LE SOSPENSIONI

Progettare una vettura per la Formula SAE

Il lavoro di progettazione di una vettura da corsa è, senza dubbio, impegnativo e costellato di problematiche di complessa soluzione, non ultima la presenza di un regolamento tecnico spesso molto vincolante

Ing. Tommaso Innocenti – Università di Firenze

Dario Scapaticci

Il commento del coordinatore della rubrica

Nell'articolo che presentiamo torniamo a parlare di competizioni studentesche, in questo caso la Formula SAE; già in passato abbiamo avuto modo di rimarcare l'importanza e l'efficacia di queste manifestazioni, che rappresentano per gli studenti vere e proprie 'palestre di applicazione' di quanto appreso in teoria. Le difficoltà tecniche, la gestione degli imprevisti, l'ambiente competitivo e la necessità di lavorare in un team affiatato rappresentano un 'training' formidabile per meglio affrontare il difficile mondo del lavoro contemporaneo. L'articolo illustra, in particolare, i metodi di progetto utilizzati dall'Università di Firenze per la progettazione delle sospensioni della propria vettura.

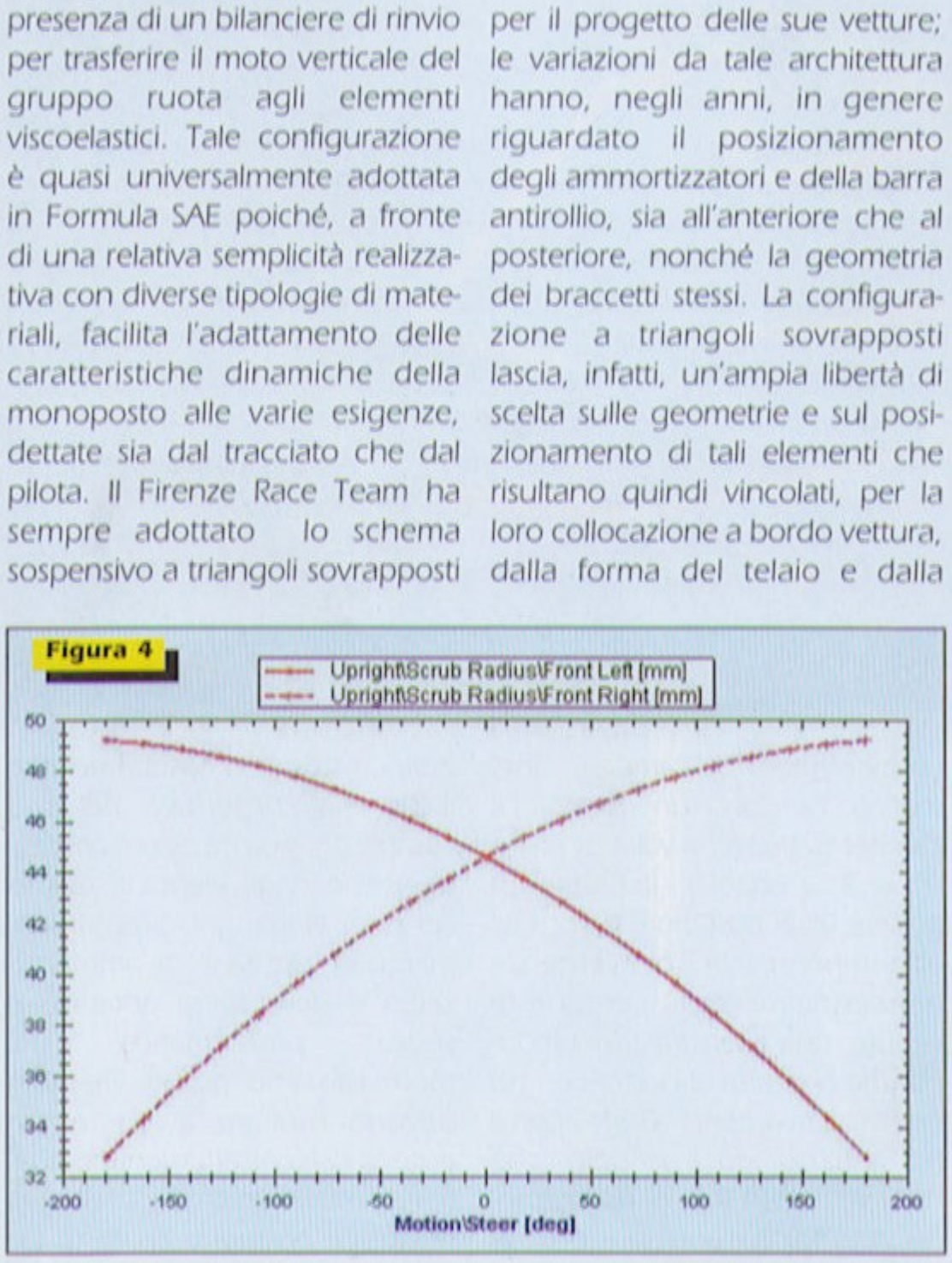
Tralasciando i livelli più alti del mondo dell'automobilismo sportivo, come la Formula 1 e dintorni, con le sue quasi infinite risorse, si possono cercare di individuare alcune metodologie di progetto di carattere generale che possono costituire una traccia per il lavoro di ingegneri e progettisti che dedicano risorse e tempo, comprese spesso anche ore di sonno, al disegno di una monoposto performante ed affidabile. Il caso che verrà preso in considerazione è quello del progetto del sistema sospensivo di una monoposto a ruote scoperte, di tipo Formula, che partecipa al campionato Formula SAE, riservato agli studenti universitari di tutto il mondo. Le vetture SAE sono vincolate ad uno stretto regolamento tecnico che, oltre a porre dei vincoli molto rigidi per garantire la sicurezza del pilota, impongono la presenza di un sistema sospensivo, comunque esso venga realizzato, ed in grado di garantire uno scuotimento di circa 50 mm (per la precisione 2 pollici) dalla configurazione statica. Tale vincolo è visto come incentivo alla progettazione di un sistema cinematico completo e funzionante in ogni sua parte e non relegato al ruolo di "supporto" per i gruppi ruota. Deve essere sottolineato, in quest'ottica, che le vetture Formula SAE sono interamente disegnate e realizzate da team di studenti universitari e sono quindi un banco di prova per le competenze acquisite negli anni di studi: è quindi logico imporre uno

Figura 1 - La monoposto 2708RR del Firenze Race Team che ha partecipato al campionato Formula SAE nel 2008. La vettura è un punto di rottura col passato per il team fiorentino e presenta molte soluzioni innovative, non ultimi dei nuovi ammortizzatori ed un diverso posizionamento degli organi elastici.

Figura 2 - La tipica configurazione a triangoli sovrapposti è quasi universalmente adottata nelle vetture di tipo Formula. Anche in Formula SAE tale schema è quello di maggiore diffusione, anche se con diverse configurazioni e materiali con cui è realizzato. Nella foto si possono apprezzare i gruppi sospensivi anteriori delle vetture del Firenze Race Team, di TUG Racing e di Elephant Racing.

Figura 3 - Vista del sistema sospensivo posteriore della 2708RR del Firenze Race Team. Si possono notare la configurazione a triangoli sovrapposti con pull-rod e bilanciere di rinvio (rocker) per l'attuazione dell'ammortizzatore e della barra antirollio. La posizione particolarmente ribassata dell'ammortizzatore contribuisce ad abbassare il centro di massa della vettura.

studio approfondito della vettura in ogni sua parte (Fig.1). In particolare il sistema sospensivo, sebbene ingegneristicamente privo di eccessive complicazioni, richiede una particolare cura per essere dimensionato in modo accurato e risulta essere fortemente condizionante per il comportamento dinamico della vettura; il progettista, ovvero lo studente, ha così modo di mettere in pratica le conoscenze acquisite negli anni di studio. Il sistema sospensivo di una vettura da corsa, in particolare di una vettura da Formula, è caratterizzato, tradizionalmente, dallo schema a "triangoli sovrapposti" con la presenza di un bilanciere di rinvio per trasferire il moto verticale del gruppo ruota agli elementi viscoelastici. Tale configurazione è quasi universalmente adottata in Formula SAE poiché, a fronte di una relativa semplicità realizzativa con diverse tipologie di materiali, facilita l'adattamento delle caratteristiche dinamiche della monoposto alle varie esigenze, dettate sia dal tracciato che dal pilota. Il Firenze Race Team ha sempre adottato lo schema sospensivo a triangoli sovrapposti per il progetto delle sue vetture; le variazioni da tale architettura hanno, negli anni, in genere riguardato il posizionamento degli ammortizzatori e della barra antirollio, sia all'anteriore che al posteriore, nonché la geometria dei braccetti stessi. La configurazione a triangoli sovrapposti lascia, infatti, un'ampia libertà di scelta sulle geometrie e sul posizionamento di tali elementi che risultano quindi vincolati, per la loro collocazione a bordo vettura, dalla forma del telaio e dalla presenza degli altri organi della macchina (Fig.2). Un posizionamento degli ammortizzatori e delle barre sulla parte alta del telaio li rende facilmente accessibili per eventuali regolazioni, ma sposta le masse lontano dal suolo, con conseguente innalzamento del centro di massa della vettura; ancora una volta il progettista deve mediare fra queste due situazioni per cercare l'ottimo per una data applicazione. Per quanto riguarda la vettura 2009/2010 del Firenze Race Team, la 2709RR, è stata scelta una configurazione di tipo push-rod all'anteriore, con ammortizzatori posizionati nella parte alta del telaio e barra antirollio a "T" e pull-rod al posteriore, con barra antirollio ad "U". All'anteriore la scelta di tale architettura è stata condizionata dalla necessità di rispettare le dimensioni minime consentite dal regolamento per l'abitacolo, che hanno imposto lo spostamento di tutti i componenti "ingombranti" fuori dal perimetro del telaio, mentre al posterio-



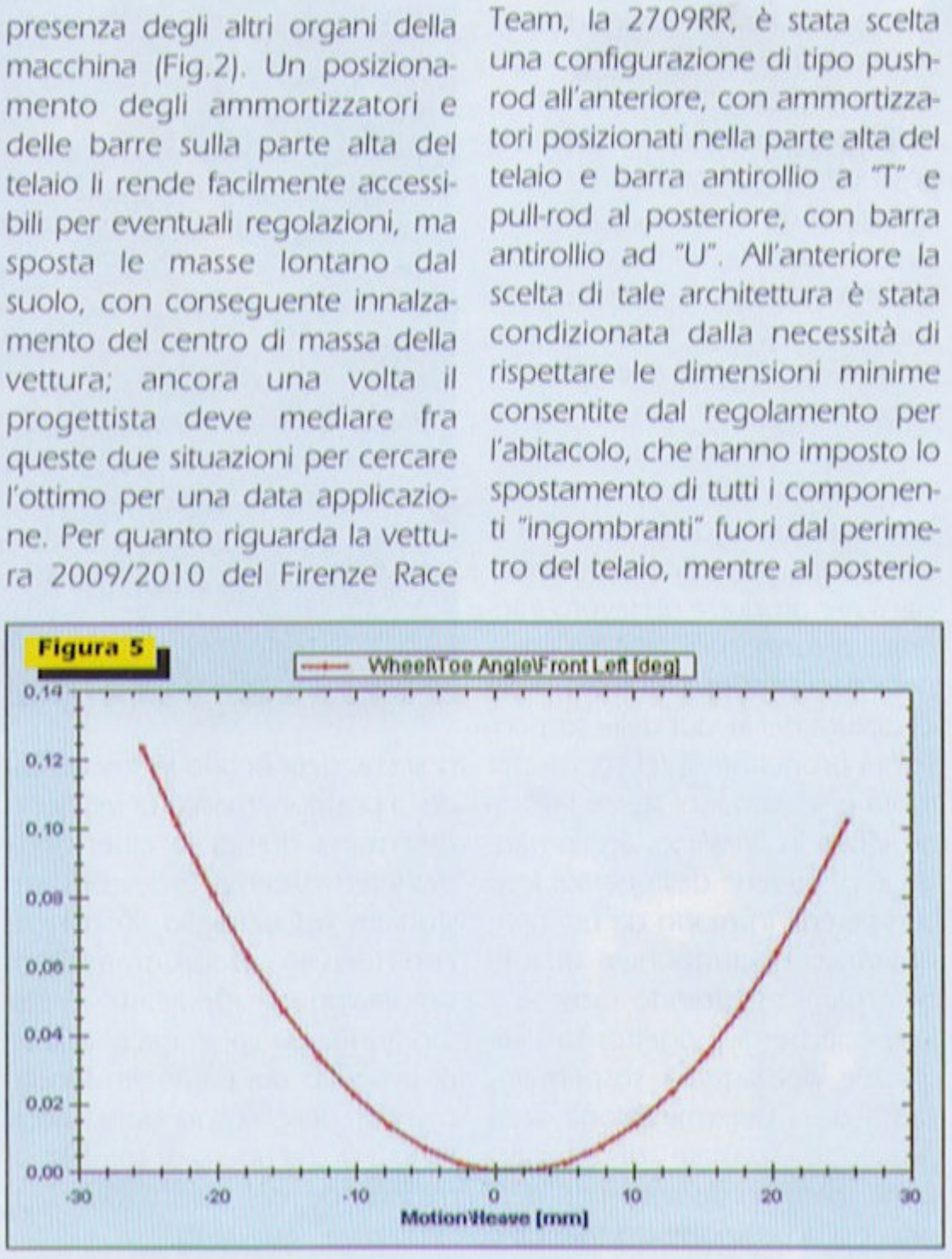


Figura 4 e 5 - Mediante i programmi di analisi cinematica dedicati è possibile simulare il sistema sospensivo nel suo complesso, andando a valutare quelli che sono i parametri fondamentali della sospensione stessa.

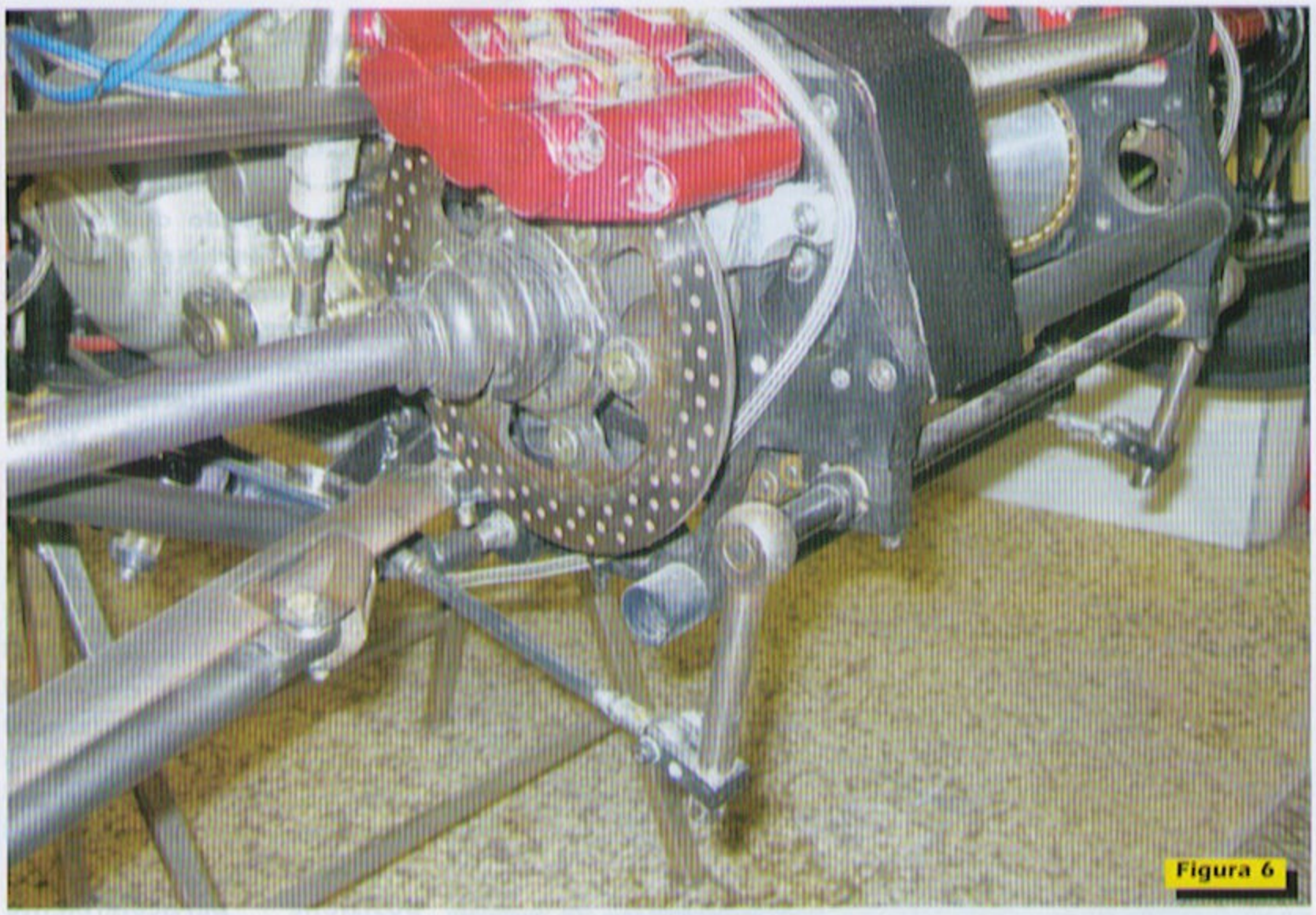


Figura 6

Figura 6 - Il posizionamento delle barre antirollio in vettura non è un'operazione agile, dato che questi organi spesso entrano in conflitto con le geometrie del telaio e con la presenza degli altri elementi della macchina. La necessità di allocare le barre in auto costringe quindi il progettista a raggiungere il miglior compromesso fra funzionalità ed ingombri.

Figura 7 - La vettura, schematizzata con dei modelli semplificati, viene studiata sia cinematicamente che dinamicamente in modo da valutarne il futuro comportamento su strada ed in modo da fornire al progettista una prima idea sulla validità delle sue scelte.

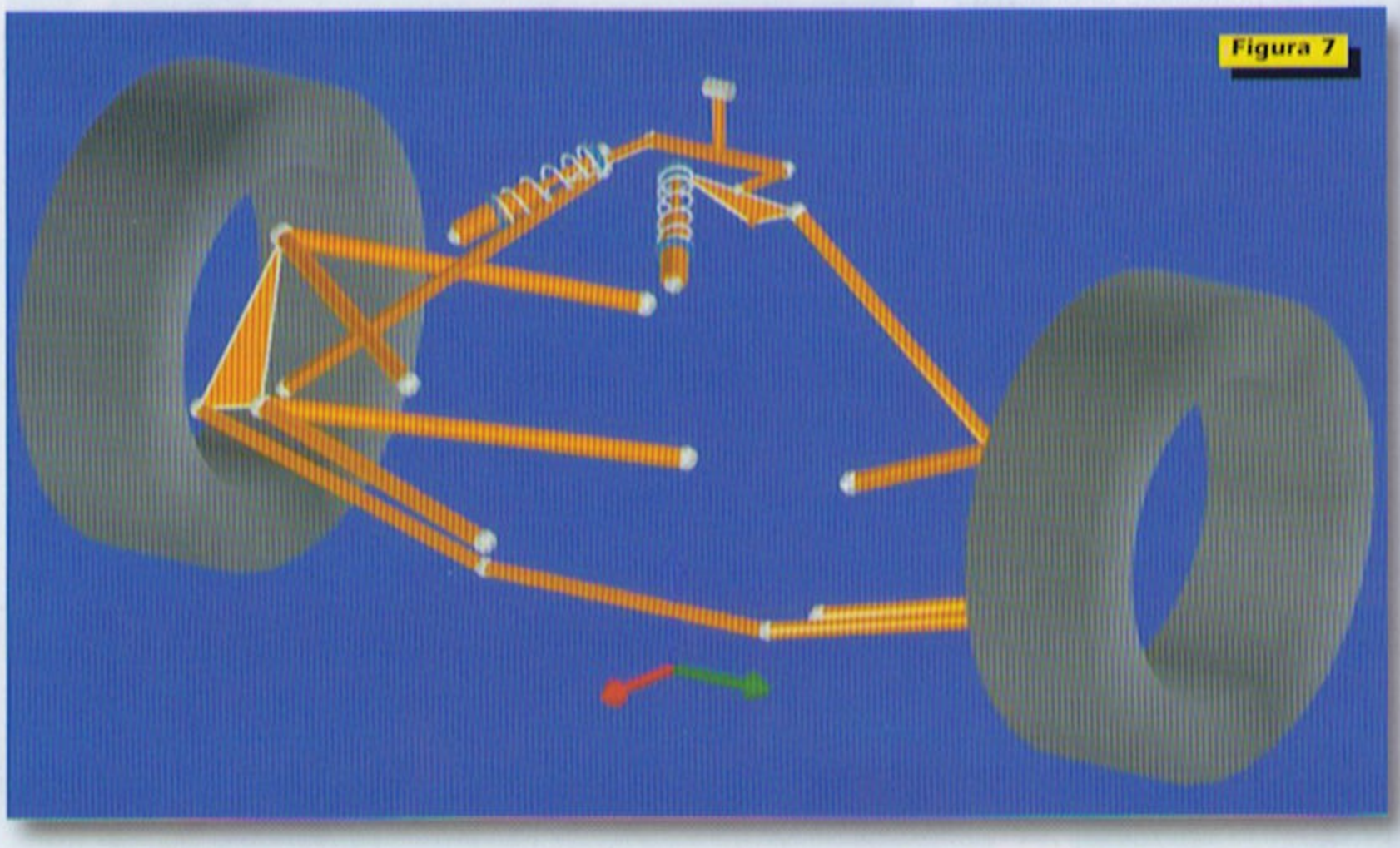


Figura 7

re si è potuto mantenere un posizionamento ribassato delle masse degli ammortizzatori e della barra, anche se leggermente scomode per le necessarie regolazioni (Fig.3). Effettuata la scelta della geometria sospensiva sulla base dei vincoli regolamentari e di ingombro, si comincia a lavorare sulla scelta della cinematica del sistema sospensivo stesso e sulla sua integrazione con il telaio e con gli altri organi della vettura, in particolare con i gruppi ruota. Il lavoro del progettista delle sospensioni diventa quindi parte integrante di quello di tutto il team, col quale egli deve interfacciarsi per produrre un lavoro integrato e funzionale alla dinamica dell'intera vettura. Durante la fase di stesura del layout delle sospensioni i progettisti di telaio, gruppi ruota e sospensioni stesse lavorano infatti in parallelo, aggiornando le geometrie delle parti a loro competenti in modo da ottenere l'integrazione funzionale di tutti gli organi, rispettando i vincoli e le specifiche di progetto. La definizione del sistema sospensivo, passa dalla determinazione della posizione spaziale di specifici punti, detti hardpoints, che definiscono la posizione dei triangoli; per hardpoints si intendono, di fatto, gli snodi attorno ai quali andranno a ruotare i singoli triangoli che definiscono la sospensione. Il posizionamento di tali punti determina quindi la cinematica dell'intero sistema e deve essere studiato nel dettaglio, in genere con l'ausilio di programmi di simulazione dedicati, per raggiungere i valori decisi in fase di progetto dei parametri fondamentali delle sospensioni, quali l'entità di recupero di camber, la migrazione del centro di rollio, l'anti-dive, etc. (Fig.4 e Fig.5). Alcuni parametri fondamentali delle sospensioni, vengono definiti in fase di progetto, in base a considerazioni di carattere cinematico: ne sono un esempio il camber statico (con valori tipici fra 0° e 3° negativi), il caster (in genere 0° al posteriore e circa 7° all'anteriore), la convergenza (tendenzialmente, per queste vetture, una apertura all'anteriore ed una chiusura al posteriore, ad es. rispettivamente 0,3° aperto 0,2° chiuso) ed il kingpin (che nella vettura in fase di realizzazione vale 4,5° all'anteriore e 0° al posteriore). La definizione dei punti fondamentali e, di conseguenza, della geometria dei triangoli, da sola non basta a definire il sistema sospensivo nel suo complesso, poiché esso è costituito anche dagli elementi elastici connessi ai triangoli. Il posizionamento in vettura degli ammortizzatori e della barra antirollio è spesso problematico, dal momento che questi elementi devono risultare al contempo accessibili e correttamente guidati nel movimento dal rocker di rinvio. La posizione finale di tali elementi è dettata, inoltre, dalle esigenze del progettista del telaio di trovare un giusto ancoraggio

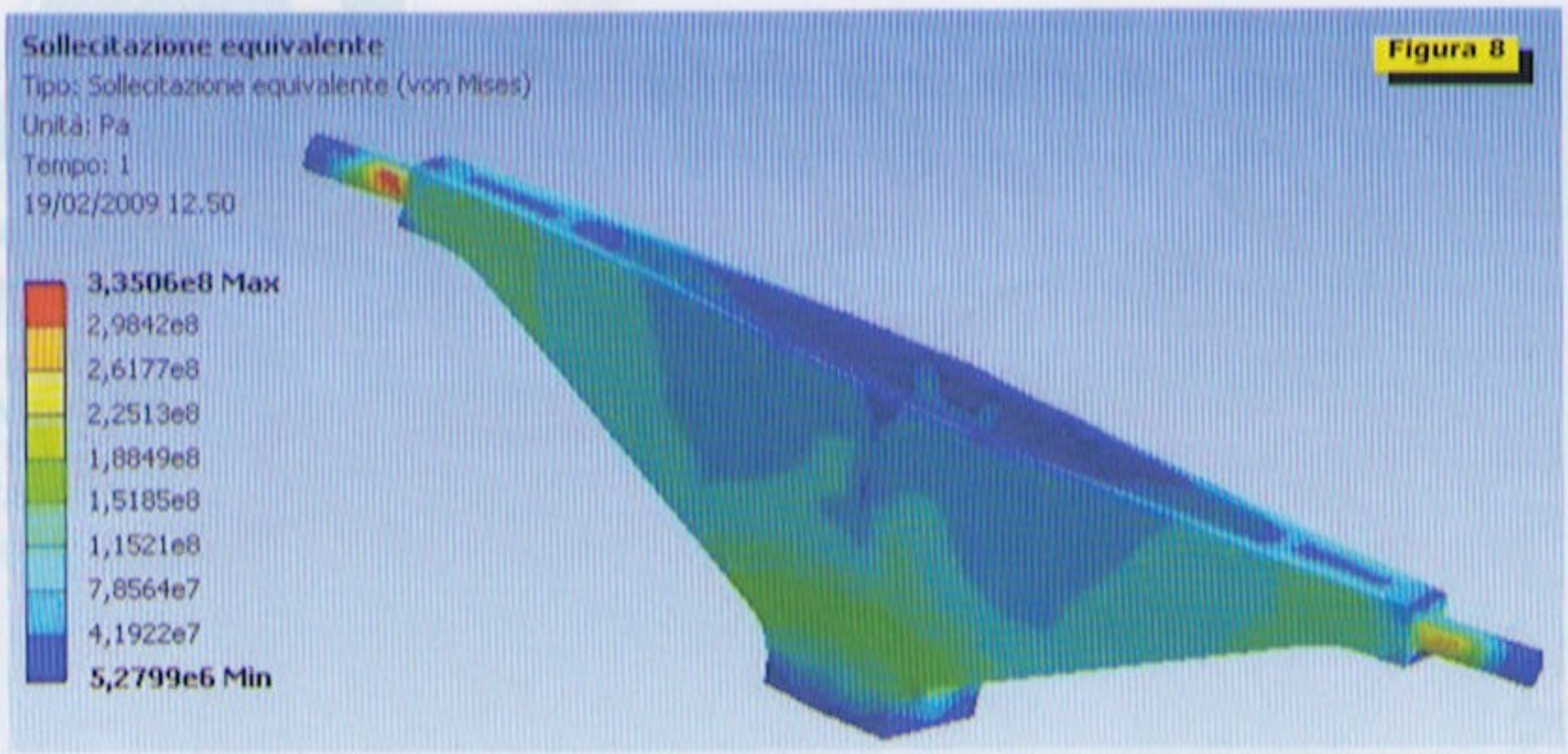


Figura 8

Figura 8 - L'analisi FEM di tutti i componenti del sistema sospensivo serve a valutare la resistenza strutturale di quest'ultimo in condizioni di lavoro. La barra antirollio anteriore, ad esempio, rappresenta un elemento particolarmente critico per posizione ed ingombri e deve essere accuratamente dimensionata per essere al contempo piccola ma resistente.

Figura 9 - Un particolare della vettura 2708RR. L'accessibilità agli organi elastici delle sospensioni è di vitale importanza per effettuare delle rapide e precise regolazioni.

Figura 10 - Le sospensioni della leggerissima vettura dei ragazzi di Delft. L'uso dei materiali compositi contribuisce alla leggerezza dell'intero sistema sospensivo. Una soluzione sicuramente interessante per praticità costruttiva e robustezza.

sulla scocca, senza compromettere le caratteristiche meccaniche della stessa o indurre eccessive concentrazioni di sforzi in punti del telaio. Risolto il problema del posizionamento, gli elementi elastici devono essere dimensionati per assolvere al loro compito in pista (Fig.6). Il dimensionamento degli organi elastici richiede l'uso di strumenti di calcolo specifici che, nel caso in esame, sono stati sviluppati in casa e dedicati alla vettura in corso di realizzazione, per determinare la rigidezza delle molle, delle barre ed i relativi bracci di leva. Il lavoro di dimensionamento prende origine da considerazioni sul comportamento che vogliamo ottenere dalla vettura in pista, in particolare per ciò che riguarda il sovrasterzo e il sottosterzo. Tali considerazioni nascono dalle conoscenze e dall'esperienza pregres-

Figura 9

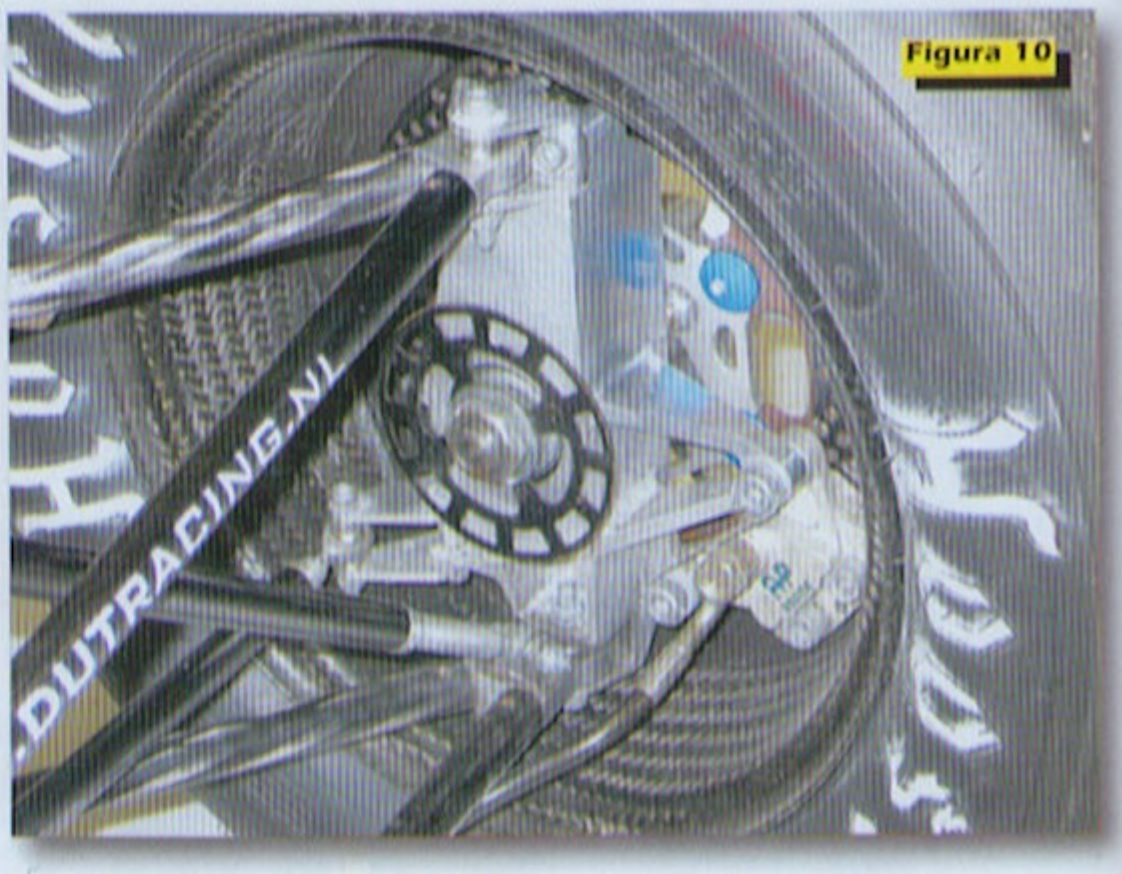


Figura 10

Figura 11 - La 2708RR ha passato diverso tempo in pista: il lavoro del progettista deve essere integrato con molti test sperimentali, onde validare le scelte progettuali o individuare inevitabili difetti. I km percorsi in prova sono un insostituibile aiuto per noi ingegneri!

Figura 11

Figura 12

Figura 13

Figura 12 - Il progetto delle sospensioni deve, per prima cosa, soddisfare le richieste del regolamento, per poter superare senza problemi le verifiche tecniche. In foto lo "scrutineering" della vettura alla gara di Silverstone del 2008.

Figura 13 - La 2708RR in pista. Le sospensioni giocano un ruolo fondamentale per il comportamento delle piccole vetture Formula SAE.

sa del progettista e del team, sia essa teorica che frutto di prove in pista. In generale il primo parametro da imporre come vincolo per il dimensionamento degli organi elastici è la frequenza propria delle sospensioni che, di fatto, ne identifica la rigidezza in condizioni di funzionamento. Alcune distinzioni vanno fatte fra vetture, sempre di tipo sportivo, che hanno un elevato carico aerodinamico e vetture che tale carico non lo sfruttano in modo significativo. Vetture dotate di ali deportanti in grado di garantire carichi aerodinamici elevati, quali le Formula, devono avere delle sospensioni in grado di garantire, in ogni condizione di funzionamento, la stessa incidenza, o quasi, delle ali stesse: tali sospensioni avranno delle frequenze proprie molto elevate e, di conseguenza, saranno molto rigide. Per una vettura come una Formula SAE, dove le velocità, specie in curva, risultano molto contenute, l'uso di eccessive appendici aerodinamiche non risulta giustificato (anche se in rettilineo piccole ali possono garantire carichi non trascurabili) e, di conseguenza, sarebbe inopportuno dimensionare le sospensioni per tale situazione. Nel nostro caso abbiamo utilizzato un valore di frequenza per anteriore e posteriore che fosse un compromesso fra quelli consigliati in letteratura, e confermati in pista, per vetture con (3,0–5,0 Hz) e senza aerodinamica (1,6–2,0 Hz), dato che la vettura 2009/2010 presenterà, a differenza dei suoi predecessori, alcuni profili aerodinamici. C'è da sottolineare che tale frequenza è stata nel corso del progetto modificata, tenendo conto dei risultati delle prove in pista della vettura della scorsa stagione che presentava una forte tendenza al sottosterzo: il progetto delle sospensioni 2009/2010 è stato quindi teso alla riduzione di tale tendenza, andando ad operare su alcuni parametri progettuali. La scelta della frequenza propria del sistema sospensivo fornisce quindi un punto di partenza per il dimensionamento degli organi elastici. Durante i quasi dieci anni di lavoro su vetture di tipo Formula, il nostro team ha maturato una buona esperienza progettuale per quanto riguarda i gruppi sospensivi ed è stato in grado di mettere a punto e tarare una procedura di calcolo degli organi elastici che si è rivelata adeguata alle necessità di definizione dei parametri principali a fronte di specifiche esigenze progettuali. La procedura, articolata in fogli di calcolo, basandosi sui parametri geometrici della vettura, quali passo, carreggiata e centro di massa, è in grado di fornire i valori fondamentali della geometria e delle caratteristiche degli elementi costituenti le sospensioni, intesi come wheel rate (che, ad esempio, indicativamente assume un valore di 25 N/mm), spring rate, installation ratio e spring rate. E' opportuno fare alcune osservazioni riguardo la definizione delle "rigidezze" degli elementi cedevoli che compongono il sistema sospensivo. Esso è infatti caratte-

rizzato da due elementi elastici: le molle vere e proprie e le barre antirollio. Data la diversa natura di tali elementi, che lavorano in condizioni di marcia diverse, è stato necessario sviluppare una procedura di dimensionamento che tenesse conto dei diversi obiettivi da raggiungere con tali organi. Se per le molle l'obiettivo è identificabile con la frequenza propria delle sospensioni stesse, per la barra antirollio si usa imporre come parametro di verifica il gradiente di rollio della vettura (definito come il rapporto tra angolo di rollio della cassa ed accelerazione laterale) che nel nostro caso avrà un valore di circa 0,8°/g. I fogli di calcolo nei quali la procedura sviluppata si articola prevedono come ingressi i dati caratteristici della vettura e, con iterazioni successive, determinano gli intervalli di rigidezze "ammissibili" per il rispetto delle specifiche di progetto, fornendo al progettista una gamma di possibili elementi elastici fra cui scegliere. Il primo foglio di calcolo, tramite alcune semplici relazioni matematiche sulla cinematica del veicolo, fornisce gli intervalli di valori per le molle (intervalli che vanno dai 25 N/mm ai 40 N/mm). Per quanto riguarda la barra antirollio, questa viene dimensionata da un secondo foglio di calcolo che tiene conto del solo moto di rollio della vettura e combina le rigidezze di molle e barre per ottenere l'adeguata rigidezza di queste ultime, in base al gradiente di rollio imposto. Gli stessi fogli di calcolo vengono utilizzati per la determinazione dei bracci di leva del bilanciere di rinvio (rocker), nonché per la determinazione del precarico da applicare alle molle per avere la giusta altezza da terra della vettura, imposta dal regolamento (25,4 mm). L'insieme dei fogli di calcolo utilizzati è stato inserito in un programma di dimensionamento degli organi elastici, che consente ai progettisti, una volta definita la geometria di vettura e sospensioni, di avere un primo, immediato valore per le rigidezze delle molle montate sulla vettura. Il tuning per ricercare le caratteristiche ottimali delle molle e delle barre viene poi eseguito, come ovvio, in pista, andando a modificare la posizione dei coltelli sulla barra o i set di molle montate a bordo (Fig.7). Successivo passo progettuale è l'analisi dinamica della vettura. Il comportamento dinamico in pista della macchina nel suo insieme, schematizzata con un modello numerico caratterizzato dalle masse, inerzie e rigidezze, viene studiato tramite un software di calcolo multibody commerciale. Anche in questa fase un corretto dimensionamento degli organi elastici porta ad ottenere un corretto bilanciamento della vettura, e di conseguenza una corretta distribuzione delle forze sulla vettura e quindi un adeguato comportamento in curva, in grado di limitare il sovra o sotto-sterzo e, in definitiva, garantire performance elevate.

Dato che il progettista necessita di strumenti software per il dimensionamento del sistema sospensivo di uso rapido e diretto, da usare in contemporanea con i programmi di disegno e di analisi cinematica, nel corso degli ultimi anni è stato messo a punto un modello di simulazione dinamica del veicolo nel suo insieme, sviluppandolo su software SimuLink®. Tale modello, accurato per quanto concerne la modellazione delle masse, inerzie e dei pneumatici, fornisce rapidamente una prima idea dell'andamento dinamico della vettura su pista: inseriti i dati geometrici della vettura, le elasticità del sistema sospensivo e le sollecitazioni esterne agenti sulla cassa (intese come accelerazioni longitudinali, laterali ed imbardata, tutte acquisite con la telemetria installata a bordo) è in

Figura 14

Figura 15

Figura 14 e figura 15 - La vettura 2008 del Firenze Race Team è senza dubbio un taglio col passato. Linea di cintura alta, braccetti a profilo airstream ed un passo di 1700 mm sono novità importanti per la monoposto fiorentia. Anche l'adozione del motore portante ed il sempre più ampio uso di materiali compositi hanno rappresentato una forte novità per il nostro team.

Figura 16

Figura 16 - Il Firenze Race Team al lavoro sulla 2708RR. La Formula SAE è un impegno indubbiamente grande, ma l'esperienza ed i vantaggi in termini di formazione professionale che ne derivano non hanno uguali.

grado di fornire l'andamento nel tempo delle sollecitazioni sulle sospensioni e sui gruppi ruota, nonché l'andamento del contatto ruota-strada. Oltre a validare le scelte fatte dal progettista in merito agli organi sospensivi, tale modello fornisce una prima idea delle forze agenti sui braccetti stessi e può essere usato come punto di partenza per il loro dimensionamento strutturale. In prima analisi vengono valutate le forze agenti sui braccetti e, di conseguenza, sul rocker, sulla barra e sugli snodi. Tali sforzi sono ricavati mediante un modello di calcolo che, basandosi sui dati di telemetria acquisiti a bordo vettura e sulle caratteristiche dei pneumatici, calcola le forze di contatto ruota-strada in ogni condizione di marcia. Stimate tali forze, e definiti i coefficienti di sicurezza (basandosi sull'esperienza pregressa e sulla "taratura" di tali coefficienti in base ad una scala di valori che considera alcuni parametri quali il materiale utilizzato per la parte, la sua criticità, la sua aspettativa di vita, etc.) si possono modellare, utilizzando programmi di calcolo agli elementi finiti, i componenti e analizzarne la distribuzione delle tensioni e deformazioni. Di particolare criticità risultano essere le barre antirollio che, oltre al vincolo strutturale, presentano quello degli ingombri e, pertanto, vanno dimensionate in modo da essere al contempo resistenti alla torsione e di facile posizionamento in vettura (Fig.8). Va da sé che per tutti i componenti l'obiettivo da raggiungere è la riduzione della massa a parità di prestazioni, dato che essa influenza tutti gli aspetti dinamici della vettura. A maggior ragione la massa delle sospensioni, divisa fra massa sospesa e non sospesa, deve essere minimizzata. In quest'ottica il team ha riprogettato interamente i braccetti, utilizzando dei tubi in fibra di carbonio appositamente laminati su nostra specifica ed accoppiandoli con degli inserti in ERGAL (7075-T6) realizzati per asportazione di truciolo dal pieno. Tale soluzione costruttiva ha permesso, a parità di resistenza strutturale, un elevato contenimento delle masse, nonché un nuovo approccio alla progettazione di tali organi che, visto che la Formula SAE deve essere uno stimolo alla ricerca ed all'apprendimento in modo da completare le nozioni fornite dagli studi all'interno delle università, è sembrata un naturale sviluppo del lavoro precedente. Anche per i nuovi braccetti sono state condotte una serie di verifiche strutturali con codici agli elementi finiti per verificarne la resistenza alle sollecitazioni cui verranno sottoposti. Tali prove, data la natura anisotropa dei compositi in fibra di carbonio, risultano di vitale importanza anche per la determinazione del layup di laminazione del composito stesso: utilizzare il giusto numero di "pelli" consente un incremento notevole delle caratteristiche meccaniche del laminato finale ed un cospicuo risparmio di peso. In conclusione, si sottolinea, ancora una volta, che la Formula SAE risulta essere una palestra di eccezionale valore per laureandi e studenti delle Facoltà di Ingegneria, che si trovano ad operare in un team di progettisti con gli obiettivi tipici del mondo delle corse. I problemi da superare e le soluzioni tecniche da valutare in fase di progetto e di realizzazione della vettura sono concrete e risultano essere un'interessante e stimolante sfida da affrontare per chi proviene dal mondo dello studio. Da non trascurare, infine, l'aspetto di integrazione delle attività e di lavoro di squadra che deve essere portato avanti seguendo un'attività come questa, dato che le sospensioni sono strettamente legate con quasi tutte le parti fondamentali della vettura. ■