

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
MECCANICA

SVILUPPO DI UN PROTOTIPO PER
LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO
NELLA COLLABORAZIONE
UOMO-ROBOT

RELATORE: CH.MO ING. MATTEO BOTTIN

CORRELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

CORRELATORE: CH.MO PROF. ING. ALBERTO DORIA

LAUREANDO: EMANUELE SUCCURRO

MATRICOLA: 2053118

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

*Ai miei genitori,
che ci sono sempre stati nonostante tutto.*

*“ Pensiamo che un fiore cresciuto sul ciglio di un precipizio sia bello,
perché i nostri piedi si fermano sul quel ciglio.
Non riusciamo ad avanzare su quel cielo
come quel fiore impavido. ”*

TITE KUBO - BLEACH, 2001-2016

Indice

Sommario	XI
Introduzione	XIII
1 Dinamica di un robot e urti	1
1.1 Dinamica di un robot	1
1.1.1 Modello dinamico di un robot	2
1.1.2 Approccio Lagrangiano	2
1.1.3 Approccio di Newton-Eulero	5
1.1.4 Confronto tra i due approcci in sintesi	5
1.2 Urti: definizione e tipologie	6
1.2.1 Urto elastico	6
1.2.2 Urto anelastico	7
1.2.3 Urto con molla	8
2 Normativa	11
2.1 ISO TS 15066:2016	11
2.1.1 Ambito e scopo	11
2.1.2 Generale	12
2.1.3 Progettazione dell'applicazione industriale	12
2.1.4 Individuazione dei pericoli e valutazione dei rischi	12
2.1.5 Operazioni collaborative	14
2.1.6 Modello matematico (Allegato A)	15
2.1.7 Commenti e considerazioni personali sul modello	23

3	Apparato strumentale	31
3.1	Panoramica generale	31
3.2	Vincoli e limitazioni	34
3.3	Biofedeltà del prototipo	35
3.3.1	Rigidità	35
3.3.2	Massa	38
3.4	Parte Superiore: componenti di contenimento delle molle	40
3.5	Parte inferiore del prototipo	45
3.5.1	Misure di sicurezza: spine	49
3.6	Misurazione della forza applicata	52
3.6.1	Capacità di carico	52
3.6.2	Analisi di frequenza	52
3.6.3	Scelta del dispositivo	55
3.7	In merito alla stampa	57
4	Progettazione delle prove e modelli matematici	59
4.1	Modalità della prova	59
4.2	Altezze e masse in gioco	60
4.3	Modello matematico	60
5	Programma, esecuzione e risultati delle prove	65
5.1	Preparazione in vista delle prove	65
5.1.1	Acquisizione dei dati	65
5.1.2	Setup dello spazio delle prove	70
5.1.3	Programmazione concettuale delle prove	71
5.2	Risultati sperimentali	71
5.3	Confronto con i valori dei modelli	76
5.3.1	Tabelle e grafici di confronto	76
5.3.2	Commenti	89
	Conclusioni	101
A	Glossario	105
A.1	Glossario di riferimento	105

A.2 Chiavi di ricerca	108
B Tavole dei modelli	109
B.1 Disegni tecnici	109
Bibliografia	115

Sommario

Il *prototipo per la collaborazione uomo-robot* da titolo della presente tesi è un dispositivo atto a riprodurre le proprietà di specifiche regioni del corpo umano e volto alla misurazione delle forze esercitate da un manipolatore su di esso. La specifica *"per la collaborazione uomo-robot"* indica la destinazione d'impiego dello strumento, ossia le applicazioni di robotica collaborativa: esso verrà infatti impiegato per regolare i parametri di lavoro dei manipolatori per evitare (o quanto meno limitare entro soglie accettabili) l'insorgere di dolore in caso di urti con gli operatori.

Dispositivi con le funzioni appena descritte sono prodotti e commercializzati da *PILZ* e *GTE Industrieelektronik*, per fare due esempi. Si tratta, in generale, di dispositivi costituiti da una piastra (con copertura solitamente in silicone) su cui il robot andrà ad applicare una forza, elementi di rigidità come molle ed un sistema di misurazione dell'entità della sollecitazione applicata.

Nel caso specifico del presente lavoro di tesi, è stato sviluppato un prototipo che riproduce fedelmente le proprietà di rigidità delle regioni del corpo umano mediante configurazioni di molle dalle diverse costanti elastiche equivalenti. Lo strumento è costituito da diverse parti, ciascuna avente la sua funzione (alloggiamento delle molle di cui sopra, fissaggio al banco di lavoro, accogliere l'impatto con il manipolatore). Le parti costituiscono l'insieme *"prototipo"* mediante assemblaggio in direzione verticale.

La misurazione delle forze che l'organo terminale del robot esercita sulla piastra superiore del prototipo avviene per mezzo di una cella di carico piezoelettrica.

Introduzione

L'elaborato a seguire si inserisce nell'ambito della sicurezza delle applicazioni di robotica collaborativa (**HRC**, *Human-Robot Collaboration*), aspetto regolamentato a livello normativo dalla specifica tecnica ISO TS 15066.

Tale specifica tecnica riguarda i requisiti di sicurezza delle modalità collaborative previste dalla Norma Tecnica UNI EN ISO 10218-2:2011 armonizzata alla Direttiva Macchine 2006/42/CE.

In particolare, nel presente lavoro di tesi si trattano lo sviluppo progettuale e la realizzazione materiale di un prototipo che, rispettando le indicazioni in normativa, possa essere impiegato per valutare le forze d'impatto derivanti da urti tra robot e operatore durante le operazioni cui si è fatto riferimento in incipit.

Il prototipo è stato quindi sviluppato secondo le indicazioni in materia di biofedeltà e modello di urto fornite in normativa, così che futuri utilizzi e raccolta di dati possano trovare giustificazione e validità di risultati nel riferimento alla ISO TS 15066.

Il progetto di tesi si è articolato in fasi distinte.

Si è in primo luogo preso visione della specifica tecnica, analizzandola al fine di comprenderne a pieno le formulazioni analitiche in materia di modellizzazione degli urti e dei corpi in gioco.

Si è poi proceduto con una ricerca bibliografica atta a determinare il metodo più efficace per garantire la biofedeltà alle caratteristiche del corpo umano nel prototipo. Tale processo ha portato ad optare per delle molle come elementi di

rigidezza.

Si sono quindi analizzate le soluzioni commerciali già presenti sul mercato al fine di avere un punto di partenza solido per quanto riguarda la fase di sviluppo concettuale.

Una volta ultimata la progettazione dello strumento si è infine valutata quale fosse la grandezza fisica che convenisse valutare e quale lo strumento migliore per misurarla. Si è deciso di misurare la forza d'impatto mediante l'impiego di una cella di carico.

La trattazione inizia con il capitolo 1, a scopo introduttivo. Esso è articolato in due sezioni: la prima tratta la dinamica dei robot; la seconda è dedicata alla descrizione del fenomeno dell'urto e alla formulazione analitica per le diverse tipologie di collisioni.

Il capitolo 2 è dedicato all'analisi della normativa.

Una prima parte è stata destinata alla descrizione dell'ambito coperto dalla specifica tecnica ISO TS 15066 e a considerazioni di carattere qualitativo riguardo alle operazioni collaborative.

La seconda parte copre l'Allegato A della specifica tecnica. In esso vengono descritti il modello matematico del corpo umano, le cui singole parti del corpo vengono raggruppate per regioni e rappresentate mediante masse efficaci e rigidità, e quello dell'urto. Vengono inoltre indicati i valori soglia di forza/pressione ammissibili per ciascuna regione del corpo.

Il capitolo 3 è dedicato all'apparato sperimentale, dato dall'insieme di prototipo e dispositivo di misurazione.

Viene dedicato spazio al dimensionamento delle molle e alle scelte progettuali riguardanti le modalità con cui realizzare le costanti elastiche efficaci da normativa. Successivamente, si descrivono le varie parti che costituiscono l'insieme "prototipo" una volta assemblate e i motivi dietro le scelte che hanno portato all'adozione di determinate feature.

Segue un'analisi di frequenza atta a valutare il range di frequenze caratteristico

per impatti simili a quelli che andranno ad essere osservati mediante il prototipo oggetto dell'elaborato. Tale studio è stato svolto per poter determinare la banda di frequenza necessaria per la cella di carico e, di conseguenza, la compatibilità o meno dei diversi dispositivi in commercio con le esigenze emerse.

Il capitolo si conclude con un cenno alle accortezze adottate in fase di progettazione di stampa.

Il capitolo 4 è dedicato alla presentazione di una prova pre-impiego del prototipo (per "impiego" si intenda l'utilizzo con manipolatore) e di un modello matematico per la stima della forza rilevabile in tale test.

Il capitolo 5 è dedicato alla descrizione dettagliata delle prove di cui al capitolo precedente. Sono qui presentati le modalità di acquisizione dei dati e le verifiche di corretto funzionamento del sensore adottato, il *setup* dello spazio di lavoro, l'esecuzione delle prove, la raccolta dei risultati e il confronto (attraverso l'ausilio di tabelle e grafici) con i modelli matematici.

L'elaborato si chiude illustrando le conclusioni tratte a seguito del processo di sviluppo del prototipo e del suo utilizzo nei test preliminari. Vengono quindi proposti sviluppi futuri in merito al lavoro fatto.

Capitolo 1

Dinamica di un robot e urti

In questo capitolo verranno illustrati:

- la dinamica di un robot;
- il concetto di urto, tenuto conto delle varie modalità con le quali tale fenomeno può presentarsi.

Per quanto riguarda la trattazione inerente il primo argomento, verranno presentati il concetto di modello dinamico e i diversi approcci che possono essere seguiti per lo studio di esso.

Per quanto invece concerne il secondo punto, verranno forniti i modelli per lo studio di urti perfettamente elastici e completamente anelastici, al fine di rendere più chiaro quanto presente nei capitoli relativi alla normativa di riferimento e all'apparato sperimentale sviluppato.

1.1 Dinamica di un robot

Si è deciso di presentare l'argomento perché tale ramo della meccanica dei robot riveste un ruolo rilevante in ambiti quali simulazione del moto, progettazione di prototipi e sintesi di algoritmi di controllo, tutti campi che toccano anche le applicazioni collaborative della robotica e che interessano eventuali sviluppi futuri in tale materia.

Nello specifico, l'importanza della dinamica del robot sta nel fatto che tramite

essa è possibile simulare un manipolatore senza che il sistema sia materialmente presente: da tali simulazioni è possibile pianificare controllo e moto del robot. In aggiunta, mediante analisi del modello dinamico è possibile determinare forze e coppie in gioco, grandezze fondamentali nella progettazioni di componenti quali attuatori, giunti e trasmissioni.

Le informazioni presentate in questa sezione sono state tratte da [1] e [2].

1.1.1 Modello dinamico di un robot

Il già citato *modello dinamico di un robot* è il modello matematico del sistema dinamico "manipolatore".

Tale modello fornisce una descrizione in termini matematici (variabili nel dominio del tempo e costanti) della relazione che sussiste tra le forze generalizzate agenti sul sistema e l'insieme delle configurazioni spaziali $q(t)$ assunte dalla sua struttura al variare del tempo. Sono *forze generalizzate*:

- le coppie di attuazioni in corrispondenza dei motori;
- forze e momenti esterni esercitati sul robot.

Molteplici sono i metodi in base ai quali determinare il modello dinamico. I più noti sono l'approccio Lagrangiano e l'approccio di Newton-Eulero.

1.1.2 Approccio Lagrangiano

L'approccio Lagrangiano è di tipo energetico e permette di derivare le equazioni della dinamica in forma chiusa (o simbolica).

Si consideri un sistema di corpi rigidi, le posizioni ed orientamenti dei quali possano essere espresse mediante n coordinate generalizzate q . L'approccio Lagrangiano si basa sul calcolo di una quantità L detta *lagrangiana* del sistema meccanico, pari alla differenza tra l'energia cinetica T e l'energia potenziale U del suddetto sistema:

$$L = T - U. \tag{1.1}$$

Tale quantità dipende da:

- parametri dinamici dei *link*, ossia masse e momenti di inerzia;
- parametri geometrici (lunghezza) dei *link*.

Siano ξ_i le forze generalizzate associate alle coordinate generalizzate q_i . Il lavoro elementare dW che le forze agenti sul sistema compiono può essere espresso come segue:

$$dW = \sum_{i=1}^n \xi_i dq_i. \quad (1.2)$$

Si può dimostrare che esistono le equazioni di Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} - \frac{\delta L}{\delta q_i} = \xi_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1.3)$$

Nello specifico caso di un manipolatore robotico, il cui moto è definito dalle n coordinate libere di giunto q_i , l'energia cinetica T è data dalla forma quadratica:

$$T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{B}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (1.4)$$

con \dot{q} velocità di giunto e $\mathbf{B}(q)$ matrice d'inerzia del manipolatore.

L'energia potenziale U è data dalla somma delle energie potenziale dei singoli *link*:

$$U(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n -m_i \mathbf{g}^T \mathbf{p}_i \quad (1.5)$$

con \mathbf{p}_i posizioni dei baricentri, $i=1, \dots, n$.

Da 1.4 e 1.5 consegue l'espressione della Lagrangiana:

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (1.6)$$

e quindi

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_j + \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{q}^T \mathbf{p}_i \quad (1.7)$$

con b_{ij} elementi della matrice di inerzia B .

Derivando la Lagrangiana:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \frac{db_{ij}(\mathbf{q})}{dt} \dot{q}_j \quad (1.8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\delta b_{ij}(\mathbf{q})}{\delta q_k} \dot{q}_k \dot{q}_j. \quad (1.9)$$

Si considerino inoltre

$$\frac{\delta T}{\delta q_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\delta b_{jk}(\mathbf{q})}{\delta q_i} \dot{q}_k \dot{q}_j \quad (1.10)$$

e

$$\frac{\delta U}{\delta q_i} = - \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \frac{\delta \mathbf{p}_i}{\delta q_i} = g_i(\mathbf{q}) \quad (1.11)$$

A partire dalle equazioni di Lagrange 1.3 si ottiene

$$\sum_{j=1}^n b_{ij}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\delta h_{ijk}(\mathbf{q})}{\delta q_i} \dot{q}_k \dot{q}_j + g_{ik}(\mathbf{q}) = \xi_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1.12)$$

dove:

$$h_{ijk} = \frac{\delta b_{ij}}{\delta q_k} - \frac{1}{2} \frac{\delta b_{jk}}{\delta q_i}. \quad (1.13)$$

Il modello dinamico di un robot può quindi essere riassunto in termini matriciali:

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1.14)$$

Le matrici in 1.14 rappresentano nell'ordine:

- $\mathbf{B}(\mathbf{q})$: i termini inerziali;
- $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: i termini centrifughi e di Coriolis;
- $\mathbf{g}(\mathbf{q})$: i termini gravitazionali,

mentre $\boldsymbol{\tau}$ descrive le forze generalizzate (forze o coppie) ai giunti.

Commenti e precisazioni all'approccio Lagrangiano illustrato

Per completezza, si precisa che:

- il modello dinamico, così come appena descritto, è stato formulato nello spazio dei giunti; sarebbe in alternativa possibile una formulazione nello spazio operativo del robot;
- non si sono tenute in considerazione la presenza del sistema di attuazione (motori e sistema di trasmissione), che nella realtà introduce effetti dinamici vari sul manipolatore (attrito, elasticità, giochi...), né l'eventuale azione sul robot di coppie di attrito viscoso e/o statico.

Infine, la formulazione del modello dinamico del manipolatore basata sulle equazioni di Lagrange permette di ottenere un modello in forma chiusa, di facile interpretazione ed utilizzo nell'ambito della sintesi del controllore, ma risulta un procedimento caratterizzato da inefficienza sotto l'aspetto computazionale.

1.1.3 Approccio di Newton-Eulero

Per sopperire ai limiti dell'approccio Lagrangiano 1.1.2, il modello dinamico del robot può essere in alternativa formulato secondo l'approccio di Newton-Eulero. Esso si basa sull'utilizzo:

- dell'equazione dinamica di Newton, secondo la quale la somma delle forze agenti su un sistema meccanico è pari alla variazione della quantità di moto;
- dell'equazione dinamica di Eulero, per la quale la somma dei momenti agenti è uguale alla variazione del momento della quantità di moto.

Il metodo consiste nello scrivere i bilanci di forze (equazioni di Newton) e di momenti (equazioni di Eulero) agenti sul singolo *link*, evidenziando le interazioni con i membri contigui nella catena cinematica. Così facendo, si ottiene un sistema di equazioni risolvibile in modo ricorsivo, propagando velocità ed accelerazioni dalla base del robot verso l'*end-effector*, forze e momenti in senso opposto. Tali formule ricorsive possono essere valutate in modo sia simbolico che numerico. Nell'ambito proprio di quest'ultima modalità, la caratteristica della ricorsività rende l'algoritmo di Newton-Eulero computazionalmente efficiente.

1.1.4 Confronto tra i due approcci in sintesi

Entrambi gli approcci forniscono lo stesso modello matematico per la dinamica di un robot se risolti in maniera simbolica.

Sussistono tuttavia delle differenze tra le due formulazioni. Gli aspetti caratteristici motivo di tali diversità vengono riproposti a seguire, in due elenchi puntati, a sintesi della trattazione svolta fino a questo punto.

L'approccio Lagrangiano:

- si presenta come sistematica e di facile comprensione;

- fornisce le equazioni del moto in forma analitica compatta, permettendo di evidenziare i termini inerziali, centrifughi/di Coriolis e gravitazionali in forma matriciale;
- si presta all'introduzioni di effetti dinamici (attriti, deformabilità, giochi...).

L'approccio di Newton-Eulero:

- è un metodo ricorsivo, caratteristica che lo rende efficiente dal punto di vista computazionale;
- è raccomandato per le applicazioni *real-time*.

1.2 Urti: definizione e tipologie

Nell'ambito della fisica si definisce "urto" l'evento risultato della collisione di due corpi che si trovano ad esercitare forze l'uno sull'altro. Per semplicità, nelle formulazioni di seguito proposte si considereranno urti unidimensionali (che avvengono cioè lungo una retta). Durante l'urto, il comportamento dei due corpi che prendono parte alla collisione è quello di un sistema isolato e la loro quantità di moto si conserva.

A seconda che si conservi o meno anche l'energia cinetica, l'urto si definisce elastico o anelastico. Nel caso in cui i due corpi risultino solidali dopo l'impatto, l'urto viene detto completamente anelastico.

L'argomento oggetto di questa sezione è trattato ed approfondito in [3].

1.2.1 Urto elastico

Riprendendo quanto scritto in precedenza, un urto è perfettamente elastico se si conservano sia la quantità di moto sia l'energia cinetica totale.

Considerare l'urto unidirezionale permette di omettere la notazione vettoriale e scrivere:

$$\begin{cases} m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 V_1 + m_2 V_2 \\ \frac{1}{2} m_1^2 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2^2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1^2 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2^2 V_2^2 \end{cases} \quad (1.15)$$

dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due corpi (di masse m_1 e m_2 rispettivamente) prima dell'urto, mentre V_1 e V_2 sono quelle ad urto avvenuto.

Note le velocità dei due corpi prima dell'urto e le relative masse, è possibile determinare le velocità successivamente all'urto:

$$\begin{cases} V_1 = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)}v_1 + \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)}v_2 \\ V_2 = \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)}v_1 + \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)}v_2 \end{cases} \quad (1.16)$$

Nei casi reali vi è sempre dispersione di energia cinetica in qualche misura, sicché l'urto perfettamente elastico è un caso ideale di urto. Esistono però fenomeni in cui è possibile assumere tale modello per descrivere le collisioni che avvengono tra le entità in gioco.

1.2.2 Urto anelastico

Se durante l'urto parte dell'energia cinetica si disperde trasformandosi in altre forme di energia, si parla di urto anelastico. Nel caso particolare di urto completamente anelastico, è possibile determinare la velocità V a cui si muovono i due corpi solidali dopo l'urto. Poiché a conservarsi è la sola quantità di moto, si può scrivere

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)V \quad (1.17)$$

con la medesima simbologia (m_1 , m_2 , v_1 e v_2) utilizzata nel caso di urto elastico precedentemente illustrato.

Da 1.17 si può quindi ricavare

$$V = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}. \quad (1.18)$$

Coefficiente di restituzione e

Nella realtà, gli urti non sono né perfettamente elastici né completamente anelastici. Si introduce quindi nella trattazione il coefficiente di restituzione e , definito come:

$$e = \frac{V_2 - V_1}{v_1 - v_2} \quad (1.19)$$

con la simbologia già vista in precedenza 1.2.1.

Tale coefficiente viene impiegato per definire l'elasticità della collisione ed assume

valori tra 0 (urto completamente anelastico) e 1 (urto perfettamente elastico).

Per urti unidimensionali, noto il coefficiente di restituzione e , si possono calcolare le velocità finali (V_1 e V_2) a partire da quelle iniziali (v_1 e v_2) di due masse (m_1 e m_2) che prendono parte all'evento di collisione:

$$V_1 = v_1 + m_2(1 + e) \frac{v_2 - v_1}{m_1 + m_2} \quad (1.20)$$

$$V_2 = v_2 - m_1(1 + e) \frac{v_2 - v_1}{m_1 + m_2} \quad (1.21)$$

1.2.3 Urto con molla

Per comprendere le formulazioni che caratterizzano il modello da normativa e le ragioni dietro alcune scelte riguardanti l'apparato sperimentale, si presenta anche il caso di urto di una massa m contro una seconda massa M abbinata ad una molla di costante elastica k .

Il comportamento della molla è descritto dalla legge di Hooke

$$F = kx \quad (1.22)$$

con F forza applicata e x allungamento della molla.

L'energia potenziale U posseduta dalla molla è data da

$$U = \frac{1}{2}kx^2. \quad (1.23)$$

Si consideri un urto su piano perfettamente liscio (così che non vi sia dispersione di energia per effetto dell'attrito) cui prendano parte una massa m e una seconda massa M . La massa m si muova con una certa velocità iniziale v verso la massa M . Sia quest'ultima inizialmente ferma e vincolata mediante molla di costante elastica k a riposo.

Ha luogo un urto anelastico: a collisione avvenuta, le due masse procedono solidali con la medesima velocità V andando a comprimere la molla:

$$mv = (m + M)V. \quad (1.24)$$

Da 1.24 si può determinare la velocità V come

$$V = \frac{mv}{m + M}. \quad (1.25)$$

Passando all'aspetto energetico, successivamente all'urto il sistema avrà energia cinetica complessiva E_c

$$E_c = \frac{1}{2}(m + M)V^2. \quad (1.26)$$

Sostituendo 1.25 in 1.26 si ottiene

$$E_c = \frac{1}{2}(m + M) \left(\frac{mv}{m + M} \right)^2. \quad (1.27)$$

Il bilancio energetico risulterà

$$E_c = \frac{1}{2}(m + M) \left(\frac{mv}{m + M} \right)^2 = \frac{1}{2}kx^2 = U \quad (1.28)$$

da cui è possibile determinare la compressione x della molla

$$x = \frac{mv}{\sqrt{k(m + M)}}. \quad (1.29)$$

Capitolo 2

Normativa

In questo capitolo verrà presentata la normativa di riferimento per la realizzazione di una sicura collaborazione uomo-robot in contesti industriali. Verrà poi illustrato il modello cui la normativa ricorre per definire quantitativamente i limiti cui si deve sottostare nell'ambito di di cui sopra. Seguiranno commenti, analisi e proposte di formulazioni alternative.

2.1 ISO TS 15066:2016

2.1.1 Ambito e scopo

La specifica tecnica ISO TS 15066 fornisce linee guida per l'adozione di misure che garantiscano il raggiungimento di un soddisfacente livello di sicurezza nell'ambito della robotica collaborativa. Sono oggetto dell'interesse della norma non solo l'interazione tra operatore e robot (o meglio, sistema robotico) ma anche le meccaniche che definiscono i rapporti tra queste due risorse e l'ambiente che si trovano a condividere.

Per una piena comprensione della norma, occorre far riferimento anche alle altre specifiche tecniche in essa indicate [4].

2.1.2 Generale

Dopo aver fornito definizioni per termini impiegati, la norma procede descrivendo gli aspetti che caratterizzano la robotica collaborativa e che la differenziano rispetto all'impiego di risorse "robot" che svolgono task in autonomia, senza l'intervento umano.

Caratteristica principale della robotica collaborativa rispetto a quella "classica" è la condivisione del medesimo spazio di lavoro: possono quindi verificarsi collisioni tra operatore e manipolatore. A partire da questa considerazione, si pone la necessità di una valutazione del rischio per l'identificazione dei pericoli presenti e stimare i rischi da essi derivanti. Lo scopo è quello di portare alla progettazione di applicazioni sicure e, nel caso in cui non si riesca a realizzare la piena sicurezza in fase di design, e di adottare misure di protezione adatte, efficaci e sufficienti.

2.1.3 Progettazione dell'applicazione industriale

Per eliminare i pericoli e ridurre al minimo i rischi la normativa prescrive di tenere in considerazione:

- limiti dimensionali dello spazio di lavoro;
- lo spazio di lavoro;
- aspetti ergonomici ed interfaccia operatore-attrezzatura;
- limiti di utilizzo;
- limiti di tempo (durata di un'operazione collaborativa, transizione da un'operazione collaborativa ad altre con diverse modalità).

2.1.4 Individuazione dei pericoli e valutazione dei rischi

La normativa prescrive l'obbligo di eseguire una valutazione dei rischi ed evidenzia la necessità di prestare particolare attenzione a possibili situazioni di contatto uomo-sistema robotico generate da comportamenti volontari o involontari ragionevolmente prevedibili.

Individuazione dei pericoli

Tra le fonti di pericolo che la normativa elenca, riportiamo quelle con rilevanza ai fini della tesi e di quanto verrà successivamente discusso:

1. per quanto riguarda il robot,
 - parametri caratteristici del task (carico, forza, quantità di moto, coppia, geometria, superficie, forma e materiale);
 - condizioni di contatto quasi-statico;
 - posizione dell'operatore rispetto al manipolatore;
2. per quanto riguarda il sistema robotico nel complesso,
 - design dell'*end-effector* e caratteristiche del *workpiece*;
 - movimenti e posizioni raggiunte dell'operatore;
 - determinazione della tipologia di contatto (transitorio o quasi-statico) e regione del corpo interessata.

Identificazione dei *task*

Seppur non si ritenga indispensabile un esame delle caratteristiche dei *task* collaborativi ai fini della presente tesi, si riportano alcuni degli aspetti da valutare nell'ottica della valutazione dei rischi, ossia:

- frequenza e durata della presenza dell'operatore nello spazio di lavoro a sistema robotico in movimento;
- frequenza e durata del contatto tra operatore e robot a sistemi di alimentazione attivi;
- riavvio automatico o manuale del movimento del sistema robotico al termine del *task* collaborativo.

Eliminazione dei pericoli e riduzione dei rischi

La riduzione dei rischi può essere raggiunta mediante misure che si basano su determinati principi quali, in ordine di priorità:

1. sicurezza integrata alla progettazione;
2. limitazione dell'accesso ai pericoli o controllo di questi al fine di raggiungere uno stato di sicurezza;
3. rendere disponibili misure supplementari come informazioni per l'uso, addestramento, segnali e dispositivi di protezione individuali.

L'attenzione, per quanto riguarda questo elaborato, è rivolta nello specifico al secondo punto. Anticipando quanto verrà successivamente illustrato alla sezione dedicata all'apparato strumentale 3, l'obiettivo della sicurezza nella collaborazione uomo-robot sarà raggiunto regolando la velocità del manipolatore (e di conseguenza la forza da esso esercitata in caso di collisioni con l'operatore).

2.1.5 Operazioni collaborative

Al fine di garantire lo svolgimento delle operazioni collaborative in condizioni di sicurezza, la norma prescrive l'impiego delle seguenti soluzioni:

1. arresto monitorato di sicurezza (*safety-rated monitored stop*);
2. guida manuale (*hand guiding*);
3. monitoraggio della velocità e della distanza (*speed and separation monitoring*);
4. limitazione di potenza e forza (*power and force limiting*).

Si tratterà nello specifico della quarta soluzione, la cui trattazione in termini di modello matematico sarà affidata a sezioni successive.

Per approfondire i punti 1., 2., 3., si rimanda a [4].

Controllo dei limiti di potenza e forza

Questa soluzione prevede il raggiungimento di condizioni di sicurezza nell'interazione uomo-robot mediante la limitazione delle prestazioni del manipolatore. In questo ambito, i robot possono essere dotati di mezzi tecnici che permettano di stabilire limiti di soglia per forze, coppie, velocità, quantità di moto, potenza meccanica e agli assi (definendo lo spazio ristretto).

A seconda del tipo di contatto previsto o ragionevolmente prevedibile, vengono impiegate soluzioni specifiche per realizzare la riduzione del rischio:

- per contatto transitorio, si ricorre alla limitazione della velocità delle parti mobili (ossia robot, utensile, pezzo manipolato) e si adottano design appropriati per le caratteristiche fisiche del sistema (ad esempio, per la superficie della parte che potrebbe collidere con l'operatore);
- per contatto quasi-statico, oltre alle soluzioni già citate per il contatto transitorio, si pone l'attenzione al design delle caratteristiche che potrebbero essere fonte di pericolo per quanto riguarda intrappolamento dell'operatore e/o schiacciamento di una parte del suo corpo.

2.1.6 Modello matematico (Allegato A)

L'Allegato A definisce delle linee guida per stabilire i limiti di soglia per i parametri prestazionali del sistema robotico. Tali limiti possono essere calcolati in funzione delle soglie di insorgenza del dolore all'interfaccia uomo-macchina a seconda del tipo di contatto che si verifica. Tali valori vengono quindi utilizzati per stabilire i limiti di pressione e forza per le varie regioni del corpo, secondo un modello appositamente definito. Tali dati di forza e pressione possono essere inoltre impiegati per stabilire l'energia massima trasferibile all'interfaccia uomo-robot al verificarsi del contatto. Infine, possono essere determinati limiti di velocità del manipolatore, per la specifica operazione collaborativa in esame, al fine di garantire il non superamento dei valori di soglia per forza e/o pressione applicate sul corpo dell'operatore. Il modello considerato ha carattere conservativo, con focus sulla sicurezza, e le soglie di insorgenza del dolore provengono da studi effettuati in merito.

Modello del corpo umano

Nella valutazione dei rischi occorre tenere conto di quali saranno le regioni del corpo interessate da contatti previsti o ragionevolmente prevedibili nell'ambito della collaborazione uomo-robot. Tali considerazioni risultano importanti perché parti del corpo diverse avranno anche diverse soglie di sopportazione del carico biomeccanico prima dell'insorgere del dolore/di lesioni lievi. Il modello del corpo definito in Allegato A prevede la suddivisione del corpo in 29 aree specifiche raggruppate in 12 regioni (vedasi Tabella 2.1).

Si fa poi riferimento alle forze e pressioni massime sostenibili dalle varie regioni del corpo precedentemente definite. Nella Tabella 2.2 sono raccolti i valori di forza massimi ammissibili per ciascuna regione, a seconda che il contatto sia quasi-statico o transitorio

Nella presente tesi si sono omessi i valori relativi alle pressioni massime ammissibili, preferendo il ragionamento in termini di forze limite. I valori soglia, compresi quelli relativi alle pressioni qui omessi, sono riportati in [4] e sono stati stabiliti da studi quali:

- [5], per i valori di forza;
- [6], per quanto riguarda i valori di pressione;
- [7, 8, 9], per quanto riguarda il fatto che i valori per forza (e pressione) nel caso di contatto transitorio sono pari a quelli per contatto quasi-statico per un fattore moltiplicativo pari a 2.

Ritornando alle regioni del corpo, queste vengono modellizzate come masse aventi diverse costanti elastiche efficaci k . m_H , invece, è la massa efficace di ciascuna regione del corpo e tiene conto sia della massa della regione cui si fa riferimento sia delle interconnessioni tra regioni ad essa adiacenti. I valori di m_H e k per ciascuna regione del corpo sono contenuti in Tabella 2.3.

Regione del corpo	Specifica area del corpo
Cranio e fronte	centro della fronte tempia
Volto	muscoli masticatori
Collo	muscolo del collo settima vertebra cervicale
Schiena e spalle	articolazione della spalla quinta vertebra lombare
Petto	sterno muscolo pettorale
Addome	muscolo addominale
Bacino	osso pelvico
Parte superiore braccia e articolazione gomito	deltoidi omero
Parte inferiore braccia e articolazione polso	radio muscolo dell'avambraccio nervo del braccio
Mani e dita	polpastrello indice D polpastrello indice ND articolazione terminale indice D articolazione terminale indice ND eminenza tenar palmo D palmo ND dorso mano D dorso mano ND
Cosce e ginocchia	muscolo della coscia rotula
Parte inferiore gambe	centro dello stinco muscolo del polpaccio

Tabella 2.1: Suddivisione del corpo in aree e raggruppamento in regioni.

Regione del corpo	Contatto <i>quasi-static</i> Massima Forza Ammissibile (N)	Contatto <i>transient</i> Massima Forza Ammissibile (N)
Cranio e fronte	130	260
Volto	65	130
Collo	150	300
Schiena e spalle	210	420
Petto	140	280
Addome	110	220
Bacino	180	360
Parte superiore braccia e articolazione gomito	150	300
Parte inferiore braccia e articolazione polso	160	320
Mani e dita	140	280
Cosce e ginocchia	220	440
Parte inferiore gambe	130	260

Tabella 2.2: Valori massimi ammissibili di forza per ogni regione del corpo, in funzione del tipo di contatto.

Regione del corpo	Costante elastica efficace k (N/mm)	massa efficace m_H (kg)
Cranio e fronte	150	4.4
Volto	75	4.4
Collo	50	1.2
Schiena e spalle	35	40
Petto	25	40
Addome	10	40
Bacino	25	40
Parte superiore braccia e articolazione gomito	30	3
Parte inferiore braccia e articolazione polso	40	2
Mani e dita	75	0.6
Cosce e ginocchia	50	75
Parte inferiore gambe	60	75

Tabella 2.3: Costanti elastiche e masse efficaci per ognuna delle regioni del corpo.

Modello del contatto

Nel caso in cui il contatto sia quasi-statico, i valori di 2.2 possono essere impiegati in maniera diretta per il controllo dei parametri prestazionali di forza del robot, mediante l'impiego di appositi dispositivi di misura su di esso installati.

In generale, i valori di 2.2 vengono impiegati per definire l'energia trasmessa all'interfaccia uomo-robot in occasione del contatto e per regolare la velocità del manipolatore di conseguenza.

Devono essere note e tenute in considerazione:

1. specifiche informazioni relative a manipolatore, utensile e pezzo, quali:
 - la massa del carico m_L ;
 - la massa totale delle parti mobili del robot M ;
2. situazioni previste e ragionevolmente prevedibili di contatto uomo-macchina, e nello specifico
 - se il contatto è quasi-statico o transitorio;
 - i suddetti limiti massimi ammissibili di carico biomeccanico 2.2;
 - se si vuole ragionare in termini di pressione,
 - la superficie in corrispondenza della quale è previsto/prevedibile il contatto e le sue caratteristiche fisiche.

Per descrivere il contatto si impiega il modello fisico-matematico di urto completamente anelastico (1.2.2) tra due masse. La massa efficace del robot m_R

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L \quad (2.1)$$

entra in contatto con la massa efficace m_H , rappresentativa della regione della parte del corpo dell'operatore, ad una velocità relativa v_{rel} in corrispondenza di una superficie di area A (2.1). Si assume che l'energia cinetica venga interamente trasmessa alla regione interessata.

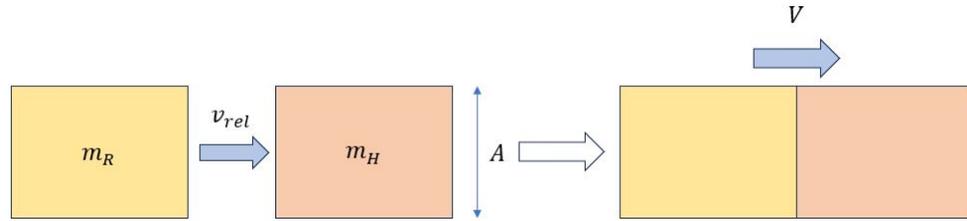


Figura 2.1: Modello semplificato del contatto.

Formulazione analitica

Si procede quindi calcolando il massimo trasferimento di energia E consentito inserendo i valori di forza F_{max} di 2.2 nell'equazione

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} \quad (2.2)$$

Si ottiene quindi un valore di energia massima trasferibile per ciascuna regione del corpo come mostrato in Tabella 2.4. Dai valori di energia massima trasferibile ottenuti si ricavano quelli per la velocità relativa massima v_{rel} . Tale valore corrisponde, nell'ipotesi in cui l'operatore sia fermo, alla velocità alla quale può muoversi il manipolatore per mantenere, nell'eventualità di collisioni, la forza applicata entro i limiti di soglia di Tabella 2.2.

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{1}{2} m_{rid} v_{rel}^2 \quad (2.3)$$

dove

- m_{rid} è la massa ridotta del sistema a due corpi 2.1 considerato nella presente trattazione;
- v_{rel} è la velocità relativa tra robot e regione del corpo interessata dal contatto.

La massa ridotta m_{rid} si calcola con

$$m_{rid} = \left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1} \quad (2.4)$$

con m_H da Tabella 2.3 e m_R da 2.1.

Regione del corpo	Energia massima trasferibile E (J)
Cranio e fronte	0,225
Volto	0,113
Collo	0,9
Schiena e spalle	2,52
Petto	1,568
Addome	2,42
Bacino	2,592
Parte superiore braccia e articolazione gomito	1,5
Parte inferiore braccia e articolazione polso	1,28
Mani e dita	0,523
Cosce e ginocchia	1,926
Parte inferiore gambe	0,563

Tabella 2.4: Energia massima trasferibile al verificarsi del contatto per ciascuna regione del corpo.

Da 2.3 si ricava l'espressione per v_{rel} responsabile della trasmissione della forza massima ammissibile F_{max} in caso di contatto

$$v_{rel} = \frac{F_{max}}{\sqrt{m_{rid}k}} \quad (2.5)$$

Limiti del modello matematico riportati nella norma

L'assunzione di contatto transitorio come urto completamente anelastico rappresenta un'approssimazione fortemente conservativa ai fini della sicurezza dell'operatore. Molto più realisticamente, il contatto transitorio avviene secondo modalità ibrida, a metà tra l'urto completamente anelastico e quello perfettamente elastico. Un'altra approssimazione fatta riguarda la superficie in corrispondenza della quale avviene il contatto robot-uomo: essa è assunta perfettamente piatta. La nor-

mativa chiude facendo riferimento a studi in corso riguardanti proprio il modello dell'urto e gli effetti di diverse geometrie e configurazioni dei corpi a contatto.

2.1.7 Commenti e considerazioni personali sul modello

Anche se quello cui si farà riferimento nella presente tesi sarà comunque il modello così come proposto in normativa (senza quindi di alcuna modifica), dedico questa sezione a commenti, considerazioni e ragionamenti in merito a possibili cambiamenti da apportare alla formulazione presentata nelle sezioni precedenti.

Modifica alla costante elastica efficace

Le costanti elastiche in 2.3 esprimono la rigidità delle regioni del corpo a livello osseo, o meglio, senza considerare la presenza di tessuti soffici a copertura delle ossa. All'aspetto degli elementi di *damping* viene però posta attenzione in svariate soluzioni commerciali. Soluzioni come il set per la misurazione delle collisioni *PRMS* per HRC della *PILZ* [10] o i dispositivi *CoboSafe GTE* [11] fanno infatti utilizzo di dischetti in silicone di diversi spessori per simulare tessuti soffici. In entrambe le soluzioni si ricorre a tre diversi elementi di compressione in silicone:

- uno di spessore 7 mm, Shore A70, avente una costante elastica pari a 240 N/mm;
- un secondo di spessore 14 mm, Shore A30, con costante elastica 36 N/mm;
- un terzo di spessore 21 mm, Shore A10.

Nelle prove di collisione il prototipo che sarà soggetto all'urto con il robot viene assemblato in modo da:

- mediante l'impiego di molle, avere le caratteristiche di rigidità di cui alla Tabella 2.3;
- avere un elemento di compressione all'interfaccia prototipo-robot che simuli il tessuto soffice per la parte del corpo di interesse nella valutazione della collisione.

Le combinazioni regione del corpo-elemento di compressione sono di seguito presentate in Tabella 2.5

Regione del corpo	Shore	Spessore (mm)
Cranio e fronte	A70	7
Volto	A70	7
Collo	A70	7
Schiena e spalle	A30	14
Petto	A70	7
Addome	A10	21
Bacino	A70	7
Parte superiore braccia e articolazione gomito	A30	14
Parte inferiore braccia e articolazione polso	A70	7
Mani e dita	A70	7
Cosce e ginocchia	A30	14
Parte inferiore gambe	A30	14

Tabella 2.5: Regioni del corpo ed elementi di compressione associati per simularne i tessuti soffici.

L'inserimento di suddetti elementi di compressione introduce una componente di rigidità aggiuntiva nel sistema, che ora presenta due elementi elastici disposti in serie. La costante elastica efficace equivalente k_{eff} sarà quindi

$$k_{eff} = \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_{damp}} \right)^{-1} \quad (2.6)$$

dove:

- k è la costante elastica efficace delle regioni del corpo da Tabella 2.3;
- k_{damp} è la costante elastica efficace dell'elemento di compressione, i cui valori per le due coperture maggiormente impiegate (Shore A30 e A70) sono

ricavate sperimentalmente in [12] (*non si hanno a disposizione valori di k_{damp} per la regione "Addome").

Impiegando k_{damp} in luogo di k in 2.3 per poi calcolare v_{rel} , si ottengono valori di velocità relativa maggiori.

Assumendo, a titolo esemplificativo, una massa efficace del robot m_R pari a 17,5 kg (30 kg attribuibili alle parti mobili e 2,5 kg al carico danno questo valore con 2.1), si ottengono i valori di velocità relativa v_{rel} illustrati in Tabella 2.6.

Regione del corpo	Velocità senza damping (mm/s)	Velocità con damping (mm/s)
Cranio e fronte	358	456
Volto	253	290
Collo	1266	1392
Schiena e spalle	643	903
Petto	507	533
Addome	630	*
Bacino	652	688
Parte superiore braccia e articolazione gomito	1082	1465
Parte inferiore braccia e articolazione polso	1194	1290
Mani e dita	1342	1538
Cosce e ginocchia	522	807
Parte inferiore gambe	281	460

Tabella 2.6: Confronto dei valori di velocità relativa introducendo o meno le caratteristiche dell'elemento di compressione nella formulazione analitica (* non si hanno a disposizione valori di k_{damp} per la regione "Addome").

Emerge quindi che, se si tenesse conto della presenza di tessuti morbidi nella formulazione analitica (rappresentabili mediante elementi di damping con una certa k_{damp}), si potrebbe aumentare la velocità relativa v_{rel} senza superare il valore

soglia di forza trasmissibile F_{max} .

In Tabella 2.7 sono presentati gli aumenti percentuali dei valori di v_{rel} attuabili considerando quanto esposto nelle righe precedenti.

Regione del corpo	Aumento di velocità relativa realizzabile considerando la presenza di tessuti soffici (%)
Cranio e fronte	27,48
Volto	14,56
Collo	9,92
Schiena e spalle	40,44
Petto	5,08
Addome	*
Bacino	5,08
Parte superiore braccia e articolazione gomito	35,40
Parte inferiore braccia e articolazione polso	8,01
Mani e dita	14,56
Cosce e ginocchia	54,56
Parte inferiore gambe	63,30

Tabella 2.7: Possibilità di aumentare la velocità relativa associata a ciascuna regione del corpo introducendo i tessuti soffici nel modello (* non si hanno a disposizione valori di k_{damp} per la regione "Addome").

La modifica alla formulazione analitica in questo caso ha riguardato la sola introduzione di una componente di rigidità aggiuntiva, senza alterare il modello di urto completamente anelastico. Ne consegue che un aumento di velocità relativa favorirebbe la produttività della cella e che, in virtù del carattere conservativo e cautelativo del modello impiegato, si manterrebbe comunque un buon livello di sicurezza per l'operatore.

Modifica alla massa efficace del robot

La massa efficace del robot viene calcolata in norma ISO TS 15066 mediante 2.1. Altra formula per il calcolo di m_R è quella proposta da Khatib [13] per manipolatori rigidi, che tiene conto della configurazione dei giunti.

Poiché non verrà utilizzata più avanti, tale formula non verrà riportata. Si sappia comunque che essa tiene conto della configurazione dei giunti ed in particolare:

- della direzione di movimento normalizzata;
- la parte traslazionale della matrice Jacobiana per la configurazione del giunto al momento del contatto;
- la matrice di inerzia al momento del contatto.

Quella che si propone qui di seguito è una formula più semplice, sulla falsariga di quella già illustrata per la norma 2.1:

$$m_R = \frac{M}{3} + m_L \quad (2.7)$$

Come è possibile notare dal confronto con 2.1, la modifica consiste nel diverso peso attribuito al contributo dato dalla massa M degli elementi mobili del robot. Questa modifica trova due giustificazioni:

- la massa del robot viene ripartita equamente non tra i soli due estremi della parte a sbalzo del manipolatore (dalla spalla all'interfaccia meccanica) ma divisa e ridistribuita come concentrata in corrispondenza dei giunti di spalla e gomito e del polso;
- se si considera lo sbalzo come un corpo rigido, la sua matrice di massa *Lumped* è diagonale [2x2] con valori non nulli pari a metà della massa totale; se si considera invece la matrice di massa *Consistent*, quest'ultima non è più diagonale e in posizione (2,2) si trova un terzo della massa totale. In ragione di ciò, all'estremità dove si trova l'interfaccia meccanica si può assumere la presenza di un terzo della massa totale delle parti mobili del manipolatore, cui andrà sommato il carico m_L .

Inserendo in 2.4 la formula di m_R proposta in luogo di quella presentata in norma e impiegando 1.24, si calcolano i valori di v_{rel} che si ottengono con l'assunzione oggetto della presente sezione.

Assunti a titolo esemplificativo massa degli elementi mobili del robot M pari a 30 kg e massa del carico m_L di 2,5 kg, in Tabella 2.8 si presenta un confronto tra i valori di v_{rel} da norma e quelli ottenuti apportando la modifica a m_R .

Regione del corpo	Velocità da norma (mm/s)	Velocità con modifica a m_R (mm/s)
Cranio e fronte	358	372
Volto	253	263
Collo	1266	1275
Schiena e spalle	643	727
Petto	507	574
Addome	630	713
Bacino	652	738
Parte superiore braccia e articolazione gomito	1082	1114
Parte inferiore braccia e articolazione polso	1194	1219
Mani e dita	1342	1351
Cosce e ginocchia	522	601
Parte inferiore gambe	281	324

Tabella 2.8: Confronto dei valori di velocità relativa ottenuti da norma e introducendo la modifica alla formulazione di m_R .

Come mostrato in Tabella 2.9, la modifica alla formulazione di m_R fa aumentare i valori di velocità alla quale il manipolatore esercita F_{max} in caso di contatto, ma in misura più contenuta rispetto a quanto visto in 2.1.7.

Regione del corpo	Aumento di velocità relativa realizzabile considerando la modifica a m_R (%)
Cranio e fronte	3,94
Volto	3,94
Collo	1,28
Schiena e spalle	13,06
Petto	13,06
Addome	13,06
Bacino	13,06
Parte superiore braccia e articolazione gomito	2,89
Parte inferiore braccia e articolazione polso	2,03
Mani e dita	0,66
Cosce e ginocchia	15,08
Parte inferiore gambe	15,08

Tabella 2.9: Possibilità di aumentare la velocità relativa associata a ciascuna regione del corpo introducendo la modifica alla formulazione di m_R .

In questo caso, ancor più che nel precedente 2.1.7, sono garantiti:

- un adeguato livello di sicurezza per l'operatore durante lo svolgimento dei task collaborativi, sia per il carattere conservativo e cautelativo del modello di riferimento sia perché gli aumenti di v_{rel} attuabili sarebbero comunque contenuti;
- un certo incremento della produttività grazie alla possibilità di aumentare la velocità operativa del manipolatore.

Capitolo 3

Apparato strumentale

In questo capitolo verranno descritte le fasi in cui si sono articolate progettazione e realizzazione del prototipo, sia a livello di concepimento dell'idea sia nell'ambito della scelta delle soluzioni tecniche.

Nello specifico, si partirà con una panoramica generale volta a fornire un'idea complessiva di come si è pensato di realizzare il dispositivo per poi passare alla trattazione riguardante le singole componenti del sistema, a ciascuna delle quali sarà riservata una sezione del presente capitolo.

3.1 Panoramica generale

Analisi di alcune soluzioni commerciali esistenti

Nella fase di concepimento dell'idea sono state valutate diverse possibilità di realizzazione del prototipo. Dopo un'attenta analisi di tutte le opzioni si è deciso di ricreare qualcosa di simile a soluzioni commerciali quali i dispositivi di misurazione della forza *PILZ* [10] e *CoboSafe CBSF* della *GTE Industreelektronik GmbH*[11]. Per avere un'idea più chiara di come si presentano i due tool citati, si vedano le Figure 3.1 e 3.2. Entrambe le soluzioni sono costituite da un dispositivo destinato ad essere soggetto alla collisione con il robot più accessori e sistemi di misurazione della forza impressa dal manipolatore.

Caratteristica comune a entrambi i dispositivi è quella di essere costituiti da:

- una base che verrà fissata;

- una piastra mobile;
- pistoni con funzioni di guida del movimento della piastra di cui sopra;
- una molla per simulare la rigidità della regione del corpo desiderata; tale molla è sostituibile e le soluzioni commerciali vengono vendute con un set di molle in grado di coprire tutti i valori in Tabella 2.3.

Entrambe le soluzioni prevedono l'impiego di elementi di compressione 2.1.7 a rivestimento della piastra (per esigenze di biofedeltà alla regione del corpo) e di una coppia di film sensibili. La soluzione GTE si differenzia, in fase di esecuzione del test, per l'utilizzo di un panno in microfibra a copertura dei due film.

In entrambi i casi, a prova completata, i film vengono scannerizzati mediante apposita strumentazione e, attraverso elaborazione di software debitamente programmati, vengono fornite all'utilizzatore le misurazioni di forza e pressione esercitati dal manipolatore sul dispositivo.

In aggiunta, la soluzione GTE permette di visualizzare i valori massimi di forza per contatto transitorio e quasi-statico (regime) da un display integrato al dispositivo.



Figura 3.1: Dispositivo per la misurazione della forza PRMS, <https://www.pilz.com/it-IT/products/robotics/prms/prms>



Figura 3.2: Dispositivo per la misurazione della forza CoboSafe, <https://www.gte.de/en/produkte/messtechnik/cobosafe-cbsf>

Progettazione concettuale

Dopo aver condotto l'analisi di funzionamento e le dovute valutazioni in termini di complessità strutturale e costo delle varie soluzioni, si è deciso di sviluppare un prototipo semplice ma funzionale.

Entrando più nel dettaglio, il dispositivo è stato pensato come costituito da:

- una base per il fissaggio al piano di lavoro;
- un gruppo di molle (in luogo della molla singola) in parallelo al fine di simulare le varie costanti elastiche delle regioni del corpo;
- una piastra su cui andrà ad urtare il manipolatore;
- dei cilindri guida per garantire discesa verticale della piastra di cui sopra durante l'urto;

- misure tecniche per garantire l'integrità delle singole componenti e del sistema nel complesso, integrando le soluzioni descritte in apposita sezione a seguire;
- una copertura che protegga da usura e/o danneggiamenti di altra natura la piastra di cui sopra;
- una cella di carico integrata per la misurazione della forza in luogo delle soluzioni più impegnative ed elaborate impiegate nelle due alternative commerciali precedentemente descritte.

Si procede quindi spiegando il funzionamento del dispositivo pensato e descritto qui sopra. La base del prototipo viene portata entro lo spazio raggiungibile del manipolatore, collocata in modo che l'*end-effector* possa andare ad urtare il prototipo con moto verticale dall'alto verso il basso e fissata al banco di lavoro. Il prototipo viene quindi assemblato dopo aver scelto le molle rappresentanti la regione d'interesse e la copertura di silicone dello spessore più indicato. Si procede quindi facendo impattare il robot con il dispositivo. La forza sarà misurata dalla cella di carico e, dall'analisi dei valori rilevati, si deciderà sull'eventuale necessità di regolare i parametri prestazionali del robot, al fine di garantire la sicurezza dell'operatore durante la collaborazione.

3.2 Vincoli e limitazioni

Prima di entrare nel dettaglio della progettazione delle singole componenti dell'apparato sperimentale, si riporta che le scelte riguardanti le dimensioni delle parti sono state vincolate dal *build volume* della stampante 3D Ultimaker S3 a disposizione.

Si riportano le seguenti specifiche:

Build Volume (XYZ)

230 x 192 x 200 mm.

3.3 Biofedeltà del prototipo

Nella seguente sezione sono presentate le considerazioni fatte e le conclusioni tratte per quanto riguarda le soluzioni adottate per simulare le caratteristiche di rigidità e massa delle regioni del corpo umano descritte in norma ISO TS 15066 [4] e riportate nella presente tesi in Tabella 2.3.

3.3.1 Rigidità

Per riprodurre le rigidità delle regioni del corpo indicate in norma ISO TS 15066 2.3 sono state valutate diverse possibili soluzioni alternative, quali:

- una struttura a rigidità variabile funzione della particolare configurazione assunta fra diverse possibili;
- una o più molle pneumatiche;
- una o più molle a compressione.

Come già anticipato, si è optato per l'ultima opzione in quanto di più semplice progettazione e realizzazione rispetto alle altre due presentate.

Nello specifico, si è deciso di optare per una soluzione a 4 molle in parallelo, secondo una configurazione che prevede 3 di queste disposte ai vertici di un triangolo equilatero e la quarta collocata in posizione centrale, nel baricentro.

Dai valori delle rigidità per ciascuna regione del corpo si è quindi stabilito il numero minimo di molle necessario a coprire, in diverse combinazioni, tutti i valori della tabella di riferimento 2.3. Si sono rispettati i seguenti criteri:

- la rigidità desiderata doveva essere realizzata usando non meno di 4 molle;
- le molle dovevano avere disposizione simmetrica (4 tutte uguali o solo la centrale con costante elastica diversa).

Per realizzare tutte le rigidità sono necessarie 16 molle, aventi costante elastica uguale a quattro a quattro: 2.5 N/mm, 7.5 N/mm, 12.5 N/mm e 37.5 N/mm.

Nella Tabella 3.1 a seguire si illustra come, con le molle di cui sopra, sia possibile realizzare le rigidità indicate in norma.

Costante elastica efficace (N/mm)	Configurazione (quantità molle x costante elastica)
150	4 x 37,5
75	1 x 37,5 3 x 12,5
60	1 x 37,5 3 x 7,5
50	4 x 12,5
40	1x 2,5 3 x 12,5
35	1 x 12,5 3 x 7,5
30	4 x 7,5
25	1 x 2,5 3 x 7,5
10	4 x 2,5

Tabella 3.1: Configurazioni delle molle per realizzare le costanti elastiche efficaci da norma ISO TS 15066.

Dimensionamento e scelta delle molle

Individuato il numero di molle e la costante elastica di ciascuna "tipologia", si è proceduto al dimensionamento delle stesse, ossia alla determinazione dei parametri di corsa [mm], e quindi carico massimo [N], che tali elementi devono possedere per poter essere impiegabili nel prototipo e dunque nelle prove di collisione.

Partendo dai valori di forza massima ammissibile per il contatto transitorio per ciascuna regione del corpo (vedasi Tabella 2.2), considerate le configurazioni con molle tutte uguali, si è diviso il carico fornito per 4, in modo da ottenere il carico minimo che ciascun elemento avrebbe dovuto sostenere.

Per la scelta delle molle ci si è affidati a *Sodemann Industrijedre A/S* [14], inserendo i valori di carico minimo ottenuti e le rigidità delle tipologie di molle (sotto forma di intervallo, +/-20%) come criteri di ricerca fra i prodotti a catalogo.

Oltre ai due parametri di cui sopra, necessari il primo per l'effettiva eseguibilità della prova ed il secondo per esigenze di biofedeltà, si è cercato di trovare molle che avessero diametri, lunghezza e corsa confrontabili e compatibili, in modo da semplificare la successiva progettazione non solo delle sedi destinate ad accoglierle ma anche del prototipo nel complesso.

Identificate le molle rispondenti ai requisiti identificati, si è poi verificato che queste soddisfacessero le specifiche di carico anche per le configurazioni con molla centrale diversa da quelle esterne 3.3.1.

Nella Tabella 3.2 a seguire sono riportati i modelli delle molle scelte e le loro caratteristiche.

Codice Prodotto	Costante elastica (N/mm)	Corsa (mm)	Diametro esterno (mm)	Diametro interno (mm)	Lunghezza (mm)
C06000632500M	2,49	30,28	15,24	12,04	63,5
C06000852500S	7,4	18,85	15,24	10,92	63,5
C06000922500M	12,47	16,56	15,24	10,56	63,5
C12252073500S	37,84	16,33	31,12	20,6	88,9

Tabella 3.2: Molle impiegate (*Sodemann Industrijedre A/S* <https://www.molle-industriali.it/> [14]) e caratteristiche.

In Tabella 3.3 si riportano quindi le costanti elastiche effettivamente realizzabili impiegando le molle scelte confrontate con quelle indicate dalla norma. Le costanti elastiche effettivamente realizzabili mediante le molle scelte sono ritenute accettabili rispetto ai valori forniti in norma, in quanto gli scostamenti percentuali da tali valori sono al massimo +1,333% e -0,943%.

Costante elastica effettiva (N/mm)	Costante elastica da norma (N/mm)	Scostamento percentuale (%)
151,36	150	+0,907
75,25	75	+0,33
60,04	60	+0,067
49,88	50	-0,240
39,9	40	-0,250
34,67	35	-0,943
29,6	30	-1,333
24,69	25	-1,240
9,96	10	-0,400

Tabella 3.3: Confronto tra le costanti elastiche realizzabili tramite le molle scelte e quelle indicate in norma ISO TS 15066.

3.3.2 Massa

Le masse efficaci assegnate alle vari regioni del corpo 2.3 non sono state riprodotte in alcun modo nel dispositivo, linea seguita anche nelle due soluzioni commerciali utilizzate come riferimento 3.1.

Le considerazioni che hanno portato a questa decisione sono di seguito illustrate. La parte di prototipo che andrà ad interagire direttamente con il manipolatore durante le prove di collisione può essere considerata, in maniera semplificata, come un sistema massa-molla, in cui la massa M rappresenta la piastra che subisce l'urto con il robot e la molla ha costante elastica equivalente k a quella del gruppo molle per una data configurazione.

La legge che regola il moto del sistema è

$$M\ddot{x} + kx = F_0 \quad (3.1)$$

con F_0 termine relativo all'ampiezza della forza.

Da 3.1 si ricava

$$x(t) = \frac{F_0}{k}[1 - \cos(\omega_n t)] \quad (3.2)$$

con

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}. \quad (3.3)$$

Il termine relativo alla massa M influenza la sola pulsazione della risposta come visto in 3.3 mentre non ha alcuna influenza sull'ampiezza. Da qui la decisione di non considerare l'implementazione delle masse in 2.3 nel prototipo in alcuna forma, né realizzando piastre intercambiabili né pensando ad alloggiamenti per pesi aggiuntivi.

A titolo esemplificativo si riporta in Figura 3.3 l'andamento della risposta dei sistemi rappresentativi di "volto" e "mani e dita", aventi in Tabella 2.3 stessa k ma diversa m_H , soggetti ad una forza di ampiezza 100 N.

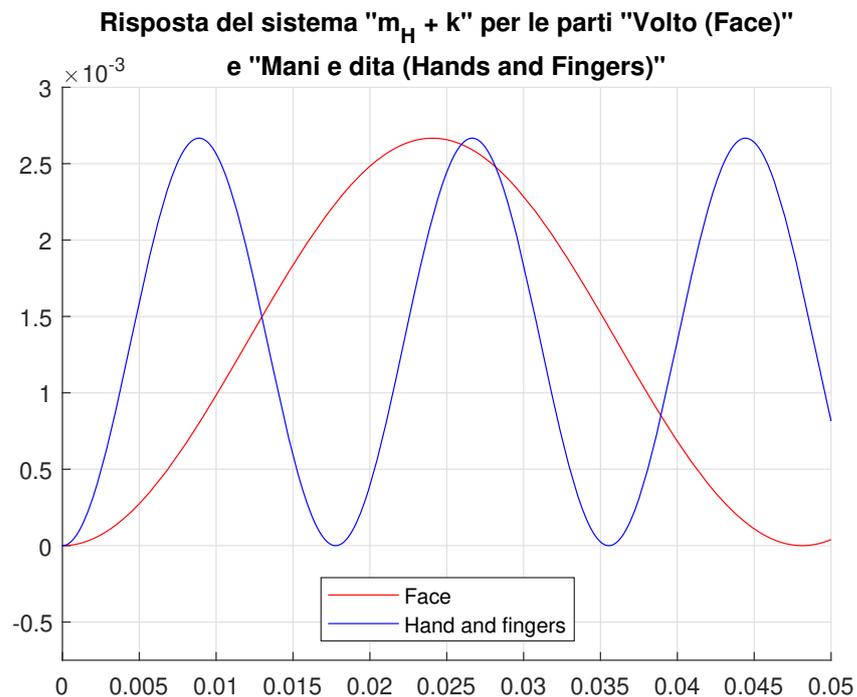


Figura 3.3: Confronto dell'andamento teorico della risposta dei sistemi rappresentativi di "volto" e "mani e dita" soggetti ad una forza di ampiezza 100 N.

3.4 Parte Superiore: componenti di contenimento delle molle

Il gruppo molle, qualsiasi sia la configurazione, dovrà essere mantenuto fermo, senza possibilità di scorrimento lungo il piano orizzontale di una, l'altra o entrambe le estremità dei singoli elementi di rigidità. Per raggiungere questa condizione sarà necessario pensare ad opportune soluzioni tecniche al momento della progettazione e realizzazione dei due componenti a contenimento del gruppo molle, ossia delle parti che chiameremo:

- piastra superiore, destinata a subire l'urto del robot;
- prima piastra inferiore, dove l'utilizzo dell'aggettivo "prima" sarà poi specificato nella sezione dedicata alla parte inferiore del dispositivo 3.5.

In questa sezione verranno descritte:

- le *feature* adottate per garantire la stabilità del gruppo molle;
- le altre caratteristiche che si è deciso di attribuire agli elementi superiore ed inferiore, tralasciando alcune delle peculiarità del secondo perché trattate in un'altra sezione.

Piastra superiore

Alla luce del modello di urto impiegato dalla normativa, la parte destinata alla collisione con il manipolatore è stata fin dal principio pensata piatta. Per risparmiare materiale nella realizzazione del prototipo mediante stampante 3D, si è poi deciso di realizzare la piastra superiore con forma non circolare ma triangolare a vertici arrotondati.

Si veda Figura 3.4.

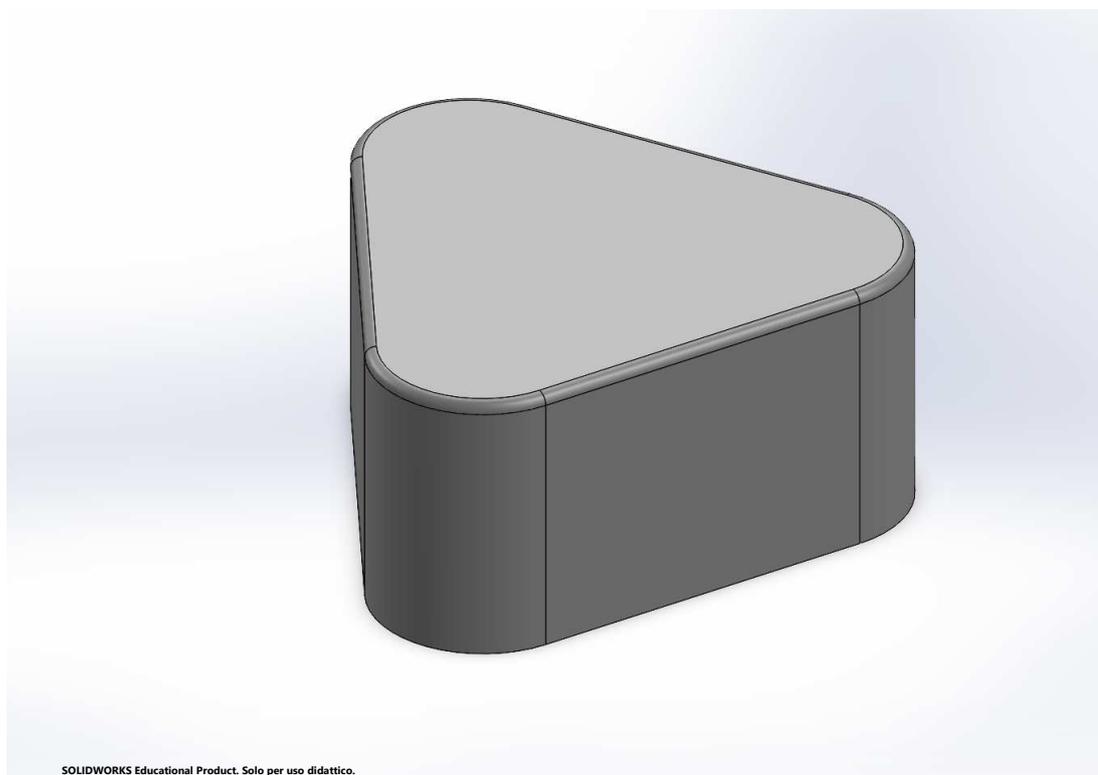


Figura 3.4: Parte superiore, interfaccia piatta.

Per quanto riguarda il contenimento del gruppo molle, le considerazioni sui diametri anticipate in fase di scelta delle componenti di rigidità in 3.3.1 sono state qui impiegate per la realizzazione di alloggiamenti nella forma di cave concentriche. Le molle sono state infatti scelte, come già detto, per semplificare anche fasi di progettazione come questa. In particolare, si fa notare che le tre tipologie con costante elastica minore hanno diametro esterno uguale tra loro e più piccolo rispetto a quello interno della tipologia più rigida, tanto da permettere la realizzazione di due cave concentriche per l'alloggiamento.

Si è poi dotata la piastra con quattro corpi cilindrici cavi, uno al centro di ciascuna corona di alloggiamenti. Essi serviranno per l'accoppiamento con elementi guida presenti nella prima piastra inferiore. La profondità del foro dei corpi cilindrici è stata decisa sulla base dei valori di corsa massima delle molle scelte 3.2. Per chiarire ulteriormente come si presenta la parte della piastra destinata ad accogliere le molle, si fornisce l'immagine in Figura 3.5.

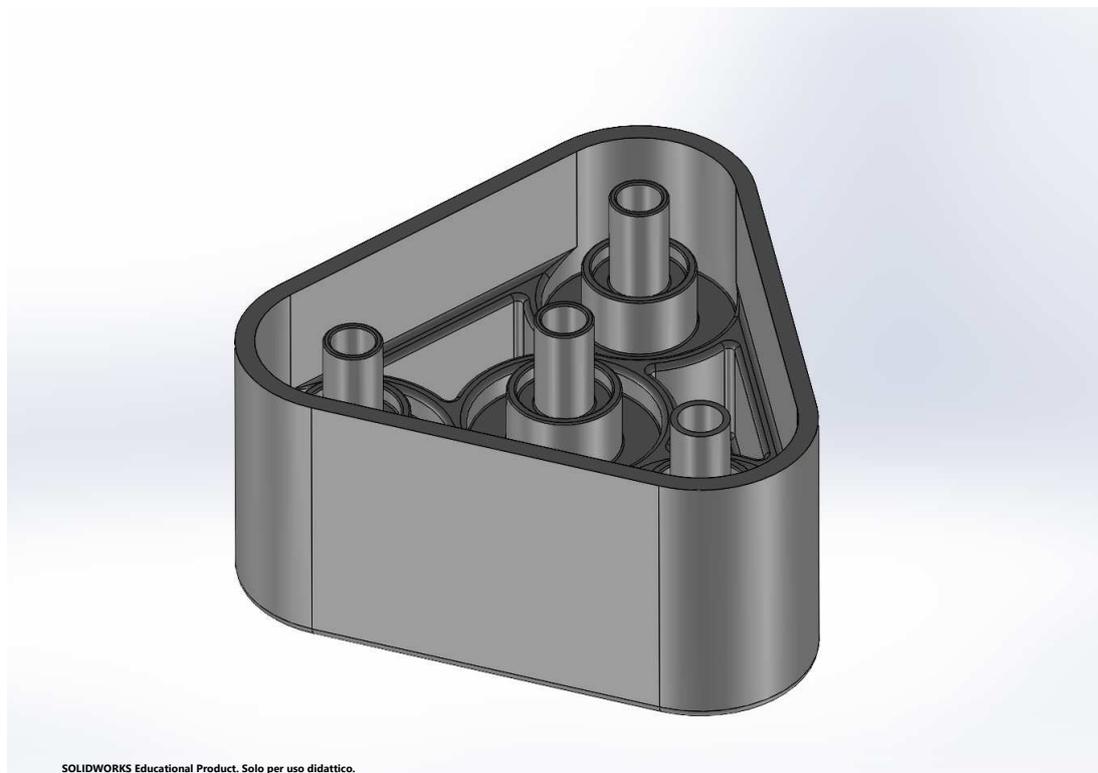


Figura 3.5: Parte superiore del dispositivo, vista sulle cave concentriche per l'alloggiamento delle molle.

Prima piastra inferiore

Così come la piastra superiore 3.4, anche la prima piastra inferiore presenta:

- cave di alloggiamento per l'altra estremità delle molle, che impediscono traslazioni sul piano orizzontale degli elementi di rigidità lasciando loro al più libertà di ruotare attorno all'asse;
- forma triangolare a vertici arrotondati per questioni di rispetto dei vincoli di *build volume* della Ultimaker S3 e di risparmio di materiale in fase di stampa.

Si differenzia invece per la presenza di elementi cilindrici, centrati rispetto alle cave e con funzioni di guida. Essi infatti, accoppiati con i corpi cilindrici cavi della piastra superiore, garantiscono che il moto della parte soggetta all'urto avvenga in direzione verticale. La struttura della prima piastra inferiore fin qui descritta viene presentata in Figura 3.6

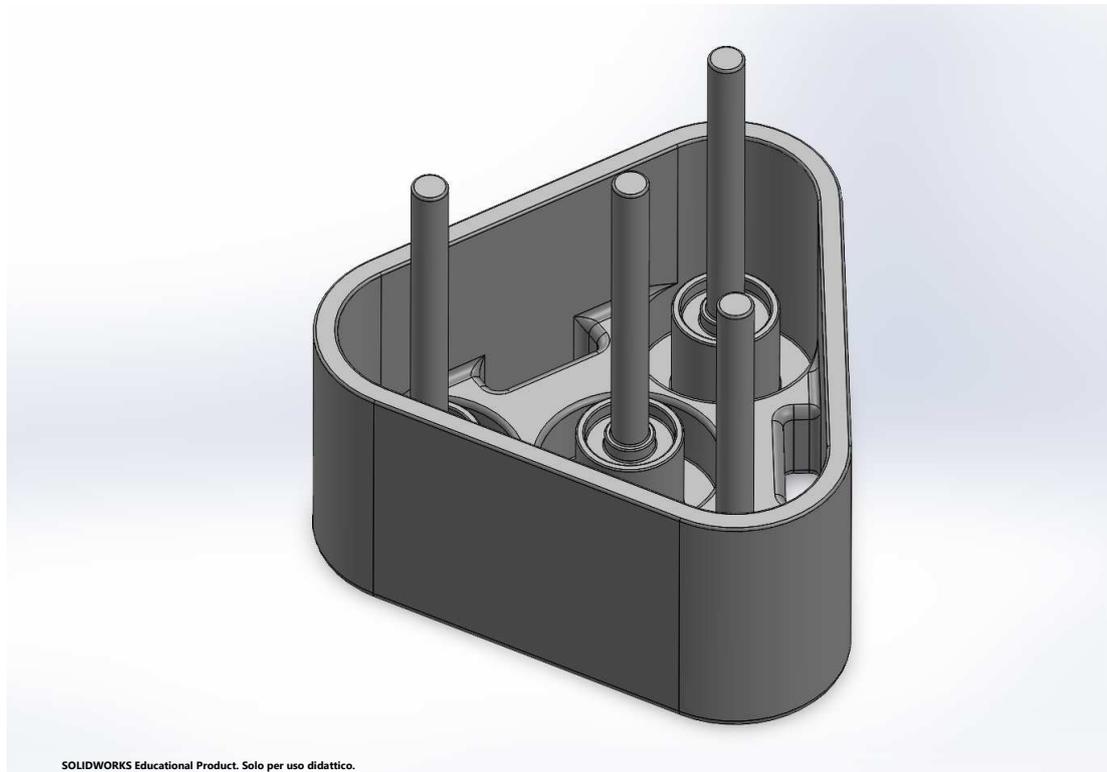


Figura 3.6: Prima piastra inferiore, lato contenimento delle molle.

Scelta costruttiva per mantenere una certa linearità delle molle

Si vuole concludere la descrizione della parte di prototipo destinata al contenimento del gruppo molle trattando una particolare scelta fatta nel corso della progettazione.

Per come è stato pensato il funzionamento del prototipo, la parte superiore scende verticalmente una volta avvenuto l'urto con il manipolatore, con compressione delle molle. Si è quindi fatto in modo che:

- per le configurazioni di molle che sostengono carichi minori, le piastre superiore e prima inferiore dovranno entrare in contatto prima che la compressione degli elementi di rigidità raggiunga la corsa massima; da lì, un ulteriore aumento del carico porterà all'attivazione di una misura di sicurezza 3.5.1 se verrà raggiunto il valore limite di forza;
- per le configurazioni che hanno capacità di carico maggiore non si avrà "chiusura" delle piastre né raggiungimento della compressione massima (con

spire delle molle a diretto contatto), ma verrà subito chiamata in causa la soluzione tecnica di sicurezza.

Questo accorgimento, nella forma di un bordo rialzato sulle superfici delle due piastre interessate, è stato adottato al duplice scopo di:

- mantenere in primis il comportamento delle molle il più lineare possibile, per conferire alle prove validità in virtù della fedeltà al modello fisico-matematico;
- in secondo luogo per fornire, nel caso delle configurazioni meno rigide, un primo evento di *warning* che segnali l'istante in cui cade la validità della prova.

Nel prototipo ciò si traduce in una distanza di 15 mm tra le due piastre di contenimento in assenza di carichi esterni.

In Tabella 3.4 si riportano le configurazioni di molle per le quali si ha passaggio per la chiusura delle piastre e carico al quale tale condizione è raggiunta.

Costante elastica effettiva (N/mm)	Carico di chiusura (N)
34,67	520,05
29,6	444,00
24,69	370,35
9,96	149,40

Tabella 3.4: Costante elastica effettiva e carico di chiusura delle piastre delle configurazioni per le quali si verifica tale passaggio intermedio.

Si riporta a commento finale l'impossibilità di realizzare misurazioni significative in caso di contatto transitorio per la configurazione di molle a rappresentazione dell'addome (10 N/mm da ISO TS 15066, 9.96 N/mm nell'apparato in esame): la soglia massima riportata nella norma è infatti di 220 N per la suddetta tipologia di urto mentre con l'introduzione della soluzione progettuale appena descritta si raggiungono massimo 149,40 N (valore che comunque supera la forza massima ammissibile per contatto quasi-statico).

3.5 Parte inferiore del prototipo

La parte inferiore del prototipo è costituita da tre parti:

- la prima piastra inferiore;
- la seconda piastra inferiore;
- la base per il fissaggio del dispositivo al piano di lavoro.

Le indicazioni "prima" e "seconda" sono utilizzate per diversificare due elementi della parte inferiore sulla base dell'ordine in cui li troveremmo in un ipotetico esploso del prototipo, procedendo dall'alto verso il basso.

Prima piastra inferiore

Oltre alle feature con funzione di contenimento delle molle e guida del movimento, la prima parte inferiore presenta tre fori rettangolari passanti per l'accoppiamento con la seconda piastra inferiore.

Tali fori sono mostrati in Figura 3.7.

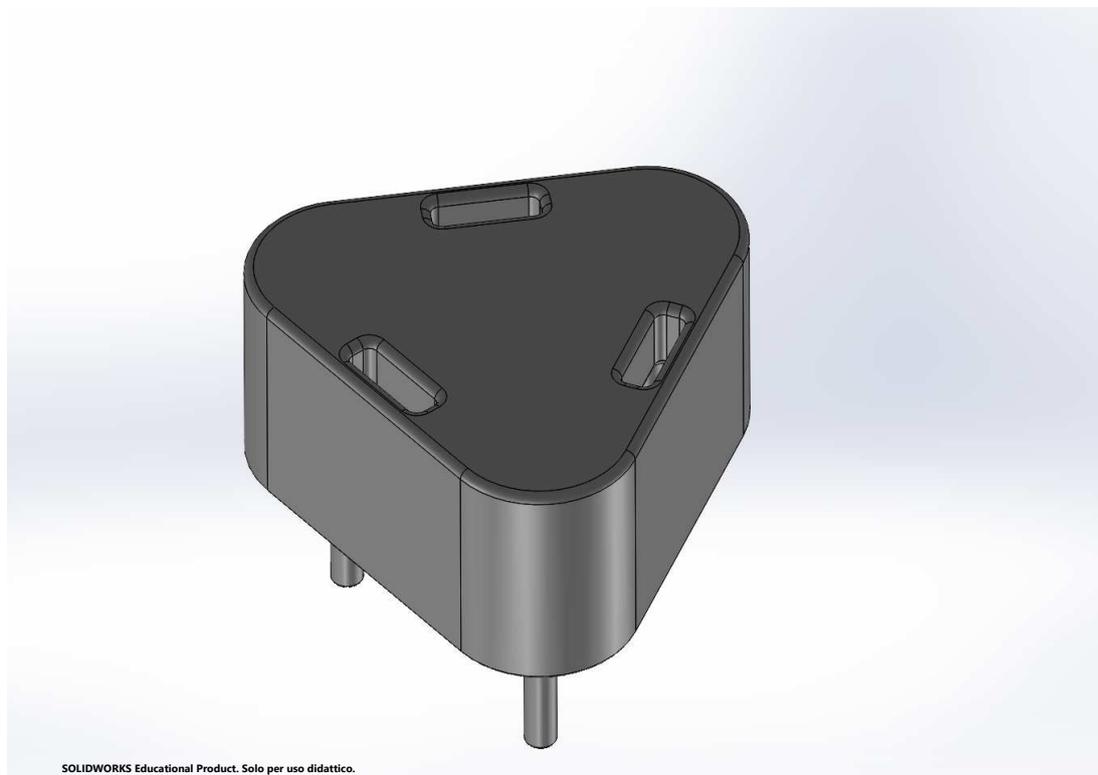


Figura 3.7: Prima piastra inferiore, dettaglio dei fori per l'accoppiamento con la seconda piastra inferiore.

Seconda piastra inferiore

La seconda piastra inferiore presenta:

- forma triangolare con rimozione dei vertici, al fine di ridurre il materiale impiegato in fase di stampa del pezzo;
- degli elementi a forma di parallelepipedo per l'accoppiamento con la prima piastra inferiore, mediante inserimento nei fori di cui 3.7;
- una cava per l'alloggiamento della cella di carico e per il passaggio dei suoi cavi;
- 12 cave laterali per l'inserimento di spine, la cui funzione verrà spiegata in seguito nella sezione dedicata 3.5.1.

La cava per l'alloggiamento della cella è di forma cilindrica con tre spazi a canale destinati alla fuoriuscita del cavo. Sul fondo di tale cava è stato realizzato un foro

esagonale per l'inserimento in pressione di un dado M6 per il fissaggio del sensore di forza scelto (si veda 3.6.3 di seguito).

In Figura 3.8 a seguire si mostra come si presenta la seconda piastra inferiore.

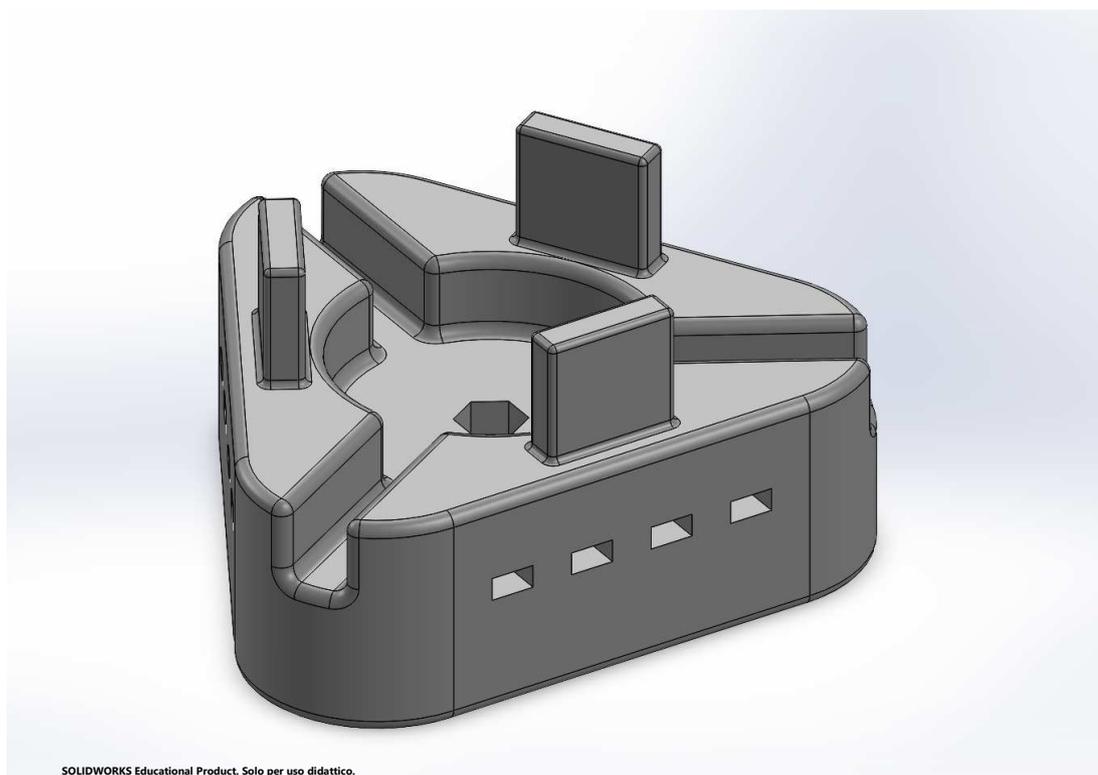


Figura 3.8: Seconda piastra inferiore.

Base di fissaggio del dispositivo

La base del dispositivo ha diverse funzioni:

- accogliere la seconda parte inferiore;
- fornire sostegno al dispositivo;
- permetterne il fissaggio ad un piano di lavoro, in modo da garantirne la stabilità durante le prove.

La prima funzione viene assolta mediante una struttura a collare che avvolge la seconda parte inferiore con un certo margine (occorre evitare vi sia attrito tra le

pareti delle due parti in questione per motivi che saranno resi più chiari successivamente). Tale struttura a collare presenta profilo a triangolo a vertici arrotondati come le parti già descritte ed è dotata di 12 fessure laterali per l'inserimento di già citate spine.

Il sostegno delle parti soprastanti del dispositivo è garantito dalle spine (si veda 3.5.1 per entarare nel dettaglio della questione).

Per quanto riguarda il fissaggio a banco, la base si presenta come una piastra rettangolare a vertici arrotondati con tre fori M6. Tali fori hanno un interasse di 49.8 mm, valore corrispondente alla distanza tra le scanalature del piano di lavoro utilizzato nell'ambito della presente tesi. Le pareti esterne del collare e i fori sono distanziati in modo da permettere l'impiego di rondelle con diametro fino a 20 mm circa.

Per ulteriori chiarimenti si veda la Figura 3.9 a seguire.

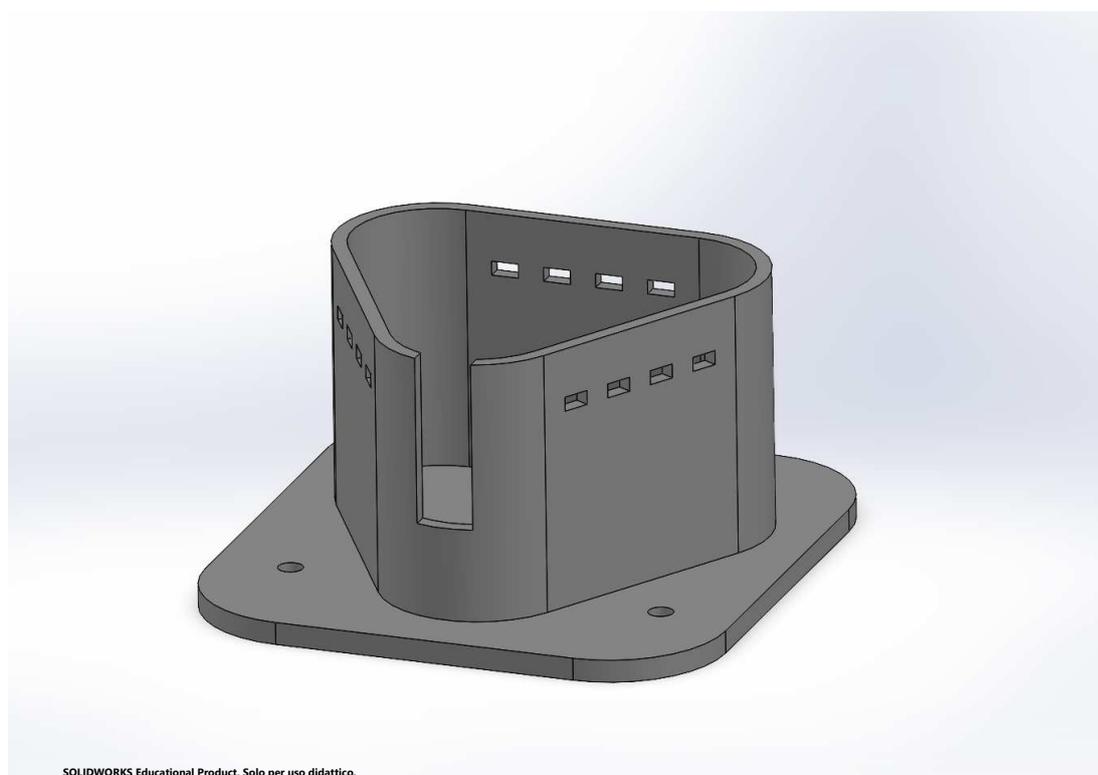


Figura 3.9: Base del dispositivo.

3.5.1 Misure di sicurezza: spine

Le spine offrono, come già detto in 3.5, funzione di sostegno alle parti del dispositivo soprastanti la base. Svolgono però anche funzione di sicurezza.

Si è infatti ragionato su come salvaguardare il dispositivo in caso di carichi troppo elevati che sarebbero andati ad intaccarne l'integrità. L'idea è stata quella di realizzare il dispositivo come sospeso e sorretto da un mezzo che avesse una resistenza tale da cedere sotto carichi di una certa entità. La rottura di tale mezzo avrebbe sottratto il prototipo all'azione dell'*end-effector* del robot con una caduta controllata dall'altezza di 3,4 cm (questa la quota alla quale la seconda parte inferiore è sostenuta rispetto al fondo della struttura a collare).

Occorreva quindi individuare quale mezzo con modo di rottura orientato adottare e determinarne le caratteristiche dimensionali per assolvere alla funzione di cui sopra.

Le soluzioni valutate per garantire l'integrità del dispositivo in caso di carichi eccessivi sono state:

- l'implementazione di alette;
- l'utilizzo di un disco di sostegno con intagli;
- l'impiego di alette.

La scelta è ricaduta su quest'ultima tipologia di componenti per due motivi principali, quali:

- semplicità realizzativa della soluzione, in quanto spine a sezione rettangolare risultano particolarmente facili da ottenere mediante tecnologie dell'*Additive Manufacturing* come la stampa 3D;
- progettazione poco onerosa dal punto di vista analitico.

Di seguito si illustrano nel dettaglio le fasi in cui si è articolata la progettazione delle spine.

Innanzitutto, si è calcolato il carico massimo sostenibile per tutte le possibili configurazioni di molle realizzabili dai dati di corsa in 3.2 e di costante elastica effettiva in 3.3. I risultati sono contenuti in Tabella 3.5.

Costante elastica effettiva (N/mm)	Corsa massima (mm)	Carico massimo (N)
151,36	16,33	2471,71
75,25	16,33	1228,83
60,04	16,33	980,45
49,88	16,56	826,01
39,9	16,56	660,74
34,67	16,56	574,14
29,6	18,85	557,96
24,69	18,85	465,41
9,96	30,28	301,59

Tabella 3.5: Costante elastica effettiva, corsa massima e carico massimo delle configurazioni realizzabili.

Alla luce dei risultati ottenuti, si è scelto di porre 540 N come carico al quale si sarebbe attivata la funzione di sicurezza ad opera spine.

Tale valore consente infatti di:

- salvaguardare l'integrità del prototipo per le configurazioni possibili delle molle, eccezion fatta per le due meno rigide;
- eseguire prove con carichi fino a 100 N superiori al massimo valore soglia in Tabella 2.2, che è pari a 440 N.

Nel contesto del dispositivo realizzato, si è assunto il comportamento degli elementi spina uguale a quello di travi incastrate ad un'estremità, con l'altra libera e soggetta al carico "limite di sicurezza" individuato diviso per il numero di spine. Tale numero è stato deciso pari a 12, in modo da poter disporre 4 spine per superficie laterale (piatta) del collare.

Per travi inflesse il momento flettente M_f all'incastro vale

$$M_f = Fl \quad (3.4)$$

con:

- F forza applicata, che nel caso in esame è pari al carico limite di sicurezza per spina, pari a 45 N;
- l lunghezza della trave, qui corrispondente alla lunghezza libera della spina; si è optato per una spina di 30 mm, da cui $l=15$ mm in virtù delle soluzioni adottate per il dispositivo in corrispondenza dell'accoppiamento *struttura a collare-seconda piastra inferiore*.

La 3.4 può essere riscritta come

$$M_f = \sigma_{max} W_f \quad (3.5)$$

con σ_{max} tensione massima del materiale (45,3 MPa da datasheet [15] per il *Tough PLA*) e W_f modulo di resistenza a flessione. Si è quindi calcolato W_f .

Tale parametro può essere anche espresso come

$$W_f = \frac{I_x}{y_{max}} \quad (3.6)$$

con I_x momento di inerzia della sezione rispetto all'asse x (parallelo alla base, passante per il baricentro) e y_{max} semi-altezza della sezione. I_x , per sezione rettangolare di base b e altezza h , è dato da

$$I_x = \frac{1}{12} b h^3. \quad (3.7)$$

Sostituendo 3.7 e $y_{max}=h/2$ in 3.6 si ottiene

$$W_f = \frac{1}{6} b h^2. \quad (3.8)$$

Stabilita base b della sezione della spina pari a 7 mm, immettendo il valore trovato con 3.5 in 3.8 si è determinata una altezza h pari a 3,574 mm. Approssimando a 3,6 mm, procedendo all'inverso, si è determinato che ogni spina risulta resistere singolarmente per carichi entro i 45,6 N: l'impiego di 12 spine garantisce l'attivazione della misura a garanzia dell'integrità del prototipo per carichi a partire dai 547,2 N.

3.6 Misurazione della forza applicata

Poiché la grandezza di interesse nell'ambito della prova è una forza, si è optato per l'utilizzo di una cella di carico come strumento di misurazione. A seguire verranno indicate le fasi in cui si è articolata la verifica di compatibilità e quindi la scelta del dispositivo di misurazione.

3.6.1 Capacità di carico

Il primo parametro valutato per la compatibilità della cella al prototipo e alla prova, alla luce dell'entità delle forze in gioco, è stato la capacità di carico. Il valore di riferimento utilizzato come criterio di ricerca e poi scelta è stato quello determinato come carico limite di sicurezza in fase di dimensionamento delle spine, cioè 547,2 N. A tale valore si è fatto riferimento come capacità minima che la cella di carico avrebbe dovuto avere per soddisfare le esigenze presentate ad introduzione della sezione 3.6.

Si è quindi ristretta la ricerca alle celle di carico con capacità di almeno 1000 N, valore ricorrente nelle soluzioni commerciali e primo disponibile maggiore al riferimento stabilito.

3.6.2 Analisi di frequenza

Il secondo parametro valutato nella scelta della cella di carico è stato la larghezza di banda. Occorre infatti che la cella di carico sia compatibile in termini di *bandwidth* con il comportamento del sistema (ossia del prototipo).

Per trovare la larghezza di banda del prototipo, si è eseguita un'analisi di frequenza in ambiente MATLAB al fine di determinare la minima e la massima frequenza naturale.

Al fine di eseguire tale tipo di analisi via *Fast Fourier Transform (FFT)* occorre avere a disposizione un andamento di forza da impiegare come input. Per averne uno affidabile, si è fatto riferimento al grafico in Figura 3 di [12], da cui si è usato come riferimento specifico il profilo per velocità pari a 240 mm/s.

Il motivo dietro la scelta di questa fonte nello specifico è da ricercarsi:

- nelle modalità di esecuzione della prova, le medesime di quelle previste dalla presente tesi;
- nel tipo di dispositivo impiegato nella misurazione; esso infatti appartiene alla serie CoboSafe, cui ci si è ispirati nella progettazione della soluzione oggetto dell'elaborato.

Il profilo è stato quindi discretizzato dividendo l'intervallo di tempo della misurazione in sotto-intervalli ed individuando per ciascuno di essi un valore di forza rappresentativo. Il risultato della discretizzazione è riportato in Figura 3.10. Si è quindi realizzato uno script che implementasse il calcolo della FFT per il profilo considerato, specificando una frequenza di campionamento di 1000 Hz come riportato nella documentazione tecnica di riferimento della soluzione CoboSafe [16]. Dall'analisi del grafico ottenuto, mostrato in Figura 3.11, si sono individuati i valori di 2 e 68 Hz come estremi del range di frequenza del sistema (si veda Figura 3.12).

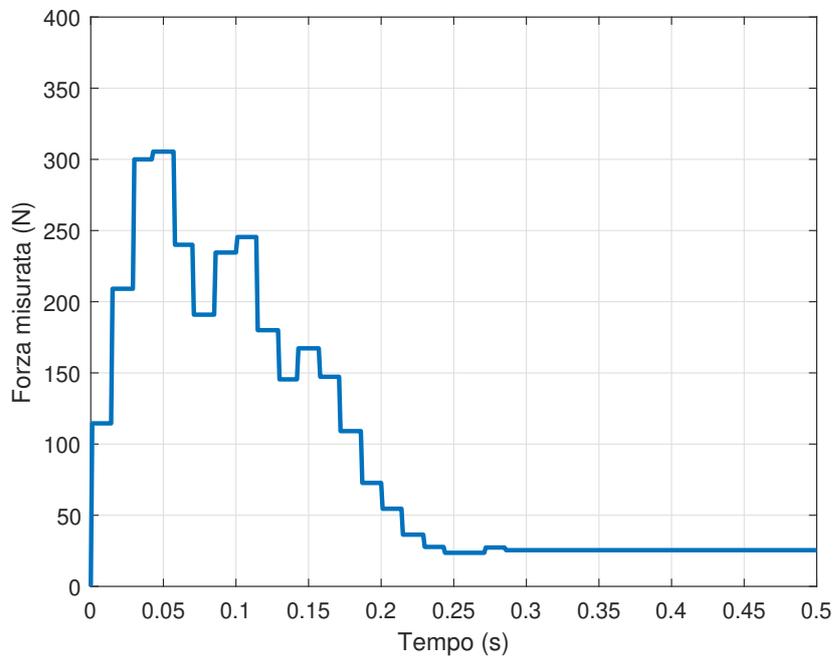


Figura 3.10: Profilo di forza utilizzato per l'analisi di frequenza, ottenuto per discretizzazione da quello relativo ad una velocità di 240 mm/s in [12].

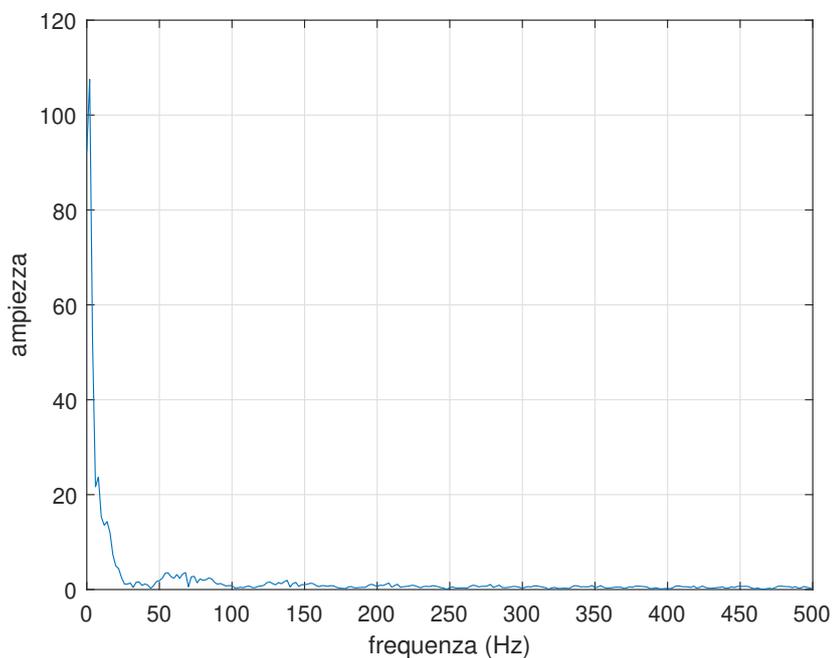


Figura 3.11: Plot della risposta in termini di ampiezza e frequenza (Hz).

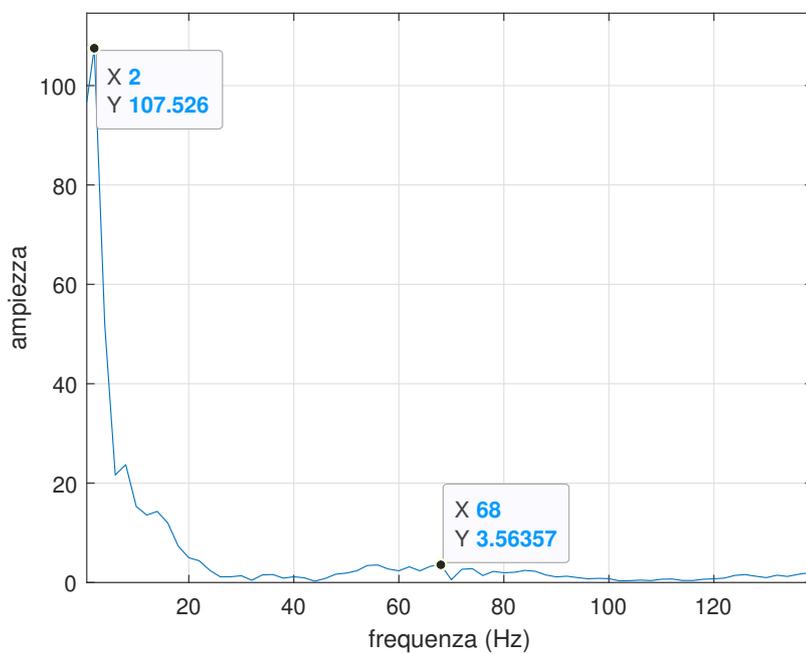


Figura 3.12: Zoom sul plot della risposta ed estremi del range di frequenza.

Il range di frequenza determinato dall'analisi in ambiente MATLAB trova riscontro in [16], cui fanno riferimento le soluzioni commerciali *CoboSafe* e dove viene indicato che i segnali derivanti da contatto -anche molto rapido- includono normalmente frequenze fino ai 100 Hz.

Per completezza, si è svolta un'analisi di frequenza FFT anche per l'ingresso, che è invece stato ipotizzato sulla base del profilo di risposta e delle descrizioni della prova e del sistema robotico. I risultati ottenuti sono compatibili con quelli della risposta (esaminata nel dettaglio) e con quella accennata per la verifica.

3.6.3 Scelta del dispositivo

A questo punto, si è proceduto con la ricerca di un dispositivo che avesse caratteristiche rispondenti ai requisiti di capacità e frequenza individuati.

La scelta è ricaduta sul dispositivo *Model 208C03* [17], un sensore di forza prodotto dalla *PCB Piezotronics* [18].

Nello specifico, tale sensore è in grado di misurare forze fino alle 500 lb (ossia 2,224 kN, sia in trazione che in compressione) e ha limite superiore di frequenza pari a 36000 Hz.

Il fissaggio della cella di carico alla seconda piastra inferiore avviene per mezzo di un perno (*stud*) di montaggio con estremità 10-32 UNF 2A per il lato sensore e M6 per l'avvitamento alla madrevite immersa nel pezzo.

Si riporta in Figura 3.13 il modello SolidWorks della cella di carico di cui sopra. Si allega quindi la Figura 3.14, nella quale è riportato il modello SW del prototipo una volta assemblato.

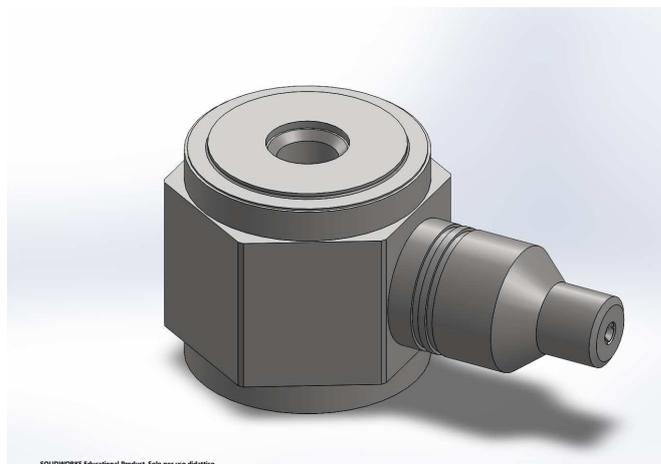


Figura 3.13: Modello SolidWorks della cella di carico scelta.

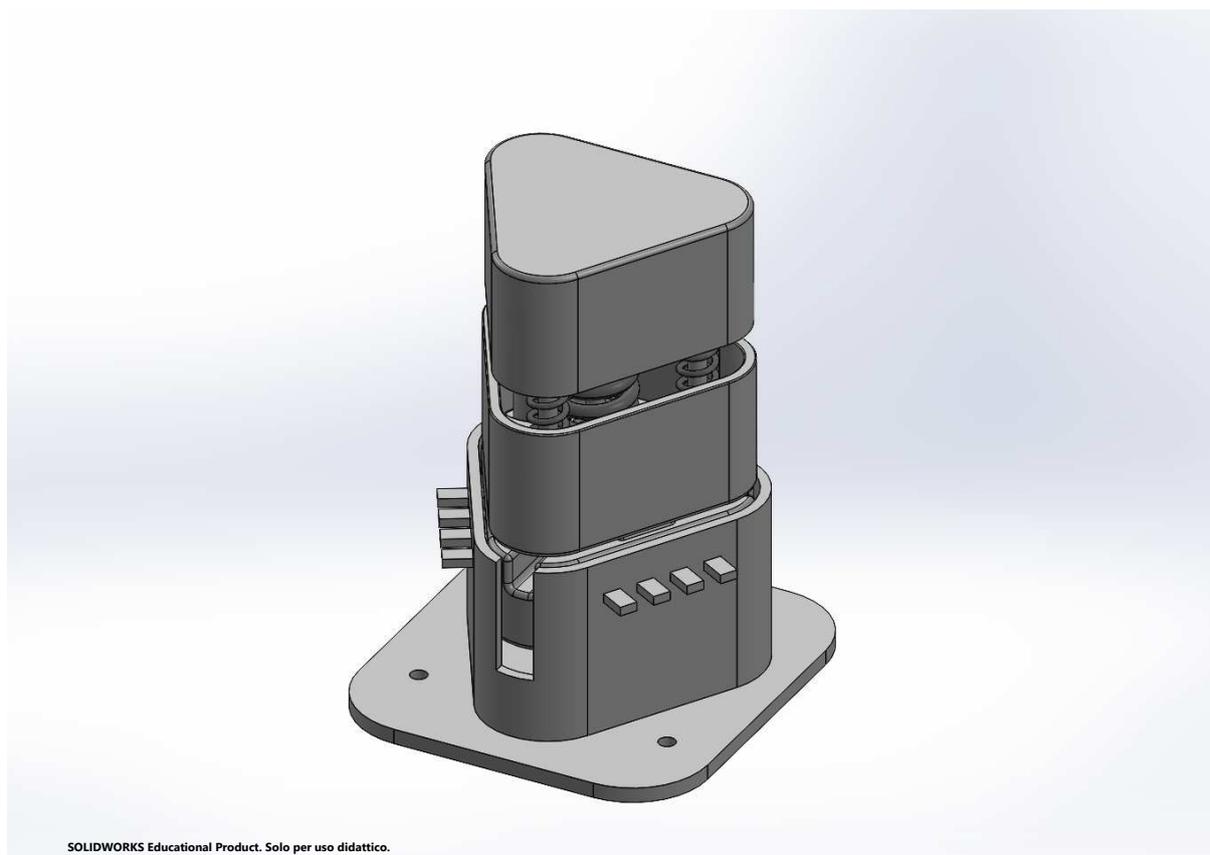


Figura 3.14: Assieme a progetto completato.

3.7 In merito alla stampa

In fase di progettazione si è pensato che gli elementi prismatici della seconda piastra inferiore 3.8, quelli cilindrici cavi della piastra superiore 3.4 e quelli pieni della prima inferiore 3.4 potessero essere soggetti a cedimento per applicazione dei carichi in direzione non perfettamente verticale (come idealmente ipotizzato e considerato).

In fase pre-stampa dei modelli si è quindi deciso di optare per l'impiego di un materiale meccanicamente resistente quale il *PETG UHD* per la realizzazione delle due piastre inferiori. L'*infill density* di tali componenti è stato scelto pari al 30%. Per la piastra superiore, in cui le *feature* potenzialmente instabili sono corpi cavi, si è optato per il *Tough PLA* andando a realizzare un *infill density* mirato sui cilindri pari al 100%. Il resto del componente presenta riempimento al 20%.

Anche per la base del prototipo si è impiegato il *Tough PLA* con *infill density* al 20%.

Le spine, anch'esse realizzate in *Tough PLA*, presentano riempimento totale (100%) in modo da soddisfare le esigenze di resistenza già descritte in precedenza 3.5.1.

Capitolo 4

Progettazione delle prove e modelli matematici

In questo capitolo verranno descritte le modalità con le quali svolgere delle prove per verificare sperimentalmente il funzionamento del dispositivo prima dell'impiego effettivo.

Verrà inoltre illustrato un modello matematico che fornisce i valori di forza che ci si aspetta di ottenere in seguito allo svolgimento di suddetti test.

4.1 Modalità della prova

Il test oggetto del capitolo prevede che, installato il gruppo-molle in modo da realizzare la costante elastica desiderata e fissato il prototipo al banco, sia lasciato cadere un corpo di massa M da una certa altezza sulla piastra superiore del dispositivo. Nel caso l'altezza scelta sia significativa, si può ricorrere ad un elemento guida (ad esempio, un tubo) per indirizzare il corpo il più possibile verso il centro del "target".

Per proteggere la piastra viene posto un panno in microfibra sulla superficie del dispositivo che sarà interessata dall'impatto.

4.2 Altezze e masse in gioco

Si riportano:

- la massa della piastra superiore, pari a 80,00 g;
- la massa del panno di protezione, pari a 4,70 g;
- la massa della prima piastra inferiore, di 111,10 g;
- la massa della seconda piastra inferiore, pari a 118,62 g;
- l'altezza del prototipo, pari a 194,88 mm;
- in Tabella 4.1 le masse totali delle molle per le configurazioni realizzabili.

Costante elastica (N/mm)	Massa (g)
75,25	203,24±0,04
60,04	205,29±0,04
49,88	64,15±0,04
39,9	56,27±0,04
34,67	66,20±0,04
29,6	66,88±0,04
24,69	58,32±0,04
9,96	32,63±0,04

Tabella 4.1: Masse totali dei gruppi-molla per le configurazioni realizzabili. L'incertezza è riportata per completezza.

4.3 Modello matematico

Viene quindi proposto un modello matematico per il calcolo della forza d'impatto che ci si aspetta di rilevare mediante la cella di carico nel corso della prova.

Sono elencate qui di seguito le ipotesi sulle quali si basa questo modello:

- la rigidità K nel punto d'impatto è pari alla costante elastica efficace del gruppo-molle per la particolare configurazione realizzata sul dispositivo 2.3 3.3; la piastra superiore è stata assunta infinitamente rigida;
- il comportamento delle molle è considerato lineare, anche in virtù della soluzione adottata in 3.4;
- si trascura la deflessione statica delle molle dovuta al peso della piastra superiore;
- l'attrito esercitato dall'aria sulla massa in caduta è trascurato.

Sia quindi fatta cadere la massa M da una quota h definita rispetto al piano della piastra superiore del dispositivo inizialmente ferma ($v_m=0$ m/s). La velocità v_M con la quale suddetta massa impatta sul dispositivo è:

$$v_M = \sqrt{2gh} \quad (4.1)$$

con g accelerazione di gravità.

L'urto sarà caratterizzato da un certo coefficiente di restituzione e compreso tra 0 e 1 1.2.2. A causa dell'urto, la massa M assume velocità V_M secondo 1.20. Con la simbologia introdotta nel presente capitolo, si ha

$$V_M = v_m + m(1 + e) \frac{v_m - v_M}{m + M}. \quad (4.2)$$

La piastra superiore, avente massa m (comprensiva del panno), assume velocità V_m secondo 1.21, che con la simbologia introdotta in questa sezione diventa

$$V_m = v_m - M(1 + e) \frac{v_m - v_M}{m + M}. \quad (4.3)$$

Al momento dell'impatto, il sistema *massa-piastra superiore* possiede:

- potenziale gravitazionale $E_{p,1}$ rispetto al piano della compressione f delle molle pari a

$$E_{p,1} = (m + M)gf; \quad (4.4)$$

- energia cinetica $E_{cin,1}$ pari a

$$E_{cin,1} = \frac{1}{2}(mV_m^2 + MV_M^2). \quad (4.5)$$

Il potenziale elastico $E_{el,2}$ posseduto dal gruppo-molle è dato da

$$E_{el,2} = \frac{1}{2}Kf^2 \quad (4.6)$$

con K costante elastica efficace del particolare gruppo-molle installato.

Secondo il principio dell'energia meccanica, a meno di un termine relativo al potenziale gravitazionale della massa M assunto a seguito del rimbalzo ($e_i < 0$) post-urto, si ha

$$E_{p,1} + E_{cin,1} = E_{el,2}. \quad (4.7)$$

Sostituendo 4.4, 4.5 e 4.6 in 4.7 si può determinare la compressione massima f delle molle:

$$f = \frac{(m + M)g + \sqrt{[(m + M)g]^2 + K(mV_m^2 + MV_M^2)}}{K}. \quad (4.8)$$

Moltiplicando f da 4.8 per K si ottiene la forza dinamica (di natura elastica) esercitata dalla massa M a seguito della caduta:

$$F_{din} = Kf = (m + M)g + \sqrt{[(m + M)g]^2 + K(mV_m^2 + MV_M^2)}. \quad (4.9)$$

Nei grafici a conclusione del capitolo si mostrano gli andamenti della forza dinamica al variare del coefficiente di restituzione (Figura 4.1) e della costante elastica efficace K del gruppo-molle (4.2) installato sul dispositivo.

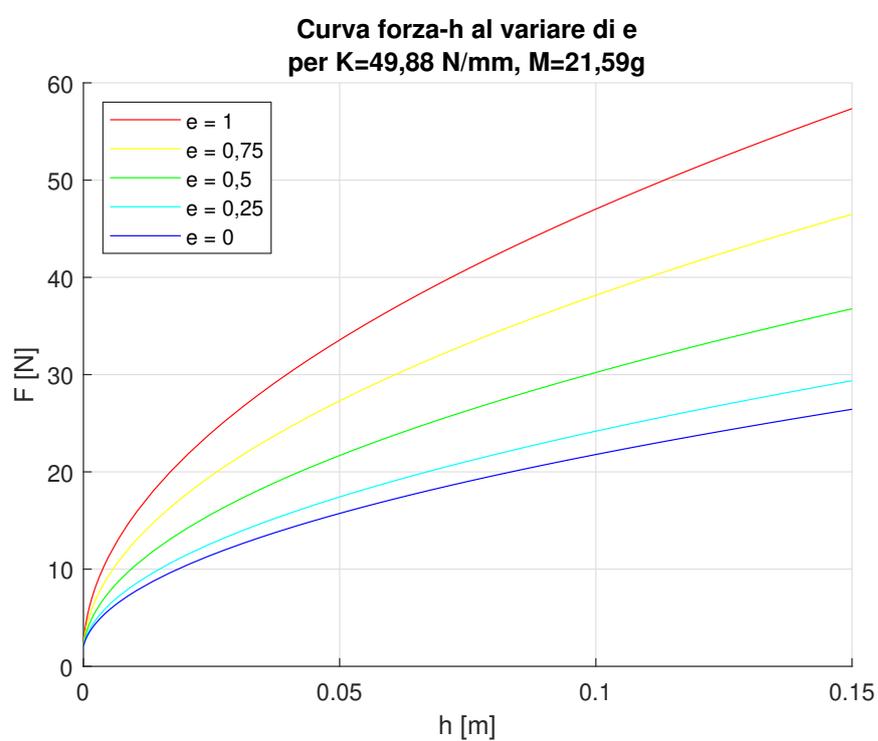


Figura 4.1: Curve forza- h parametriche nel coefficiente di restituzione e per costante elastica efficace pari a 49,88 N/mm e massa di 21,59 g.

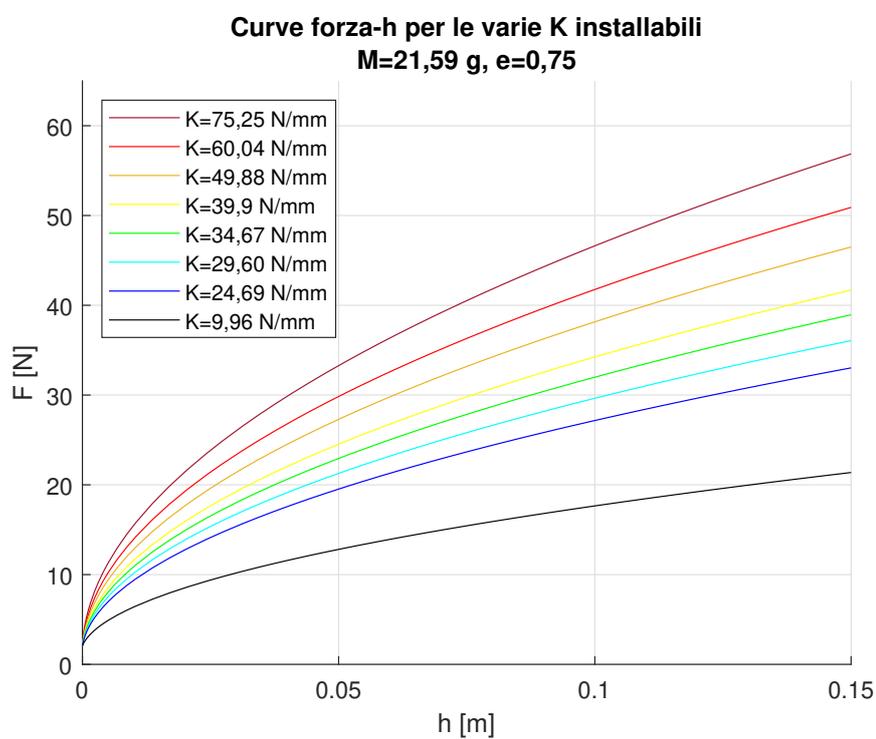


Figura 4.2: Curve forza- h parametriche nella costante elastica efficace K per massa di 21,59 g ed e pari a 0,75.

Capitolo 5

Programma, esecuzione e risultati delle prove

In questo capitolo verrà illustrato il programma delle prove, la preparazione della strumentazione di acquisizione e come si presenta lo spazio di lavoro, e, infine, si riporteranno i risultati ottenuti sperimentalmente confrontandoli con quelli previsti dal modello 4.3).

5.1 Preparazione in vista delle prove

In questa sezione verranno descritte gli accorgimenti e le procedure adottati in vista dell'esecuzione delle prove.

5.1.1 Acquisizione dei dati

Come già detto in precedenza 3.6.3, la scelta dello strumento impiegato per la misurazione delle forze d'impatto è ricaduta su una cella di carico.

Tale sensore è stato collegato mediante apposito connettore ad un modulo *National Instruments (NI 9230 BNC)*. Prima di procedere all'acquisizione dei dati, si è configurato un *task* per la misurazione di forze, specificando tipo (*FORCE (IEPE)*), parametri e caratteristiche del dispositivo in uso. Entrando nel dettaglio della procedura, il primo step ha previsto la configurazione di un *canale virtuale* per l'acquisizione di segnali analogici di forza.

Si è poi proceduto con la selezione del *canale fisico* di riferimento, come mostrato in Figura 5.1

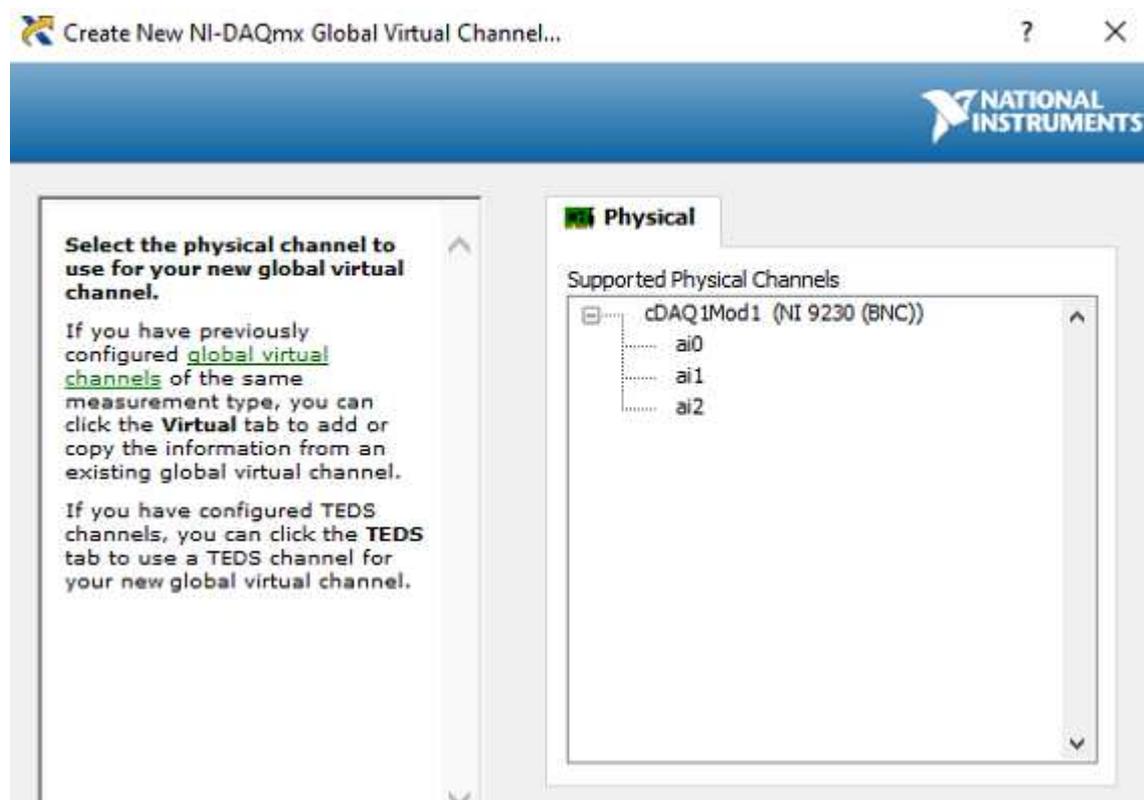


Figura 5.1: Schermata di selezione del canale fisico.

Definite le generalità del *global virtual channel*, si sono quindi inserite le impostazioni del sensore di forza *IEPE*, *Integrated Electronics Piezo-Electric*, quali:

- *Signal Range Input*, ossia i valori di forza minimi e massimi che ci si aspetta di leggere mediante la cella di carico (2,224 kN per trazione/compressione da datasheet);
- *Scaled Units*, cioè l'unità di misura (in questo caso Newton);
- *Sensitivity*, ovvero la sensibilità dello strumento, pari a 2,318 mV/N;
- *Source of Excitation*, ossia la sorgente di alimentazione, che può essere *External*, *Internal* (come in questo caso) oppure *None*;
- *Iex Value*, ossia il valore della corrente di alimentazione [A];

- *Coupling Mode*, ossia la tipologia di alimentazione, se AC (come qui) o DC.

La schermata di configurazione si presenta come in Figura 5.2

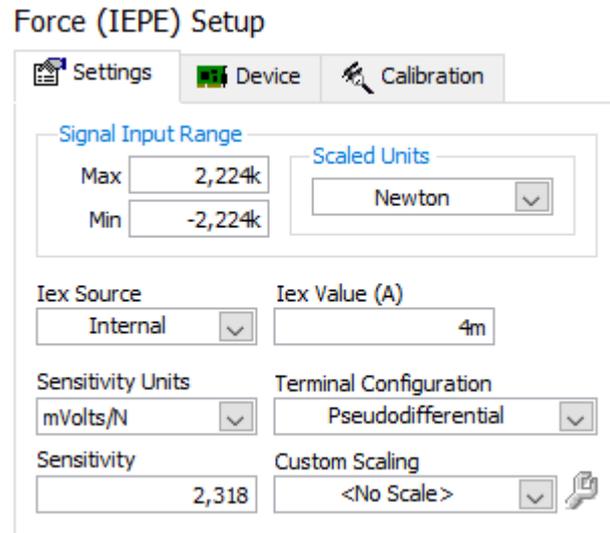


Figura 5.2: Schermata di configurazione delle impostazioni del sensore IEPE.

L'acquisizione è stata possibile grazie ad un *driver* dedicato e all'impiego del software MATLAB, utilizzato anche per l'analisi dei dati ottenuti dalle prove.

Verifica del corretto funzionamento della cella

Il corretto funzionamento della cella di carico è stato verificato impiegando l'*Impact Hammer Model 086D05* [19] prodotto dalla *PCB Piezotronics*.

Con procedimento analogo a quello illustrato in precedenza (5.1 e 5.2), si è configurato un *task* per la misurazione di forze e un corrispondente canale virtuale dedicato al sensore di cui sopra, connesso al modulo *NI* attraverso un canale fisico diverso da quello della cella.

Avviata l'acquisizione mediante apposito script in ambiente *MATLAB*, si è quindi proceduto colpendo la cella con il martello. Si è proceduto in questa maniera fino ad ottenere 15 rilevazioni. Mediante lo script di cui sopra, si sono individuati/determinati, per ciascuna rilevazione:

- l'*offset* medio della cella, $base_{cella}$, ed il picco di forza max_{cella} da essa rilevata;

- l'ampiezza $F_{max,cella}$ della forza rilevata dalla cella in corrispondenza del suddetto picco

$$F_{max,cella} = max_{cella} - base_{cella}; \quad (5.1)$$

- l'*offset* medio dell'*Impact Hammer*, $base_{hammer}$, ed il picco di forza max_{hammer} da esso rilevato;
- l'ampiezza $F_{max,hammer}$ della forza rilevata dall'*Impact Hammer* in corrispondenza del suddetto picco,

$$F_{max,hammer} = max_{hammer} - base_{hammer}; \quad (5.2)$$

- la differenza *diff* tra le due ampiezze calcolate in 5.1 e 5.2

$$diff = |F_{max,cella} - F_{max,hammer}|; \quad (5.3)$$

- l'errore *err* rispetto a $F_{max,cella}$

$$err = \frac{diff}{|F_{max,cella}|}; \quad (5.4)$$

- l'errore percentuale *err%*.

Scelto errore percentuale massimo accettabile pari al 3%, si è calcolata la media dei valori *err%* ottenuti dalle 15 rilevazioni e si è verificato che fosse inferiore al limite prestabilito. L'esito positivo di tale verifica (errore percentuale medio pari a 2,4974%) ha permesso di decretare che il sensore installato nel prototipo funziona correttamente.

Si allega il grafico di un'acquisizione in Figura 5.3. Sono state quindi effettuate acquisizioni finalizzate alla determinazione dell'errore caratterizzante la rilevazione per tutte le configurazioni del prototipo. La procedura è simile a quella precedentemente illustrata, con la differenza che il martello è stato fatto impattare sulla parte superiore del prototipo e che si sono considerate 11 acquisizioni.

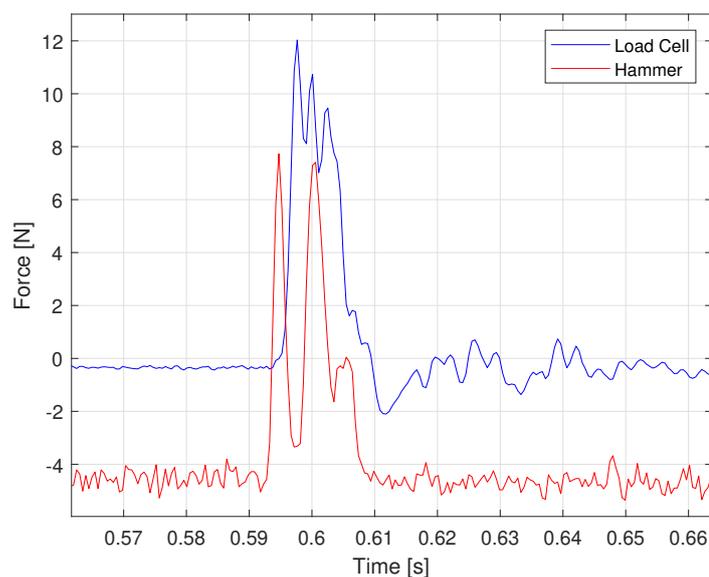


Figura 5.3: Grafico di un'acquisizione tipo di forza rilevata da cella di carico (blu) e da *Impact Hammer* (rosso). L'errore percentuale per questa rilevazione è 0,5198%.

In Tabella 5.1 si riportano gli errori per ogni configurazione di molle installabile sul dispositivo.

Costante elastica efficace installata [N/mm]	Errore percentuale medio [%]
75,25	+3,3346
60,04	-3,2686
49,88	+9,661
39,90	+8,8867
34,67	+8,9189
29,60	+13,7057
24,69	+8,5809
9,96	+17,0084

Tabella 5.1: Errori percentuali medi caratterizzanti le acquisizioni per specifica configurazione (in termini di costante elastica efficace) delle molle.

5.1.2 Setup dello spazio delle prove

Il prototipo è stato fissato al banco di lavoro mediante i fori realizzati sulla base 3.5. Per la caduta della massa M si è invece preparata una struttura apposita a forma di L rovesciata, all'estremità pensile della quale sarà appeso il corpo destinato all'impatto con il prototipo mediante lenza in polimero. La caduta si realizza via taglio del suddetto filo.

Lo spazio di lavoro nella sua interezza è mostrato in Figura 5.4.

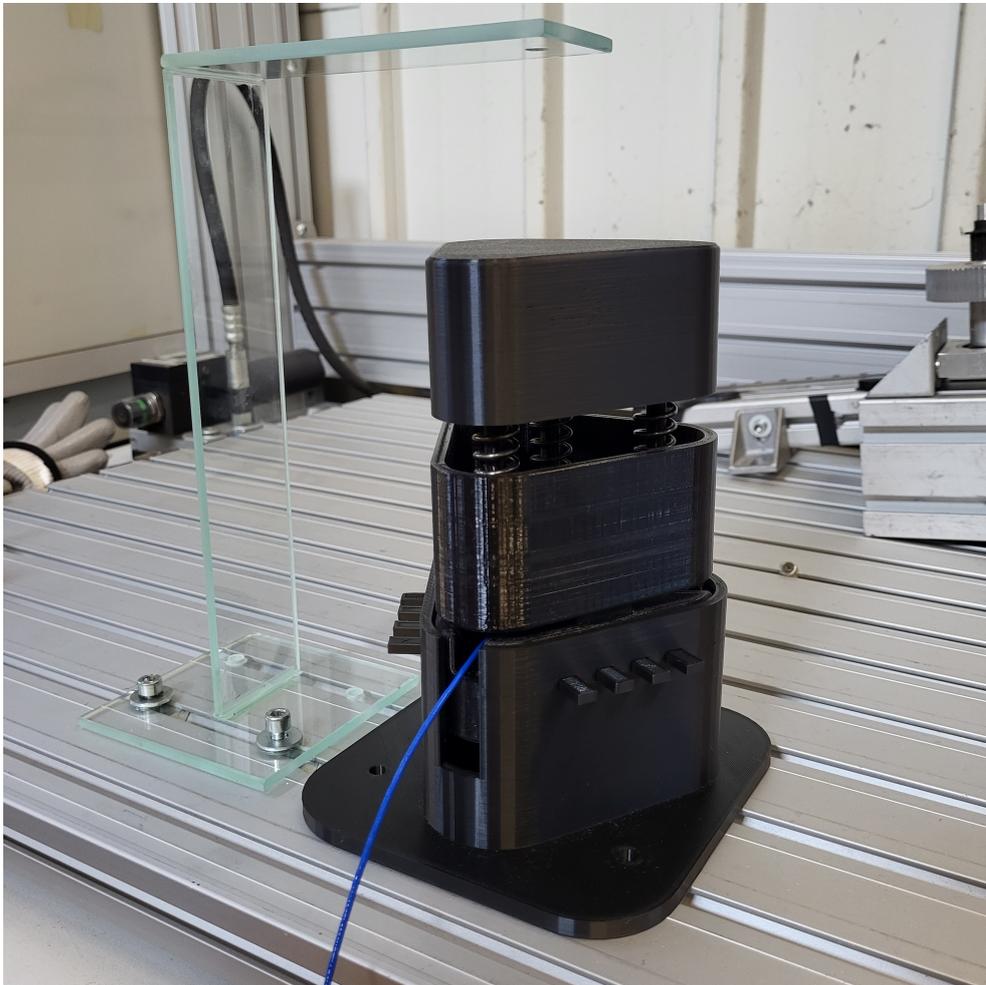


Figura 5.4: Panoramica del setup dello spazio delle prove. In foto, la struttura per la caduta della massa di prova, il prototipo fissato al banco e il cavo per il collegamento *cella-modulo NI*.

5.1.3 Programmazione concettuale delle prove

Prima dell'esecuzione delle prove si è proceduto decidendo in merito a:

- valore della massa M_1 da lasciar cadere sulla piastra superiore del prototipo: $M_1=21,59$ g;
- valore dell'altezza $h_{cad,1}$ dalla quale far iniziare la suddetta caduta della massa: $h_{cad,1}=40$ mm; tale quota è misurata dal piano della piastra superiore;
- numero di rilevazioni di forza per ciascuna delle configurazioni del gruppo-molle realizzabili (scelto pari a 5);
- utilizzo di altri due valori di massa, M_2 e M_3 , e di un secondo per l'altezza di caduta, $h_{cad,2}$, ed esecuzione delle prove per ogni nuova combinazione dei parametri in gioco (massa, altezza, costante elastica efficace installata), in modo da avere a disposizione studi di più casistiche: $M_2=28,30$ g, $M_3=41,24$ g e $h_{cad,2}=70$ mm

Riassumendo, per ogni configurazione realizzabile del gruppo-molle si avrà a disposizione un valore di forza (ottenuto come media di 5 misurazioni) per ognuna delle sei combinazioni di massa e altezza di caduta.

5.2 Risultati sperimentali

I risultati dei test sono stati riportati in questa sezione dopo una valutazione dell'adeguatezza dei parametri di altezza scelti secondo la modalità di seguito illustrata. Dopo aver acquisito "a vuoto" (i.e. senza lasciar cadere la massa M) ed aver ottenuto 5 set di dati di rumore intorno all'*offset*, si è determinata l'ampiezza (positiva) massima rispetto all'offset medio per ciascuna rilevazione, per poi calcolare l'ampiezza massima media, che è risultata pari a 0,1474 N.

Si è poi confrontata l'entità di tale ampiezza con l'ampiezza media di forza nella combinazione di parametri che, da stima, avrebbe dato il valore più basso, ovvero quella che prevede:

- la costante elastica efficace minore tra quelle d'interesse per la tesi, pari a 9,96 N/mm;
- la massa M più piccola, pari a 21,59 g;
- l'altezza di caduta minore, ossia 40 mm.

L'ampiezza media determinata per tali parametri di prova è 14,1880 N.

Risultando l'ampiezza media (positiva) del rumore pari a 1,04% di quella del segnale di forza utile, si è decretata come più che accettabile l'altezza di 40 mm come quota più bassa considerata nell'ambito delle prove.

Anche apportando a posteriori una modifica al valore rilevato alla luce dell'errore caratteristico medio della configurazione (che porta ad un valore di forza "corretto" di 11,7749 N), l'ampiezza media del rumore è risultata pari a circa 1,25% del segnale utile.

Si è inoltre deciso di riportare le rilevazioni per i soli gruppi-molle di elementi aventi la medesima lunghezza. Si sono quindi escluse le configurazioni che fanno uso della *C12252073500S* da 37,84 N/mm in modo da valutare assemblaggi che, teoricamente, avrebbero dato risultati più affidabili. Tale giudizio viene emesso sulla base della maggior certezza riguardo la partecipazione effettiva e simultanea di tutte le molle nelle configurazioni non scartate, in quanto elementi di medesima lunghezza e con estremità contenute in alloggiamenti alla stessa quota (a meno di difetti inerenti la risoluzione di stampa).

Nelle Tabelle 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 sono inseriti i valori rilevati sperimentalmente dall'esecuzione delle prove.

Prova 1: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 40 mm

Costante elastica (N/mm)	Forza n° 1 (N)	Forza n° 2 (N)	Forza n° 3 (N)	Forza n° 4 (N)	Forza n° 5 (N)	Media (N)
49,88	27,2126	28,1536	29,3838	28,6419	28,9225	28,4629
39,90	23,7092	23,0232	22,8922	24,1765	24,1771	23,7036
34,67	23,4345	23,0246	23,8311	24,0822	23,2412	23,5227
29,60	22,4498	23,0088	23,2846	23,7407	21,1410	22,7250
24,69	22,4885	21,5866	22,0913	23,2764	22,3254	22,3536
9,96	14,3926	14,5029	14,0868	13,3027	14,6548	14,1880

Tabella 5.2: Valori massimi di forza rilevati in 5 misurazioni e relativa media per prove con altezza di caduta pari a 40 mm e massa di 21,59 g.

Prova 2: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 70 mm

Costante elastica (N/mm)	Forza n° 1 (N)	Forza n° 2 (N)	Forza n° 3 (N)	Forza n° 4 (N)	Forza n° 5 (N)	Media (N)
49,88	36,2915	37,8812	37,3346	36,0517	39,4188	37,3956
39,90	35,7999	34,0273	34,9637	36,1832	36,1598	35,4268
34,67	33,2244	33,3077	35,1742	36,6478	34,2716	34,5251
29,60	33,5507	33,3950	33,2920	33,6651	32,8841	33,3574
24,69	34,5693	28,7787	30,7288	31,5182	31,0707	31,3331
9,96	20,0919	19,6930	19,5409	19,1315	20,0129	19,6940

Tabella 5.3: Valori massimi di forza rilevati in 5 misurazioni e relativa media per prove con altezza di caduta pari a 70 mm e massa di 21,59 g.

Prova 3: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 40 mm						
Costante elastica (N/mm)	Forza n° 1 (N)	Forza n° 2 (N)	Forza n° 3 (N)	Forza n° 4 (N)	Forza n° 5 (N)	Media (N)
49,88	33,9194	36,5743	35,4740	32,4551	35,2691	34,5384
39,90	32,5736	32,4546	32,8940	31,8062	32,8546	32,5166
34,67	30,3564	31,2740	31,7677	31,7925	31,8312	31,4043
29,60	29,7698	29,7590	31,5964	30,2593	29,4288	30,1627
24,69	25,4581	24,4953	25,1547	24,2532	24,2744	24,7254
9,96	20,6993	20,6472	18,8727	17,6469	19,9657	19,5664

Tabella 5.4: Valori massimi di forza rilevati in 5 misurazioni e relativa media per prove con altezza di caduta pari a 40 mm e massa di 28,30 g.

Prova 4: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 70 mm						
Costante elastica (N/mm)	Forza n° 1 (N)	Forza n° 2 (N)	Forza n° 3 (N)	Forza n° 4 (N)	Forza n° 5 (N)	Media (N)
49,88	47,3333	47,6744	49,2809	51,7697	48,0842	48,8285
39,90	46,9366	45,0987	47,0050	44,1591	46,3023	45,9003
34,67	43,0182	43,9179	42,3115	43,2913	43,2941	43,1166
29,60	43,5904	43,9824	41,2227	44,2832	42,0675	43,0292
24,69	41,7624	40,5373	40,5047	41,1742	39,0118	40,5981
9,96	25,1852	26,1607	25,2707	24,4080	25,5113	25,3071

Tabella 5.5: Valori massimi di forza rilevati in 5 misurazioni e relativa media per prove con altezza di caduta pari a 70 mm e massa di 28,30 g.

Prova 5: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 40 mm
--

Costante elastica (N/mm)	Forza n° 1 (N)	Forza n° 2 (N)	Forza n° 3 (N)	Forza n° 4 (N)	Forza n° 5 (N)	Media (N)
49,88	46,6849	44,5696	43,1405	45,9490	45,8332	45,2354
39,90	46,5110	43,7710	45,2305	43,9762	43,4088	44,5795
34,67	43,0117	45,8870	45,6721	43,2537	43,5411	44,2731
29,60	42,6202	45,1973	38,8107	45,2936	45,6494	43,5143
24,69	40,5471	42,4480	42,8648	43,1013	41,5655	42,1054
9,96	23,5743	25,3282	24,6113	24,3875	24,8402	24,5483

Tabella 5.6: Valori massimi di forza rilevati in 5 misurazioni e relativa media per prove con altezza di caduta pari a mm e massa di 41,24 g.

Prova 6: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 70 mm
--

Costante elastica (N/mm)	Forza n° 1 (N)	Forza n° 2 (N)	Forza n° 3 (N)	Forza n° 4 (N)	Forza n° 5 (N)	Media (N)
49,88	63,7867	65,7483	64,4396	61,1238	63,5636	63,7324
39,90	58,3468	58,7528	63,02028	60,5521	58,8819	59,9108
34,67	52,5857	50,8515	52,9239	53,8816	54,9412	53,03679
29,60	49,5959	51,9179	50,8709	51,7585	51,5958	51,1478
24,69	49,5485	48,2218	46,7066	49,2124	50,5526	48,8484
9,96	31,7875	30,1775	29,9496	29,8205	29,6026	30,2675

Tabella 5.7: Valori massimi di forza rilevati in 5 misurazioni e relativa media per prove con altezza di caduta pari a 70 mm e massa di 41,24 g.

5.3 Confronto con i valori dei modelli

5.3.1 Tabelle e grafici di confronto

Il confronto dei dati ottenuti sperimentalmente con quelli da modello 4.9 ha portato ai risultati raccolti:

- nelle Tabelle 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 per formulazione matematica assumendo $e=1$;
- nelle Tabelle 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 per formulazione matematica assumendo $e=0,75$;
- nelle Tabelle 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 per formulazione matematica assumendo $e=0$.

Nelle tabelle sono presentati per colonne da sinistra verso destra:

- la costante elastica efficace installata [N/mm];
- la media delle forze rilevate di cui alla sezione precedente [N];
- l'errore percentuale definito in fase di validazione 5.1.1 [%];
- il valore medio di forza $F_{sperimentale}$ apportando la correzione alla luce dell'errore sopracitato [N];
- il valore di forza calcolato da modello matematico $F_{modello}$ 4.3 [N];
- lo scostamento percentuale $\Delta_{\%}$ [%], dato da

$$\Delta_{\%} = \frac{F_{modello} - F_{sperimentale}}{F_{sperimentale}} \cdot 100, \quad (5.5)$$

Sono inoltre riportati i parametri di prova (massa ed altezza) ed il coefficiente di restituzione e utilizzato nelle formule del modello.

Prova 1: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 1

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	28,4629	+9,661	25,7131	30,13	+17,19
39,90	23,7036	+8,8867	21,5971	27,06	+25,32
34,67	23,5227	+8,9189	21,42474	25,30	+18,10
29,60	22,7250	+13,7057	19,6104	23,46	+19,64
24,69	22,3536	+8,5809	20,4355	21,52	+5,32
9,96	14,1880	+17,0084	11,7749	14,08	+19,54

Tabella 5.8: Confronto *valori rilevati - valori da modello (e=1)* per prova con massa $M=21,59$ g ed altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 2: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 1

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	37,3956	+9,661	33,7828	39,51	+16,97
39,90	35,4268	+8,8867	31,4570	35,45	+9,84
34,67	34,5251	+8,9189	31,4570	33,12	+5,33
29,60	33,3574	+13,7057	28,7855	30,69	+6,61
24,69	31,3331	+8,5809	28,6444	28,12	-1,83
9,96	19,6940	+17,0084	18,26	18,26	11,72

Tabella 5.9: Confronto *valori rilevati - valori da modello (e=1)* per prova con massa $M=21,59$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 3: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 1

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	34,5384	+9,661	31,2017	34,41	+10,29
39,90	32,5166	+8,8867	29,6270	30,90	+4,29
34,67	31,4043	+8,9189	28,6034	28,88	+0,97
29,60	30,1627	+13,7057	26,0287	26,77	+2,86
24,69	24,7254	+8,5809	22,6037	24,55	+8,62
9,96	19,5664	+17,0084	16,2385	16,02	-1,33

Tabella 5.10: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=1$) per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 4: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 1

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	48,8285	+9,661	44,1112	45,15	+2,36
39,90	45,9003	+8,8867	41,8213	40,50	-3,15
34,67	43,1666	+8,9189	39,3166	37,83	-3,77
29,60	43,0292	+13,7057	37,1317	35,05	-5,62
24,69	40,5981	+8,5809	37,1144	32,11	-13,49
9,96	25,3071	+17,0084	21,0028	20,82	-0,89

Tabella 5.11: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=1$) per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 5: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 1

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	45,2354	+9,661	40,8652	41,43	+1,39
39,90	44,5795	+8,8867	40,6179	37,19	-8,43
34,67	44,2731	+8,9189	40,3244	34,76	-13,81
29,60	43,5143	+13,7057	37,55046	32,21	-14,22
24,69	42,1054	+8,5809	38,4924	29,53	-23,28
9,96	24,5483	+17,0084	20,3730	19,23	-5,60

Tabella 5.12: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=1$) per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 6: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 1

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	63,7324	+9,661	57,5752	54,40	-5,51
39,90	59,9108	+8,8867	54,5867	48,79	-10,62
34,67	53,0368	+8,9189	48,3065	45,57	-5,67
29,60	51,1478	+13,7057	44,1376	42,20	-4,39
24,69	48,8484	+8,5809	44,6568	38,65	-13,45
9,96	30,2675	+17,0084	25,1195	25,02	-0,40

Tabella 5.13: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=1$) per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 1: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 0,75

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	28,4629	+9,661	25,7131	24,53	-4,61
39,90	23,7036	+8,8867	21,5971	22,05	+2,11
34,67	23,5227	+8,9189	21,42474	20,63	-3,70
29,60	22,7250	+13,7057	19,6104	19,15	-2,36
24,69	22,3536	+8,5809	20,4355	17,58	-13,96
9,96	14,1880	+17,0084	11,7749	11,58	-1,66

Tabella 5.14: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=0,75$) per prova con massa $M=21,59$ g ed altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 2: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 0,75

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	37,3956	+9,661	33,7828	32,10	-4,99
39,90	35,4268	+8,8867	31,4570	28,82	-10,71
34,67	34,5251	+8,9189	31,4570	26,94	-14,33
29,60	33,3574	+13,7057	28,7855	24,98	-13,24
24,69	31,3331	+8,5809	28,6444	22,90	-20,04
9,96	19,6940	+17,0084	18,26	14,95	-8,52

Tabella 5.15: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=0,75$) per prova con massa $M=21,59$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 3: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 0,75

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	34,5384	+9,661	31,2017	28,42	-8,92
39,90	32,5166	+8,8867	29,6270	25,54	-13,80
34,67	31,4043	+8,9189	28,6034	23,88	-16,50
29,60	30,1627	+13,7057	26,0287	22,16	-14,87
24,69	24,7254	+8,5809	22,6037	20,34	-10,02
9,96	19,5664	+17,0084	16,2385	13,35	-17,78

Tabella 5.16: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=0,75$) per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 4: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 0,75

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	48,8285	+9,661	44,1112	37,22	-15,62
39,90	45,9003	+8,8867	41,8213	33,41	-20,11
34,67	43,1666	+8,9189	39,3166	31,22	-20,59
29,60	43,0292	+13,7057	37,1317	28,94	-22,07
24,69	40,5981	+8,5809	37,1144	26,53	-28,52
9,96	25,3071	+17,0084	21,0028	17,28	-17,74

Tabella 5.17: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=0,75$) per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 5: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 0,75

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	45,2354	+9,661	40,8652	35,01	-14,32
39,90	44,5795	+8,8867	40,6179	31,45	-22,57
34,67	44,2731	+8,9189	40,3244	29,40	-27,08
29,60	43,5143	+13,7057	37,55046	27,27	-27,38
24,69	42,1054	+8,5809	38,4924	25,016	-35,011
9,96	24,5483	+17,0084	20,3730	16,37	-19,65

Tabella 5.18: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* ($e=0,75$) per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 6: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 0,75

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	63,7324	+9,661	57,5752	45,91	-20,27
39,90	59,9108	+8,8867	54,5867	41,19	-24,54
34,67	53,0368	+8,9189	48,3065	38,48	-20,33
29,60	51,1478	+13,7057	44,1376	35,66	-19,22
24,69	48,8484	+8,5809	44,6568	32,68	-26,83
9,96	30,2675	+17,0084	25,1195	21,23	-15,50

Tabella 5.19: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* ($e=0,75$) per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 1: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 0

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	28,4629	+9,661	25,7131	14,19	-44,83
39,90	23,7036	+8,8867	21,5971	12,81	-40,70
34,67	23,5227	+8,9189	21,42474	12,02	-43,92
29,60	22,7250	+13,7057	19,6104	11,19	-42,94
24,69	22,3536	+8,5809	20,4355	10,32	-49,50
9,96	14,1880	+17,0084	11,7749	6,99	-40,64

Tabella 5.20: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=0$) per prova con massa $M=21,59$ g ed altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 2: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 0

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	37,3956	+9,661	33,7828	18,41	-45,51
39,90	35,4268	+8,8867	31,4570	16,58	-48,64
34,67	34,5251	+8,9189	31,4570	15,53	-50,61
29,60	33,3574	+13,7057	28,7855	14,44	-49,85
24,69	31,3331	+8,5809	28,6444	13,28	-53,63
9,96	19,6940	+17,0084	18,26	8,86	-45,81

Tabella 5.21: Confronto *valori rilevati - valori da modello* ($e=0$) per prova con massa $M=21,59$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 3: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 0

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	34,5384	+9,661	31,2017	17,80	-42,94
39,90	32,5166	+8,8867	29,6270	16,05	-45,84
34,67	31,4043	+8,9189	28,6034	15,04	-47,42
29,60	30,1627	+13,7057	26,0287	13,99	-46,26
24,69	24,7254	+8,5809	22,6037	12,88	-43,02
9,96	19,5664	+17,0084	16,2385	8,63	-46,83

Tabella 5.22: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello*($e=0$) per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 4: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 0

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	48,8285	+9,661	44,1112	23,17	-47,47
39,90	45,9003	+8,8867	41,8213	20,85	-50,15
34,67	43,1666	+8,9189	39,3166	19,51	-50,37
29,60	43,0292	+13,7057	37,1317	18,12	-51,20
24,69	40,5981	+8,5809	37,1144	16,65	-55,14
9,96	25,3071	+17,0084	21,0028	11,01	-47,54

Tabella 5.23: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello*($e=0$) per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 5: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 40 mm, e = 0

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	45,2354	+9,661	40,8652	24,26	-40,63
39,90	44,5795	+8,8867	40,6179	21,84	-46,24
34,67	44,2731	+8,9189	40,3244	20,44	-49,30
29,60	43,5143	+13,7057	37,55046	18,99	-49,43
24,69	42,1054	+8,5809	38,4924	17,46	-54,64
9,96	24,5483	+17,0084	20,3730	11,58	-43,14

Tabella 5.24: Confronto *valori rilevati - valori da modello*($e=0$) per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 6: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 70 mm, e = 0

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	63,7324	+9,661	57,5752	31,68	-44,98
39,90	59,9108	+8,8867	54,5867	28,47	-47,85
34,67	53,0368	+8,9189	48,3065	26,62	-44,89
29,60	51,1478	+13,7057	44,1376	24,70	-44,04
24,69	48,8484	+8,5809	44,6568	22,67	-49,23
9,96	30,2675	+17,0084	25,1195	14,88	-40,75

Tabella 5.25: Confronto *valori rilevati - valori da modello*($e=0$) per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Dai dati riportati nelle tabelle risulta che il modello con coefficiente di restituzione pari a 0 dà valori di forza che sono sottostime di quelli effettivamente rilevati, in quanto inferiori rispetto a quelli sperimentali nella misura di differenze percen-

tuali dal 40,70 al 55,14%.

Le altre due formulazioni ($e=0,75$ ed $e=1$) danno invece valori sia maggiori sia inferiori a quelli sperimentali. La tendenza rilevata è quella di scostamenti positivi (sovrastima da parte dei modelli) per masse/altezze di caduta inferiori e negativi (sottostime ad opera del modello) al crescere dei due parametri di prova.

Si è quindi deciso di concentrarsi su queste due formulazioni al fine di determinare quale delle due sia più adatta a descrivere l'evento dell'urto. Si estende quindi il discorso a quello che sarà l'impiego reale del dispositivo oggetto dell'elaborato, ossia l'utilizzo con manipolatore ad esercitare forze su di esso. Poiché un robot possiede massa efficace superiore (di due, anche tre, ordini di grandezza) ai campioni utilizzati qui nelle prove, si è decretato che il modello con $e=1$ si presta meglio alla stima delle forze che caratterizzeranno l'applicazione di destinazione. Tale scelta è dovuta al fatto che questo modello, all'aumentare dell'entità delle masse in gioco, presenta differenze percentuali rispetto ai valori da prove inferiori a quelli da stima della formulazione con $e=0,75$.

Si allegano i grafici nelle Figure 5.6 e 5.6 per fornire visivamente un'idea di quanto detto.

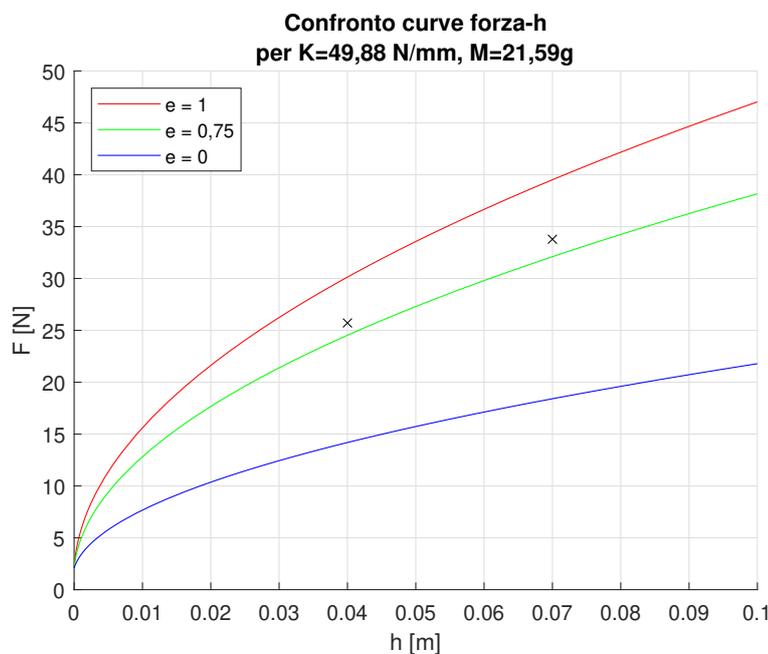


Figura 5.5: Confronto *dati sperimentali* - curve $F-h$ da modello per $K=49,88$ N/mm e $M=21,59$ g

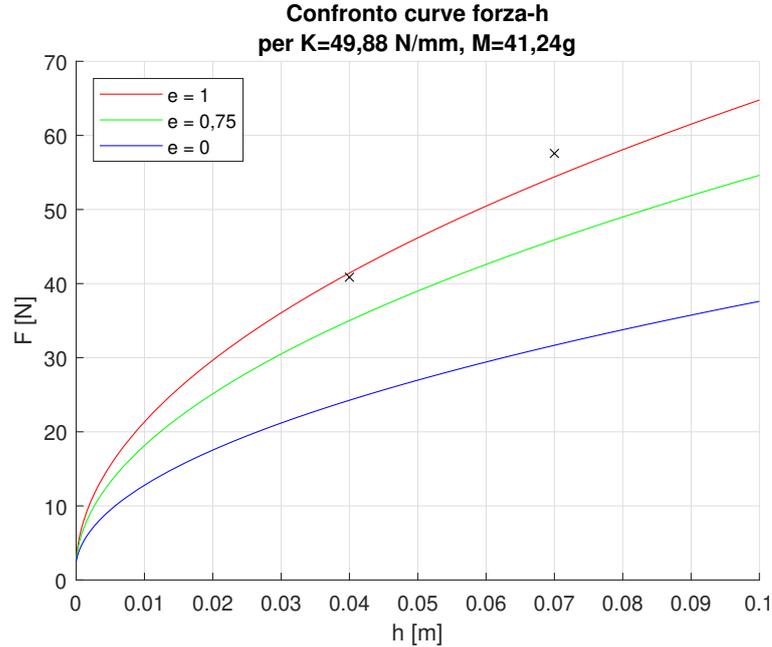


Figura 5.6: Confronto *dati sperimentali* - curve F - h da modello per $K=49,88$ N/mm e $M=41,24$ g.

Per le motivazioni esposte, si consideri quindi la formulazione con $e=1$.

Essendo questa particolare formulazione, fra quelle possibili, quella descrittiva di un urto con totale conservazione dell'energia cinetica, è possibile procedere con la riformulazione e semplificazione a seguire.

Si faccia riferimento alle modalità di prova descritte in 4.3. Siano:

- $E_{p,1}^*$ l'energia potenziale gravitazionale posseduta dalla massa M rispetto al piano della compressione f del gruppo-molle che si realizzerà con l'urto:

$$E_{p,1}^* = Mg(h + f), \quad (5.6)$$

con g e h con il medesimo significato visto in 4.3

- $E_{el,2}^*$ il potenziale elastico posseduto dal gruppo-molle (avente rigidità K) a compressione avvenuta:

$$E_{el,2}^* = \frac{1}{2}Kf^2. \quad (5.7)$$

Il principio di conservazione dell'energia meccanica tra momento del lancio della massa M e avvenuta compressione si esprime con:

$$E_{p,1}^* = E_{el,2}^*. \quad (5.8)$$

Sostituendo i singoli termini 5.6 e 5.7 in 5.8 si determina la compressione massima f^* delle molle:

$$f^* = \frac{Mg \left(1 + \sqrt{1 + 2\frac{Kh}{Mg}} \right)}{K}. \quad (5.9)$$

Moltiplicando f^* da 5.9 per K si ottiene la forza dinamica:

$$F_{din}^* = K f^* = Mg \left(1 + \sqrt{1 + 2\frac{Kh}{Mg}} \right). \quad (5.10)$$

Si fa notare come la nuova formulazione:

- non presenti problematiche riguardanti termini mancanti;
- in linea con la scelta progettuale in 3.3.2, non presenti alcun riferimento alla massa di qualsivoglia componente del prototipo (nemmeno di m , come da modello precedentemente impiegato).

In Tabella 5.26 si confrontano le due formulazioni in termini di differenza (percentuale) $diff\%$ tra i valori ottenibili, calcolata tramite:

$$diff\% = \frac{F_{din} - F_{din}^*}{F_{din}^*} \cdot 100. \quad (5.11)$$

K (N/mm)	h (mm)	M (g)	F_{din} (N)	F_{din}^* (N)	$diff\%$ (%)
9,96	40	21,59	14,08	13,20	6,60
9,96	70	21,59	18,26	7,44	4,95
9,96	40	28,30	16,02	15,15	5,74
9,96	70	28,30	20,82	19,95	4,31
9,96	40	41,24	19,23	18,36	4,73
9,96	70	41,24	25,02	24,16	3,56

Tabella 5.26: Confronto tra i valori di forza calcolati attraverso le due formulazioni per masse ed altezze di caduta impiegate nelle prove.

Le Tabelle 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 sono finalizzate al confronto *dati rilevati - valori da modello 5.10* e hanno medesima struttura di quelle precedentemente impiegate a scopo comparativo.

Si allegano poi i grafici nelle Figure 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 per fornire un'indicazione visiva dello scostamento dei dati sperimentali rispetto ai valori di forza determinati tramite modello matematico 5.10.

Entrambe le tipologie di elementi corollari al corpo del testo sono allegati a fine capitolo.

5.3.2 Commenti

Confrontando dati ottenuti sperimentalmente e valori da modello, è emerso che un'altra configurazione di molle (oltre a quelle che prevedono l'installazione della *C12252073500S*) non offre dati sufficientemente allineati alla stima da formulazione matematica da poterne ritenere le relative misurazioni affidabili. Si tratta della configurazione con $K = 24,69 \text{ N/mm}$, e nello specifico si fa riferimento alle prove 4 5.30, 5 5.31 e 6 5.32 (si fa notare che la prova 5 5.31 in generale presenta gli scostamenti percentuali più elevati).

In tutti gli altri casi lo scostamento è stato ritenuto accettabile quantomeno per ritenere sensato valutare i dati ottenuti e fare alcune considerazioni.

Anche per l'ultimo modello 5.10, alternativo ed equivalente a quello con $e=1$, vale che:

1. gli scostamenti percentuali positivi (sovrastime da parte del modello) sono presenti prevalentemente per masse/altezze di caduta inferiori;
2. i $\Delta\%$ in negativo (sottostime ad opera del modello) sono presenti tendenzialmente all'aumentare delle masse/altezze caratterizzanti i test.

Alla luce dei risultati ottenuti, riguardo agli esiti delle prove si è concluso che:

- si risente di dissipazioni di energia, specie nel caso 1.;
- la rigidità del prototipo nel punto d'impatto sia diversa da quella da ipotesi 4.3.

Le dissipazioni di cui sopra potrebbero aver luogo all'interfaccia *massa-piastra superiore* e a causa di attriti ed interferenze che vanno ad innescarsi in fase di compressione (i primi in corrispondenza degli accoppiamenti *elemento cilindrico-guida*, le seconde all'altezza degli alloggiamenti degli elementi elastici).

Per quanto riguarda la rigidità del prototipo nel punto d'impatto, questa potrebbe essere diversa da quella assunta in fase di formulazione del modello se la piastra superiore non avesse costante elastica sufficientemente alta da considerarla infinitamente rigida rispetto al gruppo-molle. Ciò andrebbe ad introdurre una rigidità disposta in serie rispetto agli elementi elastici, cosa che andrebbe ad influire sulla costante elastica equivalente del dispositivo.

Si riporta poi che le differenze percentuali ottenute via ultimo modello elaborato 5.10 definiscono un intervallo di ampiezza $\pm 15\%$ circa (rispetto ai dati riferiti alle due masse di prova maggiori). Tali scostamenti sono stati ritenuti accettabili alla luce della tipologia di dispositivo realizzato, ossia un prototipo che potrà essere oggetto di modifiche future e perfezionamento.

Per concludere, la formulazione in 5.10 può diventare

$$F^*_{din} = Mg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{Kv_{rel}^2}{Mg^2}} \right) \quad (5.12)$$

in caso si voglia stimare la forza esercitata da un manipolatore sul dispositivo, con v_{rel} velocità (relativa rispetto a quella della piastra) del robot.

La formulazione è ottenuta considerando la massa efficace del manipolatore come se fosse fatta cadere da

$$h = \frac{v_{rel}^2}{2g}, \quad (5.13)$$

sostituita in 5.10.

Prova 1: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 40 mm

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	28,4629	+9,661	25,7131	29,2842	+13,89
39,90	23,7036	+8,8867	21,5971	26,2138	+21,38
34,67	23,5227	+8,9189	21,42474	24,4500	+14,12
29,60	22,7250	+13,7057	19,6104	22,6078	+15,29
24,69	22,3536	+8,5809	20,4355	20,6663	+1,13
9,96	14,1880	+17,0084	11,7749	13,2043	+12,14

Tabella 5.27: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* per prova con massa $M=21,59$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 2: Massa = 21.59 g, altezza di caduta = 70 mm

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	37,3956	+9,661	33,7828	38,6705	+7,57
39,90	35,4268	+8,8867	31,4570	34,6087	+1,42
34,67	34,5251	+8,9189	31,4570	32,2753	-2,01
29,60	33,3574	+13,7057	28,7855	29,8384	-0,42
24,69	31,3331	+8,5809	28,6444	27,2670	+4,83
9,96	19,6940	+17,0084	16,3444	17,3983	-6,68

Tabella 5.28: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* per prova con massa $M=21,59$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 3: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 40 mm
--

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	34,5384	+9,661	31,2017	33,5628	+14,47
39,90	32,5166	+8,8867	29,6270	30,0475	+7,22
34,67	31,4043	+8,9189	28,6034	28,0282	+2,64
29,60	30,1627	+13,7057	26,0287	25,9192	+3,66
24,69	24,7254	+8,5809	22,6037	23,6964	-4,80
9,96	19,5664	+17,0084	16,2385	15,1533	+6,45

Tabella 5.29: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 4: Massa = 28.30 g, altezza di caduta = 70 mm
--

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	48,8285	+9,661	44,1112	44,3091	+0,45
39,90	45,9003	+8,8867	41,8213	39,6588	-5,17
34,67	43,1666	+8,9189	39,3166	36,9873	-5,92
29,60	43,0292	+13,7057	37,1317	34,1973	-7,90
24,69	40,5981	+8,5809	37,1144	31,2568	-15,78
9,96	25,3071	+17,0084	21,0028	19,9549	-4,99

Tabella 5.30: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* per prova con massa $M=28,30$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

Prova 5: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 40 mm

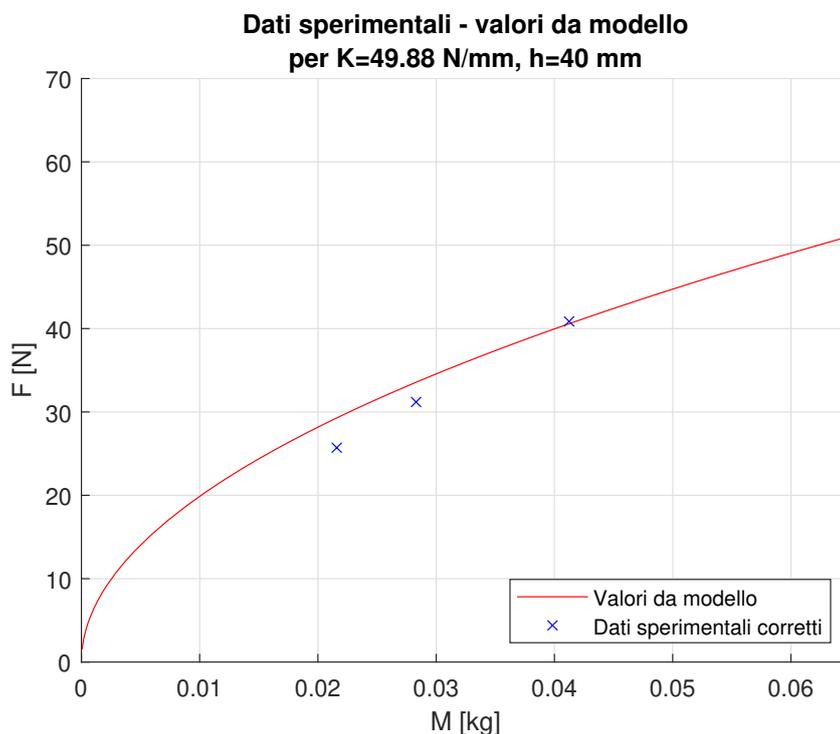
Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	45,2354	+9,661	40,8652	40,5859	-0,68
39,90	44,5795	+8,8867	40,6179	36,3425	-10,53
34,67	44,2731	+8,9189	40,3244	33,9048	-15,92
29,60	43,5143	+13,7057	37,55046	31,3589	-16,49
24,69	42,1054	+8,5809	38,4924	28,6753	-25,50
9,96	24,5483	+17,0084	20,3730	18,3634	-9,86

Tabella 5.31: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=40$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

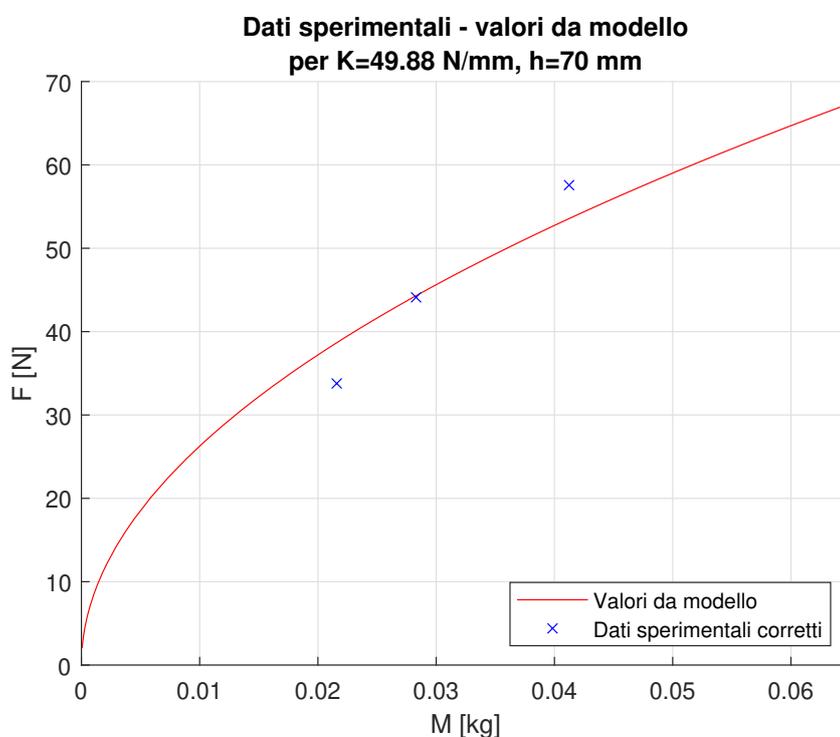
Prova 6: Massa = 41.24 g, altezza di caduta = 70 mm

Costante elastica (N/mm)	Forza Media (N)	Errore da Validazione (%)	Forza corretta (N)	Forza da modello (N)	Scostamento $\Delta\%$ (%)
49,88	63,7324	+9,661	57,5752	53,5583	-6,98
39,90	59,9108	+8,8867	54,5867	47,9447	-12,17
34,67	53,0368	+8,9189	48,3065	44,7198	-7,42
29,60	51,1478	+13,7057	44,1376	41,3518	-6,31
24,69	48,8484	+8,5809	44,6568	37,8022	-15,35
9,96	30,2675	+17,0084	25,1195	24,1593	-3,82

Tabella 5.32: Confronto *valori rilevati* - *valori da modello* per prova con massa $M=41,24$ g e altezza di caduta $h=70$ mm per ciascuna delle configurazioni d'interesse.

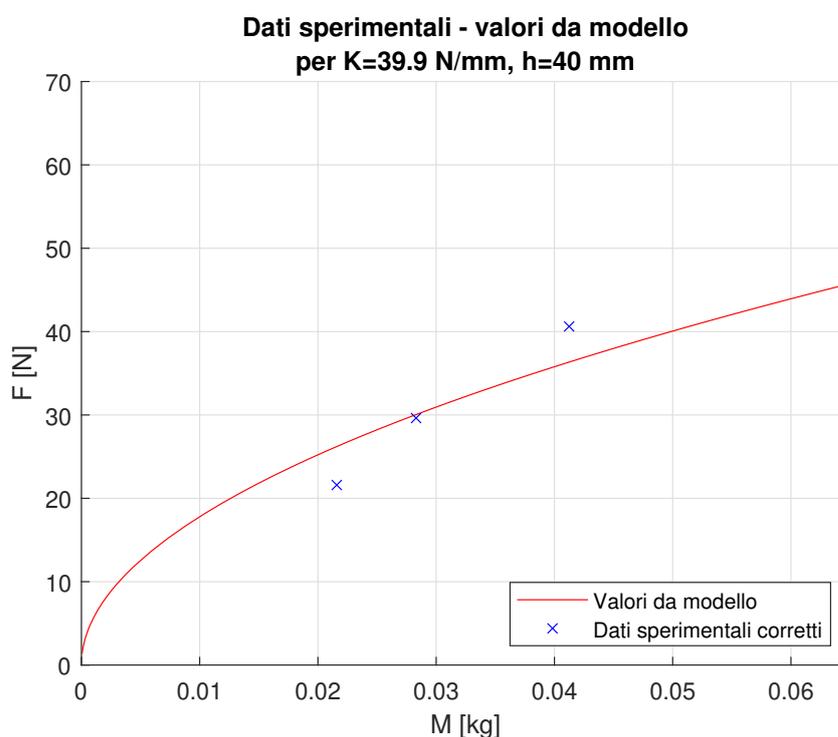


(a) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 49,88 N/mm ed altezza di caduta pari a 40 mm.

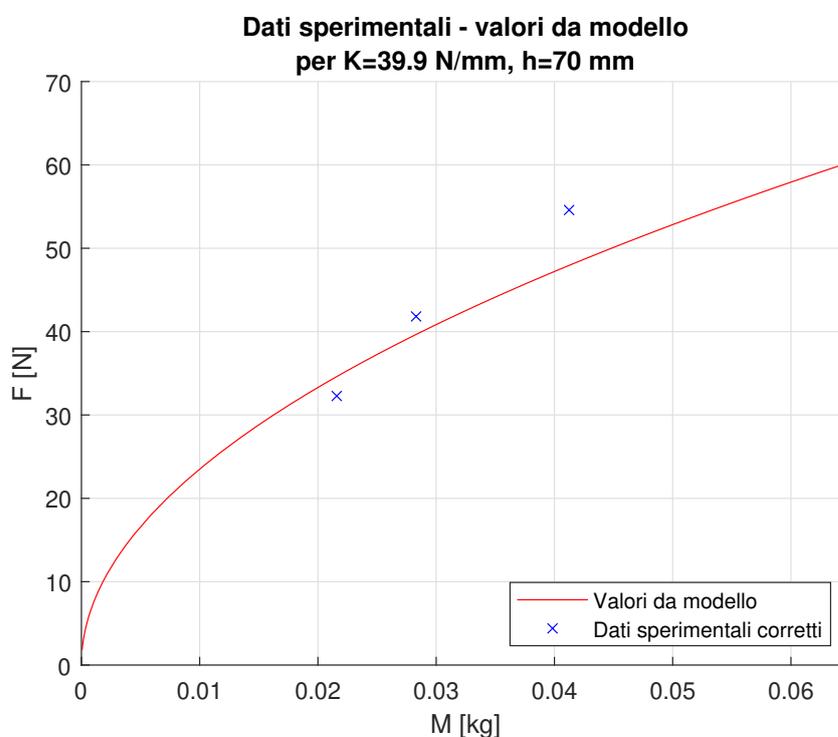


(b) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 49,88 N/mm ed altezza di caduta pari a 70 mm.

Figura 5.7: Confronto tra dati sperimentali e curva *forza – massa* da modello matematico per $K = 49,88$ N/mm.

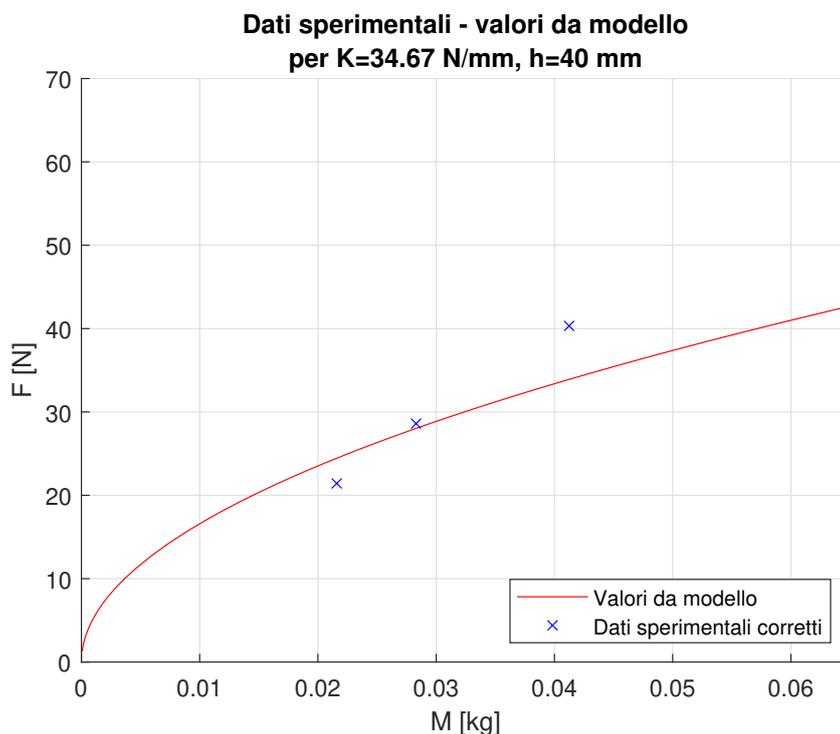


(a) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 39,90 N/mm ed altezza di caduta pari a 40 mm.

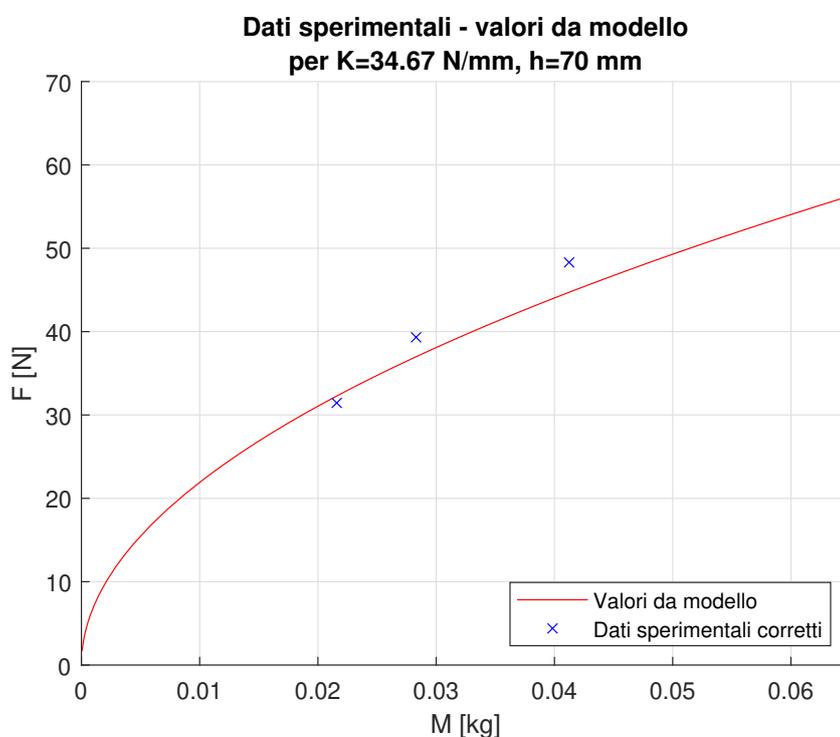


(b) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 39,90 N/mm ed altezza di caduta pari a 70 mm.

Figura 5.8: Confronto tra dati sperimentali e curva *forza – massa* da modello matematico per $K = 39,90$ N/mm.

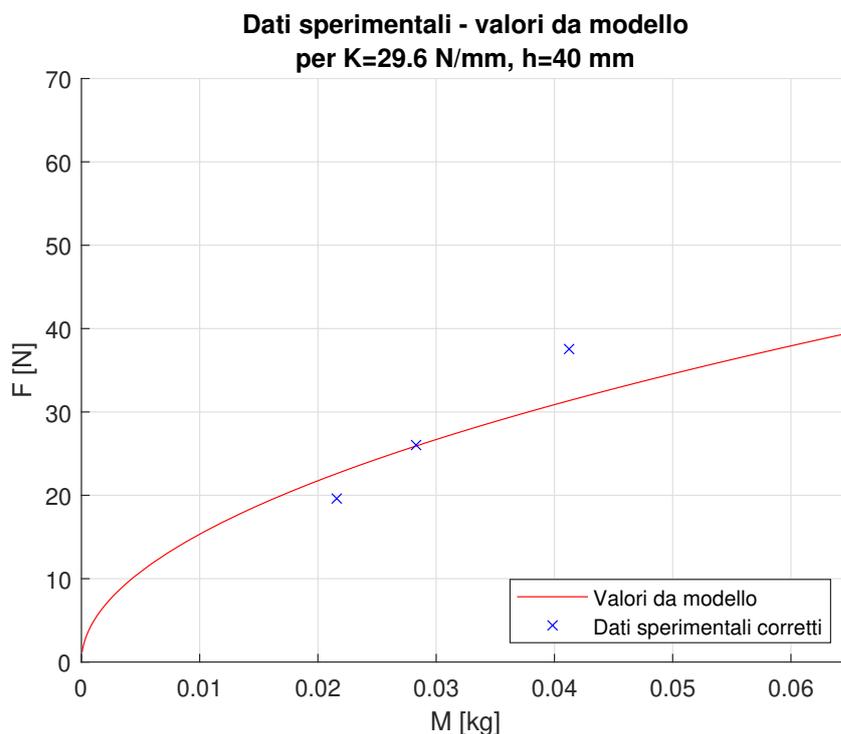


(a) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 34,67 N/mm ed altezza di caduta pari a 40 mm.

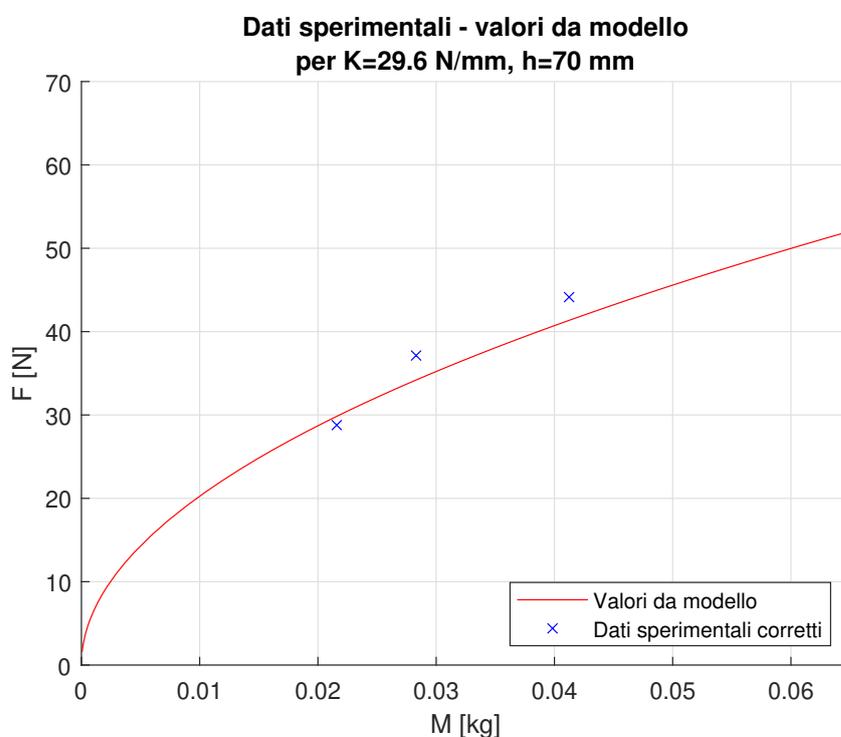


(b) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 34,67 N/mm ed altezza di caduta pari a 70 mm.

Figura 5.9: Confronto tra dati sperimentali e curva *forza – massa* da modello matematico per $K = 34,67$ N/mm.

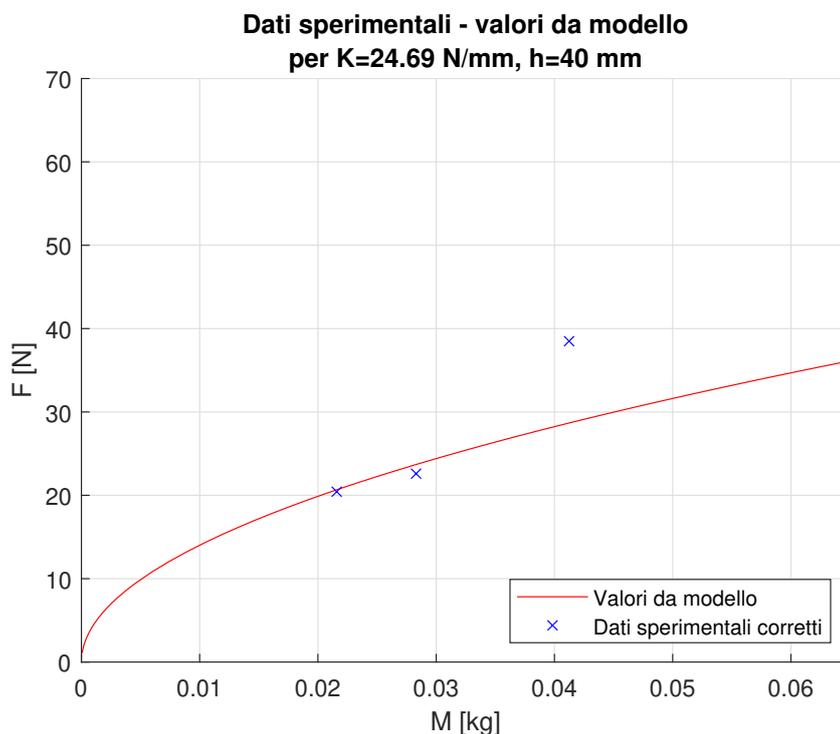


(a) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 29,60 N/mm ed altezza di caduta pari a 40 mm.

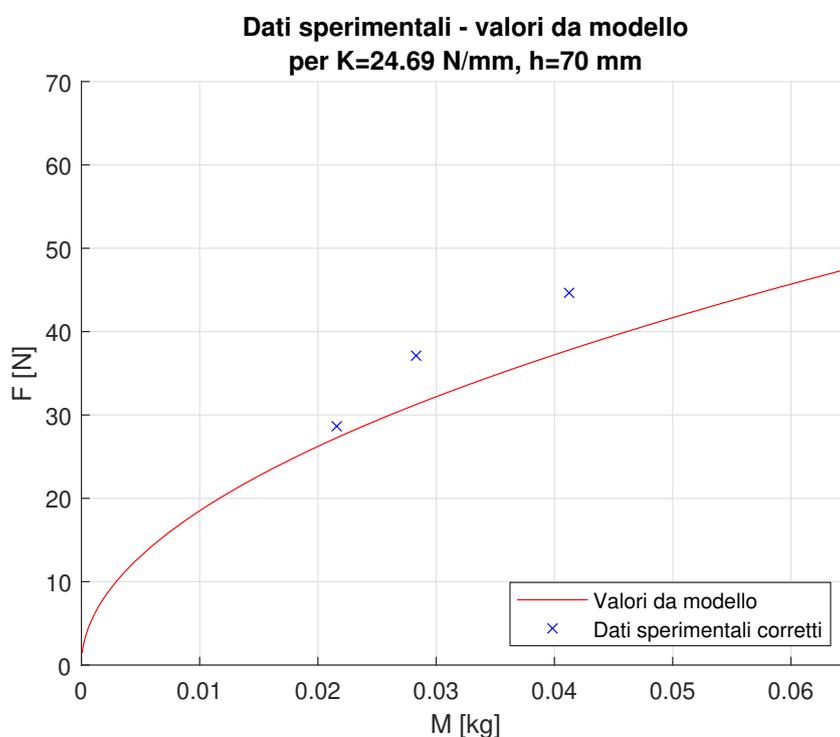


(b) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 29,60 N/mm ed altezza di caduta pari a 70 mm.

Figura 5.10: Confronto tra dati sperimentali e curva *forza – massa* da modello matematico per $K = 29,60$ N/mm.

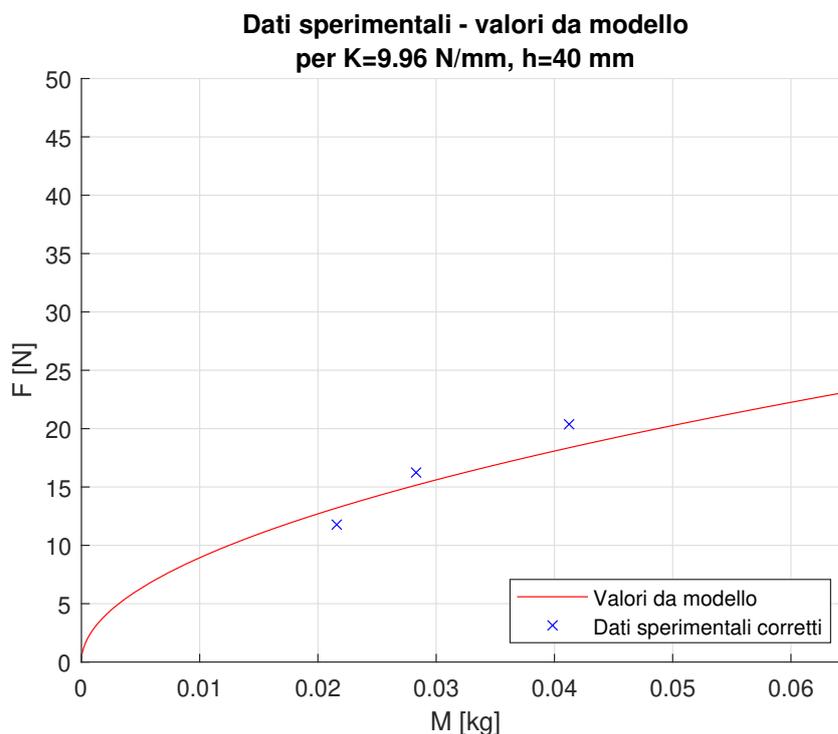


(a) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 24,6 N/mm ed altezza di caduta pari a 40 mm.

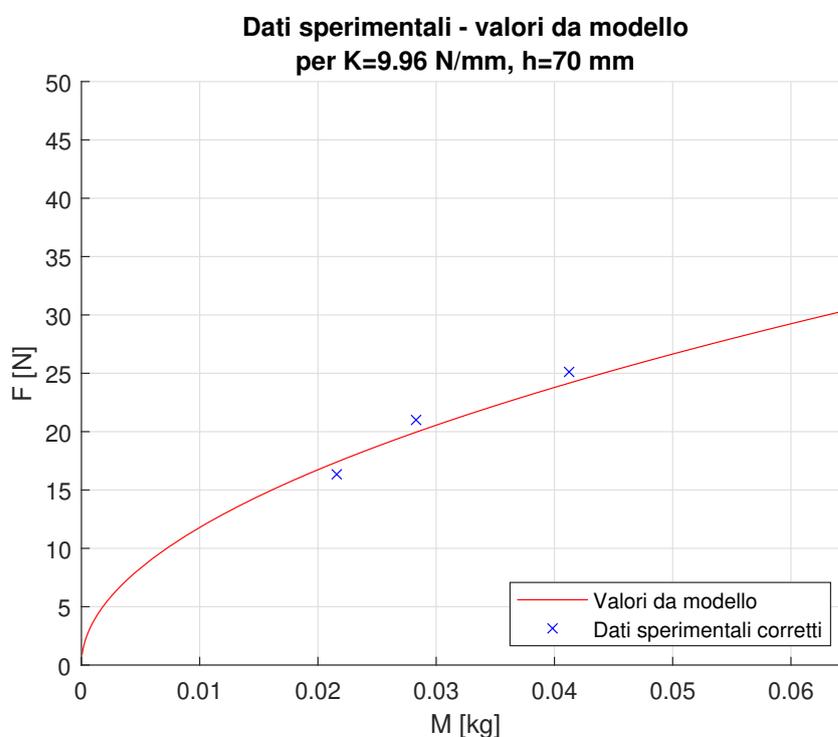


(b) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 24,69 N/mm ed altezza di caduta pari a 70 mm.

Figura 5.11: Confronto tra dati sperimentali e curva *forza – massa* da modello matematico per $K = 24,69$ N/mm.



(a) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 9,96 N/mm ed altezza di caduta pari a 40 mm.



(b) Confronto tra dati sperimentali e curva da modello matematico per costante elastica efficace installata pari a 9,96 N/mm ed altezza di caduta pari a 70 mm.

Figura 5.12: Confronto tra dati sperimentali e curva *forza – massa* da modello matematico per $K = 9,96$ N/mm.

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo progetto di tesi è stato realizzato un prototipo che può assumere le caratteristiche di rigidità delle diverse regioni del corpo umano, e attraverso il quale possono essere fatte valutazioni in merito alla sicurezza delle attività collaborative, permettendo esso di realizzare misurazioni delle forze all'impatto robot-operatore. Le scelte per riprodurre le proprietà biomeccaniche del corpo umano sono state fatte a seguito di un'approfondita analisi della Norma Tecnica UNI EN ISO TS 15066; modo di funzionamento, grandezza d'interesse e strumento per la misurazione di quest'ultima sono da ricondursi alla ricerca condotta in merito alle soluzioni commerciali pre-esistenti.

Si è quindi definito un programma di prove pre-impiego con manipolatore e presentato un modello matematico per la stima dei valori di forza che si sarebbero andati ad ottenere a seconda dei parametri di test. Si sono quindi confrontati i dati ottenuti sperimentalmente con i valori da modello, decretando come soddisfacenti scostamenti percentuali nell'intervallo $\pm 15\%$.

Seguono commenti e proposte su possibili sviluppi futuri nell'ambito di questo progetto di tesi.

Il dispositivo è stato progettato per replicare la rigidità delle *body region* mediante molle a compressione, che rappresentano la soluzione di più semplice implementazione. In alternativa, si potrebbero impiegare molle pneumatiche o strutture a rigidità variabile in funzione di una particolare configurazione adottata. Qualora si volesse ancora ricorrere a molle di compressione, si potrebbe pensare di adottare un singolo elemento di rigidità, scelta che permetterebbe di avere certezza della simmetria assiale del prototipo e del fatto che tutte le molle (una sola in questa

ipotesi) siano partecipi e attive simultaneamente nella fase di compressione.

Il dispositivo realizzato permette valutazioni per quanto riguarda urti robot-uomo collineari. Una delle possibilità è quella di realizzare prototipi con più gradi di libertà, in modo da valutare urti in più direzioni. Ciò porterebbe a riconsiderare la grandezza d'interesse e lo strumento di misurazione da utilizzare: si potrebbe scegliere di valutare accelerazioni mediante accelerometro/i.

Nel caso di impiego con manipolatore, il prototipo sviluppato si presta bene a valutazioni di urti quasi-statici, dal momento che la sua base è fissata. La casistica dell'urto transitorio può essere tenuta in considerazione solo nel picco di forza che si sviluppa negli istanti immediatamente successivi all'appoggio dell'organo terminale sulla piastra superiore. Se si volesse valutare in maniera più rigorosa e completa questa seconda tipologia di urti, si potrebbe sviluppare un dispositivo, ad esempio, montato su carrello o come *device* portatile.

Gli attriti, responsabili in parte della dispersione di energia, possono essere ridotti lubrificando periodicamente gli elementi-guida ed i corpi cilindrici in cui essi scorrono.

Ultima modifica eventualmente applicabile al prototipo è quella relativa al materiale con il quale realizzarlo. Il dispositivo oggetto del presente lavoro, si ricorda, è stato realizzato in *Tough PLA* e *PETG UHD* mediante tecnologia *AM* di stampa 3D. I singoli pezzi potrebbero invece essere realizzati in materiale più resistente (metallico) e avente rugosità superficiale inferiore alle plastiche di cui sopra.

Qualora si volesse mantenere la soluzione in materiale plastico, si potrebbe eseguire un'analisi agli elementi finiti sulla piastra superiore al fine di valutarne la rigidità (nell'ambito delle considerazioni fatte in 5.3.2).

Appendice A

Glossario

In questa sezione sono presenti il glossario dei termini usati e un elenco di chiavi di ricerca (*keyword*), con relativa traduzione italiana, utili per il reperimento degli argomenti sui motori di ricerca internazionali.

A.1 Glossario di riferimento

- **ACIDO POLILATTICO** - *polylactic acid (PLA)*
Polimero dell'acido lattico. È il materiale più usato nella realizzazione di prodotti mediante l'impiego di macchine di prototipazione rapida, le stampanti 3D a modellazione a deposizione fusa (FDM).
- **ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI** - *Finite Element Analysis (FEA)*
Tecnica di simulazione virtuale impiegata nelle analisi ingegneristiche.
- **APPLICAZIONE IN TEMPO REALE** - *real-time application (RTA)*
Applicazione che funziona entro un intervallo di tempo che l'utente percepisce come immediato o attuale.
- **CANALE FISICO** - *physical channel*
Terminale in corrispondenza del quale è possibile misurare o generare un segnale analogico o digitale.
- **CANALE VIRTUALE** - *virtual channel*
Concetto dell'architettura del driver NI-DAQmx utilizzato per rappresen-

tare una raccolta di impostazioni delle proprietà del dispositivo che possono includere un nome, un canale fisico, le connessioni del terminale di ingresso, il tipo di misura o generazione e le informazioni di scalatura.

- **CARATTERISTICA DI PRODOTTO** - *feature*
Ciascuna delle qualità costituenti le note distintive di un manufatto/prodotto.
- **COLLABORAZIONE UOMO-ROBOT** - *Human Robot Collaboration (HRC)*
Insieme delle attività in cooperazione tra essere umano e robot senza barriere di protezione fisiche.
- **COORDINATE LIBERE DI GIUNTO** - *generalized coordinates*
Sistema di coordinate, di numero pari ai gradi di libertà del sistema, che determina univocamente tutte le configurazioni di un sistema.
- **DRIVER** - *driver*
Insieme dei programmi usati dal sistema operativo di un computer per gestire un dispositivo a questo collegato.
- **DUREZZA SHORE** - *Shore hardness*
Misura della resistenza di un materiale alla penetrazione o all'indentazione.
- **MATRICE DI MASSA CONSISTENT** - *consistent mass matrix*
Formulazione della matrice di massa con struttura banda, non diagonale. Dal punto di vista formale, più rigorosa di quella lumped.
- **MATRICE DI MASSA LUMPED** - *lumped mass matrix*
Formulazione della matrice di massa nella quale tale grandezza viene concentrata nei nodi: la matrice è diagonale.
- **MEMBRO DI UN ROBOT** - *link*
Corpo rigido che interconnettendosi con altri mediante coppie cinematiche dà origine ad un manipolatore.

- **ORGANO TERMINALE** - *end-effector*
Dispositivo specificamente progettato per il collegamento all'interfaccia meccanica per consentire al robot di svolgere il proprio compito.
- **PETG** - *PETG*
Resina termoplastica impiegata nella stampa 3D. La sigla *PET* indica il tereftalato di polietilene, la *G* indica che tale resina è stata glicolizzata.
- **PRODUZIONE ADDITIVA** - *additive manufacturing (AM)*
Processo industriale impiegato per fabbricare oggetti partendo da modelli 3D computerizzati, aggiungendo uno strato sopra l'altro.
- **RIEMPIMENTO (DENSITÀ DI)** - *infill (density)*
Quantità di materiale, espressa come percentuale, all'interno di un oggetto realizzato attraverso tecnologie di produzione additiva.
- **ROBOT INDUSTRIALE** - *industrial robot*
Manipolatore multiuso riprogrammabile e controllato automaticamente, programmabile su 3 o più assi, che può essere fisso o mobile per l'uso in applicazioni di automazione industriale.
- **SCHEDA TECNICA** - *datasheet*
Documento che descrive le caratteristiche di un componente, un apparato, un software o anche un composto chimico.
- **SISTEMA ROBOT INDUSTRIALE** - *industrial robot system*
Sistema che comprende:
 - robot industriale;
 - end-effector;
 - qualsiasi macchinario, attrezzatura, dispositivo, asse ausiliario esterno o sensore che supporta il robot nell'esecuzione del suo compito.
- **SPAZIO MASSIMO** - *maximum space*
Spazio che può essere interessato dalle parti in movimento del robot come

definito dal produttore, più lo spazio che può essere interessato dalla parte terminale del braccio e dal pezzo in lavorazione.

- **SPAZIO OPERATIVO** - *operating space*

Porzione dello spazio ristretto all'interno del quale il robot si muove durante l'esecuzione del programma.

- **SPAZIO PROTETTO** - *safeguarded space*

Spazio definito dalle protezioni perimetrali.

- **SPAZIO RISTRETTO** - *restricted space*

Porzione dello spazio massimo delimitato da dispositivi che determinano dei limiti entro i quali il robot può muoversi.

A.2 Chiavi di ricerca

Inglese	Italiano
Human-Robot Collaboration	Collaborazione uomo-robot
cobots	robot collaborativi
collisions	impatti
safety	sicurezza

Appendice B

Tavole dei modelli

B.1 Disegni tecnici

La presente sezione dell'appendice è dedicata alla raccolta delle messe in tavola dei singoli componenti che costituiscono il prototipo.

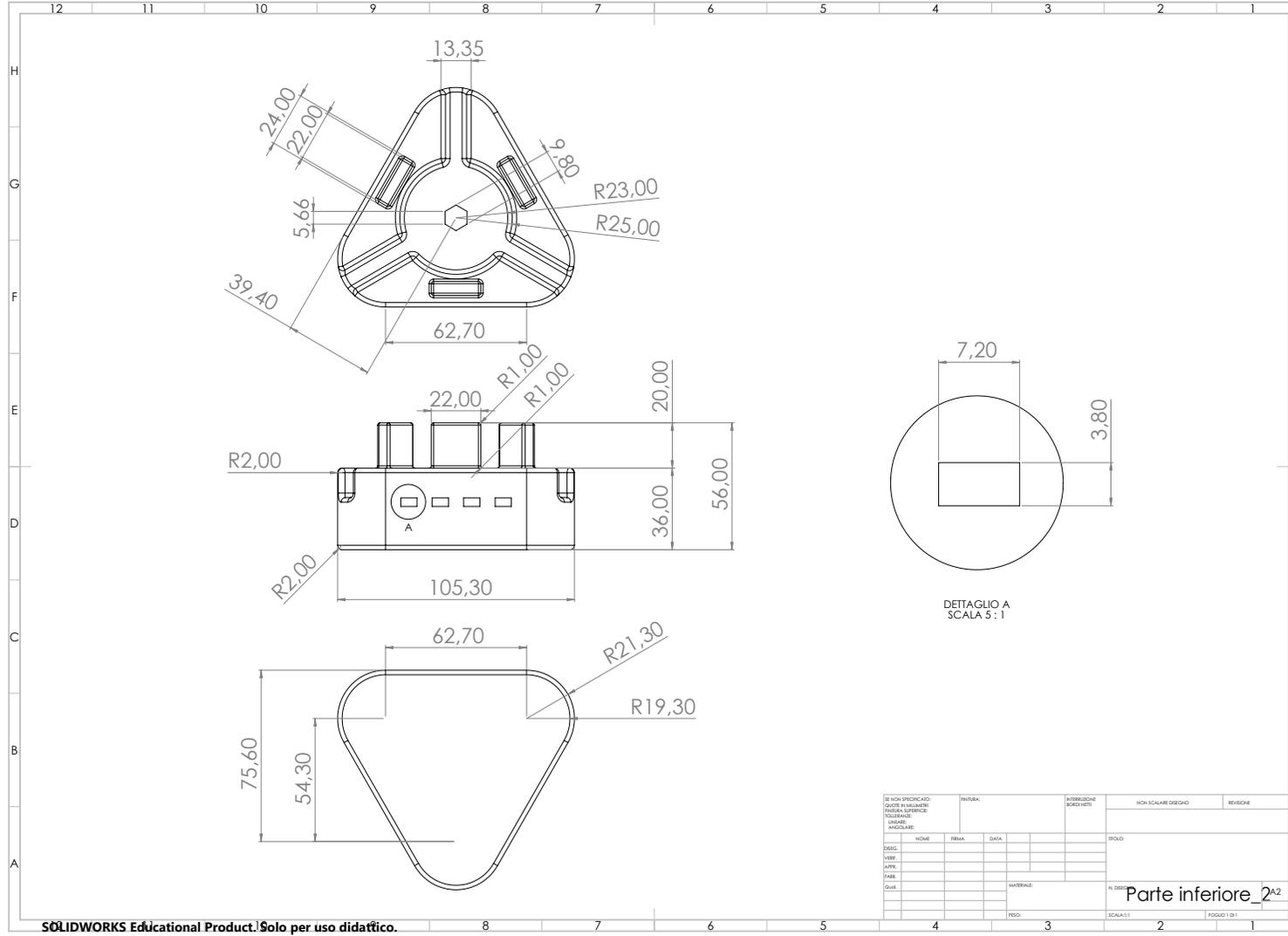


Figura B.3: Messa in tavola del componente "Seconda Parte Inferiore".

Bibliografia

- [1] <https://www.automazionenews.it/la-dinamica-di-un-robot/>.
- [2] <https://www.meccanismocomplesso.org/robot-dynamics-la-dinamica-in-robotica/>.
- [3] R. M. Brach, *Mechanical impact dynamics: rigid body collisions*. Brach Engineering, LLC, 2007.
- [4] I. Standard, “Iso/ts 15066: 2016: Robots and robotic devices—collaborative robots,” *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*, 2016.
- [5] D. G. Unfallversicherung, “Bg/bgia risk assessment recommendations according to machinery directive: Design of workplaces with collaborative robots,” *BGIA—Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance, Sankt Augustin*, 2009.
- [6] A. Muttray, M. Melia, B. Geißler, J. König, and S. Letzel, “Collaborative robots—investigation of pain sensibility at the man-machine-interface,” *Mainz, Germany. Retrieved March*, vol. 28, p. 2021, 2014.
- [7] D. Mewes and F. Mauser, “Safeguarding crushing points by limitation of forces,” *International journal of occupational safety and ergonomics*, vol. 9, no. 2, pp. 177–191, 2003.
- [8] K. Suita, Y. Yamada, N. Tsuchida, K. Imai, H. Ikeda, and N. Sugimoto, “A failure-to-safety” kyozon” system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence,” in *Proceedings*

of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3. IEEE, 1995, pp. 3089–3096.

[9] Y. Yamada, K. Suita, H. Ikeda, N. Sugimoto, H. Miura, and H. Nakamura, “Evaluation of pain tolerance based on a biomechanical method for human-robot coexistence,” *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, vol. 63, no. 612, pp. 2814–2819, 1997.

[10] <https://www.pilz.com/it/IT/products/robotics/prms/prms>.

[11] <https://www.gte.de/messtechnik/kraft-druckmesssystem/cobosafe>.

[12] C. Byner, D. Clever, H. Staab, and B. Matthias, “An extended two-mass model for clamping hazards in human-robot-collaboration: Peak forces and permissible speeds,” in *ISR Europe 2022; 54th International Symposium on Robotics*. VDE, 2022, pp. 1–8.

[13] O. Khatib, “Inertial properties in robotic manipulation: An object-level framework,” *The international journal of robotics research*, vol. 14, no. 1, pp. 19–36, 1995.

[14] <https://www.molle-industriali.it/>.

[15] https://ultimaker.my.salesforce.com/sfc/p/j0000000HOnW/a/5b000004UgTE/z40nDBo3Clypj7u9xI7MbeVe.CNpDM_Mq0nhvbpyne8.

[16] https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen/dokumente/infoblaetter/infobl_englisch/080_collaborativerobotsystems.pdf.

[17] https://www.pcb.com/contentstore/MktgContent/LinkedDocuments/ForceTorque/TM-FRC-208C_Lowres.pdf.

[18] <https://www.pcb.com/>.

[19] <https://www.pcb.com/it/prodotti?m=086D05>.

Ringraziamenti

Si ringraziano i docenti Matteo Bottin ed Alberto Doria per il contributo dato al lavoro di tesi qui presentato.