



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA**

**TESI DI LAUREA**

**STUDIO NUMERICO E SPERIMENTALE  
DELLA RIGIDEZZA DI UNO SCI AGONISTICO**

*Relatore: PROF. GIOVANNI MENEGHETTI*

*Laureando: NICOLA SIMIO*

*Matricola: 2002533*

**ANNO ACCADEMICO 2022 - 2023**



# Indice

<b>INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>Lo sci</b> .....	3
1.1 Componenti di uno sci.....	3
1.2 Sciancratura.....	4
1.3 Camber e Rocker.....	5
1.4 Lunghezza di uno sci.....	7
<b>Costruzione e materiali</b> .....	11
2.1 Costruzione di uno sci.....	11
2.2 Stratificazione di uno sci.....	13
<b>Visita a Stöckli</b> .....	18
3.1 Catena produttiva di uno sci.....	18
<b>Prime analisi</b> .....	24
4.1 Analisi sperimentale.....	24
4.2 Analisi analitica e numerica.....	28
4.3 Conclusioni.....	37
<b>Analisi definitiva</b> .....	38
5.1 Modello geometrico.....	38
5.2 Modello fisico.....	47
5.3 Analisi numerica.....	50
5.4 Confronto.....	53
5.5 Conclusioni.....	54
<b>Bibliografia</b> .....	55



# Sommario

## **1. Lo sci**

Il capitolo in questione descrive le caratteristiche fondamentali di uno sci, analizzando i suoi componenti, la sciancratura, il rocker e il camber, nonché le caratteristiche geometriche

## **2. Costruzione e materiali**

Il capitolo in questione descrive i possibili metodi di costruzione di uno sci concentrandosi sul metodo “sandwich”. Viene quindi analizzata la stratificazione di uno sci sandwich prestando particolare attenzione alle tipologie di materiali utilizzati e alle loro caratteristiche fisiche.

## **3. Visita a Stöckli**

Il capitolo in questione fornisce una presentazione dell’azienda produttrice di sci Stöckli e una descrizione della sua catena di produzione degli sci a partire dall’esperienza personale.

## **4. Prime Analisi**

Il capitolo in questione tratta dell’analisi sperimentale di flessione effettuata su uno sci e dell’analisi analitica e numerica effettuate su un modello semplificato di uno sci corrispondente ad una trave in acciaio.

## **5. Analisi definitiva**

Il capitolo in questione tratta dell’analisi numerica effettuata su un modello Solidworks realistico dello sci. I risultati numerici vengono confrontati con quelli delle analisi sperimentali.



## **Ringraziamenti**

*Desidero esprimere profonda gratitudine e riconoscenza alle persone e alle aziende che hanno contribuito in modo significativo alla realizzazione di questa tesi. Senza il loro sostegno, la ricerca e la stesura di questo lavoro non sarebbero state possibili. Si ringrazia in modo particolare il professor Giovanni Meneghetti per avermi permesso di realizzare la tesi su un tema che mi appassiona. Desidero inoltre ringraziare i signori Mathieu Fauve e Gustavo Sangiorgi dell'azienda Stöckli Swiss Sports AG per avermi permesso di visitare il loro stabilimento e raccogliere numerose informazioni che sono risultate essenziali nello svolgimento della tesi. Di particolare importanza è stato l'aiuto del signor Valeriano Lucietto di Mak Aeraulica srl, senza il quale non avrei potuto realizzare le prove sperimentali. Ad Otello Lucietto e ad Andrea Miotto un grazie per la loro pronta disponibilità a fornirmi contatti e materiali utili allo studio.*

*Infine, desidero esprimere la mia riconoscenza a coloro che, anche se non menzionati esplicitamente, hanno contribuito in modi diversi e significativi alla mia formazione accademica e alla realizzazione di questa tesi. La collaborazione, il sostegno emotivo e la condivisione delle idee sono stati fondamentali per il mio percorso di crescita e per il completamento di questo lavoro.*



# INTRODUZIONE

Il mondo dello sci alpino ha conosciuto negli ultimi cinquant'anni una notevole evoluzione sia nell'ambito della tecnica di discesa che in quello riguardante l'attrezzatura utilizzata dagli atleti. Questi due aspetti sono strettamente legati: la progressiva ricerca e sviluppo tecnologico rivolti ai materiali che compongono gli sci e alla forma stessa di questi ultimi hanno comportato la necessità di rivoluzionare il modo di sciare. Dalla sciata a "serpentina" con sci lunghi e stretti tipica degli anni ottanta si è passati a curve in conduzione con pieghe da "mano a terra" con sci corti e sciancrati. L'introduzione di nuovi materiali nella costruzione di sci è stata l'aspetto trainante nello sviluppo tecnico di questo attrezzo. L'incremento delle velocità nelle discipline sciistiche, a cui sono legate maggiori sollecitazioni, ha richiesto materiali da costruzione sempre più performanti non solo per garantire la resistenza ma per conferire allo sciatore stabilità e controllo. È importante sottolineare come la struttura e composizione degli sci si differenzi in base all'utilizzo: un prodotto destinato al mondo race sarà nettamente differente a uno destinato all'utilizzatore comune. Tale distinzione è legata ai differenti sforzi e sollecitazioni a cui lo sci è sottoposto e ad altri fattori quali velocità e rapidità nel cambio di direzione che si esplica nell'utilizzo di particolari materiali e forme nella costruzione dello sci. Si può dunque affermare che lo sci è un attrezzo sportivo la cui progettazione e realizzazione vede coinvolti molti aspetti tecnici che meritano di essere analizzati da un punto di vista ingegneristico.

L'obiettivo di questa tesi è creare un modello numerico che simuli il comportamento a flessione dello sci agonistico, concentrandosi sulla sua importanza nella progettazione. La rigidità è una caratteristica fondamentale nello sviluppo dello sci. In generale, uno sci più rigido, come quelli da competizione (sci race), offrirà prestazioni tecniche e di alto livello. Al contrario, uno sci con una struttura più morbida (sci allround e all mountain) sarà più facile da gestire e richiederà meno fatica. Tuttavia, poiché lo sci presenta un comportamento elastico durante il suo utilizzo, è essenziale considerare gli sforzi di flessione a cui è soggetto al fine di evitare deformazioni plastiche che potrebbero compromettere le proprietà e l'utilizzo pratico dello sci. Nella fase di progettazione quindi, è necessario prendere in considerazione una serie di fattori per determinare gli sforzi ai quali lo sci sarà sottoposto. Questi includono il peso dello sciatore, la forza applicata (con l'introduzione delle categorie di sci) e le sollecitazioni esterne come dossi e buche. Attraverso uno studio analitico-numerico e sperimentale, questa tesi si propone di sviluppare un modello numerico che possa simulare accuratamente il comportamento a flessione dello sci. Ciò consentirà di valutare l'impatto dei diversi fattori sulla risposta dello sci alla flessione e di ottimizzare il suo design per ottenere prestazioni ottimali. Sarà anche possibile prevedere e mitigare potenziali deformazioni plastiche che potrebbero rendere lo sci inutilizzabile.



Figura 1.1 e 1.2: A sinistra l'atleta Alberto Tomba nei primi anni 90. Sulla destra l'austriaco Marcel Hirsher nel 2014. In basso i corrispettivi sci utilizzati dai due atleti [1] [2]



# CAPITOLO 1

## Lo sci

### 1.1 Componenti di uno sci

Prima di affrontare qualsiasi tipo di considerazione sui temi precedentemente citati è fondamentale definire quali sono i pezzi che compongono uno sci. Distinguiamo:

- Punta: [1] parte superiore dello sci caratterizzata da un profilo allargato e curvo, leggermente rialzato;
- Coda: [2] parte terminale dello sci;
- Ponte: [3] parte centrale dello sci. Il ponte risulta essere più stretto rispetto a spatola e coda, ed è il punto di maggiore presa sul fondo nevoso;
- Lamina: [3] parte metallica che avvolge i lati della soletta, permette la presa su neve. Deve essere affilata regolarmente affinché possa garantire la presa. Costituisce l'unica superficie di contatto tra sci e manto nevoso durante la curva;
- Soletta: [4] elemento costruttivo attraverso cui lo sci ottiene scorrevolezza nonché primo punto di contatto dello sci sulla neve. Realizzata in polietilene inciso con piccolissimi segni atti allo scorrimento delle gocce d'acqua che si creano fra la neve e lo sci stesso. L'applicazione di un particolare sostanza cerosa detta sciolina permette alla soletta di conservare le sue caratteristiche originali;
- Piastra: [5] interfaccia posta tra lo sci e l'attacco avvitata sull'asta con asole per permettere un leggero scorrimento. Comporta un innalzamento del baricentro dello sciatore. Inoltre aumenta la massa dello sci, conferendo maggiore durezza e un migliore ritorno elastico, nonché una diminuzione del momento d'inerzia e delle vibrazioni provenienti dalla pista. Prodotta in forme e spessori diversi, composta da diversi polimeri con presenza di supporti metallici;
- Attacco: [6]: parte meccanica realizzata in plastica posta sulla piastra in corrispondenza del ponte. Rappresenta il vincolo tra sciatore e sci. Utilizza un meccanismo di molle regolabili secondo una scala DIN in modo che se la forza registrata dall'attacco in caso di caduta supera determinati valori, questi sgancino gli sci dagli scarponi, minimizzando così il rischio di lesioni alle ginocchia.

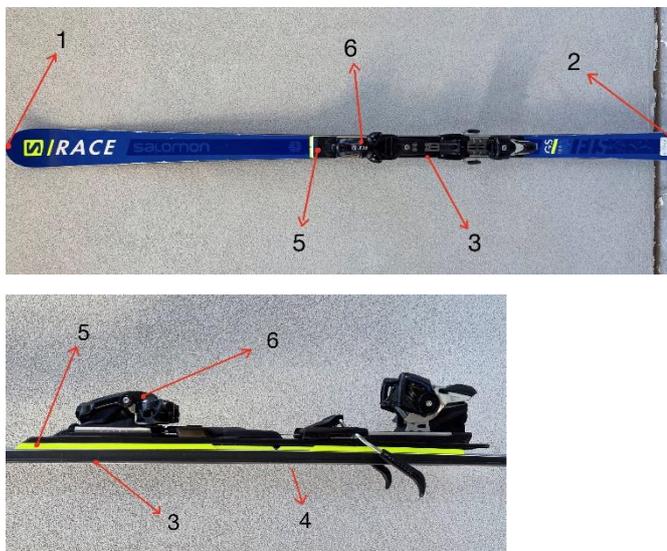


Figura 1.1 e 1.2: Immagini a fine illustrativo di uno sci e di un ponte.

È importante evidenziare che questi componenti sono comuni ad ogni sci ma presentano variazioni nella forma, materiale e proprietà a seconda della tipologia di sci.

## 1.2 Sciancratura

Con il termine sciancratura si intende la forma dello sci in condizione statica, ed è determinata dalla differenza di larghezza di punta e coda rispetto al ponte. La sciancratura, insieme alla forma e alla lunghezza dello sci, determina il raggio di curvatura, ossia quel parametro che descrive il raggio teorico di curva per cui è progettato tale modello di sci. Questo valore può essere ricavato in modo approssimativo appoggiando lo sci a terra e disegnandone a matita il profilo; proseguendo all'infinito questa linea si ottiene un cerchio il cui raggio indica il comportamento teorico dello sci, ossia la curva che lo sci compierebbe se ad esso non fosse applicato alcun carico.

Per calcolare il raggio in modo più accurato è sufficiente conoscere i seguenti valori:

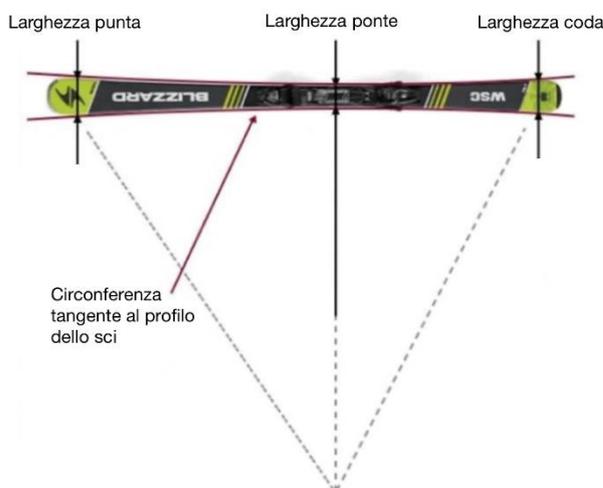
- $l$ : lunghezza degli sci in cm
- $e$ : lunghezza delle estremità degli sci in cm oltre i punti più larga.
- $t$ : larghezza del centro dello sci in mm
- $p$ : larghezza della coda dello sci in mm
- $s$ : larghezza della spatola in mm
- $t$ : larghezza del centro dello sci in mm

La formula è la seguente:

$$R = \frac{(l - e)^2}{[20 \times (s + t - 2p)]}$$

Si ottiene così il raggio della circonferenza passante attraverso 3 punti dei bordi dello sci (spatola, centro e coda). Maggiore è la differenza tra larghezza di spatola-centro-coda minore sarà il raggio di curva possibile. E' molto importante precisare che il raggio di curvatura è un raggio statico, quello dinamico è invece praticamente impossibile da calcolare, in quanto la deformazione dello sci in fase dinamica farà variare continuamente la distanza tra punta e coda e di conseguenza il raggio di curva stesso (dipende dall'inclinazione degli sci, dai supporti e dallo stato della neve). Il raggio di curvatura viene forzato sciando attraverso l'applicazione della forza da parte dello sciatore; più lo sci è sciancrato, minore sarà il raggio di curvatura, facilitando così la flessione dello sci in fase di curva e permettendo all'atleta di percorrere traiettorie più strette con minore sforzo. Generalmente gli sci da gara per slalom gigante sono lunghi e poco sciancrati, ciò li rende più difficili da curvare ma garantisce una maggiore rigidità nonché una maggiore velocità. Al contrario gli sci da turismo hanno una elevata sciancratura, così da offrire anche a sciatori meno esperti la sensazione di "scolpire" la curva perfetta

Figura 1.3: Raffigurazione schematica della sciancratura di uno sci generico. [3]



### 1.3 Camber e Rocker

Il camber e il rocker sono due caratteristiche ben distinte di uno sci. La combinazione ideale di questi due elementi è tesa a implementare le caratteristiche tecniche dello sci e di conseguenza garantire una migliore sciata.

Il camber è l'arco naturale di uno sci quando non si esercita alcuna pressione su di esso. È un fattore importante da considerare nella progettazione in quanto influenza notevolmente il comportamento dello sci. Il camber infatti aumenta nettamente la tenuta su terreni compatti e ghiacciati, estendendo l'area di contatto della lamina grazie alla pressione del peso dello sciatore che fa leva sulla sciancratura. Esistono tre tipi di camber:

- Il camber tradizionale è il più comune. Un camber medio da 3 mm a 5 mm viene utilizzato nella maggior parte degli sci. In particolare su quelli da pista perché garantisce una buona tenuta sulla neve dura. Lo sci tocca alle estremità ma non al centro, al livello degli attacchi, dove si trova sopraelevato. Applicando pressione sullo sci il camber viene compresso, il centro dello sci entra quindi in contatto con il terreno ma, grazie alla curvatura, le estremità già in contatto entrano ancora di più nel terreno e quindi nella neve. È quello che dà agli sci da pista il loro mordente e la loro tenuta anche sulle nevi le più dure
- Il camber piatto o l'assenza del camber contraddistingue uno sci piatto, senza arco, per uno sci con sciabilità media, senza molto grip o manovrabilità. Questo è il motivo per cui il camber piatto non è presente in molti sci moderni.
- Il camber inverso è quello in cui soltanto la sezione dello sci sotto il piede si trova a contatto con la neve. Questo tipo di camber caratterizza spesso gli sci da fuoripista, soprattutto quelli molto larghi. Il camber inverso viene utilizzato sempre meno in favore del doppio rocker combinato con il camber tradizionale perché è più versatile nei passaggi da e su piste battute.

Il camber tradizionale è ideale per la pista poiché lavora insieme alla sciancratura portando notevoli benefici nelle vari fasi della sciata, in particolare in quella di curva, e in quella di cambio di direzione. La curva è la fase in cui lo sci subisce maggiore pressione, più grande è la forza che lo sciatore riesce ad imprimere più accentuata sarà la flessione dello sci e maggiore sarà la presa delle lamine sul fondo, determinando così il raggio della curva. Tuttavia imprimere una tale forza risulta complicato per uno sciatore amatoriale. Grazie al camber si ha che la pressione si distribuisce maggiormente sulla punta e sulla coda dello sci; questi due punti fanno da leva sulla parte centrale rialzata, il ponte, che si flette così più facilmente entrando in contatto con la neve in un secondo tempo. La flessione del ponte fa sì che lo sci si comporti come un arco, offrendo un ritorno elastico a fine curva che permette allo sciatore di prendere slancio per affrontare la piega successiva. Nella fase di fine curva la pressione applicata dal peso dello sciatore va sempre di più riducendosi comportando quindi una riduzione della presa delle lamine sulla neve che permette allo sciatore di far scivolare gli sci sotto di sé e portarli dalla parte opposta per iniziare la nuova curva. Se è presente il camber, la diminuzione della pressione applicata allo sci comporta il sollevamento del ponte e con ciò la riduzione della superficie di contatto tra lamina e pista alle sole punta e coda dello sci (le parti più sciancrate). In questo modo quindi il cambio di direzione che lo sciatore deve imporre allo sci risulta nettamente facilitato e velocizzato.

Il rocker è una nuova tecnologia che ha rivoluzionato lo sci allo stesso modo degli sci parabolici, diventando oggi un tratto comune negli sci moderni. Il termine deriva dall'inglese "incurvato" e indica infatti una variazione nella forma della punta e della coda di uno sci, un rialzo precoce e più progressivo alle estremità dell'attrezzo. Nello specifico il rocker rappresenta il camber inverso o "negativo", ovvero un profilo concavo della soletta rispetto alla curvatura tradizionale convessa. Il profilo concavo di questa tipologia di sci comporta una ridotta superficie di contatto tra lamine e neve perché essendo sollevato in punta e in coda tocca meno il suolo e ciò conferisce all'attrezzatura una maggiore flessibilità e facilità nell'affrontare le curve in entrata e in uscita, con una manovra di inversione più agevole e fluida e un miglior effetto di galleggiamento sul manto nevoso fresco. Quando uno sci rocker procede dritto, la sezione centrale concentra la pressione sulla neve, facilitando notevolmente la virata rispetto a uno sci camberato, che viene invece piegato "in forma" dal peso dell'atleta e segue curva secondo il raggio prescritto. Nello sci rocker invece questa forma curva invece è sempre presente, quindi l'inizio delle curve è intrinsecamente più facile. Quando lo sci viene messo in curva, la lunghezza effettiva della lamina si allunga: maggiore è l'angolo, maggiore è la stabilità. La lunghezza della lamina cresce in base alle necessità, allungandosi automaticamente in pendenza.

Proprio per questo l'attrezzatura rocker è particolarmente indicata non solo nel freeride ma anche in pista. Infatti prima dell'impiego di tale tecnologia gli sci risultavano difficili da girare, perché la lamina prendeva in punta e in coda e si faceva fatica a svincolare l'attrezzo. Gli sci moderni sono sciancrati e rockerati e dunque molto più accessibili a sciatori di medio livello tecnico. Per ogni tipo di sci è stato sviluppato un rocker specifico:

- Sci da pista: dispongono di una punta leggermente rockerata che corrisponde al 5-15% della lunghezza della parte anteriore dello sci. Questo tipo di rocker consente un inizio di virata più facile senza perdere aderenza in punta e in coda.

- Sci all mountain: hanno una punta rocker più accentuata, dal 10 al 25%, e un rocker leggero nella coda (dal 5 al 10%). L'obiettivo principale è migliorare le prestazioni dello sci fuori pista e sulla neve polverosa senza sacrificare la tenuta su piste battute.

Nel complesso quindi gli sci rocker sono ideali sia per i principianti, in quanto sono molto pratici dal punto di vista della maneggevolezza, comportano un minor sforzo muscolare in curva e perdonano più facilmente gli errori, sia per gli esperti negli sport sulla neve, in particolare fuoripista. Per coloro, invece, che si dedicano esclusivamente alla discesa libera a elevate velocità, il profilo inarcato dell'attrezzatura rocker potrebbe essere meno adeguato. Tuttavia alcuni marchi importanti di sci hanno introdotto il rocker sui loro modelli di Coppa del Mondo, soprattutto in quelli da slalom gigante. Ciò permette all'atleta di usare uno sci leggermente più lungo della misura abituale, guadagnando in scorrevolezza del materiale e stabilità nella parte centrale della curva, ma eliminando i problemi di inversione tra una porta e l'altra che si avrebbero allungando lo sci, grazie a un leggero rocker in punta che permette di svincolare più facilmente la lamina.

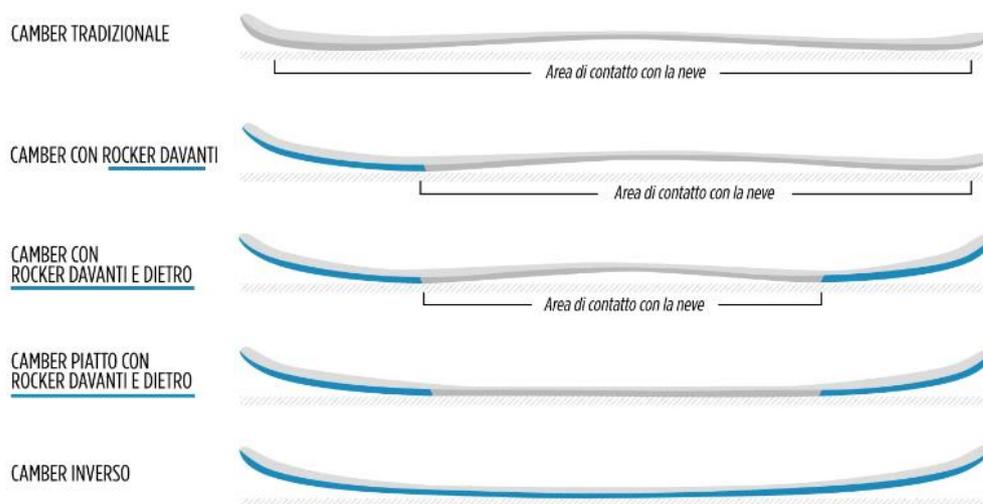


Figura 1.4: Raffigurazione delle tipologie di camber e rocker applicate agli sci. [4]

Dalla figura 1.4 possiamo osservare come la composizione di tipologie di camber e rocker possa dare vita a sci dalle forme nettamente differenti. Per esempio un camber piatto con rocker davanti e dietro dà forma ad uno sci adatto al freestyle. Le doppie punte rialzate permettono infatti di sciare anche all'indietro, ossia in "switch"; il fondo piatto permette di ruotare facilmente sulla soletta e rende l'atterraggio più stabile.

## 1.4 Lunghezza di uno sci

Un altro parametro fondamentale che caratterizza uno sci è la sua lunghezza. Fino agli inizi degli anni duemila gli sci erano prevalentemente lunghi e stretti; si prediligevano sci con altezza fino a 10 cm superiore rispetto alla statura dello sciatore. Questa maggiore estensione andava a sopperire alla mancanza di rigidità dovuta all'uso di materiali semplici (legno e alluminio) e garantiva inoltre maggiore equilibrio e stabilità. La conseguente diminuzione di manovrabilità e sensibilità veniva quindi risolta riducendo la larghezza dello sci.

Con l'evolversi delle tecnologie e dei materiali da costruzione e con l'introduzione di alcune innovazioni come sciancratura, rocker e camber si è potuto ridurre in parte l'influenza della lunghezza sulle caratteristiche tecniche di uno sci. Ad esempio si è osservato in precedenza come la sciancratura permetta a parità di lunghezza dello sci di variarne il raggio di curvatura ottenendo da uno sci lungo le caratteristiche di uno più corto. Anche l'utilizzo di materiali più resistenti come Titanal e carbonio consente di ottenere elevate rigidità anche con dimensioni inferiori dello sci. Ad ogni modo la lunghezza dello sci influisce, in fase di progettazione, sull'ampiezza del raggio di curva. Questo significa che uno sci più corto è tendenzialmente funzionale a un raggio di curva minore, viceversa uno sci più lungo consente di effettuare curve dal raggio maggiore. Consideriamo due paia di sci realizzati con lo stesso materiale, dei quali un paio più lunghi e un paio più corti. Gli sci lunghi ad alte velocità garantiscono maggiore stabilità a sollecitazioni e urti provenienti dal terreno, ma rendono più complicata la sterzata; gli sci corti danno meno stabilità ma, essendo più maneggevoli, consentono di effettuare curve più strette e rapide (anche a basse velocità) e oppongono meno resistenza sulla neve. Al giorno d'oggi la lunghezza media degli sci si è in generale ridotta e varia generalmente intorno ai 5 cm rispetto all'altezza dello sciatore secondo determinati fattori come la tipologia di sci, il livello di abilità e le caratteristiche fisiche.

Per quanto riguarda lo sci amatoriale il primo criterio di scelta è naturalmente la statura dello sciatore; essa rappresenta un riferimento dal quale partire per la misura dello sci. In secondo luogo si tiene conto della tipologia di sci; per esempio sci all-mountain e allround richiedono agilità e maneggevolezza e dunque tendono ad essere corti, sci da freeride devono galleggiare sulla neve e quindi saranno più lunghi. Infine bisogna considerare il livello di abilità dello sciatore, uno sciatore meno esperto avrà bisogno di uno sci di lunghezza inferiore rispetto alla propria statura in modo tale da avere maggiore maneggevolezza e manovrabilità in fase di curva; viceversa uno sciatore esperto necessiterà di uno sci rigido e lungo, che garantisca un maggiore ritorno elastico e un'elevata stabilità alle alte velocità. Il peso corporeo ha poca influenza sulla scelta della lunghezza dello sci ma è particolarmente importante nella scelta della sua durezza. Più una persona è pesante, più lo sci dovrebbe essere duro in modo che la pressione applicata possa essere distribuita in modo uniforme su tutta la lunghezza delle lamine. Le case produttrici di attrezzatura sciistica mettono a disposizione della propria clientela delle tabelle di riferimento per orientarsi nella scelta della lunghezza degli sci, considerando contemporaneamente tutti i parametri qui citati.

Altezza (cm)	Misura Sci Suggesta (cm)
122	100-110
127	110-120
132	120-130
137	125-135
142	130-140
147	135-145
152	140-155
158	145-165
163	150-170
168	155-175
173	160-180
178	165-185
183	170-185
188	175-193

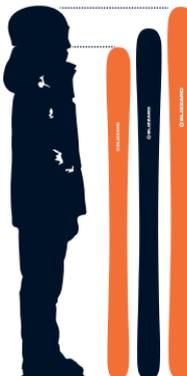


Figura 1.5: Tabella fornita da una azienda produttrice di sci che mette in relazione statura dello sciatore e lunghezza dello sci consigliata. [5]

Per quanto riguarda gli sci da gara invece è necessario effettuare una trattazione a parte. È importante sottolineare che questi sci sono progettati per garantire le massime prestazioni; le velocità e i carichi a cui sono sottoposti comportano un livello di sollecitazioni e urti molto elevato. Pertanto la forma geometrica e la composizione di tali sci è stata determinata nel tempo, attraverso numerosi studi ricavati tramite simulazioni e dall'esperienza stessa degli atleti, al fine di fornire allo sciatore un prodotto che gli permetta di spingersi al limite delle proprie prestazioni atletiche. Le quattro discipline principali dello sci alpino sono: discesa libera, supergigante, slalom gigante e slalom speciale. Ciascuna di queste specialità richiede lunghezze di sci differenti, che sono definite dalle normative FIS (Federazione Italiana Sport Invernali) e FIS (International Ski and Snowboard Federation). A seconda della categoria vengono definiti: lunghezza dello sci, larghezza sotto l'attacco dello sci, larghezza davanti all'attacco dello sci, raggio di curvatura minimo e spessore massimo delle piastre. Il margine di scelta della lunghezza dello sci per l'atleta risulta dunque ristretto in un intorno di pochi centimetri.

TABELLA MISURE MATERIALI GARE FIS 2018/2019		WC / WSC / OWG / EC / WJCH			
		DH	SG	GS	SL
Lunghezza sci minima TOLLERANZA +/- 1 cm	Femminile	210 cm.*	205 cm.*	188 cm.*	155 cm.
	Maschile	218 cm.*	210 cm.*	193 cm.*	165 cm.**
	Master Femminile	-	180 cm.	180/-5 cm.	155 cm.
	Master Maschile	-	185 cm.	185/-5 cm.	165 cm.
	U16 Femminile	-	183 cm.	Max 188 cm	130 cm.
	U16 Maschile	-	183 cm.	Max 188 cm	130 cm.
	U14 Femminile	-	-	Max 188 cm	130 cm.
	U14 Maschile	-	-	Max 188 cm	130 cm.
Larghezza sotto l'attacco dello sci	Femminile	<= 65 mm.	<= 65 mm.	<= 65 mm.	>= 63 mm.

Aggiornamento 14 marzo 2023

	Maschile	<= 65 mm.	<= 65 mm.	<= 65 mm.	>= 63 mm.
Larghezza davanti all'attacco dello sci	Femminile	<= 95 mm.	<= 95 mm.	<= 103 mm.	-
	Maschile	<= 95 mm.	<= 95 mm.	<= 98 mm.	-
Raggio minimo	Femminile	Min. 50 mt.	Min. 40 mt.	Min. 30 mt.	-
	Maschile	Min. 50 mt.	Min. 45 mt.	Min. 30 mt.	-
	Master Femminile	-	-	Min. 23 mt.	Min. 23 mt.
	Master Maschile	-	-	Min. 27 mt.	Min. 27 mt.
	U16 Femminile	-	Min. 30 mt.	Min. 17 mt.	-
	U16 Maschile	-	Min. 30 mt.	Min. 17 mt.	-
	U14 Femminile	-	-	Min. 17 mt.	-
	U14 Maschile	-	-	Min. 17 mt.	-
Piastrine (spessore massimo)	Femminile	50 mm.	50 mm.	50 mm.	50 mm.
	Maschile	50 mm.	50 mm.	50 mm.	50 mm.
	Master Femminile	50 mm.	50 mm.	50 mm.	50 mm.
	Master Maschile	50 mm.	50 mm.	50 mm.	50 mm.
	U16-14 Femminile	50 mm.	50 mm.	50 mm.	50 mm.
	U16-14 Maschile	50 mm.	50 mm.	50 mm.	50 mm.
Scarponi (spessore massimo)	Femminile	43 mm.	43 mm.	43 mm.	43 mm.
	Maschile	43 mm.	43 mm.	43 mm.	43 mm.
	Master Femminile	45 mm.	45 mm.	45 mm.	45 mm.
	Master Maschile	45 mm.	45 mm.	45 mm.	45 mm.

\* Tolleranza di - 5 cm. per gare FIS.

\*\* Tolleranza di - 10 cm. per la cat. U18 maschile.

Tabella 1.1: Tabella rappresentante le normative FIS relative ad alcuni parametri geometrici degli sci. [6]

Gli sci da discesa libera e supergigante raggiungono lunghezze di oltre 200 cm, ciò permette di raggiungere elevate velocità (fino ai 130 km/h) e garantisce un'ottima distribuzione delle vibrazioni. Poiché le traiettorie di curva sono molto ampie questi sci presentano bassissimo grado di sciancratura, con raggi di curvatura intorno ai 40 m. Gli sci da slalom gigante presentano lunghezze circa 15-20 cm inferiori rispetto a quelli da discesa e un grado di sciancratura leggermente superiore. Queste caratteristiche conferiscono allo sci un'ottima velocità di percorrenza e allo stesso tempo una maggiore flessibilità e dunque un minor raggio di curvatura. Gli sci da slalom speciale sono i più corti tra tutte le specialità con una lunghezza massima di 168 cm. Non sono progettati per raggiungere velocità elevate ma per effettuare curve strette con cambi di direzione rapidissimi. Pertanto presentano un notevole grado di sciancratura e, nonostante le dimensioni ridotte presentano una rigidità assai elevata rispetto, per esempio, a sci allround di lunghezza maggiore.



Lunghezza (cm)	Spatola (mm)	Centro (mm)	Coda (mm)	Raggio (m)
202	95	65	80	40,5
207	95	66	81	42,0

Figura 1.6: Immagine di un paio di sci Head WRC e-DH Rebel con relativa tabella di misure [7]



Lunghezza (cm)	Spatola (mm)	Centro (mm)	Coda (mm)	Raggio (m)
183	99	65	81	30,5
188	101	66	82	30,5
193	102	66	83	30,0

Figura 1.7: Immagine di un paio di sci Head WRC e-GS Rebel FIS con relativa tabella di misure [7]



Lunghezza (cm)	Spatola (mm)	Centro (mm)	Coda (mm)	Raggio (m)
151	111	65	96	11,9
156	114	66	100	12,4
158	114	66	104	12,0
165	118	67	104	12,3
168	119	68	103	12,8

Figura 1.8: Immagine di un paio di sci Head WRC e-SL Rebel FIS con relativa tabella di misure [7]



# CAPITOLO 2

## Costruzione e materiali

### 2.1 Costruzione di uno sci

Il modo in cui i materiali sono combinati e assemblati, insieme ai parametri geometrici e ai materiali utilizzati, rappresenta una delle principali caratteristiche che determina il comportamento dello sci. Si è già evidenziato in precedenza come la struttura e composizione degli sci si differenzia in base all'utilizzo; saranno quindi parametri quali rigidità flessionale/torsionale, resistenza e peso a determinare il processo di assemblaggio dello sci. Al giorno d'oggi la tecnica costruttiva ha raggiunto livelli molto alti e si caratterizza in due tipologie. Gli sci destinati all'agonismo sono realizzati utilizzando varie e complicate tecniche per la disposizione del legno e degli altri materiali, la cosiddetta "costruzione a sandwich". Per quanto riguarda gli sci più economici, invece, si ricorre alla costruzione monoscocca o "cap", ossia una tecnica che consiste nell'iniezione di schiume e materiali simili intorno al core.

La «costruzione a sandwich» consiste nel sovrapporre in modo stratificato i materiali che si vogliono utilizzare nella realizzazione dello sci per poi pressarli e incollarli tramite particolari macchinari. Il tipo di materiali utilizzati, il loro spessore e la loro disposizione all'interno della stratificazione determina le caratteristiche meccaniche dello sci. Questa costruzione risulta essere la più performante ma allo stesso tempo la più costosa, dal momento che viene realizzata in parte a mano e richiede molte lavorazioni separate. Il metodo "sandwich" garantisce elevati livelli di rigidità assiale e torsionale fornendo un'ottima stabilità e controllo anche alle alte velocità. Tuttavia produce sci i cui costi ingenti e le elevate caratteristiche meccaniche li rende adatti principalmente alla nicchia rappresentata da sciatori esperti e agonisti. I materiali utilizzati possiedono elevate prestazioni meccaniche e sono disposti nelle zone periferiche dello sci, separati da un'anima in legno. Ciò è dovuto al fatto che le aree più esterne della sezione trasversale sono quelle che influenzano maggiormente le proprietà meccaniche degli sci e quindi i materiali più rigidi e resistenti sono collocati qui dove possono agire più efficacemente ed essere più utili. Viceversa, dal momento che l'anima non ha un ruolo importante in termini di carichi di flessione e torsione, è spesso realizzata con materiali leggeri e spesso la sua costruzione è orientata allo smorzamento delle vibrazioni. La combinazione di alluminio, materiale composito con fibre ad alto modulo e legno nel core costituisce il migliore mix di materiali per conferire allo sci elevate prestazioni e buon controllo. Vediamo più nel dettaglio la stratificazione generica di uno sci realizzato con «costruzione a sandwich»:

- Copertura esterna (4): in inglese "topsheet" è lo strato più esterno dello sci. Viene realizzato in materiale polimerico e ha il compito di proteggere lo sci da eventuali urti e renderlo impermeabile all'acqua e all'umidità. È la parte più visibile dello sci e viene pertanto decorato con scritte e grafiche;
- Alluminio (3): materiale strutturale posto a ridosso della copertura esterna in forma di lamine. Si utilizza una particolare lega di alluminio chiamata Titanal;
- Materiale composito (5): generalmente sono presenti due strati in materiale composito. Vengono utilizzati compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica con fibre di vetro, basalto, carbonio, boro, kevlar. Possono esserci più di due strati, con fibre di diverso tipo e con diverse disposizioni. Come l'alluminio hanno ruolo strutturale e influenzano le caratteristiche a flessione e torsione dello sci;
- Legno (1): utilizzato per il core, ossia la strato intermedio principale e più spesso. Questo materiale offre una naturale reattività alle sollecitazioni che nessun materiale sintetico è in grado di offrire. A seconda delle caratteristiche che si vogliono ottenere dallo sci possono essere utilizzate varie tipologie di legno: legni morbidi come faggio e pioppo, legni duri come l'abete rosso. All'interno del core queste tipologie di legno vengono incollate fra loro con proporzioni e spessori differenti;
- Soletta (7): parte dello sci a diretto contatto con la neve; viene realizzata principalmente in polietilene con l'aggiunta di grafite, che solitamente costituisce circa il 40-50% della composizione. L'inserimento di grafite nella soletta offre numerosi vantaggi, tra cui un miglior scivolamento dello sci sulla neve. La grafite riduce l'attrito tra la soletta e la superficie della neve, consentendo una maggiore velocità e facilitando il movimento sugli sci.

Nei casi degli sci da gara, una particolare attenzione viene dedicata alla parte laterale della soletta che si trova in corrispondenza delle lamine. In questo caso, si utilizza un polietilene più duro per garantire una maggiore resistenza e durata, poiché questa zona è soggetta a un maggiore stress e usura durante le competizioni.

- Lamina (6): è la parte che deve garantire la presa dello sci sul manto nevoso nella fase di curva; il materiale utilizzato è un acciaio che sia allo stesso tempo resistente all'usura e deformabile;
- Fianchetti (2): in inglese “sidewalls”, hanno il ruolo di proteggere il core da urti e renderlo impermeabile. Inoltre hanno la funzione di trasmettere la forza impressa dallo sciatore sulla lamina. Per questo motivo vengono realizzati con particolari tecnopolimeri in grado di garantire rigidità ma allo stesso tempo elasticità e resistenza agli urti.

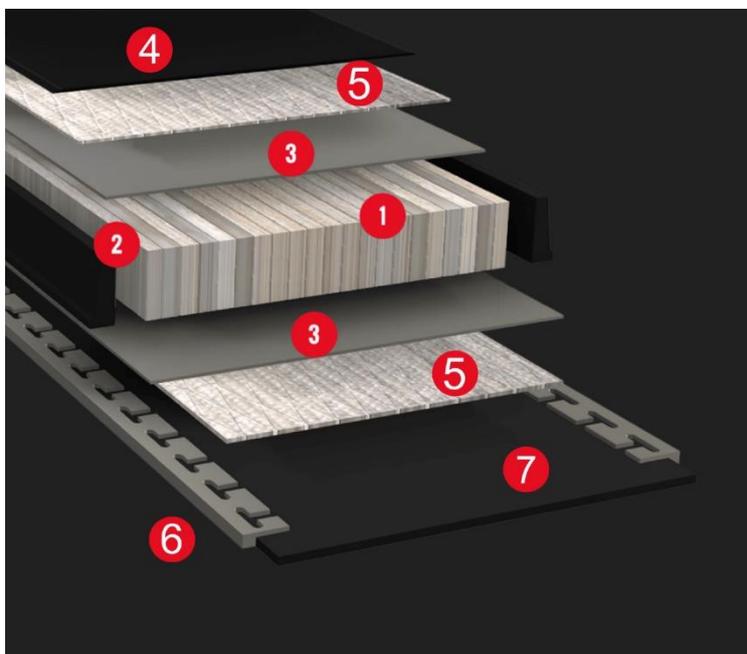


Figura 2.1: Raffigurazione della stratificazione “sandwich” di uno sci da gara [8]

La «costruzione cap» è una soluzione introdotta da alcuni costruttori a partire dagli anni 90 e tutt'ora largamente impiegata soprattutto per la produzione di sci commerciali con cuore schiumoso. Questa costruzione nasce dall'esigenza di realizzare sci leggeri e flessibili, ma con una buona rigidità torsionale, in grado di offrire una ottima manovrabilità per i principianti. Si ottengono sci caratterizzati da valori di rigidità flessionale inferiori rispetto a una struttura tradizionale sandwich, ma comunque in grado di garantire un adeguato livello di stabilità torsionale. Questa maneggevolezza è una caratteristica apprezzabile nel caso di uno sciatore inesperto, anche perché è più probabile che perdoni errori tecnici durante la discesa. Tuttavia, la eccessiva flessibilità potrebbe dare brutte sensazioni a uno sciatore più abile che cerca di eseguire curve ad alta velocità. Una bassa rigidità significa grandi spostamenti e deformazioni, che possono portare a forti vibrazioni e a una distribuzione inefficiente del carico sotto la suola, mettendo a rischio la stabilità e il controllo dello sciatore. La tecnica di costruzione consiste nel ricoprire il cuore, realizzato in materiale schiumoso o legno rinforzato con lastre di alluminio, con una sorta di “conchiglia” in materiale fibro-rinforzato, generalmente fibra di vetro. La copertura esterna racchiude tutta la parte superiore dello sci fino alle lamine e agisce come una “scatola di torsione” garantendo alta rigidità torsionale, ma allo stesso tempo un basso incremento di rigidità flessionale dovuto all'assenza dei fianchetti. La semplicità costruttiva, l'economicità dei materiali utilizzati, e la facilità di utilizzo dello sci sono sicuramente i punti di forza di questa soluzione, che permette quindi la produzione di sci in grandi quantità e a basso prezzo. Tutto ciò va necessariamente a discapito della prestazione.

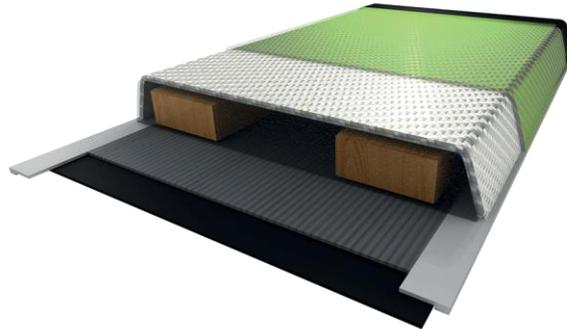


Figura 2.2: Rappresentazione della stratificazione di uno sci realizzato con costruzione monoscocca o “cap” [9]

## 2.2 Stratificazione di uno sci

Nella costruzione sandwich è prevista la sovrapposizione stratificata dei materiali desiderati e la loro successiva pressatura e incollaggio mediante macchinari specifici. La scelta dei materiali, il loro spessore e la disposizione all'interno dello strato stratificato influenzano le caratteristiche meccaniche dello sci. Si analizzano ora nel dettaglio le tipologie di materiali che vengono utilizzati per la realizzazione degli strati principali che compongono uno sci:

- Titanal:

Leghe di alluminio ad alta resistenza ampiamente utilizzate nella costruzione di attrezzature sciistiche di alto livello per la realizzazione degli strati strutturali che compongono lo sci. L'impiego di tale materiale è dovuto alle sue caratteristiche di rigidità, peso ridotto al minimo ed eccezionale resilienza, in particolare contro gli impatti, offrendo un vantaggio rispetto ai composti in fibra. Questo materiale viene utilizzato per le scocche degli sci sandwich e costituisce sia lo strato superiore che lo strato inferiore dello sci. I gusci resistono a carichi elevati di compressione e tensione senza deformazioni plastiche, soddisfacendo le esigenze di progettazione di sci high-tech con peso ridotto, elevata resistenza meccanica, resistenza alla deformazione, durata ed eccellenti caratteristiche di lavorazione. Il Titanal appartiene al gruppo di leghe 7xxx (AlZn) e il suo processo di produzione è complesso. La lega richiede una composizione chimica specifica e parametri di colata precisi, compreso un processo EMC metallurgicamente ideale. L'uso della colata elettromagnetica consente di ottenere lingotti con bassa macro-segregazione, riducendo le cricche sui bordi durante la laminazione. I trattamenti termomeccanici, il trattamento termico e la tempra contribuiscono a ottenere lastre di Titanal sottili, con uno spessore di soli 0,3 mm, che non presentano graffi e presentano eccellenti proprietà di planarità. Gli spessori del laminato vanno da 0,3 a 1,2 mm per i gusci dell'industria sciistica.

Tensile strength and elongation limits for various alloys and tempers		0	100	200	300	400	500	600
Titanal®	Tensile strength Rm [MPa]							
	Yield strength Rp0.2 [MPa]							
7075	Tensile strength Rm [MPa]							
	Yield strength Rp0.2 [MPa]							
7020	Tensile strength Rm [MPa]							
	Yield strength Rp0.2 [MPa]							

Soft temper
  T3/T4
  T4
  T6
  T7X

Tabella 2.1: Valori di tensione allungamento limite per leghe Titanal, 7075, 7020. [10]

- Materiale composito:

Gli strati di Titanal sono ricoperti da fogli di materiale composito. I materiali di vetro, carbonio e basalto vengono impregnati con resine epossidiche di alta qualità per creare compositi attraverso un processo continuo. Nonostante l'alto contenuto di fibre, viene raggiunta una penetrazione ottimale grazie a installazioni speciali. Per ottenere combinazioni ottimali di rigidità e proprietà adesive, vengono utilizzati laminati con speciali finiture superficiali in base allo spessore. Questi laminati presentano combinazioni di tessuti compositi e laminati a fibre unidirezionali. I laminati unidirezionali garantiscono massima stabilità e rigidità nella direzione longitudinale, mentre i prodotti in vetro, carbonio e basalto offrono diverse opzioni di combinazione di fibre per soddisfare le esigenze richieste dalla tipologia di sci. I compositi in resina epossidica rinforzati con fibre di alta qualità offrono proprietà uniche ottimizzate per l'applicazione richiesta. Tra queste caratteristiche rientrano il comportamento estensivo di deformazione, l'alta stabilità e rigidità nella direzione di sollecitazione, la resilienza dinamica elevata, il basso coefficiente di dilatazione termica, l'elevata durabilità e resistenza alla corrosione, oltre alle possibilità di combinazione personalizzate di matrice e fibre. Generalmente si utilizzano due fogli di laminato, posizionati tra le lamine dello sci. Le fibre di vetro in questi strati sono inclinate di zero gradi rispetto alla lunghezza dello sci. Lo spessore dei laminati varia da 0,25 mm a 0,8 mm a seconda dell'applicazione.

Eigenschaften   Properties Einheit   Unit Norm   Standard	IG F14/F14 2B*	IG F27/F27 2CF*	IG F21/R/F21 2G*	IG F21/F21 2G*	Toleranz   Tolerance
Zugfestigkeit längs   Tensile strength longit. [MPa] PA QW 005	600	480	1090	750	-12,5% +k.A.
Zugfestigkeit quer   Tensile strength transv. [MPa] PA QW 005	80	90	-	30	-12,5% +k.A.
Zug-E-Modul längs   Elastic modulus longit. [GPa] PA QW 005	25	23	37	30	±15%
Glührückstand   Ash content [Gew. %] PA QW 004	70	70	72	72	±3%*
Dicke   Thickness [mm]	0,75	0,65	1,2	0,8	±0,08mm (2G: ±0,05mm)
Max. Breite   Max. width [mm]	630				

Tabella 2.2: Alcune caratteristiche fisiche essenziali per i laminati in vetro composito. [11]

- Legno:

I nuclei in legno presentano numerosi vantaggi grazie alla loro combinazione ottimale di peso, flessibilità, stabilità e torsione. In particolare, essi risultano più leggeri rispetto ai nuclei in multistrato e offrono la possibilità di combinare diversi tipi di legno al fine di ottenere caratteristiche specifiche. Inoltre, l'applicazione dei nuclei in legno è estremamente flessibile, consentendo l'utilizzo di schiuma poliuretanic, nuclei a nido d'ape e strati di carbonio.

I nuclei in legno utilizzati nella realizzazione di sci sono costituiti da lamelle di legno massiccio, con una larghezza approssimativa di 20 mm, ma possono essere realizzati anche utilizzando lamelle di dimensioni inferiori o superiori, a seconda delle specifiche esigenze. Le diverse lamelle di legno sono incastrate a coda di rondine tramite ausilio di colla PVAC. I tipi di legno impiegati comprendono pioppo, faggio, frassino e legni esotici come paulonia, bambù e balsa.

La selezione del legno avviene considerando diverse classificazioni di peso. Ad esempio, il pioppo può presentare variazioni di densità comprese tra 330 e 500 kg/m<sup>3</sup>, le quali possono influire sulle proprietà fisiche dello sci. Al fine di minimizzare queste variazioni, il legno viene suddiviso in diverse categorie mediante un sistema di selezione automatica basato sul peso. Ciò consente di ottenere nuclei con proprietà estremamente uniformi e con un peso molto ridotto, offrendo così elevate prestazioni e una grande affidabilità nell'utilizzo.

Eigenschaften   Properties Einheit   Unit	Pappel   Poplar	Buche   Beech	Esche   Ash	Fichte   Spruce	Balsa   Balsa	Paulownia   Paulownia
Gewicht   Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Ø 420	Ø 650	Ø 680	Ø 450	Ø 180	Ø 270
Härte   Hardness (N/mm <sup>2</sup> )	H BI = 24...37 H BI = 10...15	H BI = 71...89 H BI = 29...36	H BI = 36...85...100 H BI = 37...41	H BI = 32 H BI = 12	H BI = 3...7...12 H BI = 2...3	
Drehfestigkeit   Torsional strength (N/mm <sup>2</sup> )		21,5...26,3...34,0	13,8...18,6...23,5	5,3...9,0...14,0		
Darrdichte   Dry density (kg/m <sup>3</sup> )	370...410...500	500...790...820	410...650...820	300...430...640	90...260	200...320
Zugfestigkeit   Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	43...77...110	47...135...200	70...165...293	21...90...245	20...40	64...80
Druckfestigkeit   Compressive str. (N/mm <sup>2</sup> )	26...35...56	54...82...99	23...52...80	33...50...79	5...15	25...28
Biegefestigkeit   Flexural strength (N/mm <sup>2</sup> )	43...60...94	58...160...200	58...105...210	49...78...136	15...23	31...40
E-Modul   E-Modulus (N/mm <sup>2</sup> )	4000...8800...11700	7000...16200...17700	4400...13400...18100	7300...11000...21400	1130...2600...6000	5000
Scherfestigkeit   Shear strength (N/mm <sup>2</sup> )	4,0...5,0...8,0	8,5...16,0	9,0...12,0...14,6	4,0...6,7...12,0	1,1...2,0	5,0...6,0

Tabella 2.3: Tipologie di legno utilizzate per la realizzazione del core e alcune loro caratteristiche fisiche fondamentali. [12]

- Gomma:

Gli strati di gomma utilizzati nella costruzione sandwich degli sci rivestono un ruolo fondamentale nell'incidere sulle loro caratteristiche e prestazioni. Posizionati tra il nucleo centrale dello sci e gli strati esterni superiore e inferiore, offrono una serie di vantaggi che influenzano direttamente le performance sulle piste.

Il materiale impiegato nella realizzazione dei fogli è la gomma A14689 vulcanizzata, appositamente progettata per garantire un'eccezionale performance sugli sci. Questa gomma subisce un processo di vulcanizzazione che la rende estremamente robusta e resistente all'usura, permettendo agli strati di gomma di sopportare le sollecitazioni e gli impatti derivanti dalla pratica dello sci. Ciò si traduce in una maggiore longevità e costanza delle prestazioni nel tempo. Inoltre, la gomma A14689 presenta un'ottima adesività, semplificando il processo di incollaggio durante la costruzione degli sci a sandwich. Questa caratteristica garantisce un'aderenza perfetta tra gli strati di gomma e gli altri componenti dello sci, creando una struttura solida e stabile. L'alta adesione della gomma A14689 è fondamentale per evitare delaminazioni o distacchi indesiderati degli strati durante l'uso degli sci.

La flessibilità è un'altra caratteristica di rilievo della gomma A14689. Questo tipo di gomma offre un equilibrio ideale tra rigidità e flessibilità, consentendo agli sci di reagire in modo rapido e preciso alle sollecitazioni dello sciatore. Inoltre, grazie alla sua capacità di assorbire le vibrazioni, gli strati di gomma riducono gli effetti negative delle asperità sulla superficie della neve, garantendo una guida più confortevole e riducendo l'affaticamento delle gambe dello sciatore.

quality:	A1468	
density:	1,25 g/cm <sup>3</sup>	
hardness:	70 Shore A	
tensile strength:	60 daN/cm <sup>2</sup>	
elongation:	150 %	
delaminating strength	min. 120 daN/5cm at 0,13mm thickness	
	min. 140 daN/5cm at thicknesses more than 0,13 mm	
standard thicknesses and tolerances (mm):	0,13, 0,20 mm	-0,03/+0,1
	0,30 , 0,38 mm	+/-0,08
	0,50, 0,60, 0,80, 1,0, 1,10,	+/-0,15
	1,50, 2,10 mm	
standard width and tolerances (mm):	10 up to 100 mm	+/-1,0
	100 until 1220 mm	+/-2,0
storage:	dry without dust and UV max. 12 month	
outdoor use:	rubber foil is not suitable for permanent outdoor use	

Tabella 2.4: Caratteristiche fisiche della gomma A14689 utilizzata per la realizzazione degli strati. [13]

• ABS:

Le plastiche ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) sono un tipo di materiale termoplastico ampiamente nel campo dell'industria degli sci. Si tratta di una miscela di tre componenti principali: l'acrylonitrile, il butadiene e il polistirene. Le plastiche ABS sono apprezzate per le loro proprietà meccaniche e termiche, che le rendono un materiale ideale per la realizzazione dei sidewalls degli sci. Le fondamentali caratteristiche sono:

1. Resistenza agli urti: L'ABS è noto per la sua elevata resistenza agli urti, che lo rende ideale per proteggere gli sci dai danni causati da colpi e urti durante la pratica dello sport in montagna.
2. Durevolezza: La plastiche ABS è resistente all'usura e all'abrasione, il che significa che gli sidewalls realizzati con questo materiale possono durare a lungo anche in condizioni di utilizzo intensivo.
3. Flessibilità: L'ABS è abbastanza flessibile, il che permette agli sidewalls degli sci di assorbire parte dello stress e delle forze durante la guida su terreni accidentati o durante manovre più aggressive.
4. Buone proprietà termiche: L'ABS mantiene le sue proprietà meccaniche anche a temperature relativamente basse, il che lo rende adatto per l'uso sugli sci, che spesso vengono utilizzati in ambienti freddi e nevosi.
5. Facilità di lavorazione: L'ABS può essere facilmente stampato tramite stampaggio ad iniezione, il che consente di produrre sidewalls degli sci in modo efficiente ed economico.

Tuttavia, è importante notare che l'utilizzo delle plastiche ABS nei sidewalls degli sci può variare in base al tipo di sci e a seconda del marchio. È possibile utilizzare altre tipologie di plastica o combinazioni di materiali per ottenere caratteristiche specifiche di resistenza, flessibilità o leggerezza. Per esempio alcuni produttori di sci hanno iniziato a utilizzare il bamboo, le cui particolari caratteristiche offre un'alternativa ai tradizionali materiali sintetici.

• C60E:

L'acciaio C60E è un tipo di acciaio al carbonio, appartenente alla famiglia degli acciai bonificati. Il suffisso "E" indica che è un acciaio bonificato, che è stato sottoposto a un trattamento termico di bonifica per ottenere proprietà meccaniche migliorate.

Questo tipo di acciaio è ideale per realizzare le lamine degli sci a causa delle sue proprietà specifiche:

1. Resistenza: L'acciaio C60E ha una buona resistenza meccanica, il che lo rende adatto a sopportare le sollecitazioni e le pressioni cui sono sottoposte le lamine durante l'uso dello sci.
2. Tenacità: L'acciaio C60E ha una buona tenacità, il che significa che può assorbire energia senza rompersi facilmente. Questa proprietà è importante per garantire che le lamine dello sci siano in grado di assorbire urti e impatti senza subire danni permanenti.
3. Durezza: Grazie al trattamento termico di bonifica, l'acciaio C60E ottiene una buona durezza, che contribuisce alla resistenza all'usura e all'abrasione delle lamine.
4. Flessibilità: Pur essendo resistente, l'acciaio C60E presenta anche una certa flessibilità, il che è importante per consentire alle lamine di adattarsi alle diverse superfici e curve durante la pratica dello sci.

	Modulo elastico [N/m <sup>2</sup> ]	Coeff. di Poisson	Densità di massa [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistenza alla trazione [N/m <sup>2</sup> ]	Snervamento [N/m <sup>2</sup> ]
C60E	2.1e+10	0.29	7850	356900674.5	710000000

Tabella 2.5: Caratteristiche fisiche dell'acciaio C60E utilizzato per la realizzazione degli strati.

## Capitolo 3

### Visita a Stöckli

La fabbrica di sci Stöckli è una delle aziende più rinomate e prestigiose nel settore degli sci, con una storia che risale al lontano 1935. Situata a Malers, in Svizzera, Stöckli ha costruito la sua reputazione sull'artigianalità tradizionale e l'attenzione ai dettagli nella produzione di sci di alta qualità. La realizzazione di uno sci Stöckli è un processo che unisce abilità artigianali tramandate di generazione in generazione con l'impiego delle più avanzate tecnologie. Ogni paio di sci viene realizzato manualmente da esperti artigiani altamente qualificati, che utilizzano materiali pregiati e innovativi. Questa combinazione di materiali di alta qualità conferisce agli sci Stöckli una resistenza e prestazioni superiori ai concorrenti. La fabbrica di Stöckli gestisce l'intero processo di produzione internamente, dalla progettazione alla realizzazione degli sci. Questo controllo diretto consente all'azienda di mantenere elevati standard di qualità e di garantire che ogni paio di sci che esce dalla fabbrica soddisfi le aspettative degli sciatori più esigenti. Stöckli è famosa anche per la sua costante ricerca di innovazione. L'azienda investe in ricerca e sviluppo per introdurre nuove tecnologie negli sci, migliorando costantemente le loro prestazioni e la loro resistenza. Gli ingegneri di Stöckli come Mathieu Fauve lavorano a stretto contatto con sciatori professionisti e atleti di Coppa del Mondo per testare e perfezionare i loro prodotti, garantendo che ogni sci Stöckli sia all'avanguardia in termini di prestazioni e design. La qualità del marchio Stöckli è ampiamente riconosciuta nel settore. Gli sci Stöckli sono stati premiati con numerosi riconoscimenti per la loro eccellenza, sia per le prestazioni sulle piste che per l'innovazione tecnologica. Atleti di sci di fama mondiale come Marco Odermatt hanno scelto gli sci Stöckli per le competizioni di alto livello, dimostrando la fiducia che ripongono nella qualità e nelle prestazioni degli sci prodotti da questa fabbrica svizzera.

Grazie alla disponibilità del personale di Stöckli è stato possibile visitare la loro fabbrica di sci. Tale visita, è stata fondamentale nello sviluppo di questa tesi in quanto ha fornito innanzitutto il materiale necessario per effettuare le analisi analitiche e numeriche, e in secondo luogo ha permesso di analizzare a fondo il processo di progettazione e produzione di uno sci. L'opportunità di entrare direttamente in contatto con la catena produttiva degli sci ha permesso di acquisire una consapevolezza approfondita riguardo allo studio ingegneristico che sottende la creazione di un oggetto come lo sci. Questa esperienza ha dimostrato quanto sia complesso e sofisticato il processo di progettazione di uno sci, spogliando l'apparenza iniziale di semplicità e banalità che potrebbe trasmettere.

#### 3.1 Catena produttiva di uno sci

Si riporta di seguito un breve riassunto della catena produttiva degli sci nella fabbrica di Stöckli.

- **Progettazione:**

Le case produttrici di sci come Stöckli, sono costantemente impegnate nella ricerca e nello sviluppo. Questo implica un costante lavoro di ricerca nel campo dei materiali e di nuove tecnologie innovative. Lo sviluppo di uno sci richiede diversi mesi e inizia con una bozza iniziale realizzata in laboratorio. Qui, i tecnici e gli ingegneri sperimentano la coesione e le proprietà dei materiali, creando piccoli modelli di sci. Utilizzando strumenti di misura elettronici, vengono accuratamente valutate le dimensioni geometriche dei prototipi, la rugosità delle superfici e altre caratteristiche. Sono inoltre condotte prove di carico per misurare la risposta elastica dello sci, determinare i limiti di carico e osservarne il comportamento durante le vibrazioni. Ogni modello di sci segue un processo di sviluppo e ricerca specifico. Ad esempio, gli sci All-Mountain sono progettati per adattarsi a diverse condizioni di neve, mentre gli sci da gara vengono progettati tenendo conto del tipo specifico di neve in cui saranno utilizzati. Una parte fondamentale del processo di sviluppo degli sci proviene dai test sul campo, eseguiti da atleti professionisti, il cui feedback definisce la direzione dello sviluppo e rappresenta l'elemento guida della progettazione.

- **Produzione:**

La produzione di uno sci Stöckli richiede un periodo di tempo che può estendersi fino a quattro settimane. Durante questo periodo, si susseguono numerosi processi che contribuiscono alla realizzazione del prodotto finale. La produzione degli sci è un'operazione complessa che richiede una precisa attenzione ai dettagli e una combinazione di lavoro manuale e l'uso di macchinari avanzati.

- Selezione materiali:

I materiali utilizzati nella produzione degli sci sono selezionati in base alla tipologia specifica di sci che si desidera realizzare.

Il core può essere realizzato utilizzando diversi tipi di legno, con variazioni nel numero di strati, nello spessore e nelle caratteristiche come l'elasticità e il peso. La scelta del core appropriato è essenziale per ottenere le prestazioni desiderate dello sci, come la reattività e la stabilità.

Inoltre, il tipo di lamina utilizzata può variare in base all'applicazione specifica dello sci. Le lamine, realizzate in acciaio di alta qualità, hanno un impatto sulla tenuta del bordo, la trazione e la stabilità dello sci sulle piste. A seconda delle esigenze particolari, possono essere utilizzate diverse tipologie di lamine.

Analogamente, esistono diverse tipologie di fibre di vetro disponibili, che possono variare a seconda del tipo di matrice e dei materiali secondari utilizzati. Le fibre di vetro vengono utilizzate per rinforzare lo sci, apportando resistenza, elasticità e prestazioni specifiche.

- Taglio dei materiali:

Dopo la selezione dei materiali appropriati, il processo di produzione degli sci procede con la fase di taglio per conferire loro la forma specifica. Utilizzando lo stesso macchinario, ma cambiando il tipo di tagliente o utensile, si procede al taglio del titanal, del poliestere, della fibra di vetro e della gomma.

Il core in legno viene inizialmente modellato con una forma rettangolare a parallelepipedo. Nella fase successiva, questo viene tagliato in direzione longitudinale per conferirgli la forma sciancrata desiderata. Dopo questa operazione, i fianchetti vengono incollati al core utilizzando una colla appropriata.

Infine, il core viene fatto scorrere in un macchinario che modifica localmente lo spessore utilizzando una fresa. La parte centrale del pezzo rimane la più spessa, in quanto è in questa zona che si verifica la maggiore deformazione dello sci durante la sua flessione. Man mano che ci si sposta verso la punta e la coda dello sci, lo spessore diminuisce gradualmente. Questo processo consente di ottenere una distribuzione dello spessore ottimale per le prestazioni desiderate dello sci.



Figura 3.1: Core in legno dopo operazione di taglio e incollaggio dei fianchetti.

- Rivestimento con colla:

Gli strati che compongono lo sci vengono rivestiti con due strati di colla, uno liquido e uno solido. Lo strato liquido di colla viene applicato sulla superficie degli strati dello sci. Lo strato solido consiste in una polvere che aderisce ai vari strati, facilitando l'assemblaggio e conferendo una maggiore coesione agli strati stessi, oltre a fornire una migliore capacità di assorbimento delle vibrazioni allo sci.

Durante la fase di pressatura, che avviene ad una temperatura di circa 140°C e a una pressione di 10 bar, queste speciali colle si sciolgono creando un legame solido tra gli strati che compongono lo sci.

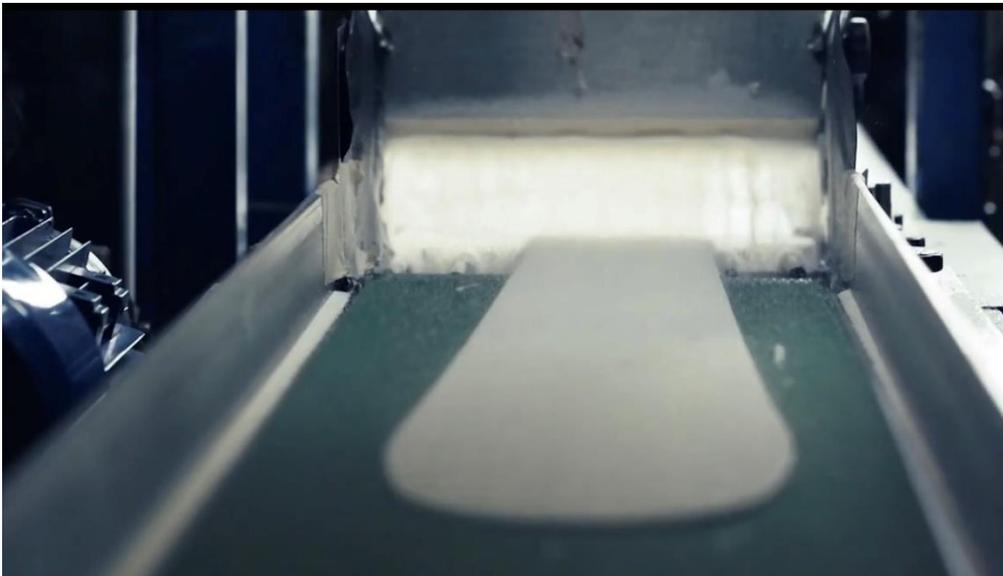


Figura 3.2: Processo di rivestimento dello strato di titanale con colla solida. [14]

- Colorazione:

La grafica che viene applicata sulla superficie dello sci può essere realizzata attraverso due diverse metodologie:

1. Sublimazione: In questo processo, lo strato di titanale dello sci viene rivestito con un polimero in forma di polvere. Successivamente, viene stampata la grafica desiderata su carta. I due strati vengono quindi posti in una pressa riscaldata, dove il colore della stampa viene trasferito alle particelle di polimero. Questo metodo permette di ottenere una grafica lucida e brillante direttamente sullo strato di alluminio. È possibile realizzare una vasta gamma di grafiche e utilizzare quasi tutti i colori, ad eccezione dei colori neon. Tuttavia, è importante notare che questa tipologia di grafica risulta sensibile ai graffi.
2. Top sheet: Questo metodo prevede l'applicazione di uno strato protettivo di plastica colorata sulla parte superiore dello sci. La plastica può essere verniciata in vari colori. Tuttavia, ogni strato di colore richiede un tempo di asciugatura di 24 ore. Di conseguenza, la gamma di colori disponibili di solito non supera le 5 tonalità.

Entrambi i metodi offrono la possibilità di personalizzare l'aspetto dello sci, consentendo una vasta scelta di grafiche e colori. Tuttavia, è importante considerare i vantaggi e le limitazioni di ciascun approccio al fine di ottenere il risultato desiderato.

- Assemblaggio:

Dopo aver preparato i vari strati che andranno a comporre lo sci si procede con la fase di assemblaggio. Durante questa fase, gli addetti si occupano di sovrapporre i diversi strati di materiale che verranno poi uniti nella pressa. Questo passaggio riveste un'importanza fondamentale, poiché un'errata disposizione dei fogli potrebbe compromettere la qualità dello sci. Generalmente viene dedicato un tempo medio di circa 5 minuti per completare l'assemblaggio di ciascuno sci.



Figura 3.3: Processo di assemblaggio dello sci eseguito da un operatore. [14]

- Pressaggio:

Dopo aver impilato gli strati, essi vengono posizionati all'interno di uno stampo in acciaio. Questi stampi variano a seconda del tipo di sci e della sua lunghezza, con un'ampia gamma di opzioni disponibili (fino a 140 tipologie di stampi). Gli stampi presentano una forma curva che conferisce allo sci la caratteristica del camber. Ai lati, gli stampi sono aperti per consentire la fuoriuscita della colla durante il processo di pressatura. Tuttavia, questa configurazione limita l'uso di termoplastiche, poiché potrebbero fuoriuscire dallo stampo.

Successivamente, lo stampo viene inserito in una pressa. Questa viene riscaldata a una temperatura di 140°C, permettendo alla colla di sciogliersi, e utilizza una pressione di 2600 MPa per unire gli strati tra loro. Questo processo richiede in genere circa 25 minuti e permette di lavorare contemporaneamente 4 sci.

È importante notare che gli sci ottenuti dalla stessa pressatura non sempre possono essere accoppiati direttamente, poiché la pressa non riesce a garantire un grado di camber preciso a ciascuno di essi. Pertanto, l'accoppiamento degli sci avviene in una fase successiva, dove vengono selezionati e abbinati in base alle loro caratteristiche e al camber presentato.



Figura 3.4: Pressa utilizzata per la compattazione e l'incollaggio dei vari strati dello sci. [14]

- Prima finitura:

Dopo essere stato pressato, lo sci risultante è ancora in uno stato grezzo e richiede una fase di rifinitura utilizzando appositi macchinari. Inizialmente, si procede alla rimozione della colla che fuoriesce dallo stampo, compito affidato agli addetti che utilizzano una fresa con un utensile in pietra.

- Appaiamento sci:

Gli sci vengono sottoposti a un controllo da parte degli ispettori, i quali li selezionano in base al grado di camber. Grazie alla presenza del titanio, il camber degli sci può essere regolato mediante appositi sistemi di leve e presse. Successivamente, viene effettuata una verifica finale che consiste nell'accoppiare gli sci alla soletta e verificare che le due superfici si allineino perfettamente.



Figura 3.5: Operazione di verifica dell'appaiamento di due sci in base al camber. [14]

- Seconda finitura:

Si procede quindi con la fase di rifinitura successiva. Gli sci vengono posizionati all'interno di una macchina in cui la soletta e le lamine vengono levigate utilizzando rulli di pietra e un liquido refrigerante. Inoltre, i fianchetti vengono sottoposti a un processo di laminazione per ottenere una superficie inclinata. Questo processo viene ripetuto per un totale di 4 volte.



Figura 3.6: Operazione di finitura delle lamine dello sci.

- Controllo finale

Dopo le fasi di lavorazione, lo sci viene sottoposto alle ultime modifiche e si presenta pronto per essere immagazzinato o venduto. Le lamine vengono sottoposte a un'ulteriore processo di laminazione per rimuovere eventuali residui del filo e su di esse viene applicato un prodotto antiruggine per preservarne la qualità nel tempo. Successivamente, viene utilizzato un laser per applicare il numero seriale sulla coda dello sci, garantendo così l'identificazione univoca del prodotto. Infine, viene applicata una componente protettiva in gomma sulla punta dello sci. Gli ispettori eseguono un controllo per verificare che lo sci non presenti difetti strutturali o grafici evidenti. Infine, lo sci viene adeguatamente immagazzinato.

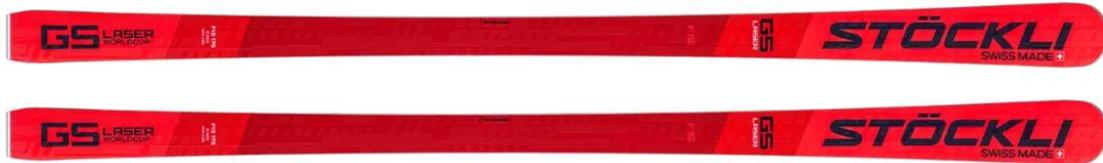


Figura 3.7: Sci ottenuto al termine del processo di produzione. In questo caso si tratta di un Laser GS Fis. [14]

# CAPITOLO 4

## Prime analisi

In questo capitolo si analizza il comportamento meccanico dello sci in seguito all'applicazione di carichi simulanti il peso impresso da uno sciatore. Questa analisi è contemporaneamente sperimentale, analitica e numerica: i dati ricavati dalle prove fisiche vengono confrontati con quelli ottenuti tramite metodi di calcolo analitici e numerici. L'analisi analitica fa riferimento alla teoria della meccanica dei solidi e viene effettuata tramite calcolatrice, quella numerica fa uso di strumenti di calcolo avanzati come Solidworks Simulation. L'approccio seguito consiste nel riferirsi inizialmente ad una trattazione semplificata del problema per poi complicare gradualmente lo studio e avvicinarsi al caso reale.

### 4.1 Analisi sperimentale

La prima parte dell'analisi è quella sperimentale. Si è innanzitutto effettuata una misura di tutti i parametri geometrici dello sci. Attraverso l'ausilio di strumenti di misura quali metro e calibro ventesimale si sono riportati i valori numerici di spessore e larghezza dello sci per diverse lunghezze dello stesso. Si sono inoltre misurati parametri specifici come la sciancratura e il rocker verificando che essi rispettassero i valori dichiarati dal produttore. È riportata qui una tabella con i risultati ottenuti dalla misurazione di uno sci Salomon Gs 188cm R26m.

Lunghezza (l) [cm]	Spessore (h) [cm]	Larghezza (b) [cm]
0,00	0,64	7,86
3,5	0,60	8,50
16,5	0,80	8,00
28,5	0,95	7,16
38	1,14	6,80
48	1,36	7,06
61	1,60	6,81
79	1,83	6,57
96	1,77	6,57
112,5	1,65	6,92
123,5	1,56	7,23
134,5	1,30	7,65
145	1,04	8,16
153,5	0,90	8,64
166,3	0,61	9,43
173,5	0,57	10,00
186	0,52	

Tabella 4.1: Tabella rappresentante i parametri geometrici dello sci utilizzato nell'analisi sperimentale. Si può osservare come lo spessore dello sci sia maggiore al centro e inferiore alle estremità; viceversa la larghezza dello sci, a causa della sciancratura, è maggiore alle estremità e inferiore al centro.

L'obiettivo dell'analisi sperimentale è verificare il comportamento a flessione dello sci al fine di confrontarlo con i risultati ottenuti dalle analisi numeriche e sperimentali. Durante l'analisi sperimentale, i carichi utilizzati simulano il peso dello sciatore e la forza applicata da quest'ultimo.

È importante sottolineare che il carico massimo di 58 kg rappresenta un valore significativo in termini di peso, considerando che viene applicato su uno sci singolo.

Una volta definiti tutti i parametri geometrici si è proseguito con la prova sperimentale:

1. Lo sci è stato disposto su due supporti, poggiato su di essi in corrispondenza della punta e della coda. La distanza misurata fra i due punti di appoggio dello sci è pari a 168 cm.



Figura 4.1: Supporti utilizzati come appoggio per lo sci.

2. Si è caricato lo sci con un peso in corrispondenza della metà del tratto di lunghezza compreso tra i due punti di appoggio e si è misurata la distanza di tale punto dal terreno. Per la misurazione di tale parametro si è utilizzato un flessometro con sensibilità di 1 mm.



Figura 4.2: Immagine raffigurante lo sci caricato con la massa da 50kg.

3. Si è ripetuta più volte la misura variando la massa dei pesi caricati sullo sci. Si sono utilizzati pesi da 50kg, 25 kg, 10kg 2 kg e 1kg.



Figura 4.3: Immagine del peso da 50 kg utilizzato nella prova sperimentale



Figura 4.4: Immagine del metro utilizzato nella prova sperimentale.

4. Nota la distanza a scarico da terra, si è potuta calcolare la freccia di deformazione dello sci nel punto di mezzeria tramite la formula:  $f = H_{vuoto} - H_{carico}$

Si riportano ora i risultati ottenuti dalla seguente prova sperimentale consistente in 9 misurazioni:

Massa [kg]	H <sub>vuoto</sub> [cm]	H <sub>carico</sub> [cm]	Freccia (f) [cm]
58	75,2	62,7	12,5
54	75,2	63,8	11,4
50	75,2	64,8	10,4
42	75,2	66,4	8,8
36	75,2	67,3	7,9
24	75,2	70	5,2
19,5	75,2	71,2	4,0
18	75,2	71,5	3,7
13	75,2	72,5	2,7

Tabella 4.2: Tabella rappresentante le frecce misurate sperimentalmente.

Dalle misurazioni ottenute ne riportate nella tabella 4.2 si può notare come i valori delle frecce per i carichi più gravosi raggiungano valori elevati in relazione alla lunghezza dello sci, per esempio con un carico di 58 kg si ottiene una freccia di 12,5 cm su 168cm di lunghezza. Ciò è indice di un elevato livello di deformazione dello sci. Durante l'esperimento si è osservato un comportamento pienamente elastico da parte dello sci; una volta rimossi i carichi l'attrezzo è sempre tornato nella sua configurazione non deformata senza mostrare alcun segno di snervamento. Da questa semplice analisi si è potuto ottenere, oltre che ai valori numerici, anche una prima dimostrazione del comportamento meccanico di uno sci. Ad ogni carico lo sci presenta un grado di deformazione che risulta essere esclusivamente di carattere elastico.

Risulta inoltre utile graficare l'andamento della freccia di deformazione al variare della massa dei pesi:

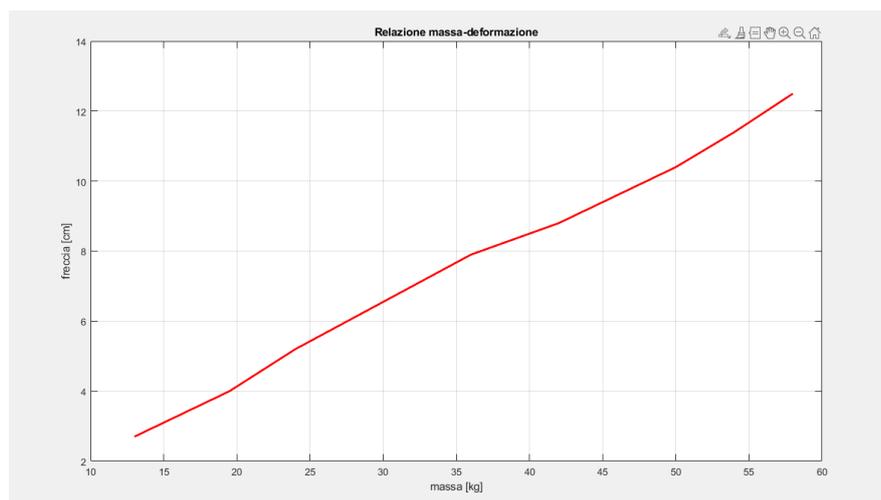


Grafico 4.1: Grafico relativo a freccia di deformazione e massa dei pesi.

Dal grafico 4.1 si osserva un andamento pressoché lineare, si può quindi ipotizzare in prima istanza che la freccia di deformazione dello sci vari linearmente con il carico applicato.

## 4.2 Analisi analitica e numerica

Per l'analisi analitica e numerica si è scelto un approccio di tipo graduale. Inizialmente si è analizzato lo sci semplificandolo ad una semplice trave in acciaio di sezione rettangolare costante e si è poi proseguito aumentando sempre più la complessità del modello. Come già anticipato, per la prima parte delle analisi lo studio è stato effettuato riferendosi contemporaneamente all'applicazione della teoria della meccanica dei solidi e a strumenti di calcolo avanzati come Solidworks Simulation. Procedendo con l'analisi però, vista la complicatezza teorica e pratica non sarà più possibile eseguire l'analisi in modo analitico e sarà dunque necessario affidarsi esclusivamente all'analisi numerica tramite il software Solidworks.

In primo luogo si è ricondotta la condizione dello sci caricato a quella di una trave in semplice appoggio. Tale ipotesi è giustificata dal fatto che lo sci presenta innanzitutto una lunghezza superiore rispetto alla larghezza e inoltre risulta essere semplicemente appoggiato ai supporti e dunque libero di scorrere su questi (solo su uno dei due). Dunque riferendosi alla meccanica dei solidi si è potuta calcolare la freccia di spostamento della trave nell'ipotesi di semplice appoggio tramite la seguente formula:

$$f = \frac{1}{3} F \frac{a^2 b^2}{EI}$$

Dove:

- E = modulo di Young del materiale
- F = forza applicata sulla trave
- a, b = distanze del punto di applicazione di F dai vincoli
- I = momento di inerzia della trave
- l = lunghezza della trave

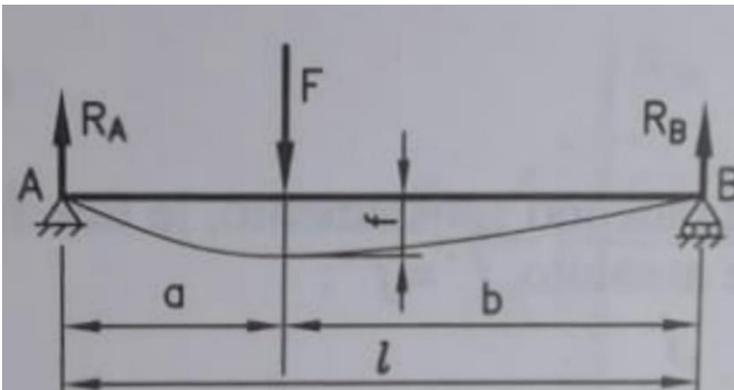


Figura 4.5: Schema grafico rappresentante forze, lunghezze e frecce per una trave in semplice appoggio. [15]

Nel caso analizzato, la forza  $F$  risulta essere applicata esattamente a metà della trave, ossia ad  $l/2$ . Pertanto si ha:

- $a = \frac{l}{2}$  ;
- $b = \frac{l}{2}$  ;

Con questa configurazione il valore massimo della freccia  $f$  si avrà in corrispondenza del punto medio della trave.

Si è quindi ricavato il momento d'inerzia per una trave con sezione di tipo rettangolare. Poiché la sezione dello sci non è costante rispetto alla lunghezza, nella semplificazione a trave a sezione costante per lo spessore  $h$  e la larghezza  $w$  si è considerato un valore medio tra quelli misurati. Risulta

- $h = 18.3 \text{ mm}$
- $w = 84.6 \text{ mm}$

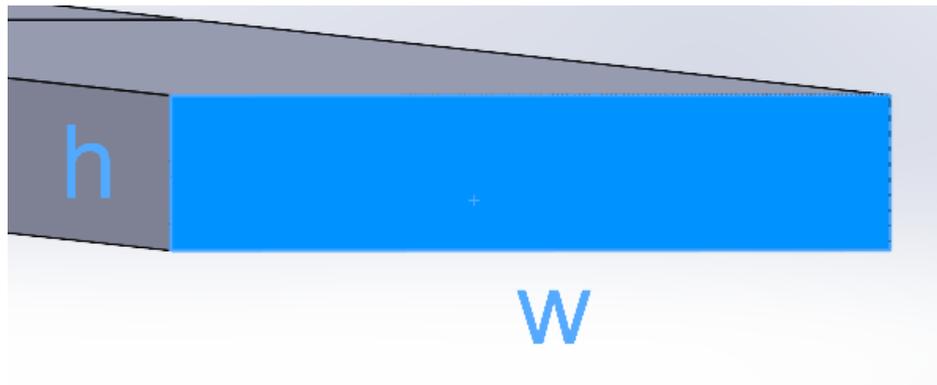


Figura 4.6: Rappresentazione delle grandezze w e h sulla sezione di trave analizzata

$$I = \frac{1}{12}sh^3$$

Sostituendo i valori si ottiene:

$$I = \frac{1}{12}84.6 \cdot 18.3^3 = 43205.8 \text{ mm}^4$$

Si attribuisce poi un materiale alla trave, in questo caso si è scelto per l'analisi l'acciaio AISI 1045 laminato a freddo. Questo materiale presenta modulo di Young  $E = 205000 \text{ MPa}$

Si può infine applicare la formula precedentemente citata per il calcolo della freccia di deformazione della trave sollecitata per diversi valori di  $F$ . Poiché l'analisi numerica vuole riferirsi alla prova sperimentale effettuata, la forza applicata sulla trave corrisponde al peso di diversi gravi che presentano differenti masse. Si ha dunque:  $F = mg$

Dato il caso analizzato è possibile effettuare alcune semplificazioni arrivando ad una formula semplificata per il calcolo di  $f$ :

$$f = \frac{1}{4} \frac{Fl^3}{Esh^3}$$

Si applica qui a titolo d'esempio tale formula per il caso di grave con massa  $m = 58 \text{ kg}$ :

- $F = mg = 58 \cdot 9.81 = 568.98 \text{ N}$
- $l = 1700 \text{ mm}$
- $w = 84.6 \text{ mm}$
- $h = 18.3 \text{ mm}$
- $E = 205000 \text{ MPa}$

$$f = \frac{1}{4} \frac{568.98 \cdot 1700^3}{205000 \cdot 84.6 \cdot 18.3^3} = 6.57 \text{ mm}$$

Si ripete quindi il calcolo per i differenti valori di massa  $m$  dei gravi e si riportano i risultati nella seguente tabella:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	Freccia (f) [mm]
58	568,98	6,575
54	529,74	6,122
50	490,50	5,668
42	412,02	4,761
36	353,16	4,081
24	235,44	2,720
19,5	191,30	2,210
18	176,58	2,040
13	127,53	1,473

Tabella 4.3: Tabella rappresentante i valori numerici della prima analisi numerica.

Dalla tabella 4.3 è immediato osservare che i valori ottenuti con questa prima analisi analitica si discostano nettamente dai valori ottenuti sperimentalmente. Prendendo ad esempio il caso con  $m=58$  kg, la freccia ottenuta sperimentalmente è  $f=125$  mm, mentre quella ricavata analiticamente è  $f=6.67$ mm; pertanto il valore reale risulta essere circa 19 volte superiore a quello calcolato. Questa incongruenza è dovuta alla notevole semplificazione adottata: a differenza della trave in acciaio lo sci è costituito da strati di acciaio e alluminio dallo spessore nettamente inferiore rispetto a quello complessivo dello sci (attorno ai 0.5 mm) e risulta essere composto anche da materiali caratterizzati da elevata elasticità come legno e gomma. Queste caratteristiche forniscono quindi allo sci una capacità di flessione nettamente superiore.

L'analisi si sposta quindi su Solidworks Simulation, strumento di calcolo numerico e grafico che utilizza la teoria dell'analisi agli elementi finiti. L'oggetto analizzato, in questo caso la trave, viene discretizzato nella mesh, insieme di elementi finiti che condividono dei nodi, ciascuno dei quali caratterizzato da un determinato grado di libertà. Tanto più piccoli sono gli elementi che discretizzano l'oggetto, tanto più il programma è in grado di cogliere la specificità di quel volume. Dopodiché vengono determinate le condizioni di equilibrio del corpo applicando carichi e vincoli all'oggetto analizzato. Si procede poi con il calcolo degli spostamenti di ogni nodo e da questo si derivano le deformazioni e infine le tensioni.

Dopo aver disegnato la trave rispettando le misure considerate per la precedente analisi si è passati all'area di lavoro Simulation. Si è cominciato attribuendo alla trave il materiale acciaio AISI 1045 laminato a freddo. Successivamente si è utilizzato il comando di Solidworks "tratta come trave", che permette di ottimizzare le prestazioni della simulazione per studi statici quando la lunghezza della trave è oltre 10 volte maggiore della dimensione maggiore della sua sezione trasversale (nel caso analizzato  $l=1700$ mm e  $w=84,6$  mm). Tramite il comando ogni elemento strutturale rettilineo viene definito da una linea retta che collega due giunti alle sue estremità e internamente il programma modella ogni trave creando una serie di elementi di trave, ciascuno dei quali è definito da due nodi di estremità e da una sezione trasversale. Nella semplificazione si assume che la sezione trasversale di una trave sia costante per tutta la sua lunghezza (e nel caso analizzato lo è). Successivamente si procede con la creazione della mesh per la trave, che risulta essere preimpostata dal programma con i seguenti valori:

Dettagli	Tipo di mesh	Mesh trave
Controllo mesh		definito
Nodi totali		127
Elementi totali		124
Tempo per completare la mesh	[hh:mm:ss]	00:00:00

Tabella 4.4: Tabella di Solidworks Simulation indicativa dei parametri della mesh. In questo caso la mesh presenta 127 nodi totali.

Si prosegue definendo i vincoli da attribuire alla trave: si applicano due vincoli non movibili ai due giunti posti alle estremità della trave, impedendo così qualsiasi traslazione dei punti.

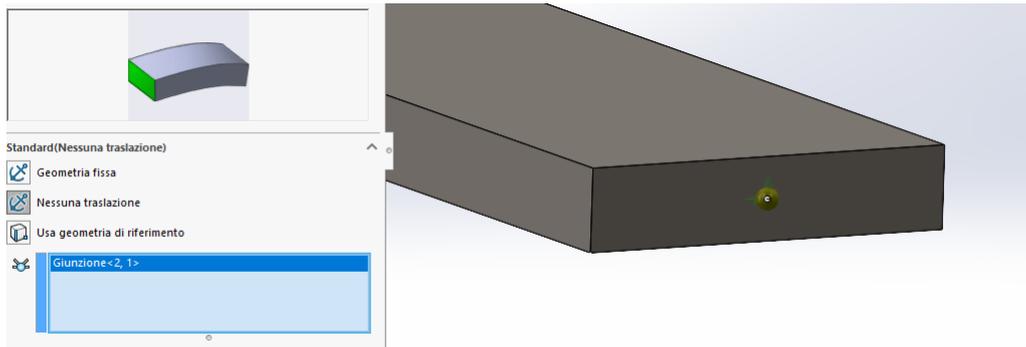


Figura 4.7: Rappresentazione della finestra di Solidworks adibita alla scelta dei vincoli.

Infine si definiscono e posizionano i carichi esterni da applicare sulla trave. Per far sì che la forza sia applicata esattamente al centro della trave si realizza il componente come assieme di due travi vincolate, ciascuna di lunghezza  $l = 850\text{mm}$ . In tale maniera, una volta applicato il comando “tratta come trave”, si ottiene una terza giunzione sulla quale è possibile applicare la forza. Come nell’analisi precedente le forze vengono applicate ortogonalmente alla trave e rivolte verso il basso, il modulo di queste varia seguendo i valori delle masse dei gravi applicati nell’analisi sperimentale.

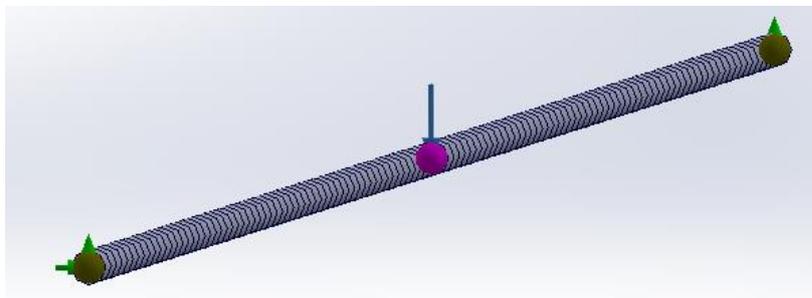


Figura 4.8: Immagine raffigurante la trave in Solidworks dopo l’applicazione del comando “tratta come trave” e l’assegnazione di vincoli e carichi.

A questo punto è possibile dare avvio alla simulazione, che nel giro di pochi secondi restituisce un’analisi numerica e grafica relativa alla deformazione e allo spostamento della trave. Attraverso alcune selezioni è possibile visualizzare il valore di spostamento massimo della trave deformata, che corrisponde alla freccia di deformazione calcolata con la precedente analisi.

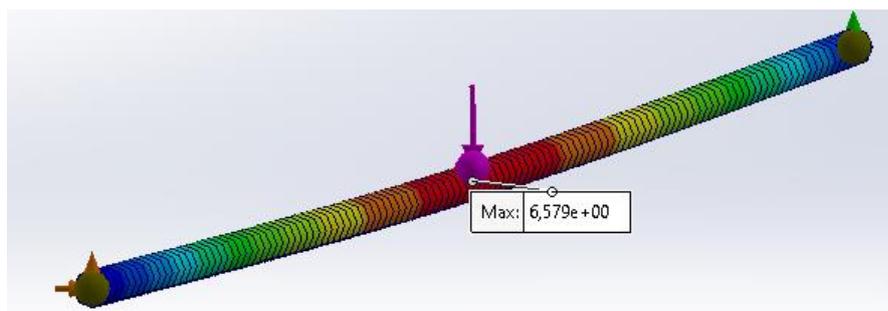


Figura 4.9: Immagine raffigurante la trave in Solidworks dopo lo studio. Il programma rappresenta in un’icona il valore massimo dello spostamento (f).

Si riportano di seguito i valori ottenuti per le frecce riferite ai differenti valori di massa m dei gravi:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	Freccia (f) [mm]
58	568,98	6,578
54	529,74	6,125
50	490,50	5,671
42	412,02	4,764
36	353,16	4,083
24	235,44	2,722
19,5	191,30	2,212
18	176,58	2,042
13	127,53	1,475

Tabella 4.4: Tabella rappresentante i valori numerici della analisi numerica tramite Solidworks Simulation.

Confrontando i risultati ottenuti dalle due analisi numeriche (tabella 4.3 e tabella 4.4) è possibile ricavare lo scarto percentuale  $\Delta\%$  relativo ai valori calcolati per la freccia f riferiti ai due metodi.

$$\Delta\% = \frac{f_{Solidworks} - f_{numerico}}{f_{numerico}} * 100 \cong \frac{0,02}{f_{numerico}} \cong 0,03\%$$

Si osserva che al variare della modalità di carico tale valore si mantiene pressoché costante intorno a  $\Delta\% = 0,03\%$ . Tale errore risulta trascurabile ai fini dell'analisi ma permette di verificare l'equivalenza  $\Delta\%$  dei due metodi risolutivi utilizzati, infatti i due procedimenti forniscono i medesimi valori della freccia f fino al centesimo di millimetro.

Si procede con la verifica statica sulla sezione della trave, è infatti di fondamentale importanza esaminare lo stato di sollecitazione presente sulla sezione della sci in seguito ai carichi e verificare che il materiale non raggiunga lo snervamento.

La verifica statica deve essere effettuata sulla sezione più caricata, che può essere facilmente trovata tramite i diagrammi di taglio e momento flettente. Con questa configurazione si ottiene un andamento lineare per il momento e andamento costante per il taglio. Si ricava il valore del momento flettente tramite la seguente formula:

$$M = \frac{Fl}{4}$$

Si traccia ora l'andamento del momento e del taglio grafico e si ottengono i seguenti grafici:

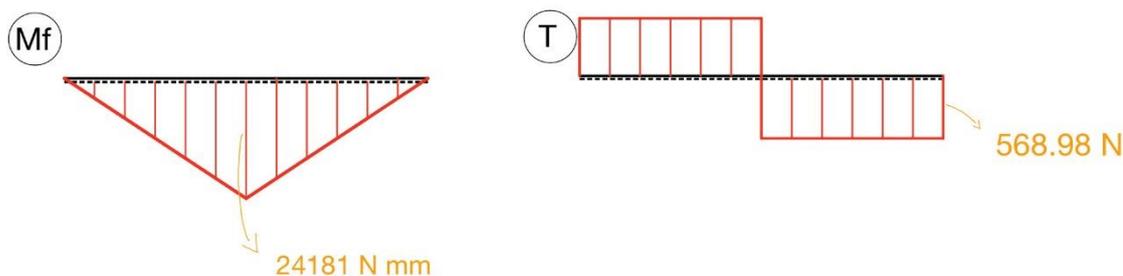


Figura 4.10: Grafici di momento flettente e taglio relativi al caso con  $F = 568,89$  N

Si osserva dalla figura 4.9 che la sezione in cui il momento flettente raggiunge il valore massimo è quella disposta a l/2 dal vincolo, ossia a metà della trave. Tale risultato è coerente con quanto ottenuto dalle precedenti analisi, ci si aspetta infatti che la sezione più caricata coincida con la sezione in cui il valore della freccia f è massimo.

A questo punto si ricavano i valori di momento flettente e taglio relativamente alla sezione di mezzeria della trave (sezione A-A) per i differenti valori del carico F. Si riportano i valori ottenuti nella seguente tabella:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	l [mm]	Momento flettente (M <sub>f</sub> ) [Nmm]	Taglio (T) [N]
58	568,98	1700	241816,5	568,98
54	529,74	1700	225139,5	529,74
50	490,5	1700	208462,5	490,5
42	412,02	1700	175108,5	412,02
36	353,16	1700	150093	353,16
24	235,44	1700	100062	235,44
19,5	191,3	1700	81302	191,3
18	176,58	1700	75046,5	176,58
13	127,53	1700	54200,2	127,53

Tabella 4.5: Tabella rappresentante i valori analitici del momento flettente e taglio nella sezione A-A.

È ora possibile effettuare la verifica statica di tipo analitico sulla sezione A-A facendo riferimento ai valori della tabella 4.5. La sezione presenta le stesse caratteristiche geometriche di quella analizzata per il calcolo delle frecce, pertanto si ha:

- h = 18.3 mm
- w = 84.6 mm

Si ricavano i valori di tensione da momento flettente  $\sigma_{Mf}$  tramite la seguente formula:

$$\sigma_{Mf,max} = \frac{M_f}{I_{xx}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{M_f}{\frac{1}{12}wh^3} \cdot \frac{h}{2} = \frac{M_f}{\frac{1}{6}wh^2}$$

Definito il momento statico  $S'_{xx} = w \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4}$ , si ricavano i valori delle tau da taglio  $\tau_T$  (non si hanno  $\tau$  da momento torcente perché la forza F è applicata sul baricentro G della sezione):

$$\tau_T = \frac{T_y}{I_{xx}} \cdot \frac{S'_{xx}}{w} = \frac{T_y}{\frac{1}{12}wh^3} \cdot \frac{w \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4}}{b} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T_y}{wh}$$

La verifica deve essere effettuata nei punti più sollecitati e pertanto viene eseguita su un punto generico della sezione A-A, distante h/2 dal baricentro. Qui si ha infatti il valore massimo della tensione  $\sigma_{Mf}$ , che si presenta come trazione o come compressione. Nel caso analizzato si sceglie il punto A che è soggetto a trazione.

Altro luogo di verifica statica è il punto B, posto a metà del lato h della sezione. Qui si ha il valore massimo delle tau da taglio  $\tau_T$ .

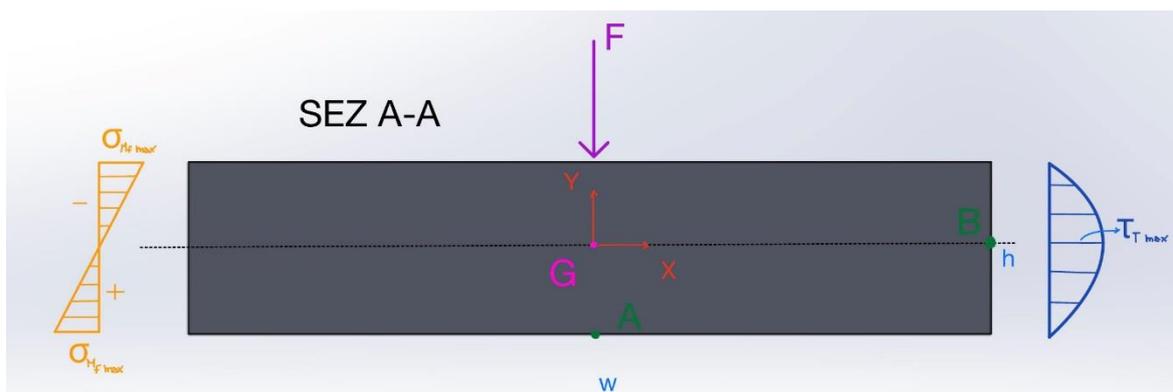


Figura 4.11: Rappresentazione della sezione A-A con i relativi grafici di andamento della tensione  $\sigma_{Mf}$  e delle tau da taglio  $\tau_T$ .

Si eseguono i calcoli dello stato tensionale della sezione A-A nei punti A e B per ciascun valore del carico F:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	Momento flettente ( $M_f$ ) [Nmm]	$\sigma_{Mf,max}$ [MPa] Punto A	$\tau_T$ [MPa] Punto A	$\sigma_{Mf,max}$ [MPa] Punto B	$\tau_T$ [MPa] Punto B
58	568,98	241816,5	51,211	0	0	0,55
54	529,74	225139,5	47,679	0	0	0,513
50	490,5	208462,5	44,147	0	0	0,475
42	412,02	175108,5	37,084	0	0	0,399
36	353,16	150093	31,786	0	0	0,342
24	235,44	100062	21,191	0	0	0,228
19,5	191,3	81302	17,218	0	0	0,185
18	176,58	75046,5	15,893	0	0	0,171
13	127,53	54200,2	11,478	0	0	0,12

Tabella 4.6: Tabella riportante i valori analitici della  $\sigma_{Mf,max}$  e  $\tau_T$  nei punti A e B della sezione A-A.

Analizzando i risultati ottenuti dalla tabella 4.6 si osserva che i valori di tensione  $\tau_T$  ottenuti nel punto B sono nettamente inferiori rispetto a quelli ottenuti dalla  $\sigma_{Mf}$  nel punto A. Si può quindi affermare che lo stato di sollecitazione sulla sezione A-A dovuto al momento flettente è più influente rispetto a quello dovuto al taglio, i cui effetti risultano quindi trascurabili nell'analisi. Il punto A rappresenta dunque il punto più critico sui cui si effettuerà la verifica statica.

Si procede ora con l'analisi numerica su Solidworks Simulation. Quando si esegue lo studio nelle condizioni di input precedentemente citate, il programma fornisce in output il diagramma delle sollecitazioni ("STRMAX: assiale e piegatura delimitazione superiore"). I risultati delle sollecitazioni vengono prima calcolati in determinati punti, chiamati punti di Gauss o di quadratura, situati all'interno di ciascun elemento. La simulazione calcola le sollecitazioni ai nodi di ciascun elemento estrapolando i risultati disponibili nei punti di Gauss. I risultati delle sollecitazioni per le travi sono calcolati in base al sistema di coordinate locali della trave. Lo stato delle sollecitazioni in un punto è completamente definito dalle componenti di sforzo normale e di taglio in riferimento a un sistema di coordinate ortogonali XYZ. Le tensioni  $\sigma$  e  $\tau$  calcolate per ciascuna sezione vengono combinate secondo il criterio di Tresca.

Si effettua lo studio per i vari valori del carico F e si imposta la visualizzazione del valore di tensione massimo. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	$\sigma_{Mf,max}$ [MPa] Punto A
58	568,98	51,211
54	529,74	47,679
50	490,50	44,148
42	412,02	37,084
36	353,16	31,786
24	235,44	21,191
19,5	191,30	17,218
18	176,58	15,893
13	127,53	11,478

Tabella 4.7: Tabella riportante i valori numerici della  $\sigma_{Mf,max}$  ottenuti tramite Solidworks Simulation.

Confrontando i valori della tabella 4.7 con quelli ottenuti dalla tabella 3.6 si osserva che l'errore relativo fra risultati corrispondenti è inferiore allo 0,01%. Ciò indica che anche in questo caso i due metodi di calcolo utilizzati (analitico e numerico) sono equivalenti.

Si può infine procedere con il calcolo del fattore di sicurezza statico  $v_s$  per il punto A della sezione A-A. Nota la tensione di snervamento del materiale  $\sigma_s = 530$  MPa, è necessario ricavare la  $\sigma_{id}$  presente sulla sezione tramite il criterio di Guest.

Vale:

- $\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{Mf}^2 + 4 \tau_T^2} = \sigma_{Mf}$
- $v_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{id}}$

Si applicano tali formule nel punto A della sezione A-A per i vari carichi F e si riportano di seguito i risultati:

Forza (F) [N]	$\sigma_{id}$ [MPa]	$v_s$
568,98	51,211	10,349
529,74	47,679	11,116
490,50	44,148	12,005
412,02	37,084	14,291
353,16	31,786	16,674
235,44	21,191	25,011
191,30	17,218	30,781
176,58	15,893	33,348
127,53	11,478	46,175

Tabella 4.8: Tabella riportante i valori analitici della  $\sigma_{id}$  e di  $v_s$  nel punto A della sezione A-A

Dalla tabella 4.8 si osserva che il valore più basso del coefficiente di sicurezza  $v_s$  tra quelli riportati si ha in corrispondenza della condizione di carico più gravosa ( $F= 568,98 \text{ N}$ ) e vale  $v_s = 10,349$ . Tuttavia tale valore risulta assai maggiore rispetto a quello minimo richiesto, ossia  $v_s=1,6$ . Pertanto la trave presenta un comportamento pienamente elastico e non sperimenta snervamento per alcuna condizione di carico a cui è sottoposta.

Anche in questo caso è possibile ricavare il coefficiente di sicurezza  $v_s$  in modo numerico tramite Solidworks Simulation. Il programma permette di aggiungere fra gli output un grafico che rappresenta i coefficienti di sicurezza  $v_s$  sulle varie sezioni della trave. È possibile selezionare la visualizzazione del valore minimo del coefficiente di sicurezza, che ci si aspetta essere esattamente nella sezione A-A.

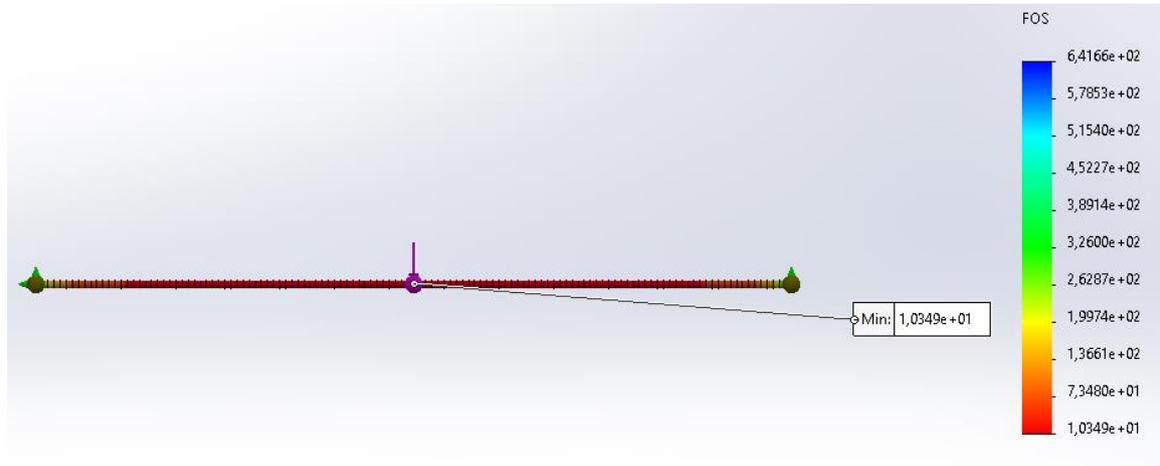


Figura 4.12: Immagine raffigurante la trave in Solidworks dopo lo studio. Il programma rappresenta in un'icona il valore minimo del coefficiente di sicurezza  $v_s$ .

Si esegue lo studio per i vari carichi e si riportano i risultati nella seguente tabella:

Forza (F) [N]	$v_s$
568,98	10,349
529,74	11.116
490,50	12.005
412,02	14,292
353,16	16,674
235,44	25,011
191,30	30,782
176,58	33,348
127,53	46,175

Tabella 4.9: Tabella riportante i valori numerici della  $v_s$  nel punto A della sezione A-A ricavati tramite Solidworks Simulation.

Comparando i valori di  $v_s$  ottenuti di con i due metodi risolutivi (tabella 4.8 e tabella 4.9) si osserva che questi si discostano per un errore relativo inferiore allo 0,01%. Anche per questa analisi pertanto i due strumenti di calcolo sono equivalenti.

### 4.3 Conclusioni

Le analisi analitiche e numeriche effettuate in questo capitolo hanno permesso di pervenire a dei risultati importanti. La semplificazione del modello dello sci a quello di una trave ha permesso di analizzare il problema riferendosi alla teoria della meccanica dei solidi e di definire un modello base di analisi che può essere utilizzato in una successiva trattazione più realistica. Seppure i risultati ottenuti in termini di deformazione e stato tensionale della trave non si avvicinano a quelli ricavati sperimentalmente con lo sci, le analisi hanno permesso di dimostrare la validità degli strumenti di calcolo di Solidworks Simulation, che ha sempre fornito dati coerenti con quelli ricavati manualmente. Questo concetto è fondamentale perché a partire dal prossimo capitolo, con la gradualmente complicazione del modello, non sarà più possibile affidarsi a metodi di calcolo analitico e dunque tutte le analisi verranno effettuate in modo numerico tramite Solidworks.

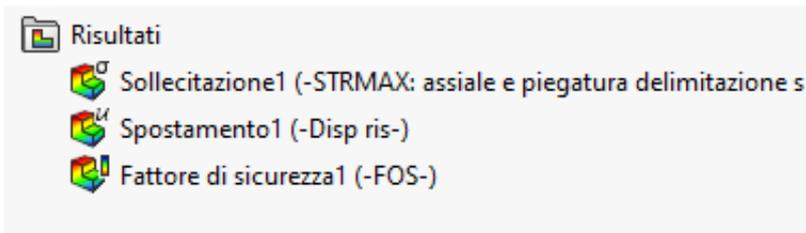


Figura 4.13: Immagine raffigurante i risultati ottenuti dall'analisi statica sulla trave. Questi consistono di 3 grafici: il grafico di sollecitazione, quello di spostamento e quello del fattore di sicurezza.

# CAPITOLO 5

## Analisi definitiva

Nel seguente capitolo, si procede a una dettagliata analisi del comportamento dello sci a flessione, adottando un approccio più realistico rispetto a quanto fatto nel caso precedente. Mentre nel capitolo 3 si è esaminato il comportamento ideale dello sci a flessione, basato su ipotesi semplificate, in questa sezione si approfondisce ulteriormente l'analisi, focalizzando l'attenzione su aspetti legati ai materiali e alla stratificazione dello sci, nonché sulla sua forma caratteristica.

La complessità del modello e delle interazioni coinvolte nel comportamento dello sci a flessione rende in questo caso difficile l'approccio analitico. Un'analisi di questo tipo infatti richiederebbe l'applicazione di equazioni differenziali complesse, che possono risultare difficili o impossibili da risolvere in modo esatto a causa delle molte variabili e fattori coinvolti.

Per tale ragione si adotta esclusivamente l'approccio numerico mediante l'utilizzo del software di simulazione Solidworks Simulation. I modelli numerici consentono di rappresentare la geometria e i materiali dello sci in modo dettagliato, tenendo conto delle varie interazioni tra gli elementi e considerando l'effetto di fattori come la distribuzione del carico e le sollecitazioni. Inoltre, l'approccio numerico offre la flessibilità di considerare diverse variabili, come le proprietà dei materiali, le forme dello sci e le condizioni operative, consentendo di condurre analisi parametriche e di ottenere risultati dettagliati e affidabili.

### 5.1 Modello geometrico

In primo luogo si procede realizzando il modello dello sci su Solidworks.

Per la realizzazione del modello, si considerano sette strati principali. Questi strati includono il core, due strati di titanale, due strati di fibra di vetro e due strati di gomma. Inoltre, il modello comprende i sidewalls e le lamine, che contribuiscono alla struttura complessiva dello sci. Per semplificare il modello e concentrarsi sull'analisi strutturale, si trascurano alcune componenti non strutturali, come la copertura esterna e la soletta dello sci. Inoltre si trascurano elementi strutturali esterni come le piastre, la cui trattazione complicherebbe notevolmente lo studio.

La forma dello sci viene modellata come una trave lunga 1700mm, corrispondente alle dimensioni utilizzate nell'analisi sperimentale di riferimento. Si esegue poi la sciancratura dello sci con un raggio di curvatura di 26 metri. Al fine di semplificare ulteriormente il modello, si sceglie di considerare uno spessore costante per tutto lo sci, al fine di evitare problemi di calcolo eccessivi in Solidworks Simulation. Lo spessore viene determinato come valore medio degli spessori dello sci lungo la sua lunghezza.

Ciascun strato di materiale nel modello viene selezionato con uno spessore caratteristico all'interno dell'intervallo disponibile, definito dalle specifiche fornite dal costruttore. La combinazione degli strati di materiale conferisce allo sci le proprietà strutturali desiderate, tenendo conto delle diverse caratteristiche di resistenza, elasticità e rigidità di ciascun materiale utilizzato. Tuttavia, va evidenziato che nessuna azienda divulga dati e informazioni specifiche riguardo ai materiali utilizzati e ai loro spessori all'interno dello sci. Pertanto, questi valori vengono approssimativamente determinati a tentativi basandosi su indicazioni generali e su modelli reali di sci. Il modello su Solidworks realizzato fornisce una rappresentazione virtuale accurata dello sci, consentendo di valutare il suo comportamento strutturale in diverse condizioni di carico e di effettuare analisi numeriche dettagliate.

Durante questa fase, si creano strati distinti per i diversi materiali utilizzati, ma non viene ancora assegnato un materiale specifico a ciascun componente. L'assegnazione dei materiali viene effettuata successivamente, utilizzando il modulo di analisi strutturale di Solidworks Simulation. La distinzione dei materiali all'interno dei modelli consente di apportare modifiche in qualsiasi momento, come ad esempio regolare lo spessore o altre dimensioni degli strati, senza dover ricostruire completamente l'assieme dello sci.

Si analizzano qui di seguito i vari strati e componenti contenuti nel modello:

- Core:

Il core dello sci viene realizzato come un insieme di 5 laminati, di cui 3 laminati di legno di balsa e 2 di legno di paulonia. Nella progettazione, è si considera la scelta delle dimensioni dei laminati in base a specifiche esigenze.

Vengono creati modelli separati per ciascuno dei due laminati di balsa e paulonia. Entrambi i laminati presentano uno spessore uniforme di 9 mm, una lunghezza identica di 850 mm e una larghezza diversa. Nello specifico, il laminato di balsa misura 19 mm di larghezza, mentre il laminato di paulonia misura 9,8 mm di larghezza.

La scelta delle larghezze dei laminati è viene fatta in modo da rispettare due criteri importanti. Innanzitutto, si considera che la larghezza del laminato di balsa sia il doppio di quella del laminato di paulonia. Questa decisione mira a ottenere una distribuzione equilibrata delle proprietà meccaniche e delle caratteristiche di flessibilità all'interno del core dello sci. In secondo luogo, si tiene in considerazione la larghezza totale massima dello sci, che deve essere di 84,6 mm, considerando anche lo spessore dei sidewalls. Questo assicura che il core, insieme ai suoi componenti adiacenti, rispetti i requisiti di larghezza complessiva dell'intera struttura dello sci.

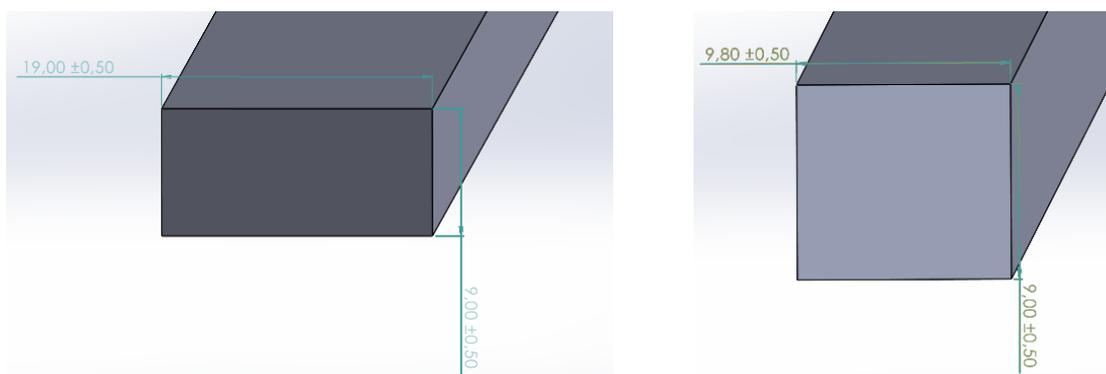


Figura 5.1: Modelli del laminato di balsa e paulonia su Solidworks.

Successivamente, questi modelli vengono assemblati in un unico assieme utilizzando il comando "accoppia" disponibile nel software. Si ottiene quindi metà del core dello sci. La scelta di realizzare il core dello sci in due pezzi è legata alla possibilità di trattare il core come due travi separate all'interno dell'analisi su Solidworks Simulation. Questo approccio consente di ottenere un vertice di giunzione tra i due laminati, dove è possibile applicare la forza o il carico desiderato durante l'analisi strutturale.

Infine si realizza un taglio estruso sull'assieme al fine di riprodurre la sciancratura dello sci con raggio R26 metri.

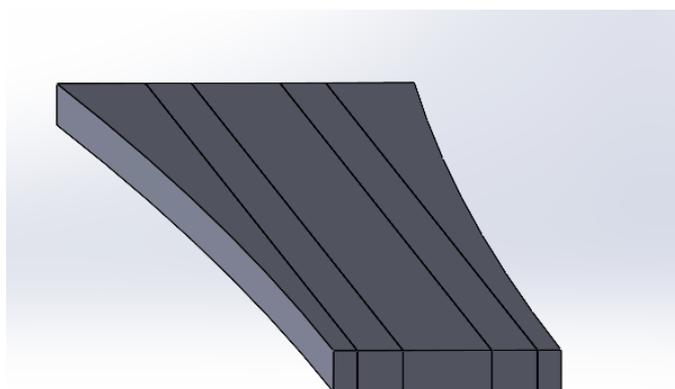


Figura 5.2: Modello rappresentante metà del core dello sci

- Titanal:

Lo strato in titanal dello sci viene realizzato come un unico componente con una lunghezza di 1700 mm e una larghezza massima di 84,6 mm. Per lo spessore dello strato in titanal, si considera un valore di 0,4 mm, che rientra nell'intervallo specificato dai produttori tra 0,3 mm e 1,2 mm.

Allo stesso modo del core, è viene creata una sciancratura con un raggio di curvatura di 26 m. Questa sciancratura si ottiene mediante un processo di taglio estruso a partire dalla trave.



Figura 5.3: Sezione massima dello strato in titanal.

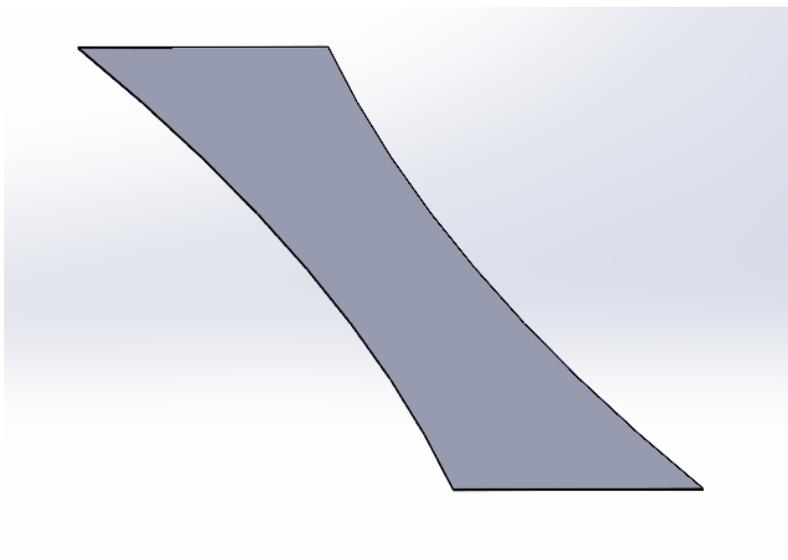


Figura 5.4: Modello rappresentante lo strato in titanal

- Fibra composita di vetro:

Lo strato in fibra di vetro dello sci è viene realizzato in modo identico a quello di titanal come un unico componente con una lunghezza di 1700 mm e una larghezza massima di 84,6 mm. Per lo spessore dello strato è si considera un valore di 0,4 mm, che rientra nell'intervallo specificato dai produttori tra 0,25 mm e 0,8 mm.

Allo stesso modo degli altri strati, viene creata una sciancratura con un raggio di curvatura di 26 m. Questa sciancratura si ottiene mediante un processo di taglio estruso a partire dalla trave.



Figura 5.5: Sezione massima dello strato in fibra di vetro.

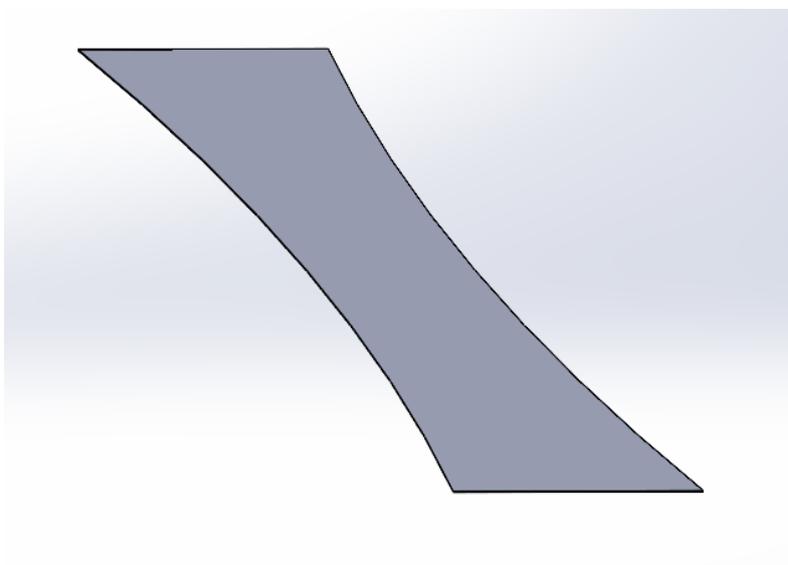


Figura 5.6: Modello rappresentante lo strato in fibra di vetro.

- Gomma:

Lo strato in gomma dello sci viene realizzato in modo identico a quello di titanal e fibra di vetro come un unico componente con una lunghezza di 1700 mm e una larghezza massima di 84,6 mm. Per lo spessore dello strato viene considerato un valore di 0,4 mm, che rientra nell'intervallo specificato dai produttori tra 0,13 mm e 2,15 mm.

Allo stesso modo degli altri strati, viene creata una sciancratura con un raggio di curvatura di 26 m. Questa sciancratura si ottiene mediante un processo di taglio estruso a partire dalla trave.



Figura 5.7: Sezione massima dello strato in gomma.

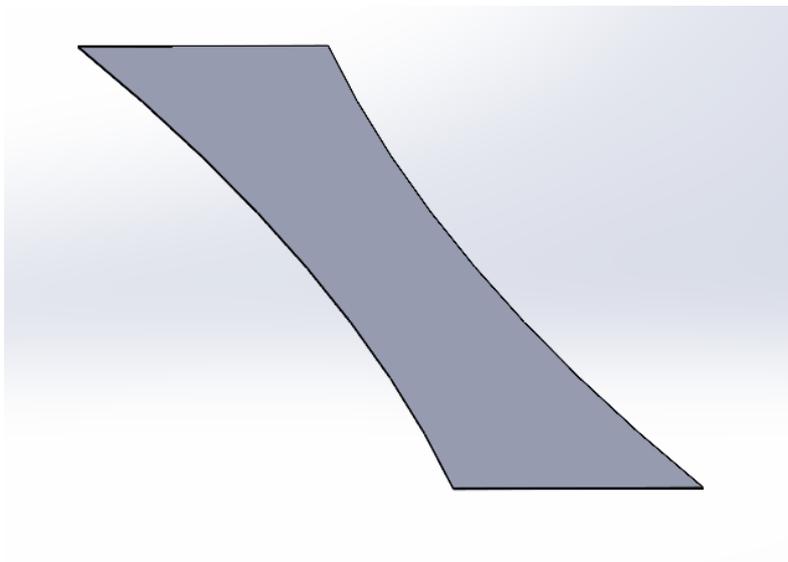


Figura 5.8: Modello rappresentante lo strato in gomma.

- Sidewalls:

I sidewalls vengono realizzati come un unico componente ottenuto dall'estrusione per 9 mm di un settore circolare di raggio R26 m e di spessore 4 mm.

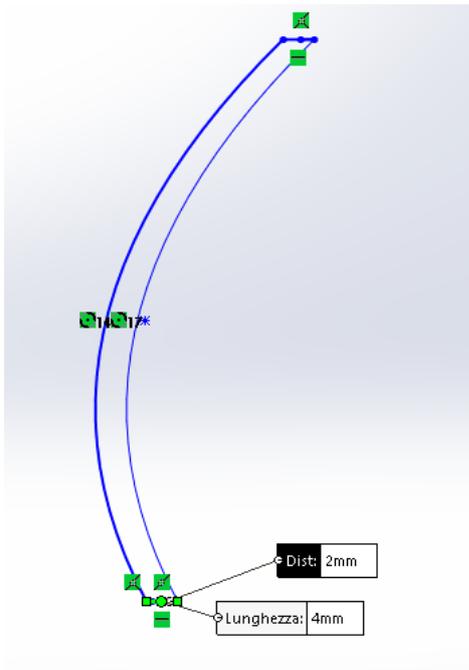


Figura 5.9: Schizzo di partenza per la realizzazione dei sidewalls.

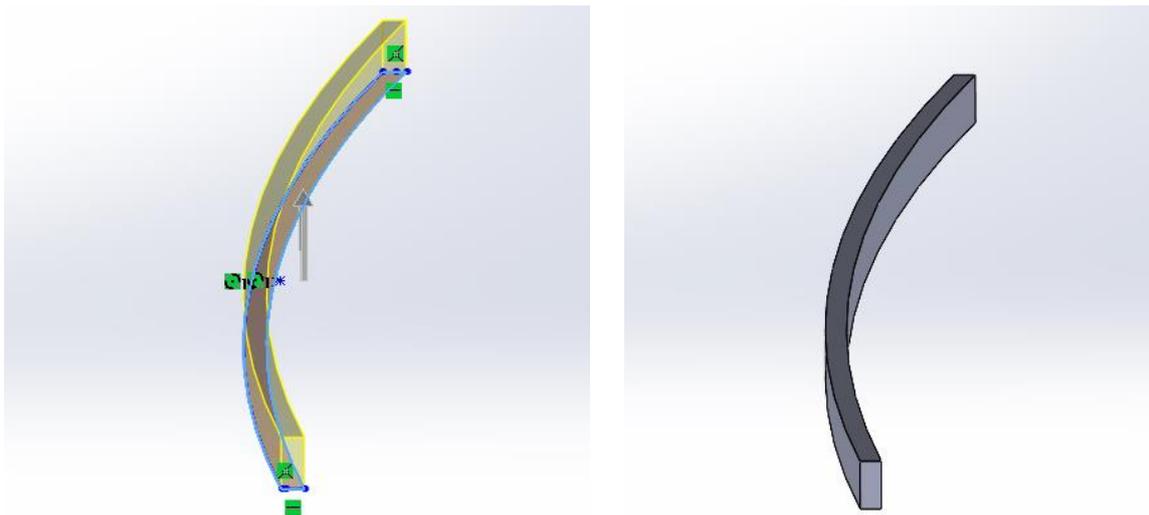


Figura 5.10: Estrusione di 9 mm dello schizzo e modello dei sidewalls risultante.

- Lamine:

Le lamine vengono realizzate come un unico componente ottenuto dall'estrusione per 0,6 mm di un settore circolare di raggio R26 m e di spessore 2,5 mm.

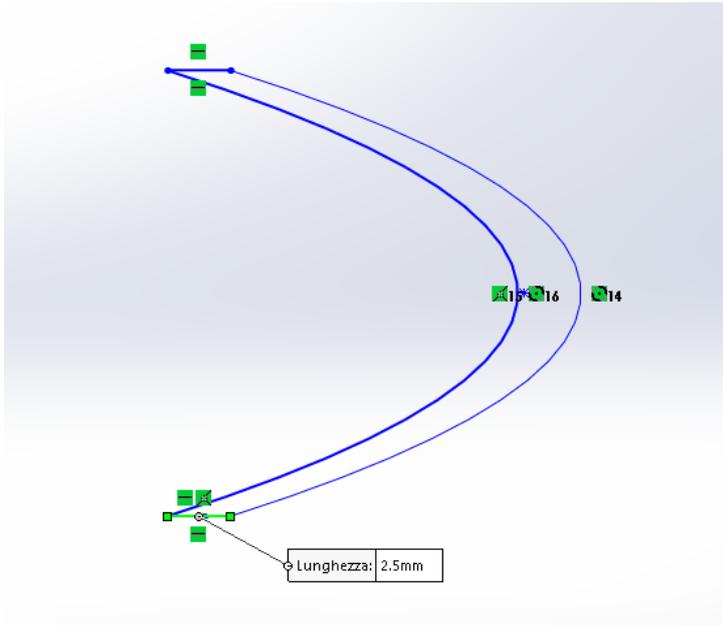


Figura 5.11: Schizzo di partenza per la realizzazione delle lamine.

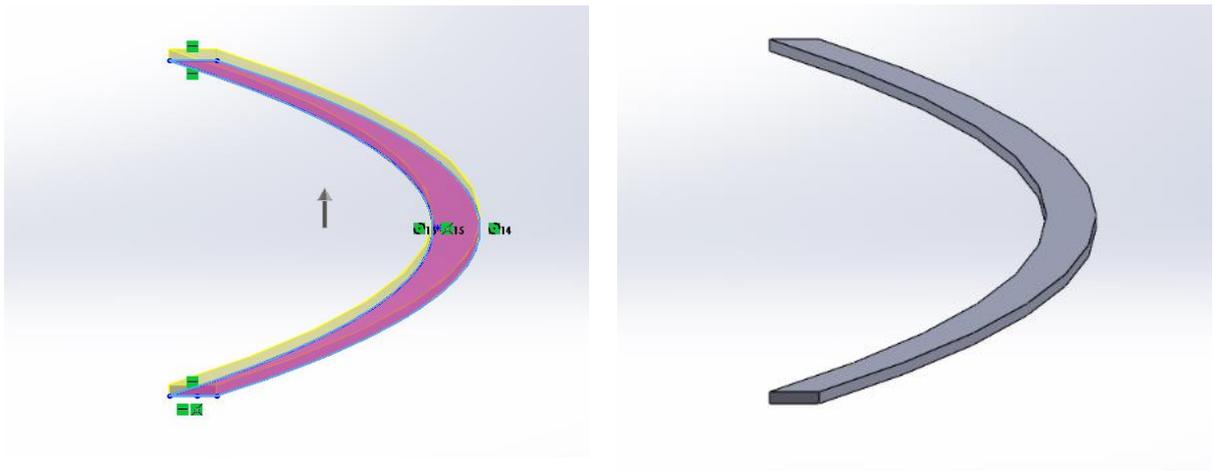


Figura 5.12: Estrusione di 0.6 mm dello schizzo e modello delle lamine risultante.

Dopo aver completato la realizzazione dei diversi strati e componenti, è possibile procedere all'assemblaggio di questi elementi per formare l'assieme dello sci sandwich.

Utilizzando Solidworks, viene creato un assieme in cui i vari elementi vengono uniti conservando le proprie caratteristiche. Qualsiasi modifica apportata a uno di essi si riflette automaticamente sull'assieme.

Su Solidworks, per effettuare un accoppiamento fisso tra componenti, si utilizza il comando "Mates" (vincoli). Questo permette di definire relazioni geometriche tra le parti che rendono il loro posizionamento stabile e impediscono i movimenti relativi tra gli elementi.

Per applicare una mate, si selezionano i volti, i bordi o i punti di riferimento delle parti da accoppiare. Successivamente, si scelgono i tipi di vincoli appropriati per il collegamento desiderato. Ad esempio, è possibile utilizzare un vincolo di coincidenza per fissare due facce tra loro, un vincolo di concentricità per allineare due fori o un vincolo di fissaggio per bloccare il movimento rotazionale di un componente rispetto a un altro.

Una volta applicati i vincoli, Solidworks calcola automaticamente la posizione delle parti in base alle relazioni definite, rendendo l'accoppiamento rigido e impedendo i movimenti relativi tra gli elementi.

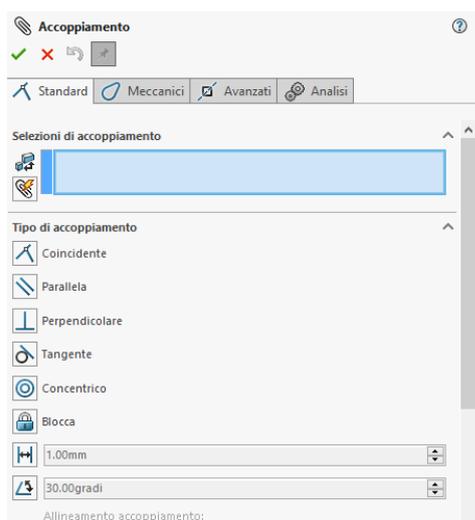


Figura 5.13: Finestra di controllo del comando "accoppiamento" di Solidworks.

L'assieme dello sci viene costruito seguendo una sequenza precisa di assemblaggio. Inizialmente, si procede unendo i due componenti del core. Successivamente, i sidewalls vengono disposti lateralmente al core. Dopo di che, si procede a disporre gli strati di titanal, fibra di vetro e gomma; per ciascun materiale si posizionano due strati, garantendo una disposizione simmetrica rispetto al core. Per completare l'assieme, vengono posizionate le lamine che, in una semplificazione ipotetica, vengono vincolate direttamente allo strato di gomma. Questo processo di assemblaggio garantisce la costruzione dello sci sandwich con tutti gli elementi correttamente disposti e fissati.



Figura 5.14: Immagine frontale dell'assieme.

Dalla figura 5.14 è possibile osservare la stratificazione del modello dello sci. Come si osserva lo spessore del core è circa 20 volte superiore rispetto agli altri strati.

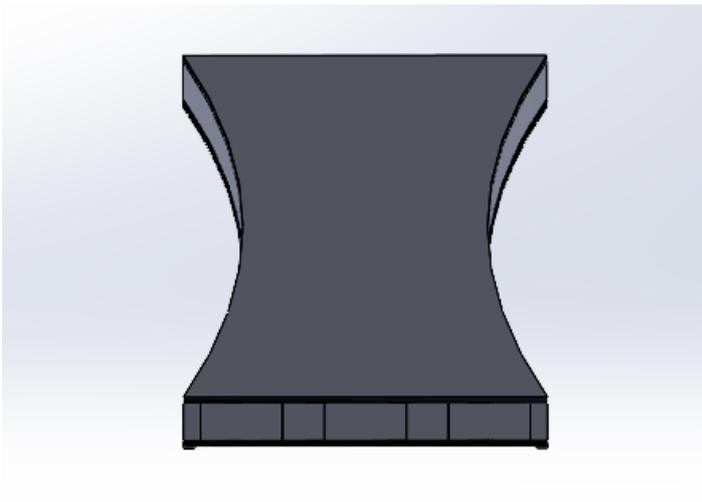


Figura 5.15: Immagine tridimensionale dell'assieme.

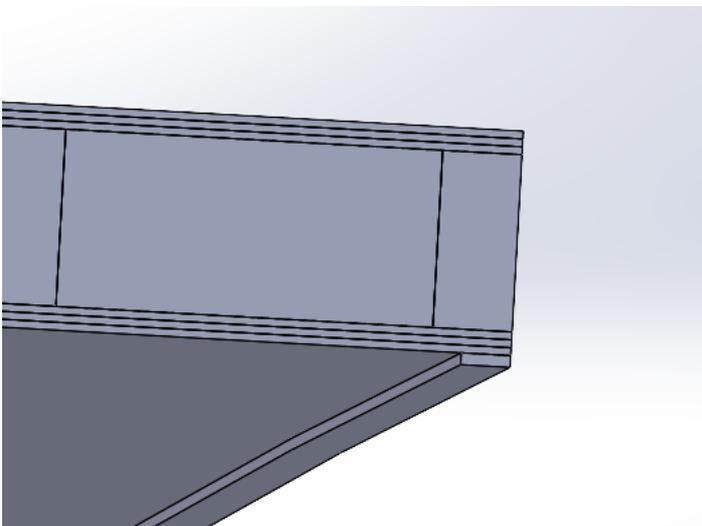


Figura 5.16: Dettaglio della stratificazione dell'assieme.

Lo spessore totale del modello è di 12 mm, un valore che si avvicina al valore medio dello spessore dello sci reale ricavato dalla tabella 4.1, il quale corrisponde a 11 mm.

La larghezza massima del modello è di 84,6 mm, valore utilizzato anche per le analisi del capitolo 4.

## 5.2 Modello fisico

Dopo aver completato la costruzione del modello geometrico dello sci, è necessario procedere con la progettazione del modello fisico. In questa fase, vengono assegnati i materiali ai vari strati dello sci. Ogni strato, come ad esempio il core, gli strati di fibra di vetro, gomma o altri materiali, viene definito specificando le proprietà fisiche e meccaniche del materiale utilizzato. Questo include caratteristiche come la densità, il modulo di Young, il coefficiente di Poisson, la tensione di snervamento e altre proprietà materiali pertinenti. Assegnare i materiali correttamente a ciascun strato è essenziale per la valutazione delle prestazioni e del comportamento dello sci durante l'uso.

Per assegnare un materiale a un componente nell'assieme, è possibile seguire il seguente procedimento: posizionarsi sul componente desiderato e selezionare l'opzione "Assegna materiale". Si aprirà una finestra contenente una selezione predefinita di materiali forniti da Solidworks. Nel caso in questione, se il materiale desiderato non è presente tra le opzioni predefinite, è necessario creare il materiale personalizzato da zero.

Si analizzano di seguito le caratteristiche dei materiali assegnati ai vari elementi:

- Core:

Come già citato precedentemente, il core viene realizzato con laminati in legno di balsa e paulonia. I dati relativi a questi materiali fanno riferimento alla tabella 2.3 citata nel capitolo 2 della tesi.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	1222200000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.29	N/A
Modulo di taglio		N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	560	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione		N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	27000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.1: Proprietà fisiche del legno di balsa.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	5000000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.29	N/A
Modulo di taglio	5000000	N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	260	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione		N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	73000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.2: Proprietà fisiche del legno di paulonia.

- Titanal:

Lo strato in titanal viene realizzato appunto in titanal. I dati relativi a questo materiale fanno riferimento alla tabella 2.1 citata nel capitolo 2 della tesi.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	6.4e+10	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.33	N/A
Modulo di taglio	2699	N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	1020	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	30000000	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	590000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.3: Proprietà fisiche del titanal.

- Fibra di vetro:

Lo strato in fibra di vetro viene realizzato in fibra composita di vetro. I dati relativi a questo materiale fanno riferimento alla tabella 2.2 citata nel capitolo 2 della tesi.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	3.7e+10	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.23	N/A
Modulo di taglio	318900000	N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	2480	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	1090000000	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	1090000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.4: Proprietà fisiche della fibra composita di vetro.

- Gomma:

Lo strato in gomma viene realizzato in gomma A14689 vulcanizzata. I dati relativi a questo materiale fanno riferimento alla tabella 2.4 citata nel capitolo 2 della tesi.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	5000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.49	N/A
Modulo di taglio		N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	1250	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	6000000	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	6000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.5: Proprietà fisiche della gomma.

- Sidewalls:

I sidewalls sono stati realizzati in ABS PC. I dati relativi a questo materiale fanno riferimento al database di Solidworks Simulation.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	2410000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.3897	N/A
Modulo di taglio	862200000	N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	1070	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	40000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.6: Proprietà fisiche dell'ABS PC.

- Lamine:

Le lamine sono state realizzate in acciaio C60E. I dati relativi a questo materiale fanno riferimento alla tabella 2.5 citata nel capitolo 2 della tesi.

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	2.1e+10	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.29	N/A
Modulo di taglio		N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	7850	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	356900674.5	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	710000000	N/m <sup>2</sup>

Tabella 5.7: Proprietà fisiche dell'acciaio C60E.

### 5.3 Analisi numerica

Una volta definito il modello fisico di riferimento, è possibile procedere con le analisi numeriche. La prima fase consiste nella definizione delle condizioni al contorno, che includono i vincoli e i carichi da applicare allo sci. Questo processo di definizione delle condizioni al contorno segue lo stesso approccio descritto nel capitolo 4 della tesi e ricalca le impostazioni utilizzate durante le prove sperimentali eseguite.

Per semplificare la trattazione si applica il comando “tratta come trave” al laminato centrale del core (quello in balsa). In questo modo si ottengono tre giunzioni, due alle estremità e una centrale, sulle quali è possibile applicare i vincoli e i carichi.

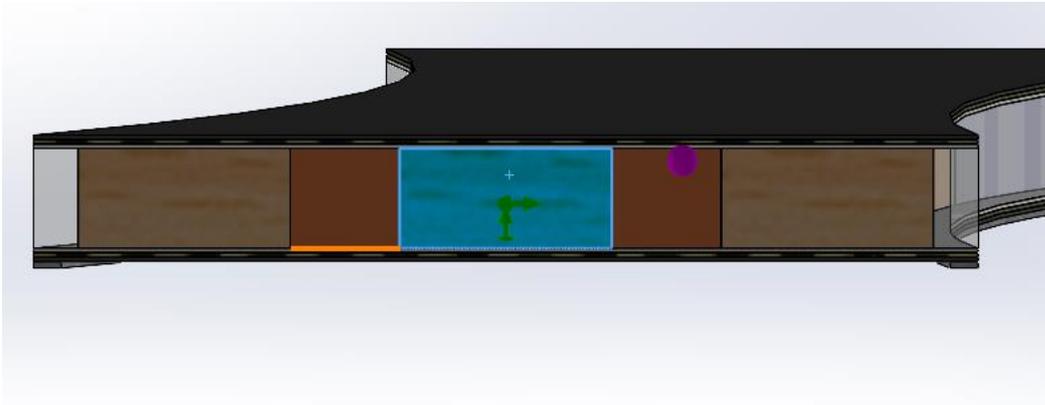


Figura 5.17: Applicazione del comando “tratta come trave” al laminato centrale del core.

Si procede definendo i vincoli da attribuire alla trave: si applicano due vincoli non movibili ai due giunti posti alle estremità della trave, impedendo così qualsiasi traslazione dei punti.

Successivamente, si definiscono e posizionano i carichi esterni da applicare sull'assieme. Per garantire che la forza agisca esattamente al centro dello sci, si sfrutta la giunzione centrale, che si trova nel punto di accoppiamento dei due elementi simmetrici del core, entrambi di lunghezza  $l = 850$  mm. Le forze vengono indirizzate ortogonalmente verso il basso, nell'orientamento desiderato, e il loro valore dipende dalle masse dei carichi utilizzati nell'analisi sperimentale.

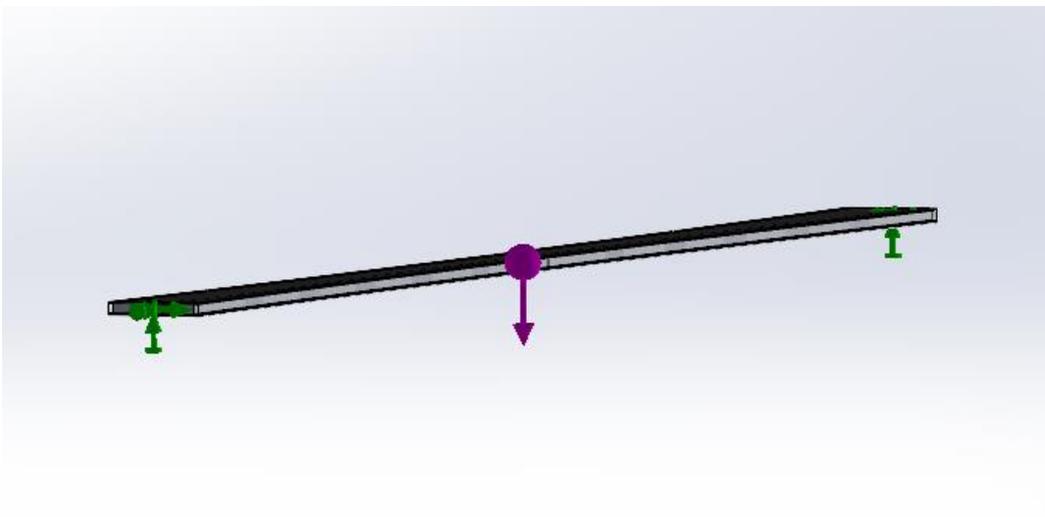


Figura 5.18: Applicazione dei vincoli e dei carichi al modello.

Infine si procede con la creazione della mesh per l'assieme, che risulta essere preimpostata dal programma con i seguenti valori:

Nome studio	Analisi statica 1 (-Default-)
DettagliTipo di mesh	Mesh mista
Mesher usato	Mesh basata su curvatura di blend
Punti jacobiani per mesh di alta qualità	16 punti
Verifica jacobiana per shell	Disattivo
Dimensione massima elemento	26,413 mm
Dimensione minima elemento	26,413 mm
Qualità mesh	ottima
Nodi totali	26320
Elementi totali	10933

Tabella 5.8: Tabella di Solidworks Simulation indicativa dei parametri della mesh. In questo caso la mesh presenta 26320 nodi totali.

A questo punto si avvia la simulazione, che restituisce un'analisi numerica e grafica riguardante la deformazione e lo spostamento dello sci. Attraverso alcune selezioni, è possibile visualizzare il valore di spostamento massimo dello sci deformato, corrispondente alla freccia di deformazione calcolata nell'analisi sperimentale, e posta a metà dello sci.

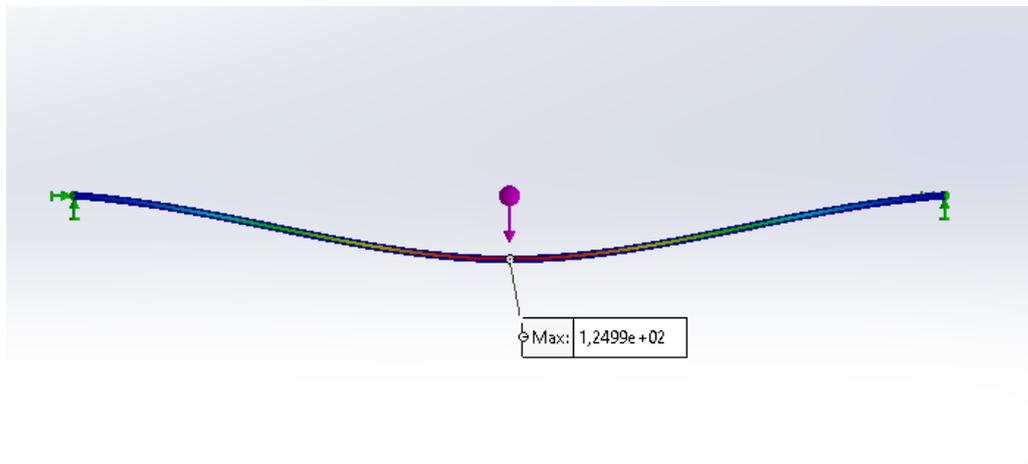


Figura 5.19: Immagine raffigurante il modello dello sci in Solidworks dopo lo studio. Il programma rappresenta in un'icona il valore massimo dello spostamento (f).

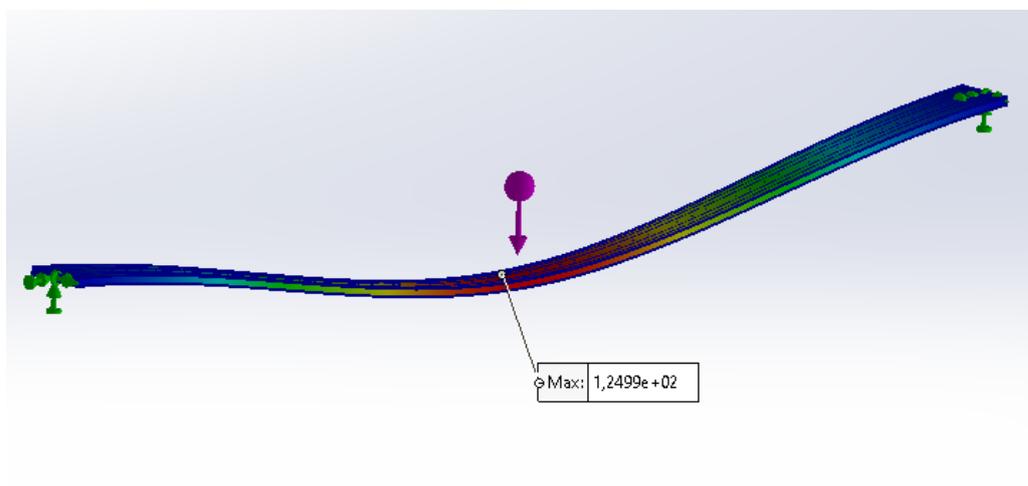


Figura 5.20: Altra prospettiva del modello dello sci in Solidworks dopo lo studio. Indicato il valore massimo della freccia di deformazione in mm per  $F= 568,98 \text{ N}$

Si riportano di seguito i valori ottenuti per le frecce riferite ai differenti valori di massa  $m$  dei gravi:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	Freccia (f) [mm]
58	568,98	124,9
54	529,74	116,2
50	490,50	106,5
42	412,02	90,5
36	353,16	77,6
24	235,44	51,7
19,5	191,30	41,1
18	176,58	38,1
13	127,53	27,8

Tabella 5.9: Tabella rappresentante i valori numerici della analisi numerica tramite Solidworks Simulation.

Confrontando i valori della tabella 5.9 con quelli della tabella 4.4 si osserva che la differenza tra i valori della freccia è superiore a dieci volte. Nella trasformazione dalla trave utilizzata nel capitolo 4 al modello di utilizzato in questo capitolo, sono stati utilizzati materiali specifici con proprietà distinte. L'introduzione di tali materiali ha provocato una modificazione nel comportamento di flessione dello sci, rendendolo più flessibile e aumentando la sua freccia di deformazione. Di conseguenza, lo sci manifesta uno spostamento in corrispondenza della sezione più sollecitata che si avvicina maggiormente a quello osservato durante le prove sperimentali.

Si verifica successivamente che lo sci presenti un comportamento di tipo elastico per ciascuno dei carichi applicati. Per fare ciò si ricava il coefficiente di sicurezza statico della sezione più sollecitata, ossia quella centrale, per il carico più gravoso e si verifica che tale valore sia superiore a quello per cui si può avere snervamento del materiale ossia  $v_s=1,6$ .

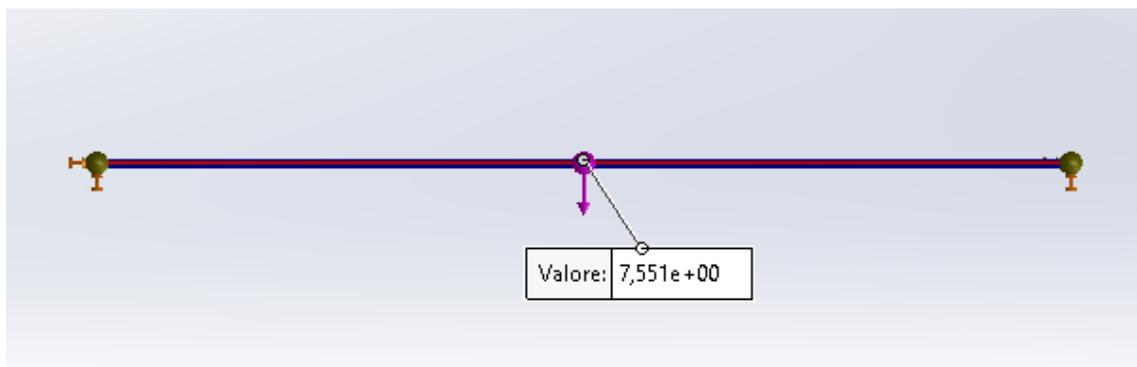


Figura 5.21: Grafico del coefficiente di sicurezza statico per lo sci per il carico  $F= 568,98$  N.

La procedura guidata Fattore di sicurezza consente di valutare la sicurezza del modello in base ad un criterio di cedimento selezionato. Per gli assiemi, il fattore di sicurezza viene calcolato dai valori non medi dei componenti di sollecitazione. Quando si seleziona modalità “Automatica”, il software seleziona il criterio di fallimento più appropriato per tutti i tipi di elemento. Dal momento che per nessun materiale è stato assegnato un criterio di cedimento di default nella finestra di dialogo “Materiale”, il software assegna il criterio di sollecitazione Mohr-Coulomb.

Dunque applicando il carico massimo  $F= 568,98$  N si ottiene un coefficiente di sicurezza statico in corrispondenza della sezione più sollecitata pari a  $v_s= 7,55$ . Tale valore risulta essere superiore al valore minimo richiesto di 1,6, pertanto si ha che lo sci presenta un comportamento elastico per ogni condizione di carico

## 5.4 Confronto

Si esegue ora il confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente e quelli numerici.

Si comparano i dati per la freccia della tabella 4.2 con quelli della tabella 5.9:

Massa (m) [kg]	Forza (F) [N]	Freccia (f) numerica [mm]	Freccia (f) sperimentale [mm]	Scarto percentuale ( $\Delta\%$ )
58	568,98	124,9	125	0,08
54	529,74	116,2	114	1,9
50	490,50	106,5	104	2,4
42	412,02	90,5	88	2,8
36	353,16	77,6	79	1,7
24	235,44	51,7	52	0,6
19,5	191,30	41,1	40	2,5
18	176,58	38,1	37	2,9
13	127,53	27,8	27	2,9

Tabella 5.10: Confronto tra valori numerici e sperimentali della freccia (f).

Dalla tabella 5.10 si può osservare che lo scarto percentuale medio tra i valori della freccia calcolata numericamente utilizzando il modello Solidworks e i valori ricavati sperimentalmente è del 1,97%. Questa leggera discrepanza potrebbe essere attribuita a due fattori principali: una approssimazione nella realizzazione del modello ed errori nelle misurazioni sperimentali.

In primo luogo bisogna considerare gli errori legati alla progettazione del modello. Nel processo di progettazione del modello, si è scelto di trascurare i due strati di topsheet e soletta presenti nello sci reale. Questa semplificazione potrebbe avere un leggero impatto sulle deformazioni del modello rispetto a quelle sperimentali. Inoltre, una possibile ragione di scarto percentuale potrebbe derivare dal fatto che non è stata considerata la variazione dello spessore dello sci lungo la sua lunghezza, la quale potrebbe influire sulla distribuzione dello sforzo e sulla flessione del modello rispetto allo sci reale. Inoltre è importante sottolineare che non si conoscono con precisione gli spessori degli strati di materiale che compongono lo sci analizzato nella prova sperimentale e le loro caratteristiche specifiche. Pertanto, i valori utilizzati nella creazione del modello Solidworks sono una approssimazione. Anche questa imprecisione può contribuire allo scarto percentuale osservato tra i risultati sperimentali e quelli numerici.

In secondo luogo è importante considerare che i valori sperimentali della freccia sono soggetti a diverse fonti di incertezza. La misurazione della freccia sperimentale dipende dagli strumenti utilizzati. Nonostante l'utilizzo di strumenti di misurazione accurati, esiste sempre una certa incertezza associata alle misurazioni stesse. Piccole variazioni nella sensibilità degli strumenti o nell'allineamento possono influire sui valori ottenuti. Inoltre, la procedura di misurazione stessa può introdurre incertezza. La posizione dei punti di misurazione, l'applicazione del carico e le condizioni ambientali possono avere un impatto sulla precisione delle misurazioni. Anche la variabilità umana nell'esecuzione della procedura di misura può contribuire all'incertezza complessiva dei valori ottenuti. Pertanto, è importante considerare che i valori sperimentali della freccia riportati nella tabella sono approssimativi e soggetti a un margine di errore.

In generale comunque, il modello dello sci realizzato con Solidworks sembra approssimare in modo soddisfacente il comportamento dello sci reale. Le deformazioni numeriche della freccia si discostano solo di pochi millimetri rispetto alle misurazioni sperimentali. Questo indica che il modello è in grado di catturare in modo adeguato le caratteristiche generali dello sci e il suo comportamento sotto carichi di flessione.

Un'altra osservazione evidenziata dal confronto tra i valori numerici e sperimentali riguarda il comportamento elastico dello sci. Durante le prove sperimentali lo sci ha sempre dimostrato un comportamento elastico. Ciò significa che una volta rimosso il carico applicato, lo sci tornava alla sua configurazione iniziale senza deformazioni permanenti. Questo fatto è confermato anche dai dati numerici, in quanto il coefficiente di sicurezza calcolato sulla sezione più sollecitata è risultato maggiore rispetto al valore minimo, indicando l'assenza di snervamento e confermando il comportamento elastico dello sci.

## 5.5 Conclusioni

Lo studio analitico-numerico e sperimentale condotto sullo sci ha fornito importanti risultati e contribuito alla comprensione del suo comportamento sotto carichi di flessione.

Si è partiti definendo le caratteristiche fondamentali dello sci e dei suoi componenti, concentrandosi sull'analisi degli strati e dei materiali che lo compongono. Successivamente, è stata eseguita una prova sperimentale a flessione sullo sci reale, che ha permesso di raccogliere dati e informazioni preziose.

In seguito, è stata condotta un'analisi comparativa tra l'analisi analitica e numerica con Solidworks Simulation applicate ad un modello di sci semplificato. Questo ha permesso di verificare l'equivalenza tra i due modelli di analisi e di stabilire una base solida per gli studi successivi.

Con i dati accumulati dalle ricerche e con l'esperienza acquisita dalla prima analisi, è stato sviluppato un modello realistico dello sci su Solidworks. È stata poi eseguita un'analisi utilizzando la simulazione numerica, dato che la complessità del modello non consentiva un'analisi di tipo analitico. Tale analisi ricalcava lo stesso procedimento seguito nella procedura sperimentale. I risultati dell'analisi numerica sono stati confrontati con quelli dell'analisi sperimentale, dimostrando una buona coincidenza con lievi discrepanze attribuibili alle semplificazioni nella progettazione e agli errori di misura. Il modello numerico è stato quindi in grado di riprodurre con buona approssimazione il comportamento sperimentale dello sci.

In conclusione, si è ottenuto un modello virtuale e numerico in grado di riprodurre in modo accurato il comportamento di uno sci durante il carico di flessione. Questo rappresenta un importante strumento per comprendere e prevedere le prestazioni degli sci, consentendo una progettazione più accurata e ottimizzata. Il lavoro svolto apre la strada a ulteriori studi e sviluppi nel campo dell'ingegneria degli sci e dei materiali, contribuendo alla continua evoluzione e miglioramento di questi fondamentali strumenti per gli sport invernali.

## Bibliografia

- [1] <https://www.rossignol.com/it/origins-legendary-skis>
- [2] <https://www.atomic.com/it-it/shop-emea/men/skiing/ski.html>
- [3] <https://www.bfoxes.it/costruzione-degli-sci>
- [4] <https://www.glisshop.it/consigli/camber-e-rocker-sci.html>
- [5] [https://www.blizzard-tecnica.com/assets/documents/blizzard/blizzard-ski-sizer\\_IT.pdf](https://www.blizzard-tecnica.com/assets/documents/blizzard/blizzard-ski-sizer_IT.pdf)
- [6] Agenda degli sport invernali – Stagione 2022/2023 sci alpino, [https://fisi.org/wp-content/uploads/AGENDA\\_SPORT\\_INVERNALI\\_2022\\_2023\\_SCI\\_ALPINO\\_update\\_14\\_03\\_2023.pdf](https://fisi.org/wp-content/uploads/AGENDA_SPORT_INVERNALI_2022_2023_SCI_ALPINO_update_14_03_2023.pdf), **3.3.15**, 17-18
- [7] [https://www.head.com/it\\_IT/ski/skis.html](https://www.head.com/it_IT/ski/skis.html)
- [8] <https://www.nordica.com/italia/it/men/skis/race/dobermann-fis/dob-gs-wc-dept-plate>
- [9] [https://elanskis.com/it\\_it/sci-uomo/all-mountain/element-orange-light-shift](https://elanskis.com/it_it/sci-uomo/all-mountain/element-orange-light-shift)
- [10] AMAG Titanal for sports, product application, 10-11, [www.isosport.com](http://www.isosport.com)
- [11] Isosport, Isoglass laminate composites, 14, [www.isosport.com](http://www.isosport.com)
- [12] Isosport, Isowoodcore core materials, 6-7, [www.isosport.com](http://www.isosport.com)
- [13] Haberkorn, A1468 vulcanised rubber foil prepared for bonding, technical data, <https://www.haberkorn.com/services/produkt-services>
- [14] <https://www.stoeckli.ch/inten/discover-more/about/manufacturing>
- [15] Luigi Caligaris, Stefano Fava, Carlo Tomasello (2016), Manuale di Meccanica, *Travi inflesse* **12**, H-181, Tabella H.46