

# PROGETTAZIONE AVANZATA DI UNO SCI DA GARA

IL PROCESSO DI PROGETTAZIONE DI UNO SCI DA GARA HA TEMPI MOLTO SERRATI. I MATERIALI E LE TECNOLOGIE DISPONIBILI SONO IN CONTINUA EVOLUZIONE. INOLTRE, DATA LA COMPLESSITÀ DEL SISTEMA - UNO SCI È COMPOSTO DA MOLTI LAYER DI MATERIALI COMPOSITI - UN APPROCCIO PURAMENTE EMPIRICO BASATO SULL'ESPERIENZA E SU PROVE SPERIMENTALI PUÒ RISULTARE MOLTO COSTOSO E NON EFFICIENTE. PER RIUSCIRE A VELOCIZZARNE LO SVILUPPO È QUINDI FONDAMENTALE L'UTILIZZO DI TECNICHE NUMERICHE AVANZATE

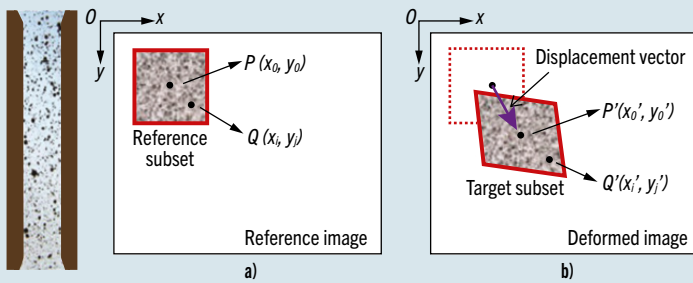
Lo sci alpinismo è un settore di nicchia tra gli sport invernali. Inoltre, l'attrezzatura gioca un ruolo determinante nelle prestazioni atletiche. Per la maggior parte della durata di una gara, gli atleti scalano pendii impervi ed in queste condizioni è fondamentale avere uno sci leggero. Tuttavia, nei tratti di discesa, il peso non è importante quanto lo è la rigidità. Serve quindi trovare un buon bilanciamento tra caratteristiche diametralmente opposte.

Il processo di ottimizzazione richiede numerosi tentativi e, considerando anche che gli approcci progettuali per lo sci alpinismo si basano prevalentemente su attività di testing, lo sviluppo di un nuovo modello può risultare molto costoso e richiedere molto tempo. Uno screening preliminare delle molteplici varianti progettuali può essere effettuato mediante test di laboratorio quali la flessione a tre punti o test torsionali. Solo i prototipi più promettenti vengono quindi provati da sciatori professionisti qualificati, come guide alpine o atleti di coppa del mondo, che possano dare una valutazione più accurata delle proprietà del-

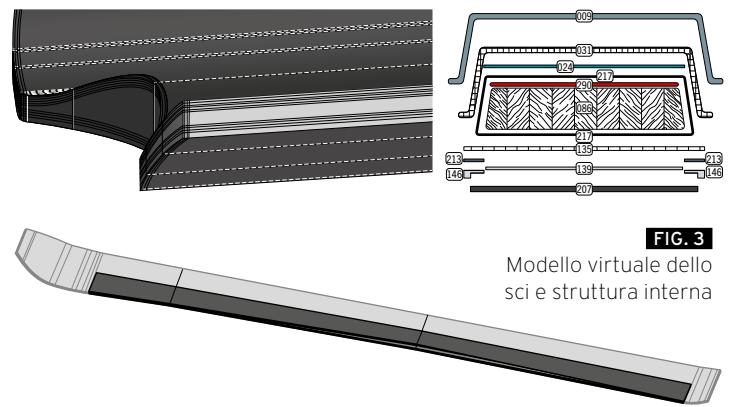
lo sci nelle condizioni reali che ne caratterizzano l'uso pratico. Questo approccio Trial&Error risulta costoso e richiede lunghi tempi per la prototipazione e il collaudo di tutte le varianti. La possibilità di ridurre il numero di prototipi fisici mediante uno screening preliminare virtuale potrebbe rappresentare un passo significativo per il miglioramento dell'intero processo di progettazione e produzione. L'analisi agli elementi finiti (FEA) è già utilizzata per le fasi di sviluppo e progettazione degli sci da discesa [1-4]. In letteratura sono anche presenti alcuni articoli in cui viene analizzato il comportamento meccanico degli sci da alpinismo [5-7]. Tuttavia, l'adozione di queste tecniche di modellazione per lo sviluppo di sci da alpinismo sembra non essere ancora molto diffusa. Va sottolineato come per lo sci alpinismo la necessità di trovare un equilibrio tra prestazioni pure e leggerezza rappresenti un ulteriore problema [8]. L'obiettivo del presente studio è quello di sviluppare un modello numerico affidabile di uno sci da alpinismo già sul mercato. Il modello si basa solamente sui dati geometrici e sui risultati delle prove di

caratterizzazione sui materiali dei vari strati di cui lo sci è costituito. La caratterizzazione avviene combinando prove di trazione con misure con correlazione digitale delle immagini (DIC). I campioni a forma di osso di cane sono stati realizzati mediante taglio laser.

Ogni materiale è stato testato in due diverse direzioni (perpendicolari tra loro). Per i materiali per i quali era possibile, la prova di trazione è stata ripetuta due volte. La correlazione digitale dell'immagine [9-16] combinata con l'ipotesi di Campbell [17] ha permesso di stimare le quattro proprietà elastiche nel piano. Inoltre, si è anche testato uno sci reale mediante prove di flessione a tre punti e flessione-torsione. Le stesse condizioni sono state riprodotte numericamente. Le simulazioni sono state eseguite con diversi livelli di semplificazione [18]. Una volta validato il modello numerico dello sci, se ne è studiato il comportamento in diverse condizioni di operative, sempre mediante modellazione numerica. In particolare, è stata simulata l'interazione sci-neve. La neve è stata modellata con il modello di Lintzèn [19].



**FIG. 2**  
Schema esemplificativo della cross-correlazione



**FIG. 3**  
Modello virtuale dello sci e struttura interna

## Materiali e metodi

### Panoramica sci

Gli sci moderni sono composti da una struttura composita multistrato, con un softcore solitamente in legno o con struttura a nido d'ape che garantisce buona flessibilità e peso ridotto. Questo nucleo è avvolto da diversi strati. Si tratta in genere di materiali rinforzati con fibra di carbonio, basalto e/o vetro. La resistenza e la stabilità dello sci sono determinate principalmente dal materiale di questi strati avvolgenti.

I layer superiore e inferiore non hanno funzioni strutturali. Quello superiore è necessario solo per dare un aspetto più attrattivo allo sci, mentre quello inferiore è determinante nel ridurre l'attrito tra sci e neve. Per ottenere uno sci ad elevate prestazioni, è importante trovare un buon equilibrio tra peso, resistenza e rigidità. Le soluzioni con un maggiore

numero di strati assicurano solitamente i progetti più performanti. Tuttavia, aumentando il numero di strati e materiali si possono avere molte più versioni da dover produrre e testare. Senza simulazioni FE, questo è sempre un problema e solo l'esperienza del produttore rappresenta uno strumento per cercare di accelerare lo sviluppo.

### Metodi

Per dare una validità generale all'approccio adottato, le proprietà meccaniche dei diversi materiali sono state ottenute con prove di trazione combinate con tecniche DIC. Ciò consente la caratterizzazione di tutte le proprietà elastiche nel piano per ciascun materiale utilizzato nello sci. I materiali impiegati nella produzione sono spesso compositi.

Hanno due costituenti principali, fibra e matrice. Le fibre servono a trasmettere la maggior parte della forza, mentre la matrice è necessaria a mantenere le fibre assieme e proteggerle dagli agen-

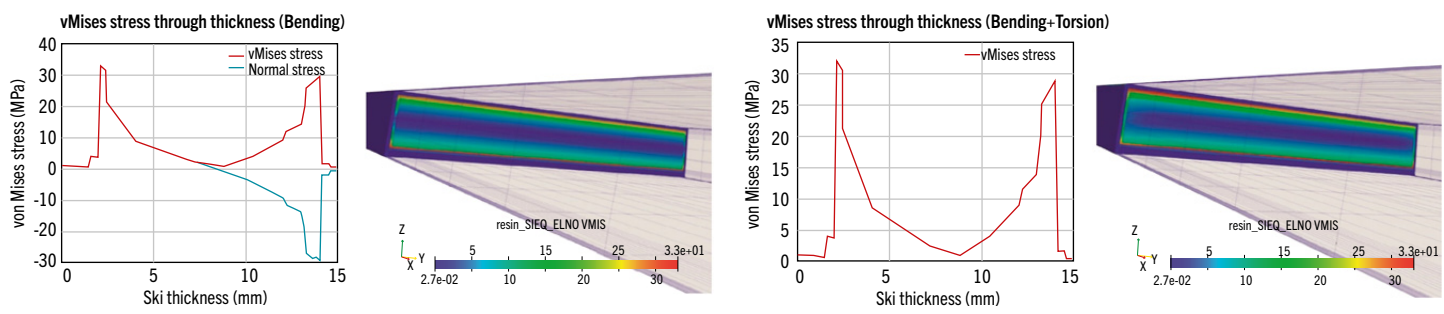
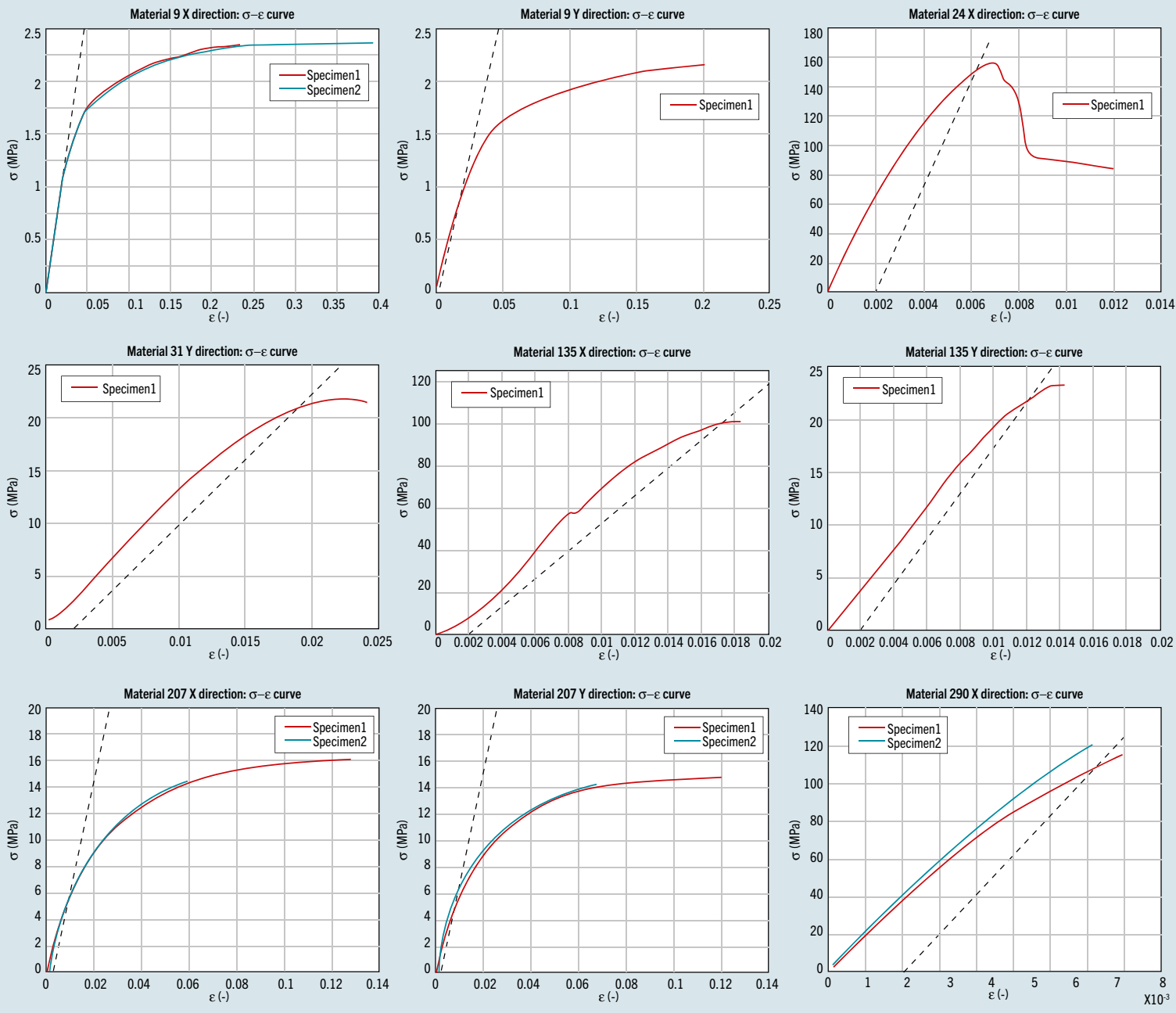
ti esterni. Per descrivere questi materiali si usa la teoria dei materiali ortotropi e delle strutture laminate. Il materiale ortotropico può essere descritto nello spazio con 9 parametri elastici indipendenti. Tuttavia, per una lamina di piccolo spessore avente fibre continue longitudinali, il comportamento elastico può essere descritto solo con 4 costanti elastiche: i 2 moduli elastici nel piano, il modulo di taglio nel piano ed il coefficiente di Poisson. Il modulo elastico può essere ottenuto direttamente dalle prove di trazione mono-assiali.

Per la stima del coefficiente di Poisson si rendono necessarie misure DIC. Il modulo di taglio è stato valutato mediante la formula approssimata di Campbell [17]. I test di trazione sono stati eseguiti su una macchina STEPLab UD04 (Figura 1) disponibile nei laboratori della Libera Università di Bolzano/Bozen. Questa è in grado di applicare forze statiche fino a 4,5 kN. Ogni test è stato eseguito con una velocità della traversa di 0,1

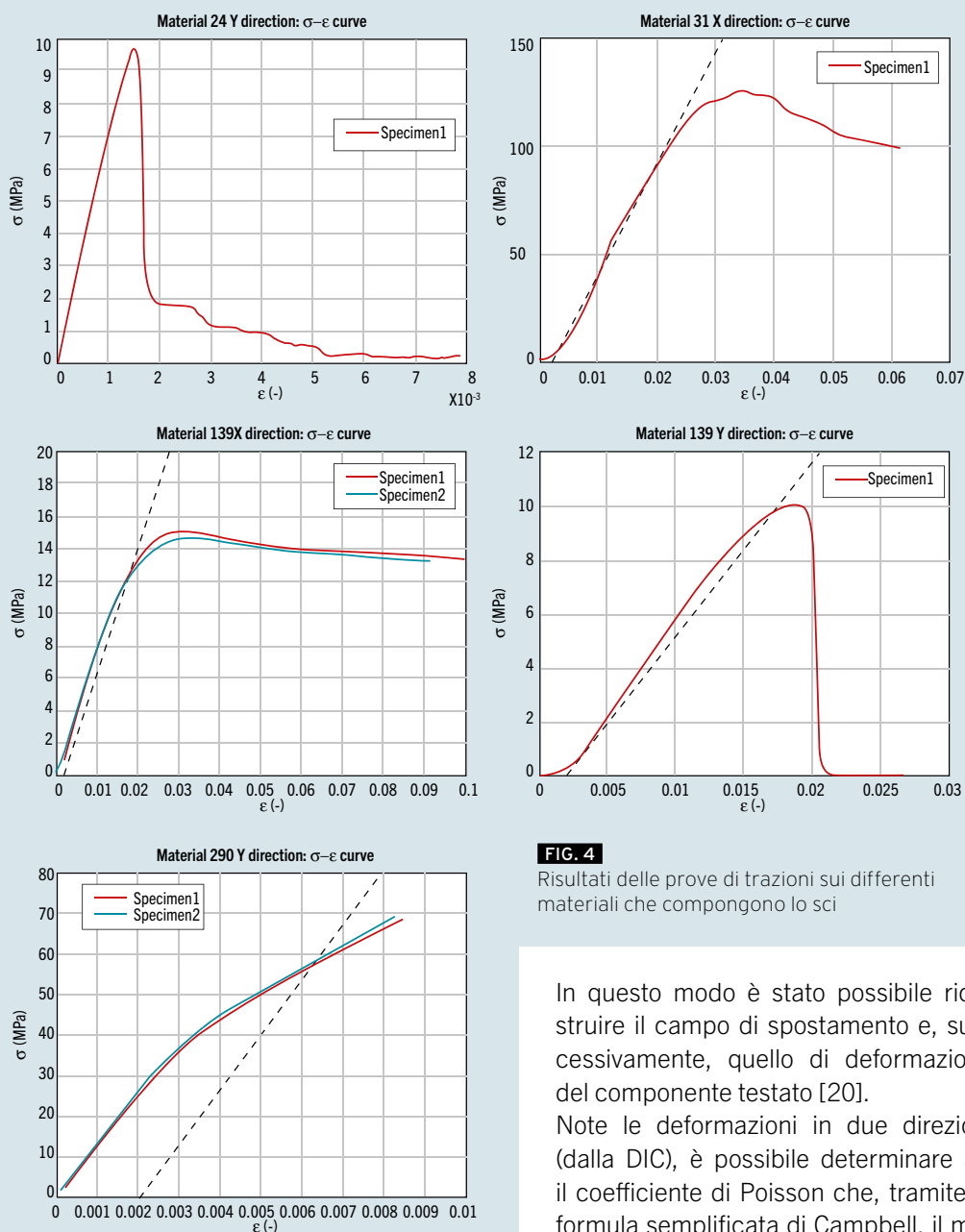
mm / min. Per quanto concerne la correlazione digitale delle immagini (DIC) è stata utilizzata una fotocamera reflex Nikon D750 con risoluzione 32MPixel e stabilizzatore, posizionata perpendicolarmente alla superficie piana del provino. Sono state anche utilizzate fonti esterne di luce per la migliore illuminazione della superficie del campione. A monte della prova di trazione, sul provi-

**TABELLA 1**  
Proprietà elastiche dei differenti materiali che compongono lo sci

	Material								
	9	24	139	207	290	135	31	86	217
Ex [Mpa]	550	35	800	850	20	4000	2000	13,7	35
Ey [Mpa]	567	8700	750	897	13,7	569	127	420	12,436
vxy [-]	0.45	0.23	0.45	0.42	0.18	0.39	0.39	0.40	0.56
vxy [-]	0.43	0.35	0.38	0.30	0.12	0.39	0.39	0.40	0.48
Gxy [Mpa]	776	35,01	1097	1291	29,125	3009	1184	10,086	25,327
$\alpha_x$ [Mpa]	11	152	10	6	110	98	87		
$\alpha_y$ [Mpa]	10	9	13	6	57	22	21		
thickness [mm]	0.35	0.35	0.50	1.10	1.20	0.55	0.55	0-5.45	0.5



**FIG. 5**  
Sforzi normali nella sezione dello sci nelle prove di flessione a tre punti e flessione-torsione



**FIG. 4**  
Risultati delle prove di trazioni sui differenti materiali che compongono lo sci

no è stato creato un caratteristico motivo a “macchioline” in bianco e nero. Durante la prova le immagini sono state acquisite a una velocità fissa.

La prima immagine acquisita (campione non deformato) è stata utilizzata come riferimento. La cross-correlazione ha consentito il riconoscimento della posizione delle singole macchiette presenti sulla superficie del campione ad ogni istante temporale (corrispondente a deformazioni diverse e note) (Figura 2).

$$v_{xy} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}; \quad v_{yx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{(1+\nu_{xy})}{E_x} + \frac{(1+\nu_{yx})}{E_y}$$

### Sci

In questa ricerca è stato utilizzato il software open- source Code\_Aster / Salome-Meca. Nel modello virtuale la coda e la punta dello sci non sono state modellate. Si è modellata solamente la par-

te dello sci che nei test rientrava tra i supporti. A causa del contributo a bassissima resistenza e della loro sezione molto piccola, le lamine (codice 146 in figura 3) non sono state modellate.

Per quanto riguarda il modello piano, lo sci è stato diviso in 145 porzioni longitudinali in modo da ottenere una buona approssimazione della curvatura dello sci e una buona modellazione degli spessori effettivi. La griglia di calcolo era composta da circa 22k elementi quadrangolari. Il modello solido, invece, risultava molto più complesso. Il numero di celle di calcolo era pari a circa 1M.

### Test preliminari di caratterizzazione delle proprietà dei singoli layer che compongono lo sci

La figura 4 mostra i risultati dei test di trazione sui vari materiali nelle due direzioni principali. La Tabella 1 riporta le proprietà elastiche dei differenti materiali che compongono lo sci mentre tabella 2 riporta lo spostamento massimo nel punto medio dello sci quando caricato con un carico di 120 N nella prova di flessione a tre punti.

Sono riportati anche i valori ottenuti dalle due diverse analisi FEM (con shell ed elementi solidi). La Tabella 3 riporta le rotazioni massime del punto medio dello sci misurate durante la prova di flessione-torsione. Anche in questo caso vengono riportati i valori ottenuti dalle due diverse analisi FEM (con shell ed elementi solidi). Figura 5 mostra le sollecitazioni nello spessore dello sci (0 corrisponde alla parte inferiore) durante la prova di flessione a tre punti e nel test di flessione-torsione. Lo strato più caricato è risultato quello nel materiale con codice 217, in cui lo sforzo ha raggiunto un valore di 32 MPa sia nella flessione a tre punti (120N) che nel il test di flessione-torsione (40N @ 0.45m).

In queste condizioni di prova, il cedimento avverrebbe per valori di carico relativamente bassi. Queste specifiche condizioni, però, benché molto utili per validare il modello numerico in quanto facil-

mente riproducibili in laboratorio non sono rappresentative delle reali condizioni di carico di uno sci durante l'esercizio. Il contatto con la neve, infatti, promuove un trasferimento più uniforme del carico dallo sci al terreno e, quindi, lo stato di sollecitazione risulta meno critico (a pari carico). Per questo motivo, il modello numerico è stato ulteriormente affinato inserendo l'interazione con la neve.

## Comportamento dello sci durante una curva in conduzione

Per studiare il comportamento dello sci durante una curva in conduzione, deve venire modellata anche l'interazione sci-neve. Per fare questo, è stato utilizzato il modello di Lintzèn [19]. Si basa su test sperimentali di compressione su campioni cilindrici di neve ghiacciata.

Lintzèn ha proposto una relazione che descrive la neve come una funzione lineare a tratti, come mostra Figura 6.

La neve è caratterizzata da un comportamento lineare iniziale in cui la costante elastica ha un valore che variava tra  $E_{tan} = 115$  (neve vecchia) ed  $E_{tan} = 160$  MPa (neve artificiale). A livelli maggiori di compressione, il comportamento può essere ancora descritto con una relazio-

Model	Displacement [mm]	Simulation Time* [min]	Error [%]
Experimental	40	35	
Shell	41	60	2.5%
Solid	44	0.23	10.0%

TABELLA 2

\*on a 9.6 GFLOPS Workstation

Spostamento massimo nel punto medio dello sci quando caricato con un carico di 120 N nella prova di flessione a tre punti

Model	Rotation Angle	Simulation Time * [min]	Error [%]
Experimental	4.44		
Shell	4.61	35	3.0%
Solid	4.86	60	9.5%

TABELLA 3

\*on a 9.6 GFLOPS workstation

Rotazione massima nel punto medio dello sci durante la prova di flesso-torsione

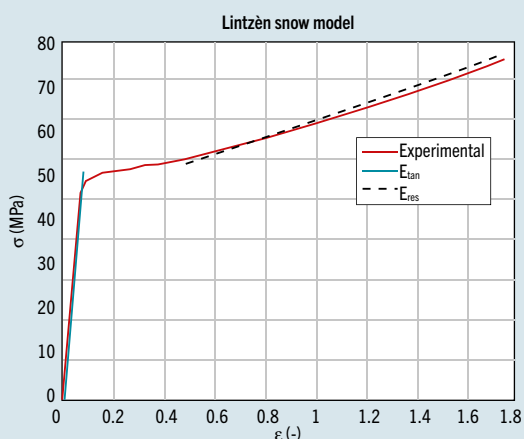


FIG. 6

Modello della neve secondo Lintzèn

Roll Angle [°]	Force applied [Kg]	Maximum Deflection [mm]	Maximum Snow Penetration [mm]
10	50	2.85	8.26
10	100	2.88	8.29
10	200	2.94	8.35
30	50	9.00	12.82
30	100	9.07	12.89
30	200	9.15	12.97
45	50	15.01	17.01
45	100	15.15	17.17
45	200	15.30	17.32
60	50	29.02	22.59
60	100	29.31	22.88
60	200	29.61	22.18

TABELLA 4

Condizioni simulate

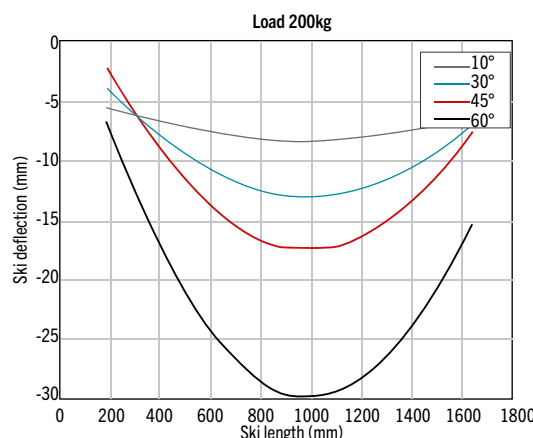
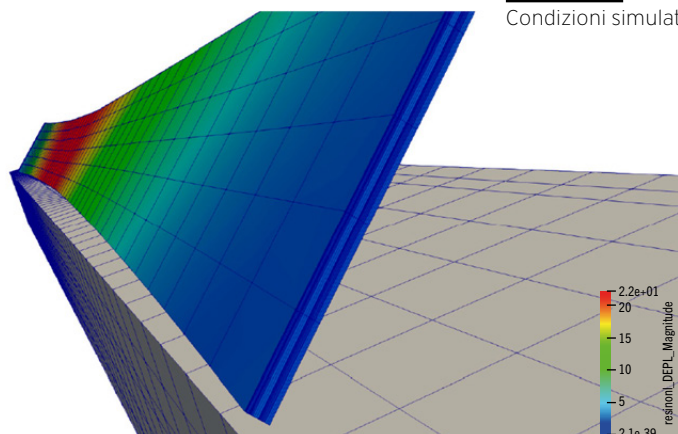
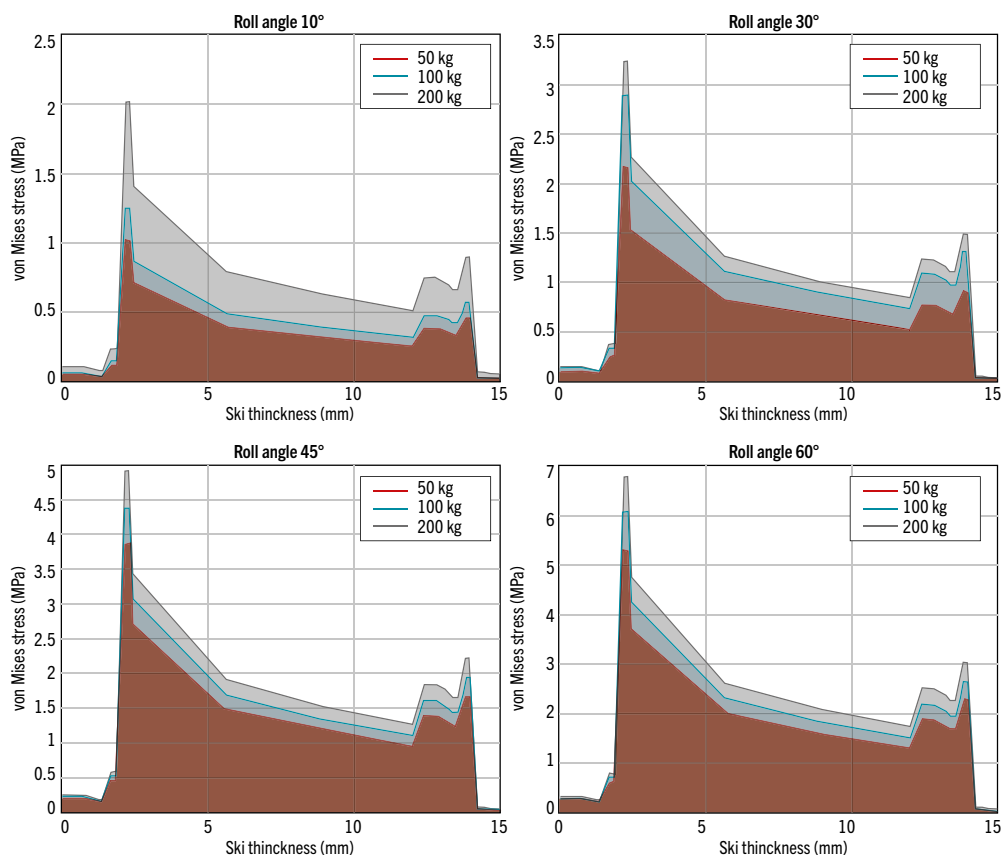


FIG. 7

Sci deformato sotto carico e deformato lungo il piano di simmetria per diversi angoli di rollio



**FIG. 8**  
Stato di sollecitazione della sezione media dello sci in esercizio

ne lineare in cui il modulo elastico assume un valore tra  $E_{res} = 9$  ed  $E_{res} = 35$  MPa. Lo sci è stato testato per diversi angoli di rollio e carichi. L'angolo di rollio descrive la rotazione dello sci lungo il suo asse longitudinale rispetto al terreno.

La tabella 4 mostra le combinazioni studiate. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando un solutore non lineare. La neve è stata modellata usando una legge elastoplastica con indurimento isotropico lineare. Il contatto è stato modellato come discreto. Il problema del contatto / attrito è stato risolto in modo disaccoppiato rispetto al problema dell'equilibrio della struttura.

Figura 7 mostra lo sci deformato sotto carico e la deformata lungo il piano di simmetria per diversi angoli di rollio. Questi risultati sono fondamentali per comprendere il comportamento dello sci durante una discesa: la combinazione di raggio di carving, angolo di rollio e carico applicato determinano il raggio di sterza-

ta. Uno sci più rigido richiederebbe un carico molto più elevato per garantire lo stesso raggio di sterzata (a parità di carving e angolo di rollio).

Pertanto, gli sci con la stessa geometria dovrebbero avere differenti strutture interne a seconda del peso dell'atleta. Le simulazioni numeriche potrebbero essere uno strumento efficace per progettare uno sci ad personam.

Figura 8 mostra chiaramente come a contatto con la neve, anche per valori relativamente elevati di carico (200kg = 2000N >> 120N utilizzati nelle prove di flessione a tre punti) i valori di sollecitazione rimangono molto contenuti.

## Discussione

Per sua natura, lo sci deve lavorare sempre e solo in campo elastico. Pertanto, durante la caratterizzazione sperimentale, la legge costitutiva è stata caratterizzata solamente fino allo snervamento. La maggior parte dei materiali testati ha mostrato una buona ripetibilità nei risultati. In alcuni casi, a causa della scarsa disponibilità di materiali, è stato pos-

sibile testare un solo campione. Le ripetizioni sono state possibili per i materiali 207 (entrambe le direzioni), 290 (entrambe le direzioni), 139 (direzione X) e 9 (direzione X). I materiali n. 207 e n. 9 hanno mostrato lo stesso comportamento in entrambe le direzioni. I test eseguiti sui materiali n. 135 e n. 31, in cui le singole fibre erano facilmente visibili, sono stati eseguiti con un campione speciale con una geometria rettangolare anziché una a forma di osso di cane.

Dopo aver misurato lo spessore e la larghezza di una singola fibra, l'area resistente è stata calcolata moltiplicando l'area di una singola fibra per il numero totale di fibre di ciascun campione.

I risultati FEM sono stati pienamente validati dal confronto con i dati sperimentali per entrambi gli approcci di modellazione (shell e solido). L'analisi 2D ha presentato uno spostamento massimo (nella flessione a tre punti) di 41 mm, con una differenza del 2,5% rispetto ai dati sperimentali, mentre il modello 3D ha previsto uno spostamento massimo di 44 mm (10% di differenza rispetto agli esperimenti). Nell'analisi di flessione-torsione, il modello 2D prevedeva una rotazione di 4,60° e il modello 3D una rotazione di 4,86°. La differenza rispetto ai risultati sperimentali era rispettivamente del 3% e del 9,5%.

Per il modello shell, le discrepanze nello spostamento / rotazione possono essere attribuite ai seguenti motivi:

- Lo sci è stato modellato con più sezioni aventi diverse altezze; quindi, la curvatura reale dello sci è stata solamente approssimata

- Le lamine in acciaio e gli strati laterali (gabbia) non sono stati modellati.

Dall'altro lato, la semplificazione nei modelli 3D è attribuibile ai seguenti motivi:

- La curvatura longitudinale dello sci non è stata considerata;

Entrambi i modelli 2D e 3D avevano la stessa larghezza massima, ma gli strati laterali erano modellati solo nel modello 3D. Il momento del secondo ordine (area) di questi strati verticali era inferiore rispetto a quelli orizzontali; pertanto,

è ragionevole che i modelli 2D risultino più rigidi rispetto a quelli 3D. Non tutti gli strati avevano scopi strutturali. Gli strati inferiore e superiore non sono stati caricati in modo significativo nonostante la massima distanza dall'asse neutro.

Questo a causa del loro basso modulo elastico. Il materiale dello strato inferiore, ad esempio, serve solamente a ridurre l'attrito con la neve e isolare lo sci dall'umidità. L'analisi FE ha permesso una valutazione accurata su come ogni strato contribuisca al comportamento complessivo dello sci.

Le simulazioni del comportamento reale dello sci a contatto con la neve hanno dimostrato come l'angolo di rollio giochi un ruolo molto più significativo rispetto

al carico applicato in termini di raggio di sterzata. Questo era pari a circa 22 m per un angolo di rollio pari a 45°, 34 m per un angolo di rollio pari a 30° e 111 m per un angolo di rollio di 10°. Il raggio geometrico dello sci (carving) era di 40 m. Il raggio di sterzata riesce però ad essere ridotto a 14 m quando l'angolo di rollio risulta superiore a 60°.

## Conclusioni

La modellazione accurata di uno sci è una sfida ingegneristica ardua. Mediante modellazione multistrato e test sperimentali di trazione accoppiati a misure DIC è stato possibile predire il comportamento di uno sci con un margine di errore inferiore al 10%. Una volta che si ha

un modello affidabile è possibile anche cambiare le proprietà dei materiali e le dimensioni dello strato e confrontare diverse soluzioni nelle prime fasi di progettazione. Ciò può comportare una riduzione del tempo necessario per lo sviluppo dello sci. Inoltre, la necessità di prototipi fisici si ridurrebbe ad una verifica finale. Una volta validato il modello, è stato anche possibile studiarne il comportamento a contatto con la neve in diverse condizioni operative.

I risultati delle simulazioni hanno permesso di quantificare i livelli di sforzo nello sci ed il raggio di curvatura per differenti carichi e angoli di rollio. Questo è fondamentale per ottimizzare l'attrezzatura per un atleta o gara specifica.

## Bibliografia

1. Wolfsperger, F.; Szabo, D.; Rhyner, H. Development of Alpine Skis Using FE Simulations. *Proced. Eng.* 2016, 147, 366-371.
2. Federolf, P.; Roos, M.; Lüthi, A.; Dual, J. Finite element simulation of the ski-snow interaction of an alpine ski in a carved turn. *Sports Eng.* 2010, 12, 123-133.
3. Zboncak, R. Experimental Verification of Ski Model for Finite Element Analysis. In *Proceedings of the 56th International Conference on Experimental Stress Analysis*, Harrachov, Czech Republic, 5-7 June 2018; pp. 450-456.
4. Mössner, M.; Innerhofer, G.; Schindelwig, K.; Kaps, P.; Schretter, H.; Nachbauer, W. Measurement of mechanical properties of snow for simulation of skiing. *J. Glaciol.* 2013, 59, 1170-1178.
5. Nordt, A.A.; Springer, G.S.; Kollar, L.P. Computing the mechanical properties of alpine skis. *Sports Eng.* 1999, 2, 65.
6. Hirano, Y.; Tada, N. Mechanics of a turning snow ski. *Int. J. Mech. Sci.* 1994, 36, 421-429.
7. Cresseri, S.; Jommi, C. Snow as an elastic viscoplastic bonded continuum: A modelling approach. *Ital. Geotech.* 2005, 4, 43-58.
8. Braghin, F.; Cheli, F.; Maldifassi, S.; Melzi, S.; Sabbioni, E. *The Engineering Approach to Winter Sports*; Springer: New York, NY, USA, 2016.
9. Musotto, Z. Digital Image Correlation: Applicazione Di Tecniche Convenzionali E Sviluppo Di Soluzioni La Stima E L'Incremento Dell'Accuratezza. Master's Thesis, ING IV-Scuola di Ingegneria Industriale, Monteluco di Roio, Italia, 2012.
10. Crammond, G.; Boyd, S.W.; Dulieu-Barton, J.M. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. *Opt. Lasers Eng.* 2013, 51, 1368-1378.
11. Makeev, A.; He, Y.; Carpentier, P.; Shonkwiler, B. A method for measurement of multiple constitutive properties for composite materials. *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf.* 2012, 43, 2199-2210.
12. Kowalczyk, P. Identification of mechanical parameters of composites in tensile tests using mixed numerical-experimental method. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2019, 135, 131-137.
13. Schreier, H.W.; Sutton, M.A. Systematic Errors in Digital Image Correlation Due to Undermatched Subset Shape Functions. *Exp. Mech.* 2002, 42, 303-310.
14. Wattrisse, B.; Chrysochoos, A.; Muracciole, J. Analysis of Strain Localization during Tensile Tests by Digital Image Correlation. *Exp. Mech.* 2000, 41, 29-39.
15. Peters, W. Digital image techniques in experimental stress analysis. *Opt. Eng.* 1982, 21, 427-431.
16. Górszczyk, J.; Malicki, K.; Zych, T. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials* 2019, 12, 2349. [PubMed]
17. Yokoyama, T.; Nakai, K. Evaluation of in-plane orthotropic elastic constants of paper and paperboard. *Proc. SEM Ann. Conf. Expo. Exp. Appl. Mech.* 2007, 3, 1505-1511.
18. Fraccaroli, L. Structural Modelling of Multilayer Skis. M.Sc. Thesis, Free University of Bozen-Bolzano, Bolzano, Italy, 2019.
19. Lintzén, N.; Edeskär, T. Uniaxial strength and deformation properties of machine-made snow. *J. Cold Reg. Eng.* 2015, 29, 04014020.
20. GOM. Available online: [www.gom.com](http://www.gom.com) (accessed on 1 May 2020).
21. *Tecnologie E Materiali Aerospaziali. CAPITOLO 32-Materiali Compositi: La Legge Costitutiva Ortotropica.* ■