

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

**Recupero e riutilizzo di uno scarpone da sci a fine vita.  
Ottimizzazione del processo di Design for Recycling  
con simulazione agli elementi finiti  
validata tramite correlazione di immagini digitale**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
VALORIZZAZIONE DELLE RISORSE PRIMARIE E SECONDARIE M

RELATORE:

**Chiar.ma Prof Alessandra Bonoli**

CORRELATORE:

**Prof. Martino Colonna**

**Prof. Andrea Zucchelli**

**Ing. Luca Raimondi**

**Ing. Lorenzo Crosetta**

CANDIDATO:

**Daniel Colombo**

- IV SESSIONE  
ANNO ACCADEMICO 2020/2021



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione e giustificazione della domanda di ricerca</b>	<b>1</b>
1.1	Stato dell'arte . . . . .	1
1.1.1	Soluzioni già esistenti per il riciclo degli scarponi . . . . .	3
1.1.2	Progetto Reskiboot . . . . .	4
1.2	Valorizzazione delle risorse . . . . .	5
1.2.1	Economia circolare . . . . .	6
1.2.2	Ecodesign e Design for Recycling . . . . .	7
1.3	Obiettivo dello studio . . . . .	8
1.4	Domanda di ricerca . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Strumentazione</b>	<b>13</b>
2.1	Digital Image Correlation . . . . .	13
2.1.1	Generalità sul metodo . . . . .	13
2.1.1.1	Valutazione dell'area di interesse dell'immagine . . . . .	13
2.1.1.2	Realizzazione dello schema randomico . . . . .	14
2.1.1.3	Immagine di misura . . . . .	16
2.1.1.4	caratteristiche del Pattern . . . . .	18
2.1.1.5	Misura degli spostamenti delle <i>facets</i> . . . . .	19
2.1.2	Strumentazione utilizzata . . . . .	21
2.1.2.1	Sistema DIC . . . . .	21
2.1.2.2	Sensore . . . . .	22
2.1.2.3	Sistema di illuminazione . . . . .	22
2.1.2.4	Software di elaborazione dati . . . . .	23
2.1.2.5	Pannello di calibrazione . . . . .	24
2.1.2.6	Sistema di vincolo dello scarpone . . . . .	28
2.2	Metodo agli elementi finiti . . . . .	30
2.2.1	Generalità sul metodo . . . . .	30
2.2.1.1	Formulazione variazionale fem . . . . .	31
2.2.1.2	Principi alla base dell'approssimazione del metodo FEM . . . . .	31
2.2.1.3	Significato fisico della matrice di rigidezza . . . . .	33
2.2.1.4	Metodo risolutivo del calcolatore . . . . .	33
2.2.1.5	Il problema numerico . . . . .	34
2.2.1.6	Integrazione rispetto al tempo . . . . .	34
2.2.1.7	Approcci di simulazione . . . . .	35

2.2.2	Strumentazione utilizzata . . . . .	36
2.2.2.1	Ansys Workbench . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Caratterizzazione del materiale dello scarpone</b>	<b>37</b>
3.1	Materiale vergine . . . . .	37
3.1.1	Disassemblaggio scarpone . . . . .	38
3.1.2	Caratterizzazione materiale scafo e materiale gambetto . . . . .	39
3.2	Blend polimerica tra i materiali di scafo e gambetto . . . . .	42
3.2.0.1	Preparazione della blend . . . . .	42
3.2.0.2	Caratterizzazione della blend . . . . .	43
3.3	Calibrazione e validazione del modello FEM di un materiale iperelastico . . . . .	44
3.3.1	Curva sperimentale . . . . .	44
3.3.2	Simulazione FEM . . . . .	45
3.3.3	Conclusioni . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Spessore scarpetta</b>	<b>61</b>
4.1	Descrizione problema . . . . .	61
4.2	Scansione 3D . . . . .	62
4.3	Post-produzione . . . . .	63
4.3.1	Differenza tra formato STL e formato STEP . . . . .	64
4.3.2	Elaborazione dei file . . . . .	66
4.4	Analisi delle acquisizioni . . . . .	73
4.4.1	Difetti e complicazioni . . . . .	76
4.5	Conclusioni . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Analisi dei meccanismi di chiusura dello scafo</b>	<b>83</b>
5.1	Descrizione del problema . . . . .	83
5.2	Problematiche relative alla calibrazione . . . . .	84
5.2.1	Processo di calibrazione . . . . .	84
5.2.2	Supporto giroscopico del pannello . . . . .	85
5.3	Acquisizione DIC . . . . .	86
5.3.1	Impostazione del problema . . . . .	86
5.3.2	Acquisizioni e analisi delle superfici . . . . .	90
5.3.2.1	Gancio1 . . . . .	92
5.3.2.2	Gancio2 . . . . .	97
5.3.2.3	Fianco . . . . .	102
5.3.3	Commento dei risultati . . . . .	104
5.4	FEM . . . . .	105
5.4.1	Geometria semplificata . . . . .	105
5.4.1.1	Impostazione del modello . . . . .	105
5.4.2	Scafo completo . . . . .	109
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>113</b>
<b>A</b>	<b>Appendice A</b>	<b>115</b>

A.1 Gancio1 . . . . .	115
A.2 Gancio2 . . . . .	120
<b>B Appendice B</b>	<b>125</b>



# List of Figures

1.1	Componenti di uno scarpone da sci . . . . .	2
1.2	Materiale dopo la separazione . . . . .	4
1.3	Scarponi da riciclare . . . . .	5
1.4	Ciclo di vita delle materie . . . . .	6
1.5	Confronto tra ciclo lineare e ciclo chiuso . . . . .	7
1.6	Configurazione del flex test . . . . .	9
1.7	Confronto . . . . .	9
1.8	Spessore utilizzato in sostituzione alla scarpetta . . . . .	10
1.9	Scafo e gambetto aperti . . . . .	11
2.1	Riferimenti per il tracking . . . . .	14
2.2	Aerografo per la realizzazione del pattern . . . . .	15
2.3	Spazzola per creazione pattern . . . . .	15
2.4	Maschera per la realizzazione del pattern . . . . .	15
2.5	Scala di grigi dei pixel . . . . .	16
2.6	Facets . . . . .	17
2.7	Caratteristiche del buon pattern . . . . .	18
2.8	Dimensione corretta <i>speckles</i> . . . . .	19
2.13	Sistema ARAMIS Adjustable . . . . .	22
2.14	Sistema di illuminazione . . . . .	23
2.15	oggetti di calibrazione . . . . .	24
2.16	Lunghezze caratteristiche della calibrazione . . . . .	25
2.17	Apertura dell'obbiettivo . . . . .	26
2.18	Pannello di calibrazione . . . . .	26
2.19	Profondità del campo di misura . . . . .	27
2.20	Scarpometro . . . . .	28
2.21	Particolare sull'attacco dello scarpone . . . . .	29
2.22	Panoramica configurazione di misura . . . . .	29
2.23	Approssimazione della funzione incognita . . . . .	32
3.1	Scarponi a disposizione per i test . . . . .	37
3.2	Componenti scarpone . . . . .	38
3.3	Stampaggio provini . . . . .	39
3.4	Provini scafo . . . . .	40
3.5	Set-up prova trazione . . . . .	41

3.6	Provini in prova di trazione uniassiale . . . . .	41
3.7	Oso di cane ISO 527-1a . . . . .	44
3.8	Dati sperimentali prova di trazione blend . . . . .	45
3.9	Grafico sforzo-deformazione prova Instron blend . . . . .	48
3.10	Tabella dati sperimentali Ansys . . . . .	49
3.11	Modello Mooney-Rivlin 5 parametri su Ansys . . . . .	50
3.12	Curva del modello matematico . . . . .	50
3.13	Vincoli della simulazione FEM . . . . .	51
3.14	Spostamento imposto sul FEM . . . . .	51
3.15	Parametri della <i>mesh</i> . . . . .	52
3.16	Impostazioni dell'analisi non lineare . . . . .	52
3.17	Allungamento in y cubetto . . . . .	53
3.18	Forza di reazione sulla faccia superiore del cubetto dal FEM . . . . .	53
3.19	Confronto curva FEM con curva sperimentale . . . . .	55
3.20	Allungamento in Y cubetto nel tratto iniziale . . . . .	56
3.21	Forza di reazione sulla faccia superiore del cubetto dal FEM nel tratto iniziale . . . . .	56
3.22	Confronto curva FEM con curva sperimentale tratto iniziale . . . . .	58
4.1	Scanner Artec Eva 3D . . . . .	62
4.2	Scannerizzazione 3D . . . . .	63
4.3	Confronto tra un file STL e un file STEP . . . . .	65
4.4	Tipici errori derivanti dall'utilizzo di un file STL . . . . .	65
4.5	Immagini 2D dei vari rilievi . . . . .	67
4.6	STL risultante scarpetta . . . . .	68
4.7	STL risultante linguetta . . . . .	68
4.8	Mesh risultante dalla prima fase di post-processing . . . . .	69
4.9	Distribuzione simmetrica dei triangoli di mesh . . . . .	69
4.10	Correzione mesh da Meshmixer . . . . .	70
4.11	Correzione mesh da Meshmixer . . . . .	71
4.12	Riduzione della mesh da Rhinoceros . . . . .	71
4.13	Distribuzione simmetrica dei triangoli di mesh . . . . .	73
4.14	Analisi di spessore della parte esterna della scarpetta . . . . .	74
4.15	Analisi di spessore della parte esterna della scarpetta . . . . .	74
4.16	Analisi di spessore della parte inferiore della scarpetta . . . . .	75
4.17	Analisi di spessore della linguetta . . . . .	76
4.18	Difetto protuberanza . . . . .	77
4.19	Difetto laccio . . . . .	77
4.20	Composizione materiali scarpetta fronte . . . . .	79
4.21	Composizione materiali scarpetta retro . . . . .	79
4.22	Composizione materiali linguetta . . . . .	79
5.1	Rappresentazione schematica del <i>Flex Test</i> . . . . .	83
5.2	Assieme del supporto del pannello . . . . .	86
5.3	Confronto . . . . .	86



5.4	Supporto giroscopico con pannello montato . . . . .	87
5.9	Calibrazione utilizzata . . . . .	90
5.10	Spostamento in x del gancio 1 nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	92
5.11	Grafico dello spostamento in x del gancio 1 in tutti gli stadi senza scarpetta e gamba . . . . .	92
5.12	Spostamento in x del gancio 1 nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	93
5.13	Grafico dello spostamento in x del gancio 1 in tutti gli stadi . . . . .	93
5.14	Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	94
5.15	Grafico della Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	94
5.16	Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	95
5.17	Grafico della Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	95
5.18	Spostamento in x del gancio 2 nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	97
5.19	Grafico dello spostamento in x del gancio 2 in tutti gli stadi senza scarpetta e gamba . . . . .	97
5.20	Spostamento in x del gancio 2 nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	98
5.21	Grafico dello spostamento in x del gancio 2 in tutti gli stadi . . . . .	98
5.22	Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	99
5.23	Grafico della Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	99
5.24	Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	100
5.25	Grafico della Variazione della lunghezza relativa nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	100
5.26	Deformazione di Von Mises sul fianco nella configurazione senza gamba . . . . .	102
5.27	Grafico della Variazione della deformazione di Von Mises lungo una curva che passa per la zona più sollecitata nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	102
5.28	Deformazione di Von Mises sul fianco nella configurazione con gamba e scarpetta . . . . .	103
5.29	Grafico della Variazione della deformazione di Von Mises lungo una curva che passa per la zona più sollecitata nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	103
5.30	Porzione di scafo . . . . .	105
5.31	Incastro rastrelliera . . . . .	106
5.32	Incastro case in acciaio . . . . .	106
5.33	Cuscinetto tra la leva e la micrometrica . . . . .	107
5.34	Cuscinetto tra la leva e la micrometrica . . . . .	107
5.35	Cuscinetto tra la il ponte e il perno della micrometrica . . . . .	107
5.36	Cuscinetto tra la il ponte e la ghiera . . . . .	108
5.37	Loadstep . . . . .	108
5.38	Deformazione equivalente . . . . .	109
5.39	Mesh alloggiamenti ganci . . . . .	110
5.40	Mesh dello scafo . . . . .	110
5.41	Mesh dello scafo . . . . .	111
A.1	Spostamento in y del gancio 1 nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	115
A.2	Grafico dello spostamento in y del gancio 1 in tutti gli stadi senza scarpetta e gamba . . . . .	115
A.3	Spostamento in y del gancio 1 nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	116
A.4	Grafico dello spostamento in y del gancio 1 in tutti gli stadi . . . . .	116
A.5	Spostamento in z del gancio 1 nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	116
A.6	Grafico dello spostamento in z del gancio 1 in tutti gli stadi senza scarpetta e gamba . . . . .	117
A.7	Spostamento in z del gancio 1 nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	117

A.8	Grafico dello spostamento in z del gancio 1 in tutti gli stadi . . . . .	117
A.9	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in x nello stadio finale senza scarpetta e gamba	118
A.10	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in x nello stadio finale con scarpetta e gamba	118
A.11	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in y nello stadio finale senza scarpetta e gamba	118
A.12	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in y nello stadio finale con scarpetta e gamba	119
A.13	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in z nello stadio finale senza scarpetta e gamba	119
A.14	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in z nello stadio finale con scarpetta e gamba	119
A.15	Spostamento in y del gancio 2 nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	120
A.16	Grafico dello spostamento in y del gancio 21 in tutti gli stadi senza scarpetta e gamba . . . . .	120
A.17	Spostamento in y del gancio 2 nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	120
A.18	Grafico dello spostamento in y del gancio 2 in tutti gli stadi . . . . .	121
A.19	Spostamento in z del gancio 2 nello stadio finale senza scarpetta e gamba . . . . .	121
A.20	Grafico dello spostamento in z del gancio 2 in tutti gli stadi senza scarpetta e gamba . . . . .	121
A.21	Spostamento in z del gancio 2 nello stadio finale con scarpetta e gamba . . . . .	122
A.22	Grafico dello spostamento in z del gancio 2 in tutti gli stadi . . . . .	122
A.23	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in x nello stadio finale senza scarpetta e gamba	122
A.24	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in x nello stadio finale con scarpetta e gamba	122
A.25	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in y nello stadio finale senza scarpetta e gamba	123
A.26	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in y nello stadio finale con scarpetta e gamba	123
A.27	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in z nello stadio finale senza scarpetta e gamba	123
A.28	Grafico della Variazione della lunghezza relativa in z nello stadio finale con scarpetta e gamba	123
B.1	Assieme . . . . .	126
B.2	Barra della base . . . . .	127
B.3	Barra filettata . . . . .	128
B.4	Traversa verticale destra . . . . .	129
B.5	Traversa verticale sinistra . . . . .	130

# List of Tables

- 2.1 Dati tecnici sensore . . . . . 22
- 2.2 Configurazione standard del pannello GOM / CP 40 MV 170 mm . . . . . 27
  
- 3.1 Report gambetto . . . . . 42
- 3.2 Analisi statistica gambetto . . . . . 42
- 3.3 Report blend . . . . . 43
- 3.4 Analisi statistica blend . . . . . 43
- 3.5 Forza e allungamenti estratti dal FEM . . . . . 54
- 3.6 Forza e allungamenti estratti dal FEM del tratto iniziale . . . . . 57
  
- 5.1 Parametri caratteristici della misurazione . . . . . 84



## Abstract

Il presente elaborato di tesi è parte di un ampio progetto, finalizzato alla realizzazione di uno scarpone da sci ottenuto per il 90% di materiale derivante dal riciclo di scarponi da sci a fine vita, all'interno del progetto LIFE RE-SKIBOOT.

Il progetto è composto da una collaborazione tra più partner, tra i quali l'azienda Dalbello produttrice degli scarponi e l'Università di Bologna. In questo contesto, l'Università di Bologna si pone l'obiettivo di realizzare la progettazione del nuovo scarpone, e caratterizzarne le proprietà flessionali avvalendosi di tecniche di simulazione numerica agli elementi finiti validata attraverso Correlazione di Immagini Digitale (DIC).

La caratterizzazione flessionale è realizzata con una prova specifica, il *Flex Test*. Questa consiste nell'imporre una flessione dorsale ad una protesi di gamba tramite una macchina di prova.

Le prime simulazioni FEM di questo complesso modello hanno evidenziato delle problematiche che hanno evidenziato la necessità di abbandonare le semplificazioni iniziali del modello, e approcciarsi ad uno studio più approfondito del materiale, e dei componenti che costituiscono lo scarpone. La presente ricerca, si pone l'obiettivo di risolvere singolarmente ognuno di questi problemi.

Inizialmente, si è realizzata la blend polimerica derivante dalla miscelazione dei materiali dello scafo e del gambetto dello scarpone a fine vita, in modo da simulare il materiale riciclato. Si è effettuata la caratterizzazione meccanica del materiale ottenuto, confrontandolo con il materiale vergine. In seguito, si è ricercato il modello costitutivo più adeguato di materiale iperelastico per il FEM. Si è quindi implementato nel codice il modello di Mooney-Rivlin del materiale.

Successivamente, si è ottenuto il modello CAD della scarpetta. A causa della mancata conoscenza della distribuzione degli spessori, e della complessità della geometria, una riproduzione tramite diretta modellazione 3D è impossibile. Si è quindi effettuata la *reverse engineering* del componente attraverso la tecnica della scansione 3D, la quale ha consentito di ottenere il file .STEP da aggiungere al modello FEM. Inoltre, la conoscenza della geometria effettiva ha consentito di realizzare il design della nuova scarpetta ottenuta da materiale riciclato.

Infine, si è utilizzata la Correlazione di Immagini Digitali (DIC) per studiare la cinematica della chiusura dei ganci dello scafo, e per studiare lo stato di deformazione residua a chiusura effettuata. Si è studiata l'influenza del piede della protesi, e della scarpetta, durante la chiusura dei ganci. In seguito, si è confrontato quanto ottenuto dalle evidenze sperimentali della DIC, con la simulazione agli elementi finiti.

Per riprodurre il *Flex Test numericamente*, in modo fedele, è necessario che lo scarpone abbia lo stesso stato di deformazione del guscio che avrebbe nella prova sperimentale; è fondamentale avere il corretto modello di materiale; ed è necessario inserire la scarpetta della simulazione per simulare il corretto trasferimento delle forze dalla gamba allo scarpone.

Si tratta di un approccio innovativo, che vede per la prima volta implementata la Correlazione di Immagini Digitali per realizzare la caratterizzazione meccanica di uno scarpone da sci.

# Chapter 1

## Introduzione e giustificazione della domanda di ricerca

### 1.1 Stato dell'arte

Lo sci è una attività sportiva che ha un impatto importante sull'ambiente a causa dell'utilizzo del terreno, dell'energia necessaria a far funzionare gli impianti sciistici, ed a causa della produzione e dello smaltimento il materiale tecnico (gli sci e gli scarponi).

Ogni anno in Europa ci sono 65 milioni di persone praticano lo sport dello sci, e ogni sciatore ha bisogno di scarponi da sci che garantiscano buone prestazioni, sicurezza e comfort ergonomico.

Gli scarponi da sci sono composti da:

- scafo;
- gambetto;
- ganci;
- suola;
- scarpetta interna;
- strap in velcro.

Lo scafo e il gambetto costituiscono il guscio esterno che ha il compito di fare da supporto. La scarpetta invece ha il compito di garantire comodità e comfort termico.

Gli scarponi da sci sono composti da moltissime parti in plastica che sono unite tra di loro tramite degli elementi connettori, talvolta metallici, come ad esempio ganci, viti o rivetti. Il guscio esterno invece invece è fatto di materiali termoplastici (generalmente poliuretani TPU, poliolefine, o poliammidi PA). La scarpetta invece è fatta con delle schiume (etilene vinil acetato EVA, e schiume a base poliolefinica PO) con diverse densità e con strati di di materiali sovrapposti uno sull'altro.



Figure 1.1: Componenti di uno scarponcino da sci[1]

A causa delle condizioni ambientali, delle caratteristiche del gesto tecnico, e della natura dei materiali, gli scarponi da sci si degradano molto velocemente. Dopo 50/80 giorni di sci il livello di comfort della scarpetta cala drasticamente a causa del deterioramento dovuto alla pressione del piede e alle condizioni di temperatura e umidità. Dopo 150/200 giorni di sci deteriora anche il guscio esterno, e il trasferimento delle forze tra la gamba dello sciatore e lo sci peggiora considerevolmente inficiando il controllo del gesto atletico, la precisione, e quindi la sicurezza. Pertanto, giunge un momento in cui lo scarponcino da sci deve essere inevitabilmente sostituito. Ogni scarponcino è destinato ad un utilizzatore diverso, ma per semplicità si possono suddividere le famiglie di scarponi in due categorie: quelli destinati al noleggio; quelli privati. Gli scarponi da noleggio hanno una vita media di 3 anni, mentre quelli privati hanno una vita media di circa 5 anni.

Il grosso problema è che, ad oggi, i materiali di uno scarponcino a fine vita non entrano nelle filiere del riciclo, ma sono generalmente mandati ad essere smaltiti in discarica. Si è tentato più volte nel passato di mettere a punto procedure per il recupero degli scarponi da sci a fine vita, ma si è sempre fallito. La difficoltà principale è dovuta alla difficoltà di disassemblaggio e separazione dei materiali componenti lo scarponcino, e i costi ad esso correlati. Un'altra criticità è legata alla difficoltà di separazione dei diversi materiali della scarpetta, e di riciclo di questi ultimi.

Quasi la totalità degli scarponi da sci a fine vita viene mandata in discarica, e questo comporta un grosso problema ambientale in quanto si tratta di grandi quantità di materiale polimerico, duro o morbido, che non viene riciclato.

Un'ulteriore problema ambientale dipende dalla quantità di scarti di produzione realizzati durante il processo produttivo della scarpetta. Questi scarti attualmente sono mandati in discarica o al massimo inceneriti per guadagnarne in recupero energetico. Nella produzione delle scarpette gli scarti di materiale possono arrivare fino al 40% della totalità del materiale usato.

Attualmente nel mondo si producono circa 3.5 milioni di paia di scarponi da sci e sono tutti fatti di materiale vergine, che viene mandato in discarica dopo soli 3/5 anni di utilizzo. In termini di numeri si parla di:

- 9.4 Kg di materia prima vergine (6.4 milioni di chilogrammi di materiale termoplastico per il guscio esterno e 3 milioni di etilene vinil acetato, e poliolefine per la produzione di scarpette).
- circa 9 milioni di chilogrammi di scarponi da sci a fine vita smaltiti come rifiuti.
- 33.800 tonnellate di emissioni di gas serra (espresse in  $CO_2$  equivalente) rilasciate nella produzione di materiale vergine.
- 963.000 GJ di olio e gas naturale necessari per la produzione della materia prima vergine.

### 1.1.1 Soluzioni già esistenti per il riciclo degli scarponi

Il materiale termoplastico del guscio è già parzialmente riciclato durante il processo di produzione. Solitamente, una percentuale variabile tra il 5% e il 20% di materiale derivante dagli scarti di produzione viene aggiunto al materiale vergine. Da questa operazione non consegue alcun calo delle proprietà meccaniche, e ciò testimonia come il materiale termoplastico possa essere riciclato con efficienza nel processo produttivo. Chiaramente si tratta di scarti di produzione che non hanno incontrato il degrado del materiale nel ciclo di vita dello scarpone, per un'analisi più accurata sarà necessaria una caratterizzazione del materiale di uno scarpone a fine vita.

Per quanto riguarda la scarpetta il problema è più complesso. Generalmente questi materiali non sono riciclati in alcun modo, e addirittura gli scarti di produzione sono mandati direttamente allo smaltimento senza essere reintegrati nel processo di produzione. Tuttavia, in altri settori si è implementato il riciclo di scarti e materiali a fine vita con la tecnica del *Rebonding*. questa consiste nel frantumare la schiuma e ricomporla mediante appositi leganti creando dei nuovi semilavorati da riutilizzare. Talvolta, per la produzione di parti delle linguette degli scarponi da sci viene già utilizzata una parte di schiuma derivata dal riciclo tramite rebonding, ma mai si è parlato di riciclare il materiale delle scarpette con questa tecnica. Ciò testimonia che effettivamente ci sia la possibilità di implementare questo processo tecnologico nel sistema di riciclo dello scarpone.

Alcune aziende hanno già tentato di introdurre dei metodi di riciclo nel ciclo produttivo degli scarponi da sci.

**Salomon** Recentemente l'azienda produttrice di materiale sciistico Salomon ha introdotto una linea di scarponi da sci realizzati con del poliuretano termoplastico (TPU) derivante dalle scarpe da running della stessa azienda. Tuttavia, il materiale utilizzato per le soles delle scarpe è considerevolmente più morbido rispetto a quello utilizzato per il guscio esterno di uno scarpone da sci, quindi il materiale riciclato è utilizzabile solo in piccole percentuali.

**Tecnica** Anche il gruppo Tecnica nel 2021 ha lavorato su un progetto di economia circolare per trasformare gli scarponi a fine vita, in materiale di seconda generazione. In questo caso il materiale che viene recuperato dagli scarponi usati non verrà necessariamente utilizzato per costruire nuovi scarponi, ma verrà utilizzato nei diversi prodotti realizzati dall'azienda.



### 1.1.2 Progetto Reskiboot

É necessario adottare delle soluzioni che diminuiscano il più possibile l'impatto ambientale di questo sport. Nell'ecosistema della progettazione degli scarponi da sci manca ancora un modello che permetta di implementare la circolarità delle materie prime. Sarebbe molto vantaggioso potere realizzare degli scarponi da sci ottenuti con la quasi totalità di materiale riciclato da vecchi scarponi da sci.

Ne consegue l'importanza di implementare un nuovo modello di economia circolare della plastica, che governi tutto il ciclo di vita del prodotto, includendo il recupero degli scarponi a fine vita e la realizzazione di scarponi composti materiale plastico (del guscio e della scarpetta) riciclato.

L'università di Bologna, in accordo con una delle aziende leader produttrici di scarponi da sci Dalbello, ed altre aziende, ha intrapreso una collaborazione con l'obiettivo di realizzare uno scarpone da sci di alta qualità, realizzato con materiale del tutto riciclato, azzerando gli scarti di post produzione della plastica.

Il traguardo consiste nell'ottenere uno scarpone da lanciare sul mercato realizzato con il 90% di materia prima riciclata, ottenuta dagli scarponi a fine vita recuperati. Lo scarpone viene macinato e le varie componenti ferrose vengono separate con un separatore magnetico. I materiali non ferrosi come l'alluminio vengono allontanati con l'aiuto di un separatore a correnti indotte. Infine, i componenti plastici vengono separati con un separatore apposito che sfrutta l'effetto elettromagnetico; ogni polimero reagisce diversamente quando sottoposto ad un campo magnetico, in questo modo i diversi materiali plastici vengono separati a seconda delle rispettive proprietà fisiche. Questo permette di separare TPU, EVA, e PO.



(a)



(b)

Figure 1.2: (a) Materiale polimerico. (b) Materiale non polimerico.

il progetto si pone l'obiettivo di realizzare 1000 paia di scarponi, caratterizzarli, e testarli su pista da sci

---

per verificarne le performance, e quindi la possibilità di commercializzazione.

Oltre ad utilizzare quasi la totalità di materiale riciclato, è importante anche sviluppare un processo produttivo che permetta di minimizzare il più possibile gli scarti di produzione (che ora si ricordano essere circa il 40%). Altrettanto importante è effettuare una progettazione del nuovo scarpone che garantisca una buona facilità nel separare i diversi materiali, plastici e non, durante il processo di riciclo. Questo consente di recuperare più materiale, e di avere una materia secondaria di maggiore qualità.

Questo sistema richiede un modello di economia circolare basato su un sistema di recupero degli scarponi a fine vita che devono essere raccolti, separati, e trasformati in materia prima seconda.

Si prevede che l'azzeramento degli scarti di produzione e la riduzione di materiale vergine dovrebbero condurre ad una diminuzione del costo dello scarpone finale di circa il 7%.



Figure 1.3: Nelle figure si vedono gli scarponi a fine vita che sono stati recuperati (a) Le linguette che. (b) Il guscio esterno composto di scafo e gambetto.

## 1.2 Valorizzazione delle risorse

lo *sviluppo sostenibile* è un processo di cambiamento che richiede di allineare i bisogni futuri con quelli attuali. Questo allineamento deve tenere conto di: un corretto sfruttamento delle risorse; direzionare in modo consapevole gli investimenti; orientare lo sviluppo tecnologico e istituzionale. Si tratta di uno sviluppo che sia in grado di soddisfare le esigenze del presente senza pregiudicare la possibilità delle future generazioni di soddisfare le proprie.

Le azioni alla base del raggiungimento dello sviluppo sostenibile sono:

- riciclo.
- recupero;

Soddisfando questi principi si avvia un ciclo virtuoso in grado di apportare vantaggi in molti settori, come quello ambientale, quello economico, energetico, e sociale.

In questi termini il tema dei rifiuti è di grande importanza. Ogni anno si producono centinaia di milioni di tonnellate di rifiuti, spesso non biodegradabili, come nel caso degli scarponi da sci.

È importante chiarire la distinzione tra risorsa primaria, e risorsa secondaria. La prima deriva da una materia prima naturale, mentre la seconda deriva dal recupero e riciclo di un rifiuto.

Le materie prime non sempre sono fonti rinnovabili<sup>1</sup>, e pertanto è necessario recuperarle, riciclarle, e riutilizzarle. la pratica del riciclo consente di ridurre il consumo di materie prime, e coerentemente riduce i rifiuti e l'inquinamento derivante da questi.

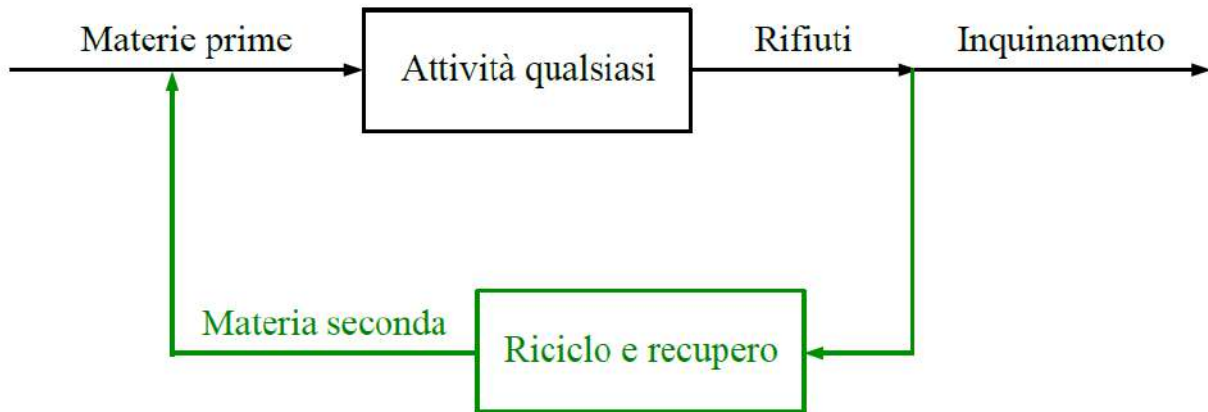


Figure 1.4: Ciclo di vita delle materie.

### 1.2.1 Economia circolare

Quanto esposto in precedenza fa intuire che vi sia la necessità di adottare un modello economico apposito, che sia fondato sul recupero e riutilizzo delle risorse e dei prodotti.

Con *Economia Circolare* si intende un insieme di processi tecnologici e sistemi produttivi nel quale le stesse risorse vengono utilizzate più volte. Sparisce il concetto di scarto e il rifiuto diventa una nuova risorsa. Ogni prodotto è composto da parti "tecniche" e parti "biologiche"; le parti tecniche vengono reinserite nel circolo produttivo per un nuovo assemblaggio e riutilizzo, mentre le parti biologiche vengono destinate al compostaggio, non essendo pericolose per l'ambiente.

Il nome di questo sistema economico deriva dal fatto che si passa da un ciclo lineare, nel quale il prodotto una volta raggiunto il fine vita diventa un rifiuto che deve essere smaltito, ad un ciclo chiuso nel quale il prodotto a fine vita viene riciclato e rimesso nuovamente nel mercato. Il riutilizzo di un prodotto può avvenire su più livelli: è possibile riciclarlo completamente, oppure aggiustarlo, oppure separarne dei componenti per utilizzarli in altre applicazioni.

Lavorare a ciclo chiuso permette di allungare considerevolmente il ciclo di vita di un del materiale, riducendone l'impatto ambientale in termini di produzione, e smaltimento.

<sup>1</sup>Una fonte si dice *rinnovabile* quando si rigenera da se stessa in tempi paragonabili a quelli del suo consumo. Se la risorsa si consuma totalmente senza che riesca a rigenerarsi in tempo, si parla di fonte non rinnovabile.



Figure 1.5: Confronto tra ciclo lineare e ciclo chiuso [2]

## 1.2.2 Ecodesign e Design for Recycling

Il *Design Industriale* è il processo di progettazione teso a soddisfare un determinato bisogno. Attraverso la progettazione del prodotto industriale vengono definiti lo scopo, la forma, il materiale, e la tecnologia per la realizzazione del bene.

La disciplina del design è un processo organizzato che ha come obiettivo finale quello di creare innovazione. Oltre allo stereotipo di sola definizione estetica della forma del prodotto, il design è anche un'attività processuale che interagisce con utenti e impresa per la realizzazione di beni innovativi che soddisfino nuovi modelli d'uso e stili di vita. È una disciplina in costante evoluzione e multidisciplinare.

L'ambiente concorre alla definizione del design, divenendo un fattore di indirizzo nello sviluppo del prodotto, e assumendo lo stesso status di qualunque altro valore industriale. In generale nella famiglia che possiamo chiamare dell'*Ecodesign*, fanno parte pratiche come quella del *Design for Recycling*, e *Design for Disassembly*.

Adottare un approccio improntato verso l'ecodesign potrebbe tradursi per l'azienda in un investimento iniziale che comporta un costo. Tuttavia quanto speso verrà recuperato nel tempo in termini economici, e di salute ambientale. Il miglioramento in termini di impatto ambientale avviene con un controllo dell'attività di progettazione in ottica di:

- proteggere l'ambiente;
- avere vantaggi economici;
- adempiere agli obblighi legislativi.

Il *Design for Recycling* (DfR) indica una progettazione orientata pienamente al riciclo del prodotto a fine vita. Si cerca di massimizzare il profitto massimizzando il numero di parti da riciclare e minimizzando il numero di parti non riciclabili. Queste operazioni possono consistere nello scegliere determinati materiali più

sostenibili di altri, oppure modificando le caratteristiche di forma e di connessione tra i corpi componenti l'oggetto.

Quando si parla di *Design for Recycling* ci si riferisce intrinsecamente anche al *Design for Disassembly*, componente fondamentale per ottenere un prodotto facilmente riciclabile. Il *Design for Disassembly* è una tipologia di produzione *green* che mira alla progettazione di prodotti che possono essere facilmente smontati e riutilizzati in altre generazioni di prodotto (secondo i principi del DfR). Progettare secondo quest'ottica permette anche di facilitare l'accesso alla manutenzione, al ricambio di parti più o meno piccole, il che permette di allungare la vita del prodotto. Bisogna concepire e costruire i prodotti in un orizzonte temporale lungo.

Per progettare in *Ecodesign* è necessario seguire alcune regole:

- usare materiali compatibili con il riciclaggio;
- servirsi del minor numero possibile di componenti, e tipologie di componenti;
- standardizzare;
- facilitare la separazione e mantenere una buona accessibilità ai componenti per una eventuale sostituzione.

## 1.3 Obiettivo dello studio

Il design dello nuovo scarpone del progetto Reskiboot è realizzato in due strade parallele. Una riguarda il guscio esterno, e l'altra la scarpetta. il lavoro è impostato considerando le informazioni ottenute nel lavoro preparatorio realizzato prima dell'inizio del progetto; tenendo conto dei problemi della progettazione attualmente utilizzata, in termini di proprietà flessionali.

Lo scarpone finale sarà caratterizzato utilizzando un protocollo ben definito per i prodotti commerciali. Questo metodo prevede di misurare la rigidità flessionale dopo un determinato numero di cicli di sciata. Il secondo test consiste nell'impattare con uno strumento a pendolo lo scarpone, e verificarne la resistenza a rottura al limite di sicurezza di 60J.

Al momento della presa in carico del progetto, era già stato performato un primo design in ottica di riciclo. Nello specifico si era studiata la rigidità flessionale di uno scarpone già esistente a fine vita.

Il test consiste nel misurare il *Flex index* dello scarpone, e misurarne lo stato di deformazione critica con il sistema di correlazione digitale delle immagini. I risultati sperimentali sono poi confrontati con i risultati ottenuti dalla simulazione agli elementi finiti della stessa prova.

Il *Flex Test* consiste nel simulare il gesto della sciata con una pressa, tenendo lo sci vincolato ad una particolare struttura chiamata *scarpometro*.

Riassumendo, la linea di progettazione seguirà una prima fase di caratterizzazione meccanica sperimentale (utilizzando la DIC), e una seconda fase di caratterizzazione meccanica numerica (con simulazione FEM).

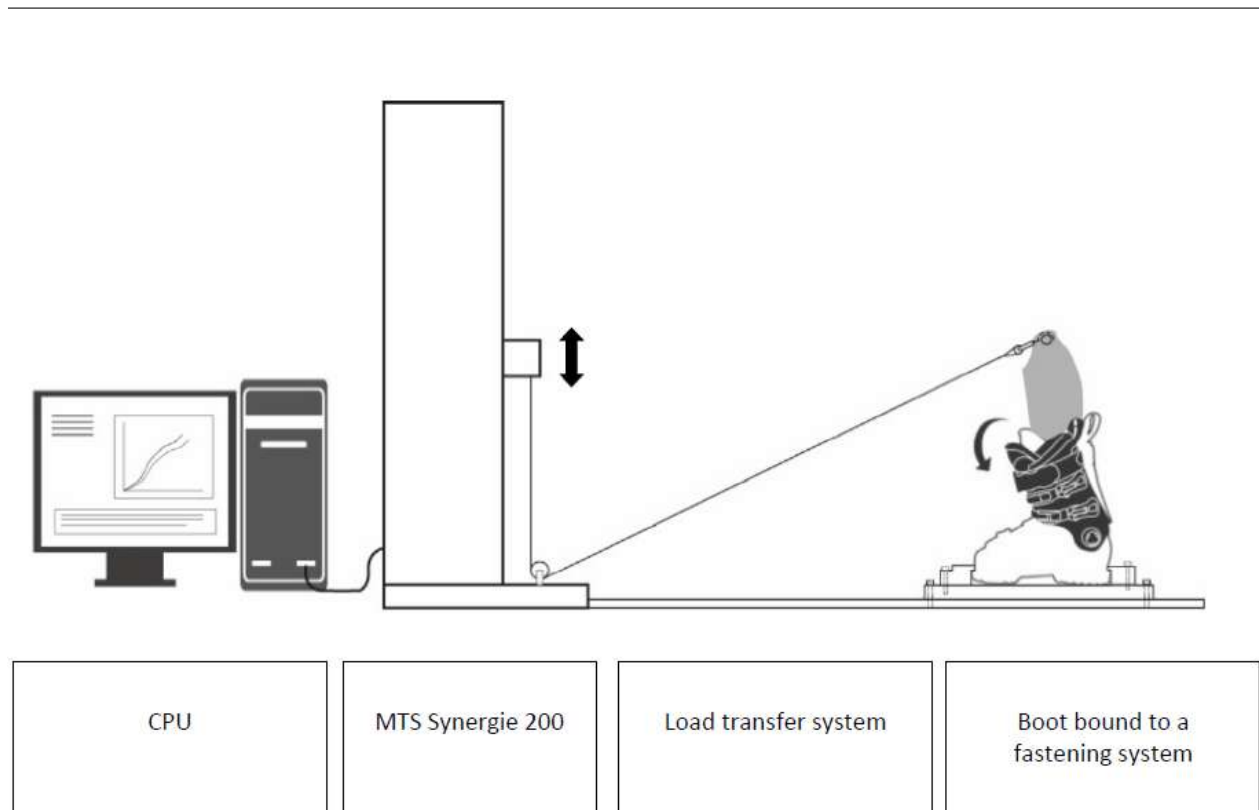
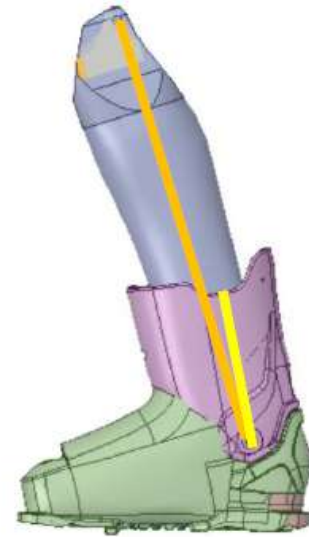


Figure 1.6: Configurazione del flex test.



(a)



(b)

Figure 1.7: Nelle figure si vedono le due configurazioni che vengono confrontate. (a) La configurazione della prova sperimentale. (b) Configurazione della prova numerica agli elementi finiti.

Avere un modello FEM funzionante è di fondamentale importanza per la realizzazione del nuovo design dello scarpone; prima di realizzare i nuovi stampi bisogna conoscere il comportamento del nuovo scarpone, e l'unico modo per farlo con dei test non invasivi è proprio la simulazione agli elementi finiti.

Lo strumento che permetterà di giustificare le considerazioni fatte, e che consentirà di validare il modello è la Digital Image Correlation (DIC), che verrà discussa in un capitolo dedicato.

Replicare sul FEM una prova di questo tipo non è semplice; ci sono molti corpi e molte variabili da gestire ed ottimizzare. Nonostante questo primo confronto abbia dato dei risultati interessanti e verosimili, ci sono delle importanti deviazioni tra i risultati del FEM e quelli della DIC. Questo elaborato di tesi si pone l'obiettivo di individuare le principali problematiche del modello FEM e risolverle, ottenendo un modello FEM il più fedele possibile con la configurazione reale.

I problemi principali emersi sono tre, e ora verranno descritti in breve.

**Modello del materiale** Il materiale termoplastico di cui è realizzato il guscio dello scarpone da sci ha delle importanti caratteristiche viscoelastiche. Visti i comportamenti meccanici che dimostra a trazione, si può parlare di materiale iperelastico. Questa famiglia di materiali deve essere definita sul software di simulazione in un modo ben preciso, non è sufficiente utilizzare un semplice modello di materiale isotropo lineare, come è stato fatto nel design preliminare di cui sopra si è discusso.

Inoltre, lo scarpone definitivo sarà realizzato con un materiale derivante dalla macinazione del materiale dello scafo e del gambetto, che verranno successivamente miscelati a formare una blend polimerica dei due.

**Scarpetta** A causa del processo produttivo della scarpetta, non esiste un modello CAD. Si è studiato come sia di fondamentale importanza il contatto tra la protesi della gamba, la scarpetta, e il gambetto. La presenza della scarpetta è resa necessaria dal fatto che senza di essa ci sarebbero dei contatti non lineari tra la gamba e lo scafo derivati da un impatto tra questi ultimi. Questo impatto non è semplice da modellare, ed inoltre non da una corretta rappresentazione della situazione reale. A questo fine, per la simulazione preliminare si è modellato una simil scarpetta con delle operazioni booleane, posizionata nel mezzo tra gamba e gambetto. Questo componente permette di avere un costante contatto tra i due componenti, senza impatto, e quindi di escludere i contatti non lineari. Non si tratta veramente di una scarpetta, ma di un semplice spessore.

Per avere un'idea approssimativa dei risultati questo spessore poteva funzionare, ma per ottimizzare la simulazione è necessario avere un modello più verosimile.



Figure 1.8: In figura si vede (a) la configurazione gamba-scarpone senza lo spessore. (b) e la configurazione dopo l'aggiunta della simil-scarpetta.

---

**Ganci di chiusura** Il modello FEM è stato realizzato con i file CAD di scafo e gambetto che sono stati forniti dai produttori dello stampo. Tuttavia, il file CAD originale vede lo scafo e il gambetto "aperti"; i lembi non sono sovrapposti tra di loro. Con delle molle virtuali è stato possibile avvicinare i lembi di scafo e gambetto, ma per simulare correttamente la situazione reale è necessario che la chiusura di questi sia compatibile con la configurazione reale ottenuta chiudendo i ganci dello scarpone, con la scarpetta e la protesi di gamba inserita. Questa configurazione vede uno stato tensionale e di deformazione dello scafo ancora prima di applicare il carico. La mancanza di questo stato tensionale chiaramente inficia notevolmente i risultati letti dalla simulazione. Questa è la problematica più complicata da risolvere.

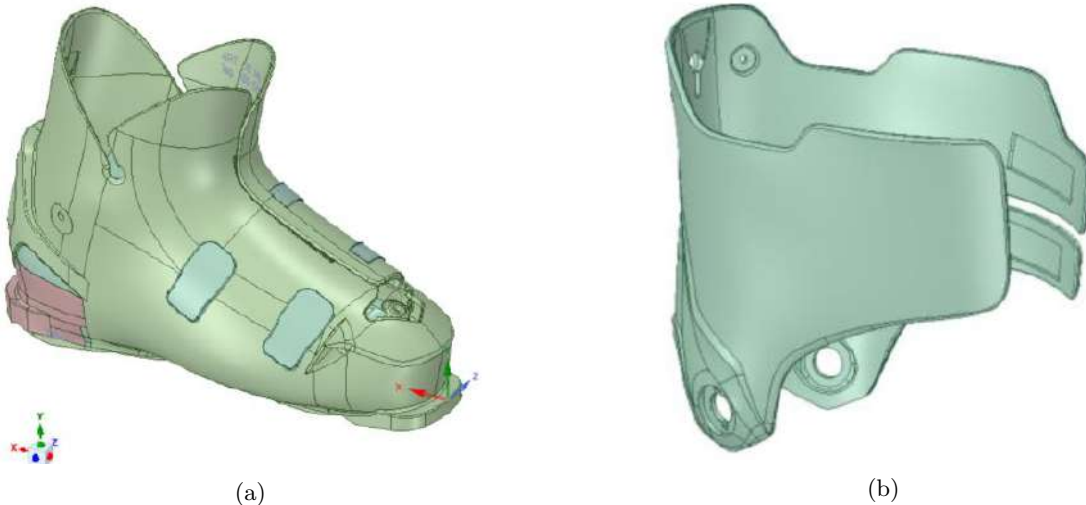


Figure 1.9: In figura si vedono lo scafo e il gambetto che non presentano la sovrapposizione dei lembi caratterizzata dalla chiusura dello scarpone con i ganci. In figura (a) lo scafo e in figura (b) il gambetto.

## 1.4 Domanda di ricerca

La prima fase della ricerca consisterà nell'effettuare una caratterizzazione completa del materiale dello scafo, quello del gambetto, e del materiale ottenuto dalla blend polimerica dei due. In seguito, si indagherà sul modello che meglio rappresenta il comportamento di questi materiali all'interno dell'ambiente di simulazione.

Nella seconda fase della ricerca si otterrà un modello CAD funzionante della scarpetta. Il modello verrà realizzato con la tecnica di scannerizzazione fotogrammetrica 3D. Verranno studiati gli spessori della scarpetta e ne sarà studiato il nuovo design.

Infine l'ultimo stadio di questo studio consisterà nello studiare con la DIC la cinematica dei ganci durante la chiusura, saranno montati i ganci sullo scafo nel FEM, e verrà riprodotta la chiusura (sia sperimentalmente che sul FEM). Successivamente, sempre con la DIC, verrà studiato il campo di deformazioni sul fianco dello scafo e sarà poi confrontato con quello risultante dalla simulazione FEM per verificare quanto fedelmente la simulazione possa riprodurre la corretta configurazione di prova.





# Chapter 2

## Strumentazione

### 2.1 Digital Image Correlation

#### 2.1.1 Generalità sul metodo

La DIC (Digital Image Correlation o Correlazione di Immagini Digitale) è una procedura di calcolo di spostamenti, deformazioni, e sforzi attraverso un metodo ottico non invasivo su provini sottoposti a sollecitazioni. Questa tecnologia performa valutazioni di coordinate 2D o 3D avvalendosi di un sistema di telecamere. Nello specifico, si adotta un sistema ad una telecamera per le valutazioni 2D e un sistema stereo multi camera per il 3D. La procedura di calcolo viene eseguita su una singola immagine o una serie di immagini registrate dalle telecamere. Se l'acquisizione di immagini avviene in un periodo di tempo, dagli spostamenti, è possibile ottenere con delle procedure di derivazione anche le velocità e le accelerazioni. Dall'interpretazione degli spostamenti locali delle coordinate è poi possibile calcolare le deformazioni e le velocità di deformazione. Grazie alla capacità delle telecamere di riconoscere e tracciare il percorso di migliaia di coordinate, si ottengono come risultati dei dati di misurazione a tutto campo e con una risoluzione molto elevata.

##### 2.1.1.1 Valutazione dell'area di interesse dell'immagine

Affinché il software sia in grado di riconoscere tutti i punti del provino durante l'applicazione del carico, è necessario ricoprire la superficie con un pattern di riferimento. A seconda di quali siano le esigenze di ogni singolo caso di studio si possono adottare due soluzioni:

- Marker point;
- Pattern stocastico.

Nel caso la misura ricercata fosse uno spostamento abbastanza semplice, si preferisce l'utilizzo dei marker fig.[2.1a], sono delle semplici geometrie applicate come adesivo sulla superficie di interesse. Nel caso l'output fossero degli spostamenti più complessi, delle deformazioni, o delle velocità, è necessario invece usare un pattern stocastico fig.[2.1b], solitamente realizzato con uno spray o con un aerografo.

I marker sono dei degli adesivi circolari bianchi con una corona circolare nera che li contorna e un punto al centro. Il contrasto creatosi tra bianco e nero permette al software GOM di distinguere i pixel bianchi da quelli neri nel corso della deformazione. In questa sede non ci si sofferma sul funzionamento di questo

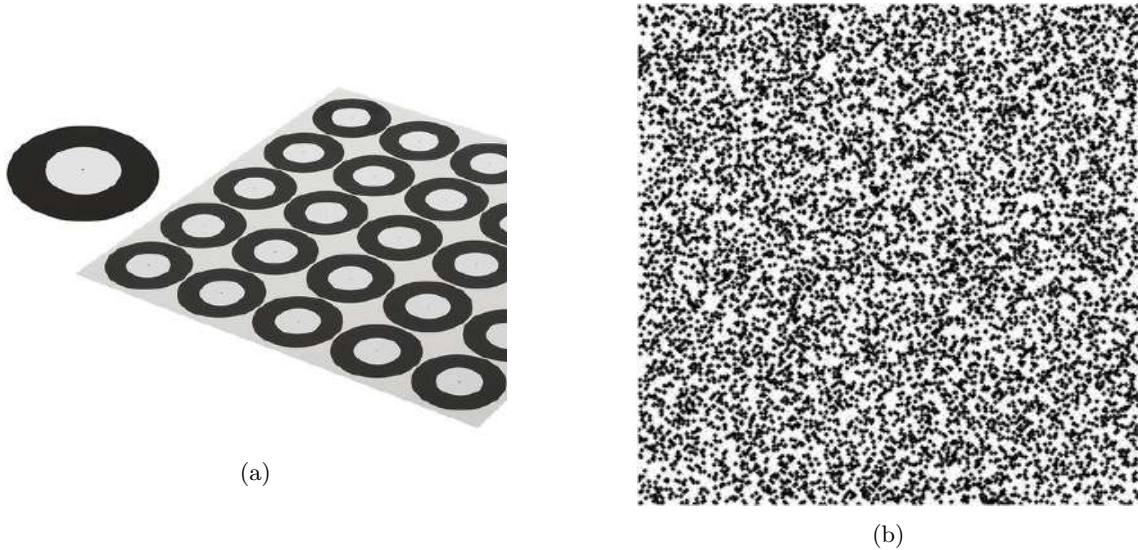


Figure 2.1: (a) Un esempio di point marker. (b) Un esempio di pattern stocastico.

sistema in quanto non è quello adottato nella presente sperimentazione.

La valutazione dell'immagine è stata realizzata avvalendosi del pattern stocastico poiché l'analisi condotta non si limita a valutare i soli spostamenti ma anche le deformazioni.

#### 2.1.1.2 Realizzazione dello schema randomico

Il pattern può essere realizzato con diverse tecniche. Le procedure più utilizzate sono: a spruzzo; con maschera; con spazzola.

**Tecnica a spruzzo** La tecnica a spruzzo comporta l'utilizzo di un aerografo, oppure utilizzo di bombolette spray. Entrambe permettono di conseguire degli ottimi risultati tuttavia, l'aerografo avendo un controllo di pressione garantisce un'applicazione più uniforme. La realizzazione del pattern è il primo elemento chiave per avere una buona correlazione delle immagini, ed essendo un parametro piuttosto delicato è bene servirsi della tecnica più precisa possibile fig.[2.2].

**Tecnica a spazzola** La tecnica a spazzola è una procedura poco utilizzata e vede l'utilizzo di speciali spazzole per l'applicazione dei riferimenti, questa si usa per provini di grandi dimensioni, ma comporta il rischio di realizzare un pattern periodico.

**Tecnica con maschera** Infine, la tecnica con maschera prevede l'applicazione di una maschera forata con uno schema randomico sopra il provino che successivamente viene colorata con una bomboletta spray. Questa procedura va bene solamente per provini piani, o in generale per provini con semplici geometrie.

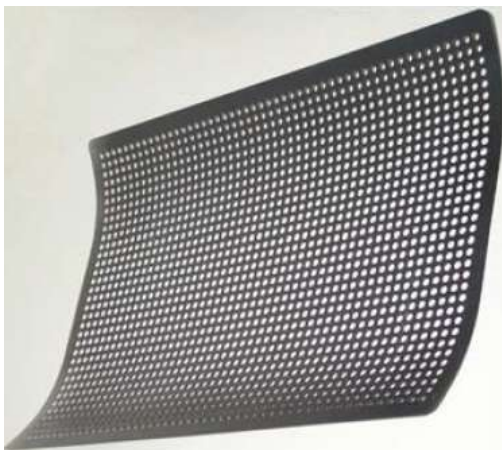
La tecnica a spruzzo è la più utilizzata, essendo quella più versatile, che permette di variare la dimensione dei "pallini", chiamati *speckle* a seconda del campione da analizzare. L'elemento che accomuna tutte e tre queste pratiche è l'alto contrasto che deve esserci tra la matrice e i riferimenti stocastici. Infatti, il pattern sarà sempre realizzato in colori bianco e nero.



Figure 2.2: Aerografo utilizzato per la realizzazione del pattern.



Figure 2.3: Spazzola per creazione pattern.



(a)



(b)

Figure 2.4: Maschera per la realizzazione del pattern.

### 2.1.1.3 Immagine di misura

L'immagine ripresa dalle camere viene suddivisa in sottodomini dei pixel chiamati *facets* di dimensioni  $N \times N$ . Le immagini sono in scala di grigi. All'interno di ogni *facet* c'è un certo numero di pixel, e ognuno di questi avrà una diversa tonalità di grigio che permette di creare una rete discreta. Il software realizza un'interpolazione dei valori discreti dei pixel per avere un andamento lineare all'interno della *facet* fig.[2.5]. In base all'intensità della luce riflessa da ogni pixel, e quindi in base al tono di grigio, al pixel verrà attribuito un valore numerico. Nei sistemi a 8 bit solitamente ogni pixel può assumere un valore che varia tra 0 e 255[3]. Il riconoscimento del grigio di ogni pixel è il sistema alla base dell'identificazione delle immagini nel corso della deformazione.

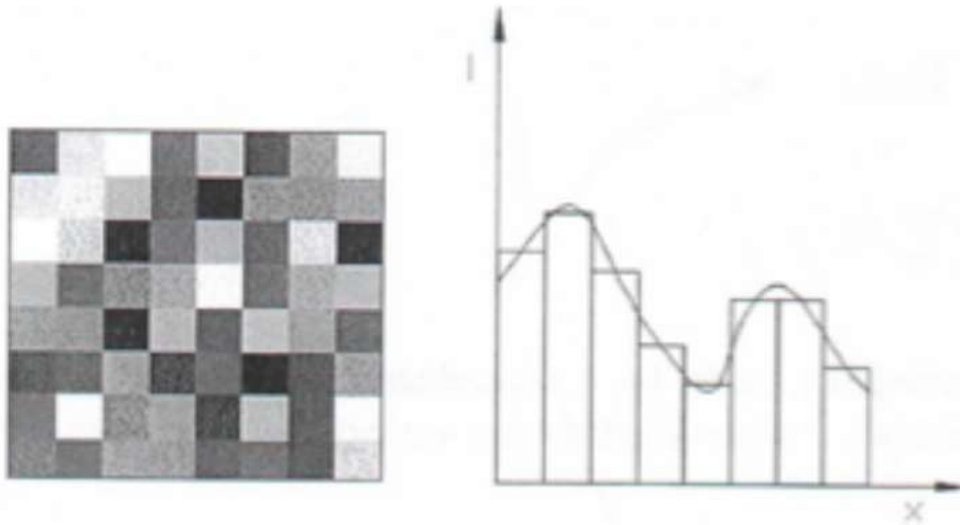


Figure 2.5: In figura è rappresentata una *facet* nella quale sono mostrati i pixel, e i diversi valori di grigio. È mostrata anche l'interpolazione che trasforma il discreto in continuo[3]

Le *facet* non sono affiancate tra di loro lungo i bordi ma sono sovrapposte secondo un certo parametro di sovrapposizione definito "Grid Space". Questa variabile determina una *Overlapping Area* che permette di avere dei punti significativi più vicini, e comuni in diversi *facets*. Questo aiuta il software a ricostruire la posizione dei suddetti punti nel corso della deformazione.

In figura [2.6] si vedono delle *facets* di  $15 \times 15$  pixel con un *grid spacing* di 13 pixel, il che comporta una *overlapping area* di 2 pixel.

Secondo il manuale del produttore [4] i parametri mostrati in figura [2.6] sono i valori standard, che garantiscono un buon compromesso tra accuratezza e tempi di calcolo. È tuttavia possibile variarne le dimensioni adattando il pattern stocastico (in termini di distanziamento e dimensione degli *speckles*). Quando si ricorre ad un ridimensionamento della *facet* è bene tenere conto delle conseguenze derivanti dall'aver una dimensione maggiore o minore rispetto a quella di default.

Una *facet* più grande garantisce una misura più precisa e riduce il rumore. Tuttavia, non permette di vedere con buona accuratezza gli effetti locali. Ne consegue che è bene usare un valore alto nei casi in cui si analizza un componente non troppo piccolo, o comunque del quale non vogliamo vedere come variano le deformazioni su dei dettagli. Inoltre, una dimensione maggiore comporta maggiore tempo di calcolo.

Viceversa, utilizzare *facets* piccole permette di esaminare con un buon dettaglio superfici piccole apprez-

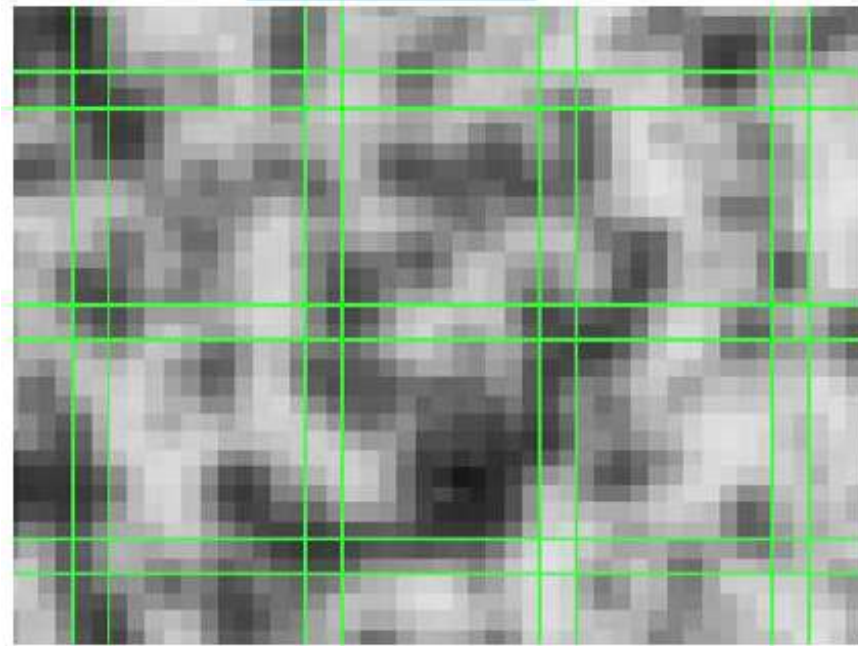


Figure 2.6: *Facet 15x15 con overlapping area di 2 pixel*

zando gli effetti circoscritti a queste aree, perdendo però accuratezza sulla misura risultante. Al contrario, aumenta il rumore mostrando gli effetti puntuali.

Avere un *grid spacing* minore di quello standard comporta un aumento della densità dei punti di misura, con conseguente aumento dei tempi di calcolo.

Uno *grid spacing* inferiore al contrario diminuisce la densità dei punti usati per il calcolo delle misure, e diminuisce il tempo di calcolo. In generale si può considerare valida una zona di sovrapposizione fino al 50%.

#### 2.1.1.4 caratteristiche del Pattern

Affinché il pattern garantisca il corretto funzionamento del sistema di misura è bene che la superficie del provino rispetti i seguenti requisiti:

- il pattern deve seguire l'intera superficie da analizzare durante tutta la deformazione, senza rompersi;
- per avere un buon contrasto, e quindi una facile lettura dei gradi di grigio da parte del software, è bene avere un rapporto del 50% tra bianco e nero;
- una superficie piana garantisce un migliore riconoscimento 3D dei punti;
- più semplice è la superficie oggetto di misura e più semplice sarà il riconoscimento del pattern da parte del software.
- la superficie del pattern deve essere opaca. I riflessi potrebbero essere percepiti diversamente dalla camera destra e quella sinistra, quindi condurre a delle incongruenze;
- gli *speckles* devono essere abbastanza piccoli da garantire una fitta rete di *facets* riconoscibili. Tuttavia devono essere abbastanza grandi da essere riconoscibili dal sensore;
- il pattern stocastico deve avere una distribuzione casuale ma con una distribuzione omogenea, quindi senza macchie troppo estese.

In figura [2.7a] e [2.7b] sono presentati dei pattern non corretti per i motivi sopra elencati. La figura [2.7c] mostra un pattern ideale.

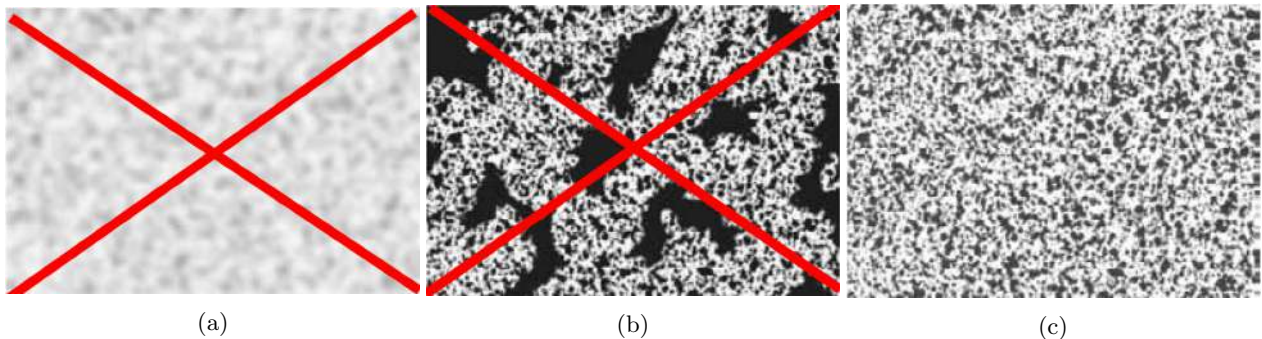


Figure 2.7: (a) Pattern non utilizzabile a causa del contrasto troppo debole. (b) Pattern non valido a causa delle macchie nere troppo estese. (c) Buon pattern con alto contrasto.

Per la realizzazione del pattern si stende una base di bianco opaco sulla quale si realizza il pattern nero con una delle tecniche descritte precedentemente.

C'è una stretta correlazione tra la dimensione della finestra di misura e la dimensione degli *speckles*. In generale, uno *speckle* troppo piccolo (inferiore alla dimensione del pixel) comporta la perdita di informazioni sul movimento del riferimento all'interno dell'area del pixel, senza modificare l'intensità luminosa. Uno *speckle* troppo grande rispetto alla dimensione della *facet* porta, alla impossibilità di correlazione della superficie.

La dimensione ideale dello *speckle* è di circa 3 o 4 volte la dimensione del pixel. Nel caso cambino i sensori, o il volume di misura (quindi la dimensione delle *facets*) si deve cambiare le caratteristiche del pattern. In figura [2.8] sono mostrate le situazioni in cui gli *speckles* sono troppo piccoli, o troppo grandi.

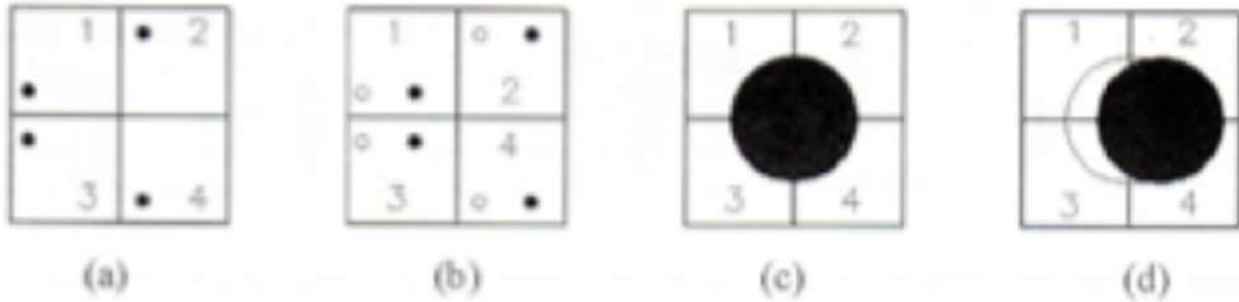


Figure 2.8: Dimensione corretta degli *speckles* rispetto al pixel. in (a) e (b) si vede come un movimento all'interno dell'area circoscritta dal pixel non sarebbe apprezzabile dal sensore. in (c) e (d) si vede come la dimensione corretta permetta di avere una variazione dell'intensità luminosa di ogni singolo pixel a seguito della deformazione.

A parità di sensore, quindi a parità di numero di pixel, se aumenta la finestra di misura sono richiesti dei pixel più grandi. Per mantenere il rapporto pixel/*speckle* corretto è necessario realizzare un pattern con *speckles* più grandi.

A fronte di queste osservazioni si può definire un parametro che consente di calcolare la dimensione caratteristica dello *speckle*  $L$  rispetto alla risoluzione del sensore e alla grandezza della finestra di misura.

Introduciamo il Fattore di ingrandimento  $M$  come rapporto tra i pixel presenti sul lato maggiore del sensore  $p$ , e la dimensione in mm della finestra di misura  $x$ .

$$M = p/x \quad (2.1)$$

La dimensione caratteristica è uguale al numero di pixel che ogni singolo *speckle* ricopre  $P$ , diviso per il fattore di ingrandimento[5].

$$L = P/M \quad (2.2)$$

### 2.1.1.5 Misura degli spostamenti delle *facets*

Dopo aver adattato il pattern alla finestra di misura, e dopo aver impostato correttamente la dimensione delle *facets*, e il loro passo, il software è in grado di eseguire la misurazione.

Vengono registrate più immagini in diverse fasi di carico del provino. Per performare i calcoli necessari il software Aramis osserva la deformazione dell'oggetto fase per fase attraverso le *facets*. Le singole *facets* sono riconosciute in ogni fase grazie al livello di grigio identificativo di ogni struttura. È sempre necessario definire uno stage di riferimento dello stato indeformato, rispetto al quale vengono calcolate le posizioni di ogni *facet*.

Nelle immagini di seguito si mostra un esempio di misurazione dello spostamento di una *facet* 15x15 in 6 stage di deformazione, dallo stage 0 allo stage 5, dove con 0 si intende lo stage di riferimento. La linea bianca tratteggiata rappresenta in ogni immagine lo stato indeformato, mentre la linea verde continua lo stato deformato in ogni stage. Per semplicità sono rappresentati solo gli stage 0, 1, e 5.



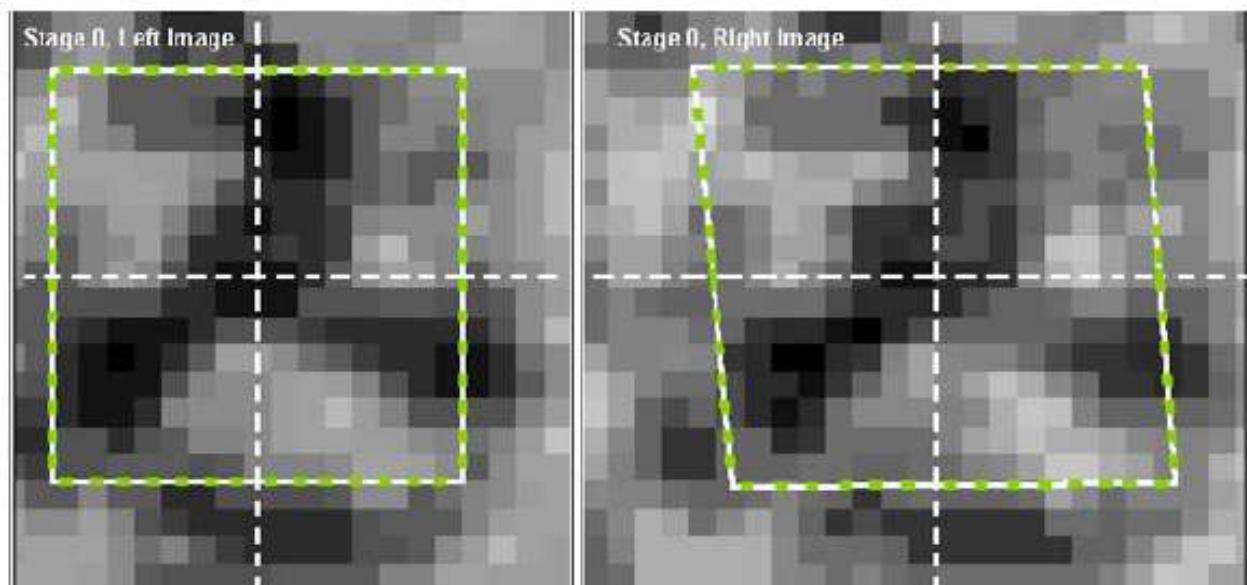


Figure 2.9: L'immagine include la *facet* vista dalla camera sinistra e dalla camera destra nello stato indeformato di riferimento, stage 0.

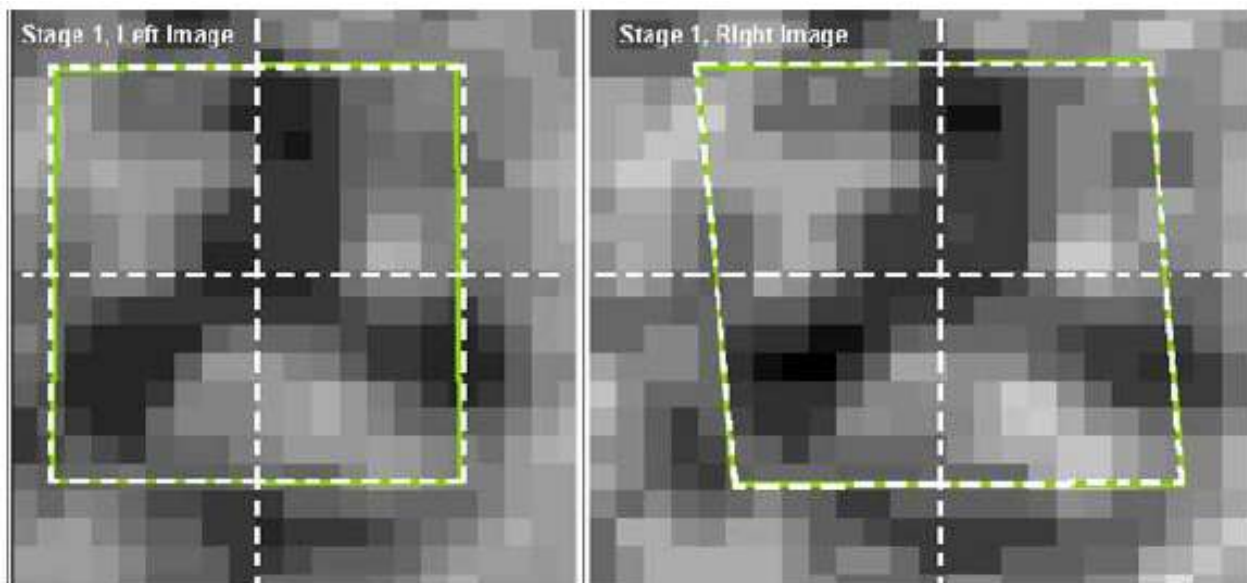


Figure 2.10: L'immagine include la *facet* vista dalla camera sinistra e dalla camera destra nello stato deformato, stage 1.

<b>Stage 2, Left Image</b>	<b>Stage 2, Right Image</b>
<b>Stage 3, Left Image</b>	<b>Stage 3, Right Image</b>
<b>Stage 4, Left Image</b>	<b>Stage 4, Right Image</b>

Figure 2.11: Stage di deformazione intermedi non rappresentati.

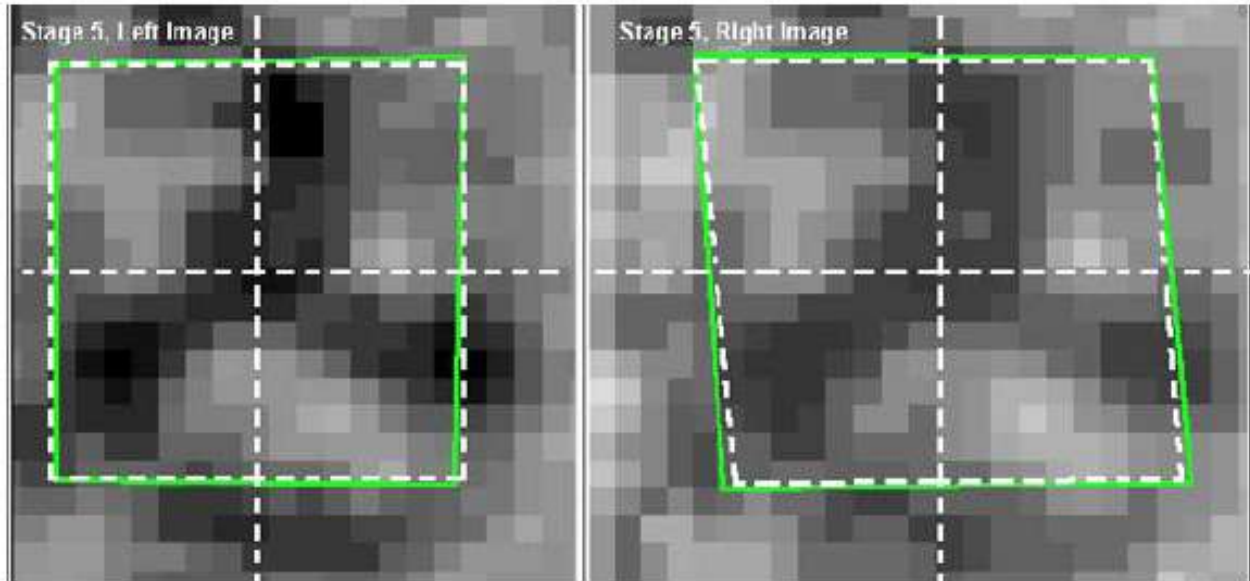


Figure 2.12: L'immagine include la *facet* vista dalla camera sinistra e dalla camera destra nello stato deformato finale, stage 5.

Il sistema calcola le coordinate 2D delle *facets* riferendosi sempre agli angoli del quadrato verde rispetto al centro risultante di ogni condizione di deformazione. La configurazione stereo a due telecamere permette di calcolare anche le coordinate 3D. Sfruttando i principi della fotogrammetria, le coordinate 2D di una *facet* viste dalla fotocamera destra, e le coordinate 2D della stessa *facet* viste dalla fotocamera sinistra, vengono combinate a formare le coordinate 3D, globali della *facet*.

Dopo che il sistema è in grado di calcolare in ogni stage la posizione di ogni singola *facet* della configurazione 3D, si ha la possibilità di calcolare tutte le grandezze derivanti, in primis le deformazioni.

## 2.1.2 Strumentazione utilizzata

### 2.1.2.1 Sistema DIC

Vi sono diversi sistemi di acquisizione per la correlazione di immagini digitale. Quello a nostra disposizione è uno dei più noti e utilizzati; si tratta del sistema Aramis dell'azienda tedesca GOM. Nello specifico si è utilizzato il modello ARAMIS Adjustable 12M

Il sistema a disposizione è equipaggiato con i seguenti componenti:

- due telecamere in bianco e nero, ciascuna con dimensione del pixel di 3.45 micrometri;
- un sistema di illuminazione composto da due luci a led blu;
- supporto per fotocamere e luci;
- workstation portatile con installati i software per acquisizione ed elaborazione dati;
- pannello di calibrazione.



Figure 2.13: Sistema ARAMIS Adjustable 12M

### 2.1.2.2 Sensore

Il sistema a disposizione è dotato di due lenti Schneider 50 mm, si tratta di due fotocamere in bianco e nero ad alta risoluzione. Le lenti sono le responsabili della definizione del range di misura. Tuttavia il sistema Adjustable permette di variare il range di misurazione a parità di obiettivi cambiando il distanziamento tra le due fotocamere. Di seguito è rappresentata la tabella con i dati tecnici del sistema in questione tab.[2.1].

Table 2.1: Dati tecnici del sensore

Sistema	ARAMIS Adjustable 12M
Volume di misura [mm]	da 20x15x4 a 770x590x590
Frequenza massima dei fotogrammi [fps]	25 in full frame, 100 con parzializzazione dell'immagine
Risoluzione telecamera [pixel]	4096x3000
Condizioni ambientali	da +5°C a +40°C
Campo di tensione	Alimentazione tramite connessione USB 3.0
Potenza assorbita	3.5 W per telecamera
Collegamento della telecamera al PC	USB3.0
Lunghezza massima del cavo tra sensore e PC	3 m

### 2.1.2.3 Sistema di illuminazione

L'illuminazione è un fattore molto importante per la buona riuscita della correlazione delle immagini. Una buona illuminazione permette di: individuare al meglio il pattern, aiuta l'inseguimento degli *speckles* da un'immagine all'altra, può eliminare i riflessi.

Esistono diversi sistemi di illuminazione: led, alogeni, monocromatici, colorati. Qualunque tecnologia si scelga, le caratteristiche importanti che deve avere una buona configurazione di illuminazione sono due:

- alta intensità;
- uniformità.

L'intensità permette di illuminare correttamente tutta la geometria del provino, diminuendo il più possibile le zone di ombra. L'uniformità, o omogeneità, è importante per escludere la presenza dei riflessi. Il tema dei riflessi è abbastanza ricorrente quanto si opera con la tecnologia DIC, è uno dei problemi più comuni che causa l'impossibilità di riconoscimento delle superfici. Spesso infatti si usano dei filtri polarizzanti applicabili direttamente alle lenti delle fotocamere o alle luci.

Il sistema ARAMIS Adjustable 12M è dotato di due lampade a led blu con un angolo del raggio di 10°. Questo tipo di illuminazione è adatto ad illuminare zone di dimensioni massime di 500 mm x 400 mm. Di norma, aumentare la frequenza di acquisizione, oppure il volume di misura, richiede un aumento di illuminazione.



Figure 2.14: Sistema di illuminazione.

#### 2.1.2.4 Software di elaborazione dati

L'azienda GOM fornisce due software per l'elaborazione dei dati:

- GOM Snap;
- GOM Correlate.

Il primo serve per inizializzare e calibrare i sensori. Il secondo si utilizza per la post elaborazione dei dati acquisiti.

GOM Snap è servito in due versioni, una per l'acquisizione 2D e una per l'acquisizione 3D. Per utilizzare il software Snap è necessario avere una licenza apposita.

Questa fase inizia sistemando la messa a fuoco e l'apertura degli obiettivi. In seguito si sistema l'illuminazione e i filtri polarizzanti, ed infine si effettua la calibrazione in base al volume di misura richiesto.

Dopo aver inizializzato il sistema è possibile aprire un nuovo progetto ed effettuare l'acquisizione.

GOM Snap permette di fare una parziale correlazione delle superfici per verificare la qualità delle immagini registrate. Se l'acquisizione è andata a buon fine si passa al software GOM Correlate, dove si effettua la vera e propria correlazione, si calcolano i conseguenti spostamenti, le deformazioni, e gli sforzi.

### 2.1.2.5 Pannello di calibrazione

Prima di iniziare un nuovo progetto è fondamentale realizzare la calibrazione del sensore. I principi dell'analisi delle immagini secondo la triangolazione funzionano soltanto se viene portata a termine una buona calibrazione. Indipendentemente dal settaggio delle luci e dell'aggiustamento del fuoco degli obiettivi, la calibrazione è uno dei passaggi più importanti per la buona riuscita dell'acquisizione.

Come è stato anticipato in precedenza, il sistema ARAMIS Adjustable permette di variare il volume di misura. La variazione del volume di misura è direttamente collegata all'oggetto di calibrazione; alla distanza del sensore dall'oggetto; e alla distanza tra le due camere; e all'angolo di inclinazione degli obiettivi.

La scelta del volume di misura dipende dalle dimensioni del campione oggetto della misurazione, o quantomeno dalla sua zona di interesse. Infatti, il particolare da misurare deve rientrare nel campo di misura del sensore durante tutti gli stadi della deformazione.

Dopo aver definito il volume di misura richiesto è necessaria una calibrazione. La calibrazione è un processo nel quale il sistema di misura è strutturato in maniera da assicurare la giusta solidità e accuratezza delle misure effettuate. Durante questo processo il software effettua la determinazione dei parametri geometrici, quali posizione e orientamento delle telecamere rispetto alla posizione delle telecamere durante la calibrazione. I risultati di questa operazione diventano la base di calcolo del software, che prende le coordinate 2D dei punti dell'oggetto di calibrazione delle telecamere e le trasforma in coordinate nelle 3 dimensioni.

In fase di calibrazione si inseriscono le informazioni degli obiettivi utilizzati. Queste, insieme alle coordinate dei punti di riferimento dell'oggetto di calibrazione, permettono di determinare le caratteristiche dell'immagine derivante dalle camere utilizzate, come ad esempio le deviazioni di distorsione. Questo permette di ottenere dei risultati di misura più precisi.

L'analisi 3D in configurazione stereo vede l'obbligo di una calibrazione completa con l'oggetto di calibrazione. Per un'analisi 2D si può anche evitare di fare la calibrazione. Tuttavia, il software non può comprendere le caratteristiche dell'immagine degli obiettivi (la distorsione).

Per i sistemi Aramis ci sono diversi oggetti di calibrazione utilizzabili. I più noti e utilizzati sono due: la croce di calibrazione figura[2.15a], e il pannello di calibrazione figura[2.15b].



Figure 2.15: (a) Croce di calibrazione. (b) Pannello di calibrazione.

In generale i pannelli vengono utilizzati per piccoli volumi di misura e le croci per volumi di misura più grandi. Sia che si tratti dei pannelli o delle croci, esistono diverse misure degli oggetti, che permettono di ottenere dei range di volume di misura differente.

Ogni oggetto di calibrazione è caratterizzato da alcuni parametri:

- Volume di misura;
- distanza tra i cursori;
- distanza di misurazione;
- apertura focale;
- angolo delle telecamere.

Con distanza tra i cursori si intende la distanza di ogni camera dal centro del sensore. La distanza di misurazione si riferisce alla posizione del centro dell'oggetto di calibrazione rispetto al sensore. L'angolo delle camere indica l'angolazione di ogni telecamera rispetto al centro dell'oggetto di calibrazione. Infine, l'apertura focale è il parametro che regola la quantità di luce che attraversa il diaframma dell'obiettivo; un'apertura maggiore fa passare meno luce mentre un'apertura bassa fa passare più luce.

In figura [2.16] sono rappresentate le grandezze sopra descritte, e in figura [2.17] è rappresentata la ghiera di regolazione dell'apertura sull'obiettivo.

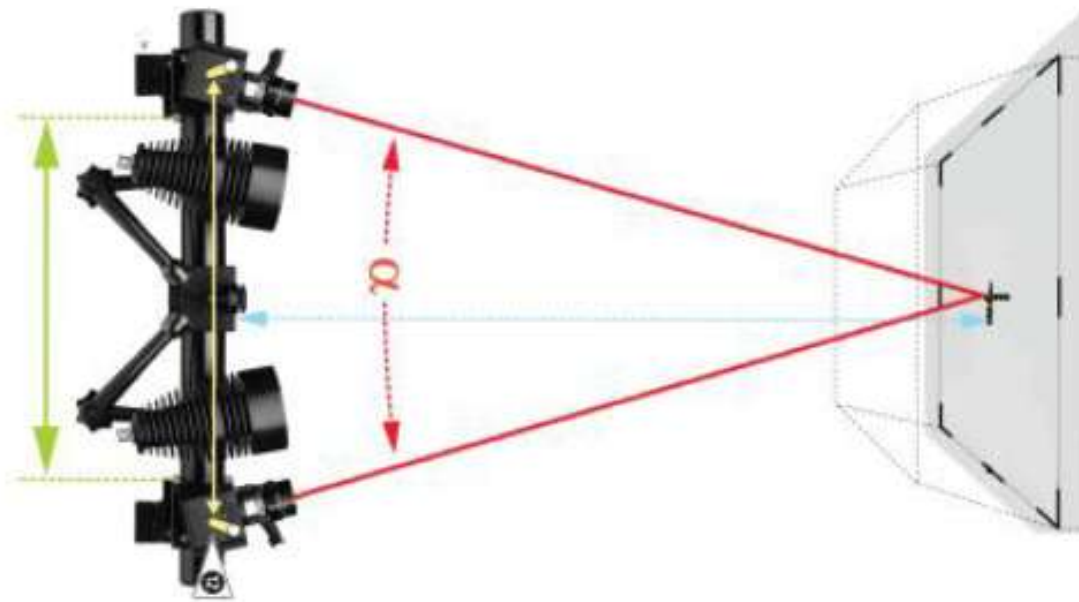


Figure 2.16: Lunghezze caratteristiche della calibrazione. In verde la distanza tra i cursori; in azzurro la distanza di misura; in rosso l'angolo delle telecamere.



Figure 2.17: ghiera di regolazione dell'apertura.

Considerando le dimensioni del nostro campione (uno scarpone da sci), ci si serve di un pannello di calibrazione. Nonostante vi siano diversi pannelli, a seconda del volume di misura ricercato, ogni pannello ha la possibilità di variare il range di calibrazione cambiando la distanza tra i cursori, l'angolo delle telecamere, e la distanza di misura.

Il pannello a nostra disposizione è il modello GOM / CP 40 MV 170 mm, mostrato in figura [2.18].

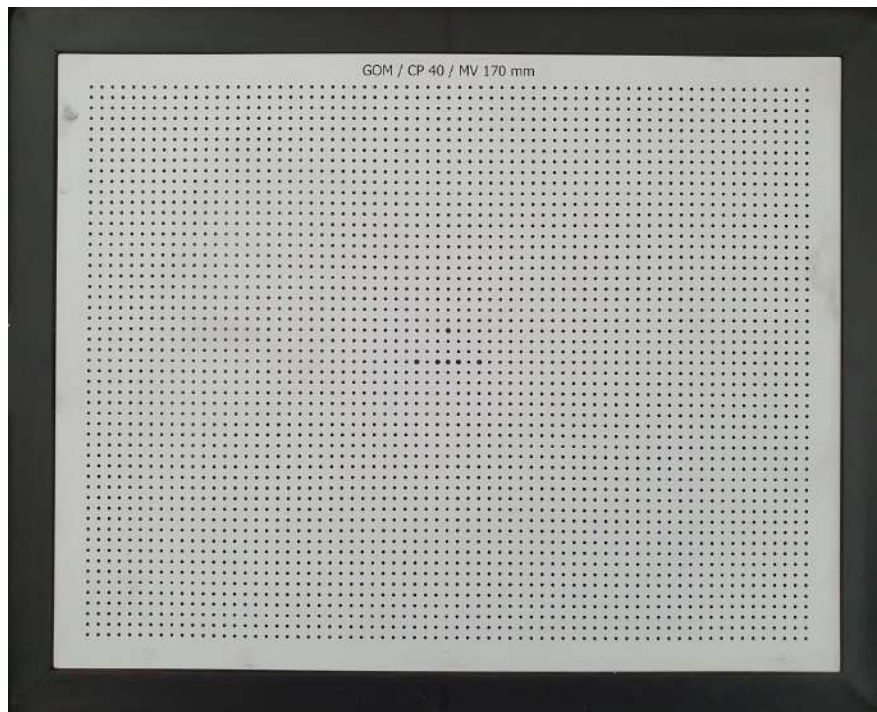


Figure 2.18: Pannello di calibrazione GOM / CP 40 MV 170 mm.

Di seguito sono riportati in tabella [2.2] i dati di configurazione standard del pannello GOM / CP 40 MV 170 mm, quando abbinato alle telecamere Schneider con lunghezza focale di 50 mm.

Table 2.2: Configurazione standard del pannello GOM / CP 40 MV 170 mm in abbinamento con obiettivi a lunghezza focale di 50mm.

Oggetto di calibrazione	CP40/MV170
Volume di misura [mm <sup>3</sup> ]	170x130x80
Distanza tra i cursori [mm]	270
Distanza di misura [mm]	697
Angolo delle telecamere [°]	25
Apertura	11

Sintetizzando, la finestra di misura è dimensionalmente limitata prima dal sensore, e poi dal pannello di calibrazione a disposizione. Nel caso in esame il Sistema ARAMIS Adjustable 12M con obiettivi Schneider 50 mm ha un'area di misura che va da un minimo di 30x22 mm<sup>2</sup> ad un massimo di 440x325 mm<sup>2</sup>. L'abbinamento di questo sistema al pannello GOM / CP 40 MV 170 mm riduce la finestra portandola ad un minimo di 78x59 mm<sup>2</sup> fino ad un massimo di 221x158 mm<sup>2</sup>.

Se si vuole usare un volume di misura diverso da quello standard riportato in tabella [2.2], è necessario fare una interpolazione dei valori caratteristici. Questo processo è fatto automaticamente dal software GOM Snap, è sufficiente impostare il volume di misura che si vuole ottenere e il programma mostra come variano le lunghezze caratteristiche.

Ogni volta che viene cambiato il volume di misura è necessario fare nuovamente la calibrazione con i nuovi dati interpolati dal software. Inoltre, in seguito a questa modifica potrebbe essere necessario sistemare anche l'apertura e le luci.

La terza dimensione del volume di misura determina la profondità del campo di misura, ovvero quanto vicino o lontano l'oggetto può essere dalle telecamere. La calibrazione determina la profondità del campo come una distanza che è compresa tra il 40% della lunghezza di misura in avanti e il 60% della distanza di misura indietro.

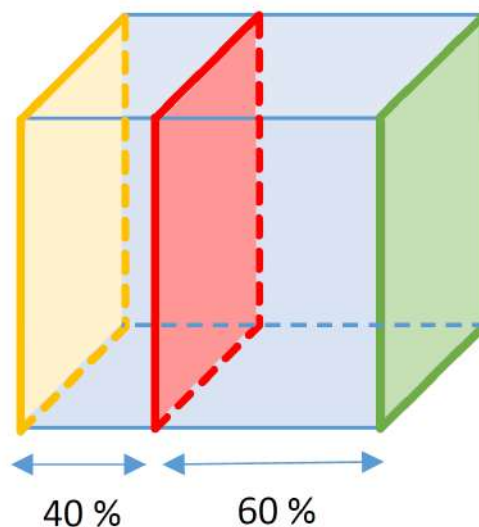


Figure 2.19: Profondità del campo di misura. In rosso è rappresentata la posizione originale dell'oggetto; in giallo la posizione dell'oggetto spostato in avanti; in giallo la posizione dell'oggetto spostato indietro[5]



Come si vedrà in seguito, la calibrazione è una variabile fondamentale per ottenere una buona correlazione. É anche una delle operazioni più delicate, in quanto il processo di calibrazione richiede di muovere il pannello in delle posizioni ben precise, ritornando poi sempre al punto di partenza. per avere una accettabile risoluzione e una bassa deviazione di misura è necessario affinare al meglio questo procedimento.

### 2.1.2.6 Sistema di vincolo dello scarpone

Il test da fare sullo scarpone è piuttosto semplice, e non invasivo. Si vuole valutare l'effetto della chiusura dello scarpone per riprodurne la cinematica nel modo più fedele possibile nella modellazione FEM. Non dovendo ricorrere all'utilizzo di una pressa per il Test Flex, sarebbe sufficiente un semplice sistema di fissaggio dello scarpone in una posizione funzionale all'inquadratura delle telecamere. Tuttavia, il laboratorio è già equipaggiato di un una base di appoggio giroscopica, chiamata "scarpometro" che è stata progettata per lo svolgimento del Flex Test.

Questo sistema vincola lo scarpone come se fosse agganciato a dei comuni attacchi da sci. La rotazione su più assi permette di posizionare la zona di interesse del campione sempre all'interno del volume di misura. L'unica variabile spaziale che non è possibile controllare è l'altezza dal terreno, ma questa è regolabile con il cavalletto del sistema ARAMIS.

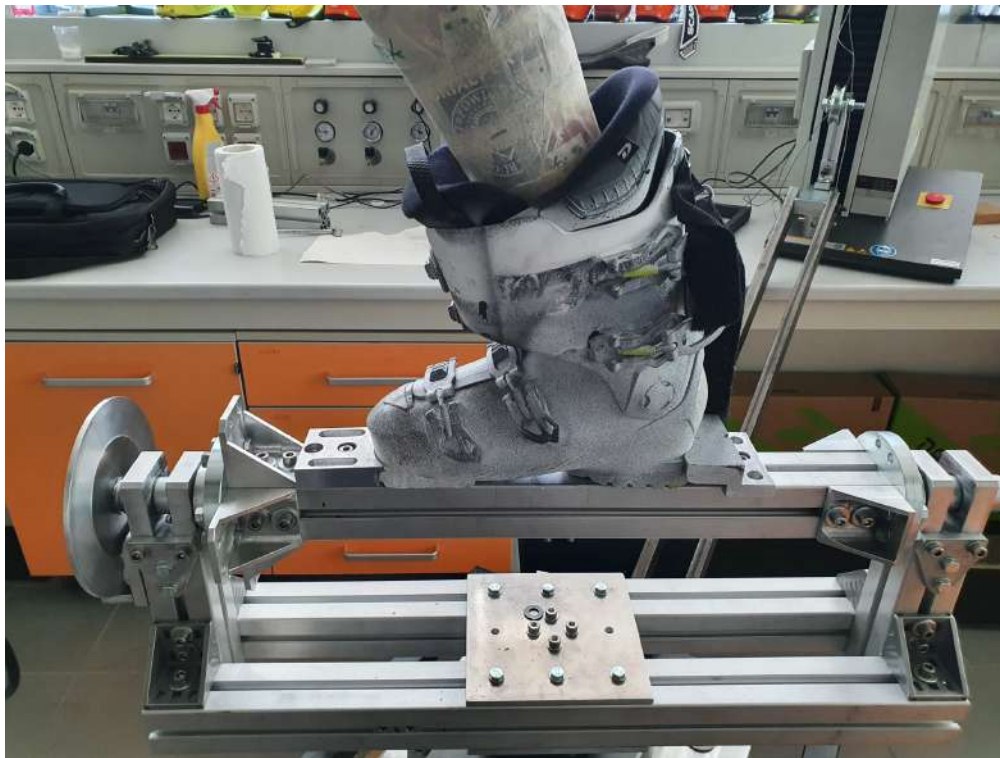


Figure 2.20: Sistema di vincolo dello scarpone. Scarpometro che permette di ruotare il campione su più assi in modo da posizionarlo nel modo più opportuno rispetto al volume di misura.



Figure 2.21: Particolare sul sistema di attacco dello scarpone allo scarpometro.

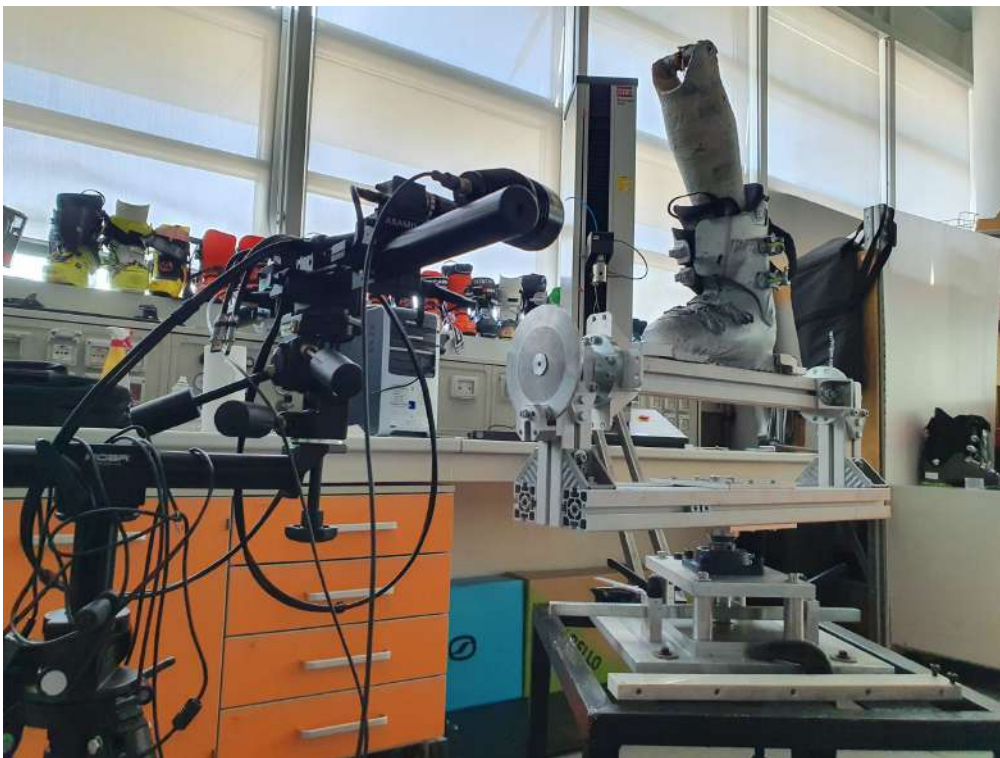


Figure 2.22: Panoramica sulla configurazione completa del sistema di misurazione. Sulla sinistra ARAMIS Adjustable 12M, e sulla destra lo scarpone vincolato sullo scarpometro.

## 2.2 Metodo agli elementi finiti

L'obiettivo della ricerca è quello di validare un modello FEM (metodo agli elementi finiti). Di seguito si presenta una sintetica panoramica del metodo, sul perché è stato sviluppato, e su quali principi si basa.

### 2.2.1 Generalità sul metodo

Sia che si tratti della fase di progettazione, o che si tratti della fase di processo, ogni stadio di realizzazione di un componente richiede una messa a punto e un'ottimizzazione. Ottimizzare permette di:

- avere la certezza di realizzare il componente secondo le specifiche richieste;
- ridurre i costi;
- ridurre gli scarti;
- ridurre l'impatto ambientale.

Storicamente la strada convenzionale per la realizzazione di un componente passava attraverso una stima basata sull'esperienza e sui dati storici; stima dei tempi, dei metodi, dei materiali. Questo conduce ad una serie di incertezze e dubbi che possono essere risolti solamente quando il prodotto è stato già realizzato, o peggio, entrato in commercio.

Con l'introduzione del metodo agli elementi finiti, risalente agli anni cinquanta del ventesimo secolo [6], la stima delle variabili in gioco si sostituisce con la verifica di esse. Da ciò consegue una progettazione basata sulla conoscenza e la padronanza delle fenomeni in gioco, senza ricorrere a tecniche invasive sui prodotti.

Il FEM è un metodo che si applica alla risoluzione numerica di problemi fisici governati da equazioni differenziali. Una soluzione analitica consente di calcolare in maniera esatta il valore dell'incognita in tutti i punti del dominio. Invece, il metodo numerico permette di calcolare una soluzione approssimata in un numero finito di punti (i nodi)

Questo metodo è nato per la risoluzione di problemi strutturali aeronautici [7], ma con il passare del tempo si sono sviluppati codici in grado di risolvere qualsiasi tipo di problema governato da fenomeni fisici reali, che siano essi strutturali; termici; fluidodinamici ecc.

Una caratteristica di questo metodo è che la soluzione non viene calcolata sul pezzo intero, ma su piccole porzioni del continuo (gli elementi finiti). Queste porzioni sono collegate tra di loro tramite dei punti specifici (i nodi). L'unione di tutte questi elementi genera una griglia chiamata **mesh**.

le equazioni che governano un sistema generalmente sono equazioni differenziali alle derivate parziali (EDP). La risoluzione analitica di queste equazione è difficilmente realizzabile a causa della complessità matematica del sistema. I metodi in forma chiusa più utilizzati sono basati sulla trasformata di Laplace e la trasformata di Fourier. Questi, consentono di risolvere solamente equazioni differenziali ordinarie, quindi il procedimento risolutivo consiste nel ricondurre le equazioni alle derivate parziali a delle equazioni ordinarie della trasformata di Laplace, o di Fourier, della funzione incognita. L'equazione viene risolta, e l'incognita ricavata tramite una antitrasformazione.

L'applicazione dei metodi analitici purtroppo non è sempre possibile, poichè la maggior parte dei fenomeni fisici reali sono governati da configurazioni troppo complesse dal punto di vista dei materiali, delle condizioni di carico, e delle condizioni al contorno.

Per ovviare a queste problematica si adottano dei metodi che consentono di applicare delle ipotesi semplificative ai modelli, consentendone la risoluzione per via matematica. Se le ipotesi semplificative sono

sufficientemente accurate, la soluzione approssimata sarà abbastanza vicina a quella analitica. Le ipotesi rappresentative del sistema reale, e quindi il modello matematico del sistema idealizzato che ne consegue, fungono da legame tra il sistema reale fisico e quello matematico. La risoluzione di questo modello matematico viene performata da diversi metodi numerici. I metodi numerici possono seguire due distinte formulazioni:

- formulazione differenziale;
- formulazione integrale.

La formulazione differenziale consiste nell'approssimare le equazioni differenziali mantenendo inalterato il dominio. A questa famiglia appartiene il metodo delle differenze finite (MDF).

L'approccio integrale approssima il dominio e mantiene inalterate le equazioni differenziali. La formulazione integrale si suddivide a sua volta in formulazione residuale, alla quale appartengono metodi come quello dei residui pesati (MRP), oppure formulazione variazionale, che applica il metodo dei volumi finiti (MVF) e il noto metodo degli elementi finiti (fem).

### 2.2.1.1 Formulazione variazionale fem

La formulazione variazionale di un problema fisico consiste nel trasformare in forma integrale le equazioni differenziali che lo regolano. Questo integrale si definisce *funzionale*. Il metodo più utilizzato per passare dalle EDP al funzionale, applica il significato fisico del funzionale nel caso di meccanica del continuo.

Il metodo variazionale più utilizzato è quello che pone il funzionale uguale alla funzione di *energia potenziale*  $\Pi$ , che è uguale alla somma tra il lavoro dei carichi esterni  $\mathbf{W}$  e l'energia di deformazione  $\mathbf{U}$ :

$$\Pi(u) = W + U \quad (2.3)$$

Imponendo la stazionarietà e la condizione di minimo per l'equilibrio stabile, si ottiene la corrispondenza tra formulazione differenziale e formulazione integrale.

A seconda del sistema considerato (barra sottoposta a carico distribuito, barra incastrata, trave, ecc.) il formalismo matematico cambia, e soprattutto cambiano le equazioni differenziali governanti il sistema. Tuttavia, l'equazione risultante in forma matriciale sarà sempre la stessa:

$$Ku = F \quad (2.4)$$

dove  $u$  è il campo di spostamenti derivante dalla legge di Hooke  $\sigma = E\epsilon$ , quindi  $\epsilon = du/dx$ , con  $\sigma$  uguale allo sforzo ed  $\epsilon$  uguale alla deformazione sul segmento infinitesimo  $dx$ .

$F$  è la matrice contenente i carichi applicati e le reazioni vincolari.

$K$  è definita matrice di rigidezza, contiene le informazioni sulla rigidezza dell'elemento, e varia in base al modello utilizzato. Sarà diversa per un'asta piuttosto che per una trave, o per una corona circolare.

### 2.2.1.2 Principi alla base dell'approssimazione del metodo FEM

Invece di risolvere il sistema su tutto il continuo, il metodo FEM suddivide il dominio in tanti sottodomini di forma elementare e ben definita, lasciando inalterate le equazioni differenziali (principio alla base del metodo integrale). Lavorare sull'intero dominio significa che variabili di campo come spostamenti sono funzioni di ciascun generico punto del dominio, e quindi sono caratterizzati dall'avere un numero infinito di incognite. Discretizzare il dominio negli *elementi finiti* permette di trasformare le incognite in un numero finito. Inoltre, il campo delle incognite viene espresso con delle funzioni approssimanti esistenti all'interno di ogni elemento.

Queste funzioni sono chiamate *funzioni di forma* e il loro andamento è definito a partire dal valore che la funzione di campo (lo spostamento nel caso strutturale) assume in corrispondenza dei nodi. Il nuovo sistema di incognite è rappresentato dal valore della funzione di campo in corrispondenza dei soli nodi.

L'obiettivo in questa fase è quello di approssimare la vera funzione incognita, con delle funzioni note (solitamente polinomiali) ottenute dall'interpolazione sui nodi del sottodominio discretizzato. Questa operazione sarà sempre possibile, come giustificato dal teorema di Weierstrass [8] secondo il quale :

*Se una funzione  $f$  è continua in un intervallo delimitato da due estremi, definito un arbitrario  $\epsilon > 0$ , esiste un polinomio  $P(x)$  tale che ogni funzione continua possa essere approssimata sufficientemente bene da un polinomio di grado sufficientemente elevato*

$$|f - P(x)| < \epsilon \quad (2.5)$$

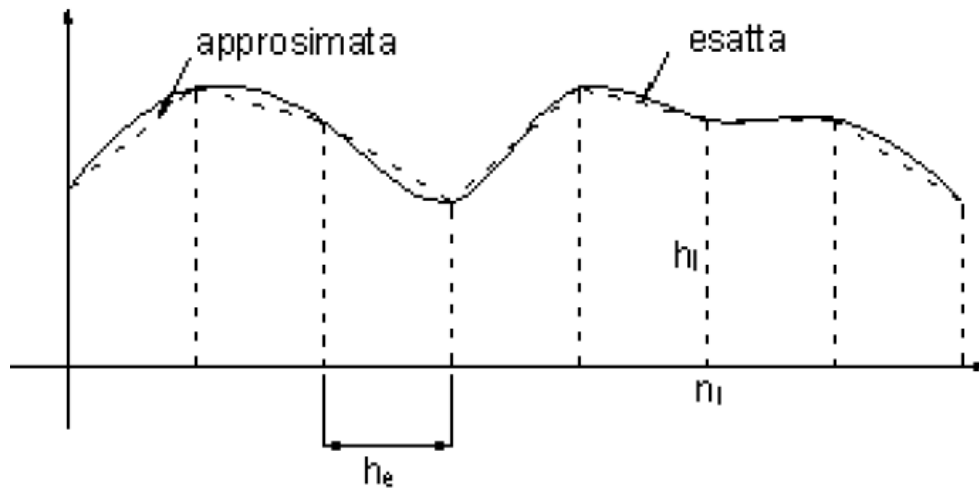


Figure 2.23: approssimazione della funzione incognita.

Nella figura [2.23] si vede chiaramente come funziona il sistema di approssimazione. Gli  $h_i$  sono i nodi, la funzione esatta rappresenta la funzione incognita sull'intero dominio  $u(x)$ , la funzione approssimata è composta da una serie di funzioni approssimanti tra nodo e nodo.

La funzione incognita risulterà essere:

$$u(x) = N_1(x)u_1 + N_2(x)u_2 + \dots + N_i(x)u_i = N^T \Delta \quad (2.6)$$

Le funzioni  $N_i(x)$  prendono il nome di *funzioni di forma* e sono tante quanti sono i nodi; dipendono soltanto dalla forma dell'elemento e hanno valore unitario nel nodo a cui si riferiscono, invece valgono zero in corrispondenza di tutti gli altri nodi.

Nella forma matriciale,  $N^T$  è il vettore contenente le funzioni di forma, e  $\Delta$  è il vettore contenente il valore puntuale dello spostamento nel nodo. L'equazione di risoluzione globale diventa quindi:

$$K\Delta = F \quad (2.7)$$

### 2.2.1.3 Significato fisico della matrice di rigidezza

Passare dalla teoria delle molle aiuta a comprendere meglio anche il modello utilizzato dal FEM.

Spesso, nello studio delle strutture i corpi vengono schematizzati e modellizzati in corpi con un insieme di molle. Queste molle possono essere di vario tipo, ma per semplicità ci si riferisce ad una semplice molla traslazionale lineare soggetta a sforzo assiale. Il comportamento di questo tipo di molla è definito dalla semplice equazione:

$$F = k\Delta l \quad (2.8)$$

dove  $\Delta l$  è l'allungamento subito dalla molla quando soggetta ad una forza  $F$ , e  $K$  è la rigidezza della molla.

È evidente l'analogia con il caso strutturale che si è analizzato in precedenza. In generale, si definisce *rigidezza* di una struttura, o *matrice di rigidezza*, la funzione di trasferimento dall'insieme delle forze applicate a all'insieme degli spostamenti [8].

Chiaramente, passando da una molla con un singolo grado di libertà, ad un sistema più complesso si passa da rigidezza a matrice di rigidezza, dall'allungamento  $\Delta l$  al vettore degli spostamenti incogniti  $U$ , da forza applicata  $f$  al vettore dei carichi, o termini noti,  $F$

### 2.2.1.4 Metodo risolutivo del calcolatore

Gli step per il calcolo della soluzione tramite FEM sono:

- Discretizzare il corpo continuo in una mesh che definisce il volume dell'elemento; la posizione dei nodi, e quindi le interazioni tra gli elementi. Le informazioni dell'elemento sono contenute solamente nei nodi, il calcolo della matrice di rigidezza, degli spostamenti, e di tutte le grandezze derivate verrà fatto esclusivamente in questi punti.
- Calcolo della matrice di rigidezza di ogni elemento del sistema.
- Gli spostamenti dei nodi vengono ricavati attraverso degli algoritmi, e viene imposta la coerenza tra questi spostamenti. Viene quindi impostato un sistema algebrico di equazioni differenziali per ogni elemento caratterizzato dall'aver una equazione per ogni grado di libertà.
- Si assembla il sistema globale di equazioni che comprende le equazioni di ogni elemento del continuo tenendo conto di: avere equilibrio ai nodi; avere compatibilità degli spostamenti all'interfaccia; considerare le condizioni al contorno (forze, vincoli, carichi termici).
- Il sistema globale viene risolto attraverso l'algebra delle matrici, determinando i valori nodali dell'incognita.

Dunque, il solutore calcola il valore dell'incognita elemento per elemento e la integra nello spazio su tutto il dominio. Tuttavia, oltre ad integrare nello spazio bisogna integrare nel tempo. La durata temporale dell'intero fenomeno viene suddivisa in infinitesimi intervalli temporali, chiamati **step**. Ad ogni step il codice verifica la validità della soluzione di tutti gli elementi, e prima di passare allo step successivo si accerta che il risultato delle equazioni teoriche sia congruente con lo stato di partenza. Se questa condizione è rispettata si parla di "convergenza della soluzione", e il processo viene reiterato per tutta la discretizzazione temporale.

La discretizzazione spaziale e temporale permette di verificare istante per istante, in ogni punto dell'oggetto in deformazione, le deformazioni, le tensioni, e ogni altro parametro governante il sistema.

### 2.2.1.5 Il problema numerico

In base alla natura del problema ci sono delle relazioni matematiche che regolano il fenomeno. Sia che la formulazione sia strutturale, termica, o di altra natura, ci sono delle forti analogie tra i diversi campi di applicazione del modello. In questa sede si parlerà solamente del campo strutturale.

I calcoli algebrici che vengono applicati dal metodo agli elementi finiti si basano sulla relazione esistente tra il campo di spostamenti e quello dei carichi agenti sull'oggetto in analisi.

Parlando inizialmente di un solo elemento finito si può scrivere:

$$\{f\} = [K] * \{u\} \quad (2.9)$$

dove  $\mathbf{f}$  è il vettore dei carichi agenti sul singolo elemento,  $\mathbf{u}$  è il vettore degli spostamenti nodali dell'elemento, ed infine  $\mathbf{K}$  è la matrice di rigidezza.

Dopo aver calcolato la relazione precedente per ogni elemento questi vengono combinati algebricamente nelle matrici globali ottenendo la relazione:

$$\{F\} = [K] * \{U\} \quad (2.10)$$

dove  $\mathbf{F}$  è il vettore dei carichi globale,  $\mathbf{U}$  è il vettore degli spostamenti nodali globali, ed infine  $\mathbf{K}$  è la matrice di rigidezza globale. Tutti e tre derivano dall'assemblaggio delle matrici dei singoli elementi dell'oggetto.

La matrice di rigidezza è nota, dipendendo dalle caratteristiche dell'elemento, i carichi applicati sono anch'essi noti, dipendendo dalla configurazione del problema. Ci si trova quindi davanti ad un problema staticamente determinato.

Per risolvere questo sistema lineare si devono seguire due strade diverse, a seconda che il problema sia lineare oppure non lineare.

**Lineare** Si tratta del caso più semplice. I termini della matrice di rigidezza sono dei numeri costanti, quindi la soluzione è ottenibile con una semplice inversione della matrice:

$$\{U\} = [K]^{-1} * \{P\} \quad (2.11)$$

Solitamente si parla di analisi lineare quando si rimane nel campo elastico di deformazione.

**Non lineare** I problemi non lineari sono molto più complessi. I termini della matrice di rigidezza non sono costanti ma dipendono dagli spostamenti incogniti:

$$[K(\{U\})] * \{U\} = \{P\} \quad (2.12)$$

In questo caso per la risoluzione si deve ricorrere a dei metodi iterativi di risoluzione molto più pesanti in termini di calcolo.

I problemi non lineari sono quelli legati alla deformazione plastica.

### 2.2.1.6 Integrazione rispetto al tempo

Come si è detto in precedenza il metodo agli elementi finiti effettua un'integrazione spaziale e un'integrazione temporale. I transitori solitamente sono legati ai problemi non lineari, e possono essere gestiti con due tipi

di algoritmi:

- algoritmi di tipo implicito;
- algoritmi di tipo esplicito.

Entrambi i metodi utilizzano dei passi temporali successivi e infinitesimi, più o meno piccoli, gli *step*.

**Implicito** Il metodo implicito calcola la soluzione al passo temporale  $n + 1$  basandosi sulla conoscenza della soluzione al passo  $n$  e sulla conoscenza delle condizioni imposte al passo  $n + 1$ .

Sono delle soluzioni tipicamente più semplici e sicure. Si utilizzano quando il problema è quasi stazionario e non è fortemente influenzato dal tempo. Potrebbe non portare a convergenza nel caso di forti non-linearità, in tal caso diviene necessario ridurre il time-step e quindi allungare ulteriormente dei tempi di calcolo già molto lunghi per natura del metodo stesso.

Un esempio di algoritmo implicito è il *metodo di Newmark o il metodo di Eulero all'indietro*.

**Esplicito** Il metodo esplicito calcola la soluzione al passo temporale  $n + 1$  basandosi sulla conoscenza della soluzione e delle condizioni imposte al passo  $n$ .

È un metodo più complesso in termini di calcolo. Si usa in quelle situazioni che sono fortemente influenzate dal tempo, e che avvengono in range temporali molto ridotti. L'equazione risolvente non si può limitare alle semplici (2.11) o (2.12), ma deve tenere conto anche della velocità di deformazione e delle accelerazioni. Nonostante sia caratterizzato da time-step più piccoli rispetto a quelli del metodo implicito, i tempi di calcolo sono ridotti poichè la convergenza è sempre assicurata. Il time-step non può essere regolato dall'utente ma viene calcolato dal software, poichè il passo temporale deve essere inferiore al tempo impiegato dall'onda per attraversare un elemento, legge di Courant-Friedrichs-Levy (CFL) [9].

Un esempio di algoritmo esplicito è il *metodo delle differenze finite*.

### 2.2.1.7 Approcci di simulazione

Nel metodo agli elementi finiti ci sono diversi approcci di simulazione:

- Lagrangiano;
- Euleriano;
- ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian).

Gli approcci tradizionali per la descrizione del continuo sono i primi due.

l'approccio euleriano studia le particelle materiali come se fossero fisse nello spazio. Il flusso di materiale è modellato descrivendo l'andamento delle variabili in punti fissi in funzione del tempo. Il materiale si deforma mentre la mesh resta fissa.

L'approccio lagrangiano permette di seguire le particelle nel loro moto. Il flusso di materiale è descritto seguendo l'andamento di ogni singola particella descrivendone le caratteristiche come funzioni dello spazio e del tempo. La mesh rimane fissa e i punti materiali del corpo sono uniti al reticolo della mesh e si muovono con la stessa velocità.

L'approccio lagrangiano è senz'altro più accurato, ma richiede dei tempi di calcolo maggiori. Inoltre, in caso di grandi deformazioni potrebbero esserci distorsioni esagerate della mesh dal quale consegue una matrice di rigidità non più gestibile dal codice. Per ovviare a questo problema è bene settare un limite di



distorsione della mesh oltre la quale il software sospende il processo di calcolo ed esegue un re-meshing (esegue una nuova discretizzazione non più distorta). Ogni qualvolta che la mesh raggiunge il livello di distorsione critico viene effettuato automaticamente il re-meshing, e ciò allunga ulteriormente i tempi di calcolo.

Nell'approccio euleriano la mesh rimane fissa e il materiale la attraversa. Questo criterio è preferito nei casi in cui il materiale subisca spostamenti veloci, come nel moto dei fluidi.

L'approccio ALE utilizza una tecnica ibrida che permette di godere dei vantaggi di entrambi i metodi [10].

### 2.2.2 Strumentazione utilizzata

#### 2.2.2.1 Ansys Workbench

Il software per la modellazione FEM utilizzato è Ansys Workbench 2020. Si tratta di uno dei programmi di modellazione agli elementi finiti più noto e utilizzato.

Nello specifico è stato utilizzato in modalità di integrazione implicita nell'ambiente *Satic Structural*

## Chapter 3

# Caratterizzazione del materiale dello scarpone

### 3.1 Materiale vergine

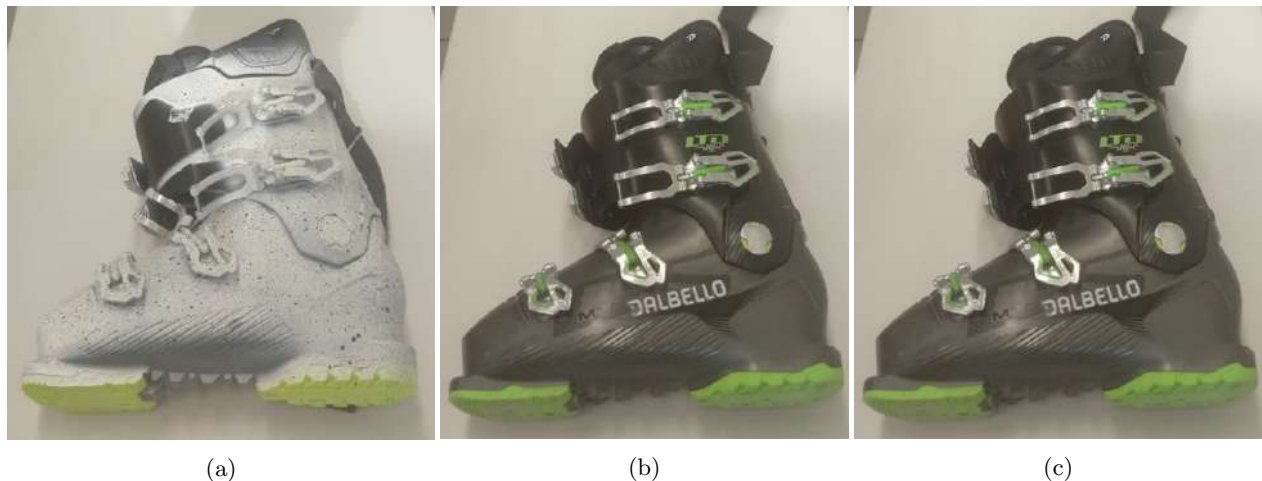


Figure 3.1: Scarponi a disposizione per i test. (a) scarpone nuovo, taglia 265, anno 2021. (b) scarpone a fine vita dopo 20 giorni di utilizzo, taglia 275, anno 2019. (c) scarpone a fine vita dopo 50 giorni di utilizzo, taglia 275, anno 2019

Lo studio del materiale è stato fatto su un paio di scarponi DALBELLO DS MX LTD nuovi, taglia 265 fig.[3.1a]. Vi sono a disposizione anche un paio di scarponi usati per 20 giorni fig.[3.1b], e un paio usati per 50 giorni fig.[3.1c]. Un interessante sviluppo futuro sarebbe la verifica dell'effetto della degradazione del prodotto usato per fasce temporali diverse, e soprattutto l'influenza di più ricicli sul blend finale.

Lo scarpone è caratterizzato dall'aver scafo e gambetto realizzati in materiali diversi, seppur simili tra loro. Entrambi sono dei poliuretani termoplastici a base poliestere.

L'obiettivo è di completare la definizione del materiale all'interno del modello FEM. Il materiale riciclato sarà un blend di questi due polimeri, ai quali si può aggiungere materiale vergine. L'obiettivo è di ridurre il più possibile il materiale vergine d'apporto. Si deve fare la caratterizzazione meccanica del materiale scafo, del materiale gambetto, e del blend.

Se la caratterizzazione mostra che la differenza tra scarpone originale e scarpone fatto con materiale riciclato è nulla non sarà necessario aggiungere prodotto vergine. Queste permetterebbe di evitare il più possibile sprechi di materiale.

Lo studio del materiale è stato fatto su un paio di scarponi DALBELLO DS MX LTD nuovi, taglia 265 fig.[3.1a]. Vi sono a disposizione anche un paio di scarponi usati per 20 giorni fig.[3.1b], e un paio usati per 50 giorni fig.[3.1c]. Un interessante sviluppo futuro sarebbe la verifica dell'effetto della degradazione del prodotto usato per fasce temporali diverse, e soprattutto l'influenza di più ricicli sul blend finale.

#### 3.1.1 Disassemblaggio scarpone

La prima fase consiste nel disassemblaggio dello scarpone. È una fase importante di cui tener conto. Smontare lo scarpone e separare ogni componente è molto complicato e oneroso in termini di tempo. È di particolare interesse considerare questo aspetto in fase di design della nuova componentistica, in quanto i tempi di disassemblaggio sono un parametro chiave nel *Design for Disassembly* e quindi nel *Design for Recycling*. È necessario studiare il pezzo in modo che ogni componente sia facile da smontare, ed eventualmente da sostituire. Questo, permette lo studio di un efficiente sistema di smaltimento e riciclo. Inoltre, aumenta notevolmente la vita del prodotto, poiché invece di buttarlo a seguito della rottura di un componente è possibile la sostituzione di quest'ultimo.

Potenzialmente questa fase può essere compiuta in automatico con sistemi di separazione basati sull'effetto triboelettrico, come realizzato dall'azienda *Plastic sort* nel progetto *Reskiboot*



Figure 3.2: (a) Ganci di chiusura dello scarpone. I più lunghi sono del gambetto e i più corti sono dello scafo. In basso si vedono le ghiera, regolabili solo per il gambetto (b) Componentistica di materiale diverso dall'Elastollan.

### 3.1.2 Caratterizzazione materiale scafo e materiale gambetto

Una volta ottenuti scafo e gambetto liberi dalla restante componentistica, si procede con la preparazione dei provini ad osso di cane secondo ISO527.

La procedura consiste nel:

- Macinare le due parti, l'uno indipendentemente dall'altro.
- Stampare un numero di provini sufficiente per eseguire un'analisi statisticamente rilevante.
- Eseguire le prove di trazione per la caratterizzazione dei due materiali.

**Macinazione** In questa fase si trasformano scafo e gambetto in frammenti di dimensione massima di 5 mm, utilizzando una griglia con fori da 5mm.

**Preparazione ossi di cane** I provini sono stati stampati con la stampante ad iniezione Babyplast, a disposizione al dipartimento DICAM (dipartimento di ingegneria chimica civile e ambientale) dell'università di Bologna, sede Terracini.

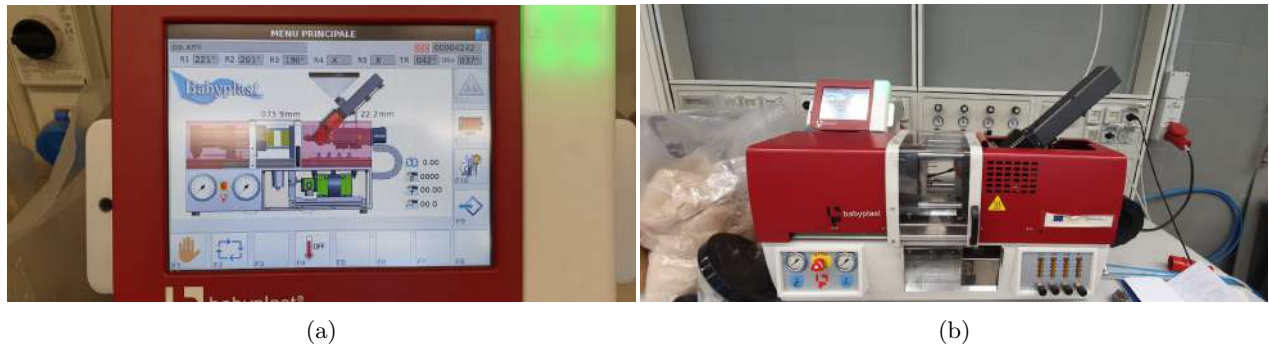


Figure 3.3: (a) Schermata della stampante ad iniezione dove sono mostrati alcuni parametri di stampaggio. (b) Stampante ad iniezione Babyplast.

In figura [3.3a] sono rappresentati alcuni parametri di stampaggio. In particolare si è stampato con: temperatura della vite di 220°C; temperatura della camera di 200°C; temperatura dell'ugello 190°C; e pressione di iniezione di 70 Bar.

Per lo scafo sono stati stampati circa 25 provini, mentre per il gambetto sono stati stampati 50 provini. Si è preferito stampare un numero maggiore di provini per il gambetto a causa dei difetti sorti nella fase di macinazione di cui si è precedentemente parlato. Sia per lo scafo che per il gambetto sono stati scartati i primi 5 provini; ciò per la possibilità di ottenere un materiale non puro, mischiato con il materiale precedentemente stampato dalla macchina, cui residui sarebbero potuti essere ancora presenti nella vite.

Per quanto riguarda il materiale del gambetto, ci si è imbattuti nel problema del distacco dei campioni dallo stampo. Dopo aver stampato il decimo provino, si è applicato con un panno del WD-40 sugli stampi. Inoltre, si è cambiato il numero di colpi dell'estrattore da uno a due. A seguito di questi cambiamenti non si sono più incontrati problemi di distacco. Durante la prova di trazione uniassiale si è tenuto conto dell'applicazione del distaccante e si sono confrontati i provini prima e dopo l'applicazione di esso, per verificare che non ci siano state variazioni delle caratteristiche meccaniche del materiale.

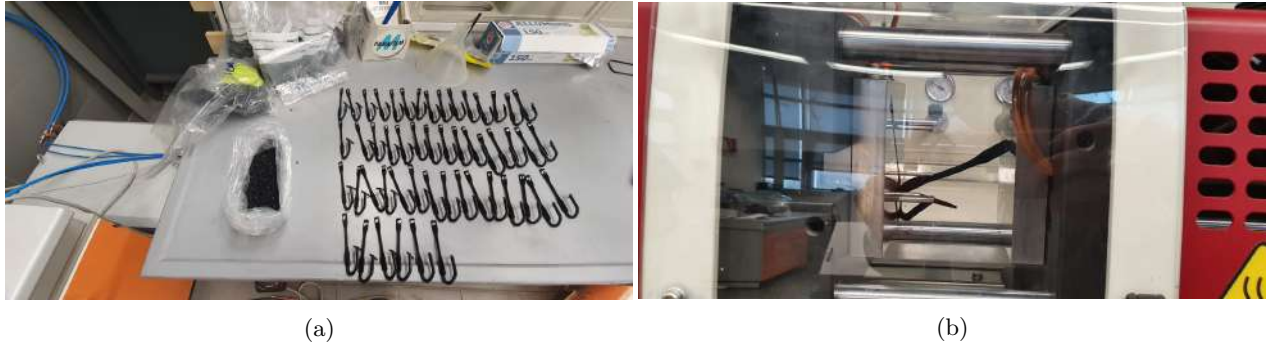


Figure 3.4: (a) Sulla sinistra, il pellet avanzato del gambetto. Sulla destra, i provini del gambetto appena stampati. (b) Un provino del gambetto con problemi di distacco dallo stampo.

**Prova di trazione uniassiale** Scafo e gambetto sono stati macinati, stampati, e trazionati in due momenti differenti. Tuttavia, si è avuta l'accortezza di mantenere lo stesso intervallo temporale di due giorni tra lo stampaggio dei provini, e la prova di trazione. Questo intervallo di tempo consiste in due giorni di attesa dal momento in cui sono stati stampati al momento in cui sono stati tirati.

Le prove di trazione sono state eseguite sulla pressa Instron, modello 5966, presente al DICAM.

Nel metodo sono state inserite le caratteristiche della prova. Un parametro fondamentale è la velocità delle traverse, in questo caso è stata fissata a 50 mm/min. Questa pressa permette di dare in output direttamente i valori di sforzo e deformazione. Questi parametri sono ricavati dalla macchina, che realizza il calcolo della forza necessaria a mantenere costante la velocità rispetto allo spostamento della traversa superiore. Per calcolare queste informazioni è necessario fornire al software le dimensioni caratteristiche del tratto utile del provino: larghezza 5 mm, spessore 2 mm, lunghezza 25 mm.

Una volta definito il metodo si può procedere e testare i provini. Sia per lo scafo che per il gambetto sono state utilizzati gli afferraggi pneumatici MTS tarati con una pressione di circa 80 Bar.

Il materiale dimostra delle caratteristiche molto elastiche. infatti, arriva a rottura intorno al 1000% di deformazione. Questa, è un'informazione importante già per se; ci fa ben pensare che per un materiale di questo tipo probabilmente sia necessario un modello iperelastico. Tuttavia, come sarà analizzato più approfonditamente nei prossimi paragrafi verranno analizzati diversi modelli prima di soffermarsi sullo studio dell'iperelasticità.

Si è osservato un comportamento abbastanza in linea con quello che ci si sarebbe aspettato. L'analisi statistica ha dato dei buoni risultati.



(a)



(b)

Figure 3.5: In figura è rappresentato il set-up della prova di trazione. (a) Afferraggi pneumatici. (b) Provino serrato negli afferraggi pneumatici appena prima di essere tirato.



(a)



(b)

Figure 3.6: In figura sono rappresentati (a) Il provino durante la prova; (b) Il provino arrivato a rottura, ancora montato sulle ganasce.

Di seguito si riporta il report delle prove effettuate sul gambetto.

Table 3.1: Report gambetto 2/02/2022. T=21°C, RH=20%

E [Mpa]	TS, break [Mpa]	strain at break [%]	Corsa finale [mm]	strain, calc[%]	N°campione
207,29	46,98	1073,18	268,35	1073,4	15
185,64	46,92	1058,19	264,61	1058,44	17
177,38	39,3	860,86	215,3	861,2	16
186,69					14
183,51	46,99	1053,19	263,35	1053,4	18
183,41	41,2	959,52	237,88	951,52	12
193,83	37,73	966,19	241,58	966,32	30
178,24	42,58	990,86	247,76	991,04	34
177,66	37,15	836,86	209,31	837,24	35
190,06	38,68	887,66	222,05	888,2	39

Table 3.2: Risultati dell'analisi statistica del gambetto

	E [Mpa]	TS, break [Mpa]	strain at break [%]	strain, calc[%]
MEDIA	<b>186</b>	<b>41,9</b>	<b>965</b>	<b>965</b>
SD	<b>9</b>	<b>3,9</b>	<b>83</b>	<b>83</b>
ERR%	4,6%	9,2%	8,6%	8,6%

## 3.2 Blend polimerica tra i materiali di scafo e gambetto

I materiali di scafo e gambetto sono stati caratterizzati. Si procede creando la blend polimerica e verificandone le proprietà della miscela.

Innanzitutto, è necessario preparare il mix di pellet del gambetto e dello scafo. Successivamente, si procede allo stampaggio dei provini. Infine si esegue alla prova di trazione uniassiale su questi ultimi.

### 3.2.0.1 Preparazione della blend

Per la preparazione della blend si procede innanzitutto con la determinazione delle percentuali di uno e dell'altro materiale. Si è deciso di mantenere le percentuali in peso secondo le proporzioni dello scarpone. Nel modello da noi analizzato, una volta separata tutta la componentistica si ha il 64,2 % di materiale dello scafo, a fronte del 35,8 % del materiale del gambetto. Nel caso preso in analisi si è voluto ottenere solamente 200g di materiale; di conseguenza si sono presi 128,4g di materiale dello scafo e 71,6g di materiale del gambetto. Il gambetto è stato pesato direttamente con una bilancia. Lo scafo non era stato pesato al tempo della macinazione, per questo il suo peso è stato ricavato dal modello CAD.

Si era pensato inizialmente di mixare i due materiali in un miscelatore in fuso di tipo Brabender, per ottenere un materiale più omogeneo. Tuttavia, si è voluto mantenere il processo il più simile possibile a quello che sarebbe stato poi riproposto in scala industriale. Effettuare il passaggio del pellet nel blender significa avere una postazione di lavoro in più, un aumento dei tempi e quindi dei costi. Chiaramente certe fasi della produzione sono indispensabili, ma è bene cercare di limitare il più possibile il peso della produzione, soprattutto se si tratta di un processo di riciclo. Inoltre, un altro fattore determinante per questa scelta è la degradazione del materiale. Si sta lavorando con un materiale polimerico che ha già subito un ciclo termico di produzione, ha lavorato per tutta la vita dello scarpone, è stato rimacinato, e ora sta per subire un nuovo trattamento termico per lo stampaggio dei provini. Da ciò si deduce che sia meglio escludere un ulteriore trattamento termico se non indispensabile. Considerando la buona affinità tra i due materiali (entrambi sono

due poliuretani termoplastici a base poliestere) si è ritenuto verosimile pensare che la miscelazione nella vite della stampante a iniezione fosse sufficiente. In caso i dati sperimentali non avessero validato questa teoria, si sarebbe ricorso al premixaggio. Ciò nonostante la scelta presa è stata validata dalle evidenze sperimentali che dimostrano la qualità in termini di caratteristiche meccaniche della blend in tabella [3.3].

### 3.2.0.2 Caratterizzazione della blend

**Preparazione dei provini ad osso di cane** Come spiegato nella sezione precedente, il materiale è stato stato stampato a seguito di un semplice miscelazione meccanica. L'unica accortezza presa è stata quella di preriscaldare il pellet alla temperatura di 80°C con lo scopo di togliere l'umidità dal materiale.

La stampante è stata impostata con gli stessi parametri di temperatura e pressione utilizzati per i materiali di scafo e gambetto. Questa volta sono stati stampati circa 30 provini, e anche in questo caso i primi 5 vengono considerati non validi.

Solitamente la stampante viene utilizzata con altri materiali, e per quanto impegni ci si possa mettere nel pulire la vite, i primi campioni stampati vedranno sempre una percentuale di composizione estranea.

Gli stampaggi non hanno incontrato problemi di distacco dallo stampo. Pertanto, non è stato necessario applicare del distaccante.

**Prova di trazione uniassiale** Come per gambetto e scafo si è aspettato due giorni prima di realizzare la prova di trazione.

Si sono mantenuti costanti i parametri della macchina. La velocità si è mantenuta pari a 50mm/min e le dimensioni del tratto utile sono rimaste le stesse. Di seguito si riportano i risultati delle prove.

Table 3.3: Report blend 24/02/2022. T=21°C, RH=20%

E [Mpa]	TS, break [Mpa]	strain at break [%]	Corsa finale [mm]	strain, calc[%]	N° campione
170,35	40,78	881,86	219,88	879,52	15
162,43	51,89	1060,19	264,38	1057,52	10
163,67	42,59	889,19	221,38	885,52	13
123,46	45,97	960,53	239,46	957,84	22
154,81	46,4	958,19	238,96	955,84	21
116,71	46,24	970,19	241,71	966,84	19
148,42	42,98	883,19	220,21	880,84	14
122,32	45,08	995,5	248,38	993,52	11
159	45,27	954,19	237,96	951,84	12
134,65	47,88	986,86	246,13	984,52	13

Table 3.4: Risultati dell'analisi statistica del blend

	E [Mpa]	TS, break [Mpa]	strain at break [%]	strain, calc[%]
MEDIA	146	45,5	954	951
SD	19	2,9	54	54
ERR%	12,8%	6,4%	5,6%	5,7%

Dai risultati dell'analisi statistica si può dedurre che il materiale derivante dalla miscela dello scafo e del gambetto è confrontabile con i materiali vergini. Come ci si sarebbe aspettato c'è un leggero calo delle proprietà meccaniche, in particolar modo rispetto al materiale dello scafo.



Il confronto dei risultati ottenuti dall'analisi statistica del blend rispetto a quella dello scafo e del gambetto ci permette di validare una importante argomentazione. Il materiale ottenuto dal riciclo dello scarpone è di qualità. In quanto a proprietà meccaniche è con i materiali vergini. Per di più, il processo tecnologico applicato, con le sue semplificazioni, si è dimostrato valevole.

### 3.3 Calibrazione e validazione del modello FEM di un materiale iperelastico

Dal momento in cui si è attestata la validità del materiale di riciclo, non rimane che implementare il modello del materiale nel modello FEM. L'obiettivo di questa analisi è quello di realizzare il corretto modello del nostro materiale tramite un software di simulazione, a partire dai dati sperimentali della prova di trazione uniassiale, e successivamente confrontare i dati sperimentali con quanto ricavato dal modello agli elementi finiti. Questo permette di validare il modello. una volta che il modello è stato validato sarà possibile implementarlo nella simulazione agli elementi finiti dell'intero scarpone.

#### 3.3.1 Curva sperimentale

Innanzitutto, si sono analizzati con un foglio di calcolo Excel i dati sperimentali ottenuti da uno dei provini ad osso di cane del blend. Si è scelto come riferimento il materiale con il comportamento che si avvicina maggiormente al valor medio risultante dall'analisi statistica (provino n.14). Di questo, si sono presi la forza letta dalla cella di carico, e lo spostamento delle traverse, calibrato rispetto i 25mm del tratto utile del provino.

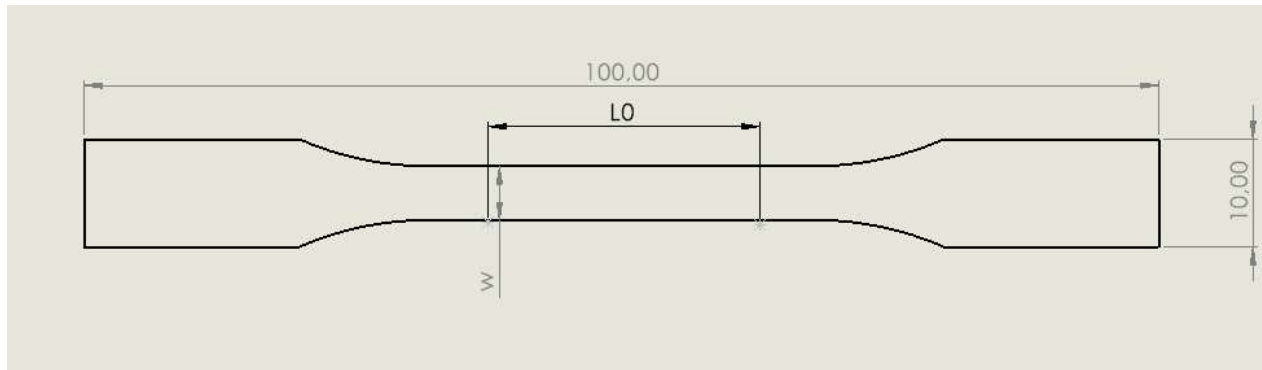


Figure 3.7: Geometria del provino secondo normativa ISO 527-1a

Nel foglio di calcolo si è calcolato lo sforzo ingegneristico dividendo la forza letta dalla cella di carico rispetto l'area trasversale iniziale del provino

$$A_0 = w * t * x \quad (3.1)$$

Successivamente si è calcolato lo *stretch ratio*<sup>2</sup>

$$\lambda = l/l_0 \quad (3.2)$$

<sup>2</sup>lo *stretch ratio* viene utilizzato per i materiali con ampia estensibilità, come le gomme o i polimeri iperelastici. É una misura della capacità estensiva (o deformazione normale) di un componente soggetto a tensione. É definita come il rapporto della lunghezza finale  $l$ , per un dato carico, rispetto alla lunghezza iniziale  $l_0$ . [11]

In figura [3.8] è rappresentata la curva che mostra lo sforzo ingegneristico al variare dello *stretch ratio* ottenuto dai dati sperimentali della prova di trazione uniassiale sul materiale del blend.

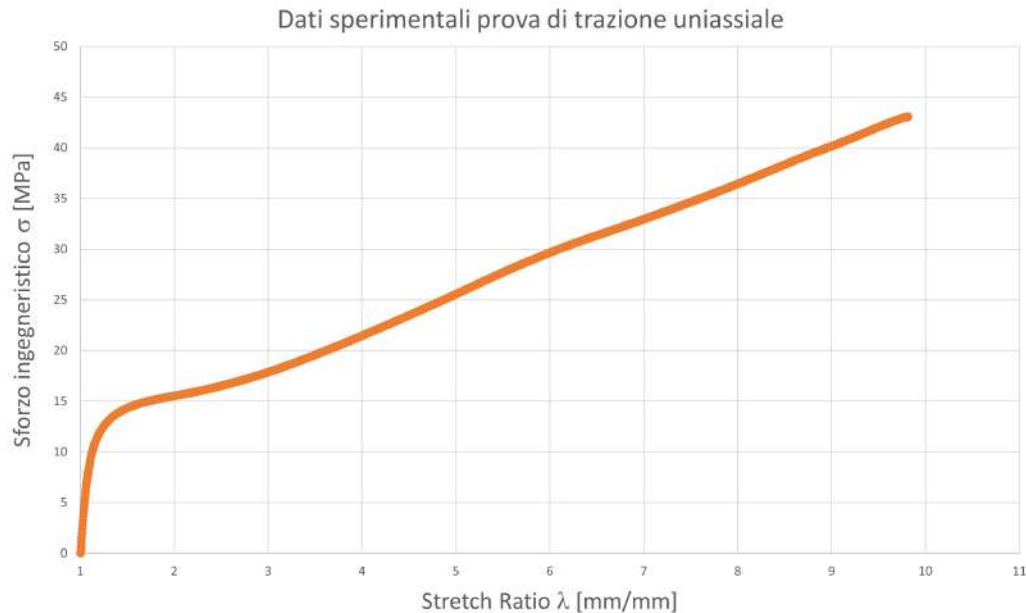


Figure 3.8: Curva sforzo ingegneristico - stretch ratio ottenuta a partire dai dati sperimentali della prova di trazione uniassiale sui provini ad osso di cane del blend

Utilizzare lo *stretch ratio* ci dà il vantaggio di poter fare la simulazione su un cubo unitario di materiale e riproporre le caratteristiche elastiche del materiale su una geometria semplificata. Questo ci svincola dal fare la simulazione sull'intero osso di cane, e quindi ci permette di alleggerire notevolmente il peso computazionale. Inoltre, riproporre l'intera prova di trazione tramite il software richiederebbe di riprodurre certi dettagli difficilmente riproducibile in ambiente FEM. Ad esempio, replicare il punto esatto nel quale le ganasce stringono il provino, come è stato fatto nella prova reale, sarebbe particolarmente difficile.

Per la natura stessa della geometria ad osso di cane, la rottura avviene nel tratto utile, dove l'area della sezione è più piccola e quindi lo sforzo è maggiore a parità di forza applicata. Avere la rottura nella zona centrale permette di avere uno stato di tensione uniassiale, e ciò permette di calcolare lo sforzo applicato. Vicino agli afferraggi non avrei uno stato di forza uniassiale in quanto entrerebbe in gioco la forza di serraggio, e lo stato di tensione non sarebbe più uniassiale. [12]

### 3.3.2 Simulazione FEM

Il programma utilizzato è Ansys Workbench 2020. Si vuole estrarre la curva sforzo ingegneristico-*stretch ratio* da confrontare con la curva ottenuta dai dati sperimentali.

**Geometria** Per simulare la prova di trazione si è utilizzato un cubo di lato unitario (1x1 mm).

In ogni modellazione agli elementi finiti è bene seguire una regola importante; è necessario osservare la presenza di simmetrie geometriche e di carico servendosene per ridurre l'estensione del modello FEM, quindi

ottimizzare i tempi e l'onerosità dei calcoli.

Nel nostro caso, si è preso un quarto di cubo, di base con lato 0.5x0.5 mm. La geometria è stata disegnata su SpaceClaim, software CAD integrato in Ansys. Il quarto di cubo è stato disegnato sul piano XZ e di conseguenza la direzione di sollecitazione segue l'asse Y.

**Materiale** Questa sezione è quella che ha richiesto più studio, e che ha mostrato il maggior numero di problemi.

Le simulazioni agli elementi finiti che avevamo visto fino a questo momento hanno sempre interessato materiali metallici. Nei metalli generalmente il campo plastico è relativamente limitato, e il tratto iniziale prima della strizione presenta un andamento perfettamente lineare. Effettuando generalmente simulazioni su componenti che lavorano a piccole deformazioni, prima di raggiungere la strizione, è sempre stato sufficiente usare un modello di materiale lineare isotropo.

Il materiale presenta un comportamento viscoso iperelastico. Inizialmente si è considerata solamente l'iperelasticità poichè la prova *Flex* è quasi statica, e non si valutano fasi di carico-scarico. La curva sforzo deformazione ha un andamento non lineare fin dal tratto iniziale. Le deformazioni raggiungono valori attorno al 1000%. Chiaramente un modello lineare elastico non può rappresentare correttamente questo comportamento. Tuttavia, si è fatta un primo tentativo per verificare il modello, ma come ci si aspettava il lineare elastico non può funzionare.

Il secondo tentativo è stato fatto utilizzando il modello elasto-plastico. Ansys consente di utilizzare la plasticità "bilineare" oppure "multilineare". Entrambi i modelli hanno consentito di avvicinarsi alla curva del modello sperimentale, ma non a sufficienza. Caratterizzare la plasticità presenta diverse complicazioni. Innanzitutto, per separare la componente plastica della deformazione da quella elastica è necessario essere a conoscenza del punto preciso nel quale avviene lo snervamento. È molto difficile individuare un punto di snervamento, dato che il materiale ha un comportamento non lineare fin dalle prime deformazioni. In generale, la caratterizzazione viscoplastica richiede l'utilizzo di modelli complessi, una delle più utilizzate è l'equazione costitutiva del modello di Chaboche. Una semplice prova di trazione uniassiale non è sufficiente; sono necessarie delle prove cicliche, ed eventualmente analizzando la deformazione derivante da sforzi intensificati su un intaglio. [13]

Vista la natura del materiale si è pensato che l'alternativa migliore sia stata quella di utilizzare un modello iperelastico. Uno dei modelli più utilizzati è quello di Mooney-Rivlin a 5 parametri, e Ansys da la possibilità di implementarlo nella simulazione.

Le gomme, o i materiali iperelastici, hanno svariate applicazioni ingegneristiche grazie alla loro facile reperibilità e al loro basso costo. Sono caratterizzati dall'avere delle importanti caratteristiche meccaniche quali: flessibilità; assorbimento di energia; resilienza; buona vita a fatica; smorzamento; facile modellabilità. La capacità di predire le proprietà di questi materiali è un importante problema tecnologico in continuo studio.

Le proprietà che meglio definiscono questi materiali sono:

- essere soggetti a grandi deformazioni quando soggetti a carichi anche relativamente limitati;
- avere un comportamento distintamente non lineare nell'estensione sotto carico;
- presentano buone caratteristiche di smorzamento, dovute alla viscoelasticità;
- sono incompressibili, o quasi incompressibili.

Le relazioni non lineari tra sforzo e deformazione sono ricavate dalla derivata parziale della funzione di energia di deformazione  $\mathbf{W}$  rispetto allo sforzo, o all'allungamento<sup>3</sup>. Storicamente ci sono due approcci per ottenere la funzione di energia di deformazione per questi materiali. Si tratta di teorie costitutive, modelli matematici che permettono di modellare agli elementi finiti i comportamenti iperelastici. Un primo approccio è basato sulla termodinamica statistica, e tiene conto della struttura molecolare microscopica. Un secondo approccio è basato su un criterio fenomenologico, che considera il materiale come se fosse un continuo. Secondo questo criterio la funzione di energia di deformazione è ricavata in termini di invarianti di deformazione (invarianti di sforzo o di allungamento). Per esprimere adeguatamente la non linearità sono necessari dei parametri caratteristici del materiale. Il numero di parametri aumenta all'aumentare della non linearità.

Uno delle teorie più importanti fondate sull'approccio metodologico è quella di Mooney. Ve ne sono due espressioni, una più specifica e una più generica. La teoria è basata su due ipotesi:

- il materiale è incomprimibile e isotropo quando lo sforzo non è applicato;
- la legge di Hooke è rispettata nel caso di taglio semplice. La forma più generica vede una arbitraria relazione non lineare tra stress e deformazione rispetto al taglio

Da qui Mooney ha ricavato matematicamente, attraverso considerazioni di simmetria, la seguente formulazione della funzione di energia di deformazione  $\mathbf{W}$ :

$$W = C_{01}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_{10}(\lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2 - 3) ; \quad \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1 \quad (3.3)$$

Dove  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  sono le deformazioni principali. Rivlin in seguito ha generalizzato il lavoro di Mooney ponendo la funzione di energia di deformazione in relazione rispetto agli invarianti:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= J^{-2/3} I_1, & I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ \bar{I}_2 &= J^{-4/3} I_2, & I_2 &= \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

dove  $\mathbf{J}$  è il prodotto delle deformazioni principali, ed è uguale a 1 nel caso di incomprimibilità e costanza del volume.

$$J = \det(\mathbf{F}) = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \quad (3.5)$$

La formulazione finale della generica legge costitutiva di Mooney-Rivlin a due costanti è così espressa [14]:

$$W = C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad (3.6)$$

Dove  $D_1$  è un parametro in incomprimibilità.

Il passaggio fondamentale rimanente è quello di far fittare la curva dei dati sperimentali con la curva del modello di Mooney-Rivlin. Per nostra fortuna Ansys WorkBench è in grado di fare il fitting in autonomia. È sufficiente inserire nel software la curva sforzo-stretch ratio ottenuta dal foglio di calcolo. Ansys riesce a trovare le costanti del modello e la curva che fitta al meglio la curva sperimentale. In precedenza, ho esposto il modello matematico a due costanti per semplicità. Tuttavia, come anticipato precedentemente il numero di costanti necessarie per rappresentare al meglio le caratteristiche del materiale sale all'aumentare della non

<sup>3</sup>La funzione di energia di deformazione  $\mathbf{W}$  è una funzione scalare di variabili tensoriali. può dipendere solo dal gradiente di deformazione  $\mathbf{F}$ , oppure può essere scritta rispetto al tensore di deformazione di Cauchy-Green  $\mathbf{C}$ .

linearità tra sforzo e deformazione. Nel nostro caso è stato necessario usare il modello di Mooney-Rivlin a 5 parametri, la cui formulazione della funzione di energia di deformazione diventa [15]:

$$W = C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{20} (\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{11} (\bar{I}_1 - 3) (\bar{I}_2 - 3) + C_{02} (\bar{I}_2 - 3)^2 + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad (3.7)$$

Utilizzare il modello iperelastico ci dà un ulteriore vantaggio. Una delle criticità del modello elastoplastico è il Modulo elastico di Young. Infatti, se si utilizza questo modello, Ansys chiede i due parametri caratteristici del tratto iniziale elastico: il modulo elastico  $E$  e il coefficiente di Poisson  $\nu$ . Il coefficiente di Poisson può essere calcolato con una ottima precisione attraverso software come Tracker, o ancora meglio attraverso la DIC. Nel nostro caso con la DIC si era ricavato un coefficiente di Poisson di circa 0.45. Per il modulo Young la questione è decisamente più complicata. Innanzitutto, sappiamo che il materiale ha una importante non linearità già dalle prime deformazioni, quindi parlare di tratto elastico è intrinsecamente poco appropriato. Come si può vedere in tabella [3.3] e tabella [3.1] il modulo elastico è il parametro che più risulta variare da un provino all'altro. Del resto sappiamo che la macchina misura il modulo elastico con il metodo della corda secante, il quale calcola il modulo rispetto ad un intervallo di deformazione che va dallo 0.025% allo 0.5%. Ovviamente considerando la curva sforzo deformazione di questo materiale, e considerando gli intervalli di deformazione che lo caratterizzano, il modulo così calcolato non è per niente rappresentativo del comportamento del materiale.

Del resto, il modulo di Young è la costante di proporzionalità della legge di Hooke, questa legge è regolata dalle ipotesi di risposta elastica e lineare. È vero che per deformazioni particolarmente basse, anche un materiale con un comportamento non lineare può mostrare delle proporzioni lineari. Tuttavia, per le deformazioni di nostro interesse il comportamento è fortemente non lineare, in questo caso le ipotesi della legge di Hooke cadono e il modulo elastico non ha più significato.

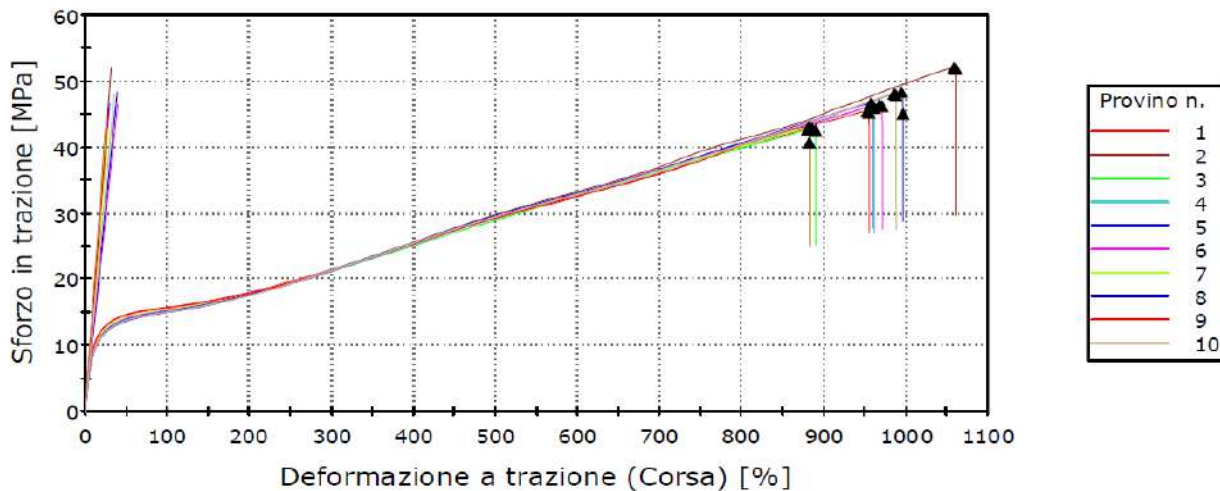


Figure 3.9: L'immagine mostra i grafici ottenuti in output dalla prova di trazione uniassiale del blend. Il grafico è ottenuto direttamente dal software della pressa Instron. Questo mostra la retta della pendenza iniziale tra 0.025% a 0.05%.

Ora che è stato descritto a livello teorico il modello del materiale utilizzato, si può presentare il percorso seguito dal simulatore.

Si prende un materiale generico di Mooney-Rivlin a 5 parametri dalla libreria di Ansys. Si elimina la legge del materiale predefinito e si sostituisce con i nostri dati sperimentali nella sezione "Uniaxial Test Data". Si inserisce la temperatura di 22°C; in corrispondenza della colonna "Strain" si inserisce lo *stretch ratio*, mentre nella colonna "Stress" si inserisce lo stress ingegneristico. Ansys riproduce la curva correttamente, come rappresentato in fig.3.10a

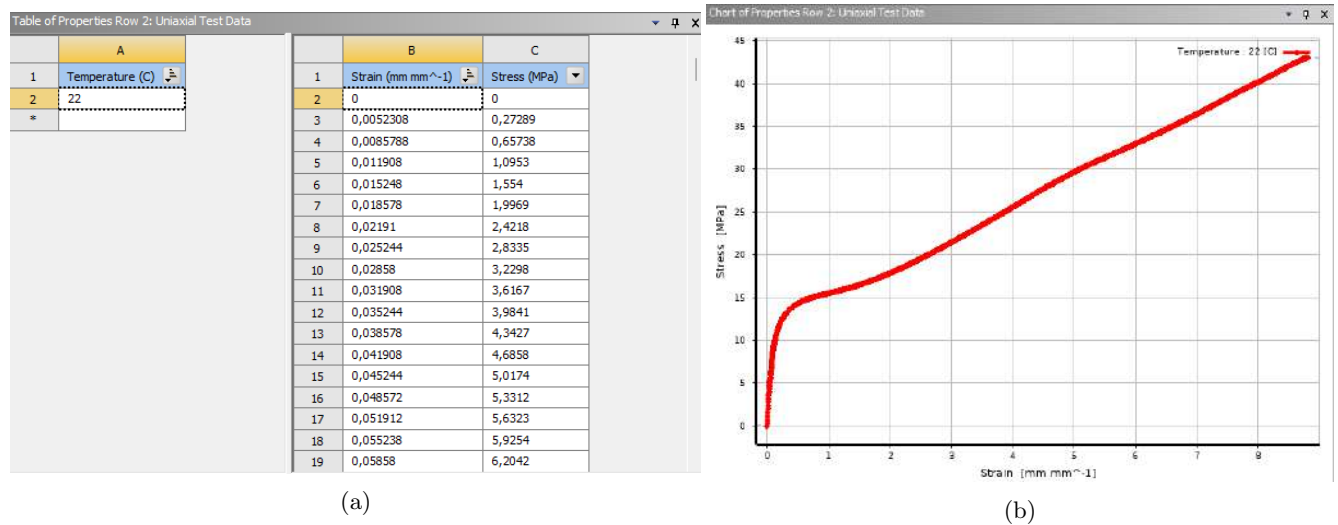


Figure 3.10: (a) Tabella nella quale sono stati inseriti lo *stretch ratio* nella prima colonna e lo sforzo ingegneristico nella seconda. (b) Curva che Ansys ha ricavato dai dati sperimentali.

A questo punto, i dati sperimentali sono stati importati nell'"*engineering data*" di Ansys e resta da far fittare la curva del modello matematico con quella sperimentale. Nella sezione delle proprietà del materiale viene aggiunto dal "Toolbox" il modello "Mooney-Rivlin 5 parameter". Nella sezione delle proprietà si apre l'opzione "curve fitting", cliccandola con il tasto destro si ha la possibilità di selezionare "Solve Curve Fit". Se si è scelto il modello con il numero di costanti adeguato al grado di non linearità della curva sperimentale, Ansys sarà in grado di fittare correttamente. se si è ottenuta una buona curva matematica, è possibile selezionare l'opzione "Copy calculated Values To Property" che inserisce tutte e 5 le costanti del modello di Mooney-Rivlin nelle proprietà del materiale come si vede da fig.[3.11].

Ansys permette di implementare nel modello anche:

- test biassiale;
- test a taglio;
- test volumetrico.

Tuttavia, per la strumentazione in nostro possesso non vi è la possibilità di effettuare nessun altro tipo di test. In particolare, per il momento non si possono ottenere provini iniettati ne per test a compressione ne per test a taglio. Dai test preliminari effettuati è comunque risultato che la sollecitazione più importante sia quella a trazione, nonostante in certi momenti della sciata lo scarpone può andare incontro anche a taglio e compressione rilevanti. In questa fase della sperimentazione si è considerata solo la trazione uniassiale.

In fig[3.12] invece si vede la curva ottenuta dal fitting del software. I 5 parametri permettono di riprodurre perfettamente la curva sperimentale. Si è provato anche il modello di Mooney-Rivlin a 3 parametri, per alleggerire l'onerosità dei calcoli, ma questo non è in grado di adattarsi correttamente alla curva sperimentale.

Il materiale è ora stato inserito correttamente e si può chiudere l'”Engineering Data” e aprire la sezione ”Model” per proseguire con il resto del pre-processing.

Properties of Outline Row 3: Elastomer Sample (Mooney-Rivlin)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Uniaxial Test Data	Tabular		
3	Scale	1		
4	Offset	0	MPa	
5	Mooney-Rivlin 5 Parameter			
6	Material Constant C10	-30,224	MPa	
7	Material Constant C01	48,402	MPa	
8	Material Constant C20	0,0044771	MPa	
9	Material Constant C11	-0,076925	MPa	
10	Material Constant C02	8,4537	MPa	
11	Incompressibility Parameter D1	0	MPa <sup>-1</sup>	
12	Curve Fitting	Fit Type: Mooney-Rivlin 5 Parameter		
13	Error Norm for Fit	Normalized Error		
14	Uniaxial Test Data	Tabular		
15	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
16	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
17	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		

Figure 3.11: Tabella delle proprietà del materiale. È indicata la sezione nella quale si è gestito il fitting tra curva sperimentale e curva del modello. Sono indicate anche le costanti calcolate da Ansys.

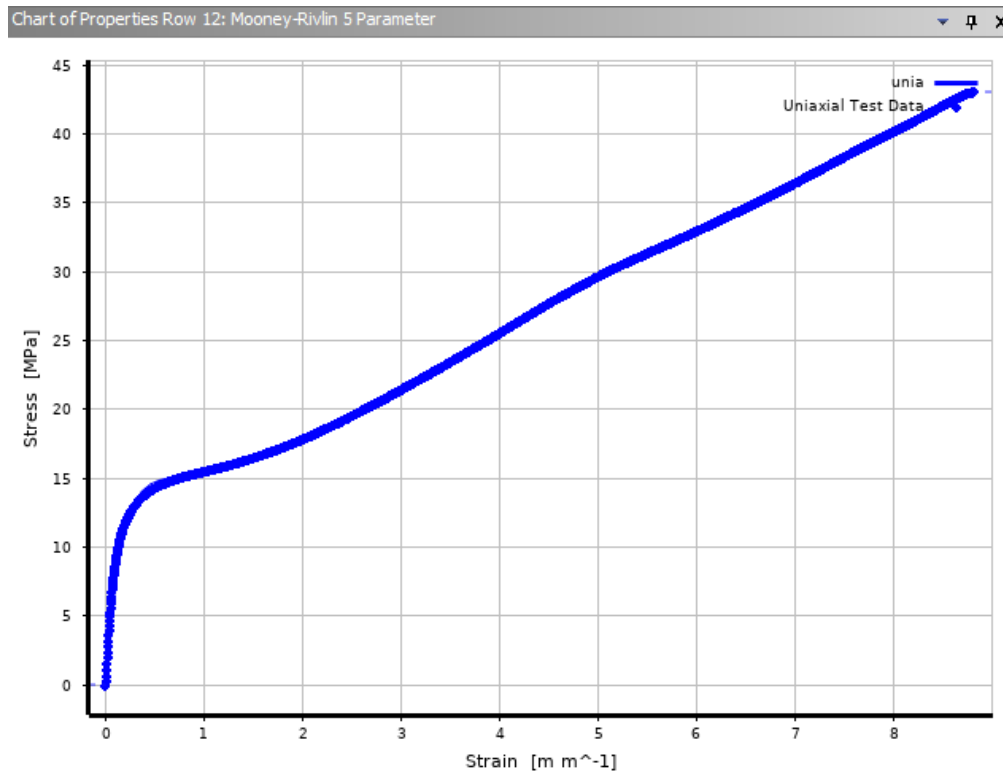


Figure 3.12: Curva che Ansys ha calcolato e che mostra la sovrapposizione perfetta tra la curva sperimentale e quella del modello matematico

**Vincoli** Alla porzione di cubo si sono inseriti i vincoli di simmetria su due facce laterali adiacenti e sulla faccia inferiore del parallelepipedo. Questo tipo di vincolo ci permette di garantire la condizione di simmetria della geometria assegnando manualmente i gradi di libertà dei nodi appartenenti al piano di simmetria. Secondo la scienza delle costruzioni per un modello piano, ai nodi giacenti sul piano di simmetria:

- non è concesso traslare in direzione perpendicolare al piano stesso;
- è concesso di traslare parallelamente al piano stesso;
- non è concesso di ruotare.

Queste tre condizioni, su Ansys, vengono soddisfatte dal comando "*Frictionless Support*", applicato a tutte e tre le facce, fig.[3.13].

Infine, è stato applicato un "*Displacement*" di 8.8 mm, che se sommato alla lunghezza del cubo di 1 mm permette di raggiungere il valore massimo dello *stretch ratio* identificato dalla curva sperimentale, come indicato in fig.[3.8].

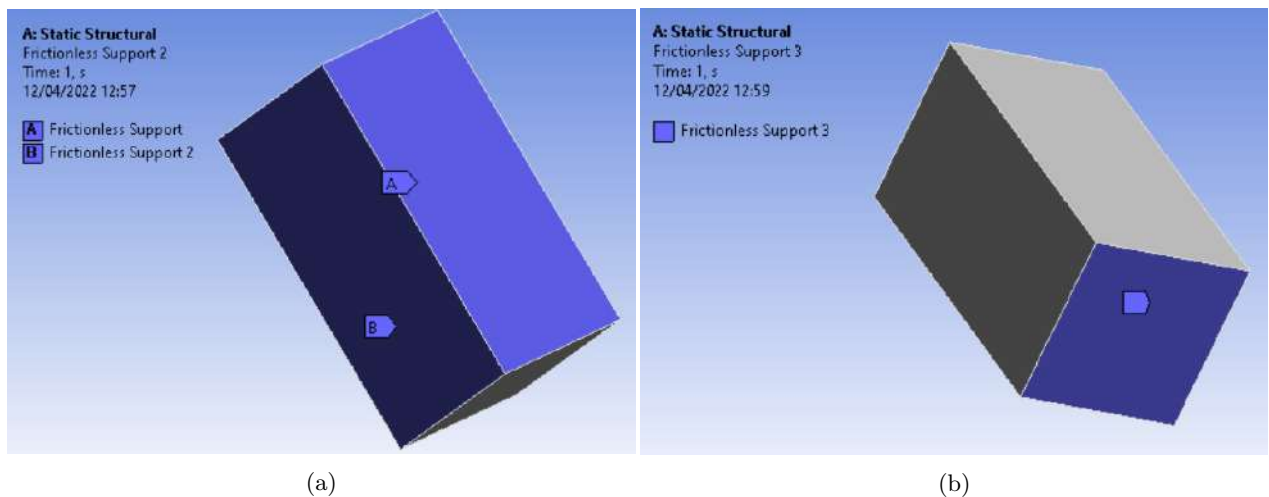


Figure 3.13: (a) Vincolo *frictionless support* applicato sulle due facce adiacenti del parallelepipedo. (b) Vincolo *frictionless support* applicato alla faccia inferiore del parallelepipedo

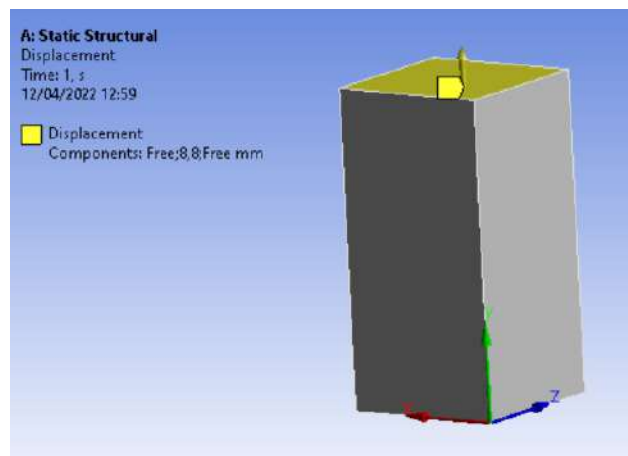


Figure 3.14: *Displacement* imposto sulla faccia superiore per simulare lo *stretch* della curva sperimentale



**Mesh** Si sono fatte diverse prove per ottimizzare la dimensione della *mesh*. Il quarto di cubo è una geometria molto semplice e di dimensioni limitate quindi una *mesh* abbastanza semplice e grossolana è sufficiente per avere degli ottimi risultati. Si è fatto uno studio di convergenza che ha ad una mesh quadratica di sizing mostrato in figura [3.15b].

Si è utilizzata una *mesh* quadratica con lati di 0.5 mm. Il risultato è raffigurato in fig.[3.15b]

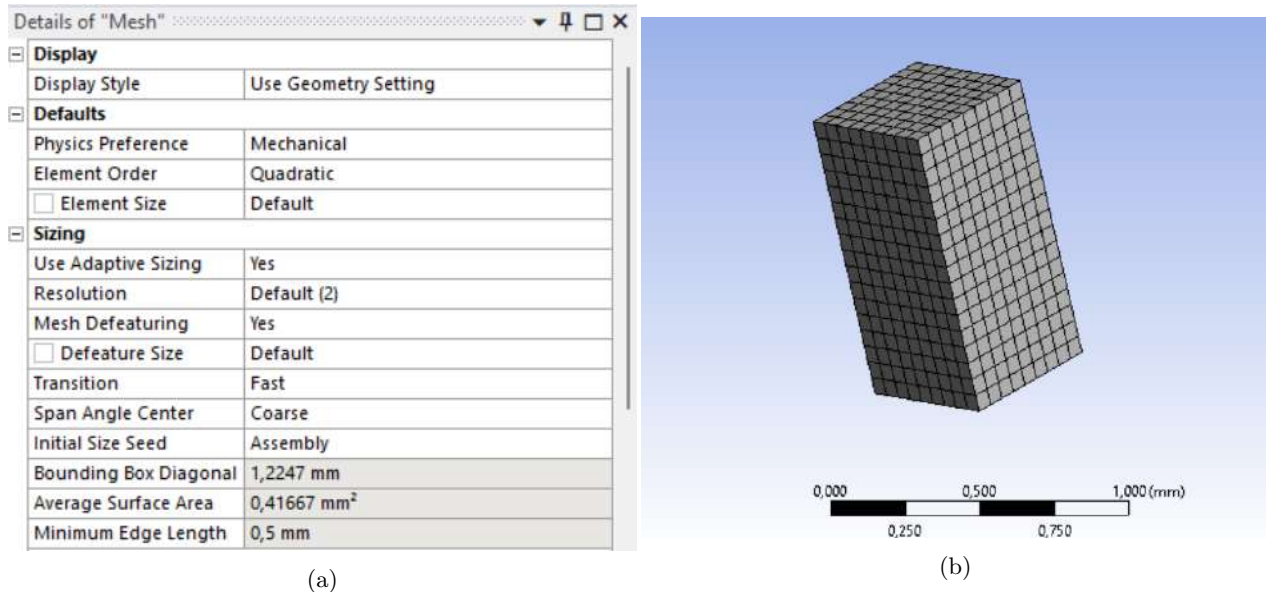


Figure 3.15: .

(a) Parametri della *mesh* (b) *mesh* sul parallelepipedo.

**Risultati** Prima di proseguire alla sezione dei risultati è bene effettuare alcune considerazioni. La plasticità implica l'applicazione di una simulazione non lineare. Di conseguenza, è necessario attivare la voce "Large Deflection" nella sezione "Analysis Setting". Nella stessa sezione si deve attivare il "Auto time Stepping" impostando gli step iniziali uguali a 30 e gli step massimi uguali a 1000. Questo ci permette di applicare il carico in modo graduale, quindi apprezzare più accuratamente la deformazione plastica fig.[3.16].

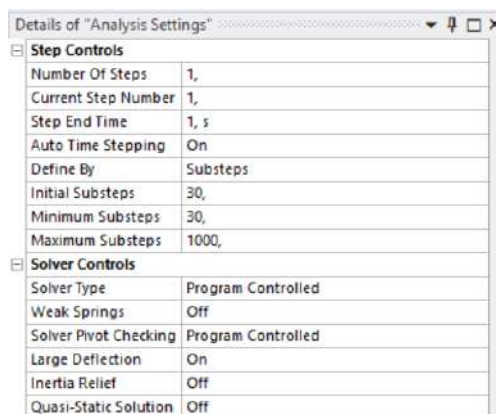


Figure 3.16: Gestione della parzializzazione del carico per apprezzare meglio la grande deformazione.

Come primo output richiesto al software non si è potuto prendere la deformazione. Poiché si è interessati allo *stretch ratio* si è ricavato lo spostamento in direzione Y della faccia superiore. Questa informazione ci permette di verificare che l'allungamento effettivo sia stato di 8.8 mm, e che quindi lo *stretch ratio* raggiunto sia quello incontrato nelle prove sperimentali fig.[3.17], pari a 9.8 mm/mm. La grandezza ottenuta è solamente l'allungamento del provino, che in un secondo momento verrà rielaborata.

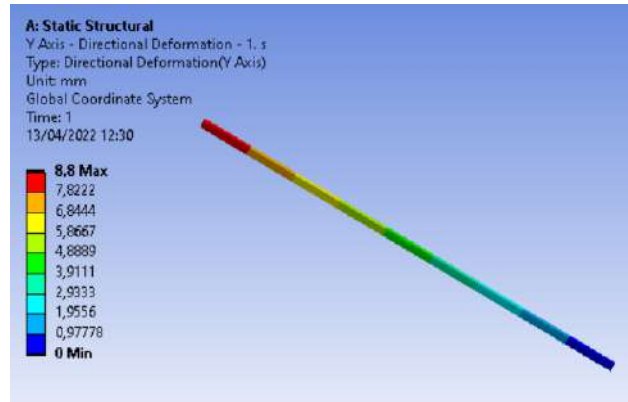


Figure 3.17: In figura si vede la mappatura dell'allungamento in direzione y subito dai nodi del cubetto rispetto alla lunghezza iniziale.

La seconda informazione che serve per poter ricavare lo sforzo ingegneristico è la forza di reazione. Non si è potuto estrarre direttamente lo sforzo poiché il FEM calcola gli sforzi reali. Si vuole avere un confronto con il grafico sperimentale, per il quale lo sforzo misurato è quello ingegneristico. Si ricerca dunque la forza di reazione sulla faccia superiore, e successivamente se ne calcolerà lo sforzo ingegneristico, pari a  $F/A_0$  fig.[3.18]

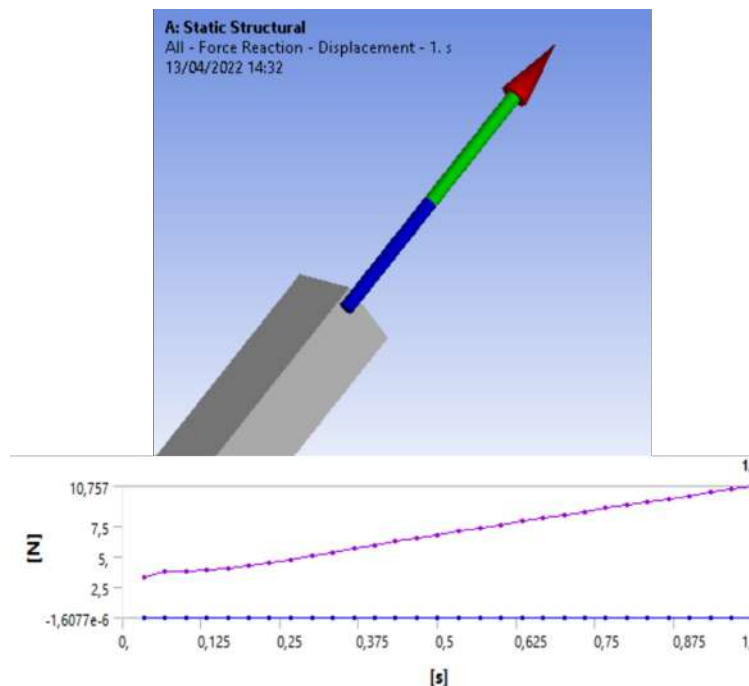


Figure 3.18: In figura si vede Il vettore e il grafico della forza di reazione sulla faccia superiore del cubetto.

Table 3.5: Valori di forza in direzione Y e allungamento in direzione Y del cubetto nella simulazione FEM

Steps	Tempo [s]	Forza in direzione Y [N]	Allungamento in direzione Y [mm]
1	3,3333e-002	3,334	0,29333
2	6,6667e-002	3,739	0,58667
3	0,1	3,8093	0,88
4	0,13333	3,9045	1,1733
5	0,16667	4,0626	1,4667
6	0,2	4,2713	1,76
7	0,23333	4,5144	2,0533
8	0,26667	4,7795	2,3467
9	0,3	5,0577	2,64
10	0,33333	5,343	2,9333
11	0,36667	5,6315	3,2267
12	0,4	5,9206	3,52
13	0,43333	6,2084	3,8133
14	0,46667	6,4939	4,1067
15	0,5	6,7765	4,4
16	0,53333	7,0557	4,6933
17	0,56667	7,3315	4,9867
18	0,6	7,6041	5,28
19	0,63333	7,8735	5,5733
20	0,66667	8,1401	5,8667
21	0,7	8,4043	6,16
22	0,73333	8,6666	6,4533
23	0,76667	8,9273	6,7467
24	0,8	9,1871	7,04
25	0,83333	9,4464	7,3333
26	0,86667	9,7058	7,6267
27	0,9	9,966	7,92
28	0,93333	10,227	8,2133
29	0,96667	10,491	8,5067
30	1,	10,757	8,8

Entrambi, allungamento e forza, sono calcolati nello stesso intervallo, ovvero i 30 *step* definiti a inizio simulazione nell'*Analysis Settings*.

I valori della tabella [3.5] sono stati inseriti in un foglio Excel nel quale si sono calcolati i parametri che occorrono alla costruzione della curva teorica. Lo *stretch ratio* si calcola sommando la lunghezza iniziale del cubo all'allungamento in Y e dividendo la somma ottenuta per la lunghezza iniziale. Lo sforzo ingegneristico si calcola semplicemente dividendo la forza per l'area iniziale.

In figura [3.19] è rappresentato in sovrapposizione il confronto tra la curva ottenuta dai dati sperimentali mostrata precedentemente in fig.[3.8] e la curva derivata dai valori estratti dalla simulazione FEM

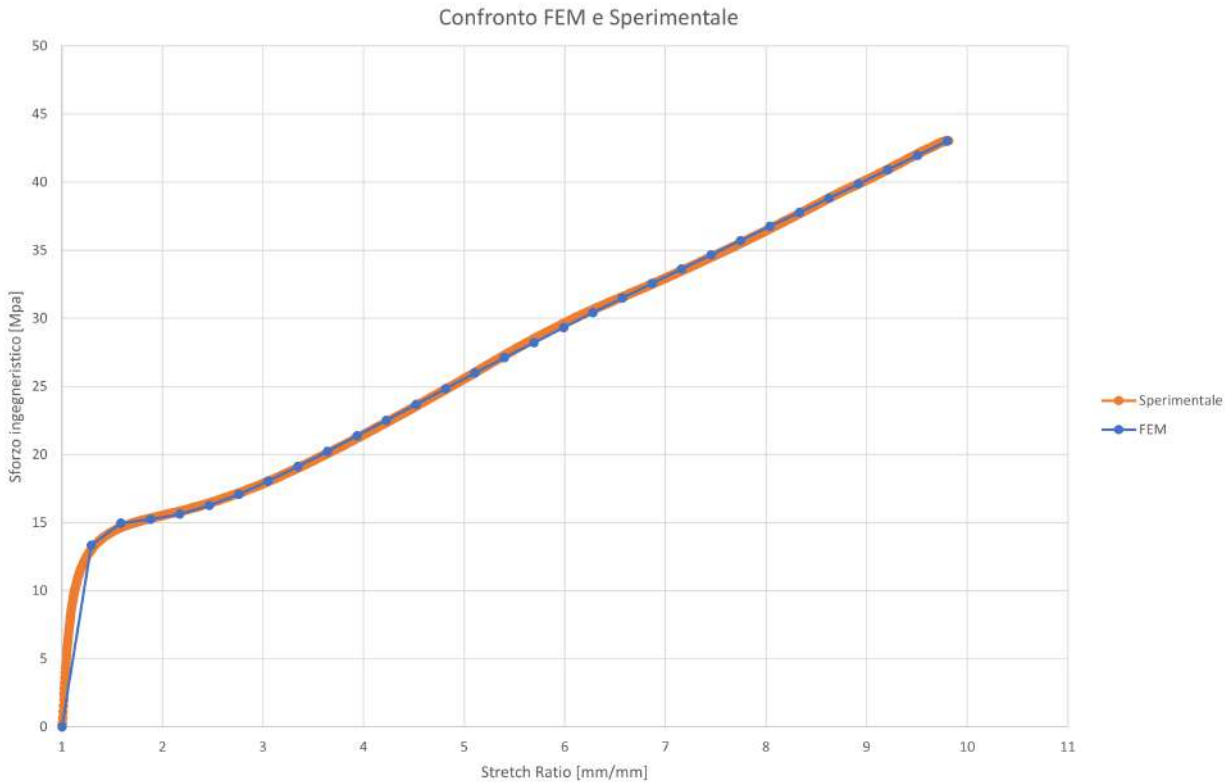


Figure 3.19: Confronto tra la curva teorica estratta dal FEM con la curva sperimentale

Il confronto mostra come la curva teorica fitti con una ottima precisione la curva sperimentale. Tuttavia, questa simulazione per come è stata impostata non consente di apprezzare l'andamento del grafico nel tratto iniziale. Ciò dipende dal fatto che nella sezione iniziale si ha un incremento di sforzo brusco, dunque la suddivisione in 30 intervalli uguali non riesce a leggere cosa succede veramente in quel punto. In questo modo, una semplice interpolazione lineare bypassa la curva sperimentale.

Per valutare con più precisione questa porzione si possono seguire due strade. Una prima via consiste nell'incrementare di molto il numero di intervalli di lettura dell'applicazione del carico. Per avere un numero di punti sufficiente nel range  $1 < \lambda < 1.5$  sono necessari moltissimi intervalli. Come diretta conseguenza i tempi di calcolo aumentano in maniera importante. Nel nostro caso si è adottata una soluzione differente. Si è deciso di effettuare una nuova prova ipotizzando di avere allungato il provino facendogli raggiungere uno *stretch ratio* solamente pari a 1.5 mm/mm, ed infittire gli *step* di visualizzazione solo in quest'area. Tale approccio non appesantisce il carico computazionale rispetto al caso precedente.

Si è colta l'occasione per definire il materiale utilizzando le costanti trovate in precedenza con la simulazione intera e illustrate in fig.[3.11] anziché sfruttare nuovamente i dati della prova di trazione uniassiale. Questo permette di mettere alla prova il modello e verificare la validità delle costanti estratte. Tale definizione del modello è sicuramente più rapida e più semplice da gestire sia per l'utente sia per Ansys.

La simulazione è impostata ugualmente a quella precedente. Si è mantenuta la stessa geometria, la stessa mesh e gli stessi vincoli. Anche il numero di *step* non cambia, si ritiene che 30 intervalli siano sufficienti per avere una rappresentazione adeguata dello zoom iniziale. contrariamente, cambia il *Displacement* applicato alla faccia superiore del cubo. In questo caso si attribuisce uno spostamento pari a 0.5 mm, che se sommato

alla lunghezza unitaria del cubetto risulta uno *stretch ratio* pari proprio a 1.5 mm/mm.

Si fa partire la simulazione e si ripropone il procedimento fatto in precedenza per l'estrazione dei parametri utili per la realizzazione del grafico sforzo-stretch, illustrati in tabella [3.6].

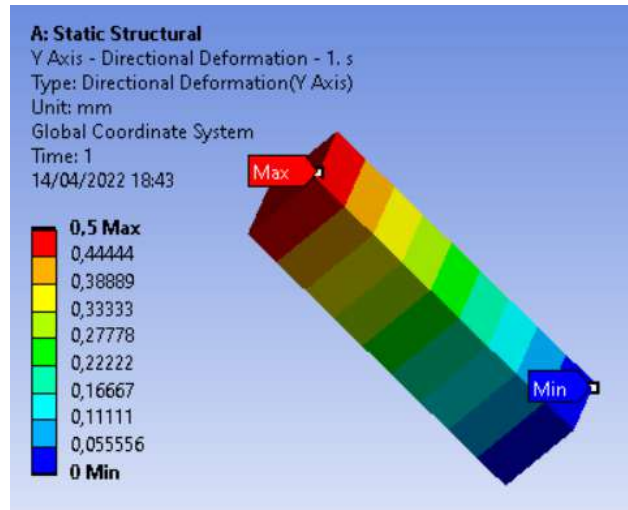


Figure 3.20: In figura si vede il particolare del primo tratto della mappatura dell'allungamento in direzione Y subito dai nodi del cubetto rispetto alla lunghezza iniziale.

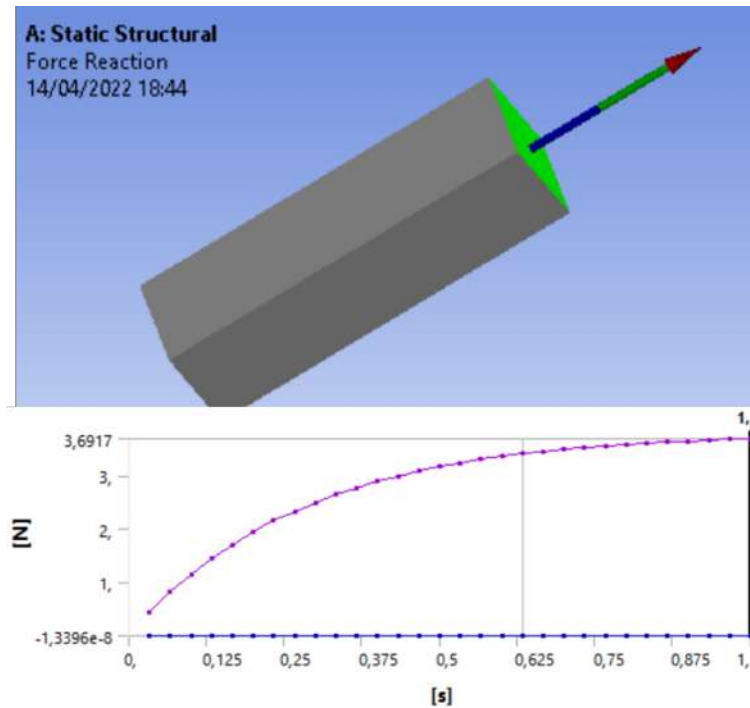


Figure 3.21: In figura si vede il particolare iniziale del vettore e il grafico della forza di reazione sulla faccia superiore del cubetto.

Table 3.6: Valori di forza in direzione Y e allungamento in direzione Y del cubetto nella simulazione FEM nel tratto iniziale della curva

Steps	Tempo [s]	Forza in direzione Y [N]	Allungamento in direzione Y [mm]
1	3,3333e-002	0,42786	1,6667e-002
2	6,6667e-002	0,80682	3,3333e-002
3	0,1	1,1427	5,e-002
4	0,13333	1,4406	6,6667e-002
5	0,16667	1,7049	8,3333e-002
6	0,2	1,9396	0,1
7	0,23333	2,1479	0,11667
8	0,26667	2,333	0,13333
9	0,3	2,4975	0,15
10	0,33333	2,6436	0,16667
11	0,36667	2,7735	0,18333
12	0,4	2,8889	0,2
13	0,43333	2,9914	0,21667
14	0,46667	3,0825	0,23333
15	0,5	3,1634	0,25
16	0,53333	3,2353	0,26667
17	0,56667	3,2991	0,28333
18	0,6	3,3557	0,3
19	0,63333	3,4059	0,31667
20	0,66667	3,4504	0,33333
21	0,7	3,4898	0,35
22	0,73333	3,5247	0,36667
23	0,76667	3,5556	0,38333
24	0,8	3,5829	0,4
25	0,83333	3,6071	0,41667
26	0,86667	3,6284	0,43333
27	0,9	3,6473	0,45
28	0,93333	3,664	0,46667
29	0,96667	3,6787	0,48333
30	1,	3,6917	0,5

da questi si calcolano lo sforzo ingegneristico, lo *stretch ratio*, e si graficano. In fig.[3.22] la sovrapposizione della curva teorica e sperimentale con dettaglio al tratto iniziale.

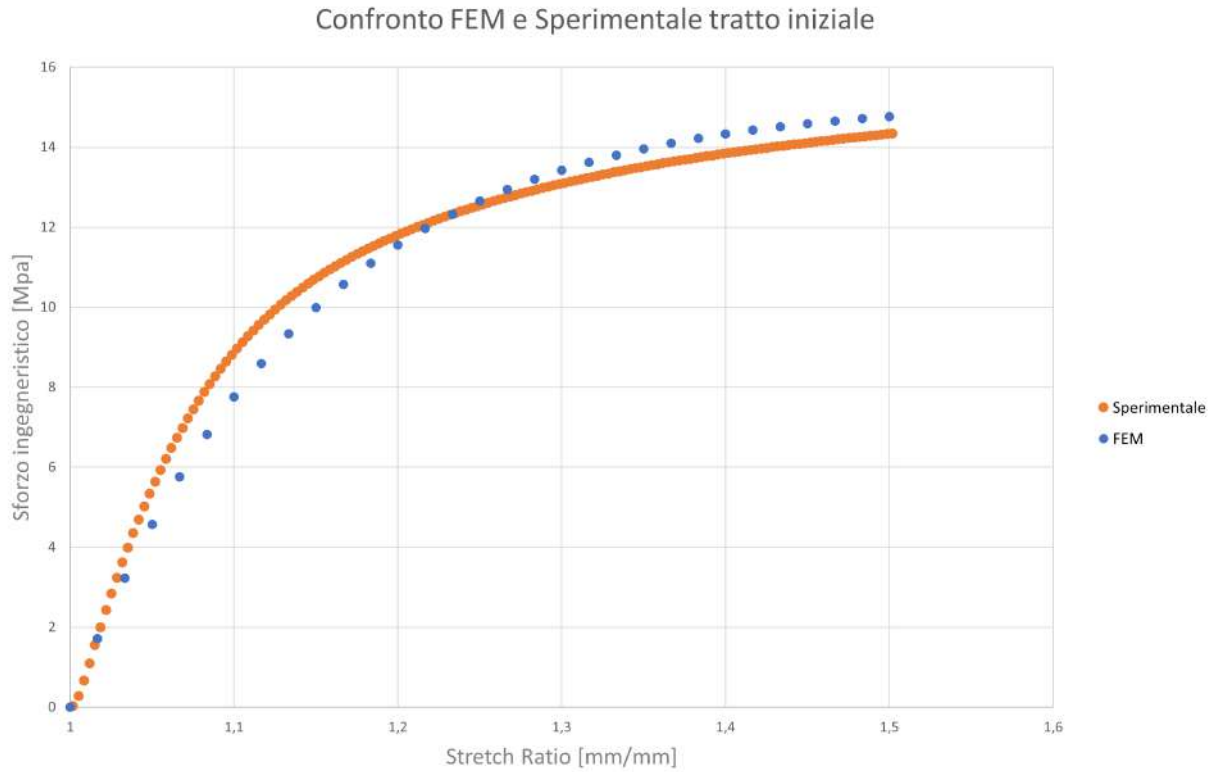


Figure 3.22: dettaglio iniziale del confronto tra la curva teorica estratta dal FEM con la curva sperimentale.

Uno zoom tanto dettagliato evidenzia una certa deviazione tra la curva sperimentale e la curve teorica. Ad ogni modo, si tratta di un tratto molto ridotto dalla curva totale. A parità di deformazione lo scarto maggiore è pari ad uno sforzo ingegneristico  $\Delta\sigma = 0.9$  MPa e si incontra per  $\lambda = 1.16$  mm/mm, che corrisponde ad una deformazione ingegneristica di  $\epsilon = 16\%$ .

### 3.3.3 Conclusioni

Il tratto iniziale della legge costitutiva è il più difficile da modellare a causa della sua rilevante non linearità. Come già detto, il modello di Mooney-Rivlin può servirsi di un numero variabile di costanti a seconda del grado di non linearità. Chiaramente complicando il modello si complica di conseguenza tutto il codice di calcolo. Pertanto si è ritenuto accettabile l'errore ottenuto. Tenendo conto dell'ottima approssimazione nel tratto più "lineare" della curva si ritiene che il modello ottenuto sia valido e sia applicabile anche per altre geometrie.

Come si è dimostrato con la seconda simulazione, le costanti di Mooney-Rivlin a 5 parametri che Ansys ha estratto dalla legge iperelastica sperimentale sono valide. Possono essere sfruttate per impostare una qualsivoglia simulazione non lineare su qualsiasi software. Le costanti sono:

1.  $C10 = -30,224MPa$
2.  $C01 = 48,402MPa$
3.  $C20 = 0,0044771MPa$
4.  $C11 = -0,076925MPa$
5.  $C02 = 8,4537MPa$

Partendo dai dati sperimentali di una prova di trazione uniassiale si è definito il modello di un materiale iperelastico.

Avere una completa caratterizzazione del blend ottenuto, insieme ad un modello FEM calibrato, è il primo passo per affinare la modellazione FEM dell'intero scarpone da sci per un Flex Test.





# Chapter 4

## Spessore scarpetta

### 4.1 Descrizione problema

Come già visto nell'analisi del primo confronto tra FEM e DIC, ci sono diversi problemi che portano ad avere un modello non perfettamente funzionante. La presenza della scarpetta influenza considerevolmente l'analisi complessiva dello scarpone.

Ricordando brevemente quanto detto nei capitoli precedenti, nel primo Flex Test al posto della scarpetta ci si è serviti di uno spessore realizzato con operazioni booleane, vedi fig.[?]. Questo ha permesso di modellare i contatti escludendo la presenza dell'impatto non lineare che si verificherebbe tra la protesi e il gambetto.

Si è detto che per la simulazione FEM, l'aspetto decisivo è il comportamento dell'oggetto e non la sua geometria. Nonostante ciò, abbiamo creduto fosse importante porre l'attenzione anche sulla scarpetta stessa. In particolare, comprendere come siano distribuiti gli spessori può aiutare a capire meglio come funzionino:

- contatti;
- distribuzioni di pressione;
- dispersione di calore;

È bene ricordare che il fine ultimo di questo progetto, che si estende oltre questo elaborato di tesi, consiste nel realizzare una riprogettazione dello scarpone in tutta la sua completezza. In quest'ottica è chiara l'importanza di avere una conoscenza più approfondita anche della scarpetta. Questo dà la possibilità di crearne un nuovo design studiato e progettato con cognizione di causa.

Oltre a voler ottenere un modello CAD uguale alla scarpetta del Dalbello DS MX LTD, ci si concentra su un nuovo design della stessa, rispettando i principi del " *Design for Recycling*".

Si vogliono riprogettare tutti i nuovi componenti in modo che si possano riciclare il più facilmente possibile, seppur mantenendo delle buone caratteristiche ergonomiche, di sicurezza, e di comfort termico.

Storicamente il design delle scarpette degli scarponi da sci è fatto attraverso una metodologia basata sull'esperienza del progettista, valendosi di un approccio *trial and error*. Tale criterio per essere ottimizzato richiede molto tempo, e talvolta si discosta dal concetto di metodo scientifico. Inoltre, solitamente la scarpetta si realizza con materiali diversi, quindi con diverse composizioni e diversi spessori. Evidentemente ciò penalizza la fase di smaltimento e riciclo [16].

Si è cercato di dare un'impronta più tecnica alla progettazione della scarpetta, un metodo accreditato e validato da diverse tecniche scientifiche e software di modellazione. Si vuole realizzare un nuovo design che

sia monomateriale, e che veda una distribuzione di spessori ben pensata rispetto al gesto tecnico della sciata, e al comfort termico.

## 4.2 Scansione 3D

Ottenere il file CAD di una scarpetta di uno scarpone da sci è cosa complessa, le aziende produttrici stesse non sono in grado di fornirne. Comunemente questi articoli si realizzano a partire da sagome di tessuti che vengono cucite o incollate fino a raggiungere la forma finale [17]. In questo modo è impossibile avere delle informazioni quantitative sulle misure della scarpetta, sia interne che esterne.

Si è pensato alla migliore alternativa per ottenere una geometria valida. A seguito di una approfondita ricerca bibliografica si è concluso che la migliore soluzione fosse l'utilizzo di uno scanner 3D.

La scannerizzazione è stata realizzata con uno scanner 3D, in questo caso il modello è ARTEC EVA 3D scanner. Si tratta di uno scanner manuale che permette di ottenere una scannerizzazione texturizzata 3D di oggetti di medie dimensioni. Questo sistema ha una precisione di 0.1 mm e una risoluzione di 0.2 mm. Funziona secondo la tecnologia color-based tracking, con un tasso di ricostruzione 3D di 16 fps.



(a)



(b)

Figure 4.1: (a) Scanner 3D Atec Eva. (b) Scarpetta oggetto del rilievo.

La scannerizzazione 3D è un'operazione che necessita la risoluzione di molti problemi. Innanzitutto, lo strumento ha bisogno sia della superficie interna che di quella esterna della scarpetta. Questo significa avere il doppio degli oggetti e quindi il doppio degli eventuali problemi. Per avere una texture omogenea, la scarpetta è stata colorata interamente di bianco opaco con una bomboletta spray. La procedura ideale consisterebbe

nel realizzare l'intera scansione di un pezzo in un colpo, o quanto meno senza muovere l'oggetto rispetto ai punti di riferimento sul suolo. Tuttavia, è sempre necessario muovere l'oggetto, anche soltanto per rendere accessibili le parti appoggiate al pavimento. Nella fase di post-produzione, le immagini vengono combinate per ottenere l'oggetto completo. Per rendere questa procedura il meno laboriosa possibile si disegnano dei simboli (come, ad esempio, lettere o numeri) sulla scarpetta in modo da tenerli come riferimento.



Figure 4.2: Nelle immagini (a) e (b) sono rappresentate le fasi di scannerizzazione della linguetta e della scarpetta.

### 4.3 Post-produzione

Ottenute le immagini, queste vengono elaborate da diversi software. In questa fase vengo eseguite una serie di operazioni:

- Unire le immagini provenienti da diverse scannerizzazioni;
- esportare il file in formato STL;
- sistemare la mesh;
- eseguire l'analisi di spessore;
- ottenere il file STEP.

Alla fine di questa procedura si è ottenuto un oggetto con una mesh. La mesh dà la possibilità di eseguire diversi tipi di analisi di calcolo, come ad esempio l'analisi di spessore .

### 4.3.1 Differenza tra formato STL e formato STEP

Per intendere al meglio quanto fatto, di seguito si descrivono le principali differenze tra i formati STEP e STL, i maggiori limiti e punti di forza di entrambi.

**STL** Il formato STL (*STereo Lithography interface format*) è probabilmente il più famoso formato di esportazione dei programmi CAD. In particolare si tratta del formato standard per la prototipazione rapida. Il file è costruito con le pure informazioni geometriche del modello, rappresenta un solido discretizzato con geometrie triangolari che formano la mesh. Ognuno dei tre vertici del triangolo è un nodo di mesh, e il file contiene le coordinate geometriche di ogni nodo della geometria con le relative unità di misura rispetto ad un sistema cartesiano X, Y, Z [18].

Il vantaggio principale del formato STL è la sua semplicità e facilità di creazione e di elaborazione dei dati. Tuttavia, questo formato di file è famoso per essere incline ad errori e anomalie a causa della poca accuratezza della superficie che viene a crearsi. Per applicazioni di modellazione accurata è necessario applicare metodologie per l'individuazione di tali errori e per correggerli. In caso contrario si rischia di ottenere un modello difettoso [19].

Nel campo della stampa 3D il formato STL rimane molto popolare poiché la sua semplicità e poca accuratezza lo rendono perfetto per essere interpretato dalle stampanti 3D. La superficie che viene rappresentata può non essere molto accurata ma è comunque una geometria regolare.

**STEP** Il formato STEP (STandard for the Exchange of Product model data), o alternativamente noto come ISO 10303 è uno dei più noti formati di esportazione di un file CAD. Questo tipo di formato è stato normalizzato per implementare una buona compatibilità dei file in tutto l'ecosistema dei software di modellazione CAD "Computer Aided Design". Come esplicitato dal nome stesso, la progettazione con il CAD fa parte di un metodo di design che implementa la parte informatica come parte fondamentale per la realizzazione di un prodotto. Tale approccio richiede di applicare la "Concurrent Engineering", secondo la quale più fasi della progettazione sono portate avanti in simultanea e parallelamente. Per rendere efficiente questo sistema è bene avere una corretta modularizzazione e suddivisione del lavoro. Il formato STEP è nato per garantire che la progettazione sia correttamente condivisa, e che tutti i componenti della catena possano apportare le adeguate modifiche.

Oltre alla questione della compatibilità, il formato STEP permette di avere degli oggetti con un grado di accuratezza molto superiore rispetto a quello dell'STL. La differenza sostanziale sta nel fatto che lo STEP legge l'oggetto come un intero corpo 3D, a differenza dell'STL che legge soltanto le relazioni geometriche dei nodi. Ogni sistema CAD-CAM possiede un metodo per leggere e scrivere i dati definiti da uno dei Protocolli di Applicazione di STEP (AP). Il più noto in Europa è il AP-214, e viene utilizzato per scambiare dati che descrivono progetti, rappresentando elementi tridimensionali o combinazioni di questi elementi con un'ottima accuratezza. È proprio grazie alle relazioni tra queste superfici che si ha la possibilità di modificare liberamente gli oggetti senza incorrere in errori e/o anomalie, come avverrebbe invece lavorando con la mesh di un STL [20] [21].

Volendo spezzare una lancia a favore del formato STL, senz'altro questo è caratterizzato da una esemplare efficienza nell'archiviazione. Infatti, i file in formato STL sono molto più leggeri dei file in formato STEP.



Figure 4.3: In figura si vede sulla sinistra un file STL, caratterizzato dalla tipica mesh. Sulla destra invece il file STEP, non più riconosciuto come un insieme di elementi geometrici ma come un intero oggetto composto da superfici legate dalle rispettive relazioni.

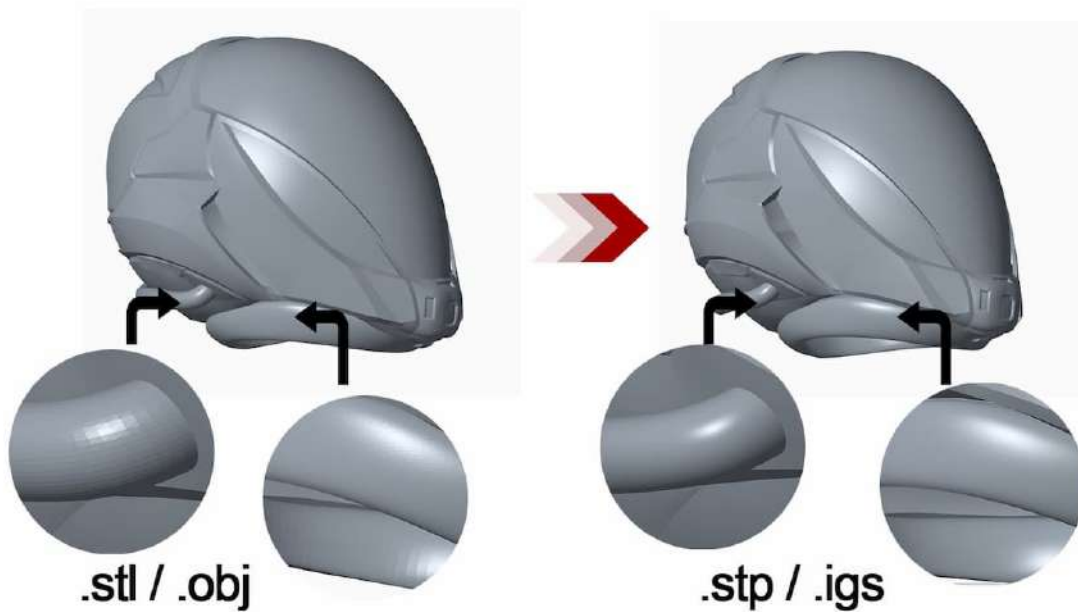


Figure 4.4: In figura si vede il tipico errore derivante dall'utilizzo di un file STL. A causa della scarsa accuratezza del file, e del fatto che non è visto come un corpo intero, si possono perdere i riferimenti tra le superfici.

Come si è visto, entrambi i formati hanno dei vantaggi di cui si può godere nei più opportuni campi di applicazione, ma se si vuole godere dei vantaggi di ambedue lo si può fare. Infatti, è possibile convertire un file STEP in un STL e viceversa, come si vedrà nel corso della seguente trattazione.

### 4.3.2 Elaborazione dei file

Le operazioni di scannerizzazione 3D fanno parte di un approccio chiamato "Reverse Engineering". si tratta del processo di realizzazione di un modello CAD a partire da una parte o un prototipo già esistente. La generazione del file CAD avviene in tre fasi:

- digitalizzazione delle parti;
- estrazione delle caratteristiche;
- modellazione CAD.

L'estrazione delle caratteristiche avviene solitamente segmentando i dati digitalizzati e acquisendo le caratteristiche (come i contorni) dalla superficie. La modellazione delle parti viene eseguita adattando delle particolari superfici ai punti dei segmenti. Il risultato è un modello computerizzato della parte composto da superfici [22].

Spesso, nel corso del processo produttivo un oggetto è creato a partire da prototipi ottenuti manualmente, o semi manualmente, in modo da attribuirne determinate caratteristiche estetiche e funzionali. Il risultato sono delle geometrie a superficie libera che sono difficili da modellare con accuratezza. Di frequente capita di voler modificare determinate caratteristiche geometriche o di voler impartire determinate modifiche di altro tipo, chiaramente questa operazione è molto difficile da portare a termine in assenza di un modello CAD dell'oggetto fisico. L'ingegneria inversa ci permette di soddisfare questa esigenza, ottenere un modello CAD di un oggetto, o una parte di un oggetto, del quale si vogliono apportare modifiche, o eseguire delle analisi. Si ricade proprio nel attuale caso di interesse. Partendo da una scarpetta realizzata con tessuti cuciti insieme tra di loro, si vuole ottenere un file CAD che permetta di farne una analisi di spessori e di apportarne modifiche progettuali.

In questo caso l'operazione di ingegneria inversa consiste nell'utilizzare la scannerizzazione 3D. Dopo aver ottenuto il file STL è necessario servirsi di una serie di programmi necessari a raggiungere l'obiettivo prefissato. Di seguito si presentano i software usati, e le operazioni fatte con ognuno di essi.

**Geomagic Design X** La prima elaborazione delle immagini ottenute con lo scan viene fatta con il programma "Geomagic Design X". Si tratta di un software di *reverse engineering* professionale raccomandato da usare in coppia con lo scanner Artec 3D. Questo software permette di ottenere modelli solidi editabili e compatibili con i più comuni ambienti CAD. Nello specifico l'output di questa fase dell'elaborazione dei dati sarà il modello in formato stereolitografico STL.

In questa fase si costruisce la scarpetta. Come già descritto in precedenza il rilievo incontra diverse difficoltà, queste rendono necessarie più scannerizzazioni, proprio in questo step i diversi rilievi vengono uniti a formare la scarpetta finale. Considerando la frequenza di acquisizione di 16 fps, e considerando che ogni singolo rilievo dura diversi secondi, il primo passaggio in ordine di importanza è la selezione delle immagini utilizzabili. Ciò consiste nel far eseguire un'analisi al software che identifichi i frame corrotti e che li elimini.

In seguito si devono combinare i diversi rilievi sfruttando i riferimenti adottati. Può capitare di perdere delle piccole porzioni di superficie e di dover entrare in interpolazione, seppur questo sia necessario per delle porzioni molto piccole. Ciò potrebbe comportare una diminuzione della precisione e della risoluzione dello strumento, ma si rimane comunque sotto uno 0.5 mm di precisione.

Nelle figure [4.5a] e [4.5b] sono mostrate le immagini rappresentanti i singoli rilievi prima di essere unite.

Se i rilievi sono fatti sufficientemente bene, e se la gestione dei riferimenti è stata pensata e gestita nel modo corretto, il risultato sarà un file STL di ottima qualità della scarpetta, con o senza la texture superficiale

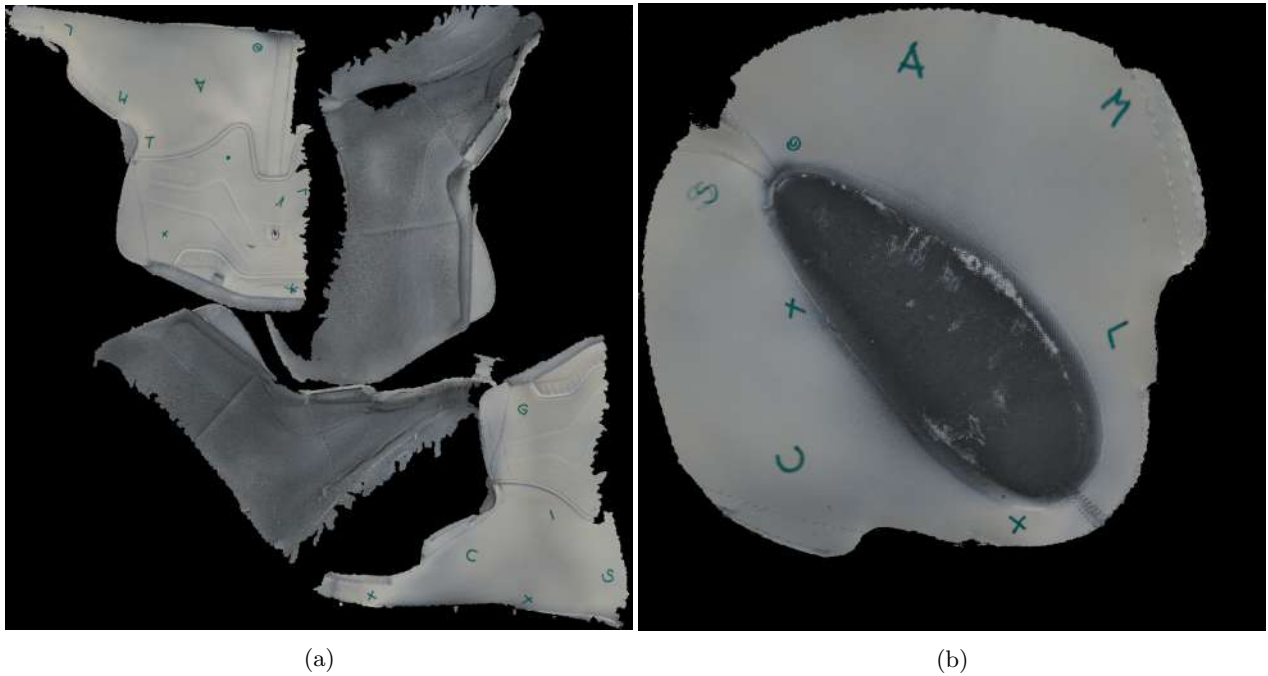


Figure 4.5: In figura sono rappresentate le immagini 2D in formato .Jpg di ogni singolo rilievo. (a) Scarpetta. (b) Interno della scarpetta.

a seconda dello scanner a disposizione e delle necessità del caso. Nella seguente circostanza la texture sarebbe superflua e andrebbe ad appesantire un file già sufficientemente grande.

Nelle immagini di seguito sono mostrati gli STL risultanti da questa prima fase di post-processing.



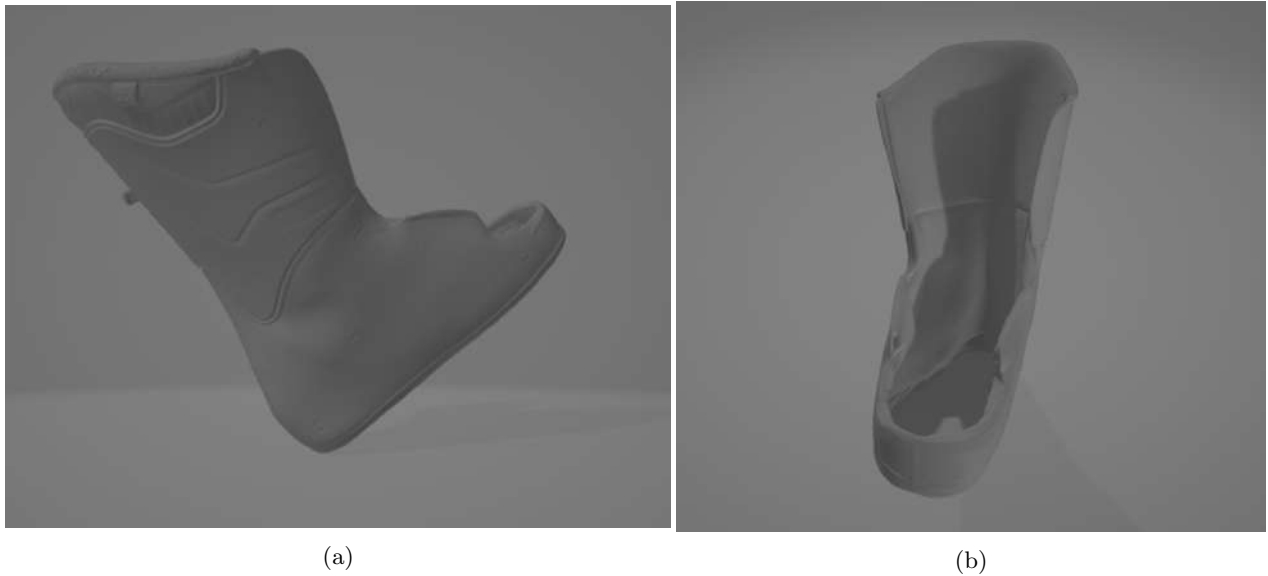


Figure 4.6: In figura sono rappresentati i file STL risultanti da questa prima fase di post-processing, in questo caso nel particolare della sola scarpetta senza linguetta.

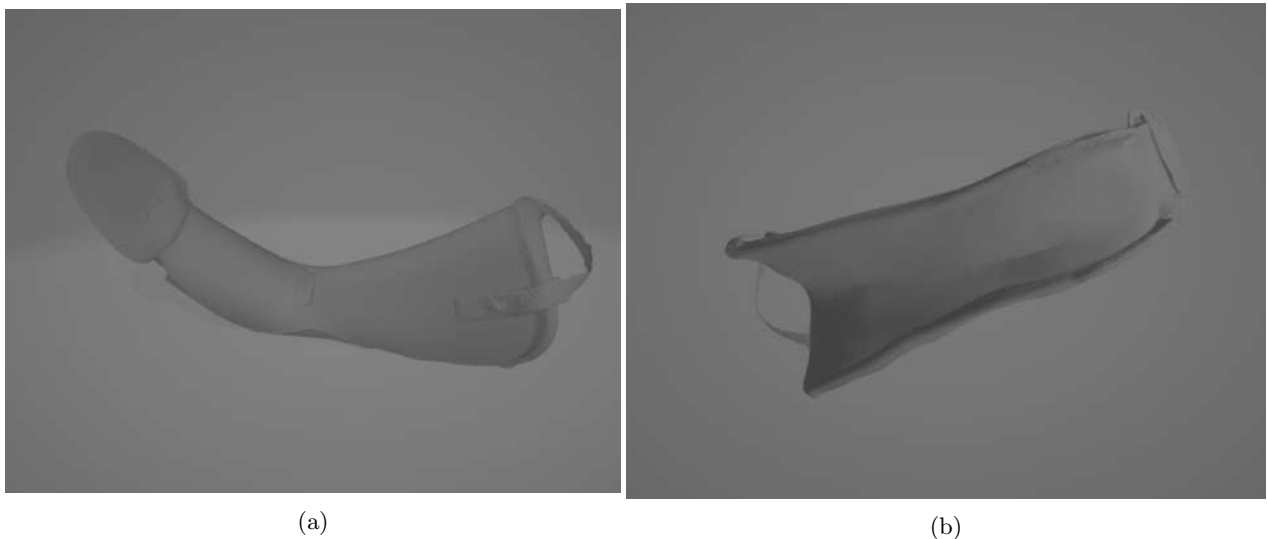


Figure 4.7: In figura sono rappresentati i file STL risultanti dal post-processing, in questo caso nel particolare della sola linguetta senza scarpetta.

**Meshmixer** Si è estratto un file STL, quindi un file caratterizzato dall'aver una mesh, più o meno fitta.

É sufficiente usare un qualunque software di visualizzazione 3D per aprire il documento e porsi degli interrogativi. Nel caso in esame si è aperto il file della scarpetta con Rhinoceros e subito ci si è accorti di alcuni problemi. Innanzitutto, la mesh in queste condizioni è certamente troppo fitta, si ha tra le mani un oggetto con cui è davvero difficile lavorare a causa dell'enorme numero di triangoli di mesh, quindi di nodi, e quindi di informazioni. In fig.[4.8] si vede come appare la scarpetta appena aperto un programma di visualizzazione. La rete è tanto fitta che il pezzo sembra colorato di nero. Tuttavia, facendo un zoom si può vedere che in realtà la grossa macchia nera è soltanto una densa maglia di triangoli molto densa.

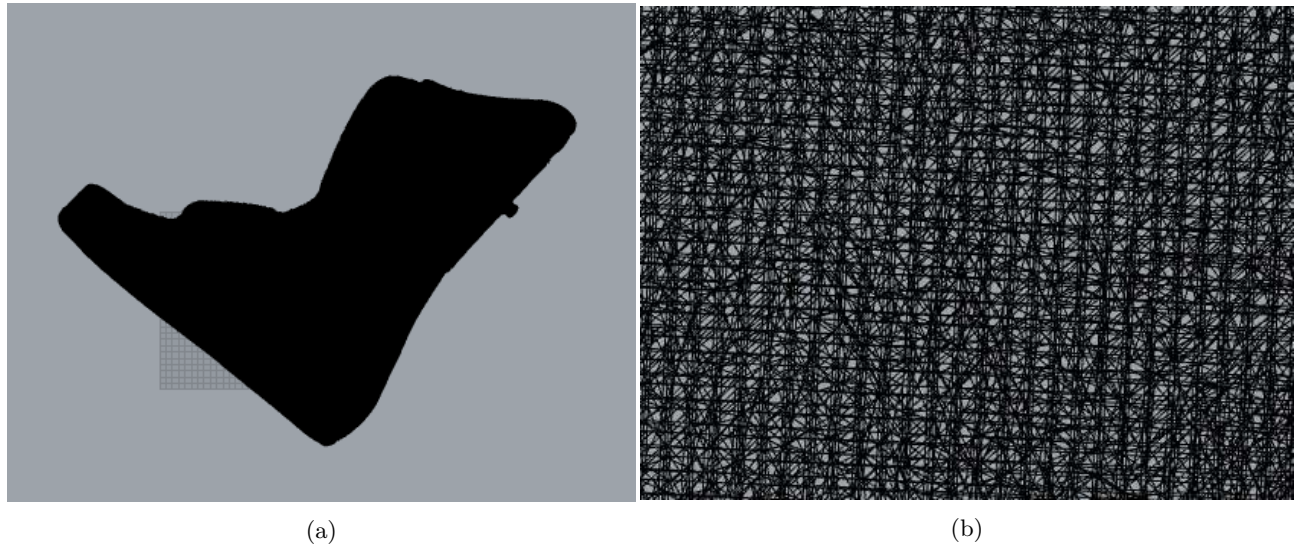


Figure 4.8: In figura (a) è mostrato l'STL della scarpetta, si vede come la mesh è talmente fitta da colorare tutta la scarpetta di nero. In figura (b) uno zoom sulla mesh.

Un secondo problema di questa mesh è che segue delle linee di simmetria casuali nella sua distribuzione, fig.[4.9]. Sarebbe sempre meglio avere dei triangoli distribuiti in modo casuale, e se proprio ci fosse la necessità di infittire certe zone, questo deve essere fatto con un certo criterio.

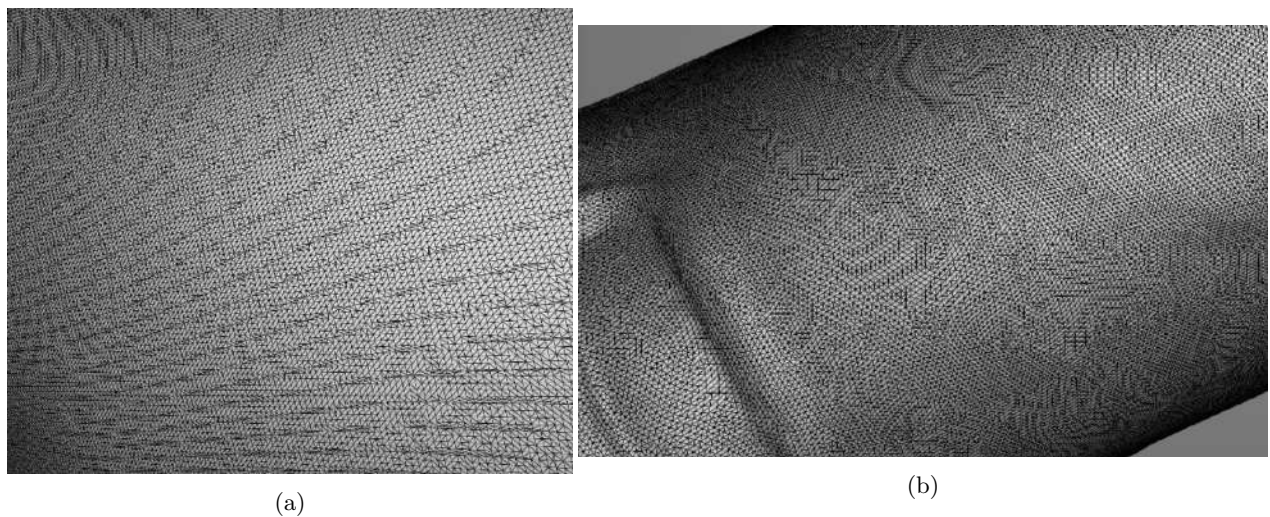


Figure 4.9: In figura a) una parte del fianco della scarpetta. In figura b) il collo della linguetta.

Si conclude che la mesh come è risultata direttamente non va bene, e quindi ci si serve di un programma esterno per sistemarla. Il programma in questione si chiama "*Meshmixer*". Si tratta di un programma molto potente proprietà di *Autodesk* che consente di lavorare con le mesh in moltissimi modi. Spesso nel mondo della progettazione e dell'ingegneria è necessario adattare e ottimizzare i modelli 3D, *Meshmixer* è uno dei programmi più versatili per fare questi lavori. Offre diverse funzioni, tra le quali quella del *remeshing*, ovvero la possibilità di ricostruire la mesh di alcune parti, o come nel nostro caso dell'intero oggetto.

Come prima cosa si importa il file STL nell'ambiente di *Meshmixer*, dopodiché si usa il comando "*Make Solid*", il quale consente di creare una mesh dato un oggetto. La mesh risultante dipende dagli input che si

danno a questo comando. Si cerca di ottenere una maglia che garantisca di non perdere parti della geometria, ma che al tempo stesso sia più leggera possibile.

In seguito a diversi tentativi si è trovata la migliore alternativa nella seguente combinazione di parametri:

- *Solid Type*: Accurate;
- *Solid Accuracy*: Max;
- *Mesh Density*: 240 per la scarpetta e 300 per la linguetta.

Gli altri valori sono stati lasciati di default.

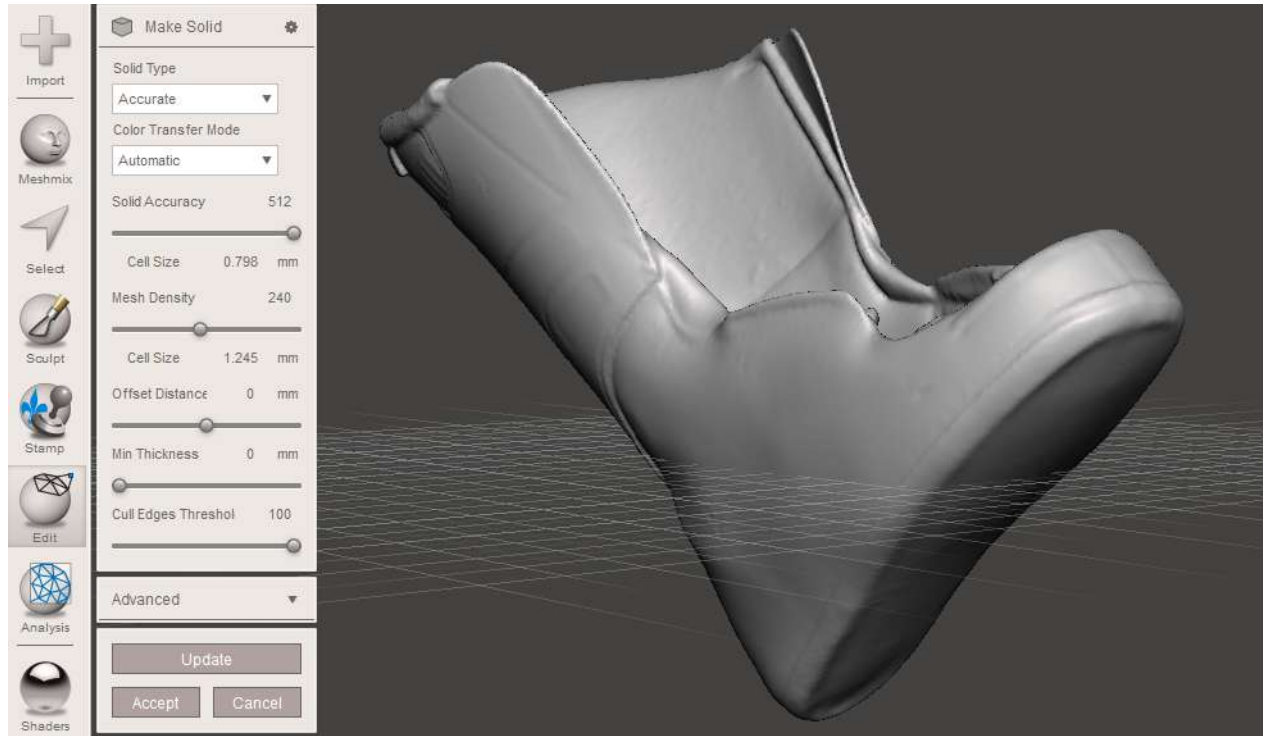


Figure 4.10: Interfaccia del software Meshmixer dove si vedono i parametri cambiati e la scarpetta che dimostra di non avere perso parti importanti della geometria.

Finalmente si è ottenuta una buona mesh e si può proseguire con l'elaborazione della geometria.

**Rhinoceros** Per completare la post-elaborazione si usa *Rhinoceros 7*. Si tratta di un software CAD, originalmente nato per non essere parametrico, ma con dei plugin ha la possibilità di diventarlo. Si è deciso di sfruttare Rhino poiché tra i vari CAD sul mercato si comporta molto bene con le geometrie a superfici complesse, bene identificate con delle spline o simili, come ad esempio uno scarpone da sci, o la sua scarpetta.

Rhinoceros consente di controllare la qualità della mesh, potendo concludere se essa sia valida oppure no. Il controllo della validità della mesh è la prima cosa da fare per essere sicuri di aver fatto tutto correttamente fino a questo punto. Se la mesh è valida, si può tornare a proseguire.

Grazie a Meshmixer si è ottenuta una mesh un po' meno fitta, ma soprattutto di qualità superiore. Tuttavia, i triangoli sono ancora tantissimi e la mesh è troppo fitta. Si procede ad una ulteriore riduzione. Se si fosse fatta una riduzione così importante a partire dalla mesh iniziale si avrebbe rischiato di perdere importanti informazioni, soprattutto nelle zone più sottili della geometria.

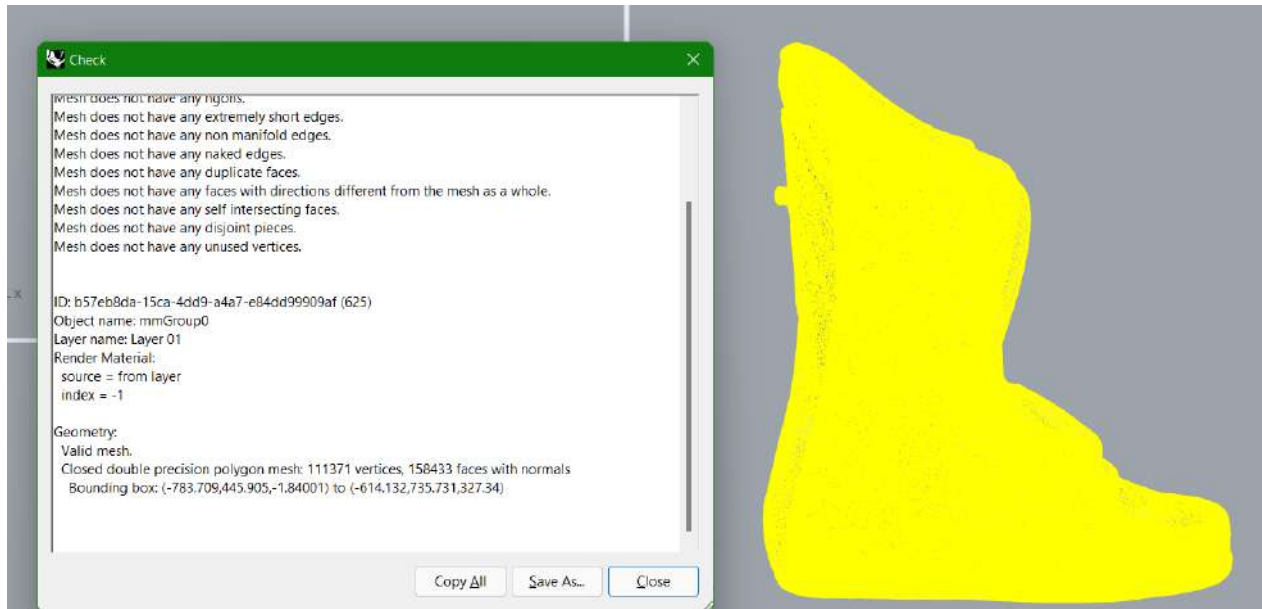
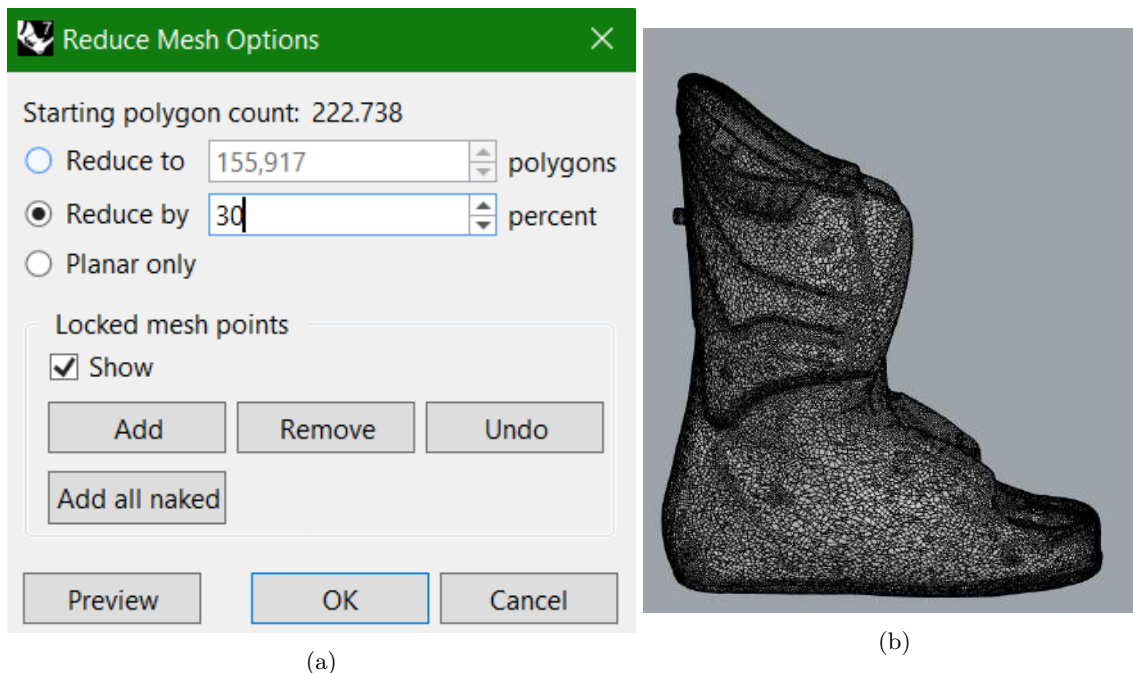


Figure 4.11: Controllo della validità della mesh.

Ci si avvale del comando "Reduce Mesh" e si imposta una riduzione della mesh del 30% per la scarpetta e del 70% per la linguetta. Anche in questo caso valgono le osservazioni fatte in precedenza; si ricerca l'ottimo compromesso tra l'aver un file leggero e lavorabile, e il non perdere informazioni.



(a)

(b)

Figure 4.12: In figura (a) interfaccia del comando "Reduce Mesh". (b) Il risultato dalla mesh ridotta sulla scarpetta.

Il file così ottenuto è pronto per essere sottoposto all'analisi di spessore. Si usa il comando "Thickness Analysis" e se ne commenteranno i risultati nella sezione dedicata.

Il nostro interesse non si limita alla sola conoscenza della distribuzione degli spessori, si vuole anche

esportare il file STEP da utilizzare successivamente per fare modifiche in ambiente CAD, o per implementarlo nella simulazione FEM.

Per esportare il file in formato STEP bisogna apportare una ulteriore modifica alla mesh. Se si provasse ad esportare il file con tale mesh triangolare, la macchina va in crash prima di completare l'operazione. Anche diminuendo di molto la densità della mesh il computer non riesce a generare un file STEP a partire da una mesh triangolare.

Si decide di semplificare ulteriormente il modello trasformando la mesh in quadrangolare, e questo è possibile con il comando "*Quad Remesh*" impostando "*Target Quad Count*" pari a 2000 per la scarpetta, e 1000 per la linguetta, invece si usa una percentuale adattiva della misura pari al 90% per la scarpetta, e 50% per la linguetta. In generale la linguetta richiede delle semplificazioni sensibilmente più importanti rispetto alla scarpetta. Questo è causa della geometria molto complessa, e soprattutto molto sottile in certe zone. Le stesse complicazioni si sono incontrate anche in fase di scannerizzazione.

Il comando *Quad Remesh* ci permette anche di convertire la superficie in una *SubD*.

Per passare da una mesh a un solido è necessario convertire la geometria in NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Le geometrie NURBS sono delle rappresentazioni in linguaggio matematico di una geometria 3D, sono in grado di definire una qualsiasi forma geometrica, che sia essa semplice (curve, linee, cerchi) oppure molto più complessa (superfici libere). Si tratta di una generazione delle curve B-Splines che permette di rappresentare le superfici. Il vantaggio è che la quantità di informazioni richiesta per la rappresentazione NURBS di un elemento geometrico è di gran lunga inferiore alla quantità di informazioni necessaria per rappresentare la stessa geometria tramite approssimazioni mesh [23].

La geometria SubD è una rappresentazione nuova adottata da Rhinoceros che permette di sostituirsi alle NURBS. Il concetto è lo stesso delle NURBS, ma secondo il produttore le superfici SubD risultano più semplicemente modificabili, e con un precisione maggiore. Le superfici di Rhino SubD sono prevedibili, misurabili e producibili, e non sono fatte di mesh.

Rhino consente di convertire direttamente in SubD in fase di creazione della mesh poligonale. In alternativa si può usare un comando apposito per trasformare la mesh in una NURB in un secondo momento.

Nelle figure 4.13b e 4.13a sono rappresentati i file STEP della scarpetta e della linguetta che si sono ottenuti utilizzando Rhinoceros.

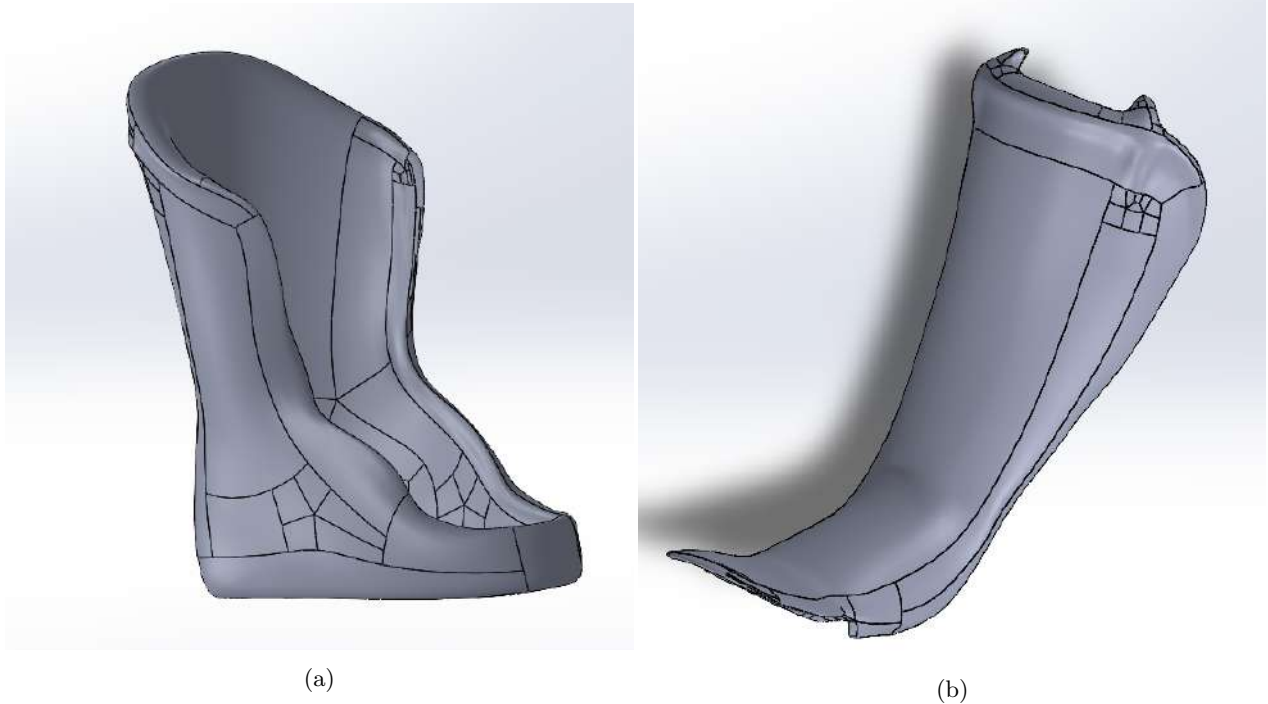


Figure 4.13: In figura a) una parte del fianco della scarpetta. In figura b) il collo della linguetta.

#### 4.4 Analisi delle acquisizioni

Come si è visto nel paragrafo precedente nel quale si è spiegato il procedimento della scansione 3D, il rilievo si è fatto con la linguetta separata dal resto della scarpetta. Con questa analisi si ricerca la distribuzione degli spessori. Per avere informazioni più interessanti in riferimento alla superficie interna si è deciso di gestire i file derivanti dalla post produzione della scannerizzazione 3D mantenendo separati la linguetta dal resto della scarpetta. Infatti, avere la linguetta separata permette di avere una migliore visione della superficie interna.

Si procede prima con un'analisi della scarpetta singolarmente, solo in seguito le osservazioni fatte verranno adattate alla scarpetta con l'aggiunta della linguetta.

**Scarpetta** Come si può vedere dalle immagini di seguito, lo spessore varia circa tra 0.5 mm e 30 mm.

Come si può ben vedere la zona dove lo spessore è maggiore è quella che ricopre il polpaccio.

La dimensione cala gradualmente fino alla zona plantare, nella quale si trovano gli spessori minimi. La zona della punta è di particolare interesse. Alcuni studi sulla dispersione termica di uno scarpone da sci hanno mostrato come la zona più critica, per quanto riguarda il raffreddamento locale, sia proprio quella della punta del piede[24]. Inoltre, le dita del piede, in quanto estremità, sono una delle parti del corpo che più risentono delle basse temperature.

Volendo fare delle considerazioni che tengano conto della relazione spessore-calore (ovvero maggiore è lo spessore, maggiore è la quantità di materiale, e più importante è l'isolamento termico) si potrebbe progettare la scarpetta con delle distribuzioni differenti di materiale: assottigliare la zona del gambetto, per cedere del materiale alla zona dello scafo (polpaccio e stinco), con particolare attenzione alla punta.

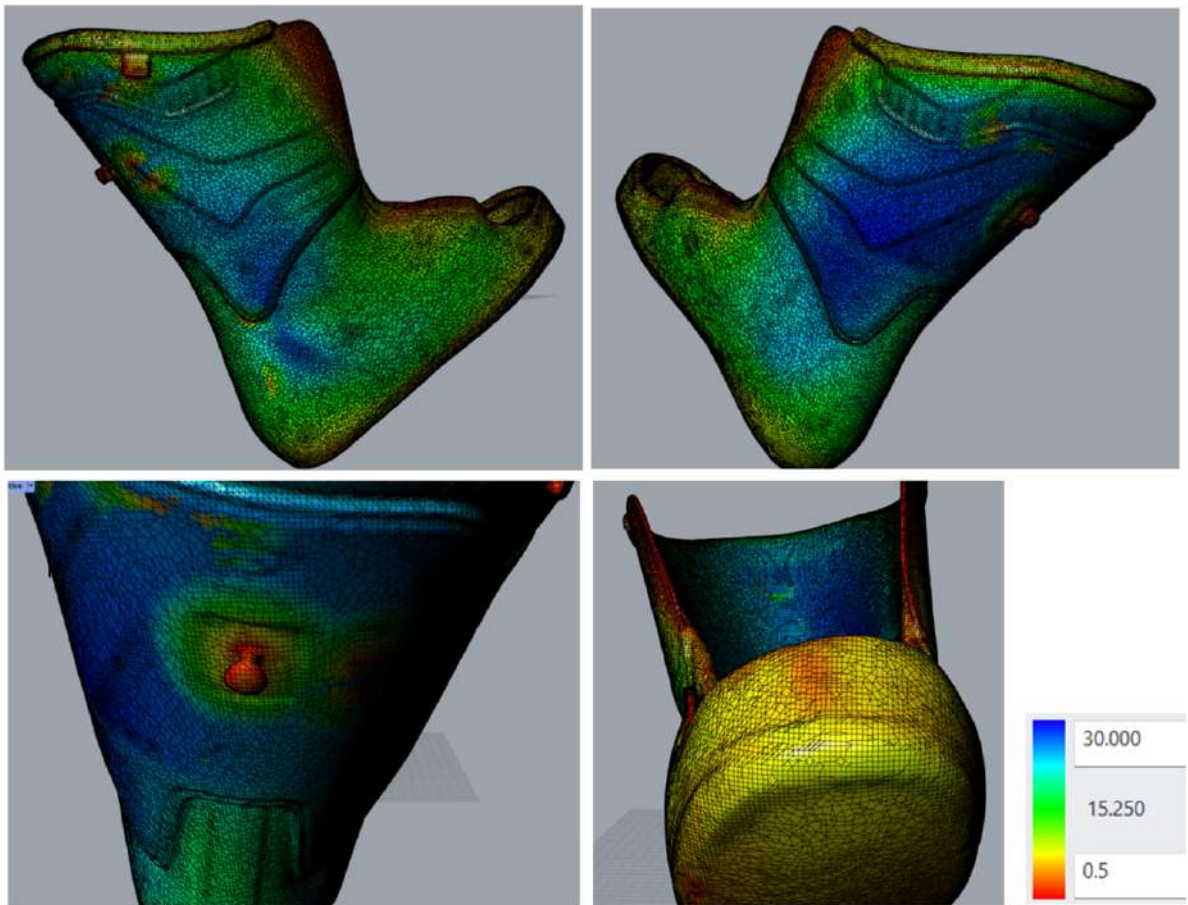


Figure 4.14: In figura si vede l'analisi di spessore della parte esterna della scarpetta.

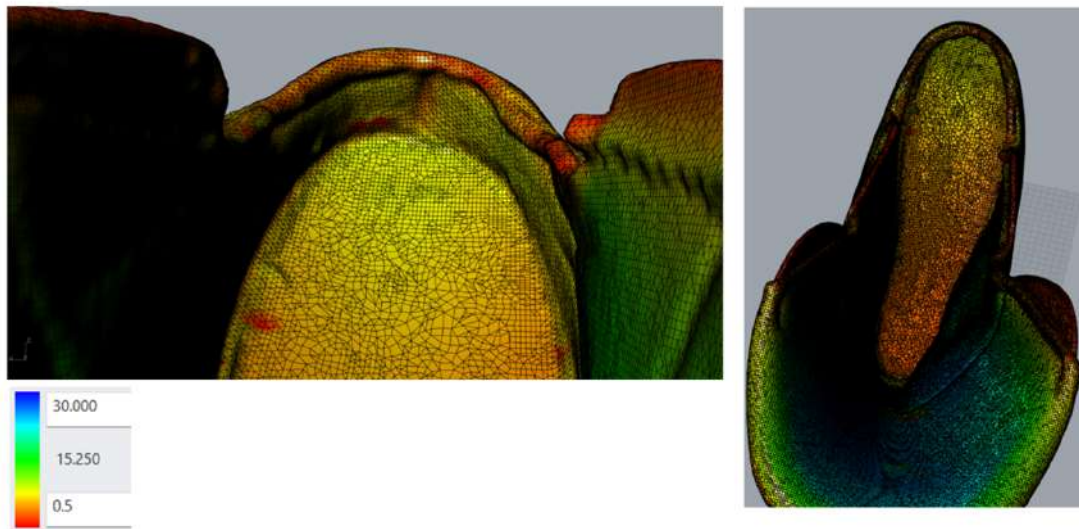


Figure 4.15: In figura si vede l'analisi di spessore della parte interna della scarpetta.

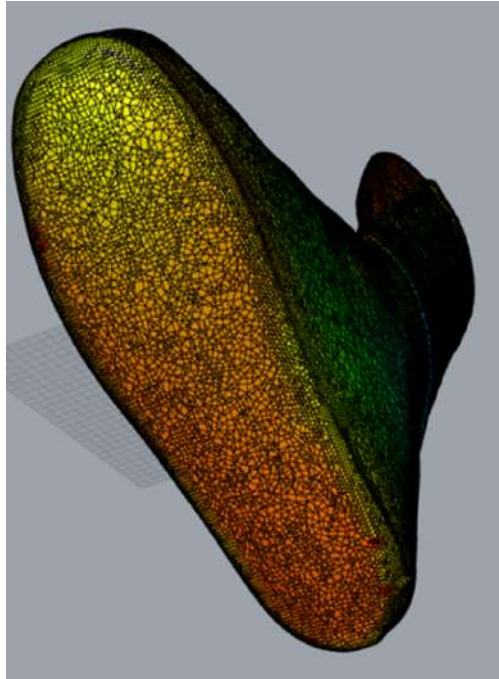


Figure 4.16: In figura si vede l'analisi di spessore della parte inferiore della scarpetta.

Il calore non è l'unico fattore di cui tenere conto. Un elemento su cui più si vuole porre l'attenzione è la composizione multi materiale. Ci si chiede se sia davvero necessario usare due materiali diversi, se sì perché, e in quali zone.

La fattibilità di utilizzare un solo materiale giocherebbe un ruolo molto importante in termini di snellezza del processo e semplicità di produzione, ma anche in ottica di design for recycling.

Da un rapido confronto tra l'analisi degli spessori e il pezzo reale, si vede chiaramente come la zona di massimo spessore sia caratterizzata dalla sovrapposizione di due materiali: quello interno più morbido (lo stesso di cui è fatto il resto della scarpetta); e uno strato esterno più rigido che forma una sorta di guscio.

Questa scelta, se pensata considerando il gesto atletico della sciata, è riconducibile al fatto che la zona dello scafo (che avvolge polpaccio e stinco) è un elemento chiave per il controllo dello sci. E' la superficie dove la forza della gamba, dallo stinco si trasmette sullo scarpone attraverso la scarpetta. E' chiaro come sia necessaria una certa rigidità proprio in corrispondenza di questa zona per trasmettere la forza con più efficienza.

Nonostante ciò, avere una maggiore rigidità non richiede obbligatoriamente l'utilizzo di due materiali diversi. Infatti, come si è visto anche da altri modelli di scarpette, l'aumento dello spessore, o addirittura l'utilizzo di più strati dello stesso materiale può portare gli stessi benefici, o quasi, in termini di rigidità.

Un fattore che può giustificare l'esimio spessore in punta e sulla pianta del piede è senz'altro la sensibilità sullo scarpone. Una scarpetta troppo spessa proprio in questi punti renderebbe più difficile il controllo dello scarpone sugli attacchi, e condurrebbe ad una sciata più imprecisa.

Implementiamo la linguetta e rivediamo le considerazioni appena fatte.

**Linguetta** Dalla distribuzione di spessori della linguetta si confermano le considerazioni fatte per la scarpetta.

La zona a contatto con lo stinco ha uno spessore maggiore (la zona dove si spinge con la gamba). Lo



spessore diminuisce gradualmente sui lati e sulla zona a contatto con il collo del piede. Questa, in tutta la sua lunghezza è fatta da due materiali: quello interno più morbido, e il guscio esterno rigido.

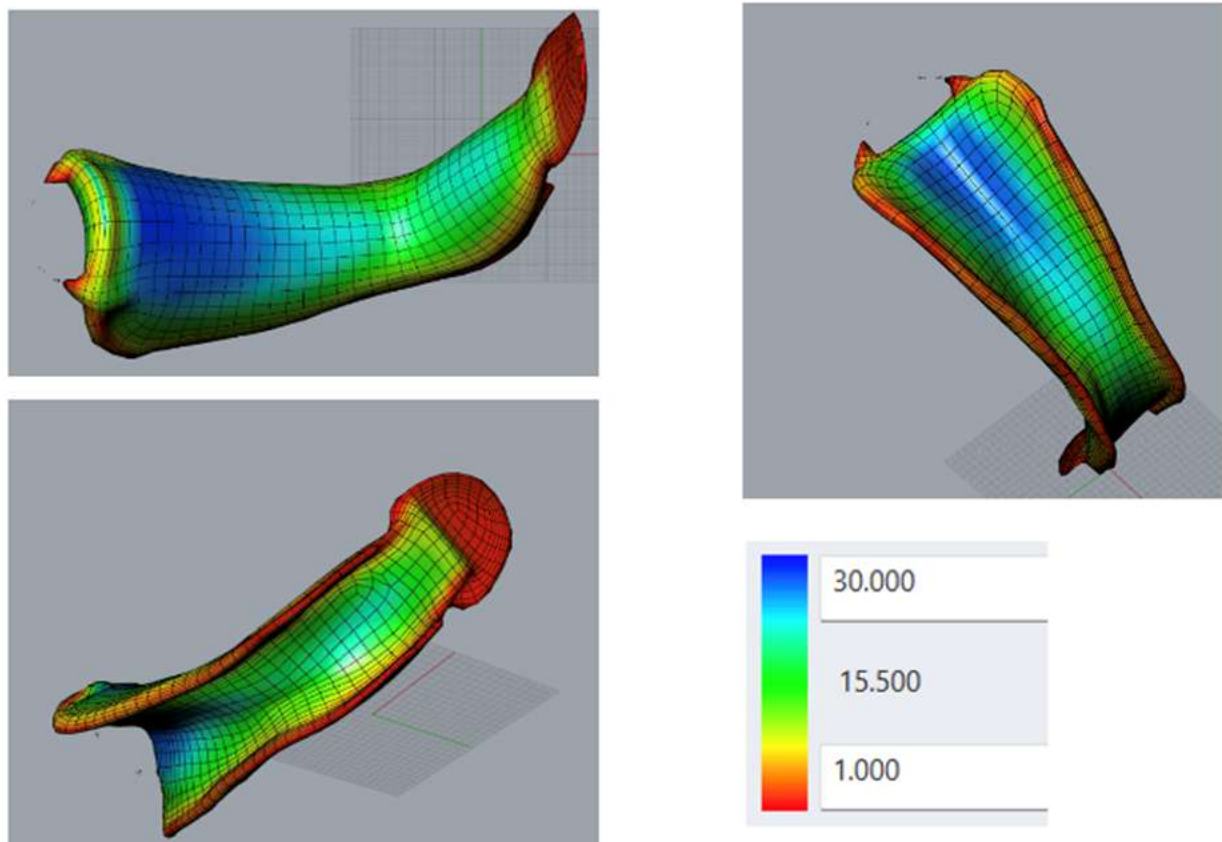


Figure 4.17: In figura si vede l'analisi di spessore della linguetta.

Anche in questo caso valgono le considerazioni fatte in precedenza. Per garantire la rigidità necessaria ci si può servire di un monomateriale con un aumento di spessore con un gradiente decrescente dall'alto verso il basso.

#### 4.4.1 Difetti e complicazioni

Data la seguente premessa: l'analisi dello spessore può essere fatta sul file STL con il programma Rhinoceros oppure sul file STEP con il software Solidworks.

Sia nella scarpetta che nella linguetta sono presenti degli elementi che non sono riusciti ad essere bene rappresentati:

- nell'ottenimento del file STL (caso della linguetta);
- nel passaggio a file STEP (caso della scarpetta).

Entrambi i programmi restituiscono dei risultati validi, confrontabili, e che rispecchiano le dimensioni dei componenti reali. L'analisi precedentemente riportata è stata fatta sul file STL con Rhinoceros, questa è caratterizzata da una visualizzazione più dettagliata. Inoltre, lavorare sul file STL permette di non perdere alcuni dettagli critici.

La scarpetta vede una protuberanza nella parte posteriore. Questa è di difficile analisi da parte di entrambi i programmi. Il file STL la rappresenta corretta dal punto di vista geometrico, ma non riesce a calcolarne bene lo spessore. Quando si passa al file STEP si perde anche la rappresentazione geometrica veritiera.

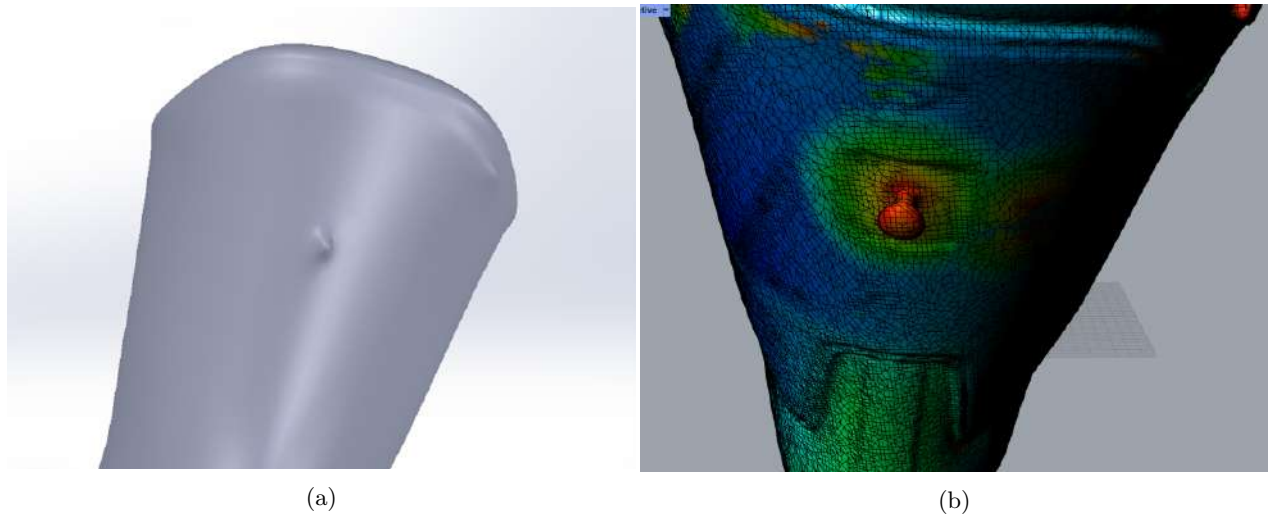


Figure 4.18: .

(a) Protuberanza sul file STEP. (b) Protuberanza sul file STL.

L'unica utilità di questa protuberanza è di fare da centraggio alla scarpetta dentro il guscio. Però, tenendo conto dell'importante interferenza tra i due componenti questo perno di centraggio non è necessario. Considerando la sua forma e considerando che è fatto di un materiale diverso, la sua presenza comporta molte evitabili complicazioni. La decisione più ragionevole per il nuovo design sarebbe quella di escludere questa protuberanza.

Sulla linguetta c'è un difetto che deriva dalla scansione stessa dell'oggetto. Si tratta del laccetto che aiuta ad infilarsi lo scarpone. A causa della sottigliezza di questo, è stato difficile averne una rappresentazione di qualità. Tuttavia, ai nostri fini la presenza o meno del laccetto è ininfluente. Dunque, in fase di analisi dello spessore non ne teniamo conto, e nell'ottenimento del file Step tagliamo i pezzi di mesh del laccetto.

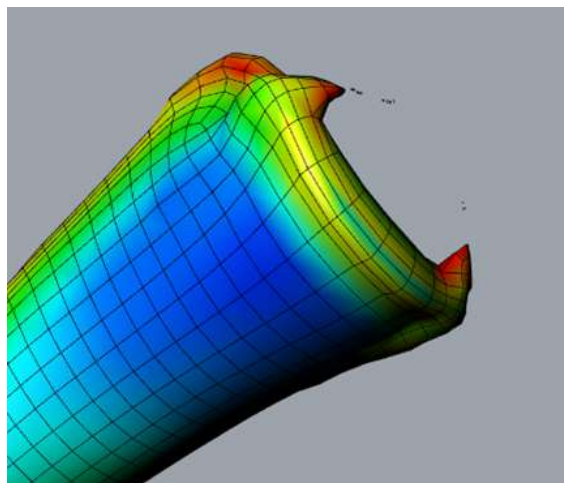


Figure 4.19: Difetto del laccetto visto nel file .Stl.

Dopo aver completato l'analisi degli spessori si svolge un rapido controllo per accertarsi che i risultati

ottenuti ragionevoli. Con un calibro si misurano alcune dimensioni caratteristiche della scarpetta e le si confrontano con i valori dell'analisi di spessore. la comparazione convalida quanto dichiarato dalla scheda tecnica dello scanner; la risoluzione rientra in un range di circa 0.1-0.2 mm.

## 4.5 Conclusioni

La scarpetta è un elemento di fondamentale importanza per lo scarpone da sci. La scelta di un materiale e di una geometria appropriata è indispensabile per un corretto comfort termico ed ergonomico, essendo la parte direttamente a contatto con il piede e con la gamba [25].

Non si è ancora nominata una delle più importanti funzioni della scarpetta; considerando tutte le parti componenti un intero scarpone da sci è proprio la parte che funge da cuscino tra la gamba e il guscio, e quella che si occupa della trasmissione del moto. In particolar modo la linguetta provvede al trasferimento del moto, e quindi al controllo sulla traiettoria della sciata.

le considerazioni appena fatte conducono ad una evidente deduzione. La scarpetta deve essere fatta di un materiale morbido per garantire il comfort e migliorare l'isolamento termico; d'altro canto non può essere neanche troppo morbida poiché non sarebbe garantita una corretta trasmissione di forza tra lo sciatore e il guscio esterno dello scarpone da sci [17]. Per questo motivo la scarpetta solitamente si compone di materiali diversi: un materiale più duro per le zone di trasmissione della forza, e un materiale più morbido per le superfici dove viene prediletto il comfort e l'isolamento termico. Generalmente la componente morbida è caratterizzata da una schiuma, il più tipico è l'etilene vinil acetato reticolato (EVA) [26]. Per quanto riguarda la zona con una resistenza maggiore si possono utilizzare schiume a rigidità maggiore oppure dei gusci termoplastici.

Nel caso della scarpetta in esame, l'analisi degli spessori ci ha permesso di individuare con un buon grado di accuratezza le zone a diversa durezza.

La zona più compressa durante la sciata è la zona frontale superiore della linguetta. Durante la flessione in avanti la tibia comprime con forza la linguetta contro lo scafo. Per garantire l'efficiente passaggio del carico si predilige un materiale con una buona rigidità, nel caso della scarpetta in esame si vede un guscio esterno di un materiale con un modulo a compressione di 100 KPa. Lo stesso materiale è presente anche sulla parte inferiore e laterale della scarpetta, tutta la zona che avvolge stinco e polpaccio.

Al contrario, la fascia interna allo scafo, quella che avvolge il piede, sfrutta una schiuma con un modulo a compressione di 10 KPa. Qua, passa in secondo piano il trasporto di energia privilegiando il comfort termico ed ergonomico. In particolare, uno strato con uno spessore di 2 mm, di materiale con un modulo a compressione di 1 KPa, viene impiegato a contatto con il piede. Questa scelta, oltre ad essere funzionale è anche pensata a fini commerciali. Infatti, il contatto tra scarpetta e piede, e la sua comodità, è una delle prime variabili che viene considerata in fase di acquisto di uno scarpone da sci.

Nelle immagini di seguito è rappresentata la scarpetta inquadrata di fronte figura [4.20], inquadrata dal retro figura [4.21], e un particolare sulla sola linguetta figura [4.22]. Sono colorate di rosso le parti ricoperte dal guscio di materiale plastico più duro.

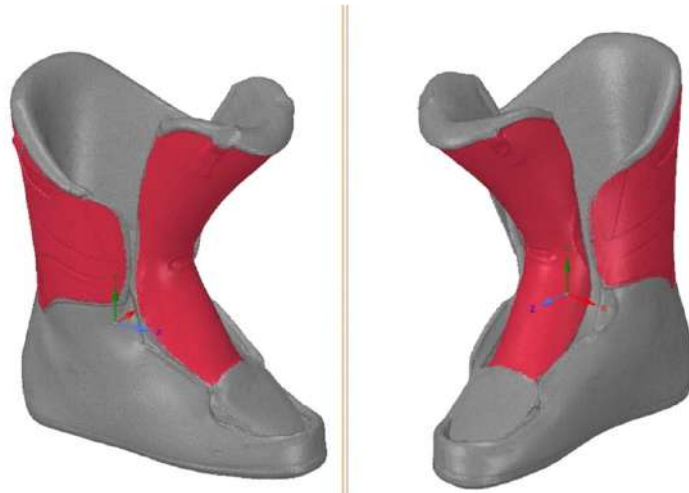


Figure 4.20: Composizione materiali scarpetta fronte.

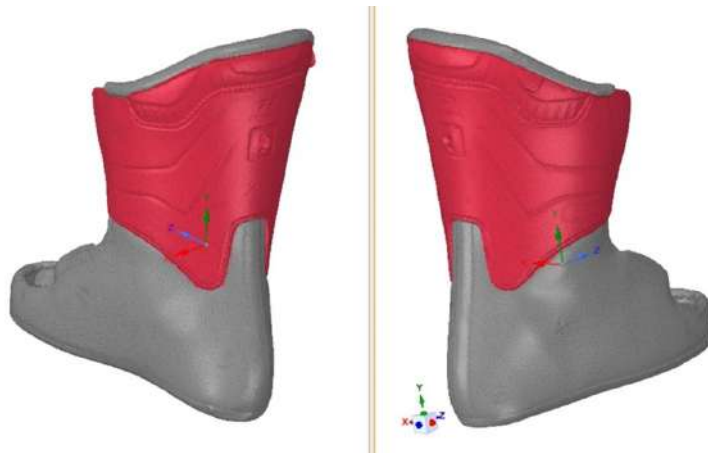


Figure 4.21: Composizione materiali scarpetta retro.

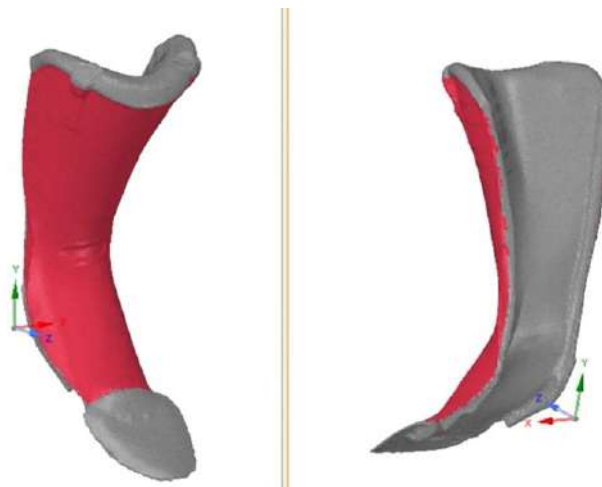


Figure 4.22: Composizione materiali linguetta.

**Importanza dell'isolamento termico** Per avere una migliore comprensione del significato del lavoro fatto si presentano alcune delle variabili maggiormente influenti sull'isolamento termico all'interno della scarpetta di uno scarpone da sci. Quanto segue è una breve sintesi degli studi di ricerca effettuati negli ultimi anni su questa specifica tematica.

La qualità di uno scarpone da sci è definita dalle proprietà meccaniche e dal comfort. Il comfort è strettamente correlato alla sensazione di freddo che viene percepita all'interno dello scarpone, in particolare nella zona del piede. Numerosi gli studi sono stati fatti sul microclima termico che viene a crearsi all'interno di una scarpetta. I fattori influenti sono diversi e come spiegato in precedenza la gestione degli spessori è senz'altro rilevante, ma la maggiore importanza è data dalla scelta del materiale corretto, sia per le sue proprietà meccaniche e sia per le composizioni chimiche.

La temperatura del piede è valutata rispetto alla temperatura dell'ambiente, la durata dell'esposizione al freddo, il livello di attività fisica, e il grado di umidità all'interno della scarpetta (derivante sia dall'umidità esterna sia dal sudore prodotto). Questi studi hanno permesso di affermare che la zona maggiormente esposta al freddo in durante la sciata è proprio quella in corrispondenza delle dita dei piedi. [24].

È anche emerso che le proprietà isolanti dello scarpone da sci dipendono dalla quantità di aria intrappolata tra il piede e la scarpa, a testimonianza di come la convezione abbia un effetto negativo sull'isolamento termico. Infatti, attraverso studi fatti in camere climatiche è stato possibile dimostrare come le scarpette realizzate in EVA a celle chiuse abbiano un migliore isolamento termico rispetto a quelle fatte con EVA a celle aperte. Ciò è giustificato dal minore coefficiente convettivo dei materiali a celle chiuse.

Un altro fattore che influenza la regolazione termica del nostro corpo è il flusso di sangue. Soprattutto per le estremità quali piedi e mani la circolazione gioca un ruolo importante sulla termoregolazione corporea. La circolazione sanguigna a sua volta è influenzata dalla pressione. Gli scarponi da sci sono noti per essere relativamente scomodi e per stringere molto il piede quando vengono indossati [26]. La distribuzione di spessori gioca quindi un ruolo molto importante in questo senso; dove non necessario è bene mantenere uno spessore il più sottile possibile, che garantisca il controllo del gesto tecnico ma senza stringere esageratamente il piede impedendo il fluire del sangue.

L'analisi degli spessori della scarpetta ci ha permesso di fare delle osservazioni interessanti. Da queste risulta evidente come vi sia la necessità di trovare un compromesso, un trade-off, tra prestazione e comfort.

Si pensi però ai fini applicativi di questo studio; il re-design in ottica di facilità di riciclo di uno scarpone da sci da noleggio. In questo caso specifico è possibile pensare la scarpetta per un utilizzatore identificabile in uno sciatore medio, o addirittura principiante, che più facilmente ricerchi nello scarpone la comodità rispetto alle ottime prestazioni.

Ai fini di questo elaborato di tesi l'interesse si concentra specialmente sul guscio esterno. Per questo ci si limita a delle osservazioni qualitative su un possibile re-design della scarpetta. La nuova scarpetta viene proposta con un design monomateriale, ottenuto dal riciclo della schiuma delle scarpette di scarponi a fine vita. La realizzazione con un singolo materiale facilita molto il riciclo della nuova scarpetta rispetto a quella realizzata di due materiali diversi, che richiede di scucire la parte plastica da quella in EVA.

Viene mantenuta la distribuzione delle diverse durezza in accordo con le considerazioni fatte al capitolo precedente. Viene mantenuta una maggiore rigidità nelle zone che esigono una ottimizzazione del trasferimento energetico (zona che avvolge stinco e polpaccio). Si mantiene una schiuma con minore rigidità nelle zone dove è più importante il comfort termico (zona del piede), poiché le schiume più morbide hanno le celle chiuse, quindi una minore convezione, più aria intrappolata nella scarpetta, e maggiore isolamento termico.

Si mantiene un sottile strato interno realizzato con una schiuma molto morbida per migliorare l'ergonomia

---

e comfort.

Per ottenere una schiuma con diverse durezza ma con le stesse caratteristiche chimiche è sufficiente gestire differientemente le proporzioni e il tipo di agenti leganti e modificare le pressioni di lavoro in fase di riciclo.

Come già detto, il nuovo design della scarpetta è soltanto qualitativo per il momento. Il materiale della schiuma da riciclo non è ancora è nostra disposizione, e di conseguenza non è stato possibile farne la caratterizzazione meccanica. Tuttavia, questa analisi ci ha dato importanti informazioni che saranno utili per avere una chiave di lettura più completa sullo studio dello scarpone nella sua completezza, e soprattutto conosciamo la geometria esatta della scarpetta e ne abbiamo ottenuto un file CAD in formato STEP che può essere implementato nel modello FEM del Flex Test.



## Chapter 5

# Analisi dei meccanismi di chiusura dello scafo

### 5.1 Descrizione del problema

Quella della chiusura dello scafo è forse la più grande criticità, o quantomeno si tratta della problematica più difficile da risolvere. Quando si esegue il *Flex Test*, lo scarpone viene tirato da una pressa per verificarne le caratteristiche flessionali. Un cavo di acciaio viene vincolato alla protesi della gamba, e l'altra estremità è fissata sulla traversa mobile della pressa. Il trasferimento del moto è garantito dall'utilizzo di una carrucola. Il procedimento è schematizzato in figura [5.1].

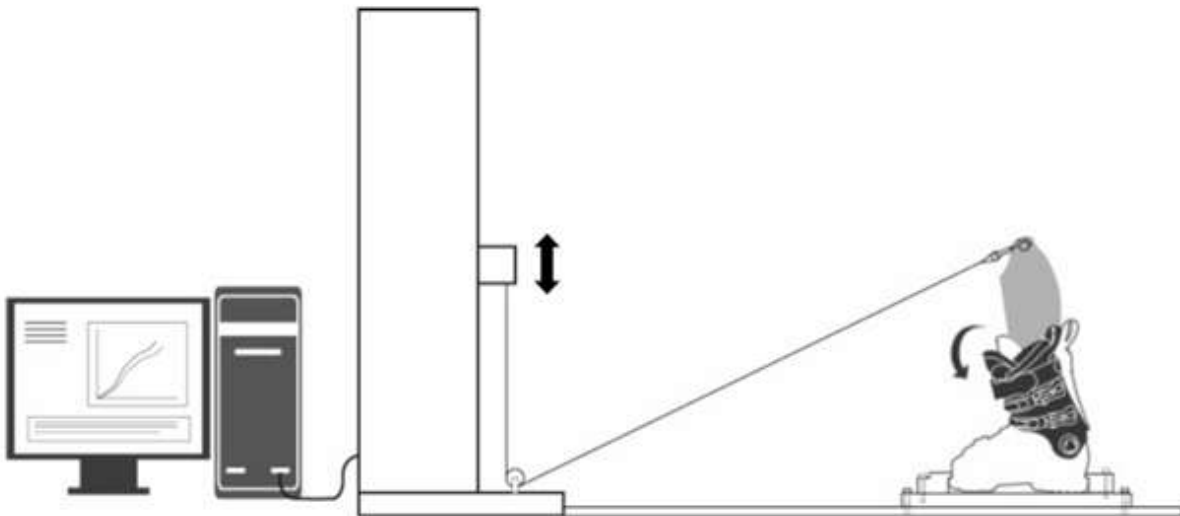


Figure 5.1: Rappresentazione schematica del *Flex Test*.

Le analisi preliminari realizzate sullo scarpone, hanno mostrato come la zona di maggior interesse per quanto riguarda le deformazioni flessionali sia quella in corrispondenza della giunzione tra scafo e gambetto. Questa zona è anche quella che più risente dell'effetto della chiusura dello scarpone. Essendo il materiale termoplastico e con delle forti proprietà viscoelastiche, subisce delle importanti deformazioni quando i ganci



dello scarpone vengono chiusi. Lo sci è uno sport che richiede una importante sensibilità sull'attrezzo sportivo. Questa sensibilità è garantita dalla presenza dello scarpone, che rende il più possibile solidale la gamba con lo sci. Con quanta più forza viene chiuso lo scarpone, e tanta più sarà la padronanza del gesto tecnico. Però, tanto più viene stretto lo scarpone, maggiori sono le deformazioni elastiche sullo scafo. Il *Flex Test* viene realizzato con lo scarpone chiuso al massimo, e con la micrometrica dei ganci al minimo della lunghezza possibile; ciò si traduce in uno stato di deformazione importante, soprattutto sullo scafo. Avere un materiale già deformato cambia considerevolmente la risposta flessionale dello scafo durante la prova sperimentale. Implementare questa deformazione nel modello FEM è molto complicato. Ancor prima di riprodurre lo stato di deformazione nel modello FEM, si incontra la difficoltà di comprendere l'entità di questa deformazione. Le variabili sono moltissime, e chiaramente la deformazione varia da piede a piede, ma l'interesse di questa ricerca è rendere la simulazione FEM il più fedele possibile a questa prova sperimentale. Dunque, si simulerà l'azione di chiusura dei ganci dello scarpone, inizialmente soltanto dello scafo. Parallelamente si utilizzerà lo strumento DIC per tracciare la cinematica dei ganci durante la chiusura, per poterla riprodurre sul FEM. Infine, sempre con la DIC si analizzerà come varia lo stato di deformazione sul fianco dello scarpone durante la chiusura per poter controllare se questo sia sufficientemente fedelmente riprodotto sul FEM.

Per verificare l'influenza della presenza della gamba (quindi del piede) e della scarpetta; la stessa prova verrà eseguita con e senza la presenza di gamba e scarpetta.

## 5.2 Problematiche relative alla calibrazione

Nel capitolo relativo alla strumentazione si è descritta l'importanza del processo di calibrazione. In questa fase si spiegherà brevemente in cosa consiste ad atto pratico, e quali sono le criticità che lo caratterizzano.

### 5.2.1 Processo di calibrazione

Come si è spiegato in precedenza, le distanze tipiche della calibrazione mostrate in fig.[2.16], dipendono dall'oggetto di calibrazione e dal volume di misura ricercato. Ogni oggetto di calibrazione viene fornito in abbinamento ad una chiavette USB che contiene le informazioni del pannello (o della croce). Queste informazioni vengono inserite nel software GOM Snap, e impostando il volume di misura desiderato il software calcola le distanze caratteristiche. Nel caso in esame si ricorda che viene utilizzato il pannello GOM / CP 40 MV 170 mm, e i parametri caratteristici scelti per la seguente analisi sono quelli in tabella [5.1].

Table 5.1: Parametri caratteristici della misurazione

Oggetto di calibrazione	CP40/MV170
Superficie di misura [mm <sup>3</sup> ]	170x125x105
Distanza tra i cursori [mm]	266
Distanza di misura [mm]	687
Angolo delle telecamere [°]	25
Apertura	11

Una volta che sono settate le caratteristiche dell'oggetto, e quindi le impostazioni di misura, si procede con la calibrazione vera e propria. Questa operazione si divide in 7 passi, 7 acquisizioni in cui l'oggetto di calibrazione avrà una posizione differente.

Il primo passo consiste nel posizionare l'oggetto di calibrazione al centro del volume di misura (quindi alla distanza di misura), con l'attenzione al particolare che la telecamera destra e sinistra siano entrambe

centrate.

Le prime tre acquisizioni determineranno il volume di misura. La prima acquisizione avviene con il pannello centrato al centro del volume. Per la seconda acquisizione il pannello viene avvicinato al sensore del 40% della distanza di misura rispetto alla posizione iniziale. Per la terza acquisizione si ritorna alla posizione iniziale, poi il pannello deve essere allontanato del 60% della distanza di misura rispetto al centro.

In questa fase bisogna avere l'accortezza di muovere il pannello sempre rispetto all'asse perpendicolare rispetto alla linea che passa tra le due telecamere.

Per le successive acquisizioni il pannello viene riportato in posizione iniziale, e da qui verrà ruotato più volte e di diversi gradi, rispetto gli assi  $x, y$ , e  $z$ .

Alla fine del processo di calibrazione il software mostra i risultati della calibrazione. Il termine di riferimento è la deviazione di calibrazione, che secondo il software deve essere sotto la dimensione del pixel per avere dei risultati validi. L'esperienza sull'utilizzo dello strumento ha poi dimostrato che per avere una buona calibrazione sarebbe meglio avere una deviazione non superiore a 0.04 pixel.

Il software aiuta a trovare la posizione esatta del pannello, indicando ad esempio se questo sia troppo vicino o troppo lontano, oppure se questo sia troppo inclinato o troppo poco. Tuttavia, si tratta di un processo molto delicato, soprattutto perché maggiore è l'accuratezza con la quale viene eseguita la calibrazione e migliori sono le superfici ottenibili dalle acquisizioni. Si potrebbe anche dire che senza una calibrazione molto bene eseguita, è improbabile ottenere delle superfici sulle quali si possono fare delle analisi consistenti.

## 5.2.2 Supporto giroscopico del pannello

Eseguire una calibrazione "a mano libera" può essere difficile e potrebbe richiedere molti tentativi, quindi molto tempo per essere eseguita correttamente. Il primo periodo in cui ci si è approcciati all'utilizzo delle DIC, la maggior parte del tempo veniva trascorso nel tentativo di eseguire delle calibrazioni sufficientemente valide. Si è quindi deciso di progettare un supporto giroscopico che consenta di avere delle posizioni univocamente definite e riproducibili con una certa accuratezza.

Si è studiato un supporto giroscopico, con origine della triade cartesiana che coincida con il centro del pannello.

Il supporto consiste in tre profilati saldati tra di loro a formare una "U". Viene poi posizionata una barra filettata trasversalmente al centro del quale vi sarà il sistema di vincolo del pannello. Il supporto è fissato sullo scarpometro tramite una vite con una chiocciola, che gli permette di scorrere avanti e indietro oltre che ruotare sui tre assi. Le tavole costruttive sono riportate in *Appendice B*.

Per l'ancoraggio del pannello al supporto si è sfruttata la lastra di acciaio presente sul retro che ha un alloggiamento circolare di raggio 10mm nel quale entrerà una piccola calamita.

L'implementazione di questo sistema ha permesso di ottenere delle calibrazioni molto più veloci e accurate. Inoltre, utilizzare il supporto dello scarpometro, che è lo stesso supporto utilizzato per lo scarpone, permette di posizionare il pannello nella esatta posizione dove sarà posizionato lo scarpone. Utilizzare il supporto giroscopico ha permesso di avere una certa ripetibilità della calibrazione che porta ad una deviazione di circa 0.04 pixel.

Le acquisizioni realizzate con queste calibrazioni garantiscono di avere delle ottime superfici sulle quali si riesce a calcolare con buona accuratezza spostamenti e deformazioni.

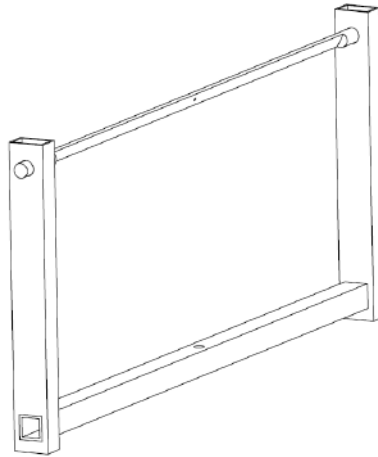


Figure 5.2: [Assieme del supporto del pannello.

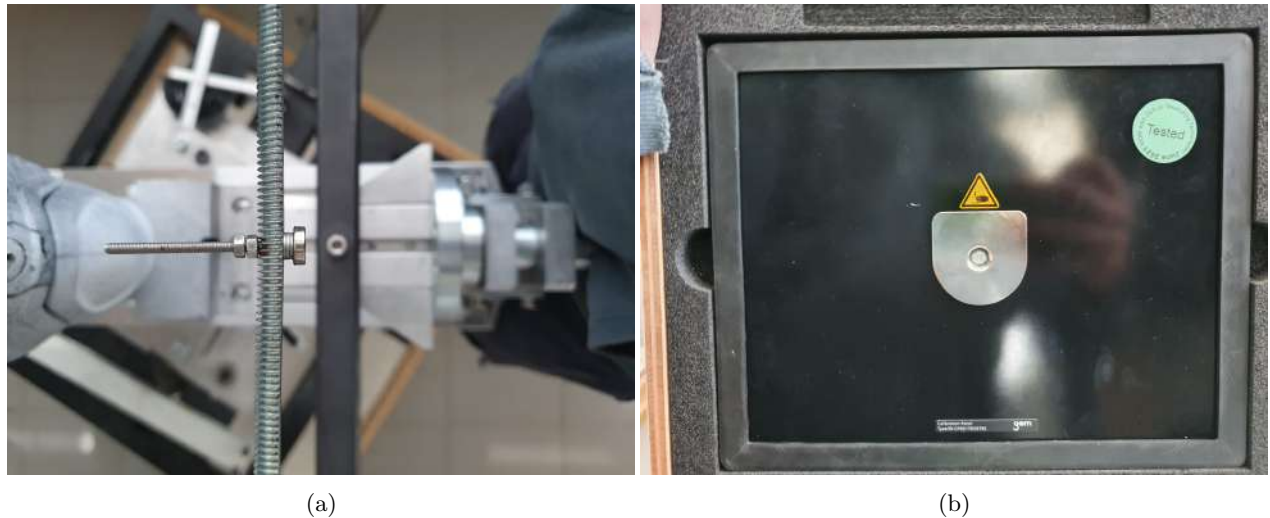


Figure 5.3: Nelle figure si vede il sistema di collegamento con calamita del pannello al supporto.(a) La vite di collegamento sulla quale si inserisce la calamita. (b) L'alloggiamento sul retro del pannello.

## 5.3 Acquisizione DIC

Dopo aver realizzato una buona calibrazione il passo successivo consiste nella realizzazione del pattern. Senza dilungarsi troppo su questa fase, il pattern è stato realizzato con l'aerografo eseguendo un fondo bianco opaco sul quale sono realizzati degli *speckles* neri opachi. La realizzazione del pattern è stata fatta seguendo tutti i principi teorici già esposti nel capitolo relativo alla strumentazione utilizzata.

Realizzato anche il pattern non resta che effettuare le calibrazioni.

### 5.3.1 Impostazione del problema

Per tracciare al meglio la cinematica del gancio durante la chiusura si è scelto di effettuare l'acquisizione in vista frontale dello scarpone.

Il programma GOM Correlate consente di costruire superfici riferendosi a tutta l'immagine acquisita, oppure soltanto ad un sottodominio di essa. L'interesse di questa fase dello studio si limita ai soli ganci,



Figure 5.4: Nelle seguenti immagini si vede un esempio del supporto montato sullo scarpometro, con il pannello applicato. Come evidente dalle figure il supporto può essere spostato lungo la linea longitudinale dello scarpone, e il pannello può ruotare rispetto tutti e tre gli assi  $x,y,z$ , mantenendo sempre il punto di intersezione dei tre assi di rotazione coincidente con il centro del pannello.

perciò si è chiesto al software di realizzare una superficie del profilo frontale del gancio. Ci si è riferiti in particolar modo alla parte mobile del gancio, e al supporto fisso figura[5.6]. Questo perché avere un supporto fisso permette di avere un sistema di riferimento rispetto al quale calcolare gli spostamenti relativi.

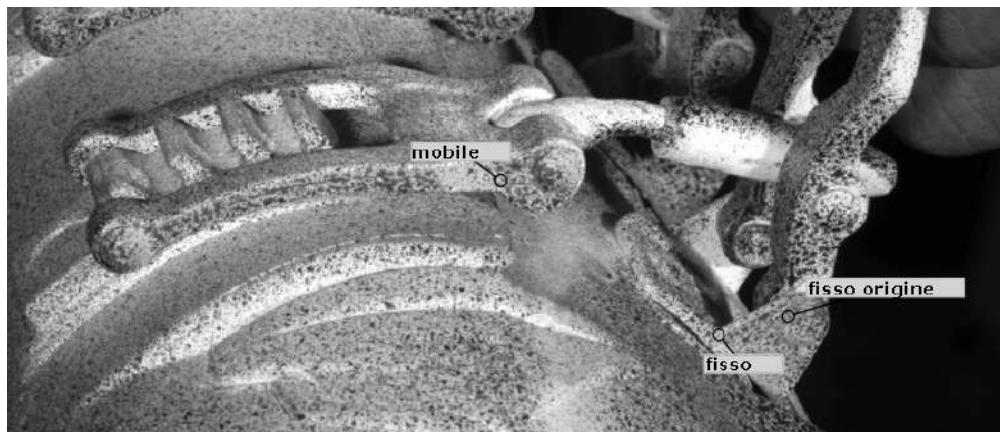


Figure 5.5: Vista dello scarpone frontale dalla quale è stata realizzata la superficie del gancio.

Come si vede dalla definizione delle due superfici la denominazione si realizza nel seguente modo:

- la parte sinistra del gancio viene nominata **mobile**, ed è quella di cui si analizzano gli spostamenti;
- la giunzione sulla destra, che rimane solidale allo scarpone durante tutto il movimento viene chiamato **fisso**;
- il perno circolare della parte fissa viene chiamato **fisso origine** perché è il punto dove verrà costruito il sistema di riferimento locale.

Nello specifico si analizzano gli spostamenti di tutte e due le superfici rispetto ad un sistema di riferimento

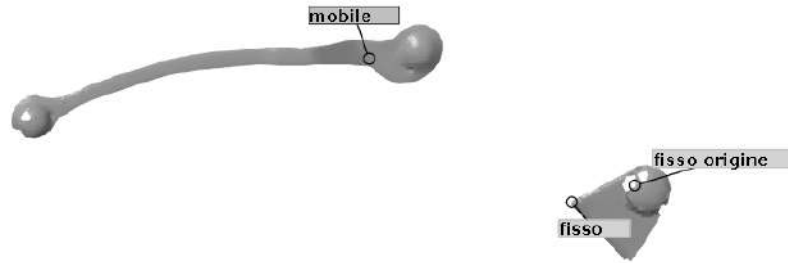


Figure 5.6: Superficie del gancio presa come riferimento per fare lo studio della cinematica.

che sarà fissato nel punto di giunzione denominato *fisso origine*. Sono poi valutate le distanze relative dei due perni della superficie mobile rispetto al sistema di riferimento creato.

Inizialmente si è provato a realizzare una sola acquisizione nella quale fosse completata l'intera sequenza di chiusura. Questo avrebbe permesso di avere la definizione delle superfici di entrambi i ganci nella stessa acquisizione. Questo però ha dimostrato alcune difficoltà.

Innanzitutto, come si può vedere anche dalla figura 5.5, il gancio davanti in alcune fasi dall'acquisizione copre il gancio dietro (ricordiamo che avere una buona correlazione è importante che la superficie sia riconosciuta in ogni step dell'acquisizione).

Inoltre, sebbene entrambi i ganci rientrano nelle dimensioni del volume di misura, si tratta di un componente molto complesso. Fare correlare delle superfici con uno spessore così fine, con dei particolari così piccoli, è molto complesso; è quindi necessario avere delle condizioni di fuoco e di illuminazione ottimali. Garantendo la perfetta illuminazione di un gancio si creano delle zone di ombra in alcune parti dell'altro gancio. Queste zone di ombre creano dei problemi soprattutto per la correlazione del particolare fisso sulla destra.

Si sarebbe potuto ruotare il sensore e ricercare una posizione della telecamera in cui entrambi i ganci si fossero illuminati correttamente. Tuttavia, come sarà spiegato meglio in seguito, si è preferito mantenere le telecamere in bolla e in asse con lo scarpone, in modo che l'asse x ed y del sistema globale dell'acquisizione coincidesse con gli assi x ed y della vista frontale dello scarpone.

Considerate le difficoltà sopra elencate si è deciso di effettuare delle acquisizioni separate dei due ganci. Si è definita una nomenclatura univoca dei componenti acquisiti.

- **Gancio 1**, il gancio vicino alla punta dello scarpone;
- **Gancio 2**, il gancio più vicino allo scafo;
- **Fianco**, nella parte dove si vede il sovrapposizione dei lembi dello scafo, figura [5.7].

Nonostante i ganci sono stati registrati in momenti differenti, si è mantenuta la stessa sequenza di chiusura, ovvero si è chiuso il primo gancio e poi il secondo. Ciò significa che l'acquisizione del primo gancio è stata realizzata con entrambi i ganci aperti, mentre quella del secondo è stata realizzata con il gancio 1 già chiuso.

Inoltre, si è mantenuto il sensore nella stessa posizione per tutte e tre le acquisizioni (gancio 1, gancio 2, fianco). È stato spostato lo scarpone in modo da avere sempre il componente di interesse circa alla stessa



Figure 5.7: Vista laterale dello scarpone dalla quale è stata realizzata la superficie del fianco.

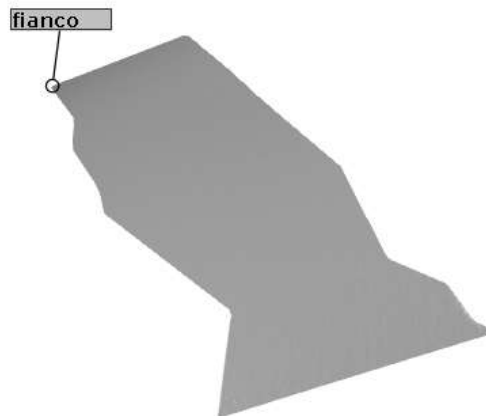


Figure 5.8: Superficie del fianco presa come riferimento per fare lo studio delle deformazioni.

distanza di misura.

Come era stato brevemente anticipato in precedenza, le tre acquisizioni sono state realizzate in due condizioni: con la gamba e la scarpetta, e senza gamba e scarpetta. Nonostante l'obiettivo finale sia quello di confrontarsi con il modello FEM da utilizzare per il *Flex Test*, che vede gamba e scarpetta inserita, si vuole capire quanto la presenza di questi due corpi possa influire sullo stato di deformazione residua dopo la chiusura dei ganci.

Ne consegue che le acquisizioni realizzate sono 6. L'acquisizione del gancio 1 con e senza scarpetta, il gancio 2 con e senza scarpetta, il fianco con e senza scarpetta.

L'ultima questione su cui si vuole porre l'attenzione è quella relativa al sistema di riferimento. Come si è

detto in precedenza, si è voluto mantenere gli assi x e y del sistema di riferimento della GOM coincidenti a quelli dell'asse intermedio dello scarpone. Per confrontare i risultati della DIC con quelli del FEM è necessario avere lo stesso sistema di riferimento, e per comodità si è scelto di utilizzare un sistema di riferimento con piano xy coincidente a quello del pezzo CAD dello scafo. Successivamente l'origine del sistema potrà essere facilmente posizionata nel punto che sarà ritenuto più comodo.

### 5.3.2 Acquisizioni e analisi delle superfici

Di seguito vengono analizzate le superfici in termini di spostamenti e deformazioni.

Tutte le acquisizioni sono state realizzate nell'arco temporale di qualche ora. Questo ha permesso di sfruttare la stessa calibrazione, e di avere approssimativamente le stesse condizioni di luce. Inoltre, si è cercato di muovere il sensore il meno possibile, e di mantenere lo scarpone nella stessa posizione rispetto alle telecamere.

La calibrazione realizzata per le acquisizioni ha come risultato una deviazione di calibrazione di 0.042 pixel, dato che permette di ottenere delle buone superfici.

Tutti i dati di calibrazione sono mostrati in figura [5.9].

The image shows two parts of a software interface for calibration results. Part (a) is a summary table, and part (b) is a detailed list of parameters.

**(a) Calibration Result Summary**

Calibration results	
Calibration deviation	✔
Current calibration info	
<b>General</b>	
Calibration date	Fri Apr 22 11:28:58 2022
<b>Calibrated sensor</b>	
Sensor name	ARAMIS Adjustable Base
Measuring volume	Adjustable measuring volume
Camera support	Adjustable base 800
Working distance	687 mm
Camera angle	25°
Camera distance	266 mm
Serial number	no identifier
<b>Calibration object</b>	
Object type	Panel (Triple Scan)
Name	CP40/170/43765
Certification date	6/2/2021

**(b) Calibration Result Details**

Certification ID	CP40/170/43765/2021-06-02
Calibration points	3657 points
Certified lengths	243.257 / 243.256 mm
Certification temperature	20.0 °C
Expansion coefficient	$6.94 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Calibration temperature	20.0 °C
<b>Calibration settings</b>	
Camera lenses	50.00 mm
Snap mode	Single snap
Max. ellipse residual	0.088 (gray value adjustment)
<b>Calibration Result</b>	
Calibration deviation	0.042 Pixels
Calibration deviation (check)	OK (limit value: 0.100 Pixels)
Camera angle	25.2°
Height variance	83 mm
Measuring volume	170 / 125 / 105 mm

Buttons: Save Protocol, OK, Cancel

Figure 5.9: Calibrazione utilizzata per le acquisizioni.

Si analizzeranno singolarmente il *gancio 1*, il *Gancio 2*, e il *Fianco*, rispettivamente nelle condizioni con e senza la scarpetta e la gamba. Se ne commenteranno i principali dettagli più caratteristici e si confronteranno le due diverse configurazioni.

Per quanto riguarda i ganci, l'attenzione è posta esclusivamente sulla comprensione quantitativa della cinematica. Il sistema di riferimento locale dei ganci è stato posto in corrispondenza della giunzione fissa del gancio. Da questo punto si sono analizzati tutti gli spostamenti rispetto agli assi x, y, e z della parte mobile del gancio.

Inoltre, si è controllato come varia la lunghezza relativa dei due perni caratteristici della parte mobile del gancio, sempre rispetto alla giunzione fissa.

Queste informazioni danno una conoscenza completa del campo di spostamenti dei ganci, e di conseguenza si hanno tutte le informazioni necessarie per riprodurre la cinematica sul FEM.

Ogni acquisizione è stata realizzata con un *Framerate* diverso. All'aumentare della resistenza del gancio durante la chiusura, il movimento del componente diventa sempre più scattoso e rapido. Ne consegue che un numero di frame più alto è fondamentale per riuscire a riconoscere la superficie nel corso di tutta l'acquisizione. Dopo l'acquisizione il segnale viene tagliato, escludendo quei frame che comprendono momenti morti, come lo spostamento dell'operatore verso lo scarpone, o il tempo trascorso dopo la chiusura completa dello scarpone. Il file finale ha numero di frame che è possibile vedere nei grafici che saranno riportati in seguito. Con *Indice* ci si riferisce al rispettivo frame, e il numero più grande definisce il numero di frame di cui è composto il segnale. Si specifica inoltre che tutte le acquisizioni sono realizzate in *Full frame*, quindi alla risoluzione completa del sensore di (4096x3000) pixel.

Riguardo alla superficie del gancio si è selezionato un sottodominio della superficie tale che garantisca di essere riconosciuto durante tutta l'acquisizione, sia con i ganci aperti che con i ganci chiusi. Per il fianco una sola acquisizione ha permesso di riconoscere tutta la sequenza di chiusura: prima il gancio 1 e successivamente il gancio 2.

Infine, si specifica che la chiusura dei ganci è stata realizzata manualmente e sempre dallo stesso operatore, in modo da avere una buona riproducibilità del gesto.

L'analisi delle acquisizioni è stata organizzata come segue.

Il gancio 1 e il gancio 2 senza la gamba e la scarpetta inserita sono stati confrontati con i rispettivi ganci 1 e 2 con la gamba e la scarpetta inserita.

Per ognuno di questi ganci è stata studiata la posizione finale del gancio a chiusura effettuata, essendo la funzione obiettivo del problema. Si è studiato separatamente lo spostamento del gancio in direzione x, y, e z.

Inoltre, per avere conoscenza dalla cinematica di tutto il movimento, si sono presi dei punti sui due perni della parte mobile del gancio e si è graficato il loro spostamento durante l'intero gesto, per ogni step.

Per tutte le immagini proposte, il punto 1 è quello sul perno più lontano dal sistema di riferimento (quello più a sinistra), mentre il punto 2 è quello più vicino (quello più a destra).

Infine, per entrambi i ganci si è studiato come varia la distanza relativa dei perni dall'origine. Si confronta la distanza sul piano ortogonale xz, e la variazione lungo gli assi x, y, e z. Queste distanze sono confrontate, caso per caso, nelle due configurazioni con e senza scarpetta inserita.

In questo capitolo sono proposte soltanto le immagini relative agli spostamenti in x, mentre quelle relative agli spostamenti in y e z sono in *Appendice A*. Lo stesso vale per le distanze relative, in questo capitolo sono presenti soltanto quelle sul piano xz.

Per il fianco invece si sono confrontate le deformazioni di Von Mises, e si sono confrontate nelle due configurazioni. In particolare si è presa la zona maggiormente deformata e vi si è costruita una curva uguale per entrambe le configurazioni, si è infine valutato come varia la deformazione sulla curva.



## 5.3.2.1 Gancio1

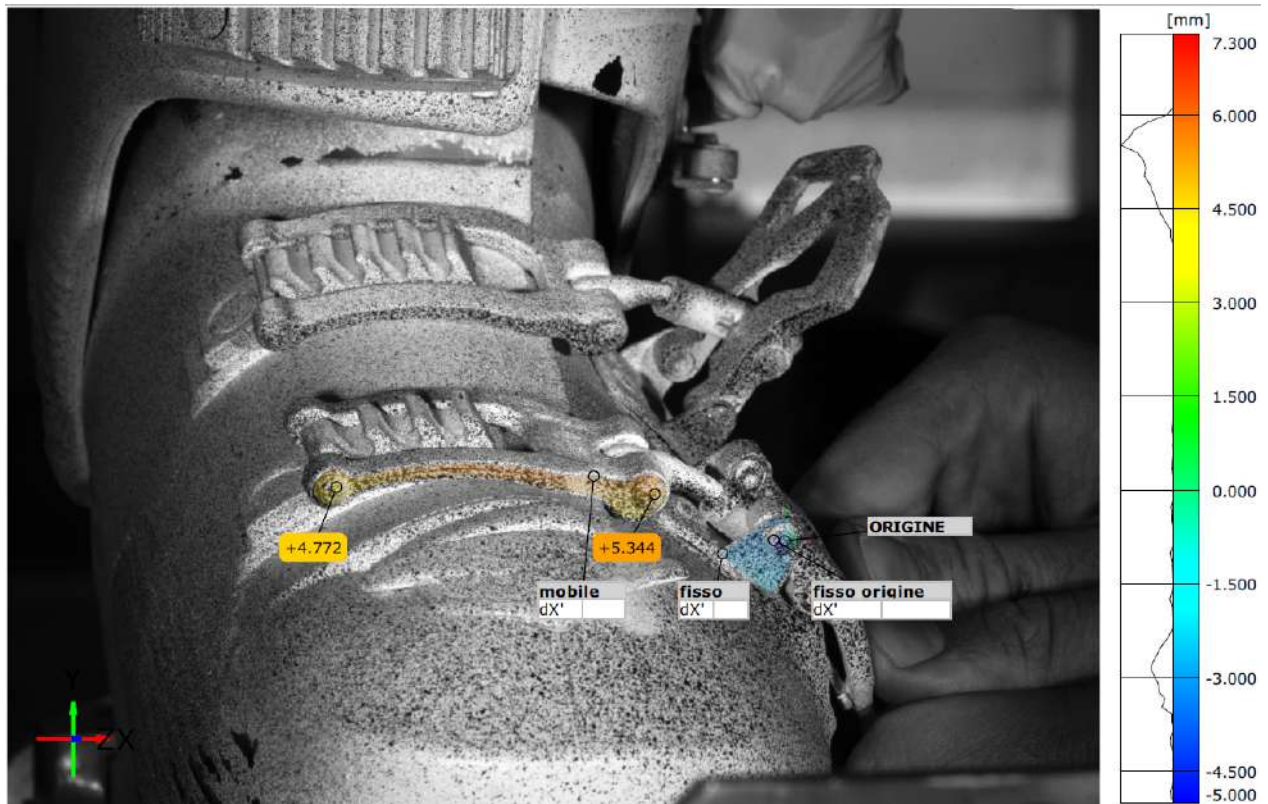


Figure 5.10: Spostamento in x del gancio 1 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

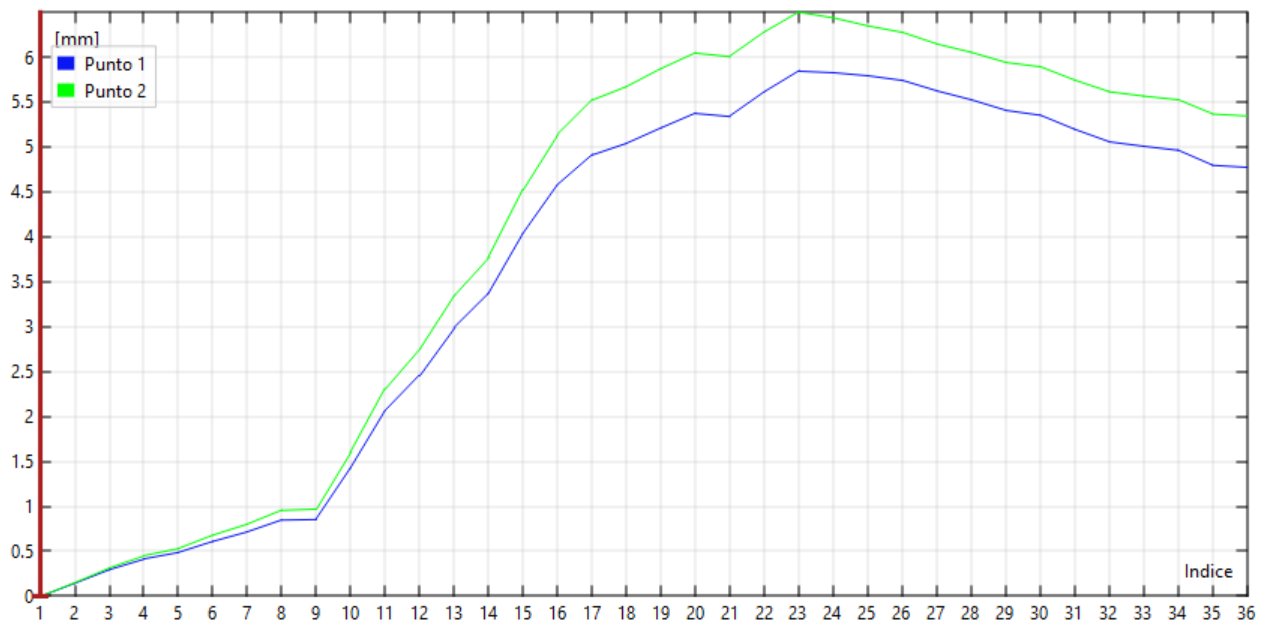


Figure 5.11: Grafico dello spostamento in x del gancio 1 in tutti gli stadi, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

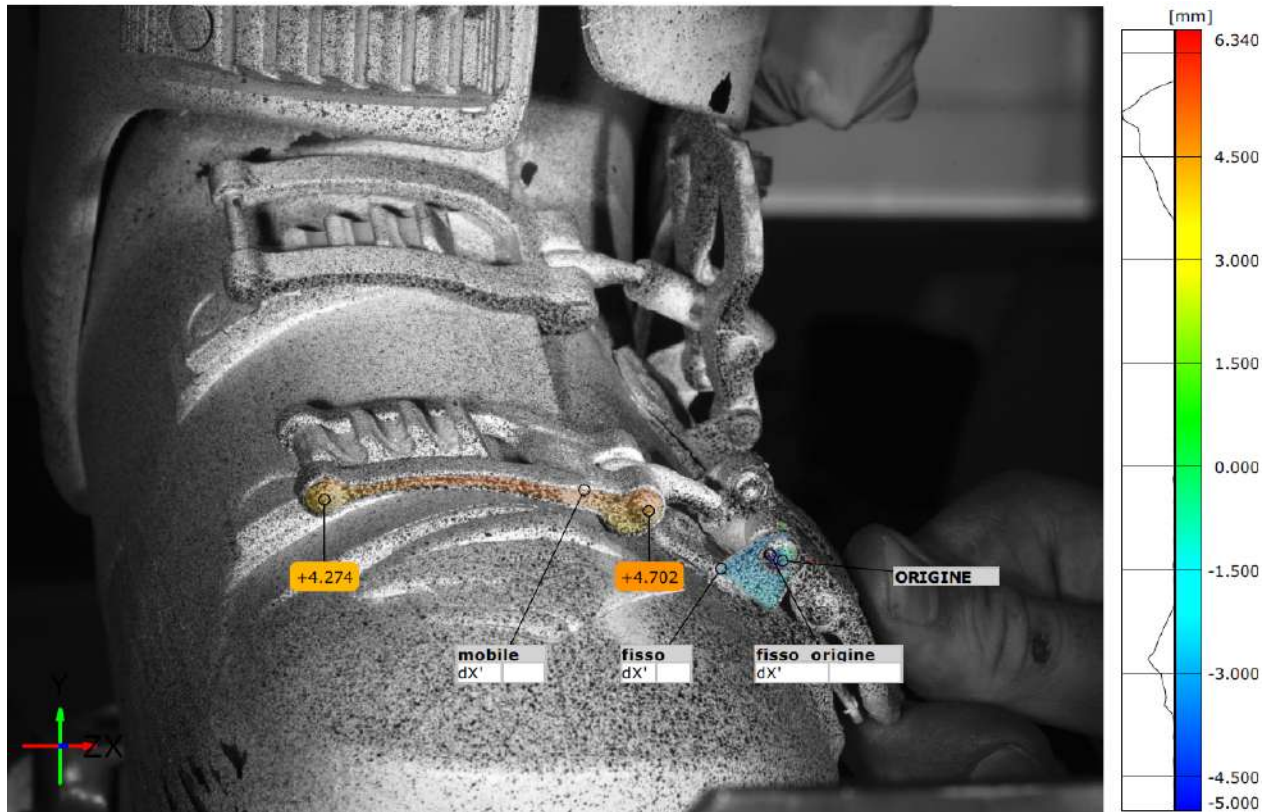


Figure 5.12: Spostamento in x del gancio 1 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

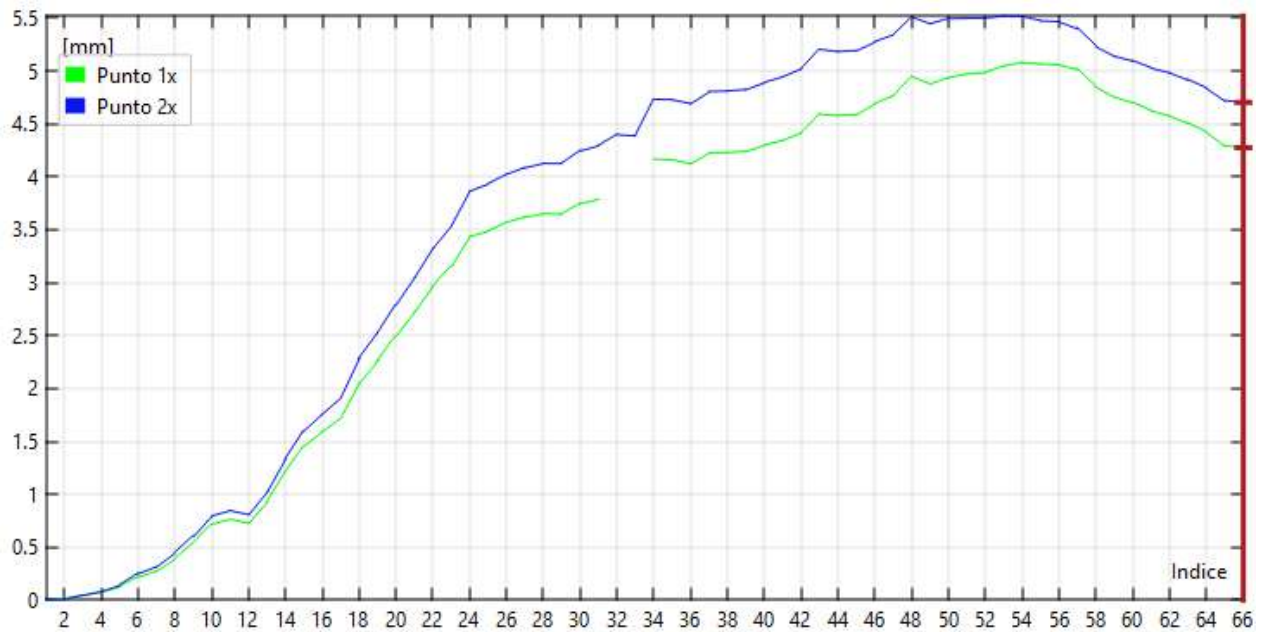


Figure 5.13: Grafico dello spostamento in x del gancio 1 in tutti gli stadi nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

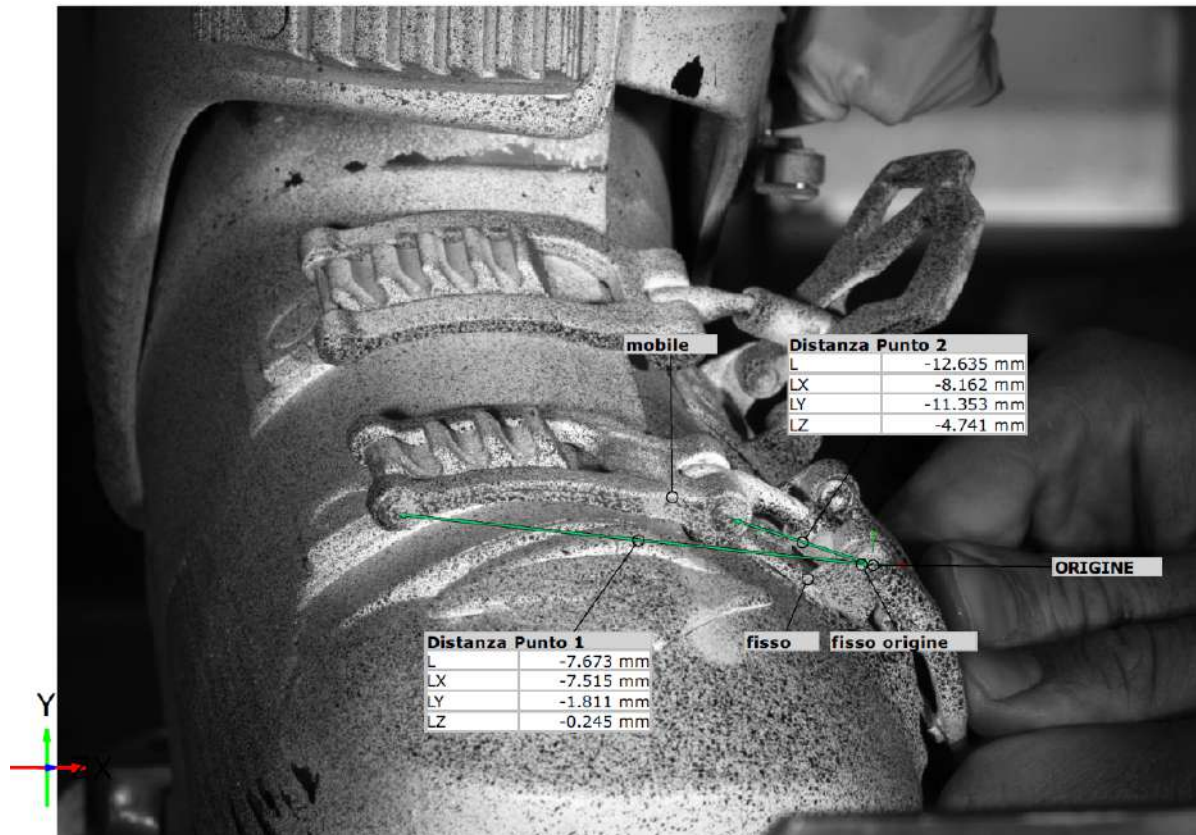


Figure 5.14: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione x,y, e z, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

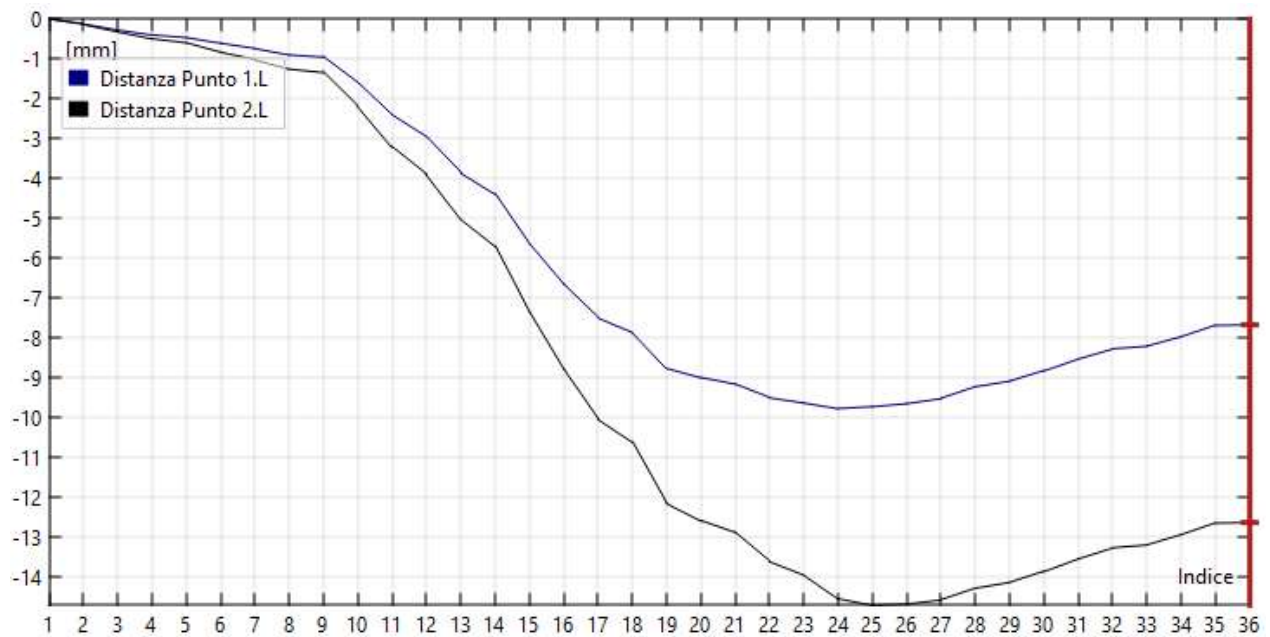


Figure 5.15: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione nel piano xy, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

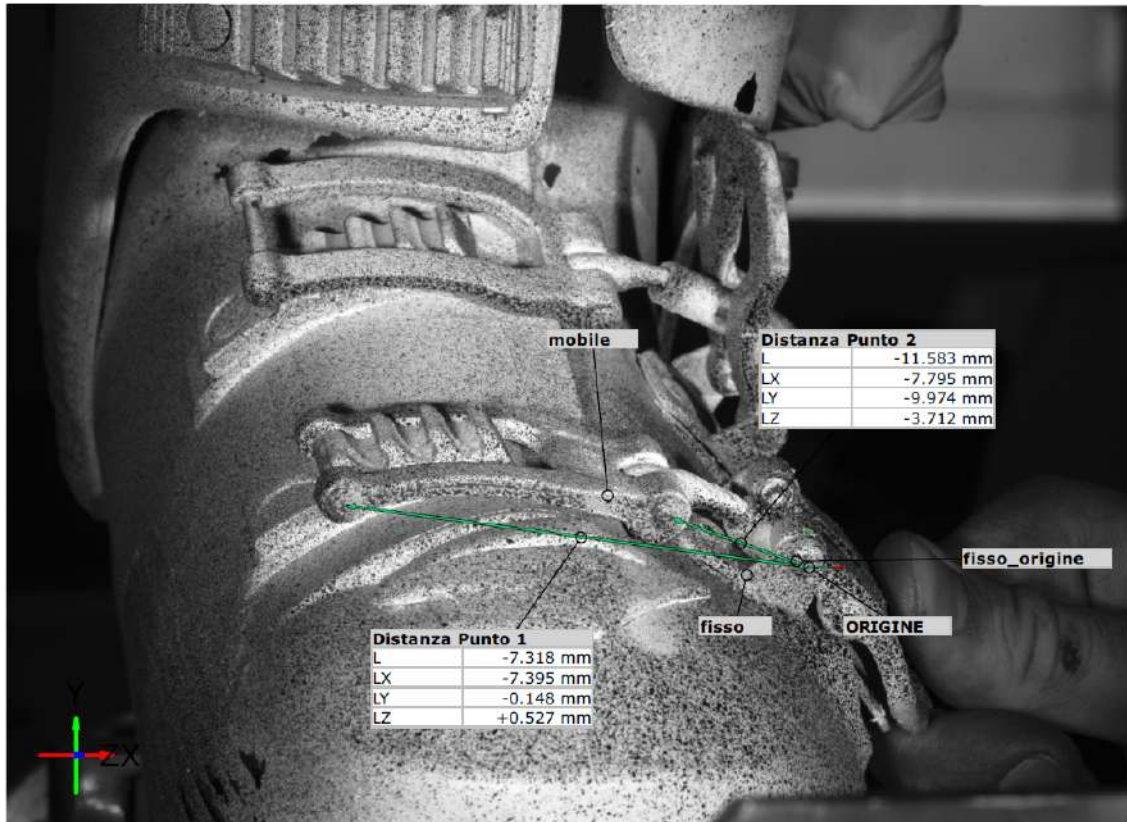


Figure 5.16: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione x,y, e z, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

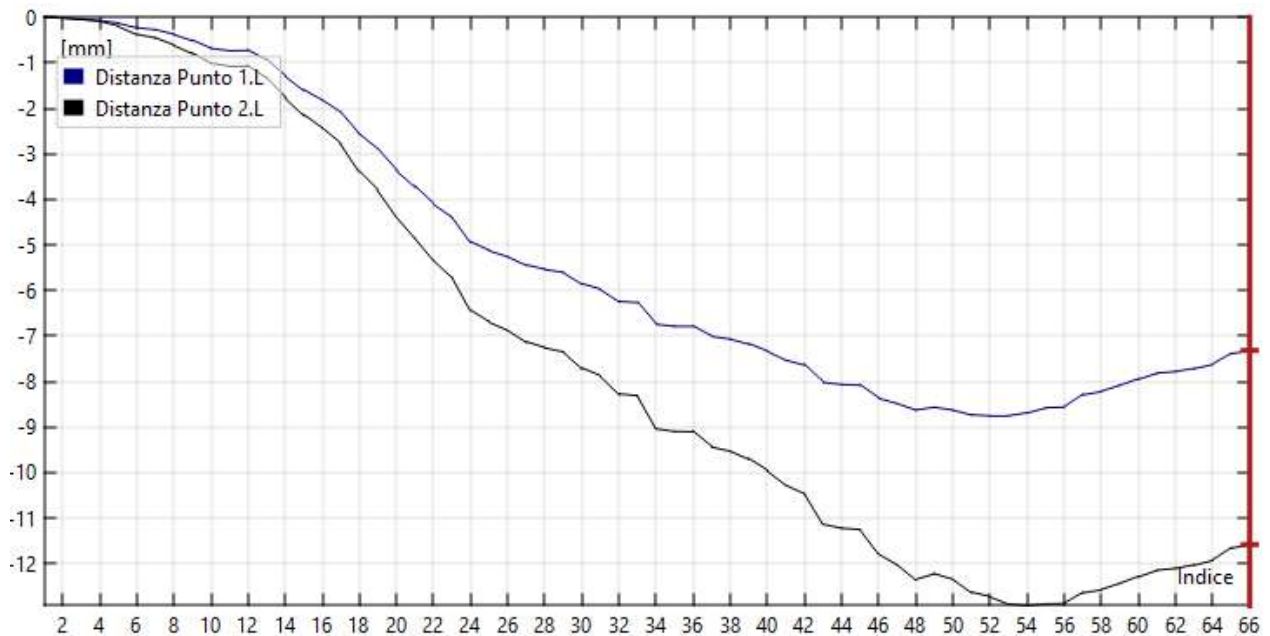


Figure 5.17: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione nel piano xy, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

Nelle immagini sopra, sono riportati gli spostamenti del gancio 1.

Come si può vedere in figura [5.10] e [5.12], lo spostamento  $dx$  è abbastanza contenuto, tra i 4.5 mm e i 5 mm sia per il punto 1 che per il punto 2. Essendo il gancio un corpo rigido, e considerando la cinematica della leva, ci si aspettava una risposta di questo tipo in direzione  $x$ , al più di qualche assestamento del gancio.

È interessante anche il confronto della configurazione con la scarpetta rispetto a quella senza. Infatti, si può dire che la presenza della scarpetta e della gamba non condizionano molto lo spostamento in direzione  $x$ , considerando che in entrambi i caso lo spostamento dei due punti è abbastanza simile, con una differenza di circa 0.5 mm da un caso all'altro.

Nelle figure [A.1] e [A.3] sono rappresentati gli spostamenti  $dy$ . Salta subito all'occhio come in questo caso cambi drasticamente il comportamento del punto 1, quello più a sinistra, rispetto al punto 2. Mentre il punto 1 si sposta in direzione  $y$  verso il basso di poco più di 1 mm, il punto 2 si sposta di circa 11 mm.

Anche in questo caso la differenza tra le due configurazioni è poca, ancora pari a 0.5 mm nel caso del punto due e soltanto 0.2 mm nel punto 1. Tuttavia mentre nel caso precedente lo spostamento era maggiore nel caso senza scarpetta, ora è il contrario.

Infine, nelle figure [A.5] e [A.7] lo spostamento  $dz$  torna a decrescere. si ha uno spostamento inferiore a 0.5 mm per il punto 1 e uno spostamento di circa 5 mm nel punto due. Nonostante si possa pensare che in direzione  $z$  non ci sia alcuno spostamento, per il funzionamento del meccanismo del gancio i lembi oltre ad avvicinarsi e scorrere in direzione  $x$ , si raddrizzano scorrendo nella direzione del gambetto. Questa è una conclusione importante per la riproduzione della cinematica sul FEM, e non sarebbe stato possibile vederlo senza ricorrere all'utilizzo della DIC.

Vedendo i grafici degli spostamenti in  $y$  e  $z$  [A.2] [A.6] e [A.4] [A.8, si vede come il punto 1 sia quasi insensibile allo spostamento in queste due direzioni.

Anche in questo caso la differenza tra lo scarpone con e senza la scarpetta inserita è poca, e ancora più evidente nel punto due.

Il fatto che in tutti e tre casi il delta spostamento nel punto due sia pari a 0.5 mm, fa pensare che la presenza della scarpetta influenzi maggiormente il punto in cui si ha la sovrapposizione dei lembi.

Analizzando i grafici degli spostamenti si vede come il comportamento tipico sia caratterizzato dal raggiungere uno spostamento massimo, che poi viene recuperato con un lieve rilassamento degli sforzi, e quindi un recupero degli spostamenti, nella condizione di equilibrio. in tutti e tre le direzioni dello spostamento si vede come il recupero sia maggiore nel caso senza scarpetta. Se ne deduce che presenza di più volume all'interno dello scafo aumenti gli sforzi caratterizzanti la dinamica del movimento, e di conseguenza porti ad una isostazzazione della struttura in una configurazione differente. L'aumento di volume provoca uno spanciamiento laterale che diminuisce la freccia in direzione  $y$ .

Dall'analisi delle distanze relative, mostrate in figura [5.14] e [5.16] si conferma come il punto 2 risenta maggiormente della presenza della scarpetta e di come la distanza relativa a livello globale sia maggiore nel caso della scarpetta. Ciò significa che la presenza della scarpetta mantenga un maggiore stato tensionale all'interno dello scafo.

Infine dai grafici [5.15] e [5.17] si conferma il trend secondo il quale il rilassamento degli spostamenti sia maggiore nella configurazione senza scarpetta. I grafici della distanza relativa in  $y$  e  $z$ , in figura [A.11] [A.13] e [A.12] e [A.13], mostrano come la distanza del punto uno 1 non risenta di uno spostamento relativo in queste direzioni. Quindi le componenti relative dello spostamento siano distribuite quasi interamente in  $x$ .

## 5.3.2.2 Gancio2

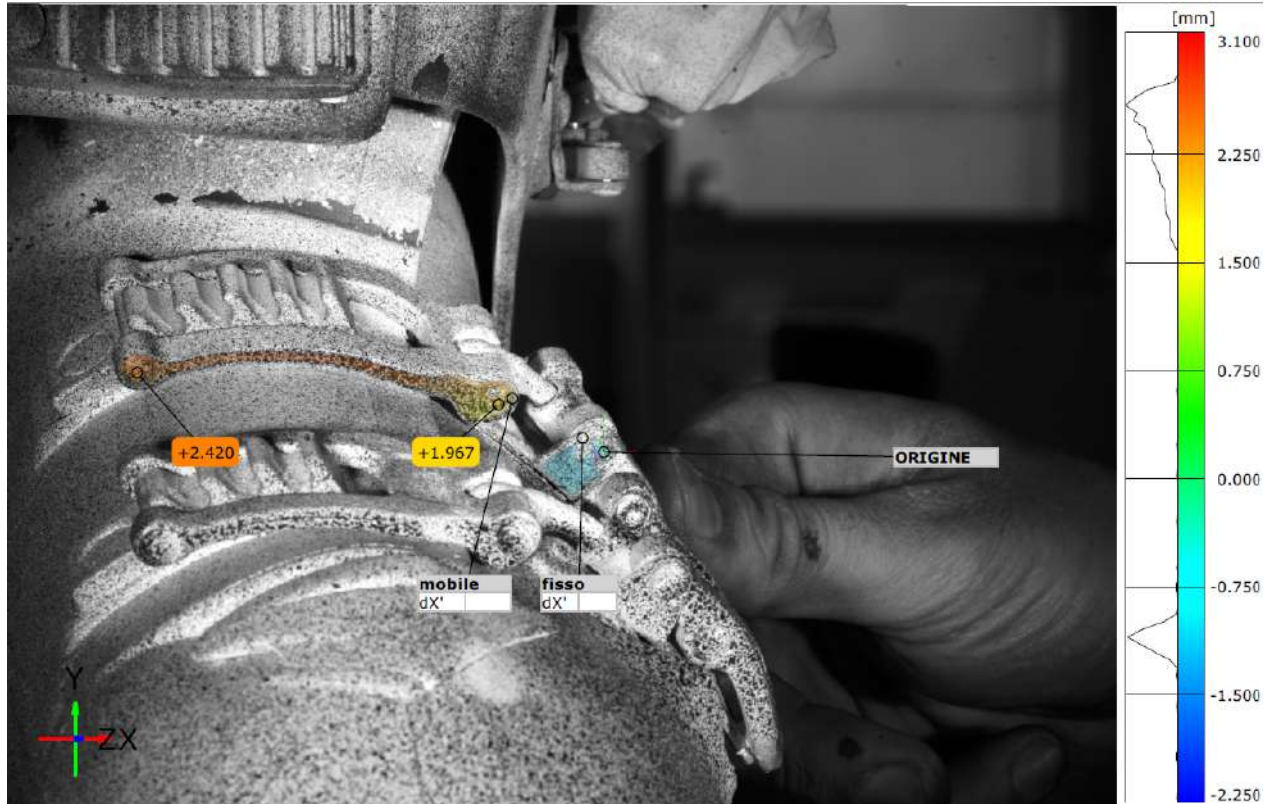


Figure 5.18: Spostamento in x del gancio 2 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

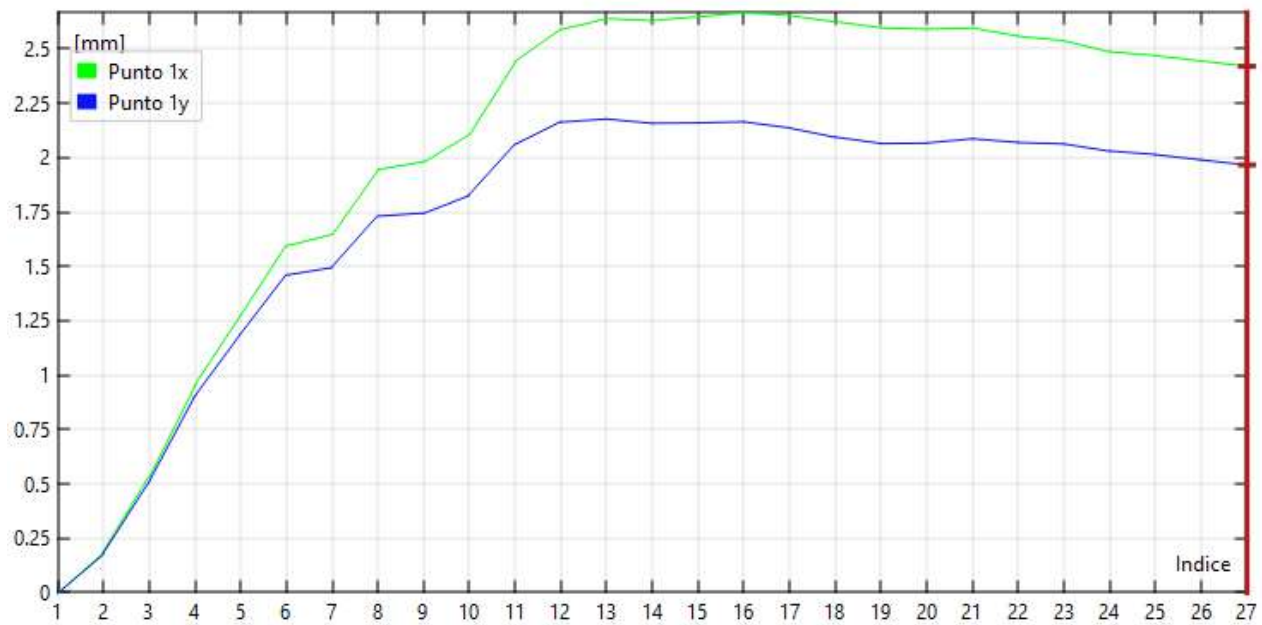


Figure 5.19: Grafico dello spostamento in x del gancio 2 in tutti gli stadi, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

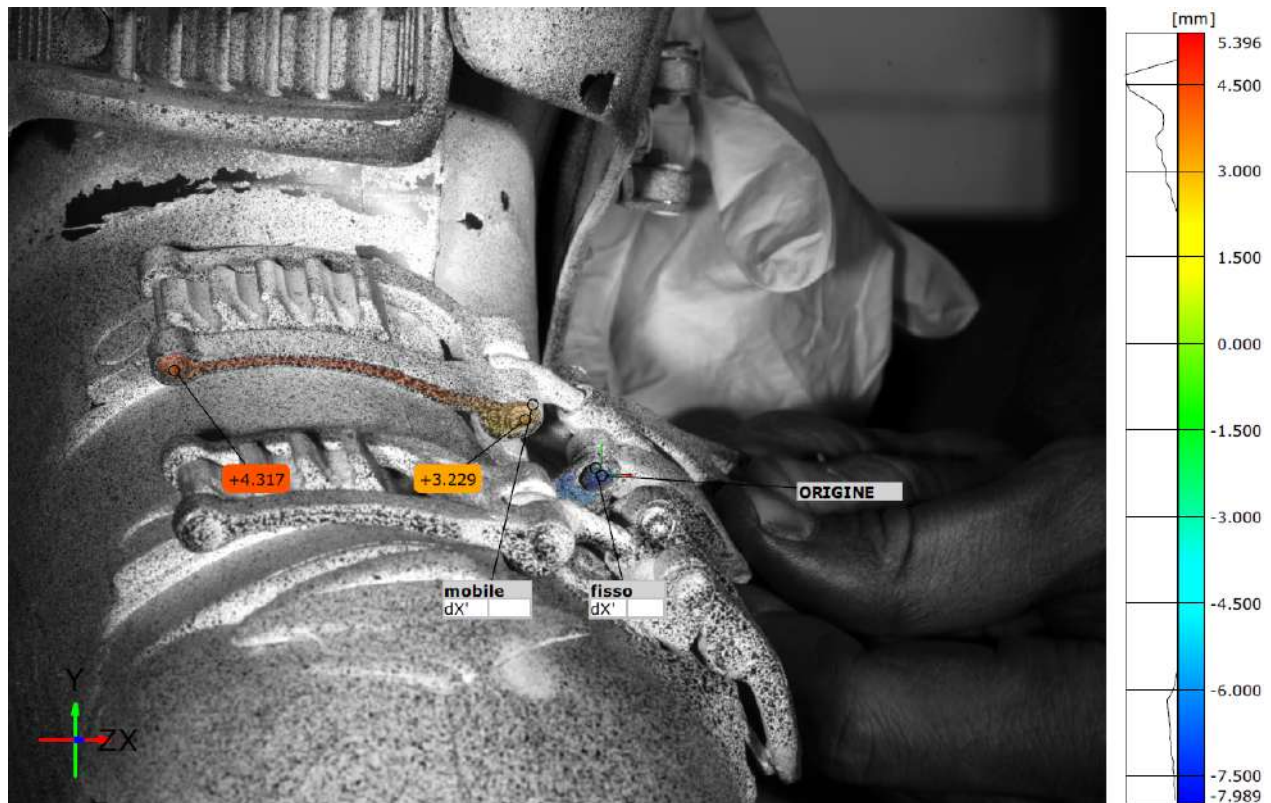


Figure 5.20: Spostamento in x del gancio 2 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

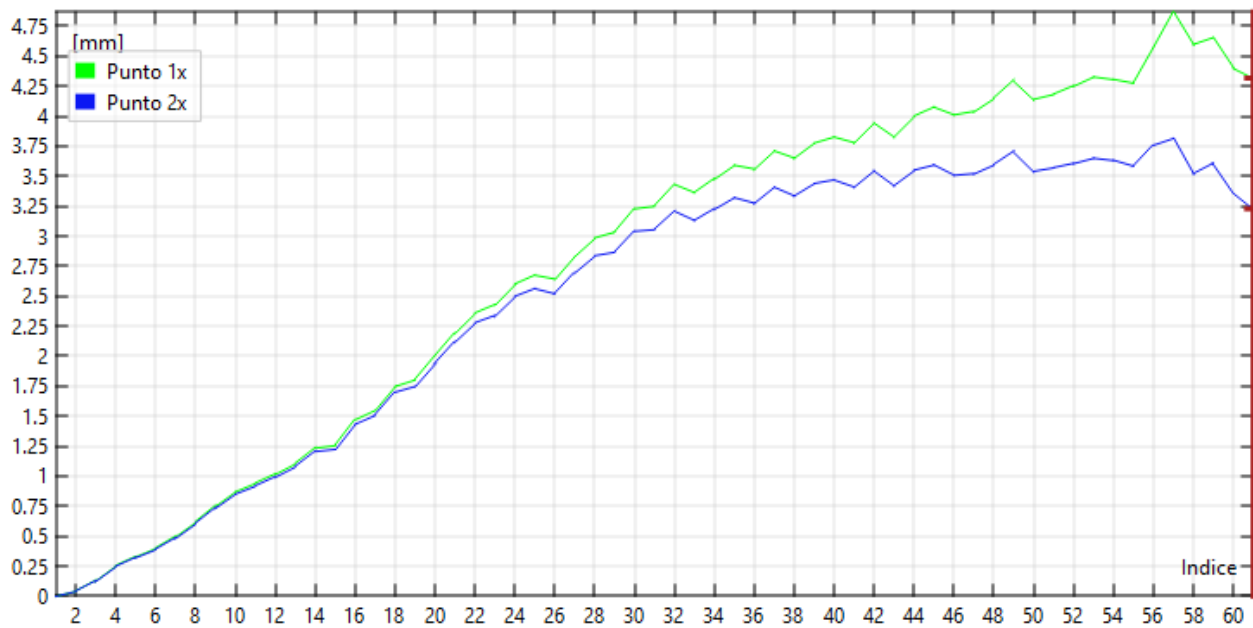


Figure 5.21: Grafico dello spostamento in x del gancio 2 in tutti gli stadi nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

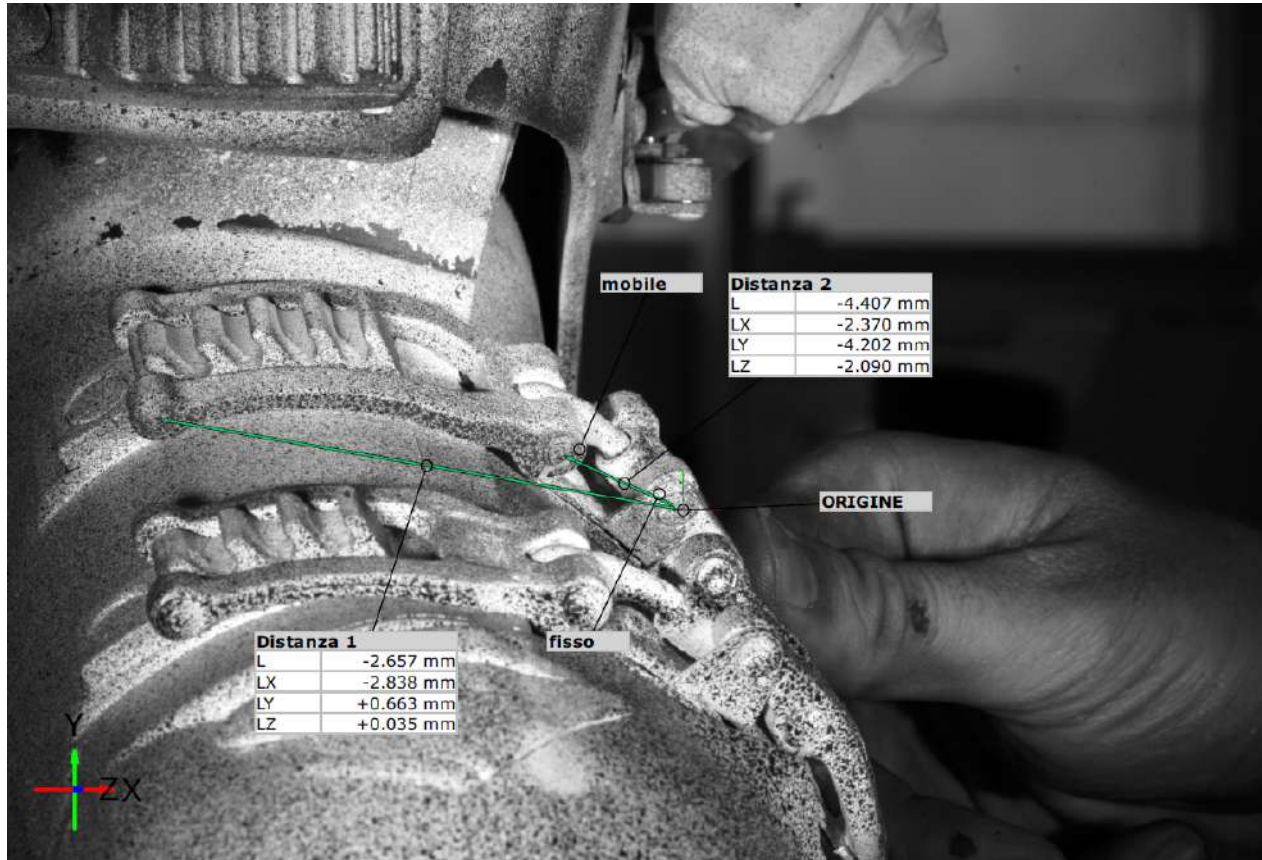


Figure 5.22: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione x,y, e z, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

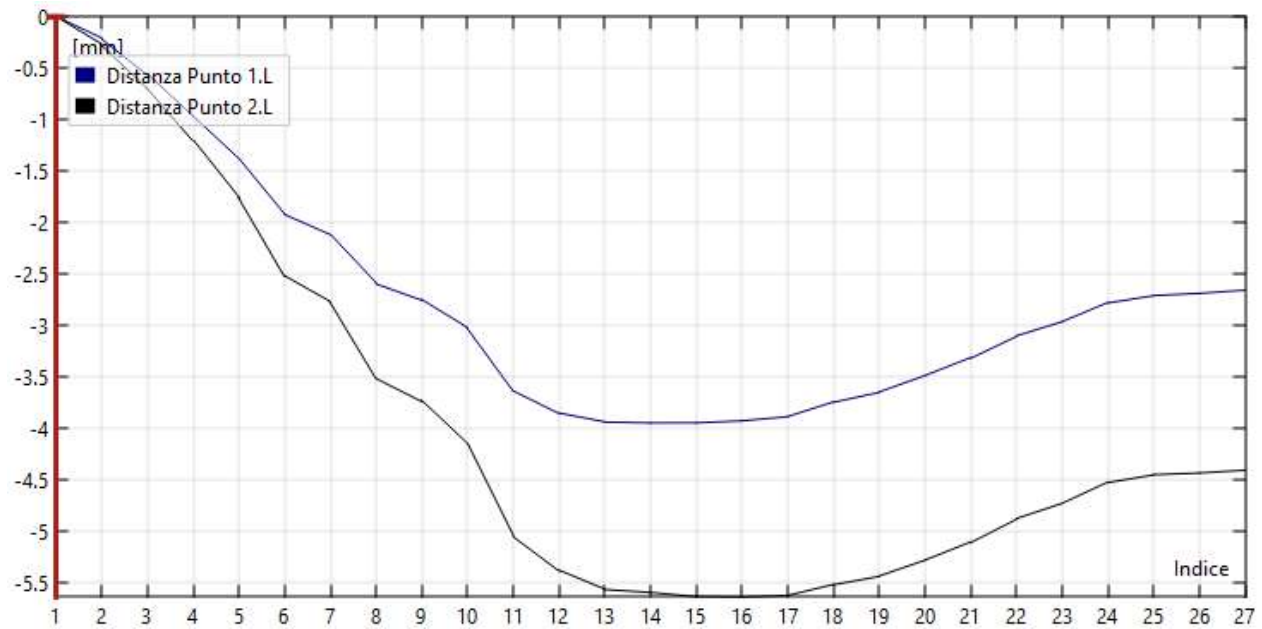


Figure 5.23: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione nel piano xy, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.



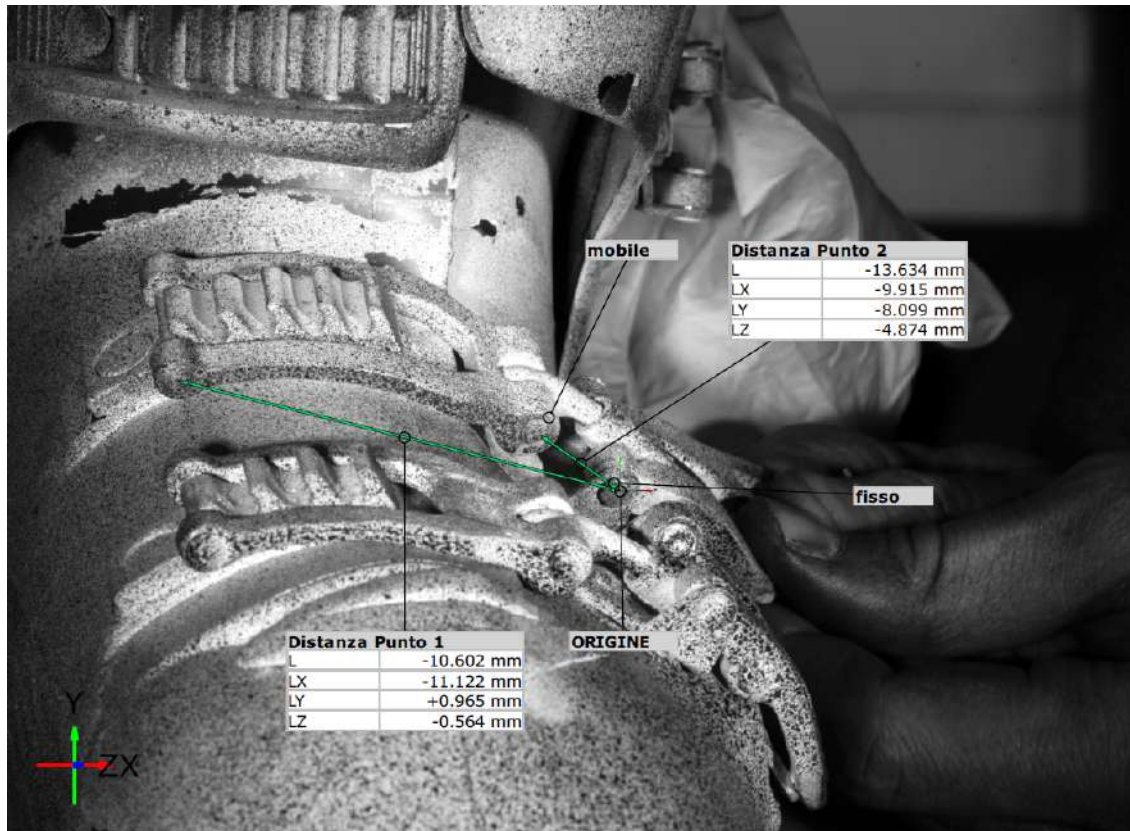


Figure 5.24: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione x,y, e z, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

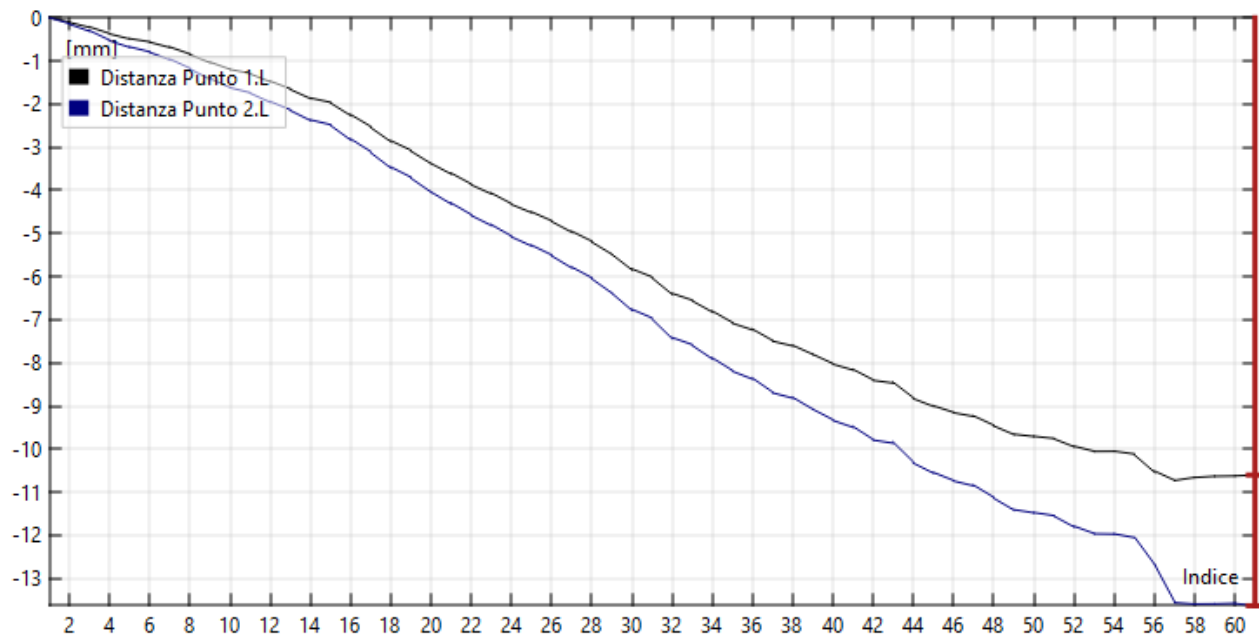


Figure 5.25: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione nel piano xy, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

In questo caso il trend cambia un po' rispetto al caso del gancio 1. Ora la presenza della scarpetta comporta globalmente degli effetti più importanti. La sequenza di chiusura è importante, avere già un gancio chiuso ha comportato un grado di vincolo in più nella struttura, e chiudere il secondo gancio richiede uno sforzo molto più intenso rispetto che la chiusura con entrambi i ganci aperti. Questo aumento dello sforzo necessario per la chiusura si verifica in maniera nettamente più marcata nella configurazione con gamba e scarpetta inserite. Con uno sforzo richiesto maggiore ci si aspetta degli spostamenti maggiori.

Salta subito all'occhio dai grafici delle distanze relative in figura [5.23] e [5.25] come la classica tendenza che si era vista nel caso precedente di recupero degli spostamenti non sia più presente nel caso di presenza della scarpetta. Questo è compatibile con quanto detto prima, cioè che all'aumentare della forze che si vengono a creare all'interno dello scarpone, il recupero degli spostamenti è sempre inferiore, e si raggiunge subito una condizione di isostaticità.

Anche in questo caso il punto 1 è pressoché insensibile agli spostamenti in direzione  $y$  e in direzione  $z$ .

Tuttavia, in questo caso si vede un comportamento molto particolare del perno fisso sul quale è costruito il sistema di riferimento. Infatti, se guardiamo l'immagine [5.20] e il suo istogramma, si vede come questo punto subisca un grande spostamento. La stessa cosa, ma con una minore intensità, è visibile nello spostamento in  $y$  [A.17]. Questo comportamento è presente sia nella configurazione senza la scarpetta che nella configurazione con la scarpetta, ma molto più marcatamente nella seconda. Questo comportamento sarà giustificato nella prossima sezione dove si analizza lo spostamento di Von Mises, e dove si verificherà che il punto che subisce la deformazione maggiore è proprio in corrispondenza di quel perno.

## 5.3.2.3 Fianco

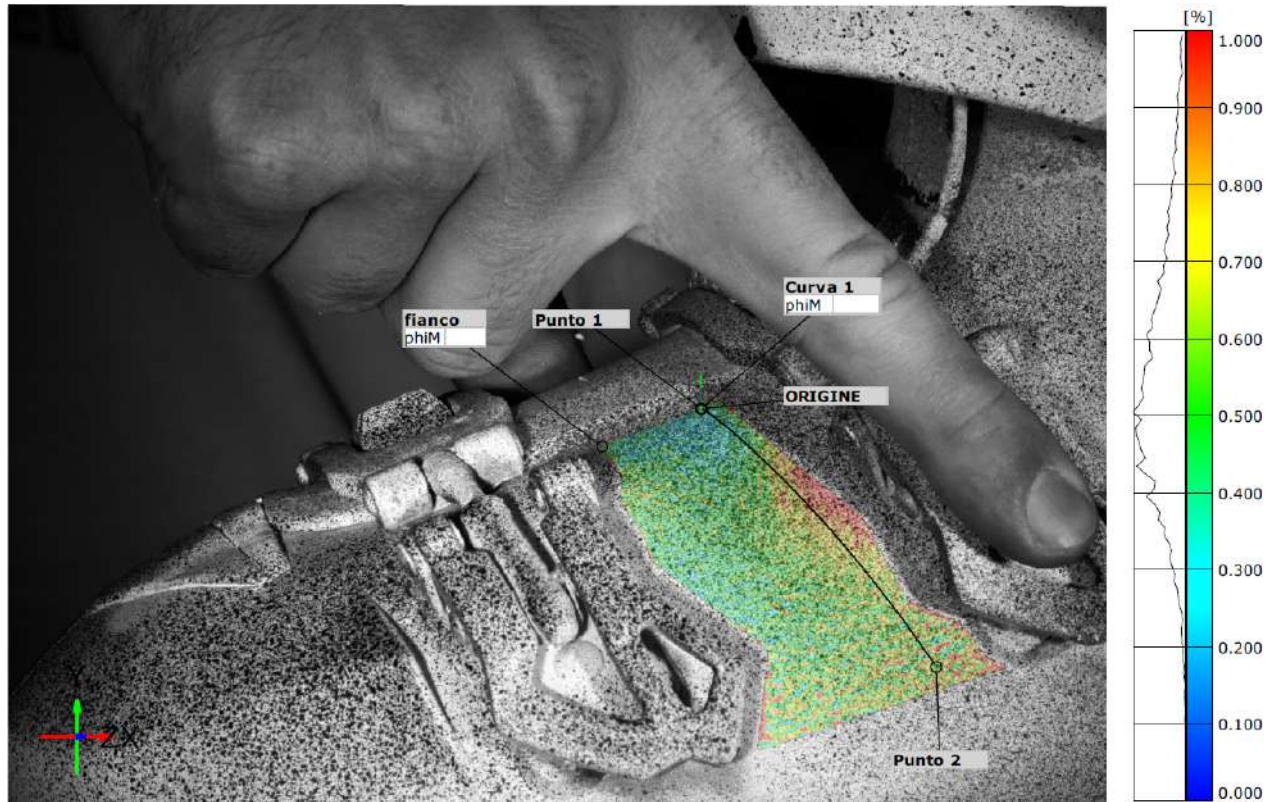


Figure 5.26: Deformazione di Von Mises sul fianco dello scarpone, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

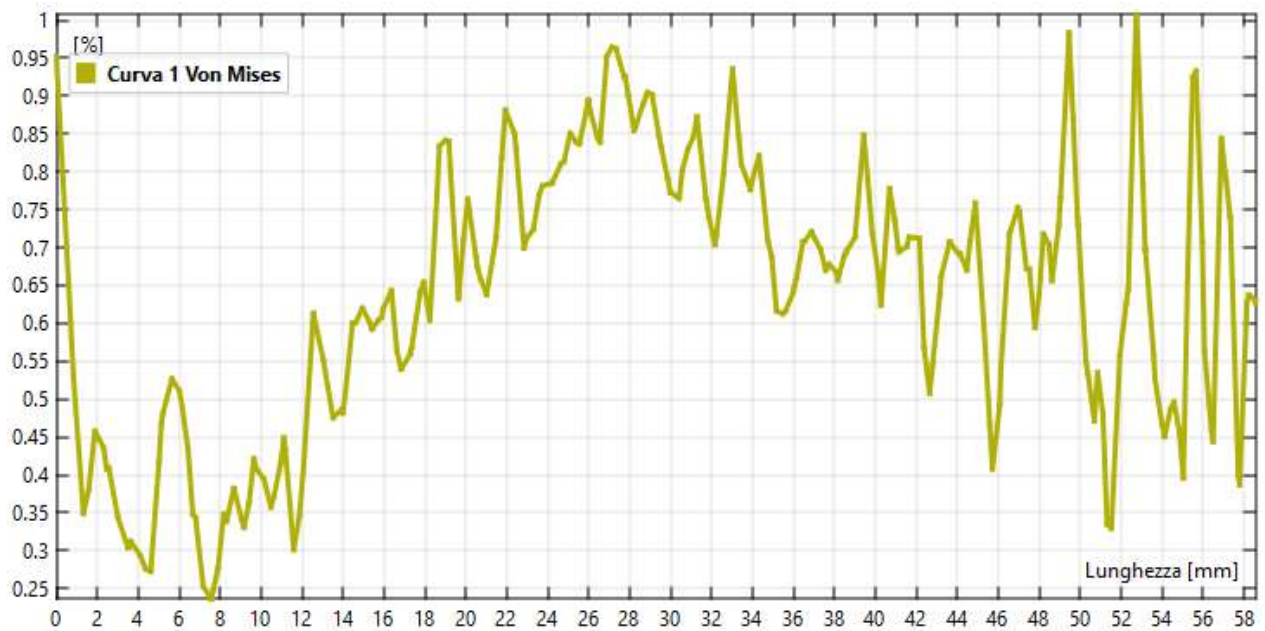


Figure 5.27: Grafico della Variazione della deformazione di Von Mises lungo una curva che passa per la zona più sollecitata nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

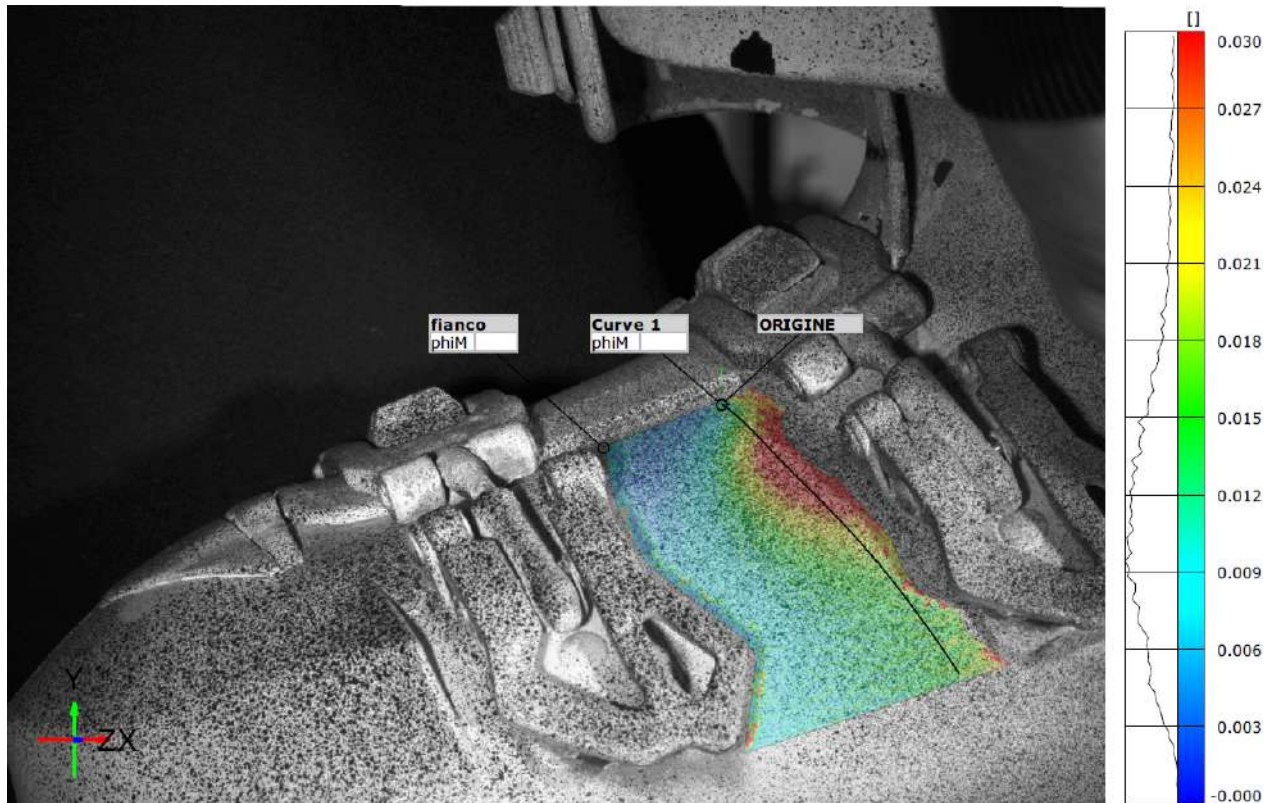


Figure 5.28: Deformazione di Von Mises sul fianco dello scarpone, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

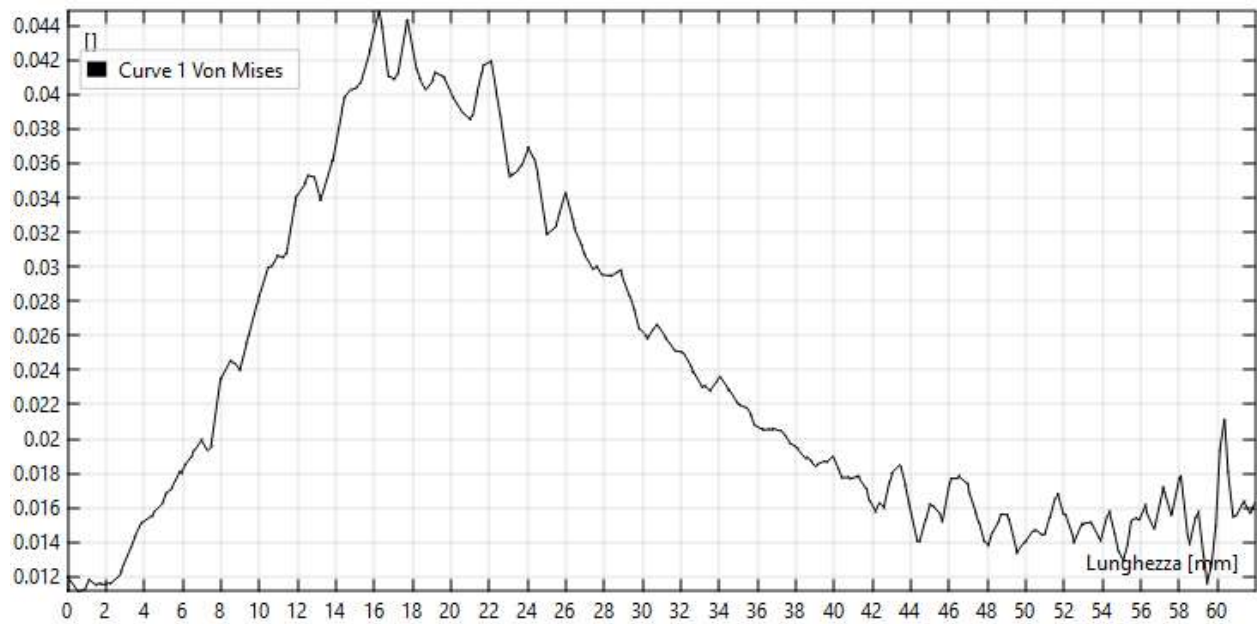


Figure 5.29: Grafico della Variazione della deformazione di Von Mises lungo una curva che passa per la zona più sollecitata nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

La deformazione di Von Mises si è calcolata su tutto il fianco, ma viste le particolarità viste negli spostamenti del gancio 2 si decise di analizzare lo stato di deformazione ponendo maggiore attenzione alla zona circostante quest'ultimo gancio.

In questo caso la valutazione dello sforzo si è fatta soltanto nello stadio finale. si ricorda che l'acquisizione è stata fatta compiendo l'intera sequenza di chiusura di entrambi i ganci, e in tutti gli stadi analizzati si è confermata la tendenza secondo la quale le deformazioni in prossimità del gancio 1 fossero ininfluenti rispetto a quelle presenti sul gancio 2. Inoltre, analizzare lo stadio finale consente di verificare lo stato di deformazione residuo a scarpone chiuso, e confrontarlo con quello ottenuto dal FEM.

Dallo studio dei ganci, si è visto come il gancio 2 veda un aumento degli spostamenti, dovuto ad un aumento degli sforzi richiesti per la chiusura. La deformazione di Von Mises conferma pienamente quanto visto in precedenza, il gancio 2 vede un picco di deformazione rispetto al gancio 1. Inoltre, questo picco è proprio in corrispondenza del perno fisso, e vede un andamento delle linee di forza concentriche, di intensità decrescente nell'allontanarsi radialmente dal picco.

La configurazione senza scarpetta vede un picco intorno all'1% di deformazione, mentre la presenza di gamba e scarpetta portano questo picco al 3%. L'intensificazione data dalla scarpetta è molto importante.

L'acquisizione dello scarpone senza scarpetta è risultata essere molto più rumorosa. Trattandosi di valori di deformazione più piccoli è comprensibile che il rumore di misura sia maggiore. Inoltre, la zona in corrispondenza del picco di deformazione è contornata da un'ombra che peggiora ulteriormente il riconoscimento della superficie. Tuttavia, il trend generale segue lo stesso andamento del comportamento della seconda configurazione, e si può dire con certezza che il picco si trova nella stessa posizione.

### 5.3.3 Commento dei risultati

Queste analisi permettono di avere tutti gli strumenti per riprodurre sul FEM la chiusura dei ganci dello scarpone. Conosciamo molto dettagliatamente lo spostamento e le distanze relative dei punti di entrambi i ganci dello scafo.

Inoltre, conoscere lo stato di deformazione residua a chiusura effettuata, consentirà di avere una conferma della corretta riproduzione dello stato di deformazione che deve avere lo scafo prima di essere tirato durante il *Flex Test*.

Il confronto tra le due configurazioni permette di concludere che la differenza, seppur poca, è presente ed è bene tenerne conto.

Inoltre, avere confrontato le due forme, ed avere identificato gli aspetti comuni, permette di dare forza all'analisi effettuata. Seppur la correlazione di immagini digitale abbia la sicurezza di rifarsi ad una prova sperimentale, trattando quindi dei dati empirici, effettuare un'analisi DIC su dei componenti così complessi potrebbe comportare importanti errori di valutazione nell'impostazione del problema. Avere una conferma che quanto fatto abbia una validità sperimentale è senz'altro un valore aggiunto del lavoro svolto.

---

## 5.4 FEM

Il passaggio successivo consiste nel riprodurre la cinematica di chiusura dei ganci sul FEM.

Questa operazione si articola in due fasi. Inizialmente, si considera una sotto struttura dello scafo, e successivamente si estende quanto fatto su tutto lo scafo. Ciò è stato fatto per semplificare il carico computazionale. Realizzare la chiusura dello scarpone con la vera e propria cinematica dei ganci è un intervento che tiene conto di molti fattori complessi, che richiedono di essere studiati approfonditamente.

I file CAD dei ganci sono stati forniti dall'azienda. L'operazione di montaggio dei ganci sullo scafo è stata fatta tramite il software CAD Solidworks. Quindi, si inserisce lo scafo nel modello FEM e si imposta la simulazione.

### 5.4.1 Geometria semplificata

Prima di realizzare la simulazione completa si è deciso di procedere con delle ipotesi semplificative, che di volta in volta saranno sostituite con le condizioni reali. Non è possibile eseguire il confronto tra la prova sperimentale analizzata con la DIC, e il FEM senza una simulazione che arrivi a convergenza.

#### 5.4.1.1 Impostazione del modello

Di seguito viene descritta l'impostazione della simulazione, che è stata realizzata in *Static Structural*, quindi con metodo implicito.

La prima semplificazione riguarda il materiale. Nonostante sia stata realizzata la caratterizzazione del materiale iperelastico, si è preferito iniziare con un semplice materiale lineare elastico, e verificare che la convergenza sia assicurata.

In questo primo modello si è utilizzata soltanto una porzione di scafo che comprende un solo gancio.



Figure 5.30: Geometria semplificata utilizzato per la prima simulazione FEM.

Il gancio è composto da:

- rastrelliera;

- ponte;
- perno della micrometrica;
- micrometrica;
- leva;
- case in acciaio.

Ognuno di questi componenti è considerato come un corpo rigido, e questi corpi rigidi sono collegati tra di loro, e alla geometria dello scafo, tramite dei vincoli.

La ghiera e il case in acciaio sono stati vincolati con un incastro allo scafo fig. [5.32] e [5.31].

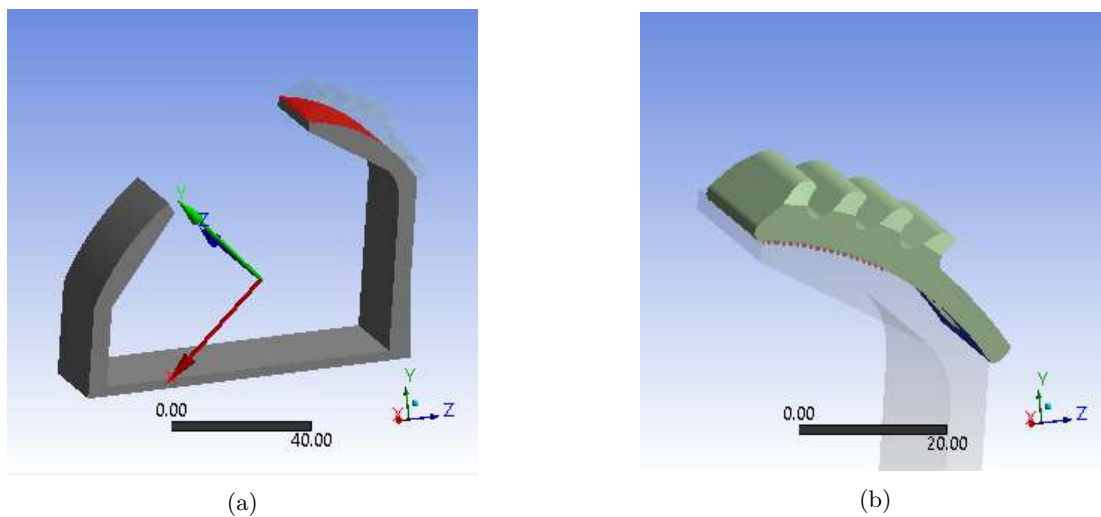


Figure 5.31: In figura si vede il vincolo di incastro che è stato applicato alla rastrelliera per tenerla vincolato allo scafo.

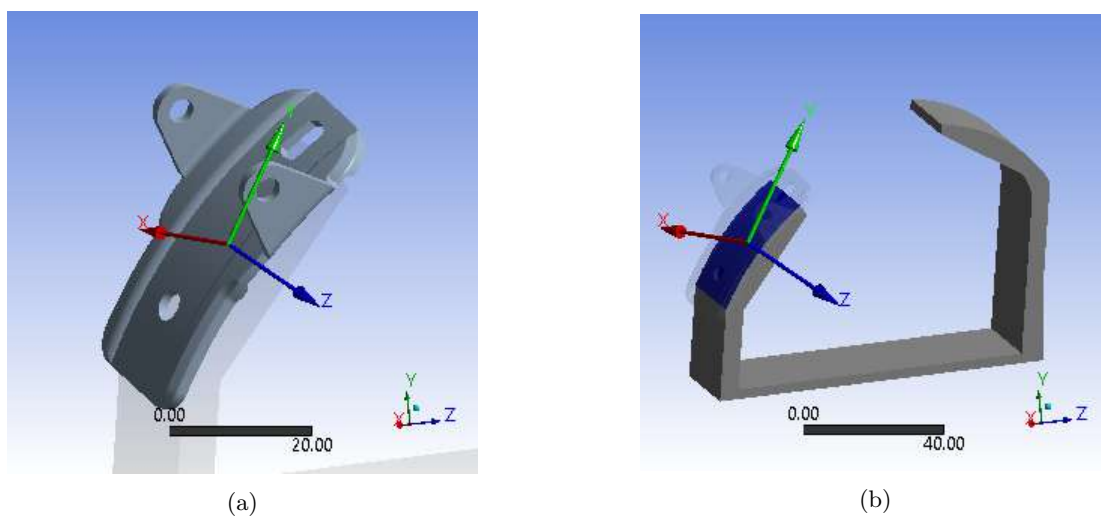


Figure 5.32: In figura si vede il vincolo di incastro che è stato applicato case in acciaio per tenerlo vincolato allo scafo.

Inoltre, sono stati aggiunte delle cerniere nei punti di giunzione degli altri corpi, tali che permettessero i naturali gradi di libertà del gancio.

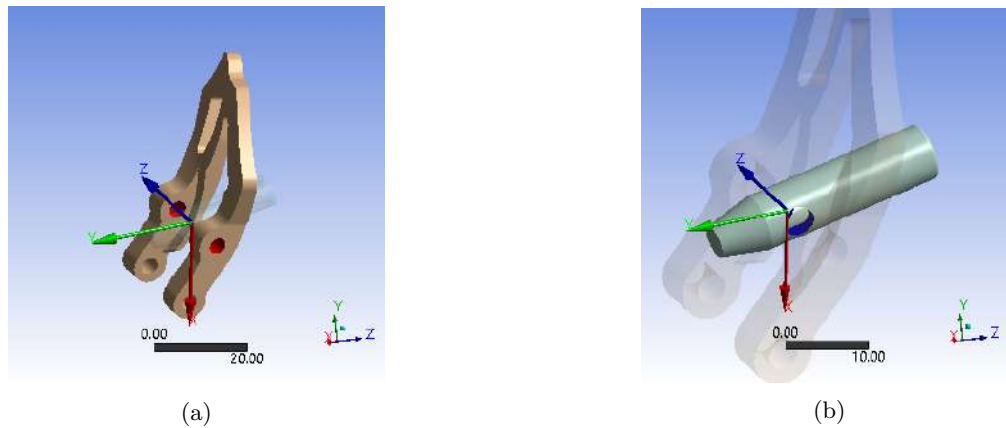


Figure 5.33: Cuscinetto tra la leva e la micrometrica.

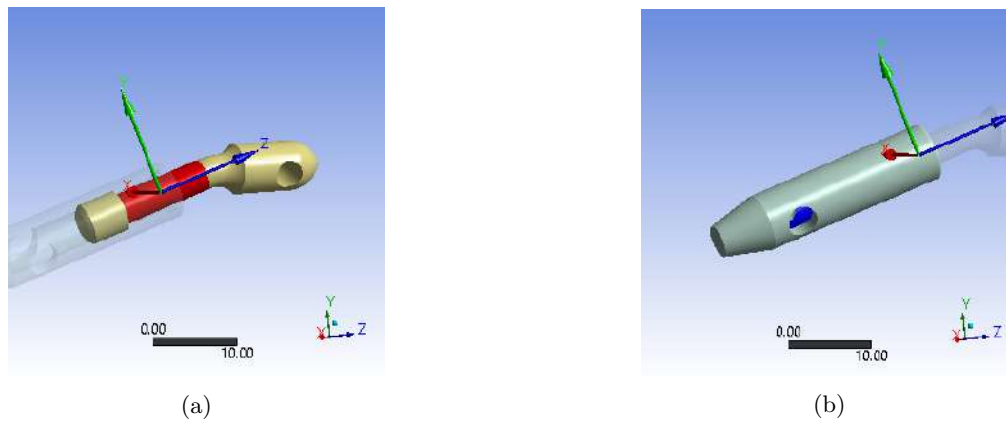


Figure 5.34: Cuscinetto tra la leva e la micrometrica.

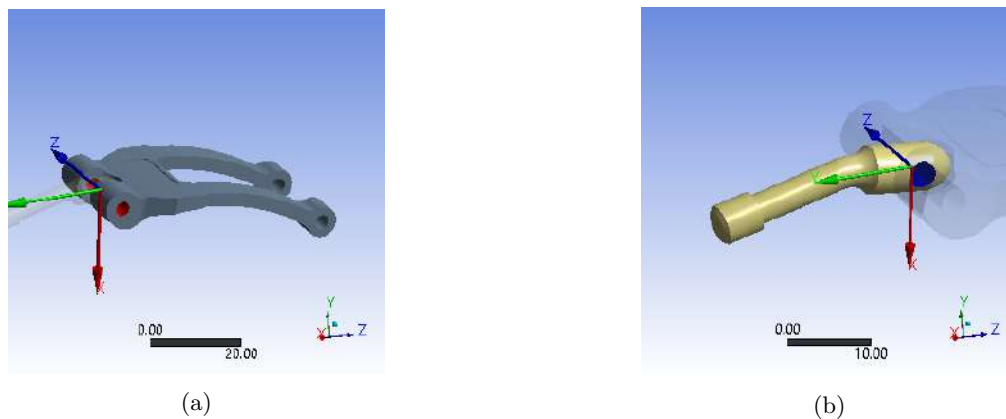


Figure 5.35: Cuscinetto tra la il ponte e il perno della micrometrica.



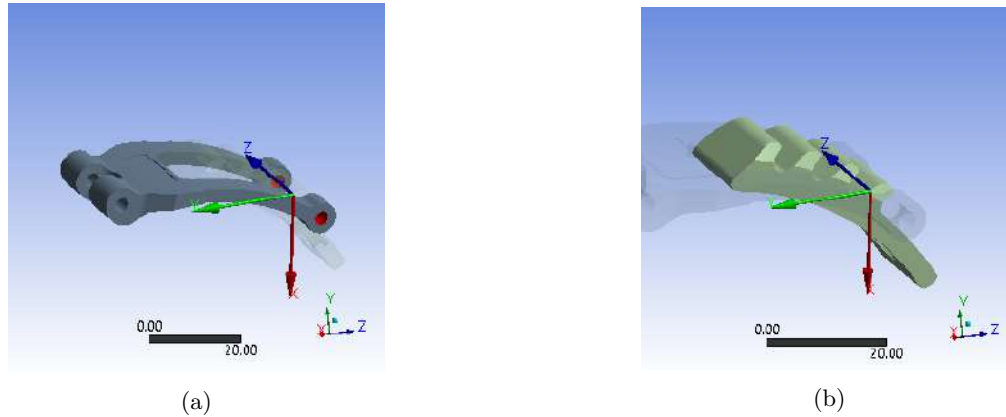


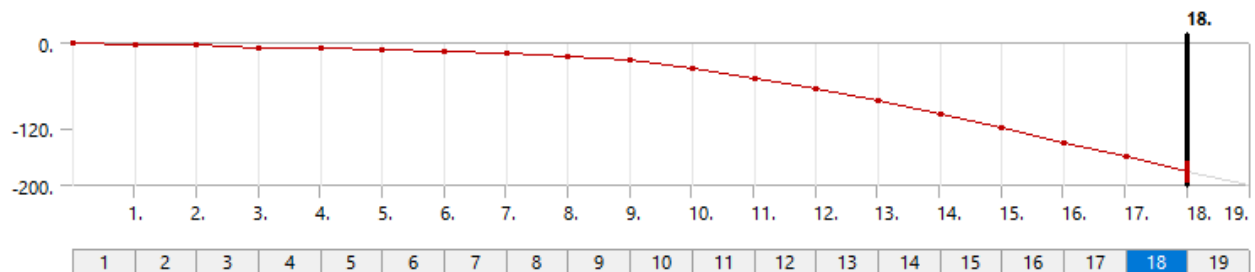
Figure 5.36: Cuscinetto tra la il ponte e la ghiera.

È stata applicata una rotazione nel perno di giunzione tra la leva e il case in acciaio. Inoltre si è inserito un vincolo di supporto fisso alla base dello scarpone.

Per monitorare con precisione la simulazione si è suddivisa l'analisi in *load steps*. Ogni *load step* è stato poi suddiviso in *substeps*. Utilizzare i *load steps* permette di suddividere la soluzione in check-point, e riprenderla di volta in volta dal punto in cui ci si è fermati, senza ripetere la simulazione da capo.

La risoluzione inizialmente ha dato problemi di convergenza. dunque verificando dalle informazioni del solutore il diagramma *Force Convergence* e il *Solver Output*, si è potuto adattare ad ogni *load step* il numero di *substeps* sufficiente per assicurare la convergenza.

Per la chiusura completa del gancio è richiesta una rotazione di 200 gradi. I primi gradi sono quelli che hanno comportato una maggiore complicazione per il risolutore. Infatti, come si può vedere dal grafico [5.37], i primi 30 gradi hanno richiesto 10 loadstep per essere risolti, mentre per i successivi 170 gradi ne sono bastati solamente 9.

Figure 5.37: Grafico che mostra tutti i *loadstep* necessari per effettuare una rotazione di 200 gradi.

Si è dimostrato che questo sistema può andare a convergenza. Inoltre, controllando la deformazione totale si vede come si ripropone il comportamento visto anche dai dati sperimentali della DIC. Il perno fisso è la parte che maggiormente subisce lo spostamento. Ciò è traducibile con il fatto che il materiale polimerico sottostante questo perno, sia quello che subisce la maggiore deformazione. Invece il perno 1, quello più a sinistra, subisce uno spostamento inferiore.

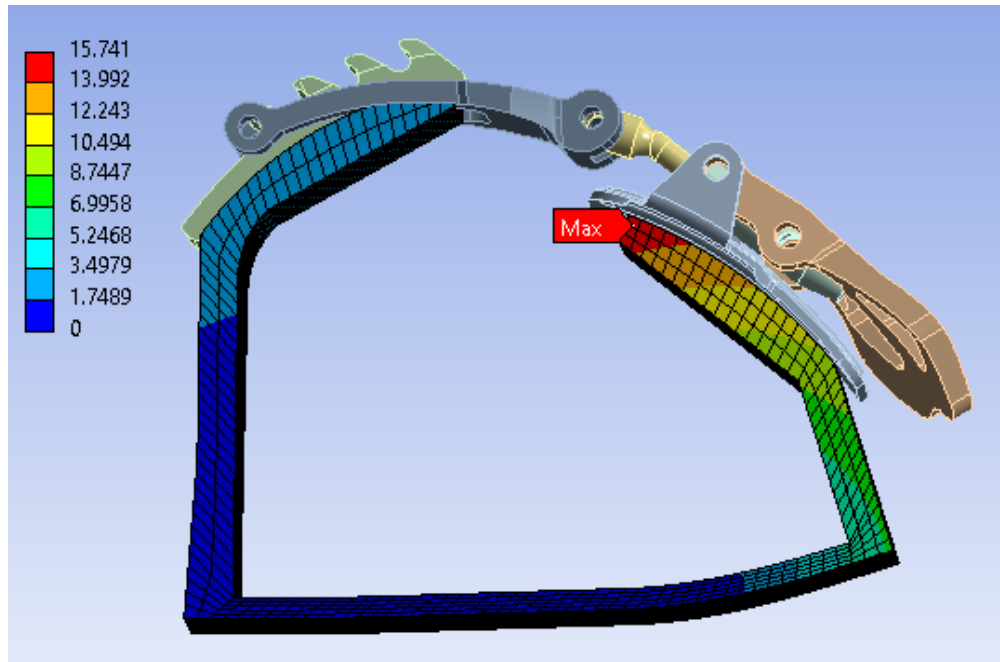


Figure 5.38: Deformazione equivalente.

## 5.4.2 Scafo completo

Dopo aver verificato la convergenza della soluzione sulla geometria semplificata, si può passare all'intero scafo con attaccati entrambi i ganci.

L'impostazione della simulazione è uguale a quella fatta per la geometria semplificata.

Si è mantenuta l'ipotesi semplificativa del materiale lineare elastico, e il meccanismo di entrambi i ganci è stato definito con gli stessi vincoli.

In questo caso si specifica come non si siano considerati i contatti tra i due lembi dello scafo. Si tratta di un contatto complesso che sarà studiato in un secondo momento, quando il funzionamento del meccanismo gancio sarà verificato.

A differenza del caso precedente, si è reso necessario effettuare un *sizing* della mesh in alcune zone che sono risultate critiche per la convergenza. Per sistemare la mesh si è realizzata un'analisi del residuo di Newton-Raphson reiterandola per tre volte, per individuare le zone che richiedessero un ridimensionamento della mesh. Il risultato finale della mesh è visibile in figura [5.40]. In particolare si è affinata la mesh sui due fianchi dello scafo, e sulle porzioni di scafo che fanno da alloggiamento per il case in acciaio fig.[5.39].

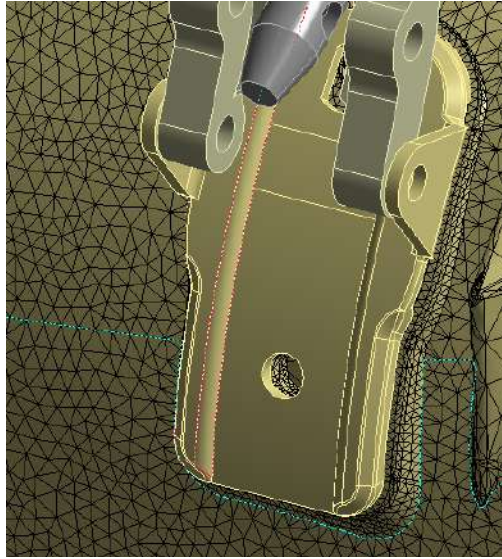


Figure 5.39: Mesh alloggiamenti ganci.

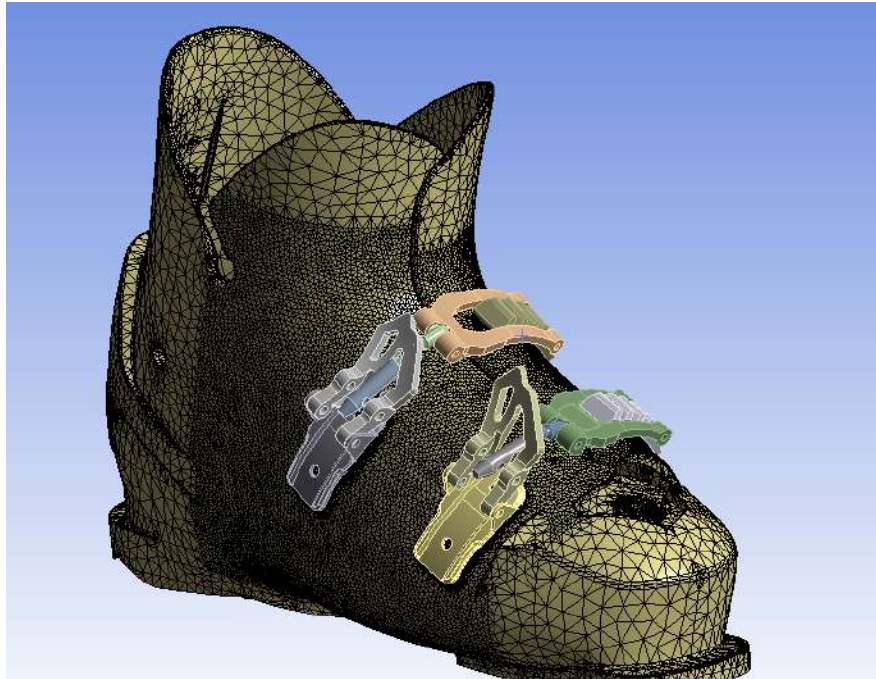


Figure 5.40: Mesh dello scafo.

Il numero totale di nodi della mesh risultante è pari a 503.126.

I supporti fissi sono stati posizionati sulla punta e sul tacco dello scarpone.

L'*Analysis Setting* è stato gestito allo stesso modo del caso precedente. Si è suddivisa l'applicazione del carico in *load steps* i relativi *substeps* vengono adattati di volta in volta per assicurare la convergenza, monitorando le informazioni del risolutore.

Si è suddivisa l'applicazione del carico in 15 *load steps* per il primo gancio e altri 15 per il secondo gancio.

In figura 5.41 è mostrato il grafico dell'applicazione della rotazione del gancio. Come si vede, sono stati realizzati solo i primi 3 *load steps*, già il quarto ha dato problemi di convergenza. Giocando con i *substeps* si

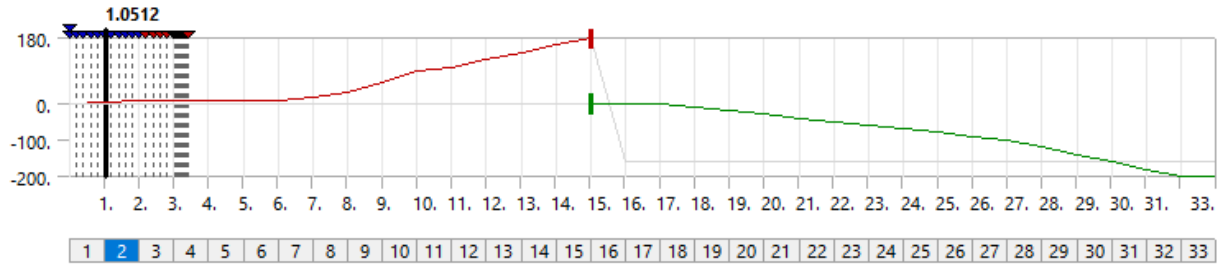


Figure 5.41: Mesh dello scafo.

garantirà la convergenza del quarto *load steps* e si reitererà il procedimento per tutti e 30 i *load steps*.

La soluzione di ogni stadio richiede molto tempo, soprattutto nei primi *load step*. Al momento della stesura di questo elaborato si sono risolti soltanto i primi 3 *load step*, dunque le conclusioni relative alle soluzioni del FEM dello scafo sono rimandate ad una successiva trattazione.



## Chapter 6

# Conclusioni

Lo studio realizzato si pone l'obiettivo di ottimizzare il modello FEM di uno scarpone da sci per la simulazione del *Flex Test*.

Il fine è di valutare numericamente le prestazioni di uno scarpone da sci ottenuto per il 90% da riciclo di scarponi a fine vita.

Lo scarpone è un oggetto complesso, composto di superfici libere, e di moltissime componenti.

Le criticità venute alla luce da un primo approccio di simulazione meritano uno studio approfondito.

Gli approcci utilizzati per le ottimizzazioni dei vari stadi hanno sfruttato tecnologie innovative, ne consegue che prima di approcciare i problemi sperimentalmente è stata necessaria una ricerca bibliografica sulle tematiche di seguito:

- caratterizzazione meccanica di un materiale iperelastico, e relativo modello numerico;
- scannerizzazione 3D;
- correlazione di immagini digitali (DIC).

La ricerca bibliografica ha permesso di approfondire le conoscenze necessarie per un utilizzo cosciente delle tecniche, e per servirsene nel campo della ricerca scientifica.

La conferma di quanto sopra dichiarato, è validata dalle evidenze sperimentali conseguite.

La prima difficoltà consiste nella definizione all'interno del codice FEM del materiale dello scarpone.

È stata realizzata una blend polimerica ottenuta dalla miscelazione tra il materiale dello scafo e il materiale dello scarpone, e si è compiuta la caratterizzazione completa del materiale iperelastico risultante. Si è definito il modello numerico da implementare nel FEM ed è stato validato attraverso la simulazione numerica.

Parallelamente, era necessario ottenere il file CAD della scarpetta dello scarpone da sci. Effettuare un rilievo su tale componente e riprodurlo con modellazione 3D non è possibile, in quanto non si hanno informazioni sulle distribuzioni degli spessori. Pertanto, si è deciso di applicare la tecnica della scannerizzazione 3D. Questa ci ha permesso di avere un file formato STEP della scarpetta vecchia, e di utilizzare le conoscenze acquisite per progettare il nuovo design della scarpetta.

Infine, per avere una simulazione FEM funzionante dell'intero scarpone, è necessario realizzare la chiusura dei ganci dello scafo compatibilmente con le condizioni reali. Si richiede che lo scarpone prima di essere posto sotto sforzo, abbia uno stato di deformazione nell'area dello scafo che sia compatibile. Per implementare la chiusura dei ganci dello scafo ci si è serviti della tecnica di correlazione di immagini digitali. Questa ci ha permesso di conoscere approfonditamente, nelle 3 dimensioni, la cinematica dei ganci durante la chiusura.

Inoltre, la valutazione dello stato di deformazione sul fianco dello scarpone, a ganci chiusi, consente di verificare che il modello FEM rappresenti la situazione reale.

Le prime simulazioni realizzate a monte di questo studio hanno evidenziato importanti correlazioni, che consentono di validare la qualità dei risultati ottenuti con la DIC

Prima di questo studio si aveva un modello FEM approssimativo, con dei risultati che si discostavano sensibilmente dalle condizioni reali. La ricerca proposta ha permesso di avere una simulazione che si avvale della corretta legge del materiale; di implementare la scarpetta nella simulazione, e quindi avere una situazione il più reale possibile della distribuzione delle forze; e avere uno scarpone con il reale stato di deformazione sullo scafo prima di essere tirato per il *Flex Test*.

Implementare queste modifiche al modello FEM della simulazione del *Flex Test* consente di superare i limiti emersi dalla prima analisi FEM sullo scarpone. Validare il modello dello scarpone a fine vita, che permette di avere un riscontro con le prove sperimentali, permetterà di progettare lo scarpone riciclato in modo che abbia le caratteristiche meccaniche richieste.

Si tratta comunque di una simulazione molto complessa, che può essere affinata sotto molti aspetti. Lo studio relativo a questo problema continuerà, e gli sviluppi futuri verteranno principalmente su:

- completare la simulazione numerica sullo scafo e verificare la compatibilità dello stato di deformazione, a chiusura compiuta, con i risultati della DIC;
- realizzare anche sul gambetto, lo stesso studio realizzato sullo scafo;
- studiare approfonditamente i contatti tra i lembi dello scafo in fase di chiusura.

Oltre al miglioramento del modello FEM, un importante risultato di questo studio consistere nell'essere riusciti a adattare, ed applicare, la tecnica di correlazione di immagini digitali ad un oggetto complesso come uno scarpone da sci, con dei buoni risultati. Come già detto, gli scarponi sono realizzati da geometrie complesse, e comprendono molti componenti, e meccanismi, che talvolta possono essere difficili da modellare. Poter utilizzare uno strumento come la DIC per lo studio di questi meccanismi, porta un grande vantaggio su qualsiasi studio futuro che verrà realizzato sugli scarponi.

# Appendix A

## Appendice A

Nella seguente appendice sono riportati degli spostamenti in direzione y e direzione z del gancio 1 e del gancio 2.

### A.1 Gancio1

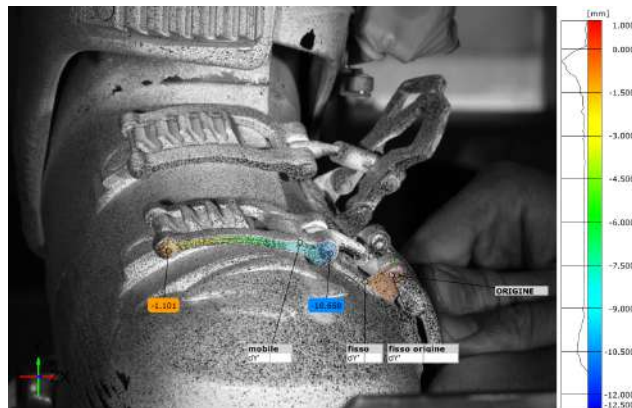


Figure A.1: Spostamento in y del gancio 1 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

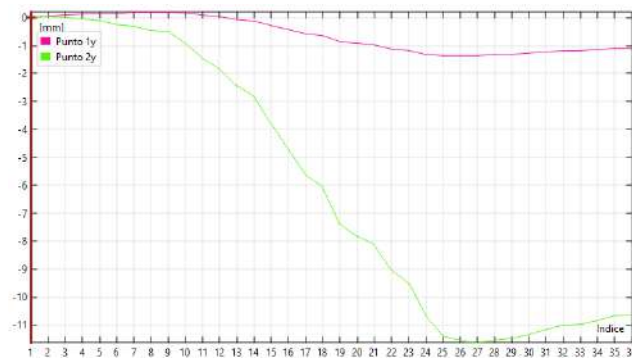


Figure A.2: Grafico dello spostamento in y del gancio 1 in tutti gli stadi, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.



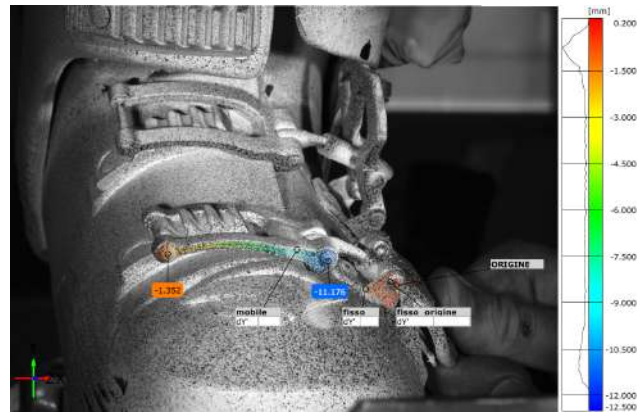


Figure A.3: Spostamento in y del gancio 1 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.



Figure A.4: Grafico dello spostamento in y del gancio 1 in tutti gli stadi nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

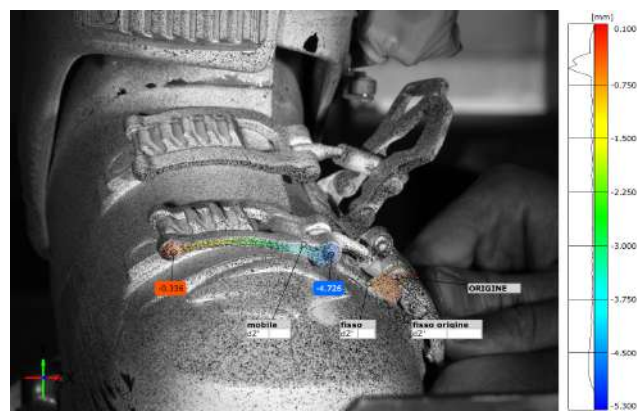


Figure A.5: Spostamento in z del gancio 1 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

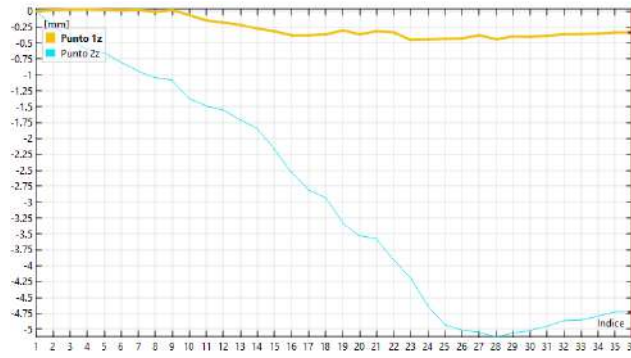


Figure A.6: Grafico dello spostamento in z del gancio 1 in tutti gli stadi, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

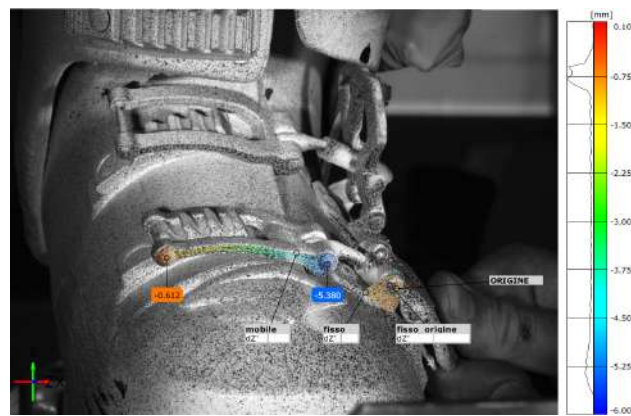


Figure A.7: Spostamento in z del gancio 1 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

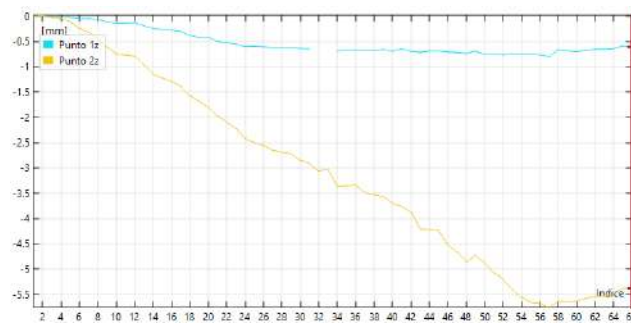


Figure A.8: Grafico dello spostamento in z del gancio 1 in tutti gli stadi nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

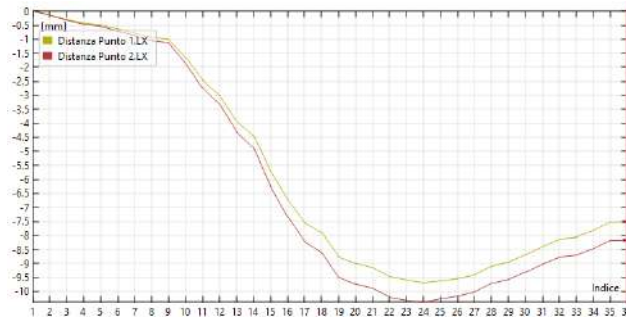


Figure A.9: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione x, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

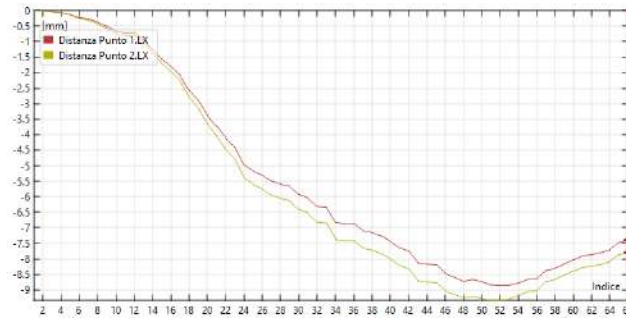


Figure A.10: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione x, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

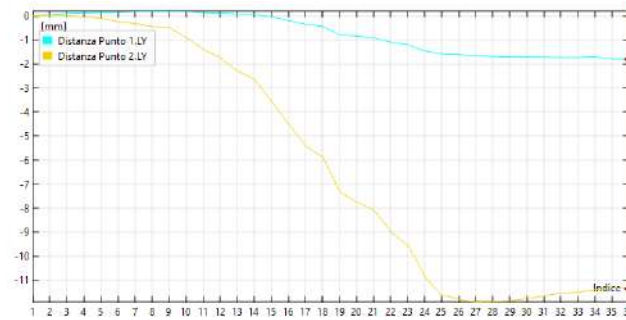


Figure A.11: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione y, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

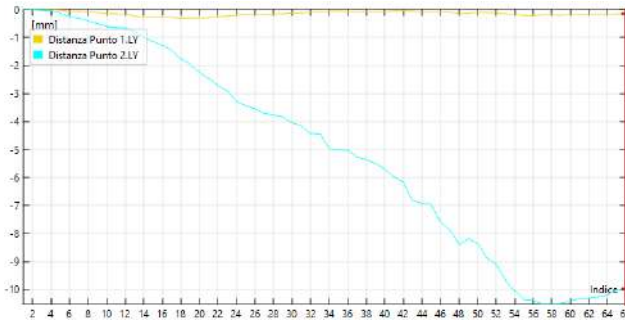


Figure A.12: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione y, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

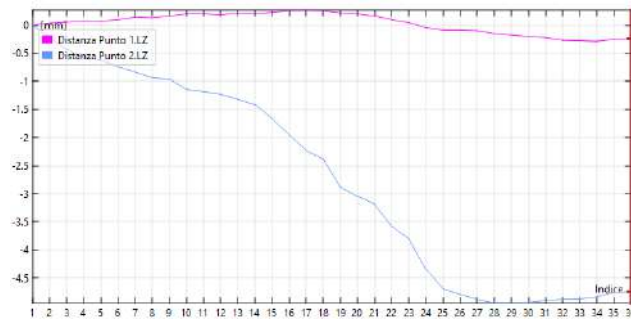


Figure A.13: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione z, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

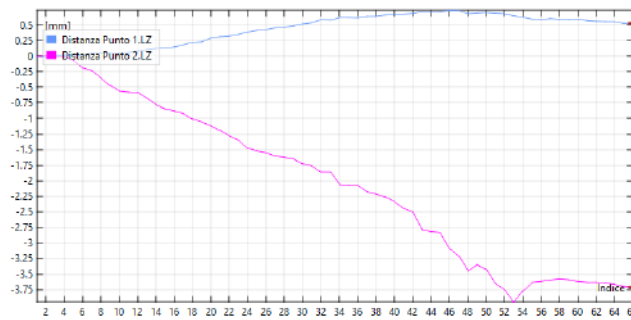


Figure A.14: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 1 nello stadio finale in direzione z, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

## A.2 Gancio2

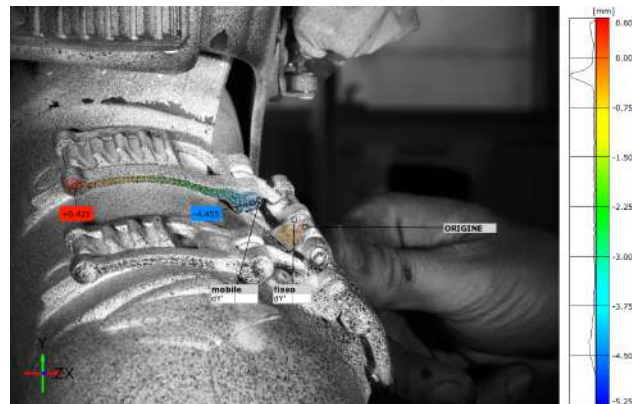


Figure A.15: Spostamento in y del gancio 2 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

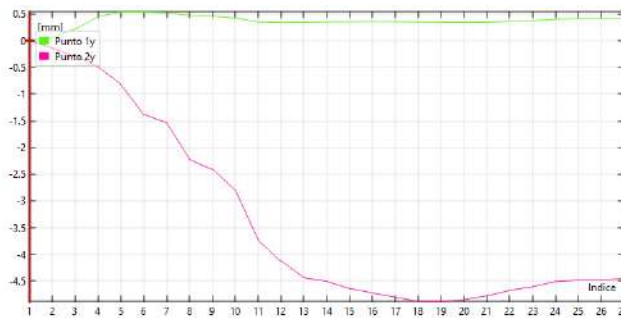


Figure A.16: Grafico dello spostamento in y del gancio 2 in tutti gli stadi, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

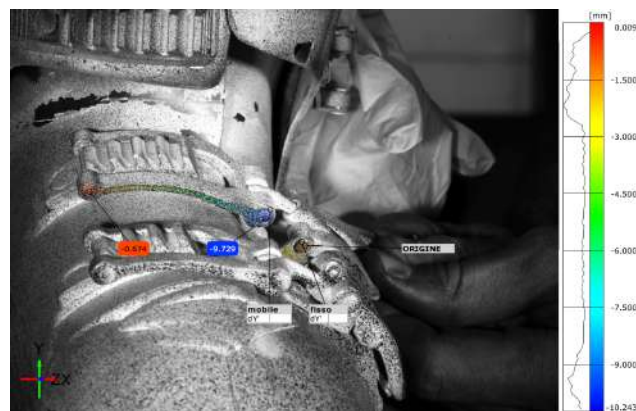


Figure A.17: Spostamento in y del gancio 2 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

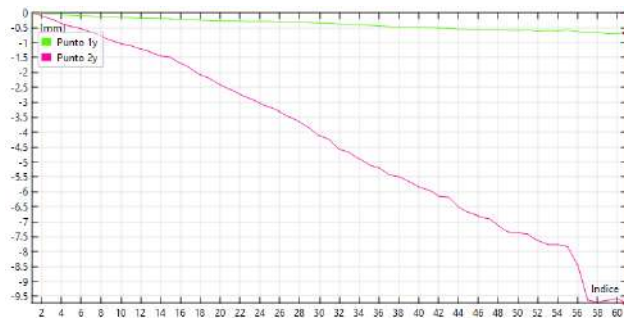


Figure A.18: Grafico dello spostamento in y del gancio 2 in tutti gli stadi nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

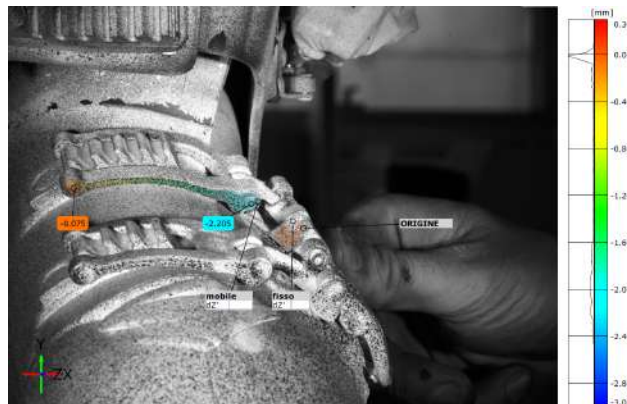


Figure A.19: Spostamento in z del gancio 2 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone privo di scarpetta e gamba.

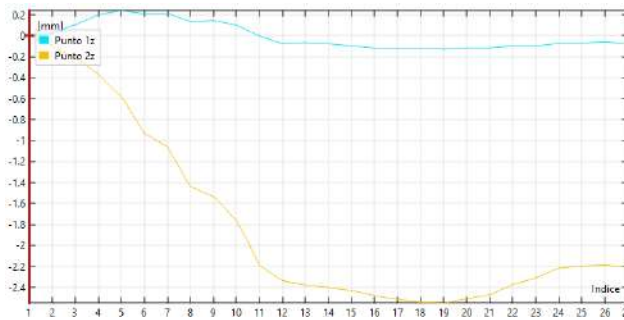


Figure A.20: Grafico dello spostamento in z del gancio 2 in tutti gli stadi, nella configurazione dello scarpone privo di scarpetta e gamba.

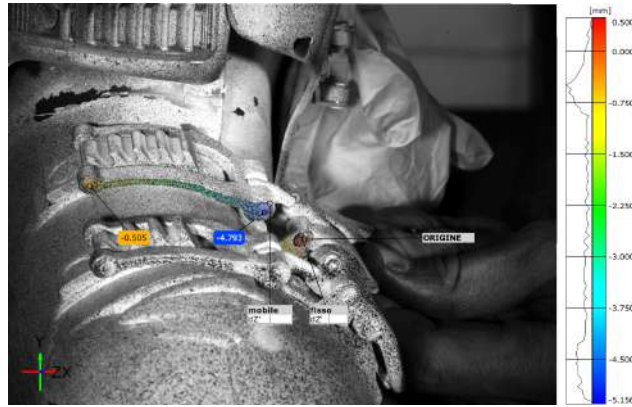


Figure A.21: Spostamento in z del gancio 2 nello stadio finale, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

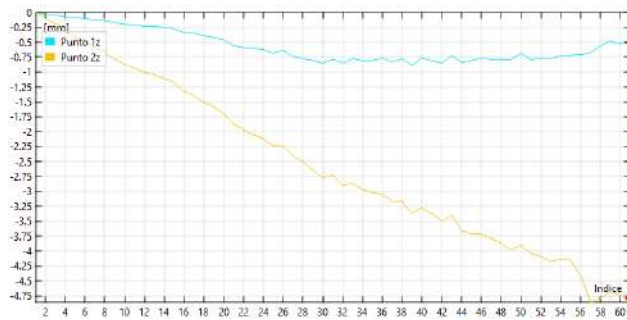


Figure A.22: Grafico dello spostamento in z del gancio 2 in tutti gli stadi nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

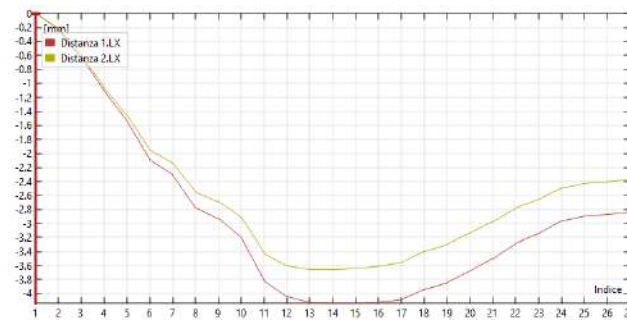


Figure A.23: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione x, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

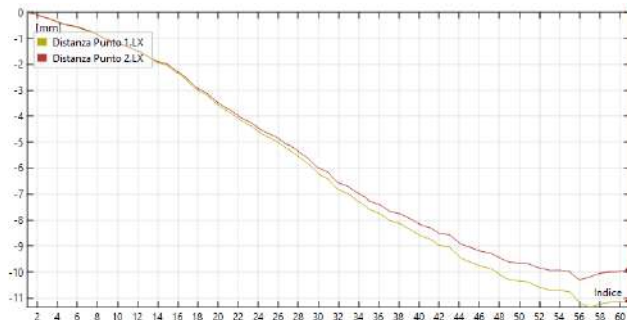


Figure A.24: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione x, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

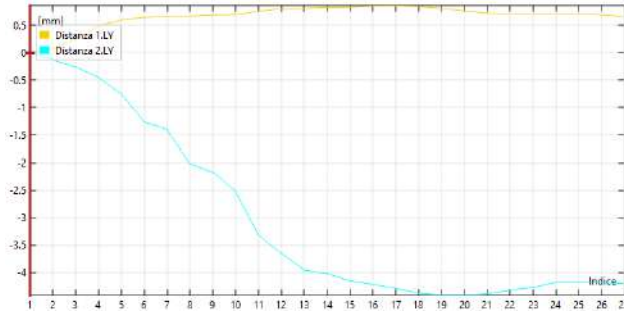


Figure A.25: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione y, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

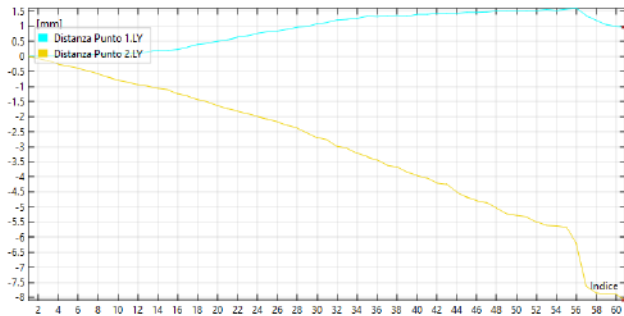


Figure A.26: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione y, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.

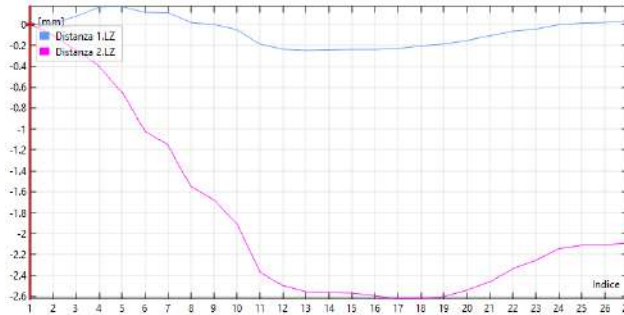


Figure A.27: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione z, nella configurazione dello scarpone sprovvisto di scarpetta e gamba.

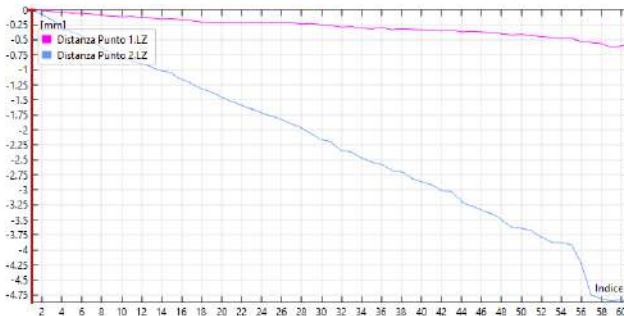


Figure A.28: Variazione della lunghezza relativa tra i due perni della parte mobile del gancio 2 nello stadio finale in direzione z, nella configurazione dello scarpone con la scarpetta e la gamba.





## Appendix B

# Appendice B

Nella seguente appendice sono riportate le tavole costruttive del supporto giroscopico per il pannello di calibrazione.

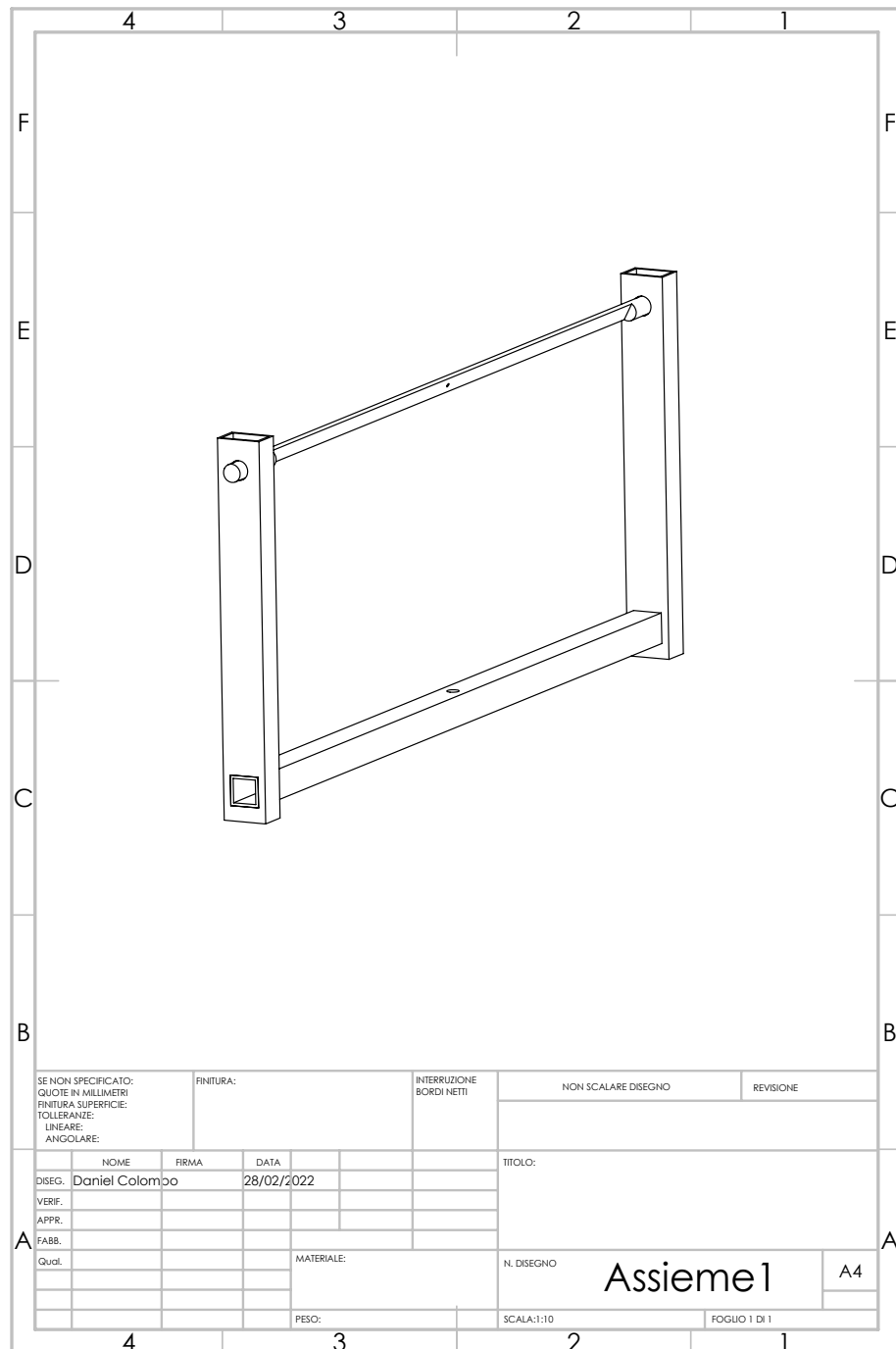


Figure B.1: Assieme.

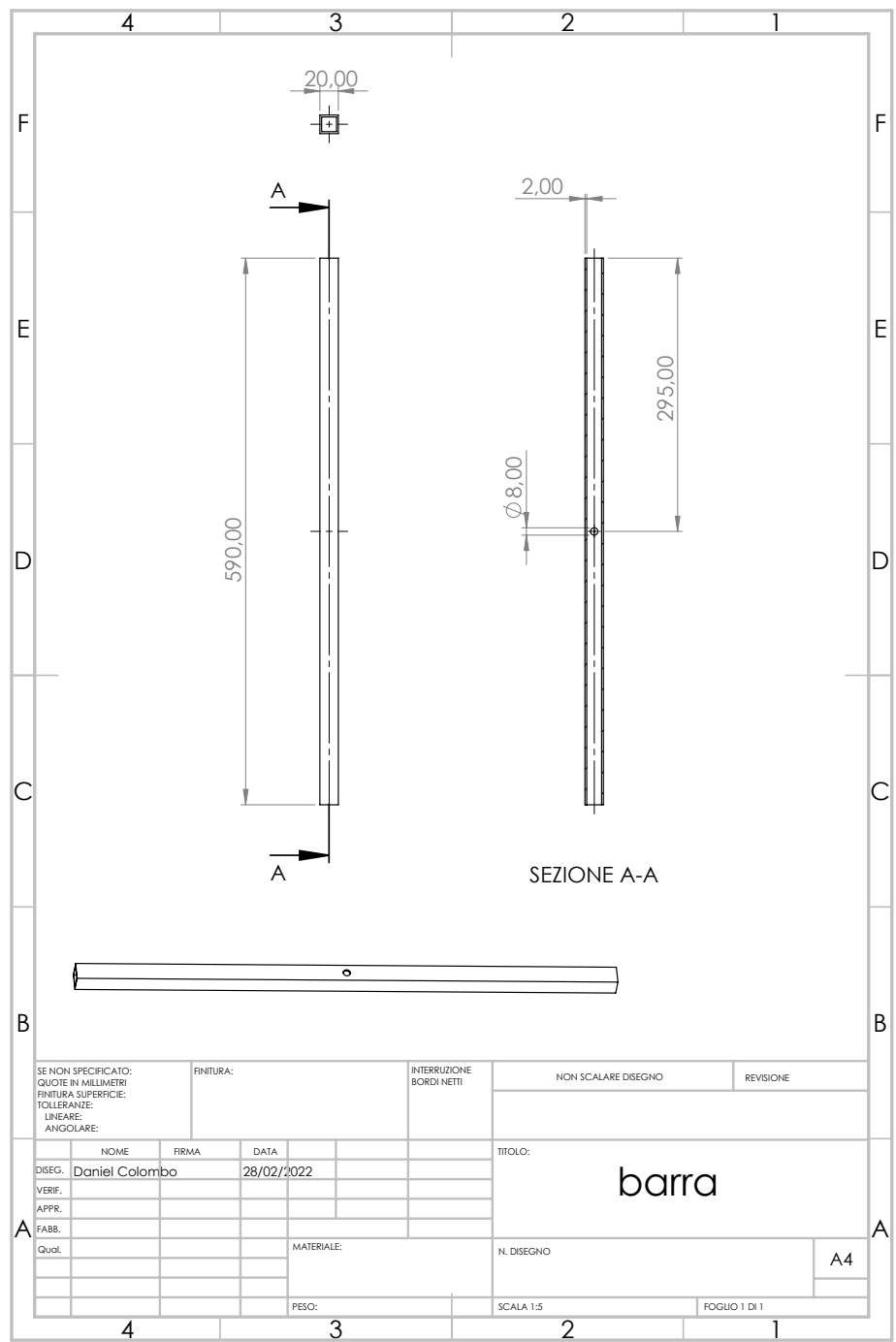


Figure B.2: Barra della base.

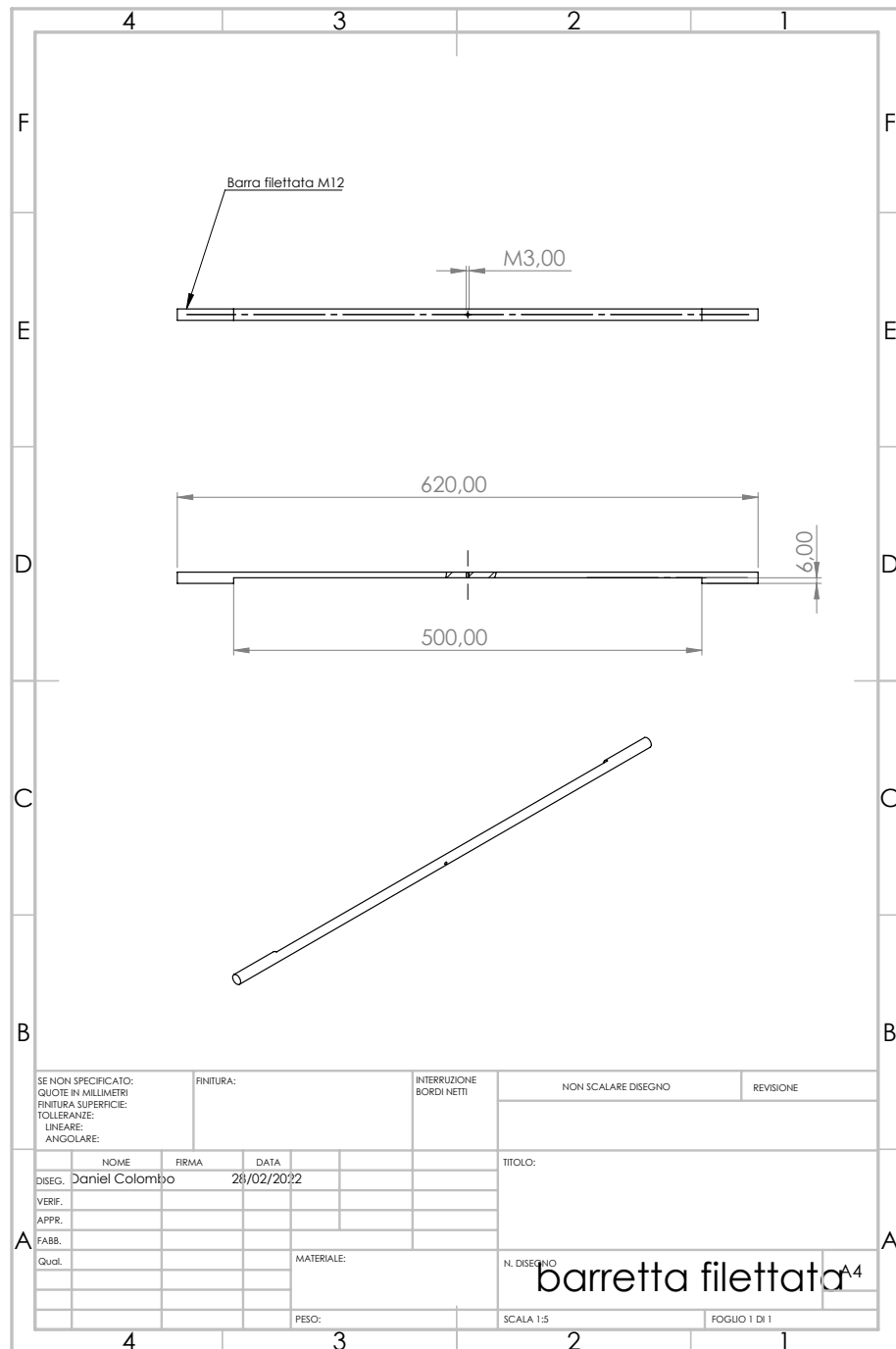


Figure B.3: Barra filettata.

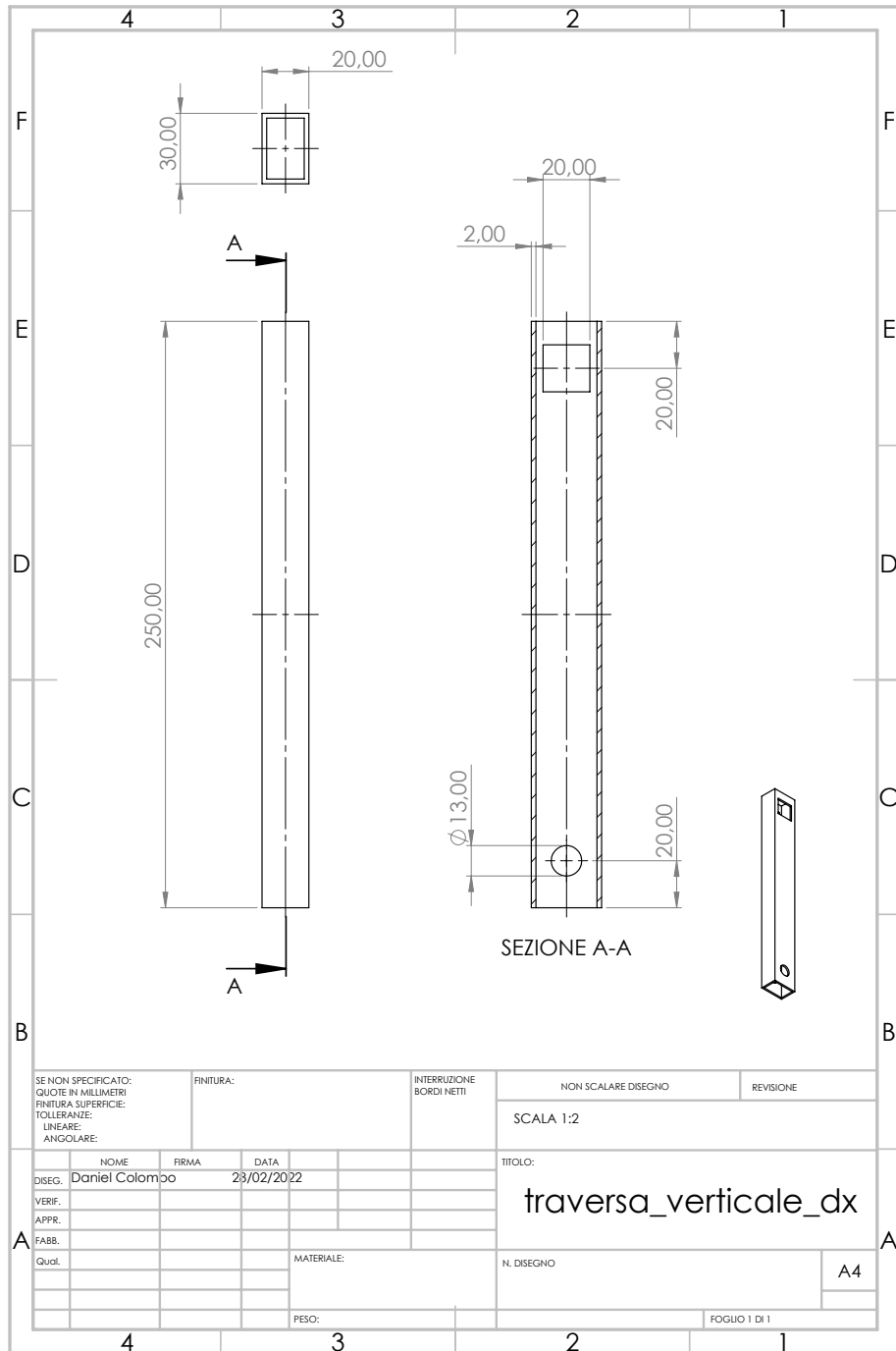


Figure B.4: Traversa verticale destra.

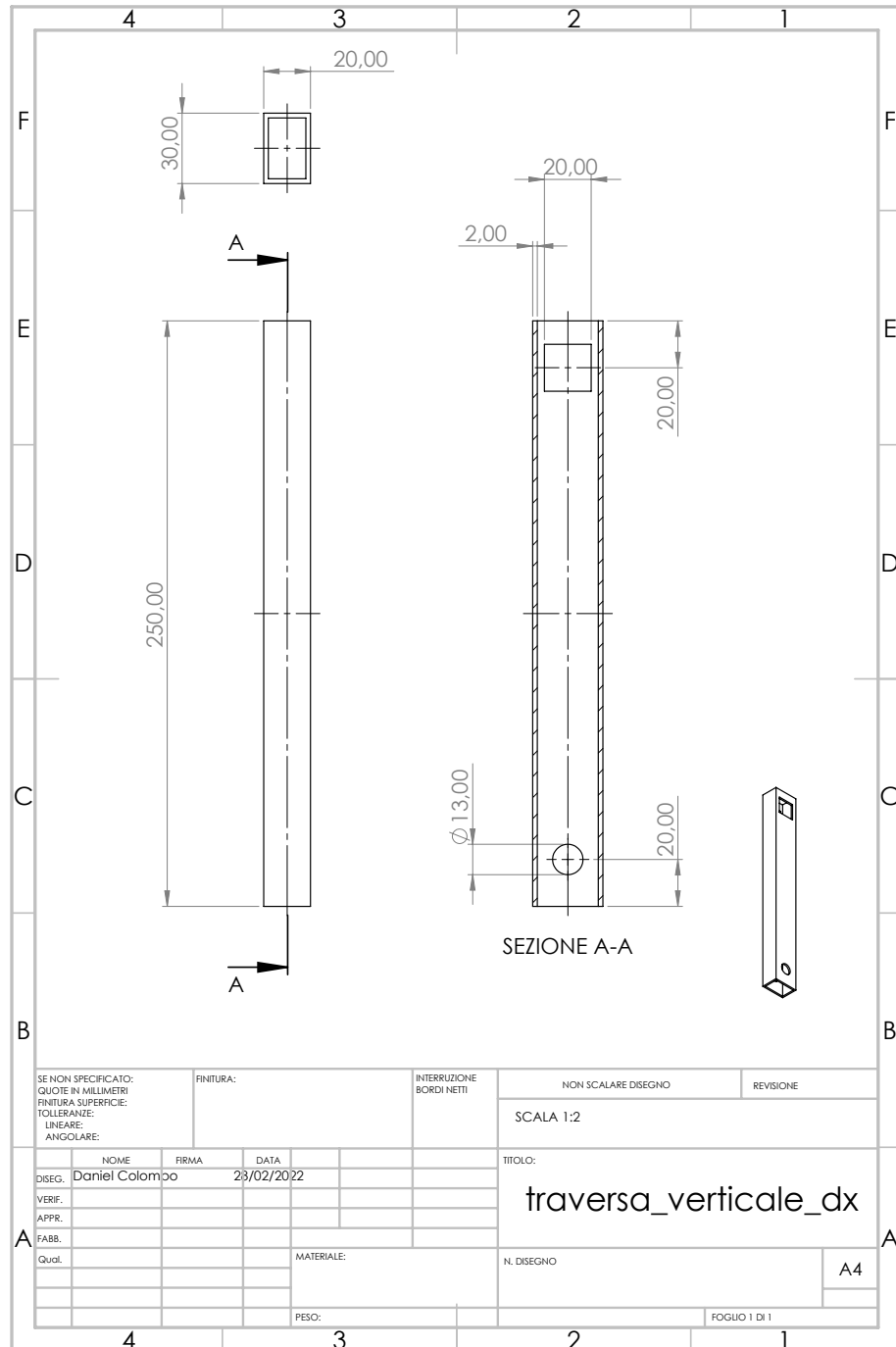


Figure B.5: Traversa verticale sinistra.

# Bibliography

- [1] Alessandro Speranzoni. “Dall’analisi bio-meccanica di uno sciatore tramite sensori inerziali, allo studio delle deformazioni di componenti di uno scarpone da sci mediante FEM e DIC”. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA, 2019-2020.
- [2] Francesca Palmitessa. *Come Sostenere l’Economia Circolare quando Viaggi – La Guida di Ecobnb*. URL: <https://ecobnb.it/blog/2019/11/economia-circolare-turismo/>.
- [3] Marco Palanca. “OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI DI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE PER L’ANALISI DI SEGMENTI OSSEI TRAMITE CORRELAZIONE DI IMMAGINI DIGITALI”. ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA, 2012-2013.
- [4] GOM mbH. *ARAMIS user manual, v6.1 and higher*. Germany: Gom, 2009.
- [5] Anna Adrover i Gili. “Evaluation of 3D optical motion and deformation analysis using GOM Aramis 6M Essential Line”. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 2018.
- [6] M Jon Turner et al. “Stiffness and deflection analysis of complex structures”. In: *journal of the Aeronautical Sciences* 23.9 (1956), pp. 805–823.
- [7] Carlos A Felippa. “A historical outline of matrix structural analysis: a play in three acts”. In: *Computers & Structures* 79.14 (2001), pp. 1313–1324.
- [8] Andrea Bacchetto. *Introduzione al metodo degli elementi finiti e alla modellazione FEM*. 2006.
- [9] Richard Courant. “Courant-Friedrichs-Lewy condition”. In: (2018).
- [10] Alessandro Manna, Renato Sante Olivito, and Paolo Lonetti. “Problemi di delaminazione in ambito dinamico nei laminati multistrato in materiale composito”. PhD thesis. 2011.
- [11] Marcel Escudier and Tony Atkins. *A Dictionary of Mechanical Engineering (2 ed.)* Oxford University Press, 2019.
- [12] Joseph R Davis. *Tensile testing*. ASM international, 2004.
- [13] Andrzej Ambroziak and Paweł Kłosowski. “The elasto-viscoplastic Chaboche model”. In: *Task Quarterly* 10.1 (2006), pp. 49–61.
- [14] Muhsin N Hamza and Hassan M Alwan. “Hyperelastic constitutive modeling of rubber and rubber-like materials under finite strain”. In: *Eng. & Tech. Journal* 28.13 (2010).
- [15] Melvin Mooney. “A theory of large elastic deformation”. In: *Journal of applied physics* 11.9 (1940), pp. 582–592.
- [16] Claes Nellestam. “The Ski Boot Project”. In: *Diploma work* (2009).



- [17] Martino Colonna, Marco Nicotra, and Matteo Moncalero. “Materials, designs and standards used in ski-boots for alpine skiing”. In: *Sports* 1.4 (2013), pp. 78–113.
- [18] Yasushi Ito and Kazuhiro Nakahashi. “Direct surface triangulation using stereolithography (STL) data”. In: *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2000, p. 924.
- [19] G Jaco van Niekerk and Elizabeth M Ehlers. “Intelligent stereolithography file correction”. In: *Intelligent Systems in Design and Manufacturing III*. Vol. 4192. International Society for Optics and Photonics. 2000, pp. 54–62.
- [20] Michael J Pratt et al. “Introduction to ISO 10303—the STEP standard for product data exchange”. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 1.1 (2001), pp. 102–103.
- [21] Smita B Brunnermeier and Sheila A Martin. *Interoperability cost analysis of the US automotive supply chain*. DIANE Publishing, 1999.
- [22] Saeid Motavalli. “Review of reverse engineering approaches”. In: *Flexible Automation and Integrated Manufacturing 1999* (1999).
- [23] Les Piegl and Wayne Tiller. *The NURBS book*. Springer Science & Business Media, 1996.
- [24] Patrick Hofer et al. “Microclimate in ski boots—Temperature, relative humidity, and water absorption”. In: *Applied ergonomics* 45.3 (2014), pp. 515–520.
- [25] Martino Colonna et al. “Thermal behaviour of ski-boot liners: effect of materials on thermal comfort in real and simulated skiing conditions.” In: *Procedia Engineering* 72 (2014), pp. 386–391.
- [26] Martino Colonna et al. “Effect of compression on thermal comfort of ski boots”. In: *Procedia Engineering* 112 (2015), pp. 134–139.