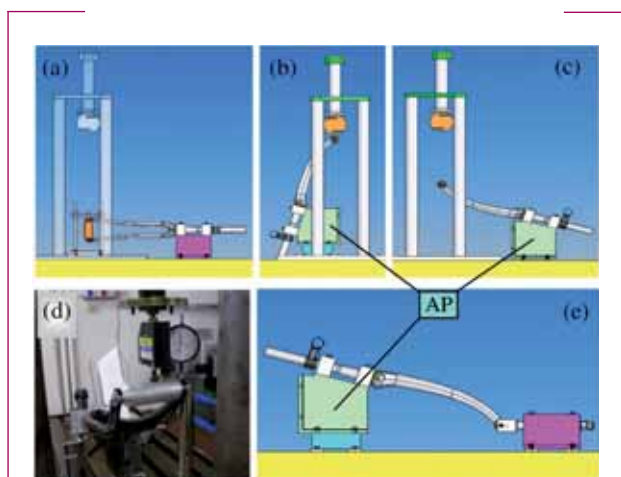


La forcella della bicicletta è **in composito**



Configurazioni del banco prova.
Laterale (a), verticale (b), frontale (c, d) e di torsione (e).

L'utilizzo di materiali compositi nella realizzazione di componenti strutturali per biciclette sportive si è consolidato nell'ultimo decennio in ambito professionistico e ha conquistato un'ampia fetta anche del mercato amatoriale [1]. Altrettanto promettente è il loro impiego nella realizzazione di veicoli a propulsione umana [2], siano essi le biciclette reclinata diffuse nel nord Europa o imbarcazioni e velivoli a pedali [3, 4]. Considerato il ruolo chiave di peso e rigidità in tali applicazioni, l'impiego dei compositi presenta vantaggi sostanziali rispetto alle soluzioni in acciaio e in alluminio. Sull'altro piatto della bilancia pesa l'affidabilità di questi prodotti, tenuto conto del costo, dell'irreparabilità, del comportamento fragile e del-

le potenziali conseguenze di una rottura catastrofica in opera. Migliorare i metodi di progettazione di tali componenti è fondamentale per aumentarne l'affidabilità e superare la diffidenza dell'utilizzatore finale, incrementando le possibilità di sopravvivenza sul mercato a fronte della crescente concorrenza delle leghe di Titanio [5] e di quelle di Magnesio [6], così come delle promettenti soluzioni in alluminio multi-strato.

La forcella è destinata ad assorbire parte consistente del peso del ciclista e delle sollecitazioni dovute alle asperità del terreno e pertanto non è nuova come oggetto di studio dal punto di vista strutturale. Da test sperimentali [7] su percorsi di gara con ciclisti professionisti sono

Identificare la corretta metodologia di modellazione agli elementi finiti di una forcella ciclistica in composito è fondamentale per aumentarne l'affidabilità e superare la diffidenza dell'utilizzatore finale. Così cresce la possibilità di sopravvivenza sul mercato a fronte della crescente concorrenza delle leghe di titanio e di quelle di magnesio, e delle soluzioni in alluminio multi-strato

state ottenute le sollecitazioni cui essa è sottoposta durante le manovre di sterzata, frenata in discesa e andatura in piano. Tali valori sono utilizzati nel presente lavoro per definire il range di forze necessarie alla caratterizzazione a banco.

Dal punto di vista numerico, la corretta riproduzione del comportamento meccanico dei materiali compositi è un tema di crescente interesse data la loro sempre più diffusa applicazione in ambito ciclistico [8] e non [9, 10]. Un aspetto fondamentale è l'analisi delle scelte di modellazione ottimali in funzione dello specifico componente oggetto di studio e in tale direzione si muove il lavoro presentato in questo articolo.

Analisi sperimentale

Le prove sperimentali statiche e dinamiche sono state condotte presso il laboratorio del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino. Per le prove statiche è stato progettato e realizzato un banco modulare in grado di riprodurre le diverse condizioni di carico mediante ricombinazione dei componenti. L'analisi è stata suddivisa in quattro prove secondo Uni En 14781 [11]: flessione frontale, verticale e laterale più una prova di torsione. In tutti i casi il carico è stato applicato a un simulacro di mozzo solidale ai forcellini, testando il componente fino a 30 kg nelle prove di flessione e fino a 60 Nm in torsione. Tra i componenti del banco riveste particolare importanza l'appoggio inclinato (elemento AP in figura 1), che permette di riprodurre l'angolo di inclinazione dello sterzo nelle prove frontale, verticale e di torsione. Due coppie di alette con asole ne permettono il fissaggio sul banco in due modalità tali da ottenere un'inclinazione di 17° o di 73°. Per la misura del carico è stata utilizzata una cella Bourdon Sedeme XC 100 mentre per tracciare gli spostamenti si è usato un comparatore centesimale. Si è quindi proceduto all'analisi modale con eccitazione impulsiva e risposta accelerometrica sul componente, sospeso in corrispondenza della testa mediante un elemento elastico molto cedevole, utilizzando le seguenti attrezzature:

- n. 1 martello trasduttore di forza PCB Piezoelectronics con punta in teflon;
- n. 2 accelerometri triassiali (2 ripetizioni per un totale di 4 punti di acquisizione) PCB Pie-

zoelectronics TLB6A12 con sensitività 101 mV/g (10.30 mV/m/s²), output bias 12,2 V e massa di 5,8 grammi ciascuno;

- n.1 frontale di acquisizione LMS SCADAS III;
- software LMS Test Lab per l'analisi e l'elaborazione dei dati.

Modellazione e analisi numerica

Potendo sfruttare la simmetria del componente è stata modellata una metà per poi specularla. Sono stati creati tre gruppi (figura 2), con lo scopo di suddividere le diverse regioni del prototipo in base al materiale e/o alla diversa procedura di modellazione:

sede cuscinetto (figura 2a) - elementi Tetra; forcellini (figura 2b) - elementi Tetra; corpo principale in composito (figura 2c) - elementi Shell (Quad e Tria).

Per simulare il materiale composito è stato modellato il singolo strato in fibra di carbonio T700 unidirezionale con matrice di resina epossidica (tabella 1), creando successivamente diversi pacchetti multi-strato e controllandone la disposizione sul componente.

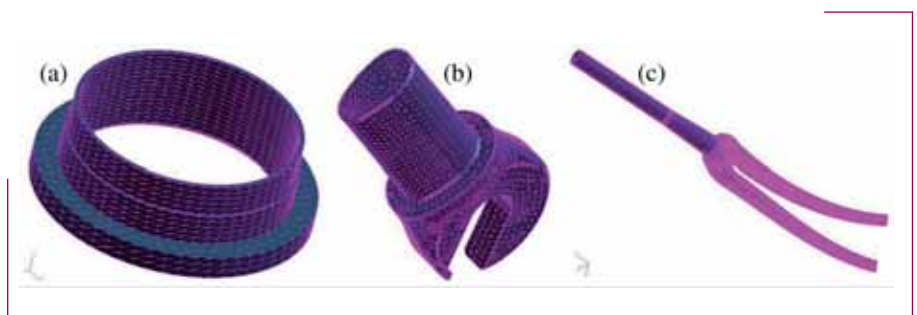
In prima battuta si è utilizzato per l'intera forcella un pacchetto a 8 strati simmetrico di spes-

sore totale 2 mm, introducendo altri pacchetti durante le successive evoluzioni del modello, da un minimo di 4 strati a un massimo di 40 strati.

L'utilizzo di elementi MPC (Multiple Point Constraint) ha permesso di collegare i diversi gruppi di modellazione e di riprodurre la presenza del simulacro di mozzo per l'applicazione dei carichi. Le condizioni di vincolo sono state inserite nel modello in corrispondenza dei cuscinetti che ne bloccano la traslazione nelle tre direzioni. L'analisi modale numerica è stata effettuata in assenza di vincoli e con l'aggiunta di

Tabella 1. Proprietà materiale composito forcella.

E_{11}	135	GPa
E_{22}	10	GPa
ν_{12}	0.26	
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$	4.8	GPa
$R_{m,11}$ (trazione)	2550	MPa
$R_{m,22}$ (trazione)	69	MPa
$R_{mc,11}$ (compressione)	1470	MPa
$R_{mc,22}$ (compressione)	236	MPa
T_{lim} (taglio)	60	MPa
$T_{delaminazione}$	9	MPa
Spessore	0.25	mm
ρ	1600	kg/m ³



Regioni del modello FE.

Modellazione del simulacro di mozzo ruota mediante elementi RBE3.



Tabella 2. caratteristiche dei modelli realizzati.

Modello	Elementi	Spessore	Peso	Note
		[mm]	[grammi]	
R1	107736	2	351.2	Modello iniziale di prima approssimazione.
R2	170062	2	351.2	Infittimento mesh.
R3	170062	1÷10	389.4	Spessori basati su valori medi rilevati sul componente reale in ciascuna regione (13 suddivisioni). Modifica densità da 1600 a 1450 kg/m ³ per compensare peso.
R4	170062	1÷10	392.0	Affinamento spessori locali, ripristino densità originale, modellazione forcellini in composito, aggiunta masse concentrate per rondelle in alluminio e colla.
R5	170062	1÷10	390.6	Ulteriore affinamento spessori locali (24 suddivisioni), aggiunta sacco di pressione residuo di processo (30 grammi, ~8% del peso totale).

opportune masse concentrate atte a riprodurre la presenza degli accelerometri, il cui peso, per quanto piccolo, non è trascurabile data la leggerezza dell'oggetto.

Nel modello è stato infine inserito il simulacro di mozzo ruota, utile per l'applicazione dei carichi, attraverso la creazione di un MPC di tipo RBE3 (figura 3).

Sono quindi state realizzate cinque successive versioni del modello per comprendere l'influenza di alcuni dettagli di modellazione secondo quanto indicato in tabella 2.

Risultati e discussione

In tabella 3 sono riportate le frequenze proprie misurate, affiancate a quelle calcolate con i diversi modelli secondo la corrispondenza effettiva del modo proprio. I modelli R1 e R2 restituiscono valori distanti dalla realtà, specialmente sui primi modi, i più importanti. Con i modelli R3, R4 e R5 la situazione migliora alle basse frequenze, ma si manifestano una suddivisione del modo 2 in due frequenze distinte (attribuita a una non perfetta simmetria nella modellazione dei foderi) e un accorpamento dei modi 3, 4 e 5 in un unico modo. Ulteriori affinamenti sono ritenuti possibili solo a fronte di una più dettagliata conoscenza degli strati e delle direzioni di avvolgimento delle fibre sul componente. In generale, con riferimento ai modi 1 e 2, il modello R4 mostra la miglior corrispondenza con le misure sperimentali, seguito dal modello R5.

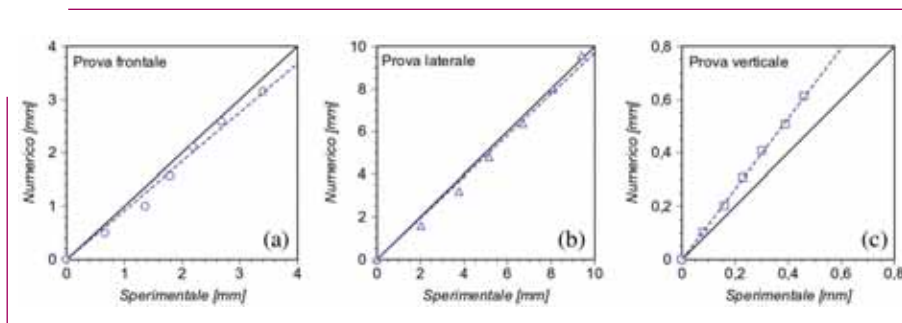
del momento applicato, si è lasciata libera la rotazione del canotto di sterzo, che è invece bloccata in simulazione per rendere isostatico il sistema. Si è quindi effettuata una doppia lettura durante la prova sperimentale rilevando la rotazione sia al mozzo sia sul canotto di sterzo, in corrispondenza del cuscinetto superiore, in modo tale da ottenere per differenza la rotazione dovuta alla sola deformazione dei foderi (figura 5a). Per coppie fino a 40 Nm si ha una buona corrispondenza tra numerico e sperimentale, mentre i dati iniziano a divergere da 50 Nm in poi a causa della contrazione dei foderi, impedita nella configurazione sperimentale con l'effetto di irrigidire il comportamento a torsione (figura 5b). L'analisi numerica del coefficiente di sicurezza

Tabella 3. confronto frequenze proprie sperimentali e modello numerico.

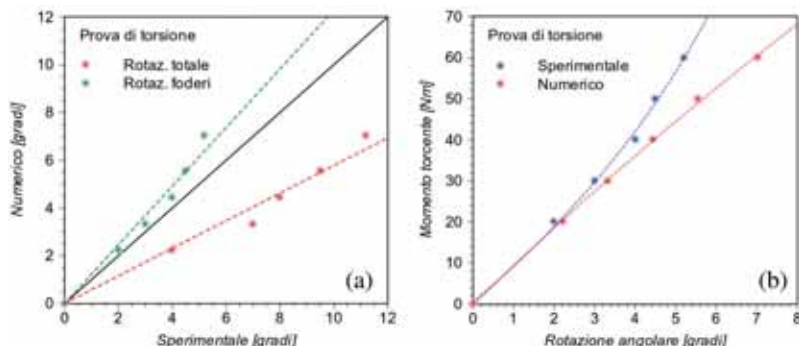
Modo	Frequenza [Hz]					
	Sperimentale	R1	R2	R3	R4	R5
1	128.7	99.5	92.8	152.0	121.6	112.3
2	270.0	254.6	233.0	313.5	237.3	224.7
3	384.2	342.2	320.0	402.0	305.1	294.7
4	430.3	420.3	-	457.3	365.8	351.0
5	466.6	-	616.7	-	-	-

Nelle prove frontale e laterale (figure 4a e 4b) entrambi i modelli R4 ed R5 sono in grado di riprodurre con accuratezza il comportamento meccanico della forcella, mentre risultano essere meno attendibili nella simulazione della prova di carico verticale (figura 4c), dove manifestano un comportamento più cedevole del reale. Durante la prova di torsione, poiché l'angolo di montaggio consentiva una scomposizione

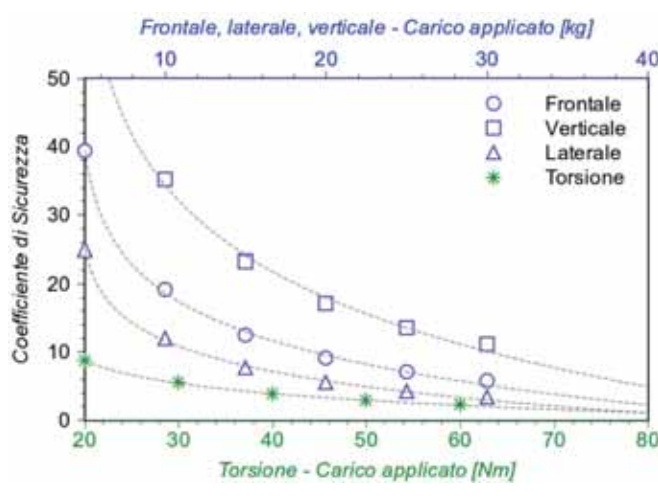
(figura 6), secondo il criterio di Tsai-Hill [12], indica che il carico laterale risulta essere il più pericoloso. Il coefficiente di sicurezza nella prova di torsione è riportato per completezza di informazione, ma non è confrontabile con le altre prove per via della differente natura del carico agente. Inoltre, per la modalità di funzionamento del gruppo sterzo-forcella-ruota è improbabile che questo tipo di sollecitazione si ma-



Confronto numerico-sperimentale prove di carico frontale, laterale e verticale.



Confronto numerico-sperimentale, prova di torsione.



Coefficienti di sicurezza calcolati e curve di tendenza logaritmiche.

nifesti durante il regolare utilizzo del componente con i livelli di coppia applicati in laboratorio.

Conclusioni

Per identificare la corretta metodologia di modellazione agli elementi finiti di una forcella ciclistica in composito si sono effettuate analisi numeriche e sperimentali. La caratterizzazione è stata svolta negli ambiti dinamico e strutturale in campo lineare elastico. Il peso, le frequenze e i modi propri del componente, così come i diagrammi carico-spostamento e carico-rotazione angolare ai forcellini sono stati utilizzati per la validazione del modello. Per le prove strutturali è stato progettato e realizzato un banco prova modulare che consente di eseguire le diverse prove ricombinando opportunamente gli stessi elementi. In una prima fase si è affinato il modello numerico per iterazione limitandosi alla validazione modale e di peso. Successivamente, la versione ottimizzata del modello è stata utilizzata per la simulazione del comportamento

strutturale statico in campo lineare.

In generale, nonostante l'approssimata conoscenza della disposizione degli strati e delle fibre in composito nel componente, il modello si è rivelato adeguato a riprodurre il comportamento strutturale della forcella per quanto riguarda le prove di carico frontale e laterale, mentre ulteriori approfondimenti sono necessari per migliorare la simulazione delle prove di carico verticale e di torsione. In quest'ultimo caso, tuttavia, si ritiene che lo scostamento osservato tra il calcolo numerico e la misura sperimentale sia da attribuire, almeno in parte, alla non esatta riproduzione delle condizioni di vincolo, che dovranno essere armonizzate intervenendo in futuro sul banco prova o sul modello numerico. Per i futuri sviluppi dell'attività si prevede di approfondire la simulazione e le prove strutturali al di là del campo lineare, fino a studiarne le modalità di rottura. Si intende inoltre affinare la tecnica di modellazione a fronte di una più accurata conoscenza della disposizione di strati e fibre sull'intera superficie del componente.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Salvatore Botrugno per la preziosa collaborazione e l'azienda Gruppo Spa per aver fornito il prototipo e il modello matematico della forcella oggetto di studio.

P. Baldissera (e-mail: paolo.baldissera@polito.it), C. Delprete (cristiana.delprete@polito.it), Politecnico di Torino, Dipartimento di Meccanica.

readerservice.it n. 52

Bibliografia

- [1] M. Byko, "Carbon fiber lightens up bicycle racing", JOM, February, 80, 2005.
- [2] J. Moynihan, "Composite construction and advanced materials", Human Power, 7, 413, 1981.
- [3] G. H. Besterfield, W. B. Paugh, "Cost effective fabrication of a graphite/epoxy submarine hull", Human Power, 35, 1923, 1993.
- [4] D. G. Wilson, *Bicycling Science*, 3rd edition, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.
- [5] R. Wandermark, "Opportunities for the Titanium industry in bicycles and wheelchairs", JOM, June, 2527, 1997.
- [6] J. Deetz, "The use of wrought magnesium in bicycles", JOM, may, 5053, 2005.
- [7] I. Orsingher, N. Petrone, 12-15 settembre 2001, "Acquisizione su strada dei carichi su bicicletta da corsa per la definizione di standard di prova a fatica", XXX Convegno Nazionale AIAS - Alghero (SS).
- [8] R. R. Chang, "Finite element analyses and experimental considerations of the deflection and failure behaviour of an asymmetric laminate composite bicycle handlebar", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 216, 207218, 2002.
- [9] G. Nicoletto, M. Vettori, L. Conversi, "Progettazione a rigidità di un alettone da Formula 3 in materiale composito", XXX Convegno Nazionale AIAS, Alghero (SS), 1215 settembre 2001.
- [10] L. Solazzi, S. Matteazzi, "Analisi e sviluppi strutturali di un telaio per kart da competizione", XXXI Convegno Nazionale AIAS, Parma, 1821 settembre 2002.
- [11] Uni En 14781, Norma Europea, Biciclette da corsa: requisiti di sicurezza e metodi di prova, febbraio 2006.
- [12] R.M. Jones, *Mechanics of Composites Materials*, 2nd edition, Taylor and Francis, Philadelphia, 1999.