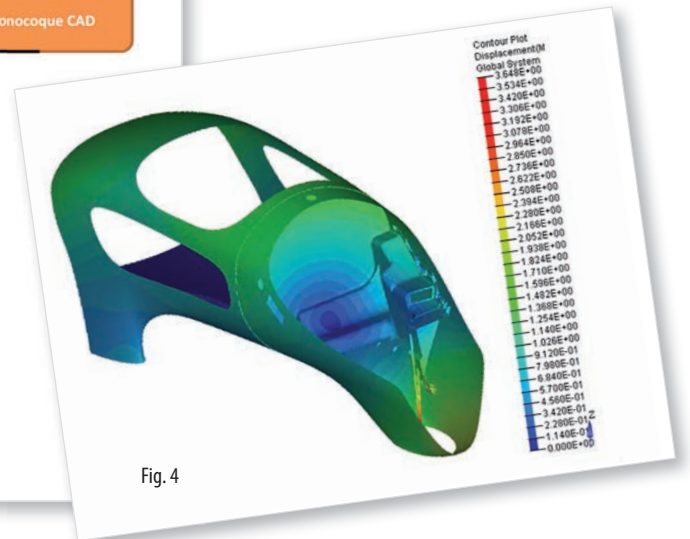


Fig. 4

obtained permits to understand the global behavior of the model, in this way also learning the behavior of the vehicle in competition. Through the final lamination, the best tradeoff was obtained, which foresees a homogeneous distribution of stresses along the entire body without compromising the mechanical characteristics and mass reduction as established in the targets.

In the Fig. 4 deformations due to torsional loading can be

observed. It can be noted how the maximum displacement equal to 3.6 mm is located at the contact point between the rear tire and the ground, while the maximum deformation of the monocoque is of 2.5 mm.

The reduction of the masses is a key factor for the engineering of a prototype destined to race in competitions of low consumption like the Shell Eco-marathon. The optimization work carried out, involved several different areas of research from

the characterization of composite materials, to the aerodynamics and mechanics. This intense synergistic work has obtained important results.

The innovative technologies used allowed to obtain a significant mass reduction with respect to the chassis of IDRA, the monocoque of IDRApegasus achieved a mass 50% less, which translates to a mass reduction of 6.5 kg while maintaining the same structural stiffness (see Table).

prevede una struttura a sandwich seguendo una disposizione delle fibre del tipo 0°/+45°/-45°/0° usando soltanto tessuti bidirezionali in modo da avere una distribuzione uniforme dei carichi. La prima analisi globale del modello si è concentrata sulla verifica a torsione, attraverso la quale è stata stabilita una prima stima del numero di ply necessari. Successivamente, il numero di ply usati e lo spessore sono diventati variabili di progetto ed hanno permesso di stabilire la dimensione ideale del laminato. L'obiettivo di riduzione delle masse è stato raggiunto senza compromettere le caratteristiche meccaniche principali, ponendo infatti come vincolo dell'ottimizzazione la rigidità torsionale del veicolo in curva. Partendo dai risultati ottenuti, è stata condotta

un'ulteriore ottimizzazione della geometria per ogni layer di carbonio con lo scopo di rinforzare solo le aree soggette ai carichi più elevati e risparmiare materiale nelle zone meno critiche. Parallelamente all'analisi torsionale, sono state effettuate altre simulazioni strutturali sul veicolo. In particolare è stata simulata la fase di accesso/uscita del pilota dall'abitacolo, concentrando i carichi sulle parti in cui il pilota poggia le mani per accedere al veicolo. Attraverso la laminazione finale, si è cercato di ottenere il miglior compromesso che includesse una distribuzione omogenea degli sforzi lungo l'intera scocca senza compromettere le caratteristiche meccaniche e l'obiettivo di diminuzione delle masse. In Fig. 4 è possibile osservare le deformazioni dovute ai

carichi torsionali. Si nota come il massimo spostamento è di circa 3.6 mm ed è localizzato nel punto di contatto tra la ruota posteriore e il piano di terra, mentre la massima deformazione dell'intera monoscocca è di circa 2.5 mm. La riduzione delle masse è un fattore chiave per l'ingegnerizzazione dei prototipi destinati a correre nelle competizioni a basso consumo, come la SEM. Il lavoro di ottimizzazione ha coinvolto un'in-

tensa sinergia tra diverse aree tecniche a partire dalla caratterizzazione dei materiali compositi, all'aerodinamica e alla meccanica. Le tecnologie utilizzate hanno permesso una significativa riduzione delle masse rispetto al telaio di IDRA: la monoscocca di IDRApegasus ha raggiunto una diminuzione del 50% della massa, che si traduce in una riduzione di 6,5 kg pur mantenendo la stessa rigidità strutturale. (Vedi Tabella)

Monocoque Monoscocca	IDRA	IDRApegasus
Theoretical mass Massa teorica	/	5,5 kg
Real mass Massa reale	11 kg	6,5 kg
Strenght Rigidità	Equal Uguale	Equal Uguale
	Mass reduction Riduzione Massa	6,5 kg
		50%

