

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Biomedica

## Tesi di Laurea Magistrale

Studio della caduta in ambito alpinistico mediante metodi numerici (FEM)



Relatori

Prof. Alessandro Scattina

Prof. Massimiliano Avalle

Candidato

Raffaele Zarra

Anno Accademico 2020/2021



# SOMMARIO

1.	Introduzione.....	5
2.	Il fenomeno, le prove sperimentali e numeriche .....	9
2.1.	La caduta in alpinismo/arrampicata .....	9
2.2.	La forza di arresto .....	11
2.3.	Il fattore di caduta .....	12
2.4.	La catena di sicurezza, tecniche e materiali. ....	14
2.5.	La corda.....	19
2.5.1.	Tipologie di corde.....	19
2.5.2.	Com'è costituita la corda: <i>modello kernmantel</i> .....	22
2.6.	Prove sperimentali.....	24
2.6.1.	I corpi in caduta .....	26
2.6.2.	Risultati delle prove sperimentali .....	29
2.6.3.	Il modulo elastico della corda ricavato mediante prove sperimentali : .....	32
2.7.	Caduta in termini numerici.....	33
2.8.	Analisi FEM .....	36
3.	Modellazione .....	38
3.1.	Modello cilindro.....	38
3.1.1.	Creazione modello.....	38
3.1.2.	Generazione della mesh.....	41
3.1.3.	Applicazione delle condizioni al contorno .....	43
3.1.4.	Accelerometro .....	46
3.2.	Modello manichino .....	47
3.2.1.	Generazione della mesh. ....	48
3.2.2.	Applicazione forze, vincoli, contatti.....	56

3.2.3. Accelerometro .....	60
4. Risultati.....	62
5. Conclusioni.....	75
Bibliografia .....	77

# 1. INTRODUZIONE

L'alpinismo è un'attività sportiva dedicata al superamento degli ostacoli durante la scalata in montagna, nella quale è necessario avere un'ottima preparazione tecnica e conoscenza dell'ambiente.

I rischi che possono presentarsi durante un'arrampicata sono sia oggettivi (frane, caduta di pietre, valanghe) sia soggettivi (poca esperienza, equipaggiamento inadeguato, valutazione errata della situazione), i quali possono portare alla caduta dell'arrampicatore. Al fine di minimizzare i rischi, sono sempre più frequenti corsi di formazione sulla *catena di assicurazione*. Essa è l'unione di tecniche di sicurezza e di attrezzature che, usati insieme, possono ridurre incidenti.

La corda è la componente principale di tale catena, la quale si comporta da "paracadute" nel caso di caduta, bloccandola. Tra le corde moderne usate in questa attività vi è la cosiddetta corda dinamica, capace di allungarsi sotto carico dinamico e quindi di *assorbire energia*, riducendo così le forze d'urto che agiscono sull'arrampicatore e sulla catena di sicurezza. Questo problema è comune anche in settori quali protezione civile, sicurezza nei cantieri, salvataggi.

Al fine di rendere sicuro ogni singolo aspetto dell'alpinismo, vi sono studi e analisi per comprendere i fenomeni coinvolti durante una caduta, per poi essere caratterizzati e verificati mediante prove sperimentali.

Ad oggi, lo studio della caduta è basato su metodi analitici, numerici e sperimentali studiando la forza esercitata dalla corda nell'istante in cui questa raggiunge la massima tensione, a causa di una caduta libera di una massa [1].

In uno studio prodotto da M. Pavier, riportato nel libro "Sports Engineering", è descritta la simulazione teorica delle cadute in arrampicata, includendo la non linearità del comportamento delle corde, al fine di prevedere il numero massimo di cadute sopportabili dalla corda fino al cedimento di essa [2]. Nel 2006 è stato esaminato in dettaglio l'utilizzo delle corde, le tecniche di fabbricazione e i materiali utilizzati e l'effetto dell'usura sulle prestazioni delle corde [3].

In campo numerico sono state trovate soluzioni capaci di simulare l'andamento della forza d'arresto tramite analisi al computer, per poi essere comparate alle prove sperimentali. Le analisi numeriche avevano un limite di base, sostituendo il grave in caduta a un sistema puntiforme il quale scambiava forze. È evidente una lieve discrepanza tra la forza massima misurata e quella calcolata, questo

potrebbe dipendere dalla qualità della corrispondenza tra l'apparato sperimentale e il modello matematico complessivo.

In ambito biomedico il metodo degli elementi finiti è ampiamente diffuso, principalmente per analisi strutturali delle protesi [4]. A differenza di queste prove che testano materiali ed elementi i quali verranno impiantati all'interno del corpo umano, lo scopo di questo studio è ricreare numericamente ciò che succede al corpo durante la caduta. [3]

Se volessimo considerare il corpo umano, esso sarebbe estremamente complicato nella sua struttura. Questo presenta componenti misti tra solidi e fluidi, con caratteristiche meccaniche diverse per ogni organo, sia gli sforzi sul corpo stesso che sul movimento in caduta. Lo studio in questione può essere una base per degli aggiornamenti importanti, cominciando con la comparazione del movimento realistico del corpo simulato per poi essere ottimizzato aggiungendo caratteristiche complesse, quali la caratterizzazione degli organi interni e le conseguenze scaturite dall'urto ricevuto durante la caduta.

Uno studio mediante FEM in combinazione all'analisi istomorfometrica è stato messo a punto da un gruppo di ricercatori della University of Kragujevac trovando una relazione tra la struttura dell'osso corticale attraverso lo scheletro facciale con lo stress occlusale, analizzando come una differenza di stress induce un'eterogeneità regionale nella morfologia osteonale [5].

Un altro studio è riportato da un gruppo di ingegneri della University of Science and Technology Beijing, in cui vi è l'analisi viscoelastica del cranio umano mediante elementi finiti. Attraverso l'uso di software quali ANSYS e PATRAN, è stato ricreato un modello bio-fedele del cranio pur essendo anatomicamente complesso [6]. Ancora, uno studio sperimentale e annessa analisi agli elementi finiti è riportato dalla Nihon University School of Dentistry, ponendo il quesito sulle influenze biomeccaniche riguardante la postura della testa sulla colonna cervicale [7].

In ambito di interesse alpinistico, in modo diretto o indiretto, ci sono stati ottimi risultati sia numericamente sia mediante studi in ambito FEM.

Vi è in corso uno studio in ambito militare sul comportamento meccanico dei giubbotti antiproiettili usando ceramiche basate su scaglie di pesce ganoide e armadillo [8]. Questo genere di giubbotto biomimetico è stato analizzato, studiando le varie disposizioni delle protezioni superficiali mediante FEM e la loro resistenza agli impatti multipli. Il riscontro è positivo, migliorando la resistenza dei giubbotto antiproiettili, DPI nell'ambito militare.

Un altro studio riporta la progettazione di sistemi di anticaduta con linee di ancoraggio flessibili orizzontali, legato principalmente alla sicurezza delle persone che lavorano ad altezze elevate e devono

avere libertà di movimento orizzontale. Il modello è stato ricreato in ambiente FEM con due componenti di linee di ancoraggio e una massa rigida in caduta, studiando la forza d'arresto di quest'ultima [9]. Nel Texas, una squadra di ingegneri meccanici ha modellato mediante tomografia computerizzata (CT) e ricreato un modello agli elementi finiti (modello biomeccanico della testa) per lo studio di DPI, precisamente per la protezione della testa, quali occhiali, casco, respiratori [10].

Utilizzando i software per l'analisi a elementi finiti si può quindi superare l'ostacolo che si trova nelle simulazioni numeriche del grave puntiforme, avendo a disposizione una geometria simile al caso reale. Mediante questa analisi si possono ottimizzare i metodi precedenti finalizzati allo studio della forza generata dalla corda, creando un modello capace di adeguarsi a qualsiasi situazione sperimentale e modificando i parametri quali *lunghezza della corda e fattore di caduta*.

Questo approccio, se rifinito e ottimizzato, potrà essere utile nelle analisi preliminari senza effettuare voli di gravi, ma soltanto effettuando simulazioni numeriche in ambito FEM. A differenza delle prove effettuate in precedenza, ci si avvicina ancor più al caso reale.

Lo scopo della tesi è di valutare l'affidabilità di un'analisi numerica della forza esercitata dalla corda effettuata con un modello più preciso di quelli preesistenti, rapportandola alle prove sperimentali effettuate nel laboratorio del Centro Studi Materiali e Tecniche (CSMT) del Club Alpino Italiano.

In un successivo studio potranno essere testate altre tipologie di corde, modificando i parametri specifici per tale modello, o addirittura ampliare le condizioni della corda stessa, quali smorzamento e fattore di umidità il quale cambia le caratteristiche meccaniche.

Il presente documento è organizzato come segue.

Nel capitolo 2 viene introdotto il fenomeno studiato, come sono state effettuate le prove sperimentali e numeriche, le nozioni sulla catena di assicurazione, sulla corda, la forza di arresto e il fattore di caduta, concetti che costituiscono la base della tesi.

Nel capitolo 3 verranno presentati i due modelli di grave, come sono stati creati, a partire dalla geometria alla generazione della mesh all'interno dell'ambiente FEM e le condizioni al contorno.

Nel capitolo 4 sono riportate le elaborazioni in post-processing di entrambi i modelli, comparate con i risultati delle prove sperimentali.

Nel capitolo 5 è riportato il resoconto della tesi, cosa si è raggiunto, i limiti riscontrati in corso d'opera e i progressi raggiunti.

## 2. IL FENOMENO, LE PROVE SPERIMENTALI E NUMERICHE

In questo capitolo verranno esaminati gli elementi chiave per comprendere le motivazioni che hanno portato questo studio. Nel paragrafo 2.1 viene inizialmente spiegato qual è il fenomeno chiave della tesi, ovvero la caduta in arrampicata, perché è così importante e quali sono i parametri coinvolti, in particolare il ruolo della corda (dal §2.2 al §2.5), con quali prove verranno poi messi a paragone i risultati dello studio (§2.6 e §2.7) e un accenno del metodo FEM, utilizzato nel corso dello studio (§2.8).

### 2.1. LA CADUTA IN ALPINISMO/ARRAMPICATA

In arrampicata bisogna essere sicuri che le prestazioni di chi la pratica, la qualità degli strumenti e le condizioni metereologiche siano adatte per essere in sicurezza [11].

Tra i pericoli che possiamo riscontrare ci sono quelli naturali, a volte anche estremi, quali cadute di massi, temporali, valanghe, ma la principale causa di pericolo in arrampicata o nell'escursionismo in generale è la *caduta*.

Nell'escursionismo e nel boulder la caduta è problema generalmente di minore gravità (per *boulder* si intende l'arrampicata su strutture naturali o artificiali di altezza molto contenuta, per cui l'energia in gioco è modesta e il corpo in caduta può essere assicurato mediante semplici materassi, detti *crash pad*), mentre nella *progressione verticale* è la causa principale di infortuni.

In questo studio ci concentreremo quindi sull'ultimo caso, essendo tra le tre la più complessa e sicuramente più gravosa dovuta alle sollecitazioni sul corpo dell'arrampicatore.

L'arrampicata necessita di una serie di *tecniche di assicurazione* nell'ambito della sicurezza. Infatti, se si pensa all'arrampicatore che possiede le capacità tali da salire facilmente una via, i materiali utilizzati in questo ambito avranno l'unico scopo di assicurare l'arrampicatore in una situazione di caduta, senza la quale avrebbe ritorsioni quali colpi di frusta violenti, impatto sulle rocce e quindi

lesioni gravi sul corpo. In Figura 1 è riportata l'immagine di un arrampicatore che, cadendo, viene bloccato dalla corda e dall'imbragatura.

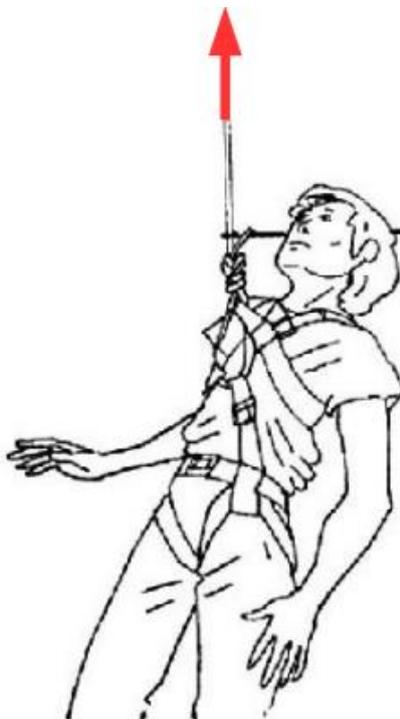


Figura 1. L'arrampicatore in fase di caduta. Oltre la corda vi sono elementi di sicurezza, uno di questi è l'imbragatura, i quali limitano la forza d'arresto, evidenziata in rosso, e le conseguenze generate sul corpo umano.

Nella pratica comune l'arrampicata coinvolge due soggetti e si svolge in due fasi distinte e successive: colui che sale per primo la via viene chiamato il primo di cordata, o capocordata, e sarà seguito dal secondo di cordata. Il primo di cordata avrà il compito di salire assicurando man mano la corda a protezioni intermedie, facendola passare in anelli vincolati a punti di assicurazione, fino ad arrivare al termine della via o di una sua sezione in cui si raggiunge un punto di sosta (Figura 2). Le protezioni intermedie hanno lo scopo di limitare l'entità della caduta (nel caso peggiore che il primo di cordata possa terminare a terra) perché il secondo di cordata dovrà trattenere il primo che sale [12]. Nell'arrampicata tradizionale, soprattutto in quei casi in cui il percorso su cui si arrampica è suddiviso in più sezioni dette lunghezze o tiri di corda, dopo che il primo è arrivato al punto di sosta (o più semplicemente sosta) e vi si è autoassicurato, il secondo sale a sua volta assicurato dal primo che sta ormai in posizione superiore: perciò il secondo di cordata ha sempre la corda che arriva dall'alto e quindi non potrà mai sperimentare una vera e propria caduta. Si dice infatti che il primo di cordata *recupera* il secondo che quindi rimane sempre in condizioni di sostanziale sicurezza (e infatti non ci si occupa mai del problema della caduta del secondo che non dà criticità).

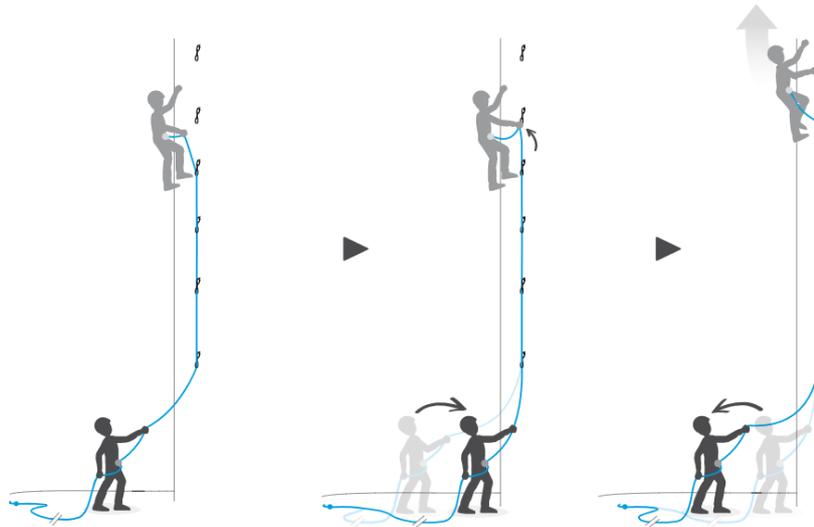


Figura 2. Il capocordata in fase di collegamento delle assicurazioni intermedie. è assicurato dal secondo in cordata il quale regola la quantità di corda da dare.

## 2.2. LA FORZA DI ARRESTO

Durante la caduta viene generata una forza la quale cresce fino a un massimo (Figura 3) denominato *forza di arresto*, ossia la forza che agisce sulla corda si scarica sul corpo in caduta, aumenta progressivamente fino a toccare il valore più elevato in corrispondenza del massimo allungamento della corda, cioè al momento dell'arresto.

Per l'arrampicatore, è l'impatto percepito al momento dell'arresto della caduta, il quale può essere attenuato mediante parametri, quali *l'allungamento della corda, dal materiale e dalle proprietà della corda* e di tutta la *catena di assicurazione*. [13]

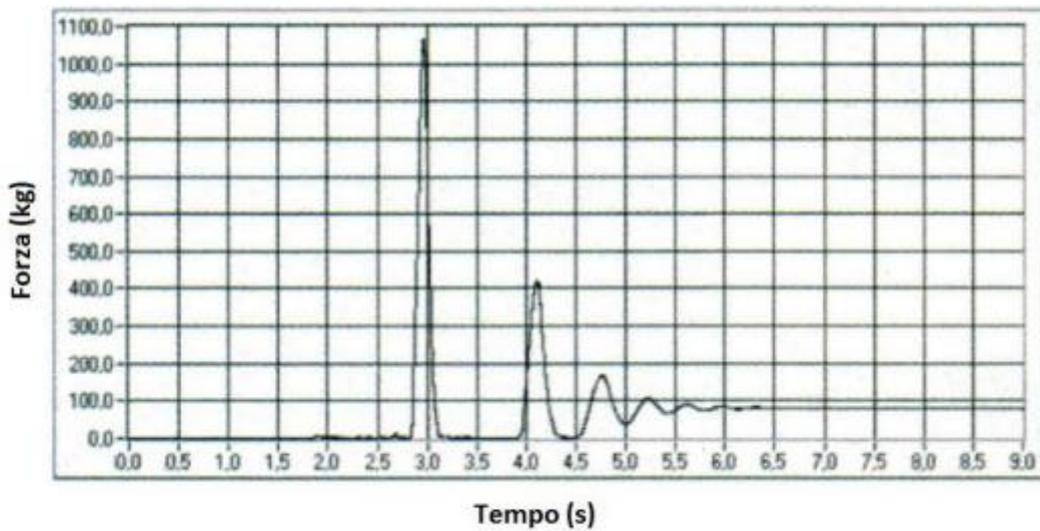


Figura 3. Esempio di risultati grafici sperimentali con voli diversi. Il primo picco è chiamato forza di arresto. Sulle ascisse è riportato il tempo (s) mentre sull'asse delle ordinate il carico (kgf)

Il limite delle sollecitazioni applicabili sul corpo umano è stato ricavato mediante studi sui paracadutisti durante la Seconda guerra mondiale dove, come per il nostro caso, all'apertura del paracadute agiscono sull'uomo delle sollecitazioni paragonabili, ovvero elevate decelerazioni. La massima decelerazione sopportabile da un uomo è pari a 15 volte il valore dell'accelerazione di gravità, indicata come 15 G.

La forza critica, data dal prodotto dell'accelerazione con la massa di 80 kg, è pari a 12 kN. Se invece la persona si trova in posizione ribaltata (a testa in giù) il valore scende da 15 G a 4÷5 G. Valori superiori di accelerazione (decelerazione) imposta al corpo umano possono portare a perdita dei sensi o a danni più gravi, temporanei o permanenti [14].

### 2.3. IL FATTORE DI CADUTA

Ci sono una serie di elementi che assicurano una forza di arresto adeguata a una possibile caduta. Insieme alle caratteristiche meccaniche della corda e di tutti gli elementi della catena di assicurazione [15], è importante conoscere il *fattore di caduta*.

Questo è l'indice in grado di quantificare la gravità della caduta del grave ed è pari al rapporto tra l'altezza della caduta  $H$  e la lunghezza della corda disponibile al rinvio prossimo all'arrampicatore  $L_0$ .

$$F_c = \frac{H}{L_0}$$

Il fattore  $F_c$  è indicativo della capacità della corda di dissipare energia, essendo l'allungamento della corda legato alla parte di corda disponibile durante la caduta. A parità di altezza di caduta  $H$ , una maggior disponibilità di corda  $L_0$  (cioè un fattore di caduta minore) produrrà quindi una minore forza di arresto.

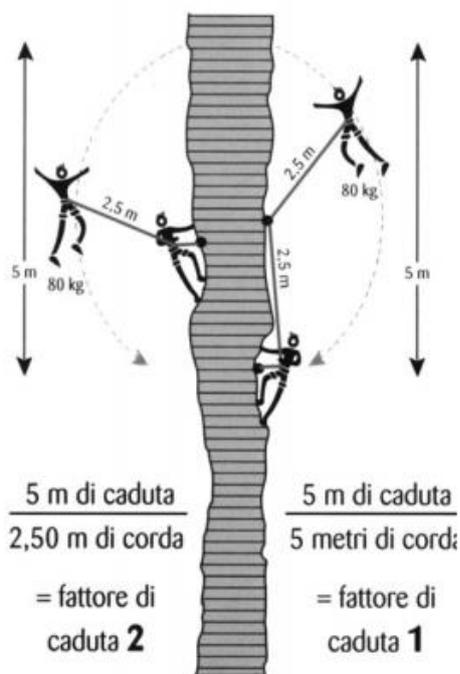


Figura 4. Sono rappresentati il capocordata, colui che è in stato di caduta, e il secondo in cordata, che assicura il capocordata. Sono dimostrati due casi di fattori di caduta. A fattore di caduta 2, a sinistra, e  $F_c=1$  a destra.

Si può subito notare che la situazione peggiore si ha quando il fattore di caduta è pari a 2, come riportato in Figura 4. L'altezza della caduta è pari al doppio della corda disponibile, generando così una forza di arresto massima. Nel secondo caso, a  $F_c = 1$  il volo dell'arrampicatore è pari alla lunghezza della corda disponibile, la quale genererà una forza di arresto minore del primo caso, grazie alla quantità di corda disponibile che riesce a dissipare l'energia e rallentare dinamicamente la caduta del soggetto.

Per queste motivazioni è sempre suggerito posizionare un rinvio appena possibile dopo essere ripartiti dalla sosta, al fine di ridurre il fattore di caduta.

Riassumendo, la corda si comporta come un elemento elastico, che assorbe parte dell'energia del corpo in caduta trasformandola in energia di deformazione della corda stessa e, in parte, in calore derivante dall'attrito tra i componenti elementari della corda. (Enzio Riccardo,2012)

## 2.4. LA CATENA DI SICUREZZA, TECNICHE E MATERIALI.

Prima di ogni seduta di arrampicata è importante che il primo di cordata abbia indossato in maniera corretta l'*imbragatura* (o più semplicemente ma meno propriamente *imbrago*) (Figura 5) e legato un capo della corda all'anello di servizio con un nodo: nella pratica sono universalmente utilizzati soprattutto il *nodo delle guide con frizione* (anche detto *nodo ad otto* o *ad otto ripassato* (Figura 6), nel linguaggio non alpinistico si chiamerebbe *nodo Savoia* ripassato) e, meno frequentemente, il *nodo bulino ripassato* (Figura 7) (nel linguaggio marinaresco sarebbe chiamato *gassa d'amante* ripassata perché la corda è raddoppiata dentro il nodo).



Figura 5. Esempi di imbrago usati in alpinismo. a sinistra il modello di imbragatura bassa, il più utilizzato, a destra l'imbragatura intera.

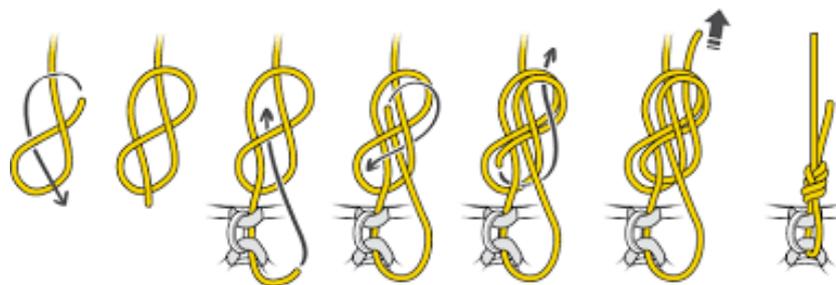


Figura 6. Nodo ad otto ripassato o Nodo Savoia

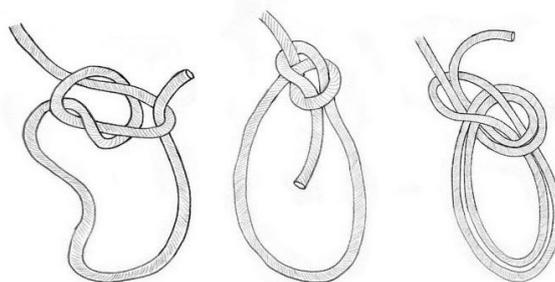


Figura 7. Nodo bulino ripassato

Il primo di cordata si farà carico di portare tutta una serie di altri dispositivi generalmente ancorati ad anelli che si trovano sulla fascia ventrale dell'imbragatura: tra questi vi sono moschettoni, rinvii (o binomi, coppie di moschettono collegati da un anello di fettuccia) e – a seconda dei casi – dispositivi di protezione mobili (chiodi da roccia, viti da ghiaccio, blocchetti da incastro fissi o regolabili, a camme, più anticamente cunei in legno, etc.).

L'*assicuratore*, ovvero colui che segue la salita dell'arrampicatore e si assicura che abbia tutto in sicurezza (detto anche *secondo in cordata*), a sua volta dovrà non solo posizionare l'imbrago in maniera corretta, ma anche posizionare la corda all'interno di un *freno*, elemento della catena di assicurazione, a sua volta ancorato o ad un punto fisso a terra (sosta) o all'anello di servizio del proprio imbrago tramite un moschettono.

È inoltre importante che l'assicuratore sia reattivo nel dare corda e recuperarla quando serve (in caso di posizionamento dei rinvii e durante la salita del primo di cordata) oltre che frenare in modo tale che la caduta del primo di cordata non sia troppo violenta.

La *Catena di Sicurezza* è l'insieme degli elementi (materiali e tecniche) che permettono, in caso di caduta, di limitare i danni sia a colui che cade, sia all'assicuratore, il quale risentirebbe della forza che lo tira verso l'alto, in direzione opposta all'arrampicatore [15].

La catena di assicurazione può essere quindi immaginata come una catena formata da anelli i quali lavorano in simbiosi al fine di prevenire rischi durante l'arrampicata (Figura 8).

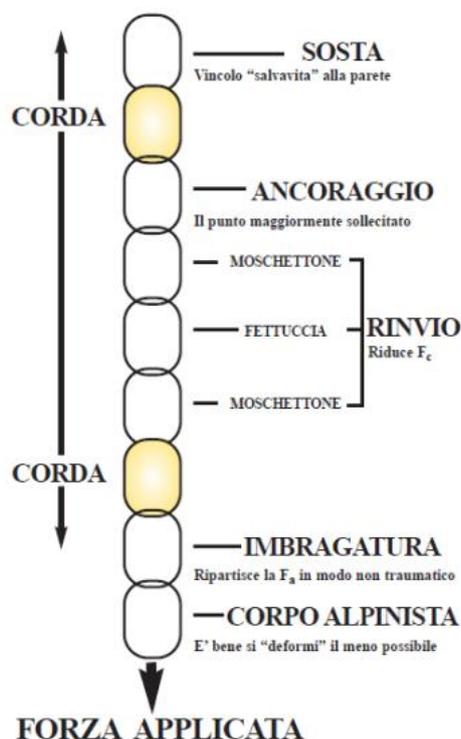


Figura 8. La catena di assicurazione vista come una serie di anelli avente come scopo comune il controllo della forza di arresto

Di seguito è riportato un elenco dei principali elementi di uso alpinistico e le relative norme che definiscono i requisiti di sicurezza e i metodi di prova [14]:

- Cordini (EN 564)
- Fettucce (EN 565)
- Anelli cuciti (EN 566)
- Autobloccanti (EN 567)
- Ancoraggi da ghiaccio (EN 568)
- Chiodi (EN 569)
- Corde (EN 892)

- Ramponi (EN 893)
- Tasselli o spit (EN 959)
- Blocchetti da incastro (EN 12270)
- Moschettoni (EN 12275)
- Friends (EN 12276)
- Imbracature (EN 12277)
- Carrucole (EN 12278)
- Caschi (EN 12492)

Essendo materiali tecnici, per essere venduti e assicurare la conformità delle esigenze richieste, prima della messa in commercio devono essere verificati e superare le prove di omologazione richieste.

La direttiva europea di riferimento è la *89/686/CEE*, specifica per tutte le attrezzature utilizzate per la protezione contro i rischi. Vengono definite le caratteristiche dei Dispositivi di protezione individuale (DPI), all'interno dei quali rientrano i materiali usati in arrampicata.

Il Decreto Legislativo *475/1992* classifica i DPI in tre categorie:

- I categoria: Racchiude i DPI che proteggono da rischi fisici di modesta entità e sono di semplice progettazione, quali contatti, vibrazioni o urti con corpi caldi non oltre i 50°C.
- II categoria: Raggruppa i DPI che non sono contenuti nelle altre due categorie.
- III categoria: Include i DPI che proteggono da danni gravi e/o permanenti e dalla morte. La corda rientra in questa categoria, essendo appunto un dispositivo che serve a proteggere dalle cadute dall'alto. [16]

La fabbricazione dei DPI di terza categoria è soggetta per legge a obblighi per il costruttore per ottenere l'attestato di certificazione CE (Figura 10) rilasciato da un organismo di controllo autorizzato, il quale afferma che il prodotto è conforme alle norme in vigore. Le normative vengono classificate dalla sigla EN seguito da un numero di identificazione, un esempio di etichetta in Figura 9.



Figura 9. Esempio di etichetta di una corda dinamica, con marchio CE, EN 892 specifico per tale tipologia di corda

Altri enti vengono coinvolti per la certificazione, quali l'ISO, ente internazionale per la conformità dei prodotti, e l'UNI, ente nazionale italiano di unificazione.

Vi è infine una serie di norme definite dalla UIAA (Unione Internazionale delle Associazioni Alpinistiche, Figura 10) le quali non sono obbligatorie e quindi si potrebbero pensare come più che altro legate ad un aspetto commerciale (anche se, prima dell'introduzione delle normative europee CEN, l'uso di materiale marchiato UIAA era fortemente raccomandato dalle scuole di alpinismo e dalle guide alpine diventando *de facto* un riferimento per la garanzia di sicurezza dei materiali così marchiati).



Figura 10. Marchio CE



Figura 11. Marchio UIAA

## 2.5. LA CORDA

Fino ai primi anni Sessanta le corde erano costituite prevalentemente da filamenti di canapa, opportunamente ritorti per conferire elasticità alla corda. Dapprima le corde in canapa dominavano il settore, data l'ottima resistenza, leggerezza e il basso costo. Tuttavia, la durata della corda in sé era breve per problemi riguardanti l'ammuffimento e l'accorciamento con l'umidità, oltre a scarse performance su carico di rottura e grado di deformabilità.

Con l'avvento delle fibre artificiali, si pensa alla scoperta delle poliammidi negli anni '40 e il successivo sviluppo, i problemi sopra elencati sono stati superati, migliorando le caratteristiche di resistenza alla rottura, deformabilità e recupero elastico. [17]

### 2.5.1. TIPOLOGIE DI CORDE



Figura 12. Schema per le diverse tipologie di corde.

La prima distinzione che si deve effettuare quando si parla di corde è senza dubbio se si tratta di corde *dinamiche* o *statiche* (Figura 12).

Le corde dinamiche, che sono in grado di dissipare energia tramite la loro deformazione, possono essere utilizzate per l'arrampicata sportiva e sono più sicure in caso di caduta.

Le corde statiche, al contrario, non possono dissipare energia in quanto non si deformano anche se sottoposte ad una sollecitazione, per questo motivo vengono utilizzate nell'alpinismo per calate o recuperi, ad esempio durante le operazioni di soccorso. Le corde dinamiche a loro volta possono essere classificate in tre categorie (Figura 13):

- Corda singola
- Mezza corda
- Corda gemella



Figura 13. Simboli sull'etichetta della corda per la distinzione tra corda singola, mezza corda e corda doppia.

Le corde singole sono usate per le vie di arrampicata dove le protezioni sono poste verticalmente. Sono le più utilizzate per l'arrampicata sportiva e hanno una lunghezza che può variare dai 60 *m* fino agli 80 *m* per le vie più lunghe.

Le mezze corde sono ideate per essere moschettonate l'una all'altra mediante rinvii. Queste, se vengono rinviate in modo alternato, riducono gli attriti della corda.

Le corde gemelle, identificate da due cerchi intrecciati, sono più leggere e meno ingombranti rispetto alle corde precedenti e devono essere moschettonate insieme come se fossero una corda singola.

L'apparecchio *DODERO* [18] è lo strumento base per i test sulle omologazioni delle corde, le quali devono essere verificate per definire la resistenza, le caratteristiche di elasticità e robustezza, al fine di garantire all'arrampicatore opportuni margini di sicurezza (Figura 14).

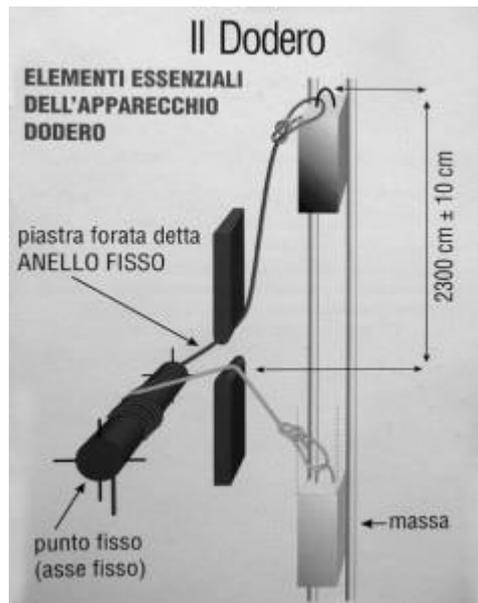


Figura 14. Schematizzazione dell'apparecchio Dodero.

Durante queste prove viene calcolata la forza di arresto, ossia la forza massima misurata su una massa metallica, la quale simula un arrampicatore.

Le condizioni standard di test qui elencate [19]:

La massa è di 80 kg tranne per le mezze corde che sono testate a 55 kg. La massa di 80 kg rappresenta il peso di un utilizzatore medio con il suo materiale;

La caduta simula un  $F_c$  pari a 1,77 su un punto fisso.

La forza trasmessa alla massa, al momento dell'arresto della caduta, è limitata a:

- 12 kN per le corde singole (un capo di corda),
- 8 kN per le mezze corde (un capo di corda),
- 12 kN per le corde gemelle (due capi di corda).

## 2.5.2. COM'È COSTITUITA LA CORDA: *MODELLO KERNMANTEL*

La corda *kernmantel* (dal tedesco kern "core" e "mantel" del mantello), ideata dall'azienda EDELRID fondata da Julius Edelman e Carl Ridder, è una corda costituita all'interno dall'anima, formata da un insieme di *trefoli* (filamenti bianchi ritorti tra loro) il cui numero aumenta all'aumentare del diametro della corda. La parte esterna è protetta da una guaina tubolare e progettata per ottimizzare resistenza, durata e flessibilità, in italiano comunemente chiamata *camicia* (Figura 15).

L'anima e la camicia contribuiscono alla resistenza della corda e all'assorbimento di energia. La camicia svolge una funzione protettiva e di contenimento nei riguardi dell'anima. Infatti, l'allungamento della corda (ovvero la capacità di assorbire l'energia di caduta con minor forza di arresto) deriva dalla sua deformazione, dipendente dalle caratteristiche proprie di costruzione della corda. [20]

Esistono quindi corde migliori e corde peggiori per quanto riguarda l'entità delle decelerazioni e quindi delle forze applicate all'alpinista dopo una caduta.

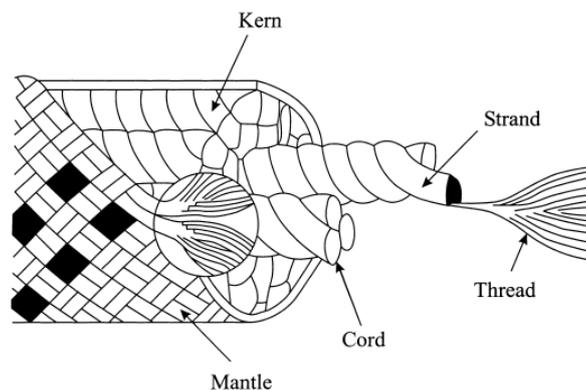


Figura 15. Composizione di una corda kernmantel costituito dalla parte interna di filamenti di Nylon 6,6 attorcigliati tra loro formando l'anima, protetto all'esterno dalla guaina. [2]

Le corde *kernmantel* fanno sì che una resistenza moderatamente alta combinata all'alta l'estensione doni un alto assorbimento di energia per arrestare la caduta di un arrampicatore. Le ragioni di ciò sono il comportamento *viscoelastico* del materiale base poliammide PA, per cui alla forza elastica si

aggiunge il contributo di una forza proporzionale alla velocità, l'attrito tra fili, trefoli e altre parti costitutive della fune e il recupero della deformazione dipendente dal tempo durante un eventuale intervallo di tempo di scarico tra due cicli di carico adiacenti. Tutte queste caratteristiche possono variare da fune a fune a seconda del progetto di fabbricazione.

Le corde devono avere a entrambe le estremità *fascette* durevoli con una lunghezza massima di 30 mm (misurata lungo l'asse della corda). Le fascette devono essere marcate in modo indelebile e permanente, almeno con le informazioni seguenti:

- Nome e marchio del fabbricante, importatore o fornitore
- Il simbolo grafico corrispondente alla tipologia di corda dinamica (corda singola, mezza corda o doppia corda)

In realtà i produttori inseriscono le informazioni indispensabili più altre informazioni utili all'utilizzatore. Sotto viene riportato un esempio di marcatura di una corda singola (Figura 16).

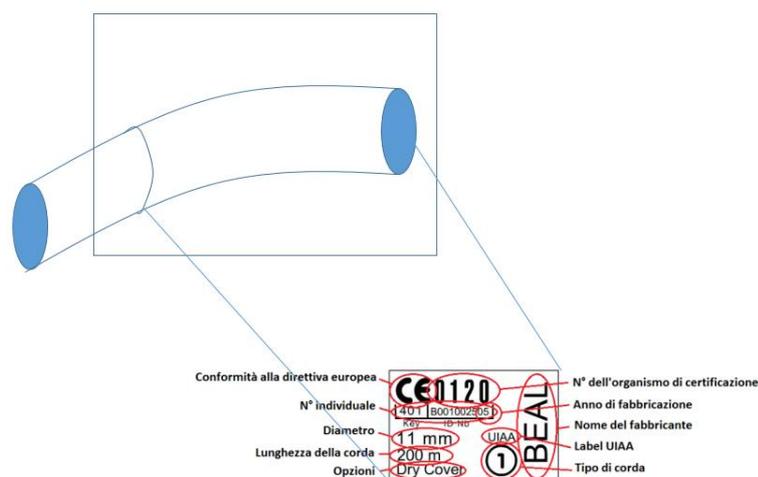


Figura 16. Esempio di etichetta presente sulle corde.

## 2.6. PROVE SPERIMENTALI

Il *Centro Studi Materiali e Tecniche* (CSMT) è una struttura operativa del CAI la quale si occupa dei problemi di sicurezza connessi all'attività alpinistica e all'arrampicata, oltre che fornire informazioni su particolari aspetti tecnici della sicurezza nella progressione in montagna o in falesia. L'attività sperimentale si svolge per la maggior parte a Padova. I test sui vari materiali sono effettuati presso il nuovo Laboratorio di *Villafranca Padovana*, mentre le prove che coinvolgono cadute di masse o di persone si effettuano alla *Torre* [21], un ex traliccio ENEL dell'altezza di 16 metri (Figura 17) modificato al fine di poter essere utilizzato come un *Dodero* [22], strumento basilare di tutto lo studio sulle corde, le caratteristiche e le rotture delle stesse.

Al fine di utilizzarlo a scopo sperimentale, il traliccio è stato rinforzato e sono state installate delle guide metalliche per far scivolare il corpo in prova. È una struttura unica al mondo, sulla quale possono essere effettuati svariati test sulla resistenza dei materiali alpinistici. Nata a metà degli anni Sessanta, il CSMT opera nell'ambito della struttura centrale CAI e ha come obiettivo lo studio, teorico e pratico, dei problemi legati alla sicurezza nella progressione in montagna ed in parete; studia inoltre le caratteristiche di resistenza e le prestazioni delle attrezzature alpinistiche e speleologiche. [21]

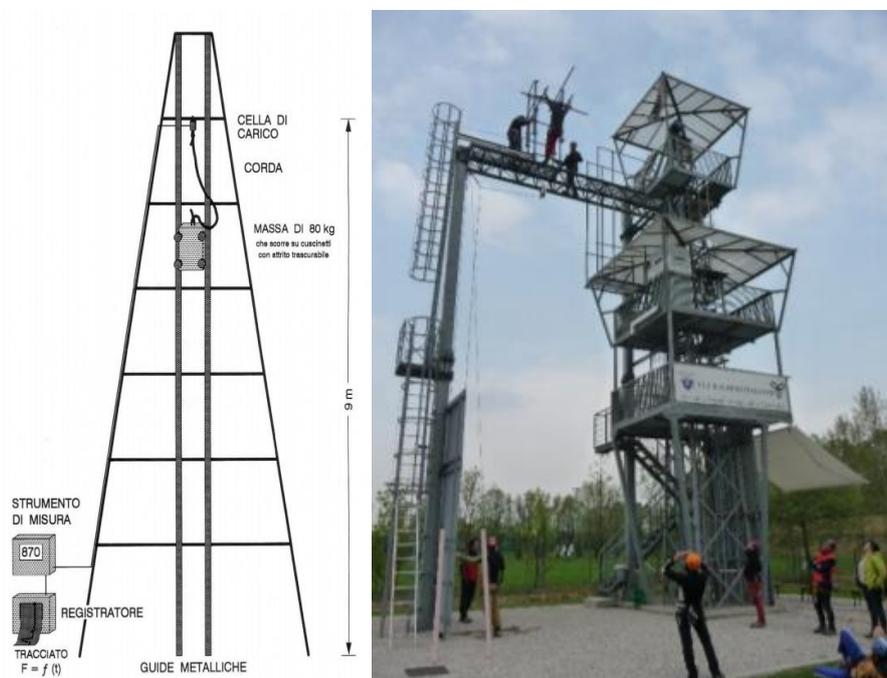


Figura 17. La torre, a sinistra lo schema tecnico, a destra la struttura presente a Padova.

Sulla *Torre* sono state effettuate le prove sperimentali, oggetto di comparazione nello studio di questa tesi. Qui infatti vengono eseguite prove nelle quali è necessario simulare un effetto dinamico affine a una caduta. I test sono svolti utilizzando una massa di 80 kg, collegata a uno spezzone di corda. All'altro capo dello spezzone è presente un moschettone che va ad agganciarsi a una cella di carico, la quale misura la forza generata.

Questa disposizione fa sì che la caduta del grave venga simulata a partire dalla situazione di sosta, ovvero l'ultimo rinvio dove la corda è ancorata. Il grave cade seguendo le guide metalliche con cuscinetti ad attrito trascurabile (nella Figura 18 viene schematizzato il modello senza guide, simile alle prove effettuate a Padova nel giugno 2020). La corda usata durante le prove sperimentali è una corda in Nylon 6,6 dinamica, singola, avente un diametro di 9,8mm e prodotta dall'azienda Millet.

Le prove vengono svolte con diverse lunghezze di corda (1m, 2m, 4m) e fattori di caduta (0.5, 1), permettendo di studiare l'andamento della forza generata dalla corda modificando questi parametri.

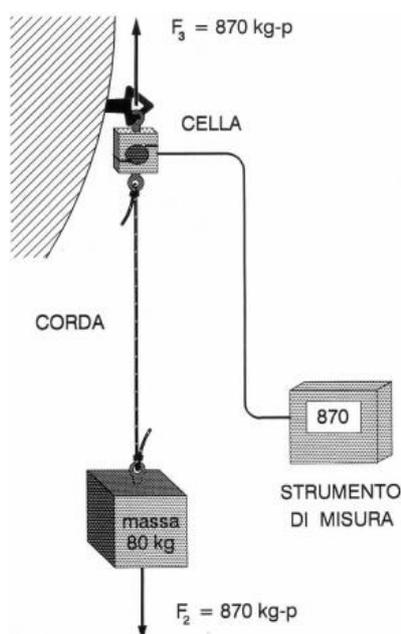


Figura 18. Schema simulazione caduta senza freno.

Il sistema di misura è composto da una *cella di carico* contenente un *trasduttore*. Quest'ultimo trasforma una deformazione del materiale, dovuta alla forza trasmessa dalla corda, in una tensione elettrica ad essa proporzionale. A valle troviamo un *voltmetro* che indica il valore massimo della tensione. Per la memorizzazione dei dati vi è un sistema di misura basato su un *convertitore analogico/digitale*. Esso converte le misure effettuate in un formato tale da essere conservato in un

computer sotto forma di database dal quale, mediante elaborazioni dei dati, si ottiene un grafico della forza rispetto al tempo (kgf-s).

### 2.6.1. I CORPI IN CADUTA

Durante le prove sperimentali sono stati utilizzati una massa cilindrica e un manichino (Figura 19) .



Figura 19. A sinistra la massa metallica, a destra il manichino imbragato

Il cilindro metallico presenta sulla superficie superiore un golfare, un anello fissato alla massa allo scopo di agevolare il sollevamento e l'ancoraggio con la corda di interesse (Figura 20).



Figura 20. Foto effettuate durante le prove a Padova. A sinistra la preparazione della massa metallica. Il cilindro metallico è approssimativamente di 70mm di raggio, mentre l'accelerometro è posizionato a 90mm dall'asse principale del cilindro, avendo così un offset di 20mm dalla superficie laterale.

Le dimensioni non erano del tutto riportate nel report delle prove sperimentali ma facilmente ricavabili dalle foto pervenute. È possibile, infatti, approssimare la dimensione del raggio del cilindro metallico e, conoscendo il peso del cilindro e la densità dell'acciaio, si può ricavare facilmente l'altezza del cilindro.

$$m_{cilindro} = 80\text{kg}$$

$$\rho_{acciaio} = 7.85 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \quad [23]$$

$$r_{cilindro} = 70\text{mm}$$

Dalla formula del volume di un cilindro è possibile ricavare l'altezza del cilindro come segue:

$$h = \frac{m}{\pi r^2 \rho} = 660\text{mm}$$

Dalle immagini possiamo ricavare la distanza dell'accelerometro dall'asse centrale. Il sensore è posizionato sulla superficie laterale del cilindro (Figura 21) e dista dall'asse centrale  $r_{acc} = 90mm$ . La distanza tra la superficie laterale e l'accelerometro è pari a  $d = 20mm$  (Figura 21).

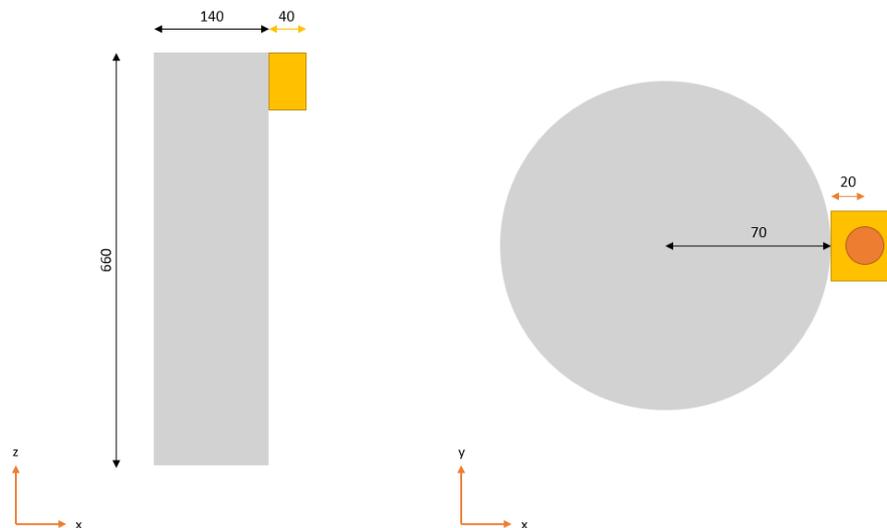


Figura 21. Dimensionamento del cilindro (mm)

Il manichino utilizzato nelle prove sperimentali (Figura 22) è stato fabbricato dall'azienda leader del settore *RUTH LEE* [24], la quale produce manichini di diverso tipo al fine di essere utilizzati in qualsiasi scenario in ambito di sicurezza. Il manichino è imbragato e collegato alla corda mediante un nodo.

È stato usato un imbrago composto da due parti: la prima protegge e distribuisce le forze generate nella zona toracica dell'arrampicatore, la seconda le distribuisce in parte sul bacino, in parte nell'area superiore delle gambe. Una maggior distribuzione fa sì che l'arrampicatore risenta meno della forza di arresto. L'accelerometro è posizionato all'interno della tasca destra del pantalone.



Figura 22. A sinistra Il manichino della Ruth lee utilizzato durante le prove sperimentali a Padova. A destra è compreso di imbrago e corde assicurative.

## 2.6.2. RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI

Di seguito è riportata la Tabella 1 sul report delle prove sperimentali.

A ogni configurazione, quindi  $F_c$  e lunghezza della corda variabili, sono state effettuate tre prove per poi ricavare un valore medio. Nella tabella sono indicate tutte le prove, a quale fattore di caduta il grave è in caduta, la lunghezza della corda, la forza di arresto letta a ogni prova e il valore medio calcolato sulle tre prove. Dato che i valori risultanti avevano dimensioni  $kgf$ , sono stati moltiplicati per  $G = 9.81 \frac{m}{s^2}$  per riportare i valori in  $N$ .

Sono stati inoltre riportati i problemi di cinque prove. Nel caso delle prove di caduta della massa metallica a  $F_c = 0.5$  e  $l = 4m$  sono sorti due problemi riguardanti la corda. Nel primo caso vi è stata la rottura della corda dovuta allo sfilamento dei morsetti mentre nel secondo caso era stata utilizzata tutta la corda che era a disposizione nella prova precedente.

Nelle prove di caduta del manichino sono stati riportati tre problemi riguardanti il salvataggio dei dati e quindi dei file Excel utili per ricavare l'andamento della forza generata dalla corda rispetto al tempo.

Sono stati però rilevati i valori del picco della forza di arresto mediante l'uso del voltmetro posto a valle della *Torre*. In rosso sono indicate le prove con i problemi citati.

Prove Torre confronto massa-manichino 2020-06-12						
Grave	fc	L spezzone [m]	Forza [kgf]	Media F [kgf]	Media F [N]	note
MASSA	fc=0.5	1	405.10	408.0	4001.2	
			409.70			
			409.30			
		2	425.00	419.2	4110.3	
			414.00			
			418.50			
		4		439.8	4312.7	rottura. Sfilamento morsetti (valore letto 225,9 kgf)
			439.80			
						non eseguita perché finita la corda
	fc=1	1	685.00	679.7	6665.1	
			682.60			
			671.50			
		2	642.60	643.9	6314.4	
			645.00			
			644.20			
		4	644.10	644.2	6317.0	
			642.40			
			646.10			
MANICHINO	fc = 0.5	1	333.10	333.1	3266.4	
			335.10			perso
			345.30			perso
		2	388.90	400.5	3926.8	perso
			400.40			
		400.50				
	4	387.10	415.3	4072.1		
		426.40				
		432.30				
	fc=1	1	538.60	549.6	5389.1	
			551.00			
			559.10			
		2	604.30	607.7	5958.8	
			605.70			
			613.00			
4		628.70	627.5	6153.3		
		626.20				
		627.60				

Tabella 1. Report delle prove sperimentali. Sono riportati i valori delle forze di arresto di ogni prova, il valore medio delle tre prove per ogni configurazione (in kgf e n) e le note.

Nella Tabella 2 sono riportati gli andamenti della media delle forze di arresto, creando una linea di tendenza per le tre lunghezze di corda utilizzate, rispettivamente a 1, 2 e 4 metri. Riguardo le prove effettuate sul manichino e nel caso a  $F_c = 0.5$  della massa metallica risulta che all'aumentare della

lunghezza della corda, il valore della  $F_a$  tende a crescere di valore. Le prove effettuate sulla massa metallica a  $F_c = 1$ , il quale risulta avere un valore medio della  $F_a$  e  $l = 1m$  più elevato (6661 N) rispetto ai casi successivi, rispettivamente 6310 N a  $l = 1m$  e 6313 N a  $l = 2m$ .

I valori della forza di arresto per entrambi i gravi a  $F_c = 0.5$  oscillano tra i 3294 N e i 4310 N, mentre per  $F_c = 1$  variano dai 5385 N e i 6661 N. È quindi confermato dalle prove sperimentali l'importanza del fattore di caduta, il quale attenua la forza di arresto del 37% al diminuire del  $F_c$ .

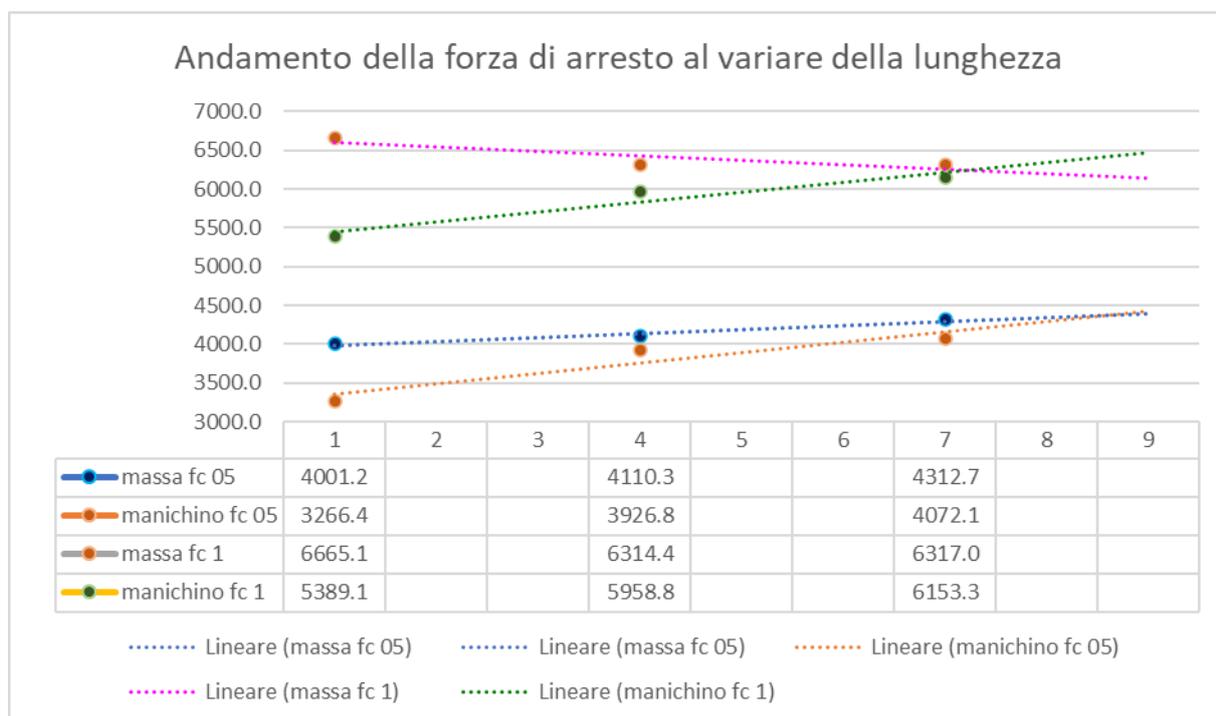


Tabella 2. Andamento delle prove sperimentali al crescere della lunghezza della corda.

### 2.6.3. IL MODULO ELASTICO DELLA CORDA RICAVATO MEDIANTE PROVE SPERIMENTALI :

Il modulo elastico è definito dalla formula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Dove  $\sigma$  è la tensione, definita come il rapporto tra forza su area nella sua configurazione indeformata.  $\varepsilon$  è la deformazione, rappresenta la variazione di lunghezza  $\delta L$  della corda in rapporto alla sua lunghezza iniziale  $L_0$ . Per il caso specifico della corda è stata effettuata una prova di trazione al CSMT, coi risultati riportati nel grafico in Figura 23. [25]

I risultati derivano da una prova di trazione in cui la corda è sollecitata tra due morsetti (due cerniere di cui una fissa e l'altra mobile con una massa all'estremità mobile). La massa si sposta a una velocità costante generando uno stato di sforzo nel materiale della corda. La prova si interrompe quando la corda si rompe. Durante la prova è stata rilevata la forza [kN], lo spostamento [m] e la velocità [m/s] rispetto al tempo. Tali dati sono conservati a ogni istante in tempo reale.

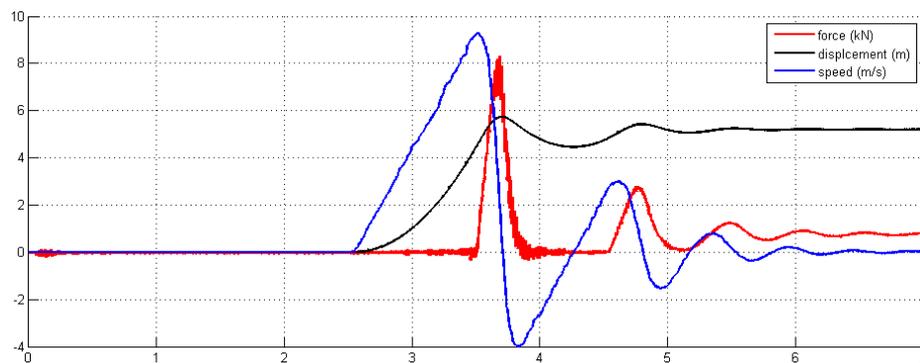


Figura 23. I risultati ricavati dalla prova elaborati mediante MATLAB. In rosso la forza (kN), in nero lo spostamento (m) e in blu la velocità (m/s).

Dalle informazioni date si è ricavato il grafico tensione-deformazione, fornendo così il valore del modulo elastico che più si adattava alle prove sperimentali (Figura 24).

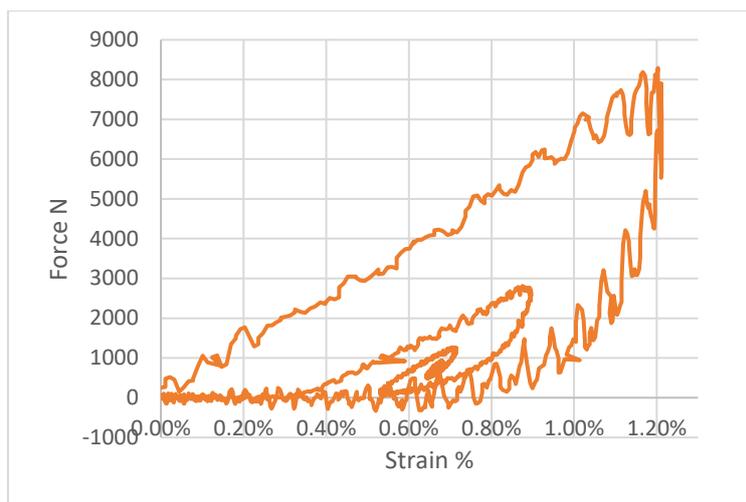


Figura 24. Grafico forza-deformazione in percentuale rilevata durante le prove di trazione su uno spezzone di corda.

## 2.7. CADUTA IN TERMINI NUMERICI

In questa sezione viene riportato un modello di calcolo efficace per trovare il valore della forza di arresto effettuato da Riccardo Enzio nella sua tesi [14].

Per effettuare il calcolo in termini numerici bisogna imporre le condizioni al contorno, le proprietà del materiale, e faremo assunzioni adatte al modello analizzato:

- La corda è fissata a un estremo.
- Le caratteristiche meccaniche della corda sono costanti, omogenee e di tipo lineare.
- Si trascurano gli effetti dissipativi dovuti all'attrito tra i filamenti (questa ipotesi è forzata in quanto vi è una grande dissipazione dovuta allo scorrimento dei filamenti, responsabile dello smorzamento).

Le caratteristiche meccaniche della corda sono costanti, omogenee e di tipo lineare, non dipendenti dal carico, anche se questa in realtà ne risente, data la disposizione geometria dei filamenti, irrigidendo la corda.

*Definizione dati:*

$L_0$  = lunghezza della corda indeformata interessata nella caduta

$H$  = altezza caduta libera

$F_a$  = forza di arresto

$\Delta L$  = allungamento della corda

$m$  = massa dell'arrampicatore

$g$  = accelerazione di gravità

$k$  = rigidità

$E$  = modulo elastico della corda

$A$  = area della sezione della corda

Il modello è basato su una corda avente una rigidità  $k$  e di lunghezza indeformata,  $L_0$ , alla quale è collegato l'arrampicatore di massa  $m$ , soggetto al solo campo gravitazionale di accelerazione  $g$ .

L'equazione di conservazione dell'energia secondo la quale in condizione di arresto della caduta dell'arrampicatore, cioè a velocità nulla di quest'ultimo e massima elongazione della corda, tutta l'energia potenziale posseduta da questo, relativa all'altezza di caduta, si è trasformata in energia di deformazione elastica nella corda.

Poiché le deformazioni della corda non sono trascurabili, nel calcolo dell'energia potenziale è necessario inserire anche il termine dovuto a  $\Delta L$ , deformazione della corda.

$$E_{potenziale}(h) + E_{potenziale}(\Delta L) = E_{deformazione\ della\ corda}$$

$$mgH + mg\Delta L = \frac{1}{2}k\Delta L^2 \quad (1)$$

Sapendo che i valori della rigidità e della forza di arresto sono:

$$k = \frac{EA}{L_0} \quad (2)$$

$$F_a = k * \Delta L \quad (3)$$

Sostituendo la rigidezza all'interno della (3):

$$F_a = \frac{EA}{L_0} \Delta L \quad (4)$$

Dalla (4) si ricava la deformazione  $\Delta L$  come:

$$\Delta L = \frac{F_a L_0}{EA} \quad (5)$$

La (2) e la (5) vengono sostituiti nella condizione energetica (1) e semplificando si ha:

$$mgH + mgF_a \frac{L_0}{EA} = \frac{1}{2} F_a^2 \frac{L_0}{EA} \quad (6)$$

Riscrivendo la (6) in funzione di  $F_a$  si ottiene la seguente relazione di secondo grado:

$$\frac{1}{2} F_a^2 - mgF_a - mgH \frac{EA}{L_0} = 0 \quad (7)$$

Si ricava quindi, escludendo la soluzione con valore negativo:

$$F_a = mg \left( 1 + \sqrt{1 + 2 \frac{H (EA)}{L_0 mg}} \right) \quad (8)$$

È evidente il rapporto tra l'altezza della caduta e la lunghezza della corda interessata, ossia il fattore di caduta:

$$F_c = \frac{H}{L_0} \quad (9)$$

Sostituendo quindi la (9) nella (8) si ottiene il valore della forza di arresto che è pari a:

$$F_a = mg \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2F_c EA}{mg}} \right) \quad (10)$$

Se ipotizziamo di utilizzare una corda di diametro fisso e quindi  $A = cost$ ,  $E = cost$  e  $m = cost$ , allora la forza di arresto  $F_a$  risulterà solo funzione del fattore di caduta  $F_c$ .

$$F_a = f(F_c)$$

## 2.8. ANALISI FEM

In questo capitolo viene introdotto il metodo FEM per l'analisi computazionale del fenomeno. Il metodo a elementi finiti è tra gli strumenti più utilizzati e utili nel campo ingegneristico. Un corpo complesso è diviso in elementi regolari e annessi tra loro mediante nodi. Il metodo FEM fa sì che un sistema di equazioni differenziali venga semplificato in un sistema di equazioni algebriche di tipo lineare.

Aumentando il numero di elementi, la simulazione FEM risulta più accurata, ma comporterà un maggiore lavoro da parte del solutore, aumentando il tempo di elaborazione. La simulazione è influenzata da altri parametri, quali le condizioni al contorno, le applicazioni dei carichi e le interfacce di contatto.

Essendo un caso di caduta con finestre di osservazione dell'ordine dei millisecondi, si è deciso di lavorare mediante analisi esplicita, analizzando così un brevissimo lasso di tempo con maggior precisione. In un'analisi dipendente dal tempo infatti si possono usare vari metodi numerici, comunemente il metodo delle differenze finite, ad esempio lo schema di Runge Kutta, Eulero esplicito ed Eulero implicito, per citare i più comuni. Si vede che i metodi impliciti sono stabili incondizionatamente, per cui permettono di effettuare l'analisi con intervalli temporali più ampi.

Tuttavia, l'approssimazione dovuta a intervalli temporali ampi resta comunque considerevole, e l'elevato costo computazionale dovuto al ricalcolo delle matrici di massa e rigidità a ogni passo temporale non giustifica il loro uso. Al contrario, i metodi espliciti soffrono della cosiddetta instabilità condizionata, per cui portano alla soluzione esatta solo se l'intervallo temporale è sufficientemente piccolo.

A differenza del metodo implicito, dove la soluzione viene elaborata calcolando e invertendo la matrice di rigidità per ogni time-step (deciso in precedenza), il metodo esplicito inverte la matrice di massa una sola volta e senza dover invertire la matrice di rigidità. [26]

Con l'avvento di processori molto potenti, data la relativa semplicità del modello in analisi, data l'accurata precisione desiderata, i metodi espliciti sono adatti al nostro caso, in termini di accuratezza, costo computazionale e semplicità di utilizzo.

Lo studio è stato effettuato utilizzando la suite messa a disposizione da *ALTAIR*. Per la fase di preprocessing sono stati utilizzati i software Hyperworks e Hypercrash, il solutore scelto per il metodo esplicito RADIOSS. Infine, la visualizzazione dei risultati è stata effettuata mediante i software Hyperview e Hypergraph.

Le unità di misura coerenti utilizzate durante le simulazioni saranno le seguenti:

MASS	LENGTH	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY
kg	mm	ms	kN	GPa	J

### 3. MODELLAZIONE

I due modelli di massa metallica e dummy sono stati ricreati in ambiente FEM riportando le caratteristiche geometriche e meccaniche (nel paragrafo 3.1.1. per il cilindro, §3.2.1. per il manichino), generate la mesh (rispettivamente nei paragrafi 3.1.2. e §3.2.2.), imposti carichi vincoli e contatti (§3.1.3. e §3.2.3.) , infine l'accelerometro (§3.1.4. e §3.2.4.).

#### 3.1. MODELLO CILINDRO

##### 3.1.1. CREAZIONE MODELLO

In questo studio non è stato ricreato il golfare in ambiente FEM per semplificare il modello, collegando direttamente mediante lo stesso nodo il corpo del cilindro con la corda. È stata ricreata la geometria del cilindro avente  $r_{cilindro} = 70mm$  e  $h = 660mm$  (Figura 25).

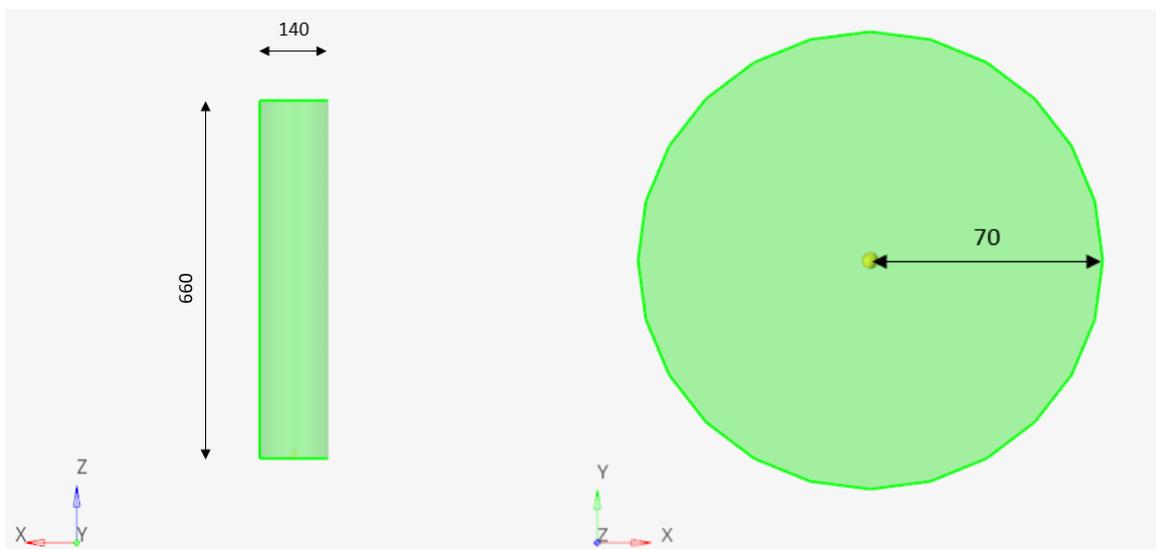


Figura 25. Il cilindro ricreato con il software HYPERWORKS 2020, con raggio pari a 70mm e altezza pari a 660mm.

## GEOMETRIA DELLA CORDA

Per ricreare la corda e riuscire a replicare i casi di fattore di caduta diversi, sono stati generati una serie di nodi al fine di riprodurre le linee che avrebbero formato la corda. Una parte è collegata al centro della superficie superiore del cilindro e l'altra parte del cavo è posta sullo stesso asse z a 10mm di distanza, al fine di avere sullo stesso asse il baricentro del cilindro e il capo della corda collegata al vincolo.

Per il caso a  $F_c = 1$ , per qualunque lunghezza della corda, bisogna mantenere la proporzione dello spezzone di corda A e quello B di pari altezza, come indicato nella Figura 26, e mantenere allo stesso tempo la lunghezza della corda.

Per il caso di  $F_c = 0.5$ , l'altezza dello spezzone di corda A è pari a un terzo dello spezzone B.

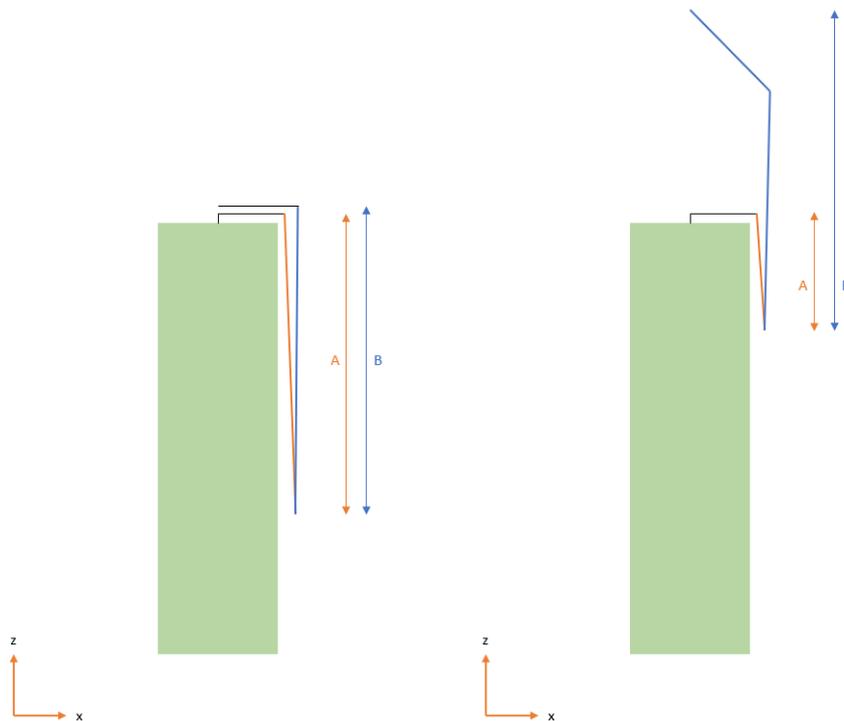


Figura 26. Schema per la determinazione degli spezzoni A e B. A sinistra per  $F_c = 1$ , a destra  $F_c = 0.5$ .

Al fine di mantenere la proporzione del fattore di caduta ( $F_c = \frac{H}{L_0}$ ) e per una semplificazione del modello, i due spezzoni variano di lunghezza a seconda della lunghezza di corda totale interessata. Le restanti parti della corda rimangono costanti. Di seguito sono riportati i due modelli di corda, i quali per approssimazione di progetto (A e B distano 5mm sull'asse x) sono comunque accettabili (Figura 27).

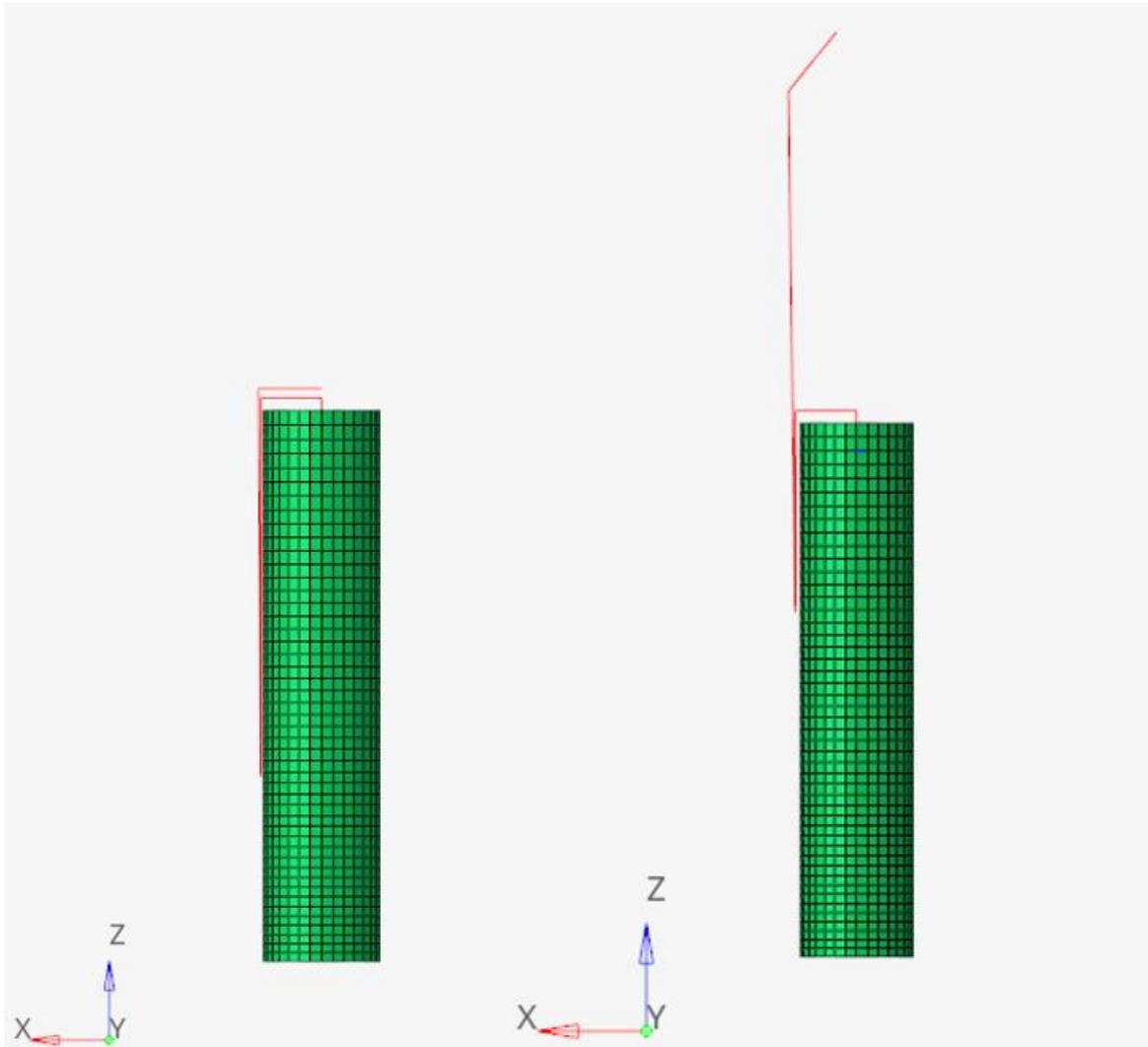


Figura 27. A sinistra la geometria della corda con  $F_c = 1$ , a destra con  $F_c = 0.5$ , entrambi a  $l=1m$ .

### 3.1.2. GENERAZIONE DELLA MESH.

Per geometrie solide possiamo scegliere elementi a base triangolare (*TETRA* o elementi tetraedrici) o a base quadrata (*HEXA* o elementi esaedrici). Gli elementi tetraedrici possono adattarsi meglio alla geometria complessa. Tuttavia, quando si integrano le funzioni di forma è meno preciso degli elementi esaedrici. Inoltre, uno dei fattori che influisce sulla qualità della mesh è la distorsione degli elementi. Se la geometria è semplice, come nel caso del cilindro, l'opzione migliore è quella di discretizzare con elementi *HEXA*.

La dimensione degli elementi sulla superficie rientrano quindi in un range compreso tra i 17 e i 19 mm, si è scelto quindi un'altezza dell'elemento pari a 18mm (Figura 28).

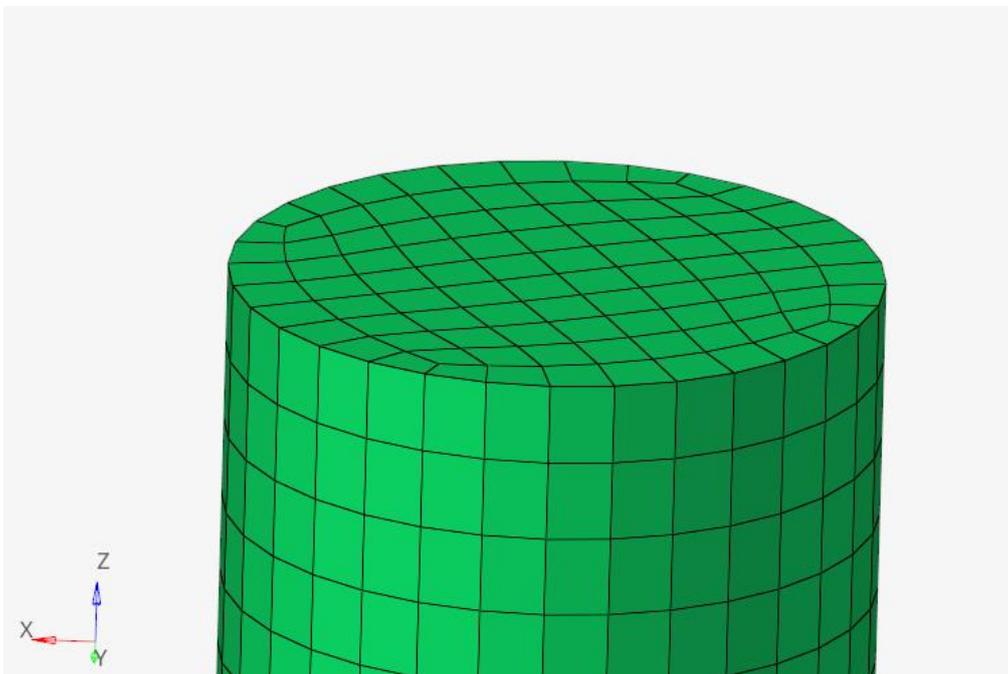


Figura 28. Superficie superiore della mesh solida del cilindro. L'altezza del singolo elemento HEXA è pari a 18mm.

Per la caratterizzazione della parte del cilindro si è scelto un modello lineare avente queste proprietà:

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\rho = 7.87 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

$$\nu = 0.3$$

La corda è stata ricreata mediante elementi *BEAM*. Con lunghezza pari a  $6\text{mm}$  e diametro della sezione circolare pari a  $9,8\text{mm}$ . Dall'immagine estratta si nota com'è stata collegata tale corda al cilindro, utilizzando un nodo in comune a entrambe le parti (Figura 29).

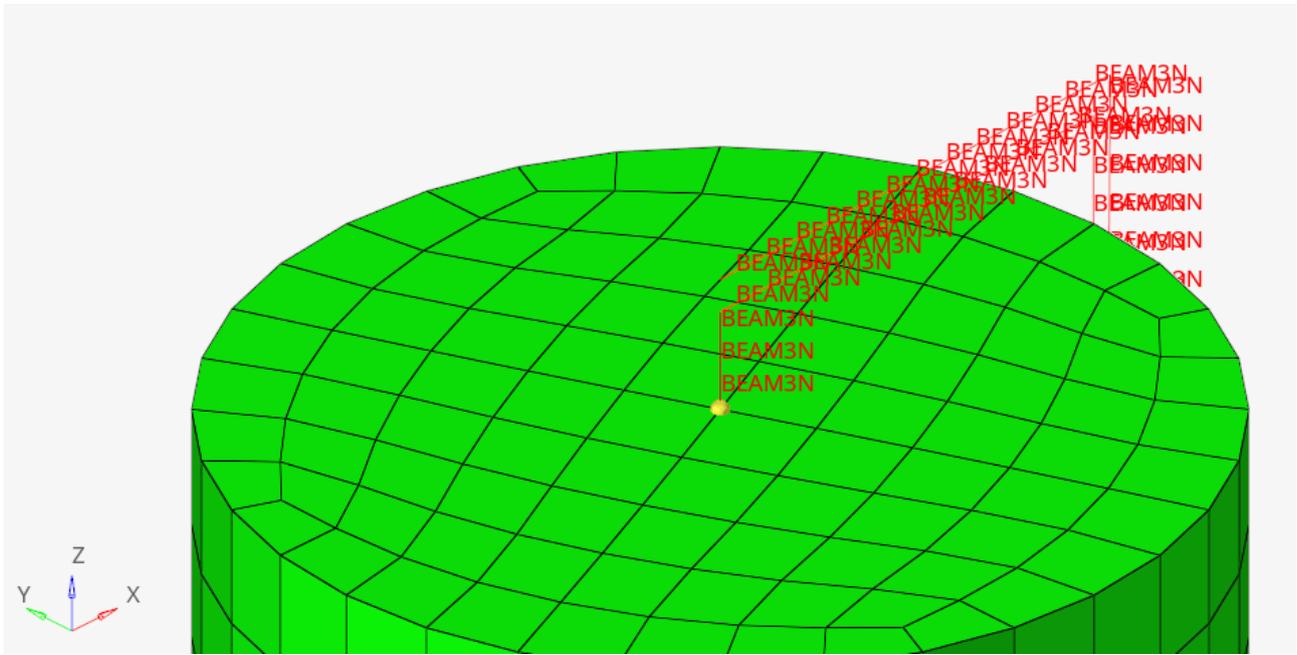


Figura 29. la parte corda è collegata al cilindro mediante un nodo in comune a entrambe le parti.

Le proprietà della corda sono state ricavate sia dalle prove di trazione trattate nel paragrafo 2.6.1., riguardante il modulo elastico, sia dalle informazioni tecniche riguardo il materiale, ovvero il Nylon 6,6.

$$\rho = 1.141 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

$$E = 0.3 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.35$$

La massa totale della corda per i valori implementati nel modello sarà:

$$m_{1m} = 93 \text{ g}$$

$$m_{2m} = 186 \text{ g}$$

$$m_{4m} = 372 \text{ g}$$

### 3.1.3. APPLICAZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO

Ricapitolando ciò che ci aspettiamo dalla simulazione, il cilindro è in caduta, dovuta alla forza di gravità, il quale è collegato a una corda di lunghezza variabile bloccata all'ultima sosta, la quale funge da vincolo fisso. La corda potrebbe strisciare sulla superficie del cilindro, è necessario quindi applicare dei contatti.

All'estremità della corda, dove troviamo l'ultimo rinvio che blocca la corda, viene applicato un vincolo fisso con spostamenti nulli ma svincolato rispetto alle rotazioni intorno ad esso (Figura 30).

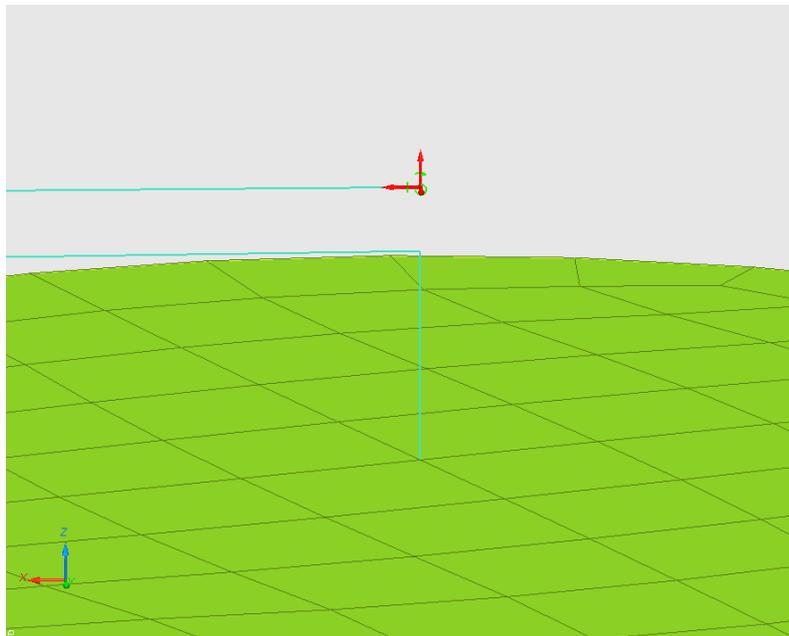


Figura 30. Il vincolo è applicato all'estremità della corda, simulando la trattenuta di un rinvio. In figura vi è il caso della corda a  $l=1\text{m}$  e  $F_c=1$ .

Per impostare il carico si è scelto di usare il *gravity load*. Questo metodo applica a tutti i nodi il carico selezionato, comodo per accelerazioni di questo tipo.

Essendoci una differenza di massa minore di 2 ordini di grandezza tra il cilindro ( $m_{cilindro} = 80\text{kg}$ ) e la corda ( $m_{corda}$  varia tra i 92 ai 372 g) si è ritenuto di non trascurare la massa di quest'ultima, applicando il *gravity load* a tutte e due le parti.

L'accelerazione segue quindi una funzione con tempo massimo di 2000ms, accettabile dato che le simulazioni non superano questa soglia, applicando un valore costante di  $G = 9.806 * 10^{-3}$  essendo il nostro sistema di misura in kg-mm-ms.

A seguire troviamo la disposizione del *gravity load* (Figura 31) sia sulla parte del cilindro che quello della corda, applicato verso il basso lungo l'asse z del sistema globale.

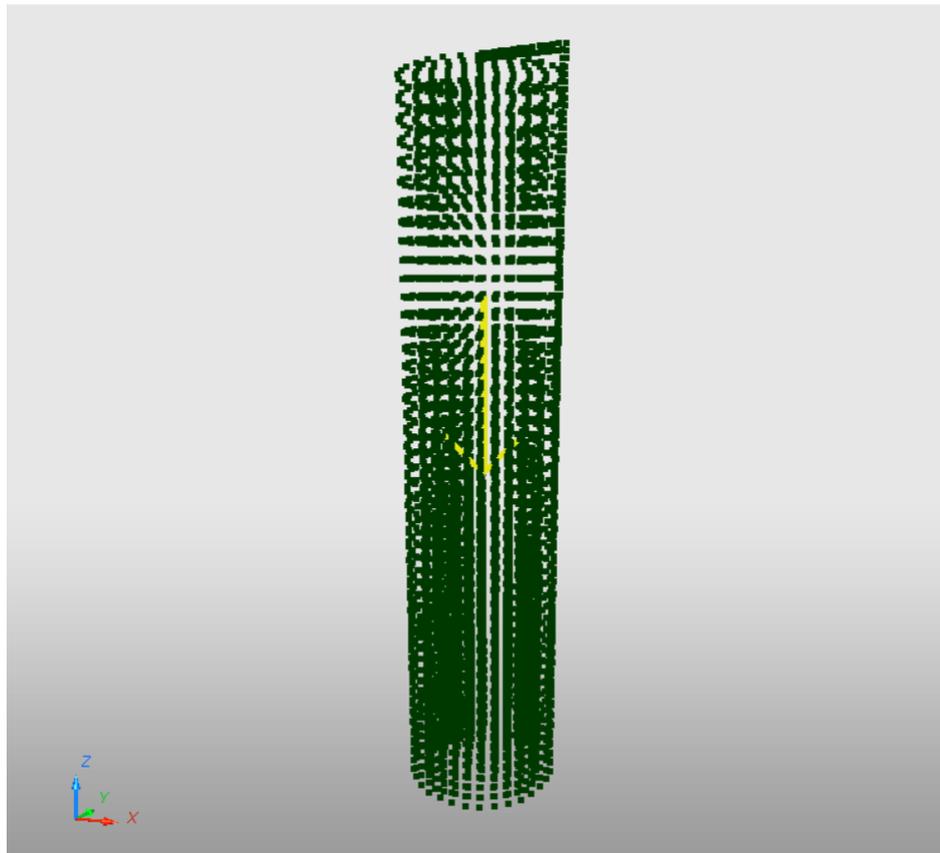


Figura 31. La forza di gravità è applicata sia alla corda che al cilindro, evidenziata con due frecce gialle diretta verso il basso e in verde i nodi interessati.

È importante inoltre per una maggior accuratezza della simulazione applicare un'interfaccia di contatto tra le due parti, nel caso particolare tra le superfici del cilindro e quelle della corda. [27]

In un assieme costituito da più parti, queste interagiscono tra loro scambiandosi delle forze sulle superfici di interfaccia. Le forze che nascono dall'interazione possono essere scomposte in componenti normali all'interfaccia (che possono essere di compressione o di adesione) e in componenti tangenziali dovute all'attrito.

Inoltre, il contatto tra due superfici genera attrito, ovvero la presenza di forze tangenziali proporzionali alle forze di compressione normali alla superficie, che si oppongono al moto relativo dei corpi nel piano di contatto. Questo fenomeno introduce delle non linearità nel sistema.

Come nel nostro caso, le due superfici di interfaccia sono inizialmente non vicine ma entrano in contatto soltanto al raggiungimento di un determinato livello di carico o di spostamento nello spazio, ad esempio il rimbalzo del cilindro fa sì che si scontri con la corda. Si è scelto quindi un tipo di contatto *TYPE 11* (Figura 32), il quale verifica l'attivazione delle forze di contatto, la convergenza delle forze interne e del campo di spostamenti del modello.

Questa interfaccia simula l'impatto tra bordi o linee (nel nostro caso i bordi degli elementi *HEXA* posti superficialmente del cilindro e i *BEAM* della corda). Nel contatto scelto è stato utilizzato un coefficiente di attrito di tipo coulombiano, che per il nylon contro l'acciaio è pari a 0.38 [28], il quale introduce una forza ortogonale all'interfaccia ed è perpendicolare alla direzione del carico tangenziale.

Per questo tipo di contatto sono state effettuate due prove. Nel primo caso è stato applicato un contatto *TYPE11*, ponendo come master le linee della corda e come slave i bordi della superficie esterna del cilindro [29]. Nel secondo sono stati creati due contatti *TYPE11*, uno simmetrico dell'altro.

Durante le simulazioni le forze generate all'interfaccia sia del primo caso che del secondo risultano praticamente uguali, quindi si è deciso di non produrre due contatti simmetrici.

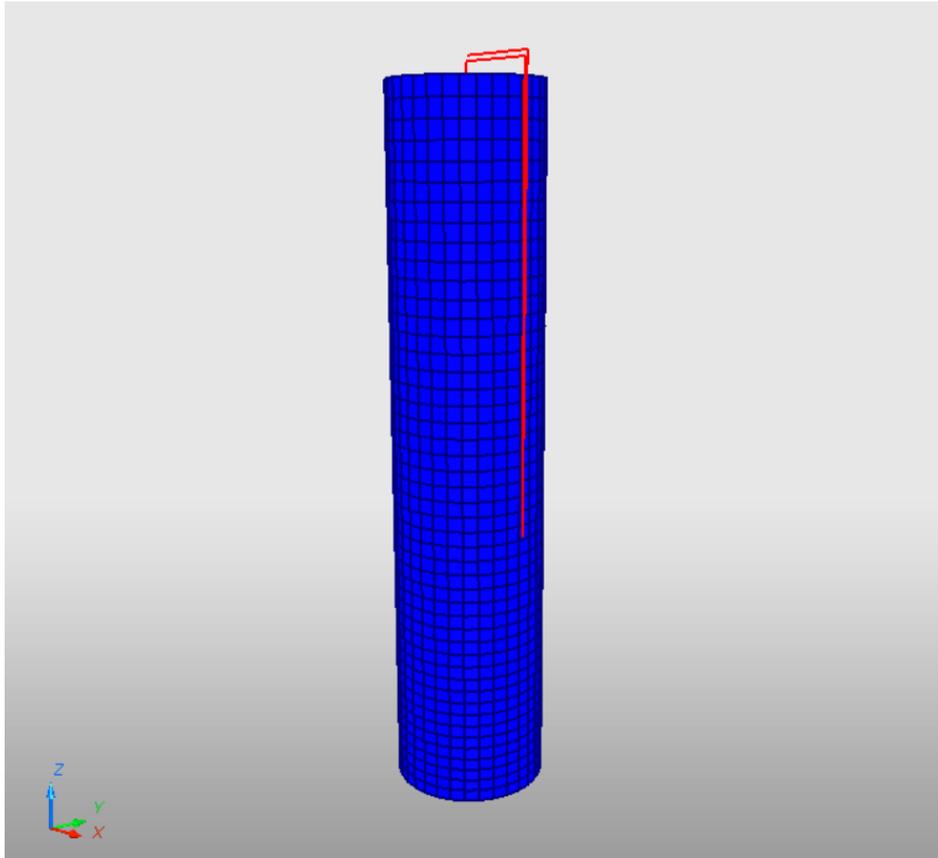


Figura 32. Il tipo di contatto utilizzato in questo caso è il TYPE 11, al fine di bloccare penetrazioni possibili all'impatto tra le due interfacce e le conseguenti forze risultanti.

#### 3.1.4. ACCELEROMETRO

Per la valutazione della forza generata dalla corda ci baseremo sui risultati ricavati dall'accelerometro e riportando le dovute trasformazioni, conoscendo il rapporto tra l'accelerazione e la forza risultante. Adeguando il metodo di installazione usato in fase sperimentale, è stato creato un sistema rigido di nodi e utilizzando tra gli slave uno dei nodi esterni del cilindro. In *HyperCrash* è stato poi applicato un accelerometro al master del sistema rigido, distanziandolo così come nel caso reale, ovvero a 20mm dalla superficie laterale del cilindro (Figura 33).

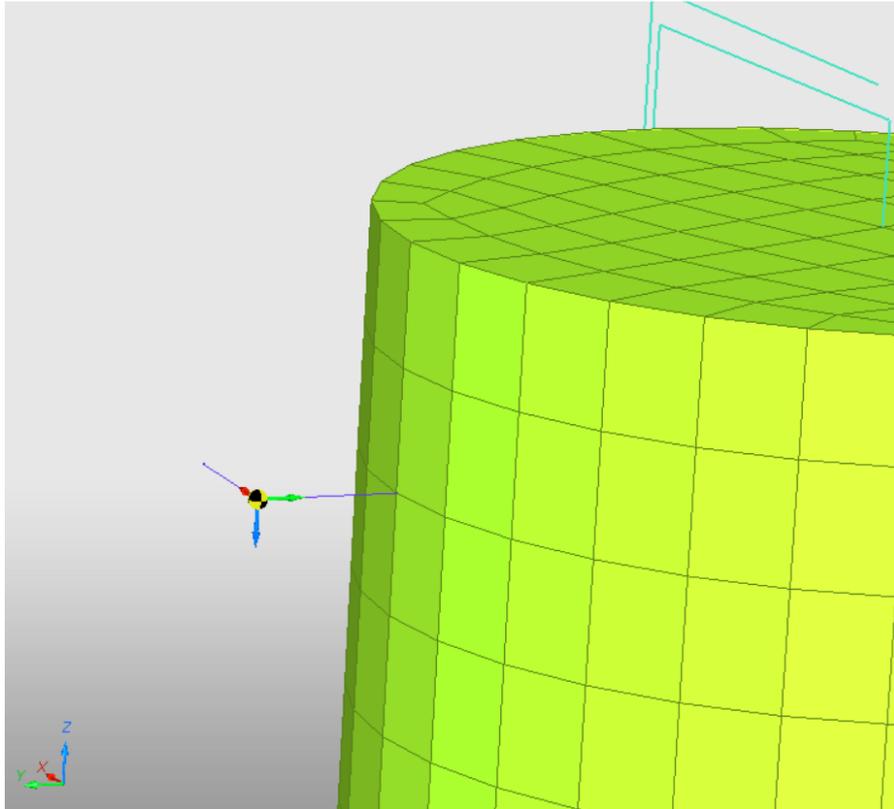


Figura 33. L'accelerometro è posizionato sul master node del corpo rigido, al quale è collegato al cilindro.

### 3.2. MODELLO MANICHINO

A differenza del caso col cilindro, durante il quale le parti sono state create da zero partendo da informazioni sia grafiche che tecniche, per il manichino è stato utilizzato un *dummy* generato dal software *HyperCrash*. Questo modello ad elementi finiti è stato validato e utilizzato al fine di simulare i manichini antropomorfi usati nei crash test. Il dummy nasce in ambito automobilistico e può essere utilizzato in qualsiasi settore dove bisogna testare le collisioni dello stesso e valutare le lesioni che si generano durante l'impatto.

Dalle analisi possono essere ricavati dati quali forze, accelerazioni e spostamenti del dummy per poi valutare in un secondo momento la gravità dell'impatto. Ciò permette di analizzare un crash test in ambiente virtuale e risparmiare sia economicamente che temporalmente, diminuendo il numero di test effettuali sperimentalmente.

Non presenta geometrie interne al corpo umano, ma si basa di una serie di parti formate da elementi SHELL, i quali replicano l'esterno del corpo umano.

Ogni parte è supportato da una serie di sistemi rigidi, ma sul quale possono essere comunque analizzati forze, accelerazioni e spostamenti senza però studiare ciò che succede all'interno del corpo. Il dummy è composto da 38 parti (parti formate dalle SHELL e dalle SPRING).

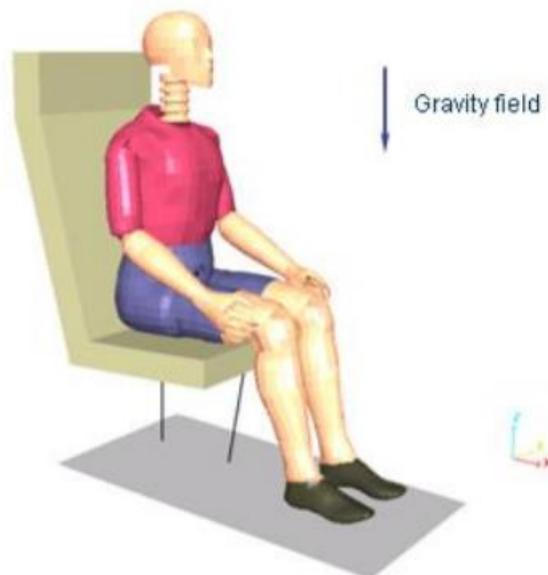


Figura 34. Il dummy in ambiente FEM. Per la creazione del dummy all'interno dell'ambiente FEM vi è bisogno di un sedile, essendo creato appositamente per i crash test in ambito automobilistico.

### 3.2.1. GENERAZIONE DELLA MESH.

Mediante l'uso del comando Safety in HyperCrash è possibile generare un dummy con caratteristiche umane prestabilite dalla suite ALTAIR, quindi proprietà e materiali adeguati al corpo umano.

$$E_{dummy} = 2.07 \text{ GPa}$$

$$\rho_{dummy} = 7.8 * 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

$$\nu_{dummy} = 0.28$$

$$t_{dummy} = 1 \text{ mm}$$

La differenza di base rispetto al cilindro è l'utilizzo di una struttura bidimensionale con elementi *SHELL* rispetto agli elementi *HEXA*, dove i nodi che fanno parte della singola parte sono bloccati localmente mediante un rigid body e ogni parte presenta un master sul quale viene aggiunta la massa.

Parti del modello, quali l'intera gamba, i rigid body e le spring delle parti mancanti sono state generate mediante il comando reflect, il quale fa sì che, scegliendo l'asse di riferimento che è lo stesso del manichino, ribalta l'intera gamba. Inoltre, son stati ricreati i rigidi per ogni parte della gamba e gli stessi sono ricollegati mediante le spring, oltre che collegare mediante una spring la parte superiore della gamba con il rigido del bacino (Figura 35).

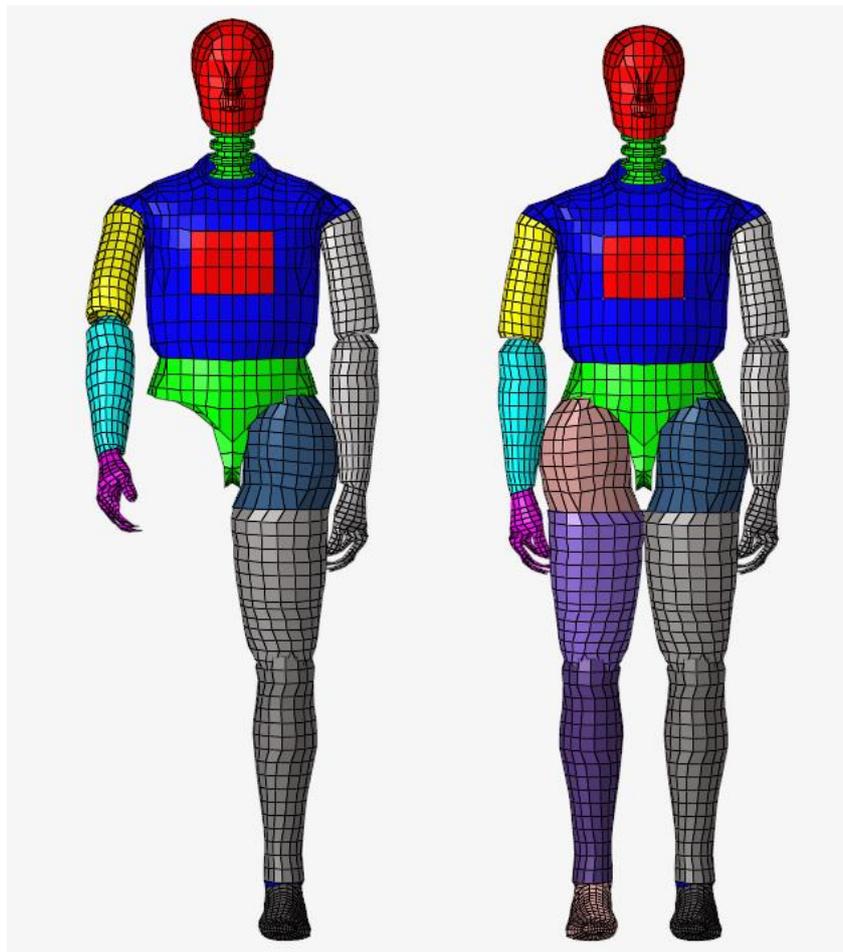


Figura 35. Vista frontale. A sinistra il modello di manichino di partenza. A destra il manichino dopo la creazione dell'arto inferiore e la rotazione del braccio.

L'arto superiore destro era ruotato in posizione diversa da quella che volevamo simulare, ovvero lungo i fianchi come l'arto sinistro. Quindi è stato ruotato l'avambraccio e la mano rispetto al braccio e infine l'arto superiore rispetto alla spalla (Figura 36, Figura 37).

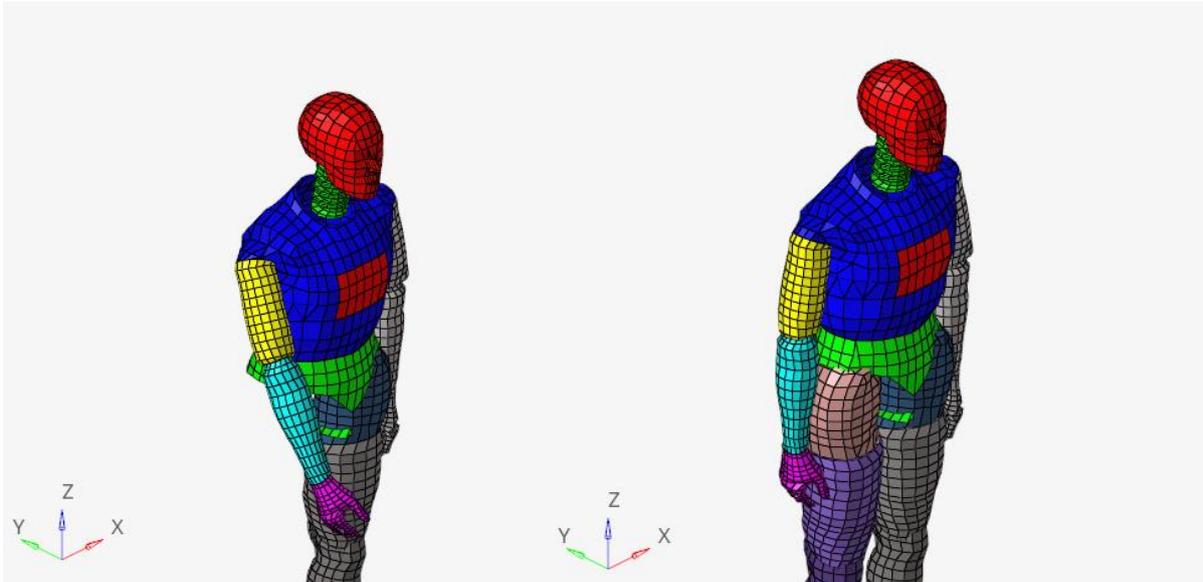


Figura 36. Posizione del braccio prima e dopo la modifica, vista Isometrica.

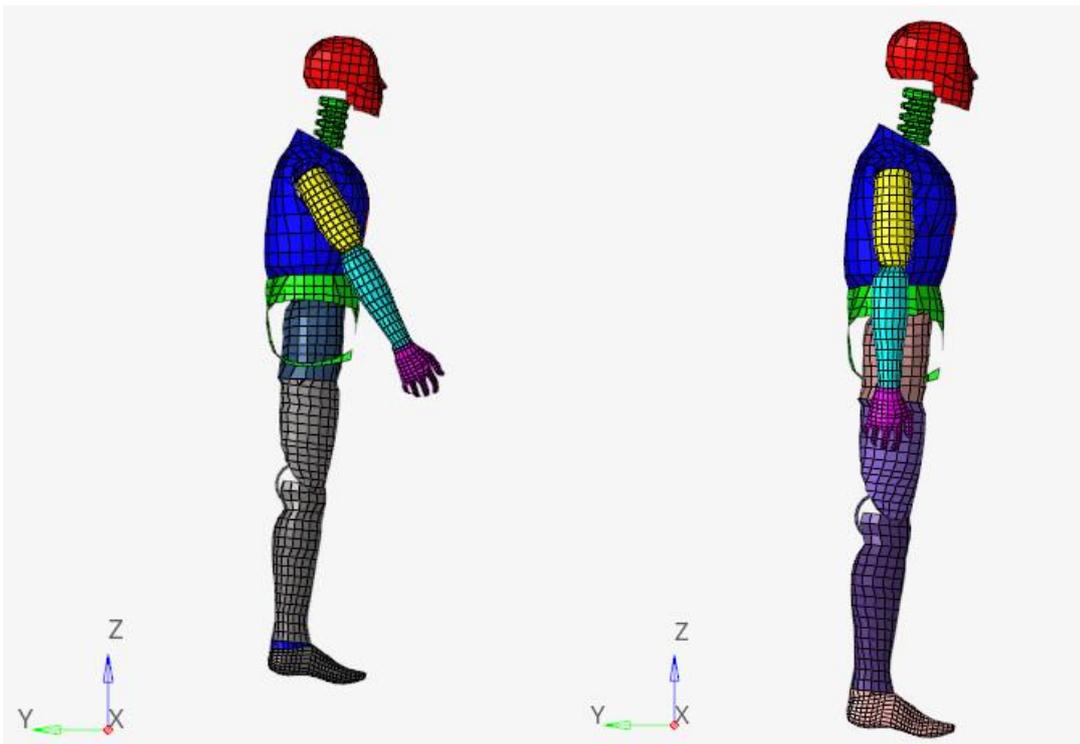


Figura 37. Il dummy prima e dopo la modifica, vista laterale.

## IMBRAGO

In una prima fase di analisi del progetto si è pensato di utilizzare il tool presente in HyperCrash per generare la mesh mediante il tool *Belt Generator*. Il problema sostanziale, il quale porterà al modificare il progetto, è che la cintura per essere generata mediante questo tool dovevano essere presi tre nodi su una parte esterna al corpo, un sedile. Inoltre, seppur utilizzando questo metodo e creando una cintura di sicurezza fittizia scegliendo tre nodi sul corpo del manichino e poi rimodellarlo, questo non assomigliava al caso reale.

Così si è scelto di procedere a un metodo alternativo, ricreando l'imbrago partendo dal corpo del manichino, scegliendo gli elementi che potevano essere utili alla generazione dell'imbrago. Ogni elemento è stato modellato mediante il comando trim al fine di avere un modello verosimile (Figura 38).

Lo spessore,  $t_{imbrago}$ , della SHELL è stata approssimata mediante prove con il calibro su un imbrago basso dell'azienda Black Mountain. La media dei vari spessori è pari a 5mm. Il peso dell'imbrago è stato ricavato mediante ricerche su prodotti simili in vendita, non essendo conosciuto il modello utilizzato durante le prove sperimentali. La protezione toracica ha massa media di 350g, mentre per l'imbrago è di 650g.

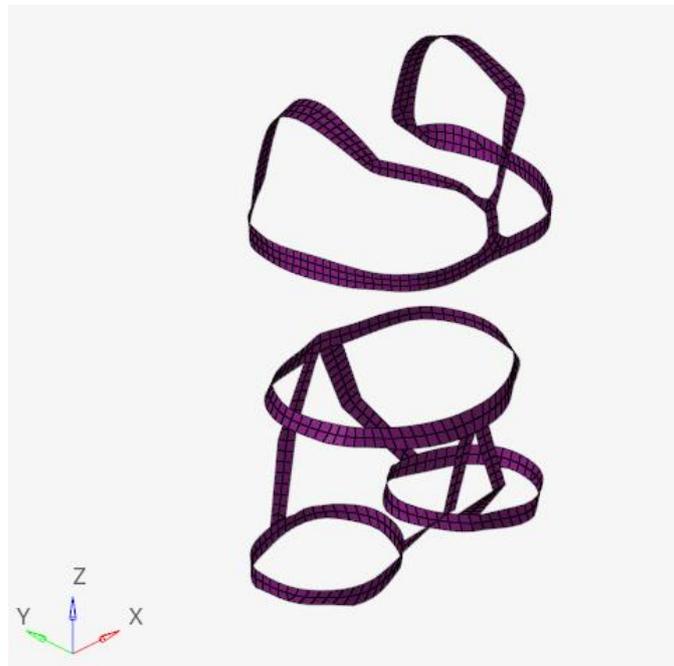


Figura 38. Modello di imbrago generato mediante offset e trim delle shell duplicate, vista isometrica.

Per le proprietà e il materiale dell'imbrago si è scelto di utilizzare ciò che veniva generato automaticamente dal tool Belt Generator. Infatti, la geometria nella cintura di sicurezza non può essere paragonata a un imbrago, ma le sue caratteristiche si approssimano bene.

$$E_{imbrago} = 2.5 \text{ GPa}$$

$$\rho_{imbrago} = 2 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

$$\nu_{imbrago} = 0.35$$

$$t_{imbrago} = 5 \text{ mm}$$

$$m_{imbrago} = 1060 \text{ g}$$

Una volta creato il modello desiderato, quest'ultimo è stato controllato mediante un apposito tool di *HyperWorks*, *QualityIndex* (Figura 39), il quale migliora la mesh e risolve le possibili distorsioni che potrebbero avere gli elementi durante la simulazione, riducendo l'errore.



Figura 39. La parte dell'imbrago è stato ottimizzato mediante il tool *QualityIndex*, minimizzando le distorsioni e non generando errori.

Le due parti dell'imbrago sono poi state collegate tra loro mediante elementi BEAM i quali simulano la connessione tra la protezione superiore e inferiore. Infine, è stata creata la parte corda con lo stesso procedimento del paragrafo 3.1.1. Il modello *imbrago corda* è riportato nella figura a seguire (Figura 40).

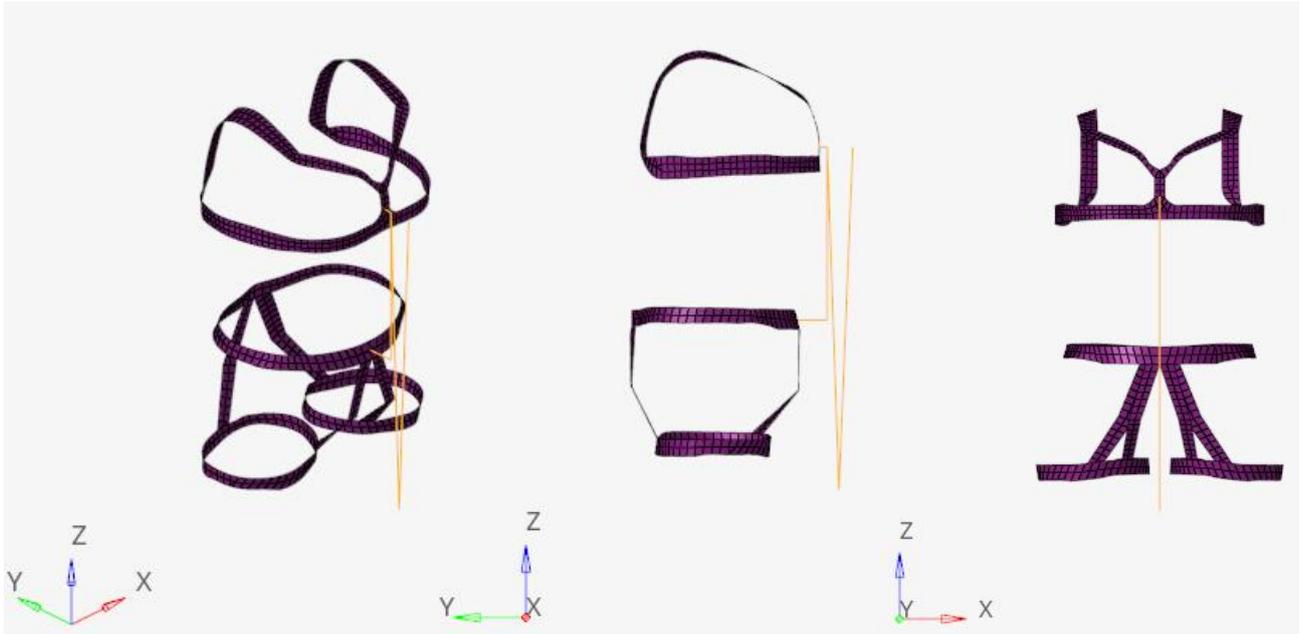


Figura 40. Vista isometrica, laterale e frontale dell'imbragatura. Le due parti sono collegate tra loro da elementi BEAM per simulare la connessione reale.

A seguire sono riportati gli screenshot del modello del dummy compreso di imbragatura e corda a  $F_c = 1$  (Figura 41, Figura 42, Figura 43) e  $F_c = 0.5$  (Figura 44, Figura 45, Figura 46).

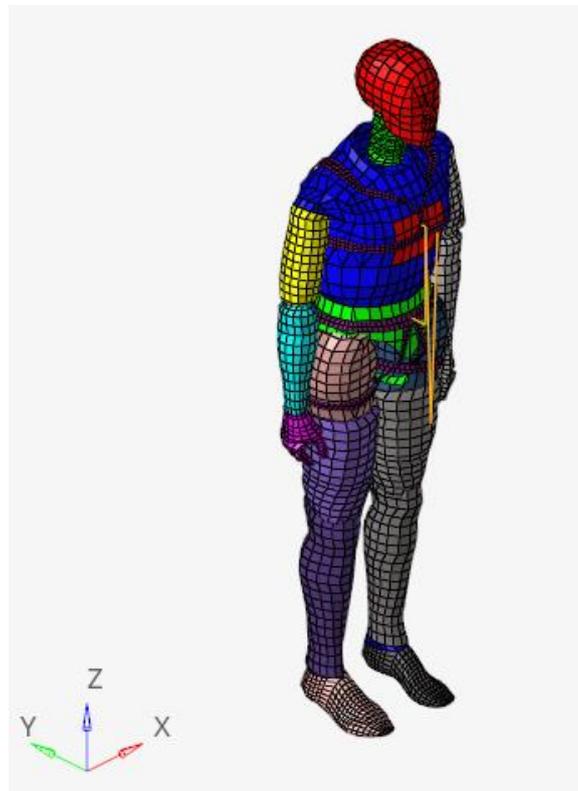


Figura 41. Modello intero dummy imbragato e connesso alla corda, vista isometrica. Caso a  $F_c = 1, l = 1m$ .

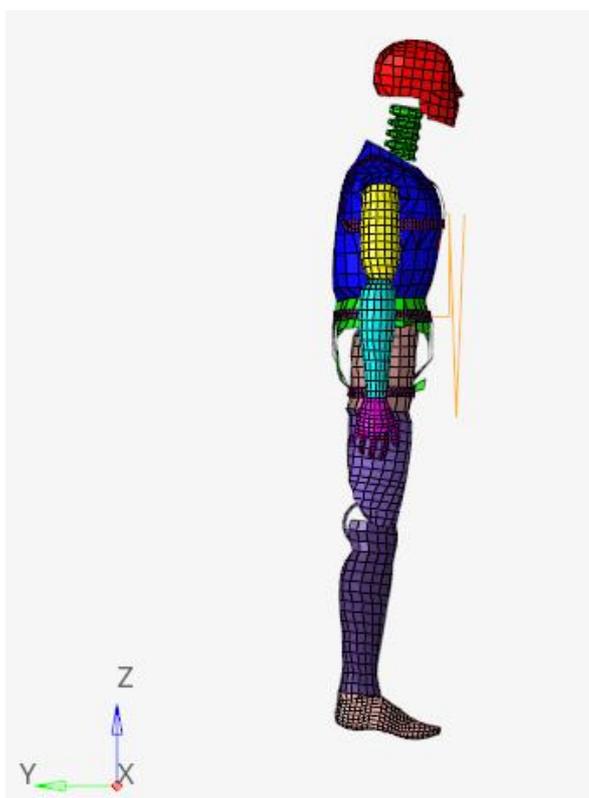


Figura 42. Modello intero dummy imbragato e connesso alla corda, vista laterale. Caso a  $F_c = 1$ ,  $l = 1m$ .

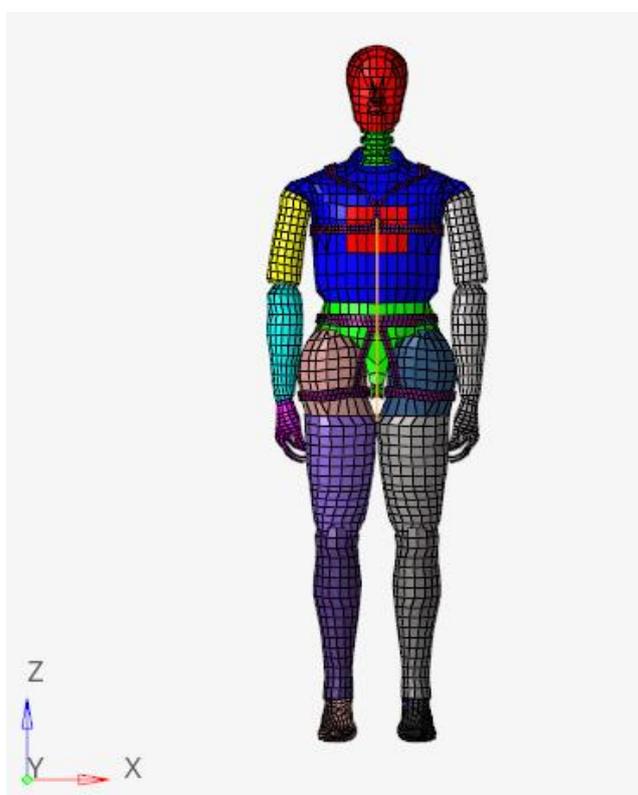


Figura 43. Modello intero dummy imbragato e connesso alla corda, vista frontale. Caso a  $F_c = 1$ ,  $l = 1m$ .

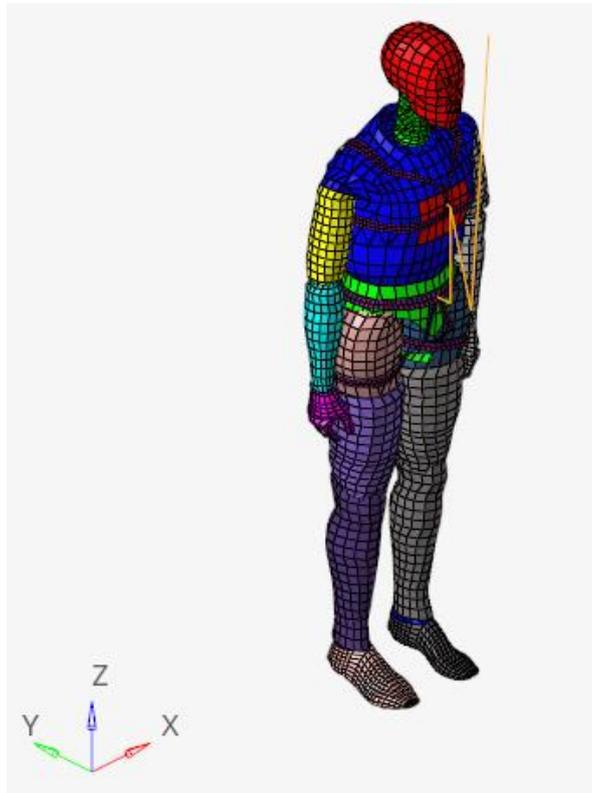


Figura 44. Modello intero dummy imbragato e connesso alla corda, vista isometrica. Caso a  $F_c = 0.5$ ,  $l = 1m$ .

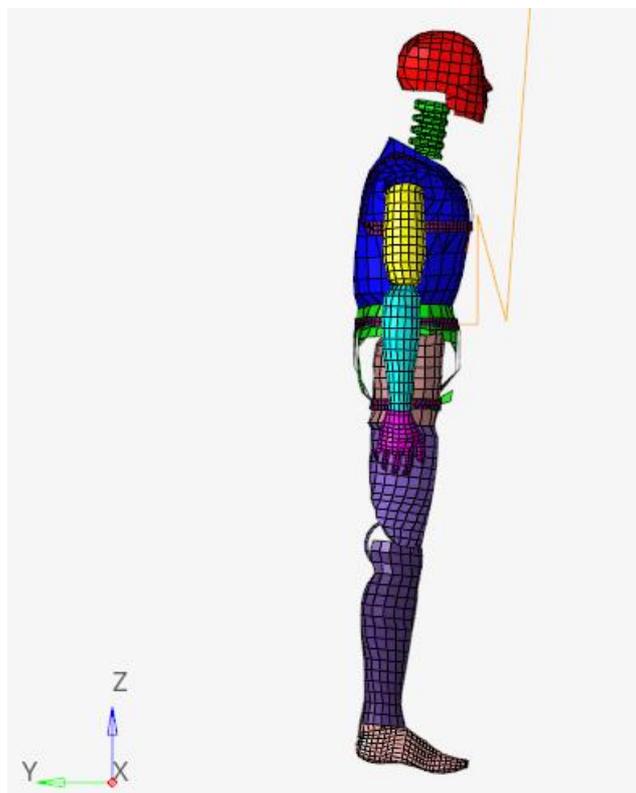


Figura 45. Modello intero di dummy imbragato e connesso alla corda, vista laterale. Caso a  $F_c = 0.5$ ,  $l = 1m$ .

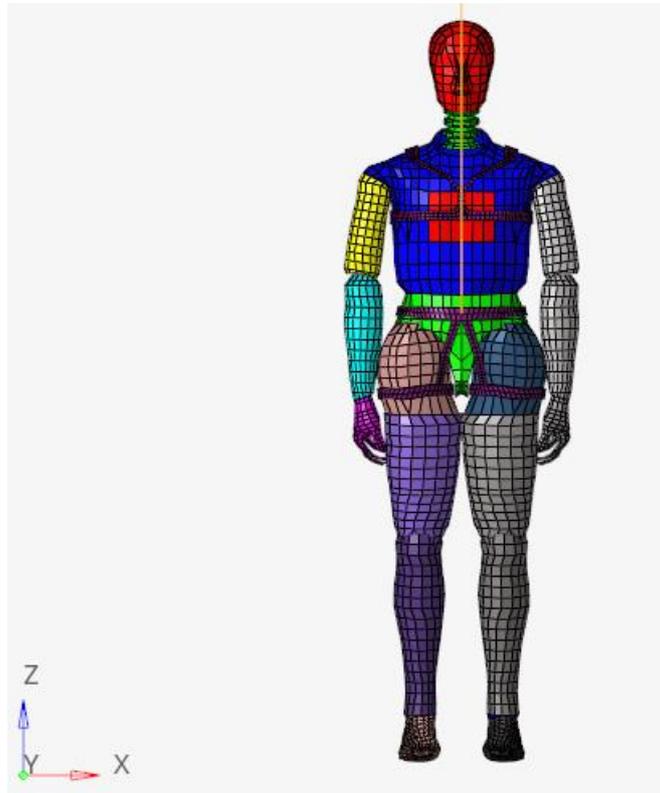


Figura 46. Modello intero dummy imbragato e connesso alla corda, vista frontale. Caso a  $F_c = 0.5$ ,  $l = 1m$ .

### 3.2.2. APPLICAZIONE FORZE, VINCOLI, CONTATTI

Per le considerazioni sul vincolo si ripete lo stesso procedimento attuato per il cilindro. Diverso è il discorso sul *gravity load* applicato sul corpo del manichino. Essendo il corpo composto da più parti con elementi SHELL e i corrispettivi rigid body, i nodi dove è stato applicato il gravity load sono i master di ogni rigid body che compongono il manichino, come se fosse il baricentro di ogni parte del corpo. La freccia in Figura 47 indica la gravità risultante su tutto il corpo.

La somma della massa dell'imbrago e della corda è di circa due ordini di grandezza inferiori rispetto alla massa del manichino, non è stato quindi trascurata la forza di gravità generata da queste parti, (Figura 48).

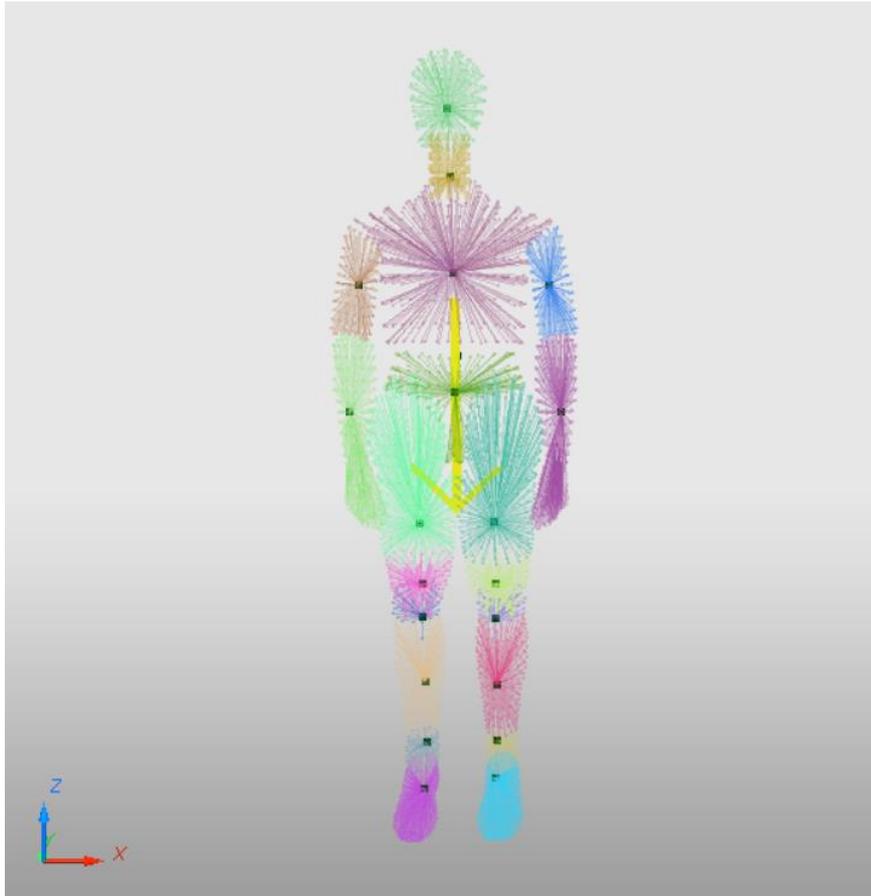


Figura 47. Tutti i rigid body presenti nel modello del manichino. Tutti i master node sono stati selezionati per essere caricati dalla forza di gravità. Il carico risultante è evidenziato dalla freccia il giallo diretta verso il basso.

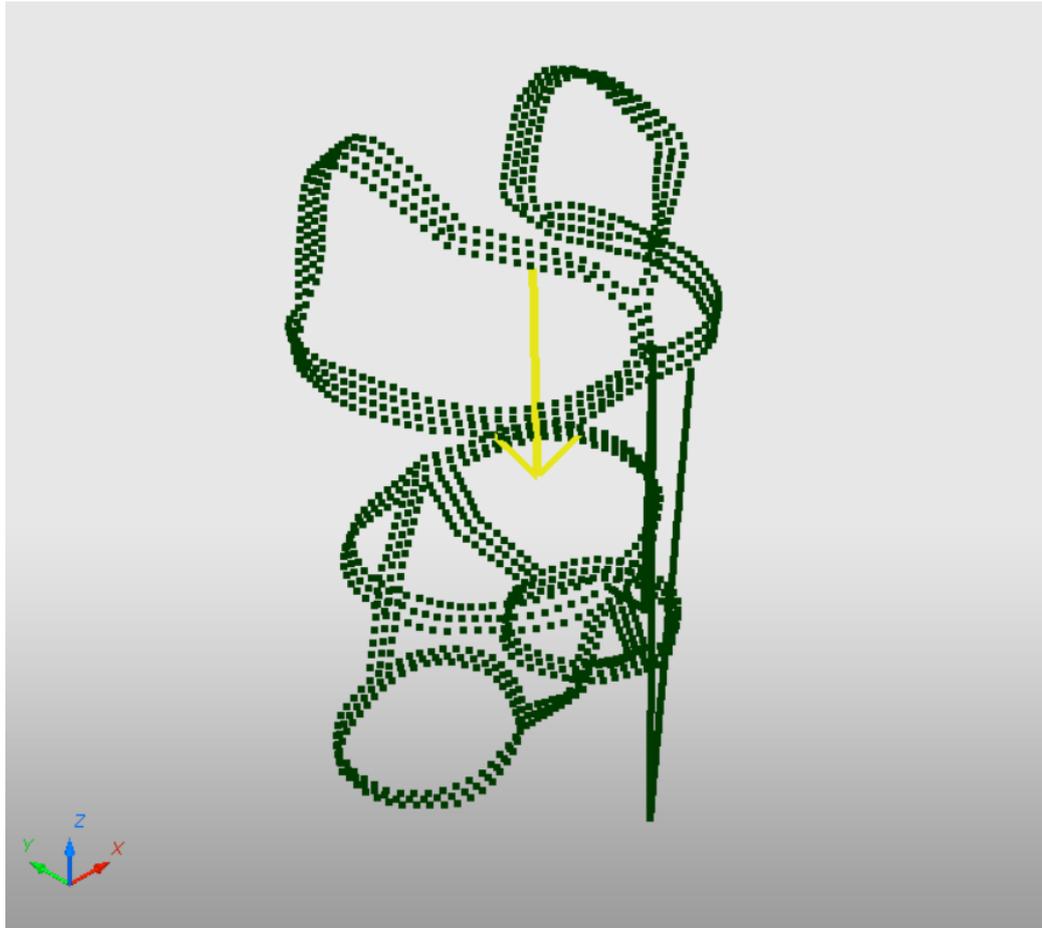


Figura 48. Il gravity load applicato alle parti corda e imbrago, caso a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$ . Il carico risultante è evidenziato con una freccia rivolta verso il basso.

I contatti utilizzati sono quelli riportati nel paragrafo 3.1.3. del cilindro. A differenza del cilindro qui abbiamo due parti, manichino e imbrago (Figura 49), formati da elementi SHELL, il quale hanno una propria thickness. Al fine di non creare penetrazioni viene aggiunto il minimo valore di *gap*, pari al valore medio delle thickness dei due corpi.

$$gap_{min} = \frac{t_{dummy} + t_{imbrago}}{2} = 3$$

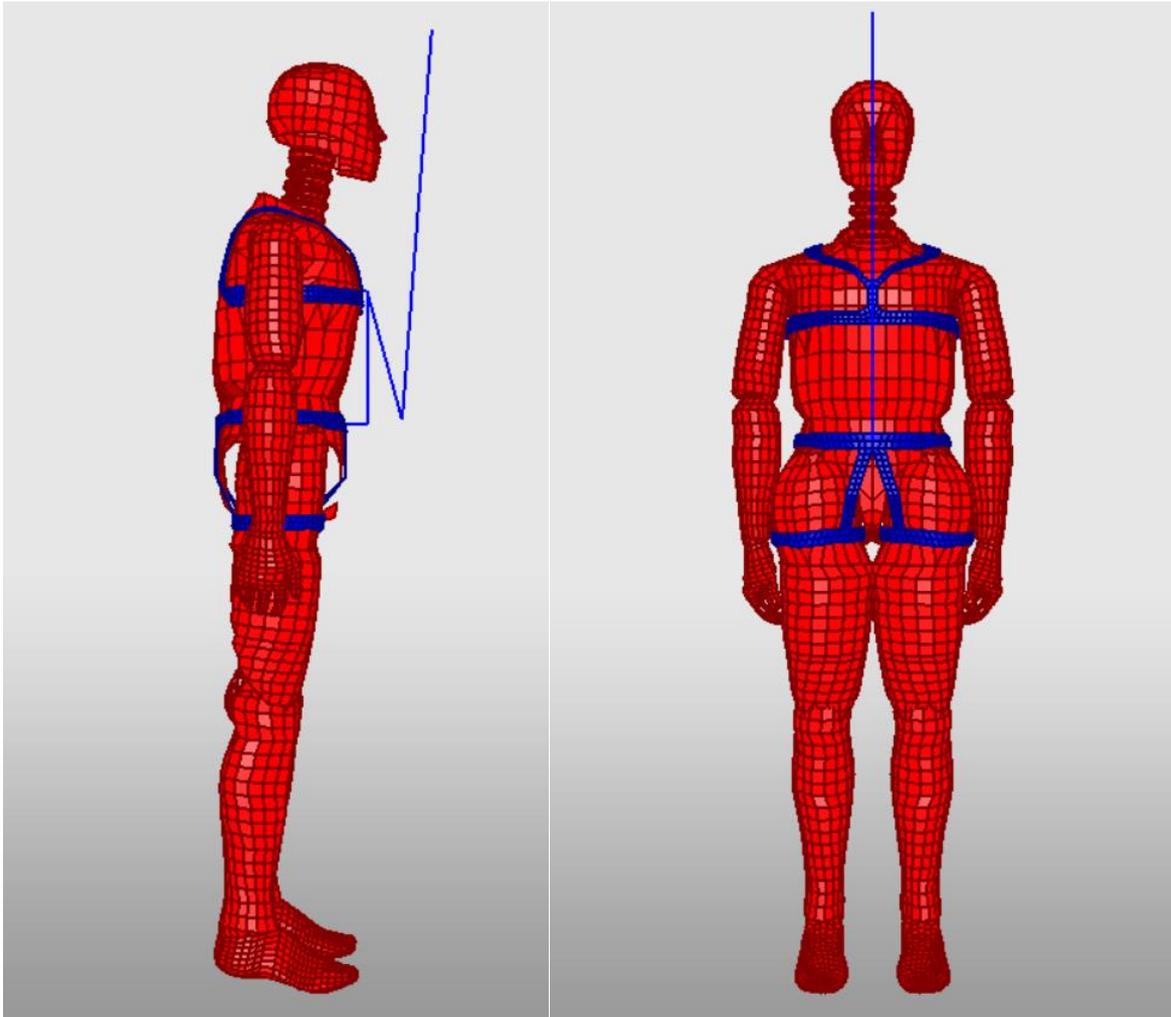


Figura 49. Interfaccia di contatto TYPE11 tra manichino e imbrago-corda.

In aggiunta all'interfaccia TYPE11 può essere implementata la *TYPE7* (Figura 50), la quale è un'interfaccia a impatto multiuso, che modella il contatto tra una superficie master e un gruppo di nodi slave. È un'interfaccia automatica tra un nodo e una superficie di contatto, il quale genera penalità con rigidità variabile. Si può generare automaticamente la versione simmetrica, invertendo il master con lo slave. Dato che la TYPE11 lavora *edge to edge* mentre la TYPE7 nodi contro superfici, possono essere utilizzati insieme per avere un controllo all'interfaccia migliore [29].

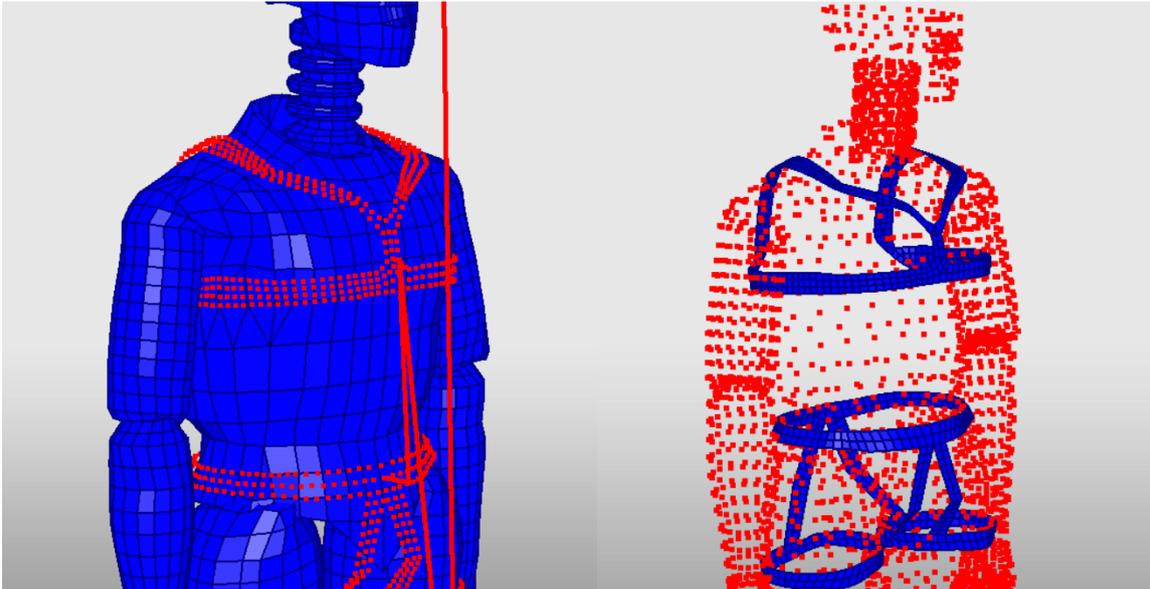


Figura 50, Interfaccia di contatto TYPE7 e la sua simmetrica.

### 3.2.3. ACCELEROMETRO

Nel caso del dummy sono state usate le informazioni ricavate dai report, ovvero l'accelerometro è stato posto all'interno di un taschino del «pantalone» del manichino a lato, Figura 51.



Figura 51. L'accelerometro, per le informazioni ricevute, è stato posizionato nel taschino destro del “pantalone” del manichino.

Si è provato così a posizionare più di un accelerometro, sia studiando i vari grafici in post-processing su HyperGraph che verificando che la posizione fosse simile a quanto era stato riferito.

La soluzione migliore è quella dell'accelerometro posizionato a lato della coscia, sfruttando sempre il metodo usato per il cilindro, quindi creando un sistema rigido al quale è stato posizionato l'accelerometro sul master node.

A differenza del caso col cilindro, essendo il dummy formato da shell e rigidi che bloccavano il movimento tra i nodi della stessa parte, è stato svincolato un nodo dal set del rigido della coscia e quindi replicato ciò che è stato fatto sul cilindro, a Paragrafo 3.1.4. , Figura 52.

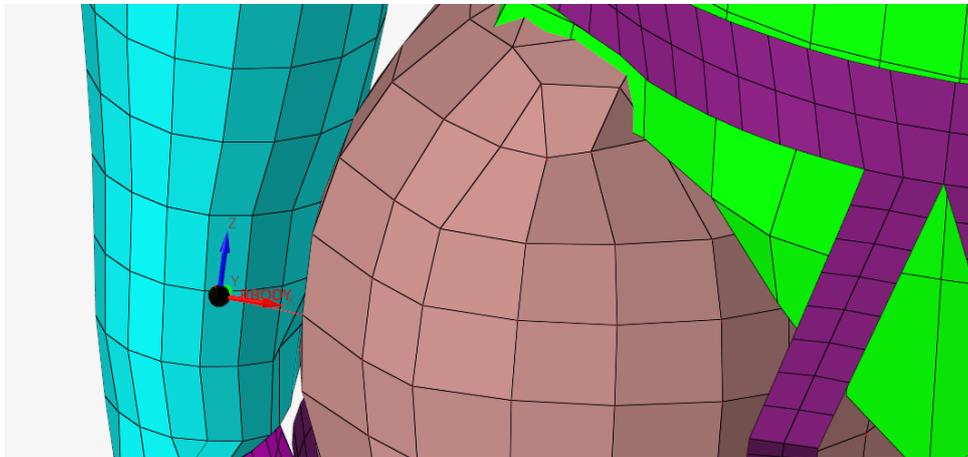


Figura 52. Posizione dell'accelerometro, a lato dell'arto inferiore.

## 4. RISULTATI

In questa sezione vengono esposti i risultati delle elaborazioni FEM, confrontandoli con i risultati ottenuti durante i test sperimentali. Le analisi effettuate mediante l'uso di RADIOSS sono state riportate in HyperGraph. I grafici sono stati creati mediante lettura dell'accelerometro.

Al fine di ricavare la forza, l'uscita dell'accelerometro ( $\frac{mm}{ms^2}$ ) sarà moltiplicata per  $10^3$  per la massa del grave in caduta e della corda. I valori ottenuti, riferendoci alle unità di misura utilizzate nella prova, saranno nell'ordine dei  $kN$ . Per una migliore lettura sono stati trasformati in  $N$ .

I grafici ottenuti mediante HyperGraph sono stati confrontati con i grafici ricavati dal set di dati delle prove sperimentali. Nei grafici vengono riportate le finestre di osservazione del primo picco, durante il quale si ha il massimo valore della forza.

Nell'analisi FEM, così com'è stata impostata nel nostro studio, sono contemplate la forza lineare elastica della corda e la forza di gravità che agisce sul corpo in caduta. Le curve delle forze ricavate da tali analisi risultano avere un andamento parabolico, simmetrico rispetto al valore massimo  $F_a$  e avente lo stesso tempo di caduta e risalita. I risultati sono quindi coerenti con ciò che è stato imposto nel modello.

Nelle analisi sperimentali, oltre alle forze presenti nella simulazione, agiscono le forze dissipative della corda. Infatti, sia in fase di caduta che di risalita del corpo, si osserva come l'andamento della forza nel tempo sia diverso rispetto alla curva ricavata mediante FEM. Ciò è dovuto all'allungamento e all'accorciamento della corda che, durante queste fasi, varia la velocità dissipando energia. Si può dedurre che il discostamento tra i due risultati è legato allo smorzamento.

Un esempio è riportato nel Grafico 1 nel caso della massa metallica a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$ . La differenza tra le forze in caso sperimentale e quella ricavata mediante simulazione varia maggiormente nelle fasi di allungamento e accorciamento della corda, durante le quali si ha una variazione di velocità e una conseguente dissipazione di energia.

La massima variazione di forza si ha nella fase di risalita, pari a  $1454 N$ . Questa infatti, raggiunto il valore di  $F_a$ , comincia a decrescere velocemente (nella fase di recupero dell'allungamento) per poi rallentare nella fase finale. La finestra di osservazione del caso sperimentale non è simmetrica come nel caso delle simulazioni. Infatti, la fase di risalita è più lenta di  $10ms$  rispetto alla fase di caduta.

Nel Grafico 2 è invece riportata la differenza delle forze misurate sperimentalmente e simulate mediante FEM nel caso del manichino a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$ . Il manichino risente maggiormente delle forze dissipative, risultando un valore massimo pari a 1551 N. La fase di risalita nel caso sperimentale è più lenta di 20ms rispetto alla fase di caduta.

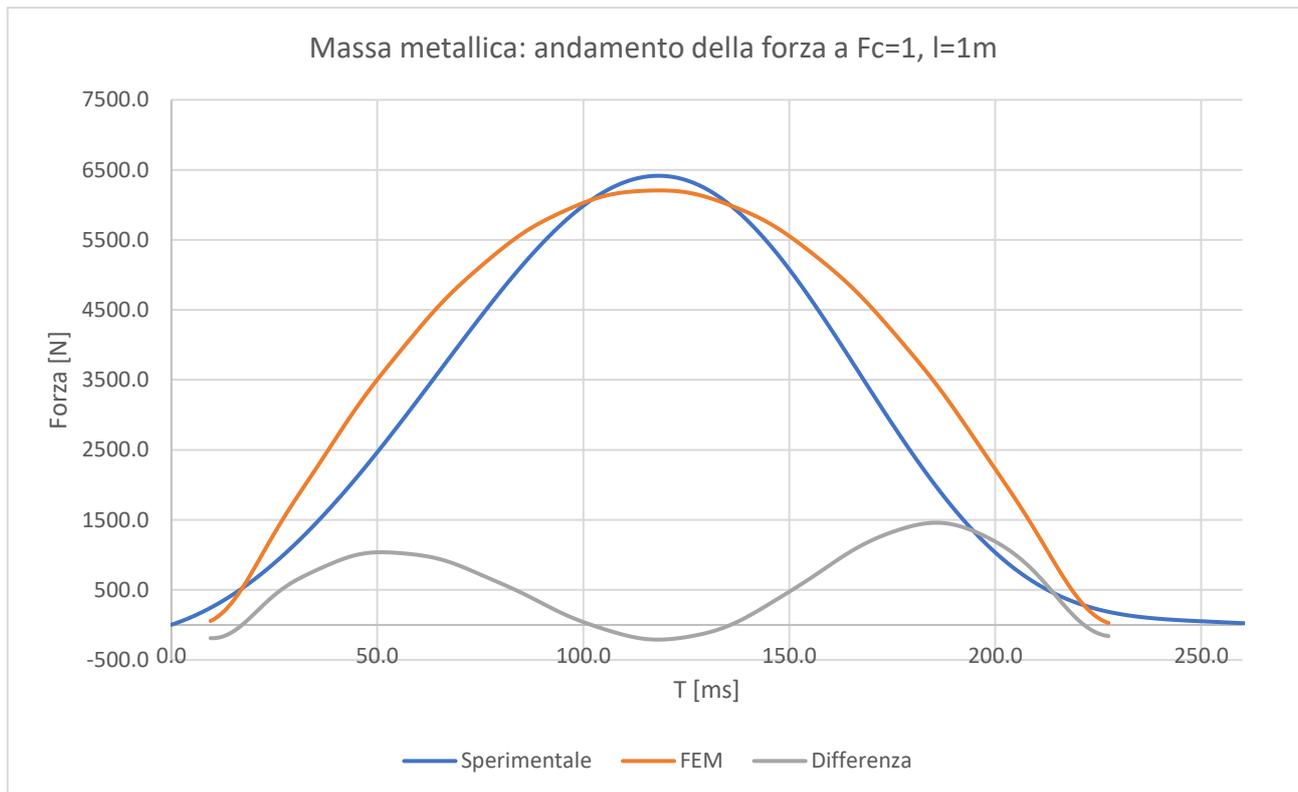


Grafico 1. Caso del cilindro metallico: andamento della forza generata dalla corda a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$  e relativa differenza di forza dovuta alla dissipazione.

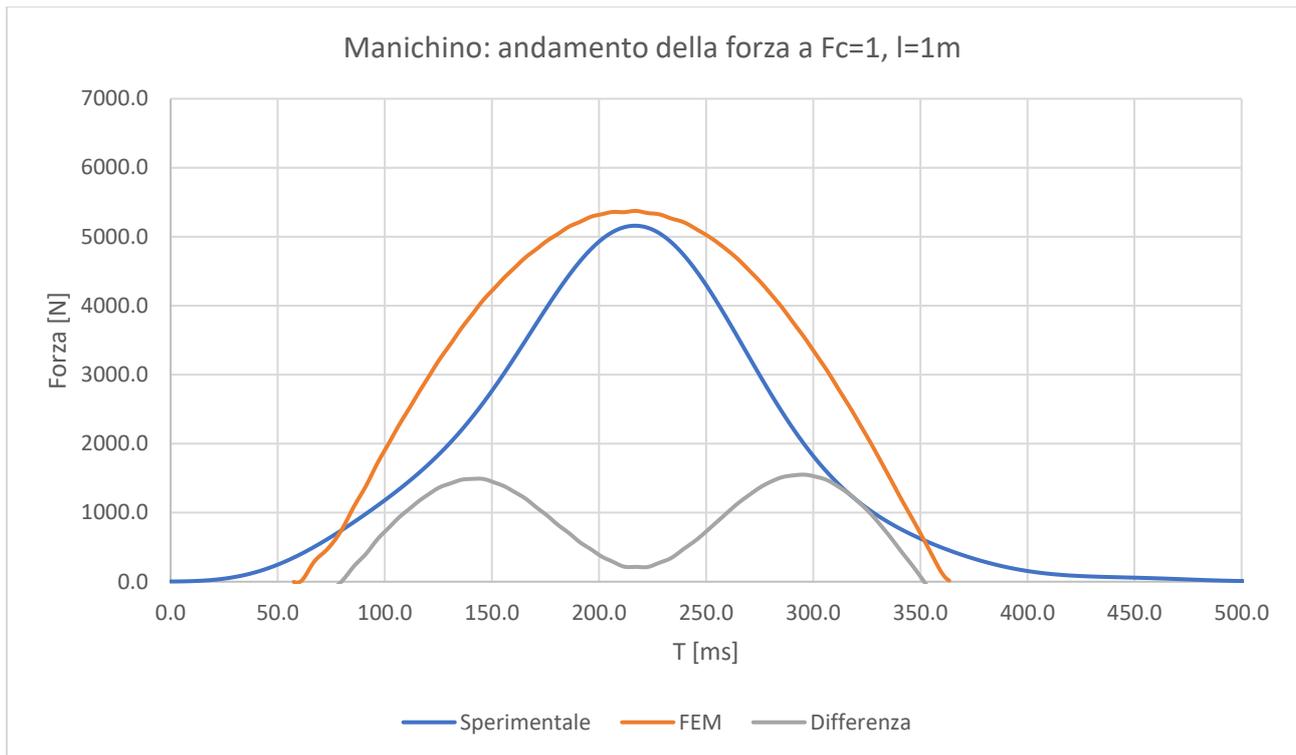


Grafico 2. Caso del manichino: andamento della forza generata dalla corda a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$  e relativa differenza di forza dovuta alla dissipazione.

Questa problematica è presente in tutti i confronti effettuati. Di seguito sono riportati i grafici nei quali sono stati comparati i valori rilevati durante le prove sperimentali (in blu) e mediante l'analisi FEM (in arancione).

MASSA METALLICA: COMPARAZIONE DATI SPERIMENTALI E FEM A  $F_c = 0.5$ .

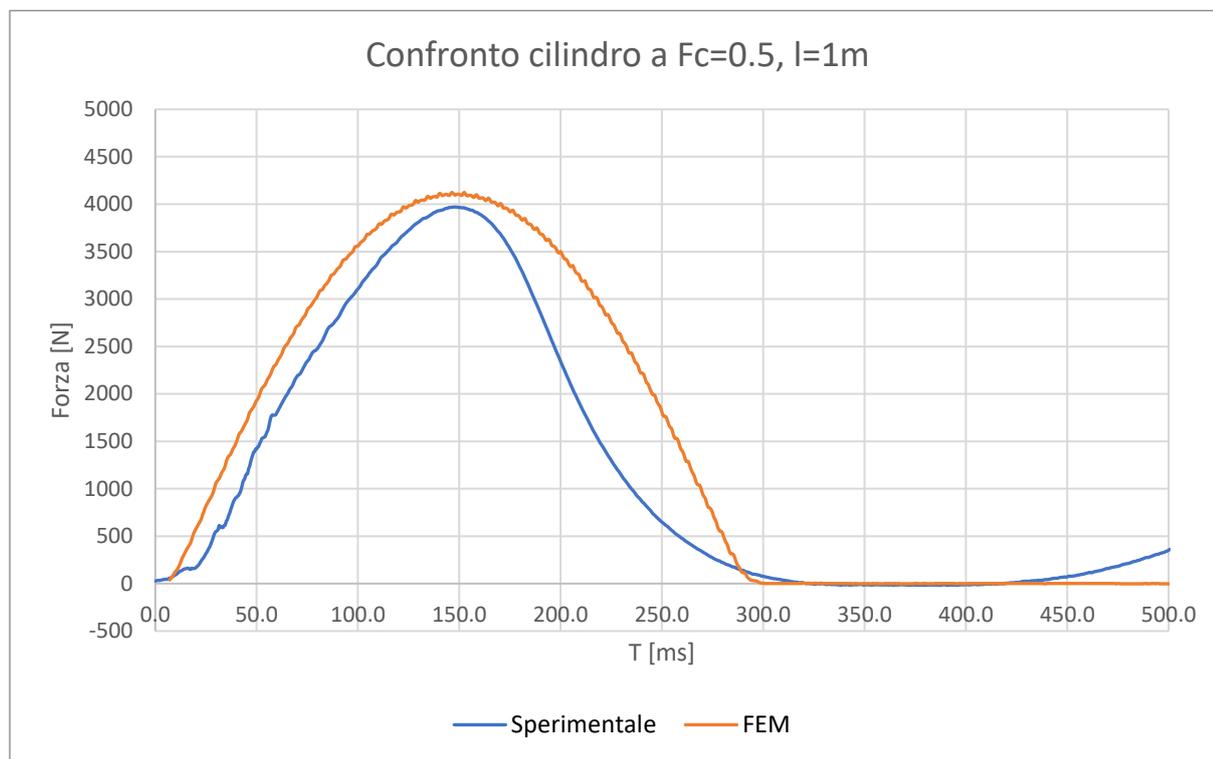


Grafico 3. Massa metallica: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$  e  $l = 1m$ .

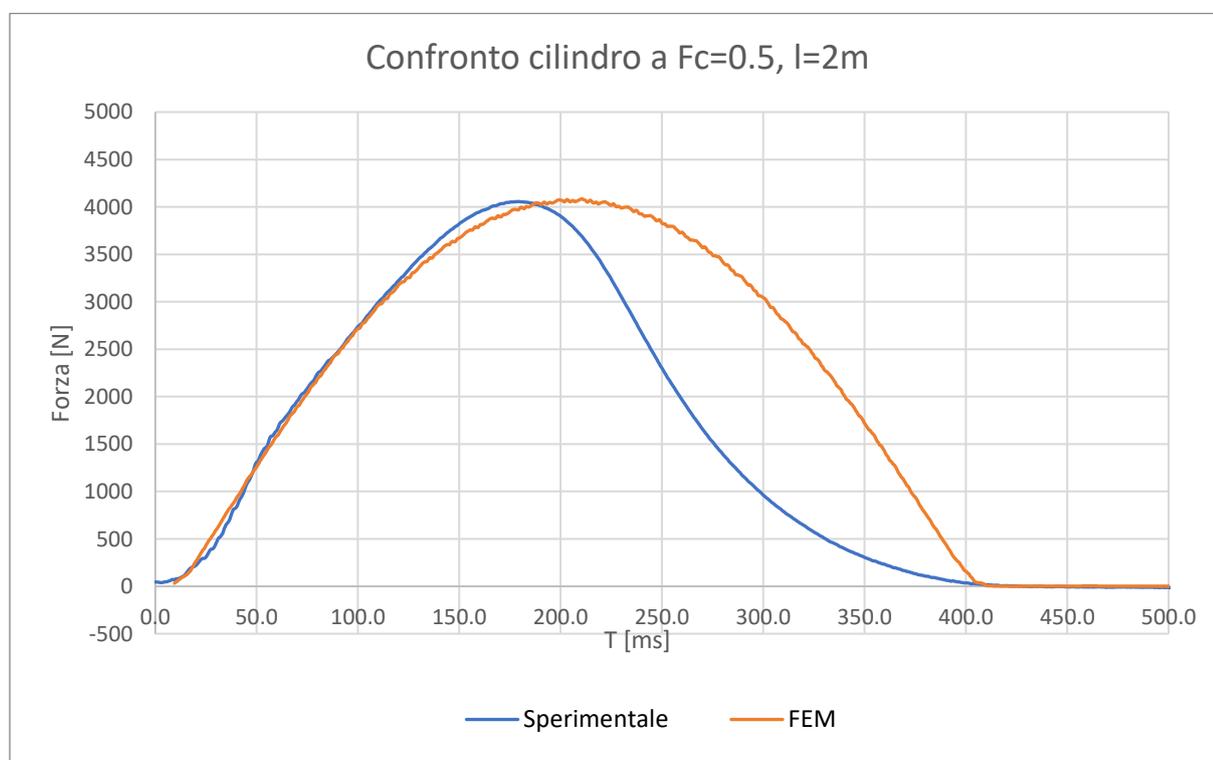


Grafico 4. Massa metallica: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$  e  $l = 2m$ .

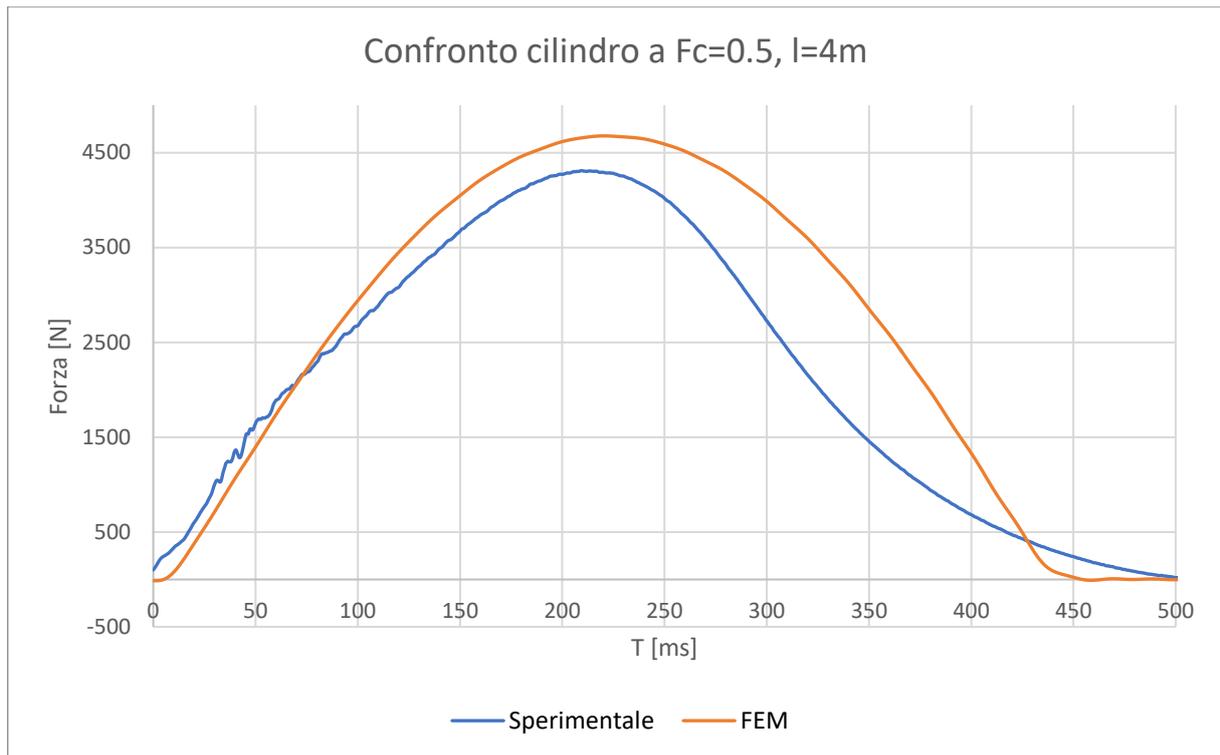


Grafico 5. Massa metallica: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$  e  $l = 4m$ .

Dai risultati plottati, con il caso in cui il fattore di caduta sia pari a 0.5, si nota che in tutti e tre i grafici il valore della  $F_a$  sia leggermente superiore al valore sperimentale, con una differenza tra caso sperimentale e analisi FEM che varia dal 3.9% per il caso a  $l = 1m$  fino all' 8.5% per il caso a  $l = 4m$ . Al variare della lunghezza della corda il valore della  $F_a$  aumenta, passando da  $4126N$  a  $l = 1m$  a  $4676 N$  a  $l = 4m$ . Come anticipato, essendo un modello lineare elastico, gli effetti della dissipazione sono stati trascurati e ciò fa sì che l'andamento della curva elaborata mediante analisi FEM si discosti dal caso sperimentale. La finestra temporale durante la quale agisce il fenomeno cresce all'aumentare della lunghezza della corda. Risulta un maggior discostamento tra la finestra temporale del caso sperimentale inferiore di 50ms dell'analisi FEM.

Di seguito sono riportati i valori della  $F_a$  ricavati mediante analisi FEM dei tre casi, comparandoli con il caso sperimentale (Tabella 3).

Massa metallica - $F_c=0.5$			
Lunghezza corda (m)	Fa SPER (N)	Fa FEM (N)	Differenza (%)
1	3970	4126	3.9
2	4057	4224	4.1
4	4310	4676	8.5

Tabella 3. Massa metallica: differenza della  $F_a$  tra caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$

COMPARAZIONE DATI SPERIMENTALI E FEM A  $F_c = 1, l = 1m$ .

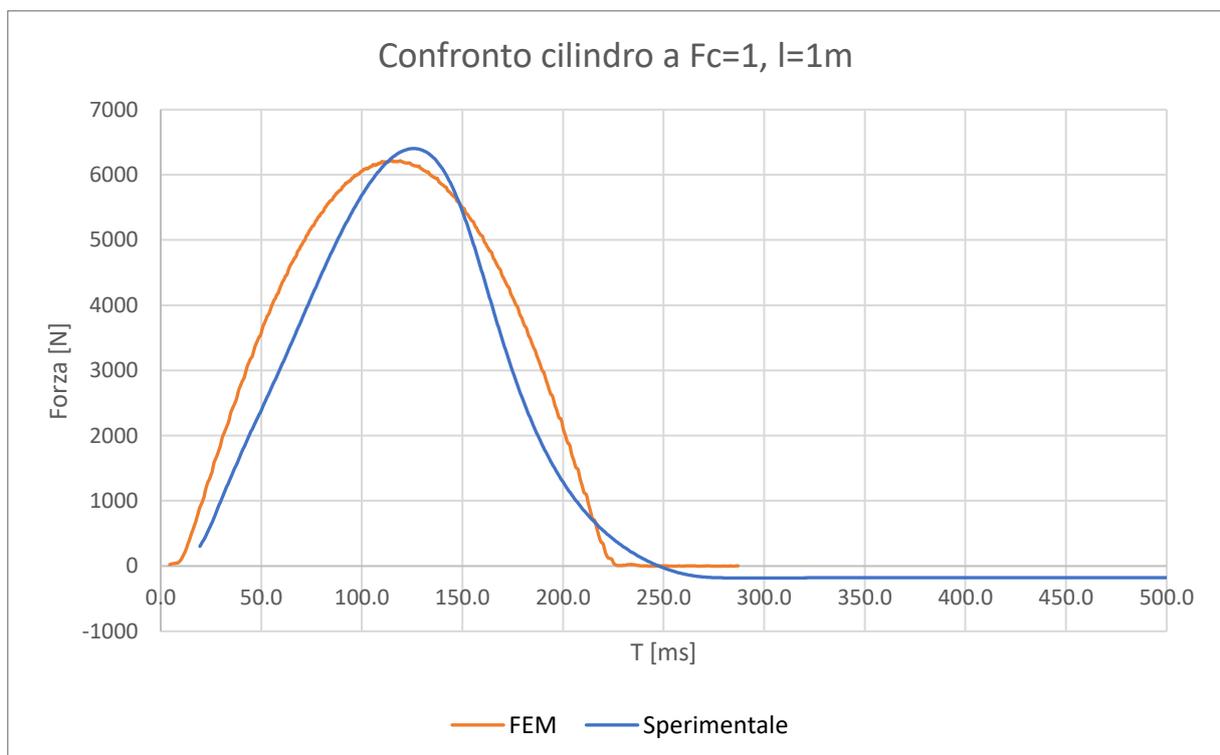


Grafico 6. Massa metallica: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$ .

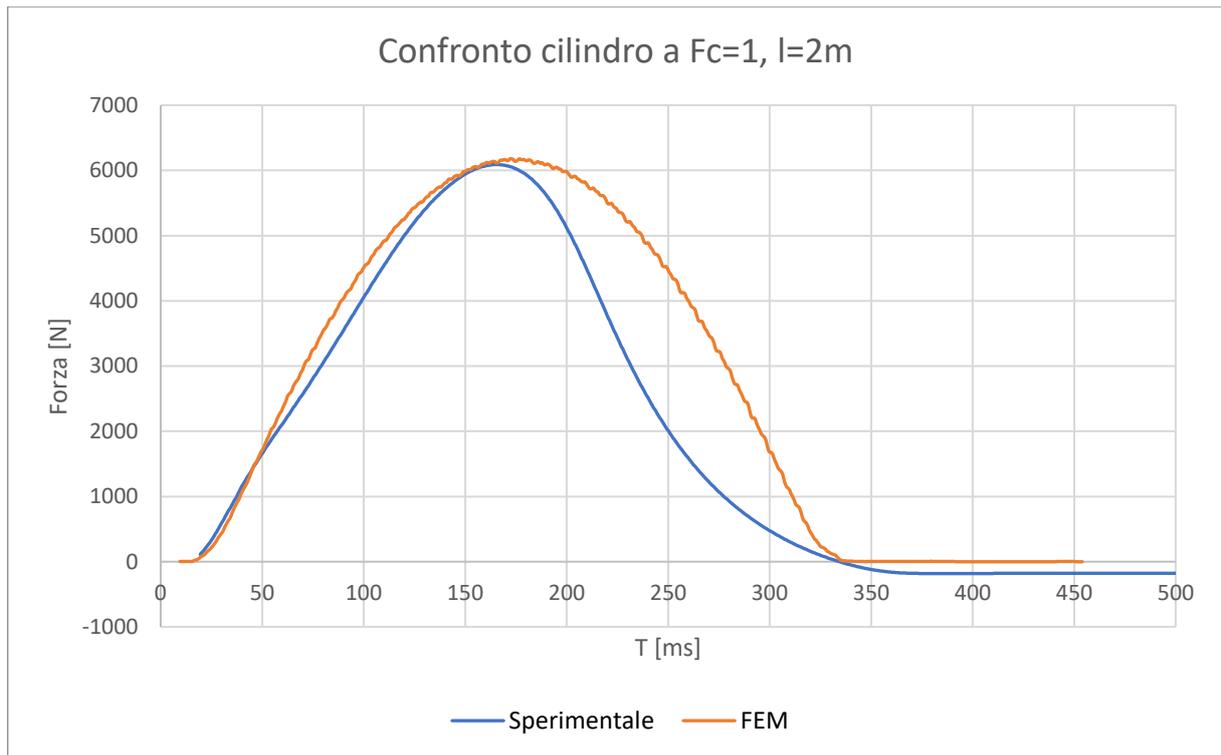


Grafico 7. Massa metallica: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$  e  $l = 2m$ .

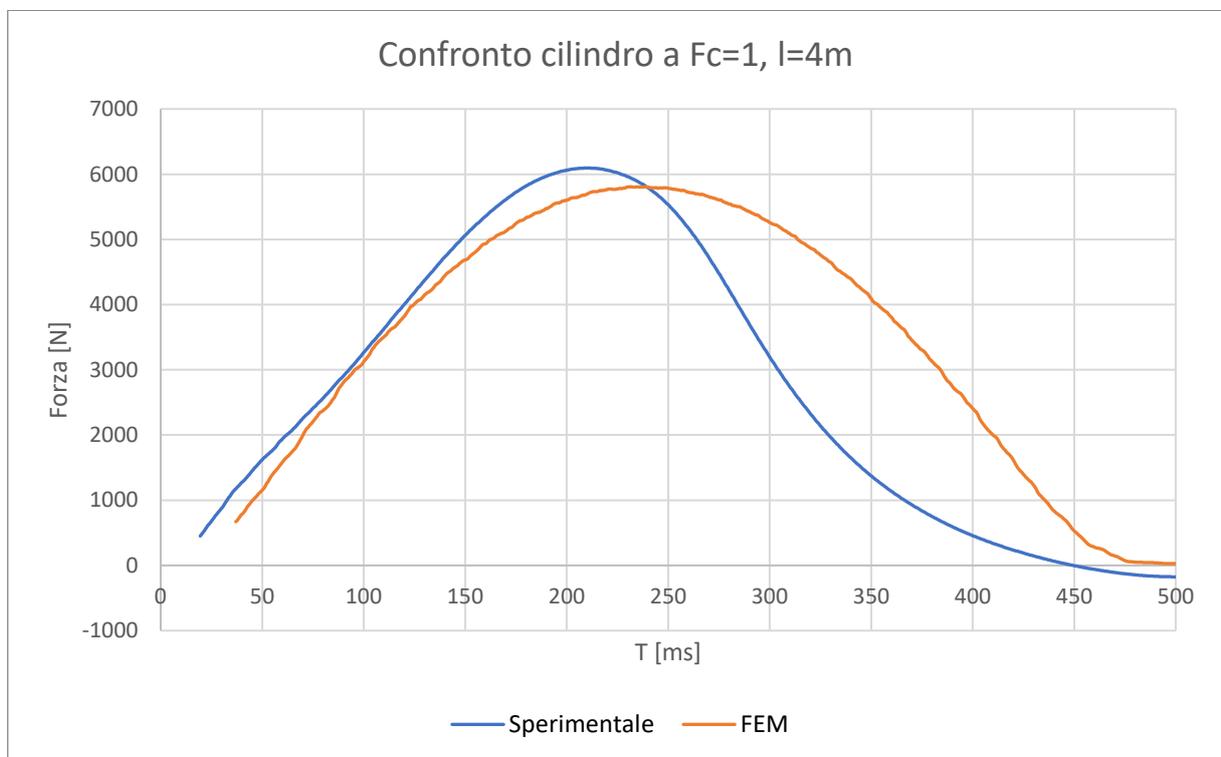


Grafico 8. Massa metallica: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$  e  $l = 4m$ .

Nel caso a  $F_c = 1$  non si ha un superamento sistematico del valore di  $F_a$  delle analisi FEM a differenza del caso  $F_c = 0.5$ . La differenza dei picchi risulta essere migliorata, passando da 1.0% per il caso a  $l = 2m$  e raggiungendo i 4.7% per  $l = 4m$ . Come per i valori sperimentali, la  $F_a$  subisce un decremento all'aumentare della lunghezza della corda, passando dai  $6380N$  a  $l = 1m$  fino a  $5890N$  a  $l = 4m$ . La finestra temporale cresce all'aumentare della lunghezza della corda, con una differenza maggiore nel caso  $l = 1m$ .

Massa metallica - Fc=1			
Lunghezza corda (m)	Fa SPER (N)	Fa FEM (N)	Differenza (%)
1	5278	4979	6.2
2	5921	5721	3.4
4	6150	5669	7.8

Tabella 4. Massa metallica: differenza della  $F_a$  tra caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$

#### MANICHINO: COMPARAZIONE DATI SPERIMENTALI E FEM A $F_c = 0.5$ .

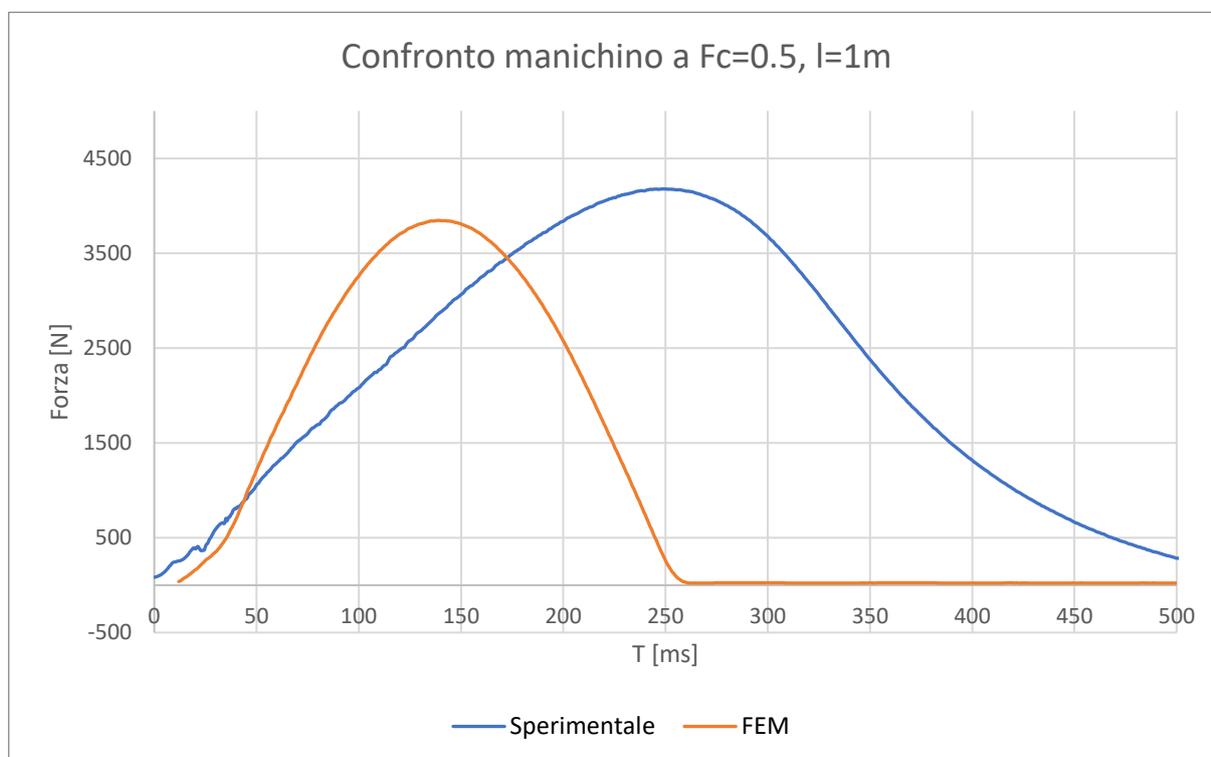


Grafico 9. Manichino: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$  e  $l = 1m$ .

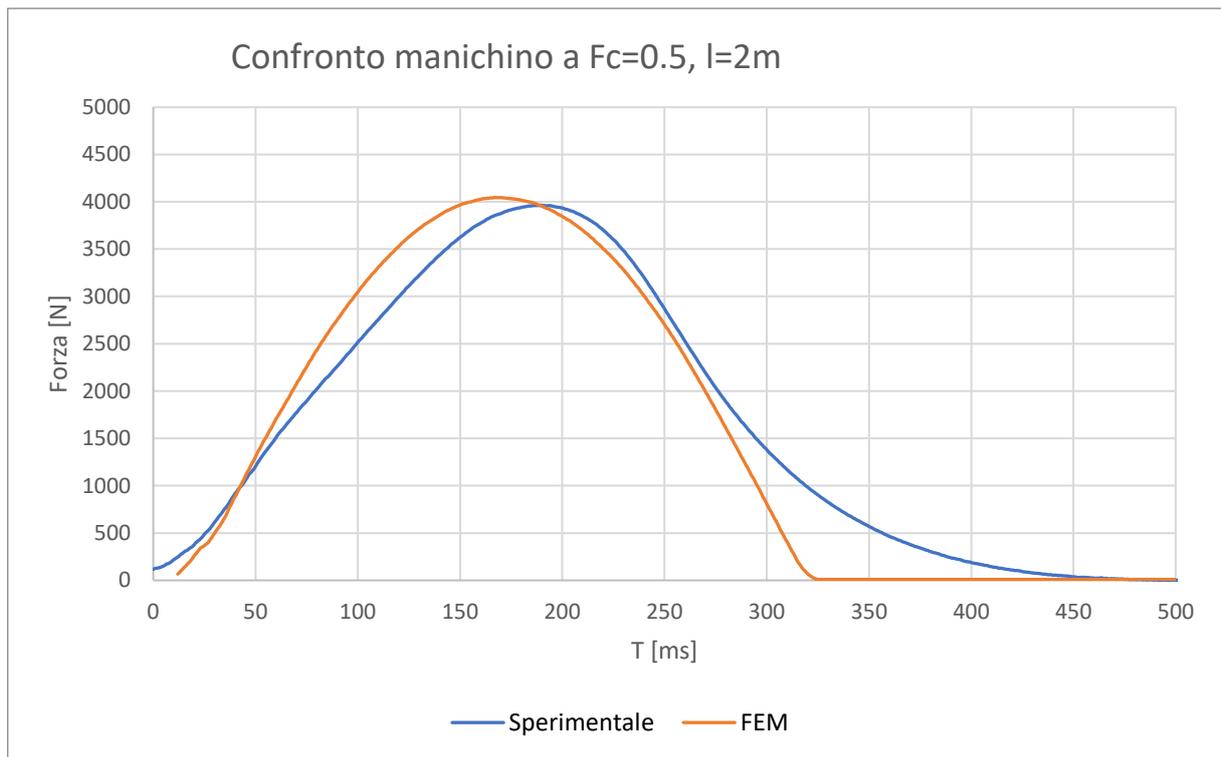


Grafico 10. Manichino: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$  e  $l = 2m$ .

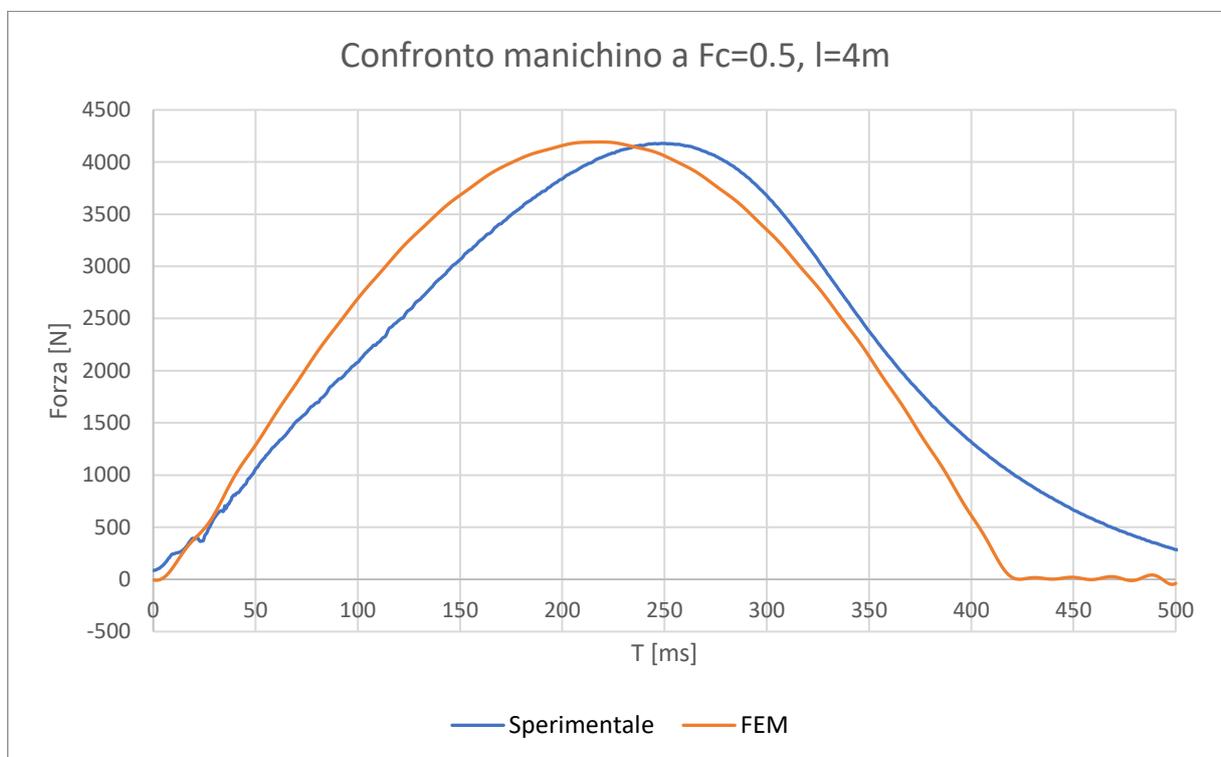


Grafico 11. Manichino: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$  e  $l = 4m$ .

Gli errori più marcati risultano essere presenti nel modello del manichino. Infatti, è quello più approssimato data la semplificazione della catena di sicurezza.

Nella comparazione della  $F_a$  con il manichino in caduta a  $F_c = 0.5$  riscontriamo un errore nel caso  $l = 1m$ . Ciò è scaturito da un salvataggio errato dei dati sperimentali, com'è stato riportato nella Tabella 1.

Infatti, la finestra temporale cresce sistematicamente all'aumentare della lunghezza della corda eccetto in questo caso. La differenza della  $F_a$  ricavata dalle prove sperimentali e dalle analisi FEM oscillano tra i 0.3% per il caso a  $l = 1m$  e i 7.4% a  $l = 4m$ . La finestra temporale nelle simulazioni mediante FEM risulta sempre minore rispetto a quella delle prove sperimentali.

Manichino - Fc=0.5			
Lunghezza corda (m)	Fa SPER (N)	Fa FEM (N)	Differenza (%)
1	4178	3869	7.4
2	3963	4053	2.3
4	4178	4191	0.3

Tabella 5. Manichino: differenza della  $F_a$  tra caso sperimentale e FEM a  $F_c = 0.5$

MANICHINO: COMPARAZIONE DATI SPERIMENTALI E FEM A  $F_c = 1$ .

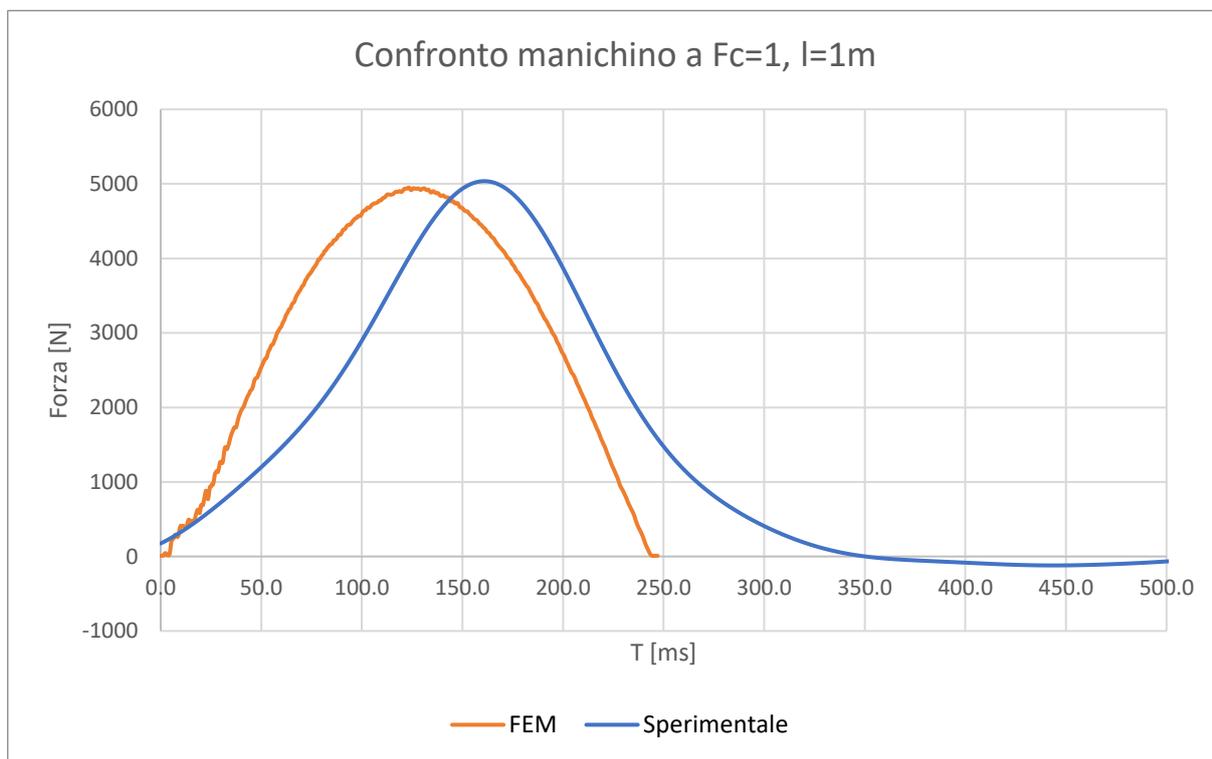


Grafico 12. Manichino: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$  e  $l = 1m$ .

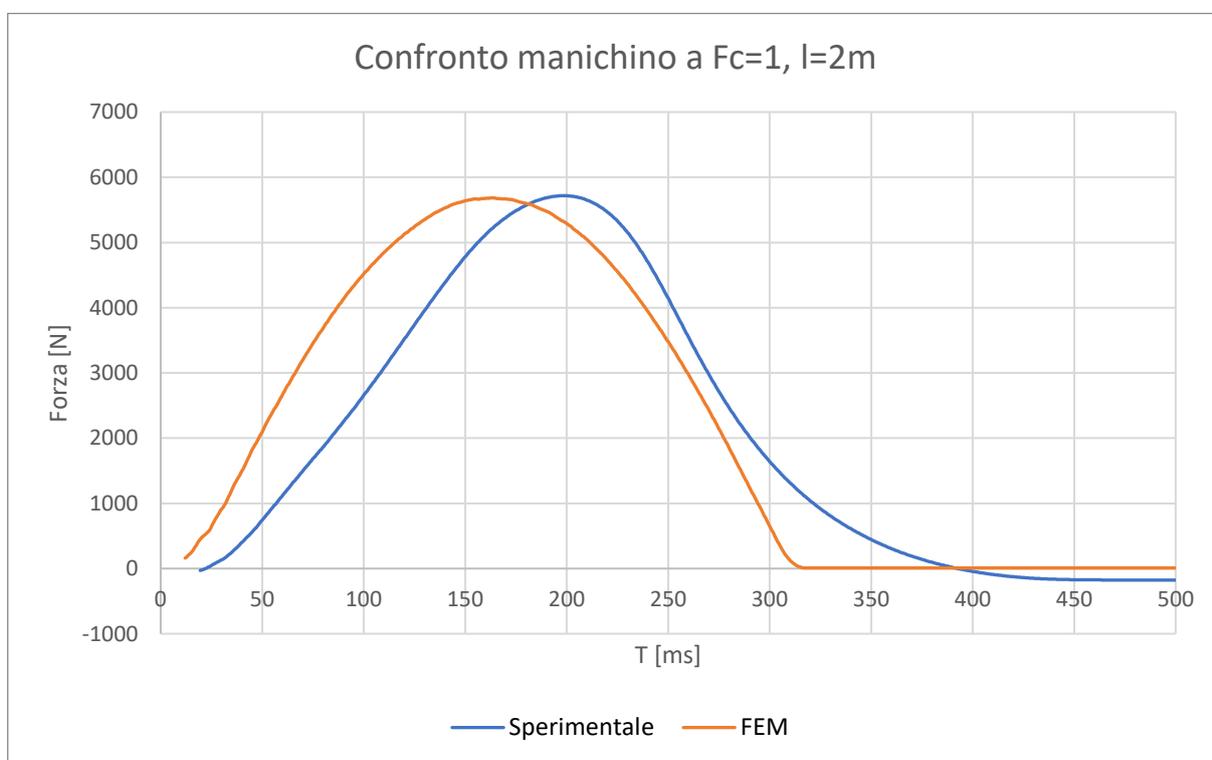


Grafico 13. Manichino: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$  e  $l = 2m$ .

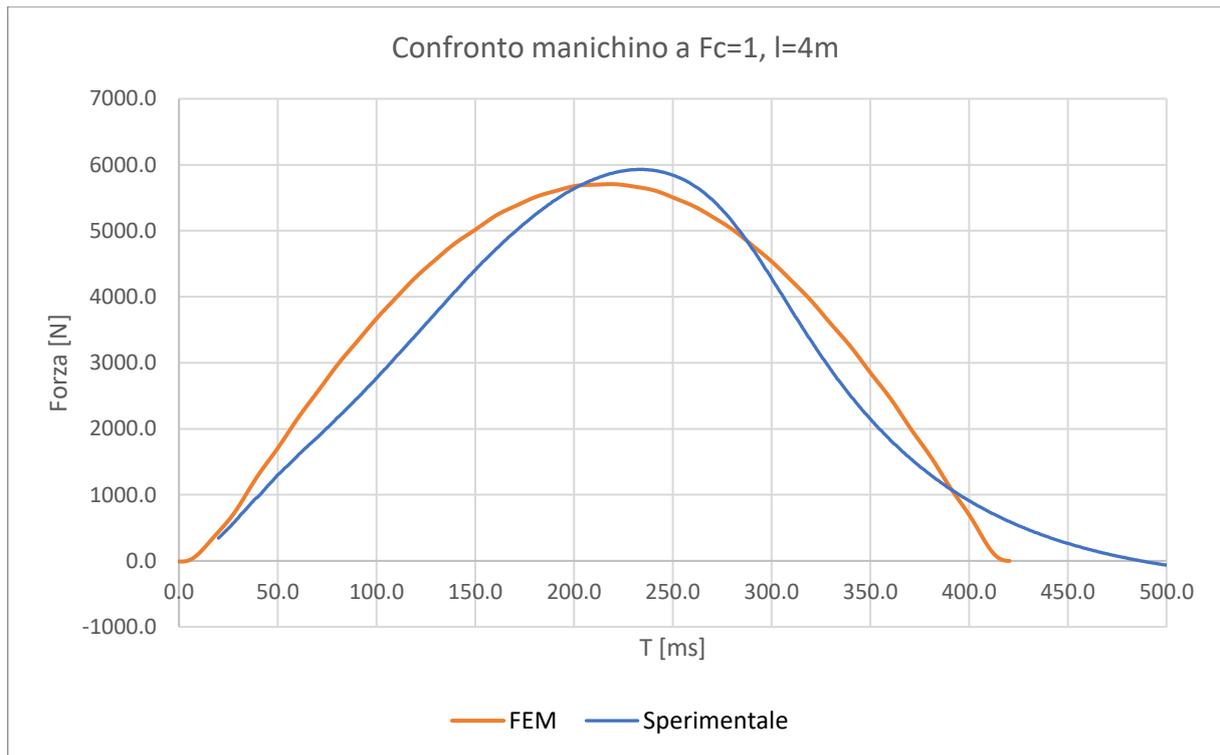


Grafico 14. Manichino: confronto caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$  e  $l = 4m$ .

Nel caso a  $F_c = 1$  i valori di  $F_a$  si discostano maggiormente rispetto al caso  $F_c = 0.5$ . La differenza dei picchi passa da 3.4% per il caso a  $l = 2m$  e raggiungendo i 7.8% per  $l = 4m$ . A differenza dei valori sperimentali,  $F_a$  subisce un decremento all'aumentare della lunghezza della corda, passando dai 6380N a  $l = 1m$  ai 5890N a  $l = 4m$ . La finestra temporale cresce all'aumentare della lunghezza della corda, con una differenza maggiore nel caso  $l = 1m$ .

Manichino - Fc=1			
Lunghezza corda (m)	Fa SPER (N)	Fa FEM (N)	Differenza (%)
1	6584	6380	3.1
2	6057	6120	1.0
4	6178	5890	4.7

Tabella 6. Manichino: differenza della  $F_a$  tra caso sperimentale e FEM a  $F_c = 1$

Nella Tabella 7. sono riportati gli andamenti delle forze di arresto ricavati mediante analisi FEM, creando una linea di tendenza per le tre lunghezze di corda, rispettivamente a 1, 2 e 4 metri. I valori della forza di arresto per entrambi i corpi in caduta a  $F_c = 0.5$  oscillano tra i 3869 N e i 4676 N, mentre per  $F_c = 1$  la  $F_a$  si trova tra i 4949 N e i 6380 N. Vi è quindi una riduzione della  $F_a$  in funzione di  $F_c$  (Tabella 8).

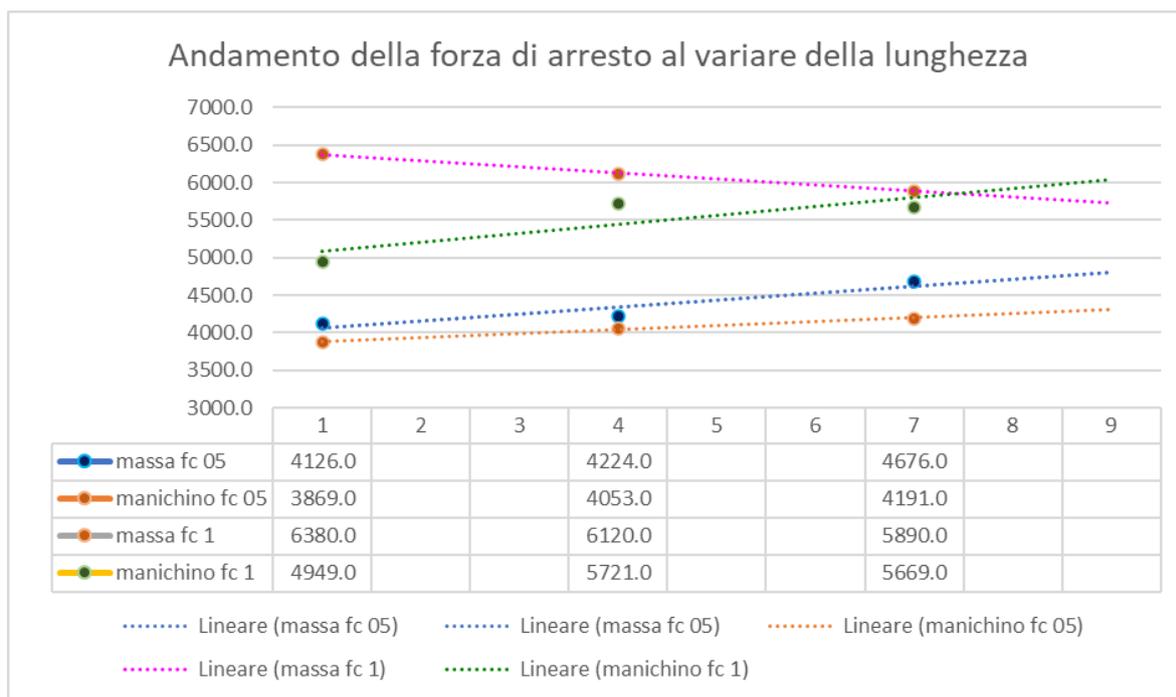


Tabella 7. Forza di arresto al variare della lunghezza della corda.

	L (m)	$F_a$ a $F_c=1$ (N)	$F_a$ a $F_c=0.5$ (N)	Riduzione $F_a$ (%)
Massa	1	6380	4126	35.3
	2	6120	4224	30.9
	4	6317	4676	25.9
Manichino	1	4949	3869	21.8
	2	5721	4053	29.1
	4	5669	4191	26.1

Tabella 8. Riduzione della  $F_a$  al variare di  $F_c$

## 5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi si propone un metodo computazionale mediante analisi agli elementi finiti per descrivere il comportamento della corda, rappresentando la forza in funzione del tempo. I parametri della simulazione sono stati calibrati su dati sperimentali misurati su una specifica corda (Millet,  $\varphi$  9.8mm).

Sono stati definiti due modelli in caduta: massa metallica e manichino. Per ogni modello sono stati effettuati 6 casi diversi al variare della configurazione, con *fattore di caduta* a 1 e 0.5 e *lunghezza della corda* variabile a 1m , 2m e 4m.

È stata utilizzata la suite *ALTAIR HyperWorks* © per l'analisi FEM, ricreando l'ambiente di prova in campo lineare elastico, semplificando la catena di assicurazione ed eliminando i freni che smorzano la caduta.

Lo studio è stato focalizzato sulla fase di preprocessing, nella quale è stato importante ricostruire i modelli basandosi su prove sperimentali al fine di avere delle soluzioni più vicine al caso reale.

Avendo considerato un modello lineare elastico ed escludendo quindi dalla simulazione gli effetti dissipativi della corda, si può notare dai risultati che l'andamento della forza generata dalla corda non rispetta a pieno ciò che succede nelle prove sperimentali.

I valori della forza di arresto hanno un margine di errore massimo dell' 8.5% nel caso più critico, mentre 8 prove su 12 non superano il 5%. È stata confermata la relazione  $F_a$  in funzione di  $F_c$ , risultando valori di picco inferiori a un  $F_c$  più basso, cosicché il corpo risenta di meno la caduta.

Il modello suddetto è un primo approccio allo studio dell'andamento della forza generata dalla corda, infatti in quanto tale è stato semplificato ed è stata studiata unicamente l'uscita generata dall'accelerometro. Può essere comunque una base di partenza per studi futuri finalizzati ad apportare migliorie riguardanti il modello dell'imbrago, la caratterizzazione della corda senza trascurare le forze dissipative di questa e l'aggiunta di elementi della catena di assicurazione.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. M. Vittorio Bedogni, «A constitutive equation for the behaviour of a mountaineering,» *Procedia Engineering*, 2011.
- [2] M. Pavier, «Experimental and theoretical simulations of climbing falls,» 1996.
- [3] A. J. McLaren, «Design and Performance of Ropes for Climbing and Sailing,» in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications.*, Glasgow, 2006, pp. 1-12.
- [4] Z. Yang, *Finite Element Analysis for Biomedical Engineering Applications*, New Washington: CRC Press, 2019.
- [5] S. I. V. A. N. D. R. Z. J. G. F. N. D. M. Janovic A, «Occlusal load distribution through the cortical and trabecular bone of the human mid-facial skeleton in natural dentition: a three-dimensional finite element study.,» University of Kragujevac, 2015.
- [6] L. W. S. S. L. T. Xianfang Yue, «Viscoelastic finite-element analysis of human skull - dura mater system as intracranial pressure changing,» University of Science and Technology Beijing, Beijing, 2008.
- [7] T. S. T. S. a. Mitsuru Motoyoshi, «Biomechanical influences of head posture on occlusion: an experimental study using finite element analysis,» *The European Journal of Orthodontics*, Tokyo, 2002.
- [8] A. P. M. A. Pedro Miranda, «Bioinspired composite segmented armour: Numerical simulations,» in *Journal of Materials Research and Technology*, Badajoz, Spain, ELSEVIER, 2019, pp. 1274-1287.
- [9] K. Baszczyński, «Dynamic Performance of Horizontal Flexible Anchor Lines During Fall Arrest— A Numerical Method of Simulation,» in *INTERNATIONAL JOURNAL OF*

*OCCUPATIONAL SAFETY AND ERGONOMICS*, Lodz, Poland, Taylor & Francis, 2015, pp. 521-534.

- [10] J. Yang, «Human Head Modeling and Personal Head Protective Equipment: A Literature Review,» Texas Tech University, Lubbock, 2009.
- [11] Ortovox, 2020. [Online]. Available: <https://www.ortovox.com/it/safety-academy-lab-rock/capitolo-1-conoscenze-base-di-arrampicata-in-ambiente/i-pericoli-in-montagna>.
- [12] C. Luperini, «CATENA e TECNICHE DI ASSICURAZIONE,» CAI Pontendera, 7 Settembre 2017. [Online]. Available: [https://caipontedera.it/wp-content/uploads/2018/03/Lez02\\_20170907\\_catena\\_tecniche.pdf](https://caipontedera.it/wp-content/uploads/2018/03/Lez02_20170907_catena_tecniche.pdf).
- [13] Petzl, «Petzl,» [Online]. Available: <https://www.petzl.com/IT/it/Sport/Forze-in-gioco-al-momento-di-una-caduta?ProductName=CONTACT-9-8-mm>.
- [14] R. Enzo, «Sicurezza delle attrezzature da alpinismo: resistenza delle corde e influenza di fattori esterni,» Torino, 2012.
- [15] R. Cabiati, «Catena di assicurazione,» 2010.
- [16] C. Bergamo, «Corso base per operatori volontari,» CCV BG, Bergamo, 2014.
- [17] C. Generale, «CORDE PER ALPINISMO: le conosciamo veramente?,» Club Alpino Accademico Italiano, 28 Gennaio 2021. [Online]. Available: <https://www.clubalpinoaccademico.it/index.php/news-2/item/422-corde-per-alpinismo-le-conosciamo-veramente>.
- [18] S. Pruccoli, «L'usura della corda in arrampicata,» CAI Rimini, [Online]. Available: <http://www.cairimini.it/metodi-e-materiali/lusura-della-corda-in-arrampicata/>.
- [19] E. Ambrogio, «Studio del fenomeno di rottura delle corde da arrampicata,» UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO, Torino, 2012.

- [20] A. Manes, «La Catena di Assicurazione: la normativa europea e i componenti,» Club Alpino Italiano, Milano, 2004.
- [21] CSMT, «caimateriali.org,» 2016. [Online]. Available: [http://www.caimateriali.org/images/pdf/presentazione\\_stage\\_torre.pdf](http://www.caimateriali.org/images/pdf/presentazione_stage_torre.pdf).
- [22] Z. C. Melchiorri, «L'apparecchio DODERO, tra passato, presente e futuro,» *La Rivista del Club Alpino Italiano*, luglio-agosto 2001.
- [23] Engineerplant, «Proprietà Metalli,» 2021. [Online]. Available: <http://www.engineerplant.it/dtec/proprietà-metalli.php>.
- [24] «Ruth Lee,» 2021. [Online]. Available: <https://www.ruthlee.co.uk/>.
- [25] C. Z. Vittorio Bedogni, «Il “fattore di caduta”, questo sconosciuto,» 2012.
- [26] A. Gugliotta, *Elementi finiti*, Otto, 2002.
- [27] F. Palloni, «Come modellare il contatto nelle analisi ad elementi finiti,» 2018. [Online]. Available: <https://blog.smartcae.com/come-modellare-il-contatto-nelle-analisi-ad-elementi-finiti/>.
- [28] P. Emiliana, «Nylon, (PA),» 2020. [Online]. Available: <https://www.plastotecnicaemiliana.it/index.php/prodotti/nylon-pa>.
- [29] Kumarasamy, «Contact Interface Modeling using Type7 and Type11 in Hypermesh,» Skill Lync, 7 Nov 2020. [Online]. Available: <https://skill-lync.com/student-projects/assignment-5-72>.
- [30] «Nylon 66 Sheet, Rod and Tube,» [Online].
- [31] I. B. I. A. Nikonov, «Influence of moisture on functional properties of climbing ropes,» *International Journal of Impact Engineering*, Vol. %1 di %2Volume 38, Issue 11, pp. Pages 900-909, November 2011.

- [32] J. W. S. H. a. N. O. H. A. McKenna, «Handbook of fibre rope technology,» 2004, pp. 375-378.
- [33] J. Wu, «The finite element modeling of spiral ropes,» 2014.
- [34] A. S. V. S. Stefan Lehner, «Mathematical model of the energy absorbing stitch brake used in via ferrata climbing,» in *Procedia Engineering*, vol. 34, 2012, pp. 652-657.
- [35] J. M. J. Vogwell, «The safety of rock climbing protection devices under,» 2006.
- [36] «Attività attuale,» Centro Studi Materiali e Tecniche, 2016. [Online]. Available: <http://www.caimateriali.org/index.php/csmt/attivita>.
- [37] A. Engineering, «Chapter 4: Solids and Hexas,» 2021. [Online]. Available: [https://www.altairuniversity.com/wp-content/uploads/2012/04/HM\\_SolidMesh\\_Extract.pdf](https://www.altairuniversity.com/wp-content/uploads/2012/04/HM_SolidMesh_Extract.pdf).
- [38] D. Soliman, «Finite element modelling of vehicles and,» Torino, 2020.

## RINGRAZIAMENTI

I miei ringraziamenti vanno alla mia famiglia per avermi supportato nel mio percorso, a mia madre Diletta, mio padre Roberto, le mie nonne e soprattutto a *mon frère* Enzo. Senza di loro non ce l'avrei mai fatta.

A Irma che con la sua pazienza mi ha aiutato nel periodo della tesi.

Al mio amico Matteo a cui voglio un grande bene e a cui devo tanto.