

SUPSI

Messa in servizio e strumentazione di un pendolo a impatto per prove di resilienza

Studente/i

Francesco Lanzeni

Relatore

Ing. Daniele Crivelli

Correlatore

Ing. Matteo Dotta

Committente

SUPSI - DTI

Corso di laurea

Ingegneria Meccanica

Codice Progetto

C10408

Anno

2021

Data

29 Ottobre 2021

STUDENTSUPSI

Ringraziamenti

Vorrei sinceramente ringraziare l'Ing. Crivelli e l'Ing. Dotta per il grande supporto fornitomi durante questo lavoro. Un ringraziamento va anche all'Ing. Galli e al Prof. Vancheri per i loro preziosi consigli.

Ringrazio l'intero corpo docente che con passione e dedizione mi ha trasmesso le conoscenze che ora sono parte non solo della mia formazione, ma strumenti che mi permetteranno di dare il mio contributo nel mondo.

Un ringraziamento particolare va alla mia famiglia che mi ha sostenuto con affetto, e ai miei amici e compagni di studio, in particolare Youssef Al Mokdad e Alessandro Folloni, per il supporto reciproco che ci siamo dati lungo questo impegnativo percorso e la condivisione di esperienze e momenti preziosi di collaborazione e amicizia.

Abstract/Riassunto

Abstract

The following project proposes the commissioning and instrumentation of an impact pendulum for resilience testing or Charpy pendulum.

The pendulum was recovered from the DACD laboratories and needed to be overhauled and secured before it could be used. The recovery of this machine is particularly important because it allows us to expand the measurement capabilities of the laboratory, in fact, the pendulum already in possession is limited to 50J, while with the pendulum of this project it will be possible to reach up to 300J.

At first the machine was completely overhauled and assembled, and at the same time the CAD model was created.

Subsequently, the safety regulations in force have been analyzed and the suitable and necessary systems foreseen by the regulations have been studied and designed.

Finally, the forces exchanged between the hammer and the specimen were analysed in order to estimate the deformations of the punch and thus choose the most suitable strain gauges for measuring the forces exchanged.

Then the strain gauges were applied and wiring was carried out to put the measuring chain into operation and static tests were carried out on the striker punch.

The calibration of the measuring system was then carried out.

Riassunto

Il seguente progetto propone la messa in servizio e strumentazione di un pendolo a impatto per prove di resilienza o pendolo di Charpy.

Il pendolo è stato recuperato dai laboratori del DACD e per poter essere utilizzato necessitava di una revisione e della messa in sicurezza. Il recupero di questa macchina risulta particolarmente importante in quanto consente di poter ampliare le capacità di misura del laboratorio, infatti, il pendolo già in possesso è limitato a 50J mentre con il pendolo di questo progetto si potrà arrivare fino a 300J.

In un primo momento la macchina è stata completamente revisionata e montata e parallelamente ne è stato realizzato il modello CAD.

Successivamente sono state analizzate le normative sulla sicurezza in vigore e sono stati studiati e progettati i sistemi adatti e necessari previsti dalle normative.

Infine si è proceduto all'analisi delle forze scambiate tra la mazza e il provino al fine di stimare le deformazioni del punzone e così poter scegliere gli estensimetri più adatti per la misurazione delle forze scambiate.

In seguito sono stati applicati gli estensimetri e sono stati effettuati i cablaggi per mettere in funzione la catena di misura e sono stati effettuati dei test statici sul punzone della mazza.

In fine è stata effettuata la calibrazione del sistema di misura.

Indice

Ringraziamenti	i
Abstract/Riassunto	iii
1 Introduzione	1
2 Progetto assegnato	3
3 Introduzione alla Resilienza e al Pendolo di Charpy	7
4 Modello CAD	9
5 Normative	11
5.1 Normative sulla sicurezza dei lavoratori	11
5.2 Normative sulla sicurezza delle macchine	13
5.3 Criticità rilevate	18
6 Funzioni e Cassa Morfologica	19
6.1 Funzioni	19
6.2 Cassa Morfologica	20
6.2.1 Protezione macchina	21
6.2.2 Movimentazione traversa posizionamento	22
6.2.3 Sgancio dente traversa posizionamento	23
6.2.4 Sollevamento mazza	24
6.2.5 Accesso posizionamento provino	25
6.2.6 Estrazione provino testato	26
6.2.7 Blocco di sicurezza mazza	27
6.2.8 Impedire l'accesso al cavo di azionamento	28
6.3 Ricapitolazione varianti	29
6.4 Disegno di concetto	31
7 Progettazione	33

8 Strumentazione	37
8.1 Stima della forza esercitata	37
8.2 Calcolo delle deformazioni	41
8.3 Scelta estensimetri	44
8.4 Considerazioni	45
8.5 Estensimetri	46
8.5.1 Installazione estensimetri	46
8.5.2 Cablaggio estensimetri	48
8.6 Catena di misura	51
8.7 Prove statiche del punzone	52
8.8 Analisi dei dati	55
8.9 Calibrazione del sistema di misura	57
8.9.1 Calibrazione estensimetri	57
8.9.2 Calibrazione scala graduata misura dell'energia	60
9 Trasloco basamento	63
10 Costi	67
11 Conclusioni	69
12 Allegati	71
Appendices	75
A Tabelle di riferimento capitolo 5 paragrafo 5.1	77
B Manuale di utilizzo del pendolo	81
B.1 Preparazione della sede del provino	81
B.2 Procedura di utilizzo	82

Elenco delle figure

4.1	Modello CAD - vista frontale / vista laterale	9
4.2	Modello CAD - vista isometrica	10
6.1	Disegno di concetto	31
7.1	Struttura con pannelli	34
7.2	Soffietto piano e Spina di bloccaggio rapida	35
8.1	Trave appoggiata con una forza posta al centro	37
8.2	Sistema massa/molla	39
8.3	Modello FEM/SIM	41
8.4	Deformazioni relative	42
8.5	Deformazioni relative - dettaglio	43
8.6	Analisi risposta in frequenza	45
8.7	Estensimetri	46
8.8	Deformazioni relative - controllo	47
8.9	Ponte di Wheatstone	48
8.10	Ponte di Wheatstone - Configurazione 2/4 di ponte	49
8.11	Cablaggio ponte	50
8.12	Cablaggio connettore a 25 pin	50
8.13	Schema catena di misura	51
8.14	Prova statica del punzone	52
8.15	Prova statica del punzone - Dettaglio	53
8.16	Normal strain - Standard force	53
8.17	Campionamento segnale elettrico	54
8.18	Forza - $\Delta U/U$	55
8.19	Errore percentuale	57
8.20	Errore quadratico	58
8.21	Misura altezza del centro di massa della mazza	60
8.22	Regolazione vite scala graduata	61

9.1	Basamento	63
9.2	Movimentazione blocco in ghisa	64
9.3	Basamento con montanti	65

Elenco delle tabelle

6.1	Valutazione varianti: Protezione macchina	21
6.2	Valutazione varianti: Movimentazione traversa posizionamento	22
6.3	Valutazione varianti: Sgancio dente traversa posizionamento	23
6.4	Valutazione varianti: Sollevamento mazza	24
6.5	Valutazione varianti: Accesso posizionamento provino	25
6.6	Valutazione varianti: Estrazione provino testato	26
6.7	Valutazione varianti: Blocco di sicurezza mazza	27
6.8	Valutazione varianti: Impedire accesso cavo azionamento	28
6.9	Riepilogo varianti	29
6.10	Riepilogo varianti	30
8.1	Pendenza rette interpolatrici	57
10.1	Costi	67
A.1	Masse di riferimento in kg in condizioni di sollevamento manuale ideale per genere e per classe deducibile dalle norme tecniche ISO 1128 e UNI EN 1005-2	77
A.2	Moltiplicatore orizzontale h_m	78
A.3	Moltiplicatore verticale v_m	78
A.4	Moltiplicatore distanza d_m	79
A.5	Moltiplicatore asimmetrico a_m	79
A.6	Moltiplicatore frequenza f_m	80
A.7	Moltiplicatore accoppiamento c_m	80

Capitolo 1

Introduzione

Con il seguente progetto di Diploma si intende mettere in funzione, strumentare e mettere in sicurezza il pendolo a impatto per prove di resilienza da 300J, recuperato dall'istituto MEMTI che si trovava nei laboratori del DACD.

Durante questo lavoro si andrà a revisionare completamente la macchina e a realizzare un modello CAD che servirà per ulteriori studi. Successivamente si andranno ad analizzare le normative sulla sicurezza vigenti e verranno progettati i sistemi di sicurezza necessari. Infine si procederà alla strumentazione della mazza e alla calibrazione del sistema di misura.

Capitolo 2

Progetto assegnato

Descrizione

Il MEMTi ha recuperato dai laboratori del DACD un pendolo a impatto per la prova di resilienza da 300J.

La macchina, vetusta ma perfettamente funzionante, è didatticamente interessante per la semplicità delle soluzioni adottate e si presta perfettamente quale oggetto di studio.

Inoltre costituisce per il laboratorio di scienza dei materiali un incremento della capacità di prova (oggi limitata a 50J) di grande interesse in particolare per i metalli.

Obiettivi del progetto:

- **Dotare la macchina dei dispositivi di sicurezza:**

La macchina ad oggi non può essere utilizzata in quanto, data la sua età, non soddisfa gli attuali requisiti di sicurezza e si vuole dunque dotarla di sistemi conformi per poterla rimettere in funzione. Per fare ciò è necessario identificare le normative di sicurezza attuali, analizzare criticamente il pendolo e progettare i dispositivi di sicurezza da implementare nella macchina. Un valore aggiunto in vista di progetti futuri (es. simulazione dell'impatto) consiste nel disporre un modello CAD completo della macchina, che si chiede di realizzare.

- **Strumentare la mazza:**

La normativa ISO 14556 definisce il metodo di strumentazione del pendolo Charpy per le prove di resilienza su provini intagliati (V-notch). Si chiede di strumentare il pendolo applicando i sensori (estensimetri elettrici resistivi) sulla mazza e mettendo in funzione la catena di misura con l'elettronica (sistema di acquisizione ad alta velocità secondo norma) e il cablaggio forniti.

La rimessa in funzione del pendolo consentirà di ampliare le capacità di misura della resilienza (attualmente limitate a 50J) e grazie alla strumentazione si disporrà di uno strumento di misura interessante per fini didattici e di ricerca.

Compiti

- Pianificazione delle attività;
- Progettazione dei sistemi di sicurezza:
 - Identificazione delle normative di sicurezza in vigore;
 - Analisi del pendolo e identificazione delle criticità;
 - Smontaggio e revisione del pendolo;
 - Modellazione CAD della macchina;
 - Definizione dei sistemi di sicurezza (specifiche, concetto, progettazione);
 - Implementazione dei sistemi di sicurezza;
- Strumentazione della mazza:
 - Analisi delle normative per i test strumentati ISO 14556;
 - Strumentazione della mazza;
 - Completamento, calibrazione e messa in funzione della catena di misura;
 - Definizione delle prove di validazione del metodo;
 - Esecuzione di una piccola campagna di prove su un materiale dato ed analisi dei risultati
- Documentazione:
 - Redazione del rapporto tecnico / scientifico del progetto;
 - Stesura di un rapporto di lavoro giornaliero.

Obiettivi

- Implementare le misure di sicurezza;
- Strumentare il pendolo;

Tecnologie

- Metodologie di progettazione meccanica;
- Elementi di macchine;
- Scienza e resistenza dei materiali;
- CAD (modelling, drafting, motion);
- Statica, cinematica-dinamica

Contatto esterno

Nessun contatto esterno presente.

Documenti allegati



Messa in servizio e strumentazione di un pendolo a impatto per prove di resilienza

Capitolo 3

Introduzione alla Resilienza e al Pendolo di Charpy

La Resilienza è la capacità di assorbire energia durante la frattura di un materiale sottoposto a carichi che variano rapidamente.

La prova di Resilienza consiste nel rompere a flessione un provino per urto con un solo colpo.

Per effettuare tale prova viene utilizzato il pendolo di Charpy che è una macchina in grado di quantificare in Joule la resilienza di un materiale; il test è stato inventato da Georges Augustin Albert Charpy nel 1900.

La macchina è composta da una mazza collegata all'estremità di un'asta che è fulcrata all'estremità opposta. La mazza viene posizionata ad un'altezza nota e di conseguenza si conosce l'energia potenziale della mazza rispetto al provino tramite la seguente formula:

$$E_0 = m \cdot g \cdot \Delta h_0 \quad (3.1)$$

Dove:

- m : è la massa della mazza
- g : è l'accelerazione gravitazionale ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)
- Δh_0 : è la differenza di altezza iniziale tra il centro di massa della mazza e il punto d'impatto con il provino

La mazza viene rilasciata e al momento dell'impatto tutta l'energia potenziale viene convertita in energia cinetica:

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Dove:

- m : è la massa della mazza
- v : è la velocità della mazza appena prima dell'impatto

A questo punto una parte dell'energia viene dissipata in deformazione del provino e successivamente la mazza prosegue e risale di un'altezza Δh_1 e quindi raggiungendo un'energia potenziale E_1 .

L'energia assorbita dal provino si può quindi facilmente calcolare mediante la formula:

$$K = E_0 - E_1 = m \cdot g \cdot \Delta h_0 - m \cdot g \cdot \Delta h_1 \quad (3.3)$$

Capitolo 4

Modello CAD

Dapprima è stato realizzato il modello CAD della macchina.

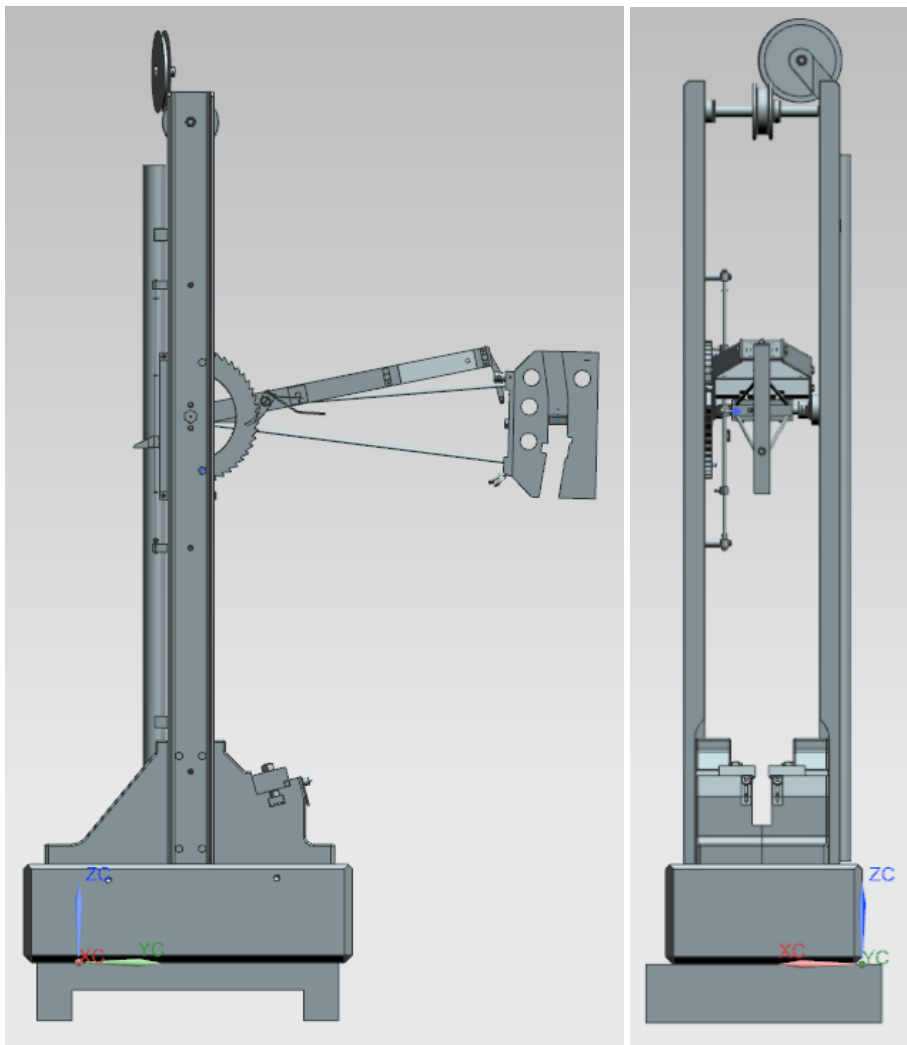


Figura 4.1: Modello CAD - vista frontale / vista laterale

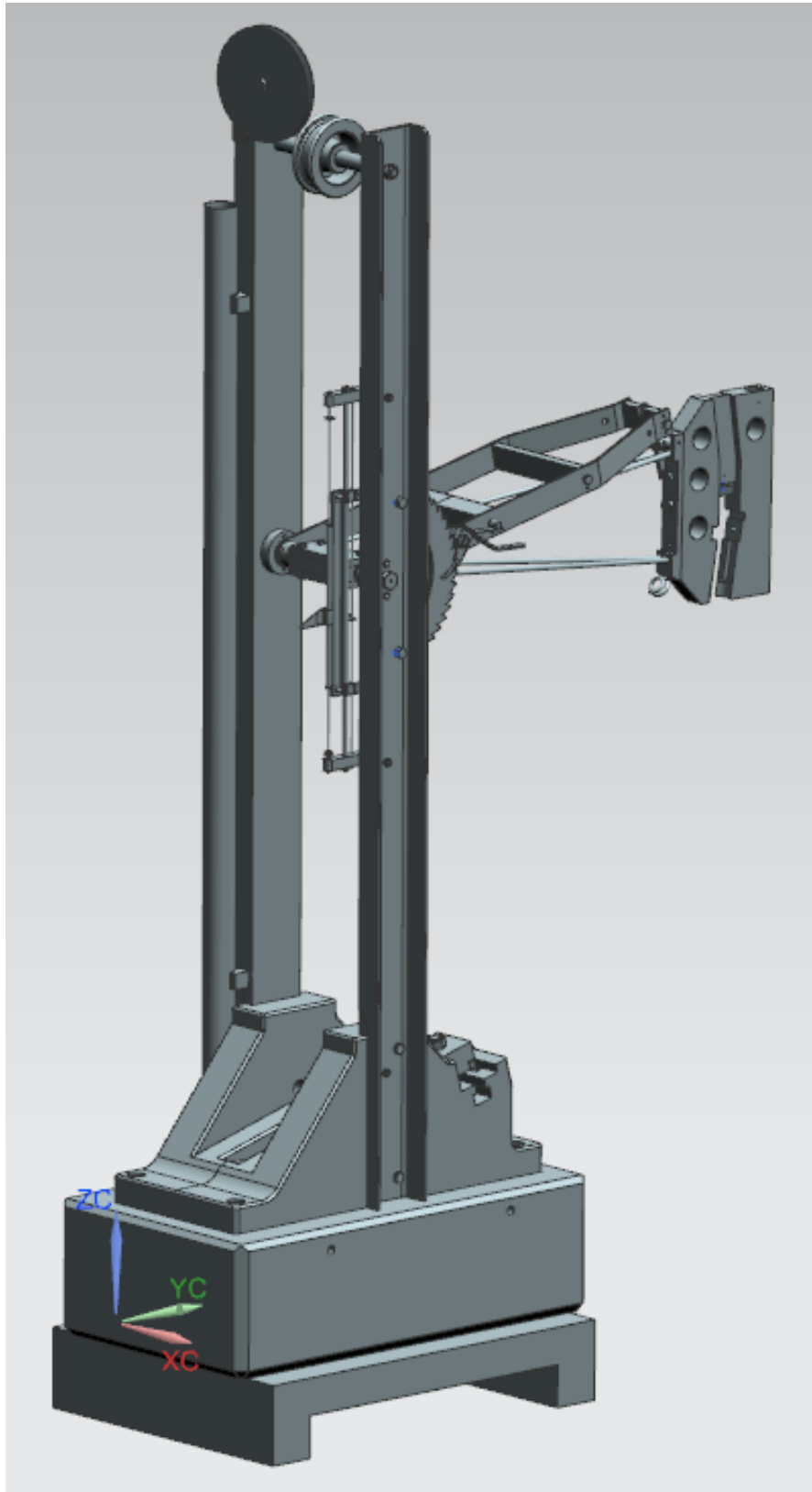


Figura 4.2: Modello CAD - vista isometrica

Capitolo 5

Normative

Lo scopo primario del progetto è la messa in sicurezza della macchina, pertanto vengono ricercate le normative che ne regolamentano l'implementazione.

5.1 Normative sulla sicurezza dei lavoratori

In particolare per quanto concerne la sicurezza dei lavoratori si è fatto riferimento al "D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 - Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106" [3], al testo "Movimentazione manuale dei carichi" [5] redatto dall'istituto INAIL (ver. 2019) che fa riferimento alla norma "UNI ISO 11228" [7] del 09 aprile 2009.

Di seguito viene riportato il paragrafo più significativo del documento "Movimentazione manuale dei carichi" [5]:

Fase 3

Limiti raccomandati per massa, frequenza e posizione dell'oggetto. Viene proposta l'applicazione dell'equazione RNLE (Revised NIOSH Lifting Equation), pubblicata dal NIOSH nel 1994 ed opportunamente modificata, sempre che risultino valide le seguenti condizioni:

- sollevamento a due mani, graduale e senza movimenti bruschi;
- non siano presenti compiti nei quali il lavoratore è supportato parzialmente;
- ampiezza dell'oggetto non superiore a 0,75 m;
- posture di sollevamento senza restrizioni;
- esistenza di buon accoppiamento sia nella presa che nell'appoggio al pavimento;
- condizioni ambientali favorevoli.

Il limite per la massa dell'oggetto sollevabile in condizioni ideali (m) è ricavato grazie all'uso dell'equazione:

$$m \leq m_{ref} \cdot h_m \cdot v_m \cdot d_m \cdot a_m \cdot f_m \cdot c_m \quad (5.1)$$

dove:

m_{ref} è la massa di riferimento per il gruppo di popolazione identificato;

h_m è il moltiplicatore di distanza orizzontale;

v_m è il moltiplicatore di posizione verticale;

d_m è il moltiplicatore di spostamento verticale;

a_m è il moltiplicatore di asimmetria;

f_m è il moltiplicatore della frequenza;

c_m è il moltiplicatore per la qualità della presa.

Per la determinazione dei singoli moltiplicatori si rimanda all'equazione RNLE del NIOSH.

Se viene superato il limite raccomandato per la movimentazione in esame, ricavato dall'equazione sopra illustrata (rapporto fra peso sollevato e peso raccomandato superiore ad 1), allora si è in presenza di rischio e occorrerà procedere alla riprogettazione del compito.

La norma ISO 11228-1 citata nel d.lgs. 81/2008 pur ricalcando, nella sostanza, l'algoritmo del modello RNLE del NIOSH, non prevede fasce di rischio.

5.2 Normative sulla sicurezza delle macchine

In particolare per quanto concerne la sicurezza delle macchine si è fatto riferimento al testo "*Direttiva macchine e norme tecniche consolidato Ed. 12.0 2018*" [4] che fa riferimento alla normativa "*Direttiva macchine 2018*" [2] contenete le modifiche apportate alla normativa "*Direttiva macchine 2006/42/CE*" [1].

Di seguito vengono riportati i paragrafi più significativi della normativa "*Direttiva macchine 2018*" [2].

Capitolo 1.2 - SISTEMI DI COMANDO

Paragrafo 1.2.1 - Sicurezza e affidabilità dei sistemi di comando

- La macchina non deve avviarsi in modo inatteso;
- Nessun elemento mobile della macchina o pezzo trattenuto dalla macchina deve cadere o essere espulso.

Capitolo 1.3 - MISURE DI PROTEZIONE CONTRO I PERICOLI MECCANICI

Paragrafo 1.3.2 - Rischio di rottura durante il funzionamento

Se nonostante le precauzioni prese sussistono rischi di disintegrazione o di rottura, gli elementi in questione devono essere montati, disposti e/o protetti in modo che i loro eventuali frammenti vengano trattenuti evitando situazioni pericolose.

Paragrafo 1.3.3 - Rischi dovuti alla caduta o alla proiezione di oggetti

Devono essere prese precauzioni per evitare i rischi derivanti dalla caduta o dalla proiezione di oggetti.

Paragrafo 1.3.7 - Rischi dovuti agli elementi mobili

Gli elementi mobili della macchina devono essere progettati e costruiti per evitare i rischi di contatto che possono provocare infortuni oppure, se i rischi persistono, essere muniti di ripari o dispositivi di protezione.

Devono essere prese tutte le disposizioni necessarie per impedire un bloccaggio improvviso degli elementi mobili di lavoro.

Nei casi in cui, malgrado le precauzioni prese, possa verificarsi un bloccaggio, dovranno essere previsti, ove opportuno, i dispositivi di protezione specifici e gli utensili specifici necessari per permettere di sbloccare la macchina in modo sicuro.

Le istruzioni e, ove possibile, un'indicazione sulla macchina devono individuare tali dispositivi di protezione specifici e la modalità di impiego.

Paragrafo 1.3.8 - Scelta di una protezione contro i rischi dovuti agli elementi mobili

I ripari o i dispositivi di protezione progettati contro i rischi dovuti agli elementi mobili devono essere scelti in funzione del tipo di rischio. Per la scelta si deve ricorrere alle indicazioni seguenti.

Paragrafo 1.3.8.1 - Elementi mobili di trasmissione

I ripari progettati per proteggere le persone dai pericoli creati dagli elementi mobili di trasmissione devono essere:

- ripari fissi di cui al punto 1.4.2.1, oppure
- ripari mobili interbloccati, di cui al punto 1.4.2.2.

Se si prevedono interventi frequenti, dovrebbe essere scelta quest'ultima soluzione.

Paragrafo 1.3.8.2 - Elementi mobili che partecipano alla lavorazione

I ripari o i dispositivi di protezione progettati per proteggere le persone dai pericoli creati dagli elementi mobili che partecipano alla lavorazione devono essere:

- ripari fissi di cui al punto 1.4.2.1, oppure
- ripari mobili interbloccati, di cui al punto 1.4.2.2, oppure
- dispositivi di protezione di cui al punto 1.4.3, oppure
- una combinazione di quanto sopra.

Tuttavia, se taluni elementi mobili che partecipano direttamente alla lavorazione non possono essere resi interamente inaccessibili durante il loro funzionamento a causa di operazioni che richiedono l'intervento dell'operatore, detti elementi devono essere muniti di:

- ripari fissi o di ripari mobili interbloccati, che impediscano l'accesso alle parti degli elementi non utilizzate per la lavorazione, e
- ripari regolabili di cui al punto 1.4.2.3, che limitino l'accesso alle parti degli elementi mobili cui è necessario accedere.

Paragrafo 1.3.9 - Rischi di movimenti incontrollati

Quando un elemento della macchina è stato arrestato, la sua deriva dalla posizione di arresto, per qualsiasi causa che non sia l'azionamento di dispositivi di comando, deve essere impedita o essere tale da non costituire un pericolo.

Capitolo 1.4 - CARATTERISTICHE RICHIESTE PER I RIPARI ED I DISPOSITIVI DI PROTEZIONE

Paragrafo 1.4.1 - Requisiti generali

I ripari e i dispositivi di protezione:

- devono essere di costruzione robusta,
- devono essere fissati solidamente,
- non devono provocare pericoli supplementari,
- non devono essere facilmente elusi o resi inefficaci,
- devono essere situati ad una distanza sufficiente dalla zona pericolosa,
- non devono limitare più del necessario l'osservazione del ciclo di lavoro, e
- devono permettere gli interventi indispensabili per l'installazione e/o la sostituzione degli utensili e per i lavori di manutenzione, limitando però l'accesso soltanto al settore in cui deve essere effettuato il lavoro e, se possibile, senza smontare il riparo o senza disattivare il dispositivo di protezione.

Inoltre, se possibile, i ripari devono proteggere dalla caduta e dalla proiezione di materiali od oggetti e dalle emissioni provocate dalla macchina.

Paragrafo 1.4.2.1 - Ripari fissi

Il fissaggio dei ripari fissi deve essere ottenuto con sistemi che richiedono l'uso di utensili per la loro apertura o smontaggio.

I sistemi di fissaggio devono rimanere attaccati ai ripari o alla macchina quando i ripari sono rimossi.

Se possibile, i ripari non devono poter rimanere al loro posto in mancanza dei loro mezzi di fissaggio.

Paragrafo 1.4.2.2 - Ripari mobili interbloccati

I ripari mobili interbloccati devono:

- per quanto possibile restare uniti alla macchina quando siano aperti,
- essere progettati e costruiti in modo che la loro regolazione richieda un intervento volontario.

I ripari mobili interbloccati devono essere associati ad un dispositivo di interblocco che:

- impedisca l'avviamento di funzioni pericolose della macchina fin quando i ripari sono chiusi, e
- dia un comando di arresto non appena essi non sono più chiusi.

Se un operatore può raggiungere la zona pericolosa prima che sia cessato il rischio dovuto alle funzioni pericolose della macchina, i ripari mobili devono essere associati ad un dispositivo di bloccaggio del riparo, oltre che ad un dispositivo di interblocco che:

- impedisca l'avviamento delle funzioni pericolose della macchina fin quando il riparo non è chiuso e bloccato, e
- tenga il riparo chiuso e bloccato fin quando non è cessato il rischio di lesioni dovuto alle funzioni pericolose della macchina.

I ripari mobili interbloccati devono essere progettati in modo che la mancanza o il guasto di uno dei loro elementi impedisca l'avviamento o provochi l'arresto delle funzioni pericolose della macchina.

Paragrafo 1.4.2.3 - Ripari regolabili che limitano l'accesso

I ripari regolabili che limitano l'accesso alle parti degli elementi mobili indispensabili alla lavorazione devono:

- potersi regolare manualmente o automaticamente a seconda del tipo di lavorazione da eseguire, e
- potersi regolare facilmente senza l'uso di un attrezzo.

Capitolo 1.6 - MANUTENZIONE

Paragrafo 1.6.1 - Manutenzione della macchina

I punti di regolazione e di manutenzione devono essere situati fuori dalle zone pericolose. Gli interventi di regolazione, di manutenzione, di riparazione e di pulizia della macchina devono poter essere eseguiti sulla macchina ferma.

Se per motivi tecnici non è possibile soddisfare una delle precedenti condizioni, devono essere prese disposizioni per garantire che dette operazioni possano essere eseguite in condizioni di sicurezza (cfr. punto 1.2.5).

Per le macchine automatizzate e, se del caso, per altre macchine, deve essere previsto un dispositivo di connessione che consenta di montare un dispositivo di diagnosi di ricerca delle avarie.

Gli elementi delle macchine automatizzate che devono essere sostituiti frequentemente devono essere facilmente smontabili e rimontabili in condizioni di sicurezza. L'accesso a questi elementi deve consentire di svolgere questi compiti con i mezzi tecnici necessari secondo il metodo operativo previsto.

Paragrafo 1.6.2 - Accesso ai posti di lavoro e ai punti d'intervento utilizzati per la manutenzione

La macchina deve essere progettata e costruita in modo da permettere l'accesso in condizioni di sicurezza a tutte le zone in cui è necessario intervenire durante il funzionamento, la regolazione e la manutenzione della macchina.

Paragrafo 1.6.3 - Isolamento dalle fonti di alimentazione di energia

La macchina deve essere munita di dispositivi che consentono di isolarla da ciascuna delle sue fonti di alimentazione di energia. Tali dispositivi devono essere identificati chiaramente. Devono poter essere bloccati, qualora la riconnessione rischi di presentare un pericolo per le persone. I dispositivi devono inoltre poter essere bloccati nel caso in cui l'operatore non possa verificare l'effettivo costante isolamento da tutte le posizioni cui ha accesso.

Nel caso di macchine che possono essere alimentate ad energia elettrica mediante una spina ad innesto, è sufficiente la separazione della spina, a patto che l'operatore possa verificare da tutte le posizioni cui ha accesso, che la spina resti disinserita.

L'eventuale energia residua o immagazzinata dopo l'isolamento della macchina deve poter essere dissipata senza rischio per le persone.

In deroga al requisito dei commi precedenti, taluni circuiti possono non essere separati dalla loro fonte di energia onde consentire, ad esempio, il supporto di pezzi, la tutela di informazioni, l'illuminazione delle parti interne, ecc. In questo caso devono essere prese disposizioni particolari per garantire la sicurezza degli operatori.

Paragrafo 1.6.4 - Intervento dell'operatore

La macchina deve essere progettata, costruita ed equipaggiata in modo tale da limitare la necessità d'intervento degli operatori. L'intervento di un operatore, ogniqualvolta non possa essere evitato, dovrà poter essere effettuato facilmente e in condizioni di sicurezza.

Paragrafo 1.6.5 - Pulitura delle parti interne

La macchina deve essere progettata e costruita in modo che la pulitura delle parti interne della macchina che ha contenuto sostanze o preparazioni pericolose sia possibile senza penetrare in tali parti interne; lo stesso dicasi per l'eventuale svuotamento completo, che deve poter essere fatto dall'esterno. Se è impossibile evitare di penetrarvi, la macchina deve essere progettata e costruita in modo da consentire di effettuare la pulitura in condizioni di sicurezza.

5.3 Criticità rilevate

Le criticità principali che sono state individuate sul pendolo di questo progetto sono:

- Masse da sollevare: bisogna verificare che le masse da sollevare siano conformi alla normativa presentata nel paragrafo 5.1 "*Normative sulla sicurezza dei lavoratori*"
- La macchina non deve azionarsi in modo inatteso
- La caduta o la proiezione di componenti o altro non deve arrecare danno ai lavoratori
- Le parti mobili non devono arrecare danno ai lavoratori

Per quanto riguarda il calcolo delle masse da sollevare, nel caso in questione del pendolo in esame, risulta che la massa sollevabile dall'operatore calcolata con l'equazione 5.1 è:

$$m = 25 \text{ kg} \cdot 1.00 \cdot 0.99 \cdot 0.85 \cdot 1.00 \cdot 0.94 \cdot 1.00 = 19.78 \text{ kg} \quad (5.2)$$

con:

$$m_{ref} = 25 \text{ kg};$$

$$h_m = 1.00 \quad (\text{non viene considerato spostamento orizzontale});$$

$$v_m = 0.99 \quad (\text{con } v = 70 \text{ cm});$$

$$d_m = 0.85 \quad (\text{con } d_{max} = 150 \text{ cm});$$

$$a_m = 1.00 \quad (\text{il carico è posizionato di fronte all'operatore});$$

$$f_m = 0.94 \quad (\text{si considera un sollevamento al minuto considerando la preparazione e una durata del lavoro inferiore o uguale ad un'ora});$$

$$c_m = 1.00$$

I valori sono ricavati dalle tabelle dell'appendice A che fa riferimento al testo "*Application manual for the revised NIOSH lifting equation*" [6].

La massa da movimentare presente nel caso di questo progetto è pari a 19 kg, pertanto entro il limite calcolato nell'equazione 5.2.

Per quanto riguarda i punti successivi dell'elenco precedente verranno tenuti in considerazione nella sezione 6.2 "*Cassa Morfologica*" come criteri di valutazione.

Capitolo 6

Funzioni e Cassa Morfologica

6.1 Funzioni

Di seguito vengono elencate le funzioni che devono essere soddisfatte dal progetto:

- **Protezione macchina:** impedire l'accesso alla macchina in funzione
- **Movimentazione traversa posizionamento:** messa in posizione della traversa di posizionamento dove si aggancia la mazza
- **Sgancio dente traversa posizionamento:** sblocco del sistema di blocco della traversa di posizionamento
- **Sollevamento mazza**
- **Accesso posizionamento provino**
- **Estrazione provino testato**
- **Blocco di sicurezza mazza**

Durante la progettazione è stato deciso di non utilizzare alcun sistema di azionamento elettrico o di qualunque dispositivo elettronico, tuttavia nell'analisi di ricerca delle varianti nella sezione "*Cassa Morfologica*" 6.2 questi elementi sono presenti e possono essere utili al fine di una futura loro implementazione.

6.2 Cassa Morfologica

Per ogni funzione vengono ricercate delle varianti che soddisfino tale scopo.

Aspetto molto importante di cui è stato tenuto conto è l'implementazione di sistemi che possibilmente non necessitino di modificare la struttura esistente della macchina.

Per ogni funzione vengono definiti dei criteri di valutazione a cui vengono assegnati dei pesi "g" che vanno da un valore da 1 (poco importante) a 5 (molto importante).

Per ogni variante, ad ogni criterio di valutazione, vengono assegnate delle note "p" da 0 (insufficiente) a 4 (eccellente/ideale) che indicano il grado di soddisfazione della variante rispetto al criterio corrispondente.

Per ogni variante si calcola il fattore "X" che corrisponde al quoziente tra, la sommatoria dei prodotti dei valori attribuiti ai differenti criteri di valutazione "p1", "p2", ..., "pn" ed i fattori di ponderazione, e la somma dei fattori di ponderazione moltiplicata con il valore di valutazione massimo della nota.

$$X = \frac{\sum(g \cdot p)}{(\sum(g)) \cdot (\max(p))} \quad (6.1)$$

6.2.1 Protezione macchina

Per quanto concerne la protezione della macchina sono state individuate le seguenti varianti:

- **Pannelli semplici:** pannelli posti a circondare la macchina ma non uniti da un telaio
- **Gabbia:** struttura con rete metallica
- **Struttura con pannelli di plexiglass:** pannelli di plexiglass vincolati ad un telaio
- **Struttura con pannelli di plexiglass e aggiunta di gabbia sui lati:** come per la struttura con pannelli di plexiglass ma in aggiunta viene integrata una rete metallica
- **Struttura con pannelli di plexiglass e lamiera sui lati:** come per la struttura con pannelli di plexiglass ma in aggiunta viene integrata una lamiera metallica

Protezione macchina	Pannelli semplici			Gabbia		Struttura con pannelli di plexiglass		Struttura con pannelli di plexiglass e aggiunta di gabbia sui lati		Struttura con pannelli di plexiglass e lamiera sui lati		
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	
Criterio di valutazione	g	p	g·p	p	g·p	p	g·p	p	g·p	p	g·p	
Impedenza all'accesso	5	2	10	3	15	4	20	4	20	4	20	
Livello di sicurezza contro schegge	5	3	15	1	5	4	20	4	20	4	20	
Livello di sicurezza contro elementi grandi	5	1	5	4	20	2	10	4	20	3	15	
Semplicità di manutenzione	3	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	
Complessità di smontaggio	4	2	8	3	12	3	12	4	16	4	16	
Costo	3	4	12	3	9	3	9	1	3	3	9	
Somma dei punti	25	-	62	-	73	-	83	-	91	-	92	
Fattore di valutazione	X	0.620			0.730		0.830		0.910		0.920	
 Variante ideale	Struttura con pannelli di plexiglass e lamiera sui lati											

Tabella 6.1: Valutazione varianti: Protezione macchina

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Struttura con pannelli di plexiglass e lamiera sui lati*" risulta la più adatta.

6.2.2 Movimentazione traversa posizionamento

Per quanto concerne la movimentazione traversa posizionamento sono state individuate le seguenti varianti:

- **Carrucola:** carrucola con cavo
- **Verricello motorizzato:** verricello con motore elettrico
- **Verricello a manovella:** verricello con manovella di azionamento
- **Sollevamento a mano**

Movimentazione traversa posizionamento	Carrucola			Verricello motorizzato		Verricello a manovella		Sollevamento a mano	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti
Critero di valutazione	g	p	g·p	p	g·p	p	g·p	p	g·p
Forza necessaria da parte dell'operatore	5	1	5	4	20	2	10	1	5
Semplicità costruttiva	2	4	8	3	6	3	6	4	8
Semplicità di azionamento	4	4	16	4	16	4	16	4	16
Ergonomicità di utilizzo	5	1	5	4	20	2	10	1	5
Necessità di energia elettrica	2	4	8	2	4	4	8	4	8
Costo	3	4	12	2	6	4	12	4	12
Peso elemento	2	4	8	1	2	1	2	4	8
Volume occupato	1	4	4	2	2	2	2	4	4
Tempi di messa a punto	3	3	9	4	12	2	6	4	12
Somma dei punti	27	-	75	-	88	-	72	-	78
Fattore di valutazione	X	0.694		0.815		0.667		0.722	
Variante ideale	Verricello motorizzato								

Tabella 6.2: Valutazione varianti: Movimentazione traversa posizionamento

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Verricello motorizzato*" risulta la più adatta ma considerata la scelta di non utilizzare elementi che richiedano elettricità per il loro funzionamento, la soluzione più adatta risulta quindi essere "*Sollevamento a mano*".

6.2.3 Sgancio dente traversa posizionamento

Per quanto concerne lo sgancio del dente della traversa di posizionamento sono state individuate le seguenti varianti:

- **Cavo collegato alla leva**
- **Pistone elettrico:** pistoncino elettrico che fa forza sulla leva
- **Motore elettrico:** motore elettrico che fa ruotare direttamente il dente
- **Sgancio a mano**

Sgancio dente traversa posizionamento	Cavo collegato alla leva			Pistone elettrico		Motore elettrico		Sgancio a mano	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti
Critero di valutazione	g	p	g·p	p	g·p	p	g·p	p	g·p
Forza necessaria da parte dell'operatore	5	2	10	4	20	4	20	2	10
Semplicità costruttiva	5	4	20	2	10	1	5	4	20
Semplicità di azionamento	5	4	20	4	20	4	20	4	20
Ergonomicità di utilizzo	5	2	10	4	20	4	20	2	10
Necessità di energia elettrica	2	4	8	2	4	1	2	4	8
Costo	3	4	12	2	6	1	3	4	12
Somma dei punti	25	-	80	-	80	-	70	-	80
Fattore di valutazione	X	0.800		0.800		0.700		0.800	
Variante ideale	Sgancio a mano								

Tabella 6.3: Valutazione varianti: Sgancio dente traversa posizionamento

Dall'analisi fatta si evince come diverse soluzioni presentino il medesimo punteggio. Nell'idea di evitare l'utilizzo di elementi che richiedano elettricità per il loro funzionamento, la soluzione più adatta risulta quindi essere "Sgancio a mano".

6.2.4 Sollevamento mazza

Per quanto concerne il sollevamento della mazza sono state individuate le seguenti varianti:

- **Carrucola:** carrucola con cavo
- **Verricello motorizzato:** verricello con motore elettrico
- **Verricello a manovella:** verricello con manovella di azionamento
- **Sollevamento a mano**

Sollevamento mazza	Carrucola			Verricello motorizzato		Verricello a manovella		Sollevamento a mano	
	Peso g	Nota p	Punti g·p	Nota p	Punti g·p	Nota p	Punti g·p	Nota p	Punti g·p
Forza necessaria da parte dell'operatore	5	1	5	4	20	2	10	1	5
Semplicità costruttiva	2	4	8	3	6	3	6	4	8
Semplicità di azionamento	4	4	16	4	16	4	16	4	16
Ergonomicità di utilizzo	5	1	5	4	20	2	10	1	5
Necessità di energia elettrica	2	4	8	2	4	4	8	4	8
Costo	3	4	12	2	6	4	12	4	12
Peso elemento	2	4	8	1	2	1	2	4	8
Volume occupato	1	4	4	2	2	2	2	4	4
Tempi di messa a punto	3	3	9	4	12	2	6	4	12
Somma dei punti	27	-	75	-	88	-	72	-	78
Fattore di valutazione	X	0.694		0.815		0.667		0.722	
Variante ideale	Verricello motorizzato								

Tabella 6.4: Valutazione varianti: Sollevamento mazza

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Verricello motorizzato*" risulta la più adatta ma considerata la scelta di non utilizzare elementi che richiedano elettricità per il loro funzionamento, la soluzione più adatta risulta quindi essere "*Sollevamento a mano*".

6.2.5 Accesso posizionamento provino

Per questa funzione sono state pensate quattro possibili alternative di medesime caratteristiche:

- Sportello a scorrimento (orizzontale o verticale)
- Sportello incernierato (orizzontale o verticale)
- Porta incernierata
- Porta a scorrimento

Accesso posizionamento provino	Sportello a scorrimento			Sportello incernierato		Porta incernierata		Porta a scorrimento	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	g	p	g·p	p	g·p	p	g·p	p	g·p
Facilità di accesso	5	3	15	3	15	4	20	3	15
Semplicità di utilizzo	4	4	16	4	16	4	16	4	16
Ergonomicità di utilizzo	4	4	16	4	16	4	16	4	16
Costo	1	3	3	4	4	2	2	1	1
Somma dei punti	14	-	50	-	51	-	54	-	48
Fattore di valutazione	X	0.893		0.911		0.964		0.857	
Variante ideale	Porta incernierata								

Tabella 6.5: Valutazione varianti: Accesso posizionamento provino

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Porta incernierata*" risulta essere la più adatta.

6.2.6 Estrazione provino testato

Per questa funzione sono state pensate quattro possibili alternative con medesime caratteristiche:

- **Sportello a scorrimento (orizzontale o verticale)**
- **Sportello incernierato (orizzontale o verticale)**
- **Cassetto**
- **Struttura sollevata:** la struttura lascia uno spazio accessibile nella parte sottostante

Estrazione provino testato	Sportello a scorrimento			Sportello incernierato		Cassetto		Struttura sollevata	
	Peso g	Nota p	Punti g·p	Nota p	Punti g·p	Nota p	Punti g·p	Nota p	Punti g·p
Semplicità di utilizzo	3	4	12	4	12	4	12	4	12
Ergonomicità di utilizzo	4	3	12	3	12	4	16	2	8
Costo	3	1	3	2	6	1	3	4	12
Somma dei punti	10	-	27	-	30	-	31	-	32
Fattore di valutazione	X		0.675		0.750		0.775		0.800
Variante ideale					Struttura sollevata				

Tabella 6.6: Valutazione varianti: Estrazione provino testato

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Struttura sollevata*" risulta essere la più adatta, questa soluzione risulta particolarmente interessante anche perchè non necessita l'implementazione o la modifica di componenti o soluzioni già presenti.

6.2.7 Blocco di sicurezza mazza

Nell'idea di evitare di modificare la struttura esistente della macchina sono state individuate due varianti in grado di assolvere la funzione di bloccare direttamente l'azionamento della mazza.

Per bloccare direttamente la mazza sono state individuate le seguenti varianti:

- **Spina di bloccaggio**
- **Chiavistello**

Blocco di sicurezza mazza	Spina di bloccaggio			Chiavistello	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	g	p	g·p	p	g·p
Semplicità costruttiva	3	4	12	3	9
Semplicità di azionamento	3	4	12	4	12
Ergonomicità di utilizzo	4	4	16	4	16
Somma dei punti	10	-	40	-	37
Fattore di valutazione	X	1.000		0.925	
Variante ideale	Spina di bloccaggio				

Tabella 6.7: Valutazione varianti: Blocco di sicurezza mazza

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Spina di bloccaggio*" risulta essere la più adatta, si è optato per l'utilizzo di una spina rapida autobloccante che risulta essere più veloce ed efficace di un chiavistello.

Nel caso in cui la mazza risulta essere caricata in una posizione elevata può risultare difficoltoso l'inserimento/disinserimento della "*Spina di bloccaggio*" dovuto alla posizione in altezza della stessa, pertanto viene introdotto l'utilizzo di una "*Pedana*" da utilizzare in questi casi per facilitarne l'operazione.

6.2.8 Impedire l'accesso al cavo di azionamento

Per quanto riguarda impedire l'accesso al cavo di azionamento sono state individuate le seguenti varianti:

- **Aletta sporgente**
- **Sportello a scorrimento verticale normalmente chiuso**
- **Soffietto piano**

Impedire accesso cavo azionamento	Aletta sporgente			Sportello a scorrimento verticale normalmente chiuso		Soffietto piano	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	g	p	g·p	p	g·p	p	g·p
Impedimento accesso	5	3	15	4	20	4	20
Automaticità del sistema	4	4	16	2	8	4	16
Costo	3	2	6	3	9	1	3
Somma dei punti	12	-	37	-	37	-	39
Fattore di valutazione	X	0.771		0.771		0.813	
Variante ideale	Soffietto piano						

Tabella 6.8: Valutazione varianti: Impedire accesso cavo azionamento

Dall'analisi fatta si evince come la soluzione "*Soffietto piano*" risulta essere la più adatta. Le altre due soluzioni consentono un parziale accesso durante l'apertura/chiusura della porta, mentre il "*Soffietto piano*" si adatta alla variazione di apertura/chiusura impedendo l'accesso in modo continuativo.

6.3 Ricapitolazione varianti

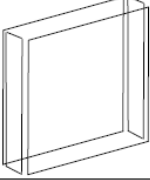

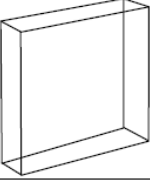
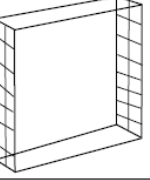
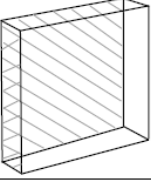
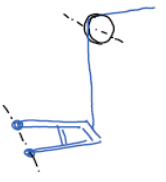
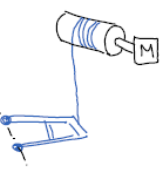
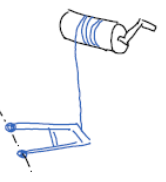
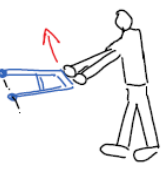
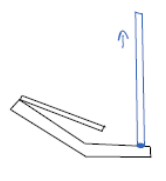
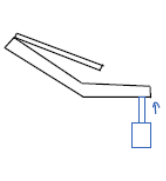
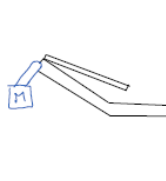
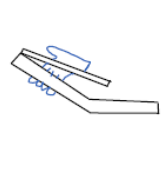
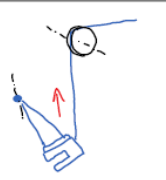
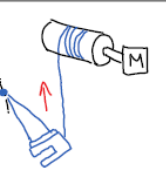
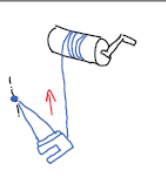
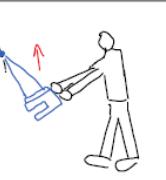
		Varianti				
		Pannelli semplici	Gabbia	Struttura con pannelli di plexiglass	Struttura con pannelli di plexiglass e aggiunta di gabbia sui lati	Struttura con pannelli di plexiglass e lamiera sui lati
Funzioni	Protezione macchina					
	Movimentazione traversa posizionamento	Carrucola 	Verricello motorizzato 	Verricello a manovella 	Sollevarmento a mano 	
	Sgancio dente traversa posizionamento	Cavo collegato alla leva 	Pistone elettrico 	Motore elettrico 	Sgancio a mano 	
	Sollevarmento mazza	Carrucola 	Verricello motorizzato 	Verricello a manovella 	Sollevarmento a mano 	

Tabella 6.9: Riepilogo varianti

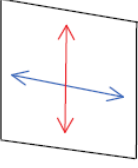
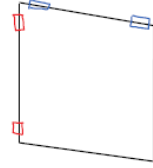
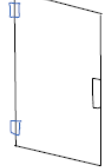
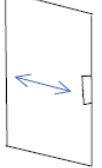
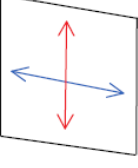
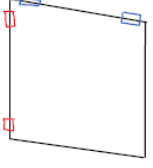
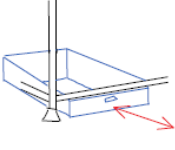
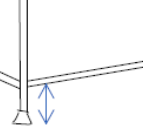
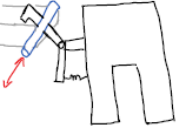
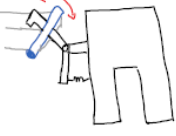
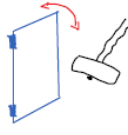
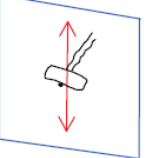
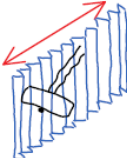
		Varianti				
Funzioni	Accesso posizionamento provino	Sportello a scorrimento	Sportello incernierato	Porta incernierata	Porta a scorrimento	
						
	Estrazione provino testato	Sportello a scorrimento	Sportello incernierato	Cassetto	Spazio aperto (struttura sollevata)	
						
	Blocco di sicurezza mazza	Spina di bloccaggio	Chiavistello			
						
	Impedire accesso cavo azionamento	Aletta sporgente	Sportello a scorrimento verticale normalmente chiuso	Soffietto piano		
						

Tabella 6.10: Riepilogo varianti

6.4 Disegno di concetto

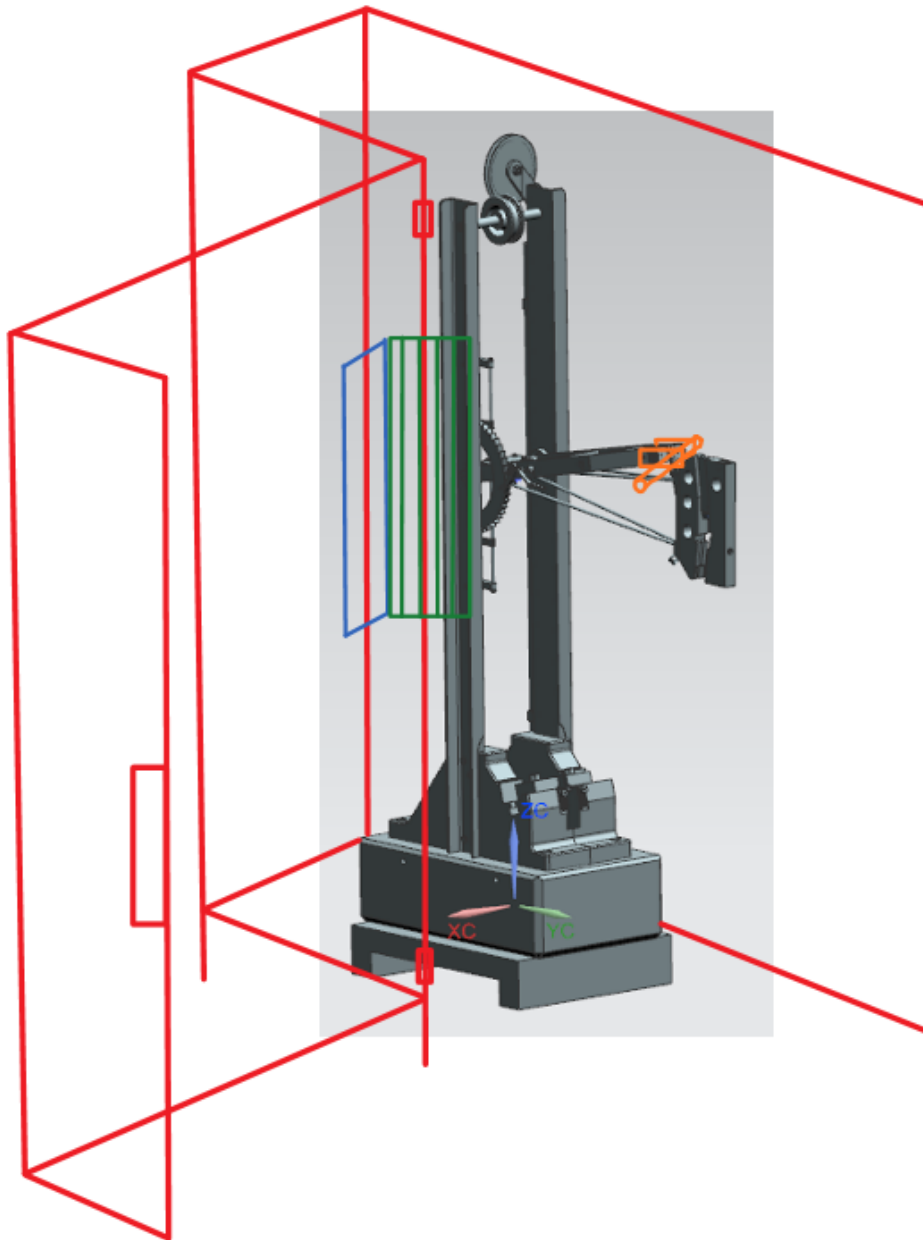


Figura 6.1: Disegno di concetto

Legenda colori:

- **Rosso:** Struttura e porta incernierata
- **Blu:** Finestra per azionamento macchina e reset sistema di misura
- **Verde:** Soffietto piano
- **Arancione:** Spina di bloccaggio

Capitolo 7

Progettazione

In questo capitolo viene affrontata in modo dettagliato la progettazione dei componenti e dei sistemi scelti nel paragrafo 6.2 *"Cassa Morfologica"*.

Per quanto concerne la *"Protezione macchina"* è stata progettata una struttura mediante il configuratore dell'azienda ITEM. La struttura consiste in un telaio realizzato con profilati in alluminio in cui sono alloggiati i pannelli protettivi in policarbonato trasparente nella parte frontale e in polipropilene bianco nella parte posteriore.

Nella struttura sono state integrate anche altre delle funzioni discusse nel paragrafo 6.2 *"Cassa Morfologica"*, in particolare l'*"Accesso posizionamento provino"* viene garantito dalla *"Porta incernierata"* ad *"L"* e l'*"Estrazione provino testato"* avviene tramite uno spazio aperto posto nella parte sottostante del telaio. Nel pannello frontale della porta vi è un'apertura per poter accedere al cavo di azionamento e al sistema di misura dell'energia.

La *"Porta incernierata"* ad *"L"* consente anche di poter avere un accesso agevole per tutte le operazioni di movimentazione e sollevamento sia della *"Traversa di posizionamento"* che della *"Mazza"*.

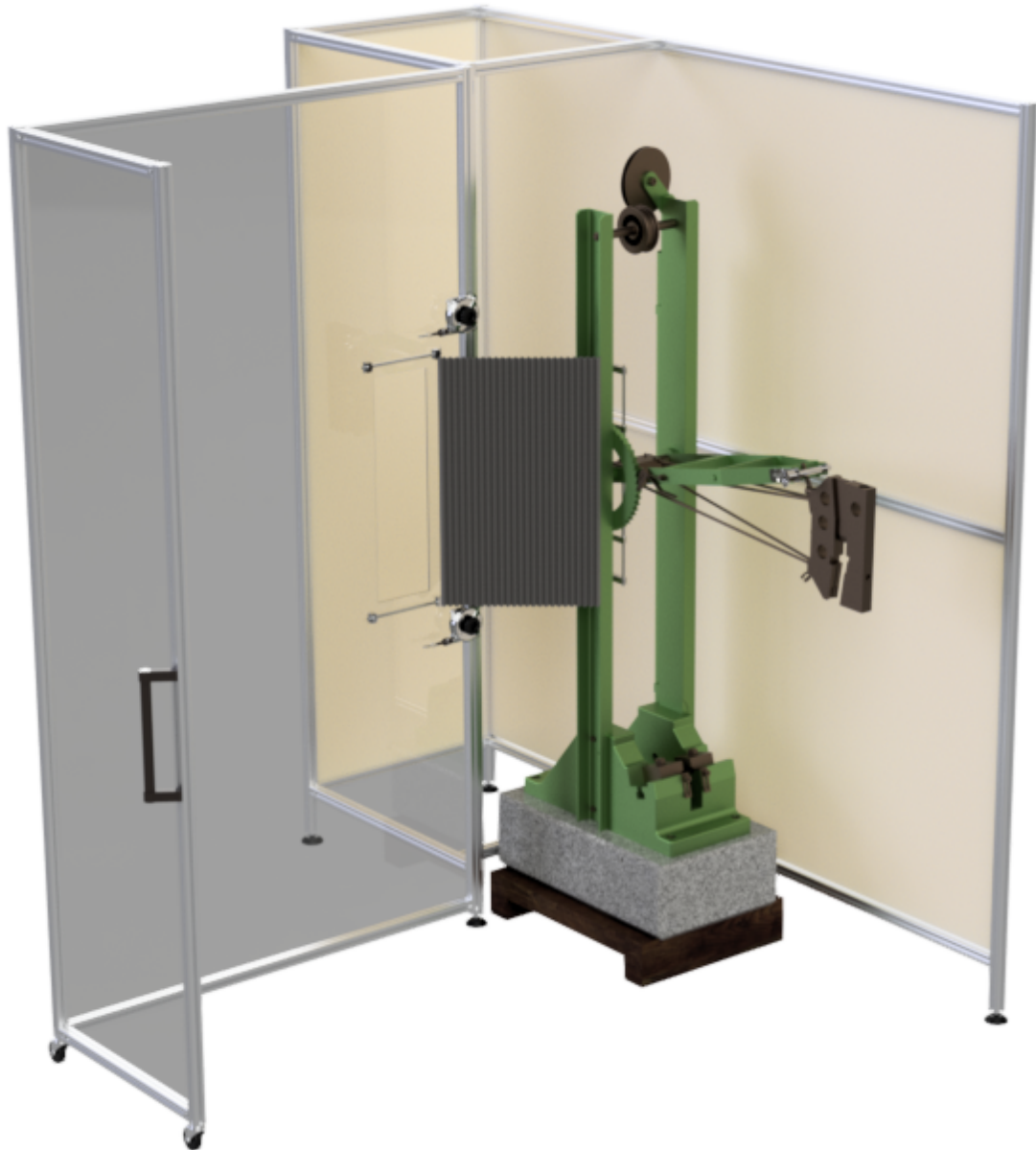


Figura 7.1: Struttura con pannelli

Per quanto concerne *"Impedire l'accesso al cavo di azionamento"* è stato introdotto un *"Soffietto piano"* che da un lato è fissato al montante del pendolo e dall'altro lato è in grado di scorrere lungo delle guide poste sul pannello della porta. Man mano che la porta viene aperta, il soffietto scorre sulle guide e si distende impedendo l'accesso all'azionamento dall'apertura sul pannello della porta e dall'interno della struttura; due tiranti a molla richiamano il soffietto durante la chiusura della porta. Questo è un sistema che si adatta alla condizione della porta e che quindi garantisce la sicurezza in ogni istante.

Per quanto concerne il "*Blocco di sicurezza mazza*" è stata introdotta una "*Spina di bloccaggio rapida*" che si innesta tra due piastre che sono state progettate in modo da non modificare la struttura esistente. Le piastre sfruttano come appoggi le viti e dei fori già presenti, nei fori vi passa una spina che attraversa interamente la struttura.

La "*Spina di bloccaggio rapida*" impedisce il movimento in modo diretto del bilanciere a ruotare anche se viene tirato il cavo di azionamento, evitando così lo sgancio della mazza.

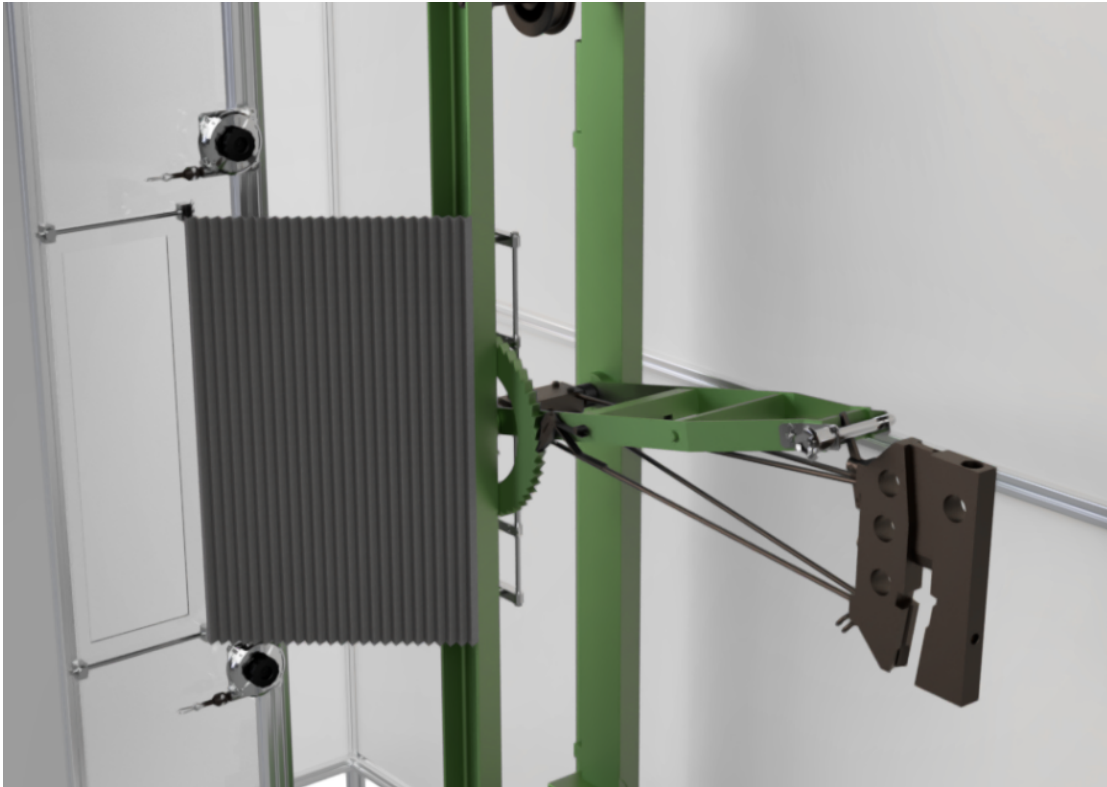


Figura 7.2: Soffietto piano e Spina di bloccaggio rapida

Capitolo 8

Strumentazione

Per poter scegliere il tipo di estensimetro più adatto è necessario avere una stima delle deformazioni che subisce il punzone della mazza e pertanto è necessario avere un ordine di grandezza delle forze interscambiate tra punzone e provino.

8.1 Stima della forza esercitata

Il primo passo è dunque stabilire l'entità delle forze in gioco. Essendo l'urto un fenomeno particolarmente complesso da analizzare, si è deciso di rimanere nel campo elastico: questo risulta comunque accettabile, in quanto le forze massime si verificano all'inizio dell'impatto e in quel momento ci si trova proprio nel campo elastico. Le forze che si avranno durante la deformazione del provino non saranno superiori, dato che ci si trova in campo plastico e l'energia viene usata per effettuare la deformazione.

Il concetto alla base di questa ipotesi è poter immaginare il problema come un sistema massa/molla in cui il provino è la molla e la mazza è la massa.

Per fare ciò bisogna trovare il modo di analizzare il comportamento del provino al fine di semplificarlo al comportamento di una molla, e pertanto si può usare la formula della freccia di una trave appoggiata con una forza posta al centro.

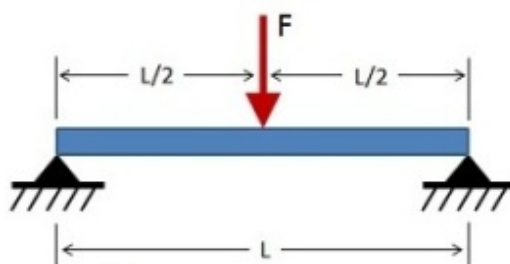


Figura 8.1: Trave appoggiata con una forza posta al centro

Per esprimere la deformata di una trave appoggiata si passa dall'equazione differenziale:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2 \delta}{dx^2} = M(x) \quad (8.1)$$

Dove:

- E : è il modulo elastico del materiale della trave
- I : è il momento d'inerzia della sezione della trave
- $M(x)$: è il momento flettente in funzione della posizione lungo la trave

In questo caso l'equazione 8.1 si può riscrivere come:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2 \delta}{dx^2} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot x \quad (8.2)$$

Integrando l'equazione 8.2 si ottiene:

$$E \cdot I \cdot \delta(x) = \frac{1}{12} \cdot F \cdot x^3 + c_1 \cdot x + c_2 \quad (8.3)$$

Calcolando per $x = \frac{L}{2}$ e applicando le condizioni iniziali:

$$\begin{cases} x = 0 \rightarrow \delta = 0 & \text{spostamento in } x = 0 \text{ nullo} \\ x = \frac{L}{2} \rightarrow \frac{d\delta}{dx} = 0 & \text{rotazione al centro nulla} \end{cases} \quad (8.4)$$

La formula finale della freccia risulta essere:

$$\delta_{\frac{L}{2}} = \delta_{max} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (8.5)$$

A questo punto si può risolvere esplicitando la forza:

$$F = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot \delta_{max} \quad (8.6)$$

Questa equazione può essere paragonata alla forza esercitata da una molla di costante k in seguito ad uno spostamento δ . In particolare la costante k vale:

$$k = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (8.7)$$

Si può ora passare al sistema massa/molla. Si può approssimare il sistema in questo modo in quanto la massa della mazza è notevolmente superiore a quella dei tondini di collegamento e la distanza della mazza rispetto al centro di rotazione è significativa. Ne consegue che il momento d'inerzia della mazza rispetto al punto di rotazione è molto maggiore del momento d'inerzia proprio della mazza stessa rispetto ai suoi assi principali, pertanto si può

ricorrere all'approssimazione del pendolo reale in un pendolo fisico con la massa concentrata.

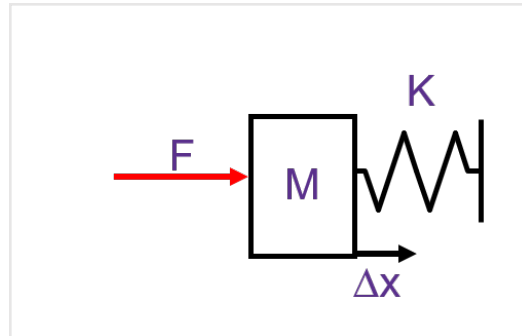


Figura 8.2: Sistema massa/molla

L'equazione differenziale che descrive tale sistema è:

$$M \cdot \Delta \ddot{x}(t) + k \cdot \Delta x(t) = 0 \quad (8.8)$$

Tramite semplici passaggi si possono calcolare le soluzioni dell'equazione differenziale omogenea:

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{k}{M}} i \quad (8.9)$$

Dato che la l'urto è un impulso la soluzione più appropriata è del tipo:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t) + B \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (8.10)$$

Sostituendo le soluzioni trovate:

$$x(t) = A \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) + B \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) \quad (8.11)$$

Ora non resta altro che risolvere con le condizioni iniziali:

$$\begin{cases} x(0) = 0 & \text{spostamento iniziale nullo} \\ \dot{x}(0) = v & \text{velocità iniziale uguale alla velocità al punto d'impatto della mazza} \end{cases} \quad (8.12)$$

$$\begin{cases} x(t) = A \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) + B \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) & , x(0) = 0 \rightarrow B = 0 \\ \dot{x}(t) = A \cdot \sqrt{\frac{k}{M}} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) - B \cdot \sqrt{\frac{k}{M}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) & , \dot{x}(0) = v \rightarrow A = \frac{v}{\sqrt{\frac{k}{M}}} \end{cases} \quad (8.13)$$

$$\begin{cases} x(t) = \frac{v}{\sqrt{\frac{k}{M}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) \\ \dot{x}(t) = \frac{v}{\sqrt{\frac{k}{M}}} \cdot \sqrt{\frac{k}{M}} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) = v \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}} \cdot t\right) \end{cases} \quad (8.14)$$

Lo spostamento massimo si ha per:

$$x_{max} = \frac{v}{\sqrt{\frac{k}{M}}} \quad (8.15)$$

A questo punto si può sostituire la 8.15 nella 8.6 mettendo $\delta_{max} = x_{max}$ e unendo la 8.7 si ottiene:

$$F_{max} = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot \frac{v}{\sqrt{\frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3 \cdot M}}} \quad (8.16)$$

Si ottiene così il valore della forza massima in funzione delle dimensioni e del materiale del provino e della velocità d'impatto e della massa della mazza.

8.2 Calcolo delle deformazioni

Per calcolare le deformazioni del punzone viene eseguita un'analisi FEM, viene applicato un carico unitario (1 N) in quanto operando in campo lineare, anche i risultati possono essere scalati in modo lineare.

Nell'immagine 8.3 viene rappresentato il modello utilizzato per la simulazione. Sulla faccia laterale è stata fatta una partizione per poter analizzare i dati in corrispondenza del centro e delle estremità della griglia dell'estensimetro. In particolare è stato ipotizzato un estensimetro con una lunghezza di griglia di 6 mm e il centro della stessa si trova ad una distanza di 15 mm dal punto di impatto con il provino.

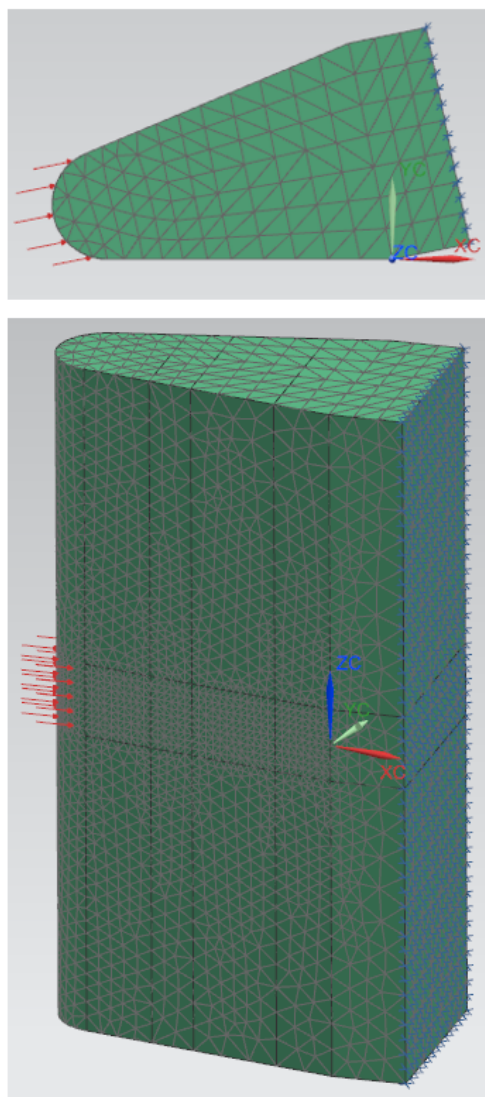


Figura 8.3: Modello FEM/SIM

La forza viene applicata sulla porzione che impatta sul provino e la faccia posteriore viene vincolata in modo fisso. Viene realizzata una simulazione statica, in quanto si conosce la forza massima ed è la stessa ad essere d'interesse.

Nell'immagine 8.4 si possono analizzare le deformazioni relative lungo l'asse X sulla faccia inclinata del punzone.

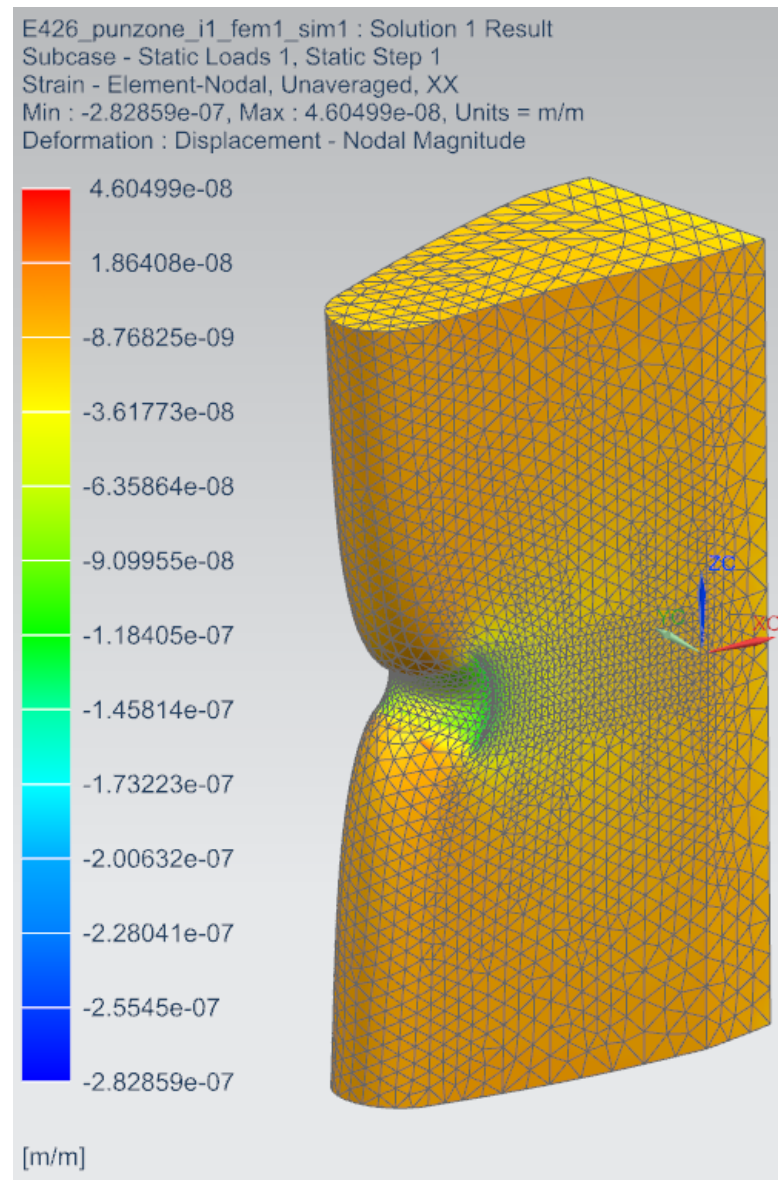


Figura 8.4: Deformazioni relative

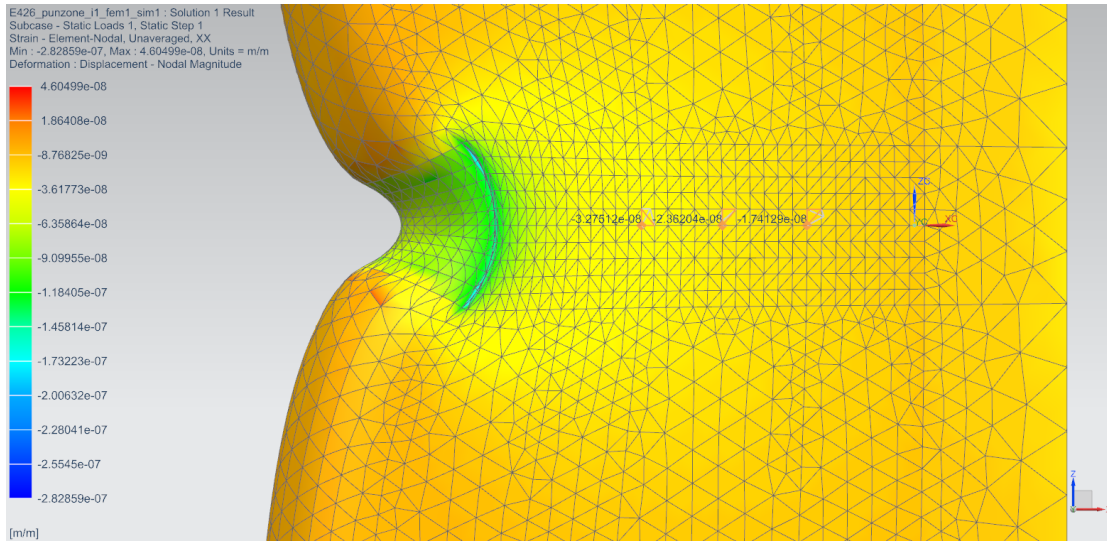


Figura 8.5: Deformazioni relative - dettaglio

Nel paragrafo 8.1 è stata ricavata la formula 8.16 e volendola calcolare per il caso di un provino in acciaio e caricando la mazza a 100J e 300J si può calcolare la forza che viene esercitata dalla mazza sul provino:

Energia caricata	100 ÷ 300	J
Massa della mazza	19	kg
Modulo elastico acciaio (<i>provino</i>)	210000	MPa
Sezione del provino	$b = 5 / h = 8$	mm
Distanza tra gli appoggi del provino	40	mm

Il momento d'inerzia risulta:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{5 \cdot 8^3}{12} = 213.33 \text{ mm}^4 \quad (8.17)$$

Mediante il principio di conservazione dell'energia si converte tutta l'energia potenziale in energia cinetica nel punto d'impatto e si calcola la velocità della mazza all'impatto:

$$\begin{cases} v_{100J} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{cin}}{M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100}{19}} = 3.24 \text{ m/s} \\ v_{300J} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{cin}}{M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 300}{19}} = 5.62 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8.18)$$

Pertanto usando la formula 8.16 la forza massima risulta:

$$\begin{cases} F_{max\ 100J} = \frac{48 \cdot (210000 \cdot 10^6) \cdot (213.33 \cdot 10^{-12})}{(40 \cdot 10^{-3})^3} \cdot \frac{3.24}{\sqrt{\frac{48 \cdot (210000 \cdot 10^6) \cdot (213.33 \cdot 10^{-12})}{(40 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 19}}} = 82 \cdot 10^3 \text{ N} \\ F_{max\ 300J} = \frac{48 \cdot (210000 \cdot 10^6) \cdot (213.33 \cdot 10^{-12})}{(40 \cdot 10^{-3})^3} \cdot \frac{5.62}{\sqrt{\frac{48 \cdot (210000 \cdot 10^6) \cdot (213.33 \cdot 10^{-12})}{(40 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 19}}} = 142 \cdot 10^3 \text{ N} \end{cases} \quad (8.19)$$

Nell'immagine 8.5 sono stati esplicitati i valori all'estremità della parte sensibile dell'estensimetro, per motivi geometrici il tipo di estensimetro prevede una lunghezza della griglia di 6 mm . I valori estremi sono di $-3.275 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$ e $-1.741 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$ mentre al centro della griglia di misura è $-2.362 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$. Pertanto per le forze calcolate all'equazione 8.19 le deformazioni risultano:

$$\begin{cases} \delta_{100J} = 82 \cdot 10^3 \cdot (-2.362 \cdot 10^{-8}) = -1936.84 \text{ } \mu\text{m/m} \\ \delta_{300J} = 142 \cdot 10^3 \cdot (-2.362 \cdot 10^{-8}) = -3354.04 \text{ } \mu\text{m/m} \end{cases} \quad (8.20)$$

8.3 Scelta estensimetri

Il valore minimo per poter avere un riscontro da un estensimetro è di circa $600 \text{ } \mu\text{m/m}$ e dai valori ricavati all'equazione 8.20 si può notare che si è ben oltre tale valore. Pertanto è possibile utilizzare degli estensimetri lineari a griglia, in questo caso si consiglia un estensimetro con una griglia di 6 mm con una resistenza elettrica minima pari a $350 \text{ } \Omega$ per poter applicare una tensione maggiore e quindi guadagnare in una sensibilità maggiore nell'acquisizione.

8.4 Considerazioni

Di seguito viene proposta l'analisi in frequenza del punzone, questa analisi risulta importante qualora si dovessero presentare delle vibrazioni indotte.

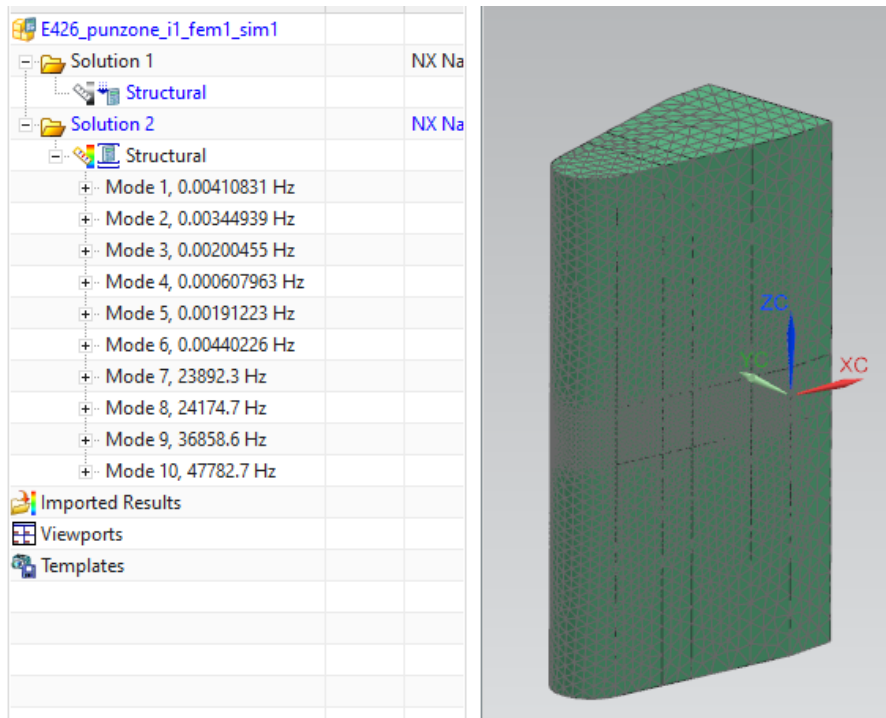


Figura 8.6: Analisi risposta in frequenza

Nell'immagine 8.6 si possono notare i primi 6 modi di vibrare rigidi, il settimo modo rappresenta la prima frequenza propria che è pari a 23892.3 Hz .

Il sistema di acquisizione dati disponibile in laboratorio è in grado di campionare con una banda di 250 kHz pertanto se ci dovessero essere delle vibrazioni indotte sarebbero ben visibili.

8.5 Estensimetri

Nel paragrafo 8.3 "*Scelta estensimetri*" sono stati individuati gli estensimetri consigliati. Avendo però già a disposizione degli estensimetri del tipo *1-LY11-3/350* equivalenti, si è proceduto all'installazione degli stessi.

8.5.1 Installazione estensimetri

Dopo un'attenta pulitura del punzone mediante lavaggio con sgrassatore, ultrasuoni e carta vetrata sono stati incollati gli estensimetri con l'ausilio di un nastro adesivo e usando una colla rapida. Il centro della griglia si trova ad una distanza di 10 mm dal punto di impatto con il provino. Nel paragrafo 8.2 la griglia era stata considerata ad una distanza di 15 mm visto che era stata stimata una griglia di lunghezza 6 mm , in questo caso avendo una griglia di lunghezza 3 mm si è potuto ridurre la distanza potendo così rilevare deformazioni maggiori essendo più vicini al carico, inoltre, è stato possibile posizionare i contatti in prossimità degli estensimetri.



Figura 8.7: Estensimetri

Nell'immagine 8.8 viene proposto il dettaglio delle deformazioni dopo aver effettuato la partizione con le dimensioni degli estensimetri che sono stati installati.

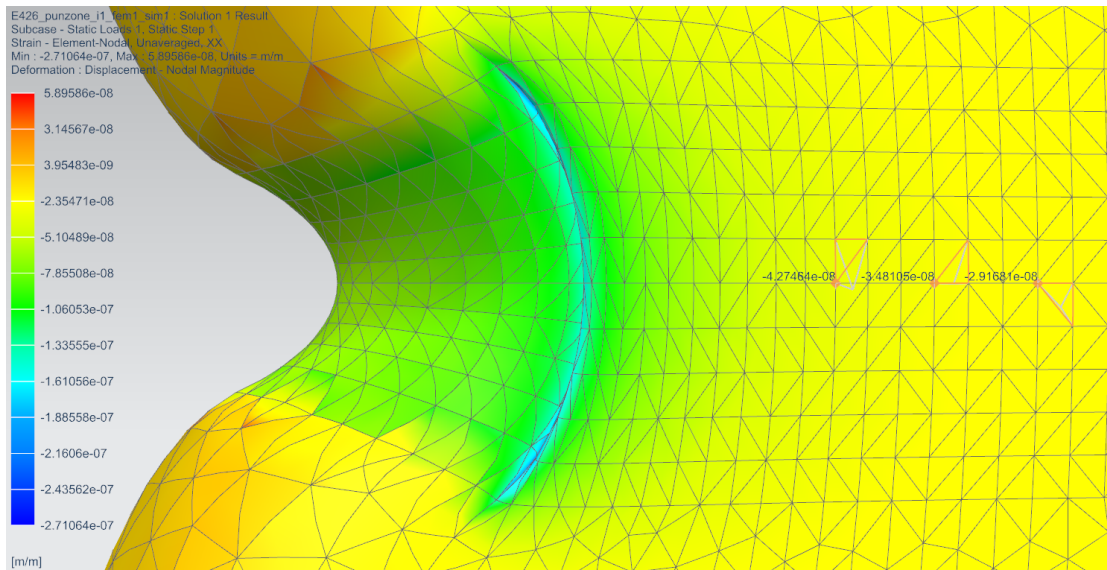


Figura 8.8: Deformazioni relative - controllo

I valori estremi sono di $-4.2746 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$ e $-2.9168 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$ mentre al centro della griglia di misura è $-3.481 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$. Pertanto per le forze calcolate all'equazione 8.19 le deformazioni risultano:

$$\begin{cases} \delta_{100J} = 82 \cdot 10^3 \cdot (-3.481 \cdot 10^{-8}) = -2854.42 \mu\text{m/m} \\ \delta_{300J} = 142 \cdot 10^3 \cdot (-3.481 \cdot 10^{-8}) = -4943.02 \mu\text{m/m} \end{cases} \quad (8.21)$$

Come risulta dalle equazioni 8.21 si hanno valori più alti rispetto a quelli delle equazioni 8.20, pertanto, gli estensimetri installati non presentano problemi per la lettura delle deformazioni.

8.5.2 Cablaggio estensimetri

Per il cablaggio viene effettuato un collegamento in "Ponte di Wheatstone" come indicato nell'immagine 8.9.

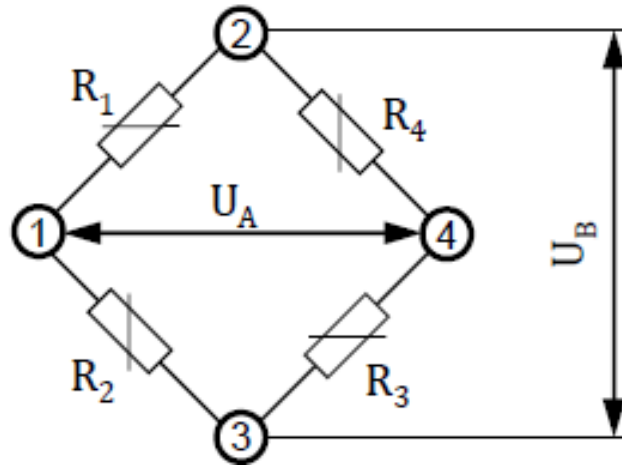


Figura 8.9: Ponte di Wheatstone

L'equazione "elettrica" del ponte si presenta come:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (8.22)$$

Mentre la caratteristica dell'estensimetro è:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon \quad (8.23)$$

Pertanto viene definita l'equazione "meccanica" del ponte come:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot (k_1 \cdot \epsilon_1 - k_2 \cdot \epsilon_2 + k_3 \cdot \epsilon_3 - k_4 \cdot \epsilon_4) \quad (8.24)$$

Nel caso di questo progetto viene utilizzata una configurazione di 2/4 di ponte, in particolare le resistenze R_1 e R_3 sono gli estensimetri mentre le resistenze R_2 e R_4 sono resistenze fisse e note pari a $348 \Omega \pm 1\%$. Il ponte viene alimentato con una tensione in ingresso U_B pari a $5 V$.

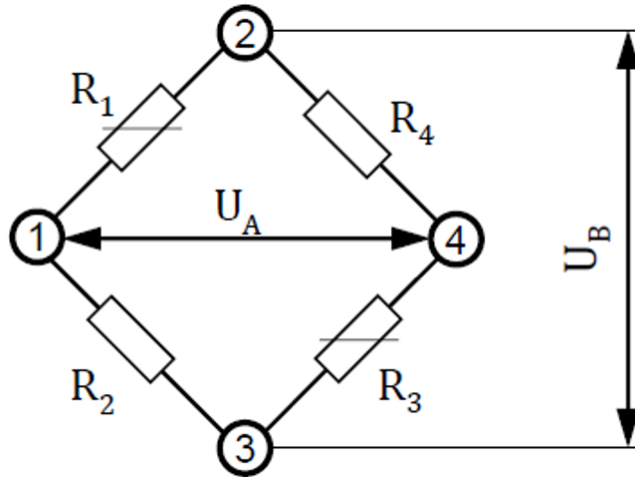


Figura 8.10: Ponte di Wheatstone - Configurazione 2/4 di ponte

Pertanto l'equazione 8.24 assume la seguente configurazione:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \quad (8.25)$$

Gli estensimetri si deformano nel medesimo modo pertanto l'equazione 8.25 può essere semplificata come:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \left(2 \cdot \frac{\Delta R}{R} \right) \quad (8.26)$$

Ora unendo le equazioni 8.23 e 8.26 si ottiene la relazione tra la tensione e la deformazione:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot (2 \cdot k \cdot \epsilon) \quad (8.27)$$

Il fattore k degli estensimetri installati è pari a $k \approx 2$ pertanto l'equazione 8.27 risulta:

$$\frac{U_A}{U_B} = \epsilon \quad (8.28)$$

Nell'immagine 8.11 viene mostrato il cablaggio eseguito, i cavi avvolti nero-verde sono collegati ad un estensimetro, mentre i cavi avvolti blu-rosso sono collegati all'altro. Le resistenze sono saldate nella parte posteriore. Il collegamento a sei fili che parte è collegato ad un connettore a 25 pin (immagine 8.12) per l'interfaccia all'amplificatore per l'acquisizione dei dati. Il collegamento a sei fili consente di eliminare l'influsso della resistenza dei cavi in quanto due cavi portano l'alimentazione e due misurano la tensione effettiva U_B , i restanti due cavi misurano la tensione U_A .

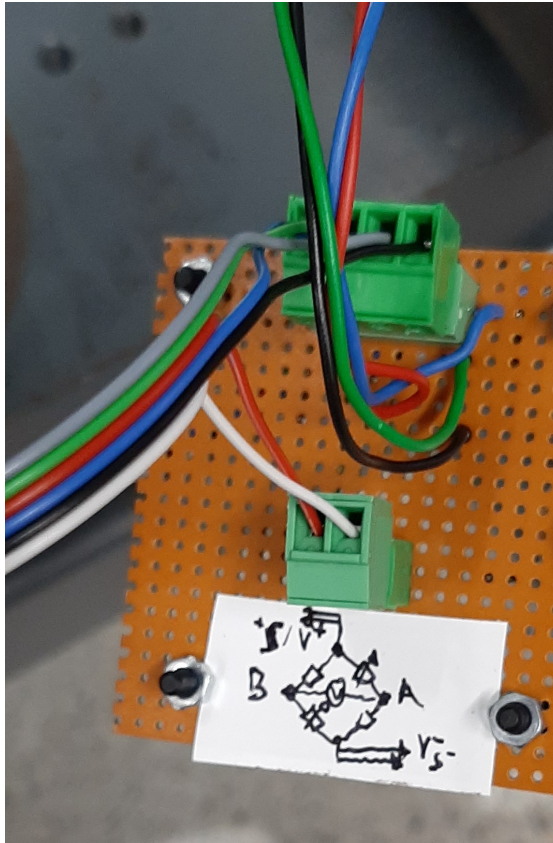


Figura 8.11: Cablaggio ponte

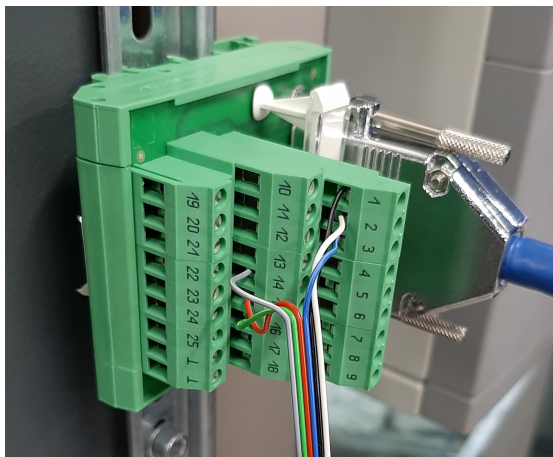


Figura 8.12: Cablaggio connettore a 25 pin

NOTA: Per lo schema della catena di misura fare riferimento al paragrafo 8.6.

8.6 Catena di misura

Di seguito viene riportato lo schema della catena di misura.

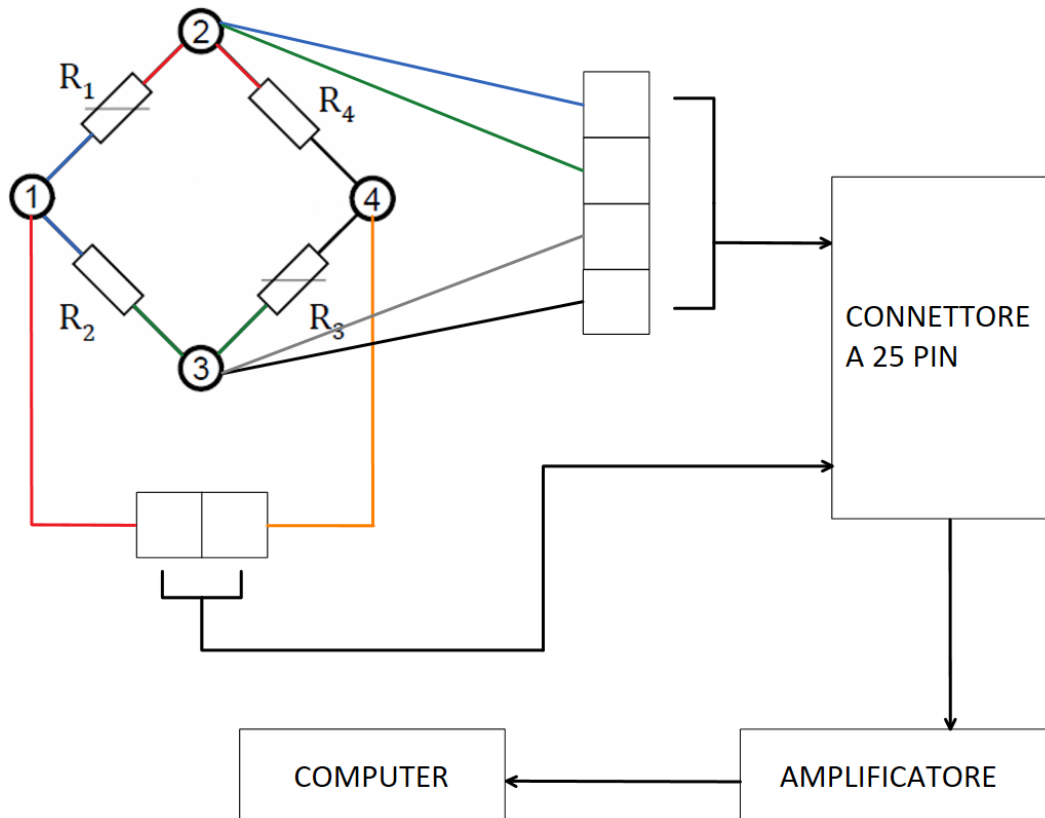


Figura 8.13: Schema catena di misura

NOTA: La linea arancione rappresenta il cavo bianco nel cablaggio reale.

I dati della tensione elettrica vengono acquisiti mediante un programma realizzato con il software *Catman - HBM*. L'acquisizione viene fatta partire manualmente e inseguito i valori vengono esportati in formato ASCII.

Mediante il programma *Office Excel* vengono importati sia i dati della tensione elettrica che quelli ottenuti dai test effettuati simultaneamente sulla macchina universale Zwick.

Infine tutti i dati vengono elaborati da un programma Matlab.

Durante l'utilizzo sul pendolo si potrà avere il valore di forza direttamente mediante il software *Catman - HBM*, per i test statici e le analisi dei dati che si vedranno nel dettaglio nei paragrafi successivi è stato necessario l'utilizzo di altri software per poter effettuare l'analisi dei dati e la calibrazione del sistema di misura.

8.7 Prove statiche del punzone

Una volta completato il cablaggio sono stati effettuati dei test mediante la macchina universale Zwick.

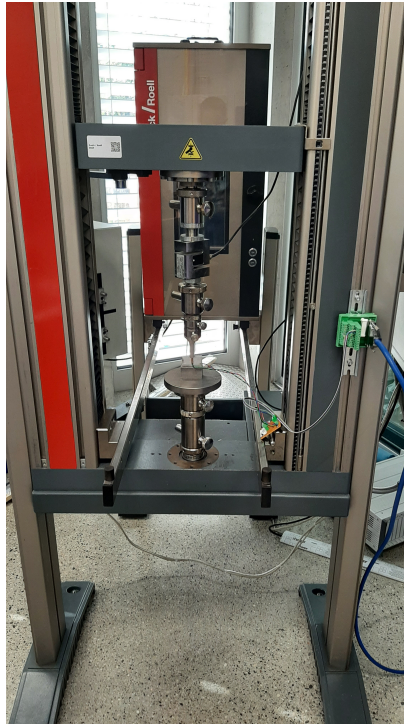


Figura 8.14: Prova statica del punzone

Per rappresentare al meglio la sollecitazione del punzone durante l'impatto con il provino è stata predisposta una configurazione della macchina con un punzone da una parte e un piatto dall'altra ed è stata utilizzata una cella di carico da 50 kN . A causa della presenza della spina nel punzone è stato necessario utilizzare un blocco di supporto con un foro per la spina.

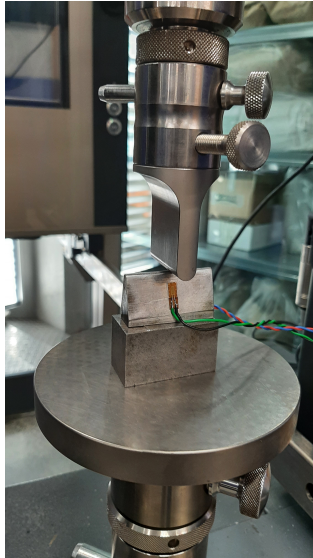


Figura 8.15: Prova statica del punzone - Dettaglio

I parametri di carico utilizzati sono:

Velocità	0.1	mm/min
Step di carico	5%	(del carico massimo)
Carico massimo	1000	N
Tempo di mantenimento del carico	8	s

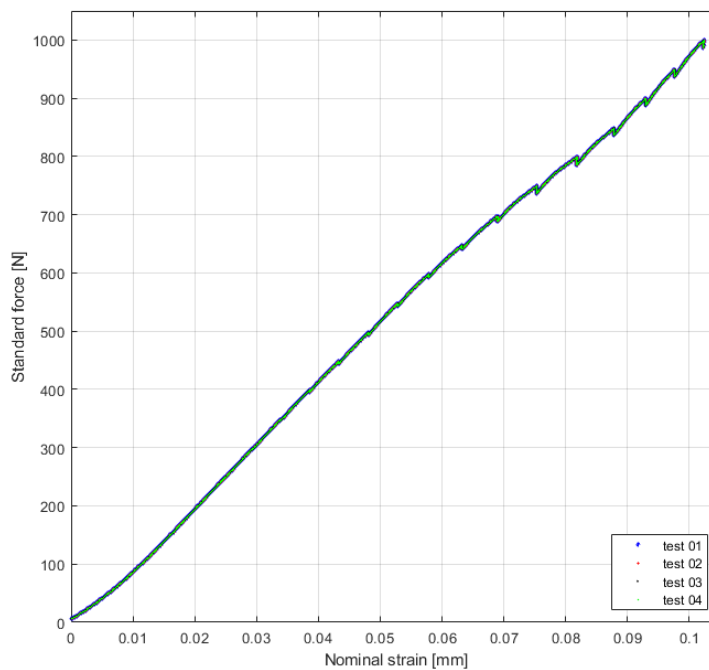


Figura 8.16: Normal strain - Standard force

Nell'immagine 8.16 si possono notare dei "salti", essi capitano al momento del mantenimento del carico e sono dovuti ad un leggero rilassamento del materiale.

Nell'immagine 8.17 si possono osservare i valori di tensione campionati durante i test. Anche in questo caso si possono osservare dei "gradini" che corrispondono ai momenti di mantenimento del carico, in questo caso si rivelano utili per poter avere più misure a parità di carico applicato. Bisogna precisare che il momento di inizio acquisizione delle diverse serie di dati non è lo stesso, pertanto, il disallineamento orizzontale non è da considerarsi.

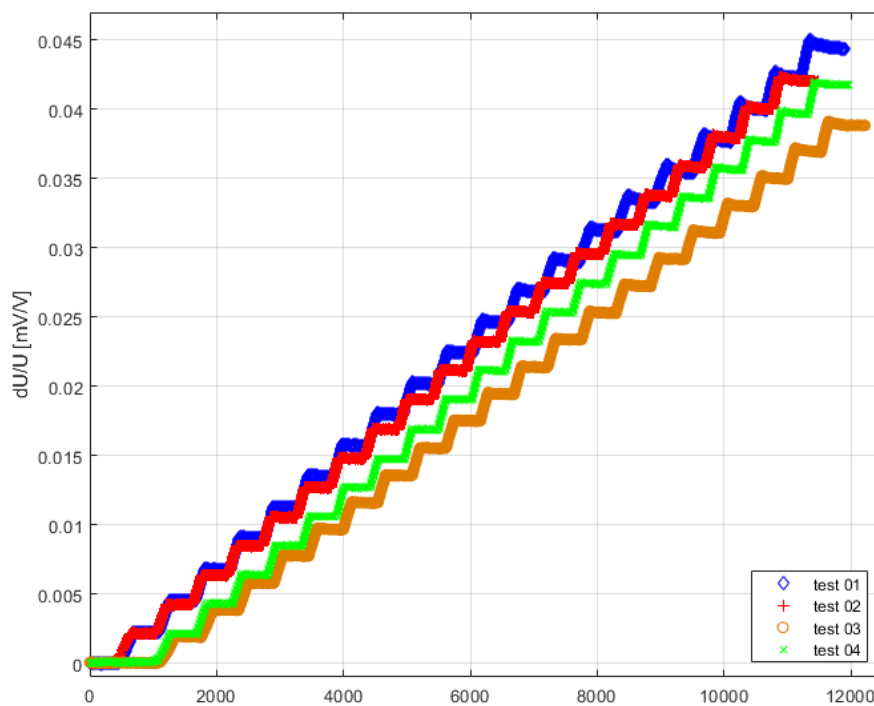


Figura 8.17: Campionamento segnale elettrico

8.8 Analisi dei dati

Le serie di dati acquisiti nei test 1 e 2 presentano già al momento di carico nullo un valore di tensione, questo è dovuto al non perfetto bilanciamento del "Ponte di Wheatstone" a causa della tolleranza delle resistenze.

Per "azzerare" tali valori è stata effettuata una media dei valori nello "scalino" corrispondente al valore nullo e poi i valori sono stati tutti scalati di quella quantità.

Per quanto riguarda le serie di dati acquisiti nei test 3 e 4 è stato effettuato l'azzeramento mediante il software *Catman - HBM* che è stato utilizzato per l'acquisizione dei dati.

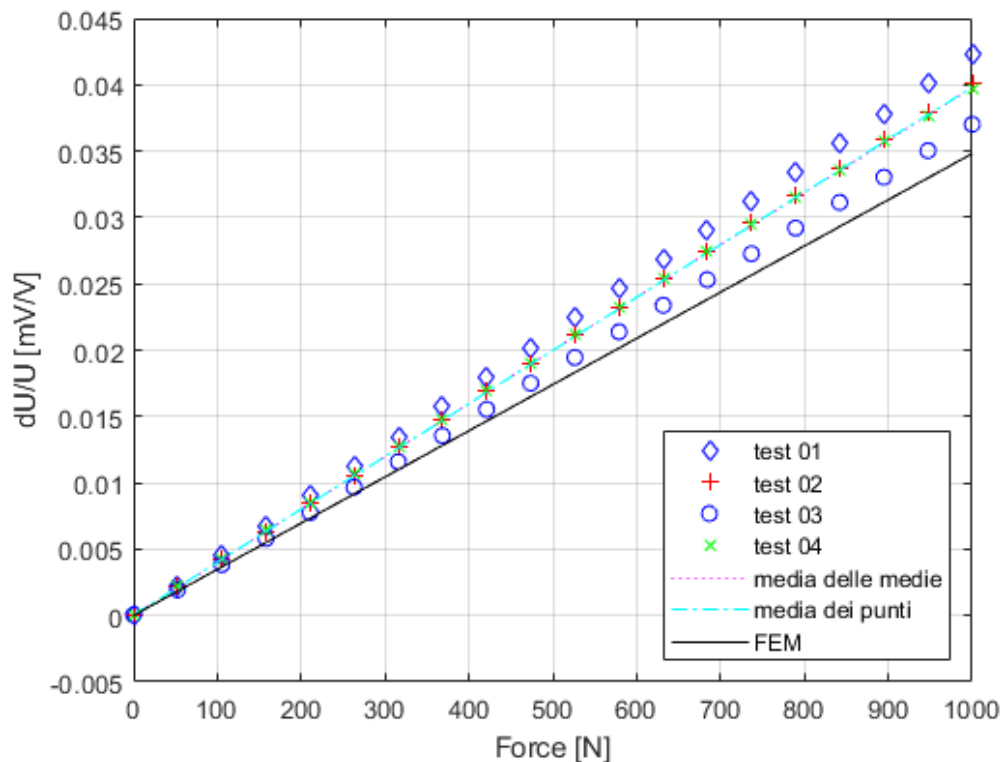


Figura 8.18: Forza - $\Delta U/U$

Mediante l'utilizzo di un programma Matlab, per ogni test sono stati calcolati i valori medi di ogni "scalino" e poi, tramite interpolazione lineare, è stata calcolata la pendenza della retta interpolatrice.

Successivamente è stata calcolata una media per ogni valore corrispondente in forza: ad esempio per un valore di forza pari a 50 N è stata calcolata la media dei valori medi dei quattro test (nell'immagine è la "media delle medie") e poi ne è stata calcolata la retta interpolatrice.

Per avere un approccio più generale è stata calcolata una media di ogni "scalino" usando come valori quelli di tutti e quattro i test (nell'immagine è la "media dei punti") e poi ne è stata

calcolata la retta interpolatrice e si è notata una leggera variazione rispetto alla "Media delle medie".

Per completezza è stata riportata una retta stimata con i valori del FEM al paragrafo 8.5.1; la pendenza della retta è pari al coefficiente $3.481 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$ ed è stato convertito in $3.481 \cdot 10^{-5} \text{ mm/m}$ data l'eguaglianza vista all'equazione 8.28 che associa mV/V a mm/m .

Come si può notare dall'immagine 8.18 le pendenze riscontrate dai test sono leggermente più alte rispetto a quella teorica ipotizzata con il FEM, questo è dovuto al non perfetto bilanciamento del "Ponte di Wheatstone", all'influenza della temperatura dell'ambiente e al non perfetto posizionamento degli estensimetri che cambia il punto di lettura del centro della griglia e quindi cambia il coefficiente di pendenza della retta. Un altro fattore da tenere in considerazione è la leggera differenza di applicazione del carico del caso reale della prova (effettuata con un punzone raggiato) rispetto all'applicazione perfettamente distribuita ipotizzata nella simulazione FEM.

L'errore percentuale della "Media dei punti" rispetto al FEM risulta quindi essere:

$$Err\% = \left| \frac{FEM - Media\ dei\ punti}{FEM} \right| \cdot 100 = \left| \frac{3.481E - 5 - 3.982E - 5}{3.481E - 5} \right| \cdot 100 = 14.39\% \quad (8.29)$$

Questa correzione verrà affrontata nella sezione successiva dove viene effettuata la calibrazione del sistema di misura.

8.9 Calibrazione del sistema di misura

8.9.1 Calibrazione estensimetri

Come accennato nel paragrafo precedente, sono state calcolate le pendenze delle rette interpolatrici dei diversi test. La tabella 8.1 riporta i valori delle pendenze calcolate mediante un programma Matlab.

Test 01	4.226E-5
Test 02	4.008E-5
Test 03	3.702E-5
Test 04	3.976E-5
Media dei punti	3.982E-5
FEM	3.481E-5

Tabella 8.1: Pendenza rette interpolatrici

Si è preso come riferimento la retta della "Media dei punti" in quanto meglio approssima tutti i campioni di dati raccolti. Nelle immagini successive vengono rappresentati gli errori percentuali (immagine 8.19) e quadratici (immagine 8.20) dei diversi test rispetto ai valori calcolati con la "Media dei punti".

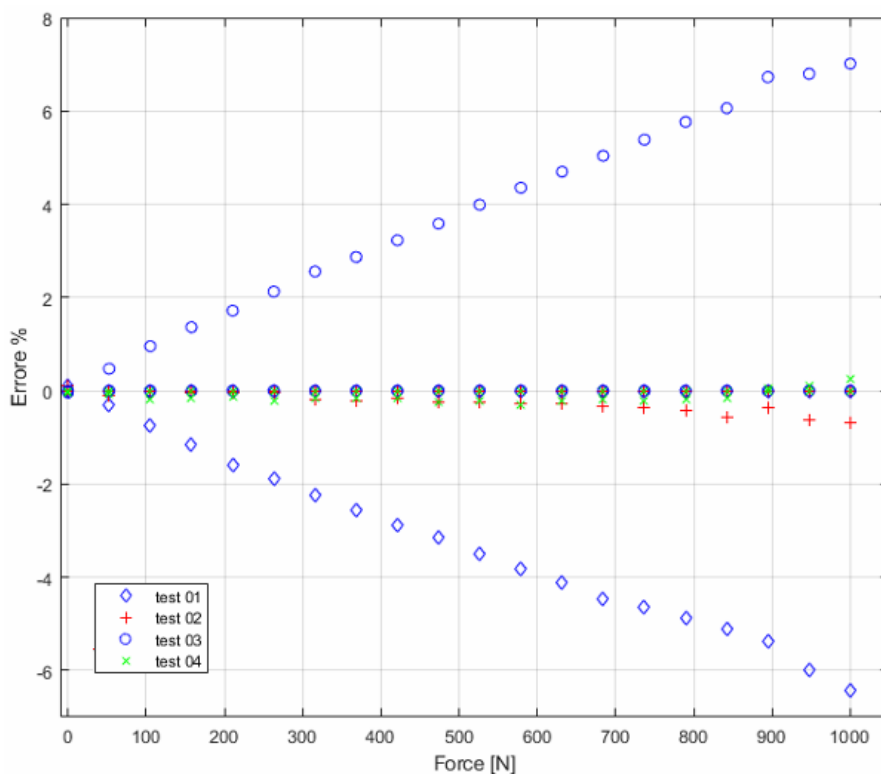


Figura 8.19: Errore percentuale

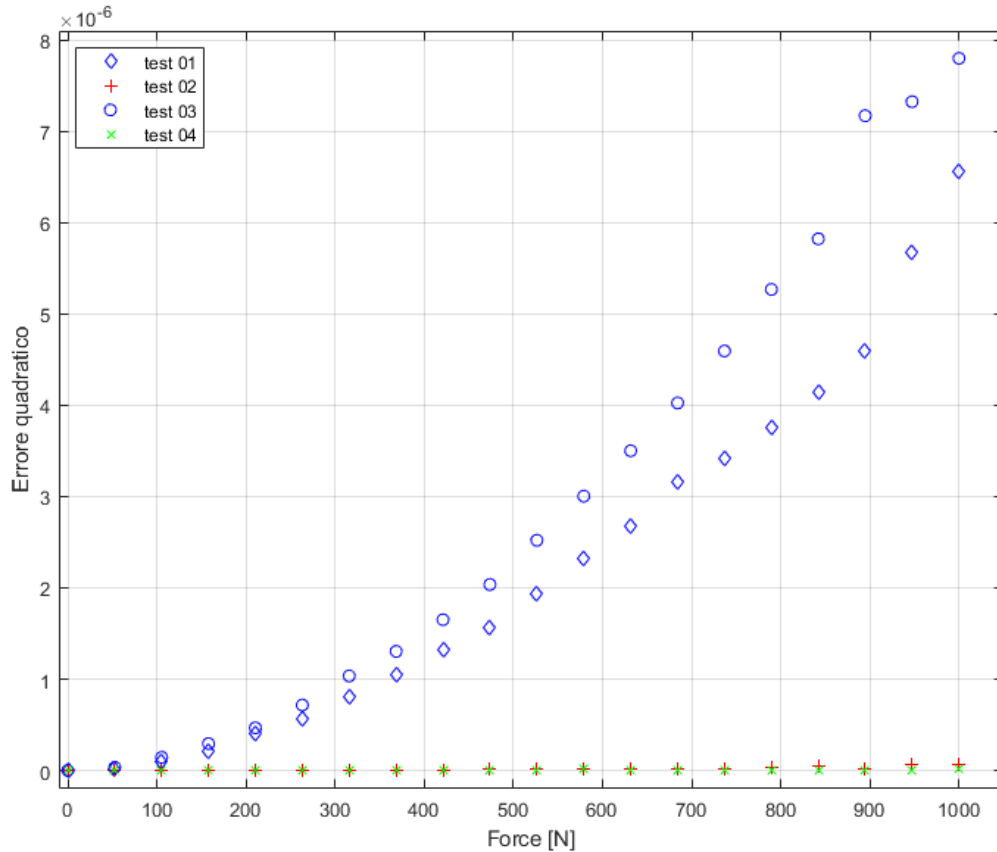


Figura 8.20: Errore quadratico

Come si può notare i test 2 e 4 seguono molto bene l'andamento della "Media dei punti", mentre i test 1 e 3 presentano andamenti divergenti, bisogna però notare che l'errore quadratico cresce ma il valore è comunque estremamente basso nell'ordine di 10^{-6} . Le leggere divergenze dei test 1 e 3 possono anche derivare dal fatto che durante gli stessi erano presenti leggere vibrazioni ambientali dovute a macchinari in funzione.

Nonostante il valore di pendenza della "Media dei punti" sia leggermente superiore a quello stimato dal FEM, si può assumere corretto date le possibili divergenze della realtà rispetto a quelle ideali stimate per l'analisi FEM.

Pertanto è possibile identificare la relazione:

$$\frac{\Delta U_A}{U_B} \left[\frac{mV}{V} \right] = 3.982 \cdot 10^{-5} \cdot Forza [N] \quad (8.30)$$

E pertanto è possibile esprimere la forza d'impatto come:

$$Forza [N] = \frac{1}{3.982 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{\Delta U_A}{U_B} \left[\frac{mV}{V} \right] \quad (8.31)$$

La calibrazione fatta è da considerarsi comunque preliminare, infatti, sarà necessario effettuare delle correzioni dopo aver eseguito dei test sul pendolo con un materiale dalle caratteristiche note. Per fare ciò viene consigliato come materiale da testare un acciaio S235JR+C del produttore SPAETER (in allegato la scheda del prodotto).

8.9.2 Calibrazione scala graduata misura dell'energia

Per quanto riguarda la calibrazione della scala graduata già presente sul pendolo che misura l'energia assorbita dal provino, si è proceduto posizionando la mazza ad una posizione arbitraria e mediante un metro si è misurata l'altezza del centro di massa della stessa dal pavimento.



Figura 8.21: Misura altezza del centro di massa della mazza

Dopo aver misurato anche l'altezza del punto d'impatto con il provino rispetto al pavimento, si è ricavata l'energia potenziale con la formula dell'energia potenziale 3.1 che viene riportata sotto:

$$E_0 = m \cdot g \cdot \Delta h_0 \quad (8.32)$$

Successivamente è stata modificata l'altezza della vite di fondo scala regolandola in modo da far combaciare il valore letto dalla scala graduata con quello calcolato.



Figura 8.22: Regolazione vite scala graduata

Considerando un errore di $1 \text{ mm}/\text{m}$ sulla misura dell'altezza dovuta alla misura effettuata con il metro, si può calcolare l'errore stimato sulla misura dell'energia impostando come $\Delta h_0 = 1 \text{ mm}$:

$$E = m \cdot g \cdot \Delta h_0 = 19 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.001 \text{ m} = 0.186 \text{ J} \quad (8.33)$$

Capitolo 9

Trasloco basamento

Un ulteriore passo importante del progetto è stato il trasloco del basamento dal laboratorio B0.04 piano terra al laboratorio B-1.08 al piano interrato.

L'ostacolo maggiore si è rivelato effettuare il dislivello di 1.2 m per passare dal piano -1 al livello del laboratorio di destinazione.

Innanzitutto sono stati portati gli elementi del basamento (vedi figura 9.1) al piano interrato -1 mediante l'ausilio di un transpallet.



Figura 9.1: Basamento

Il passo successivo è stato separare il blocco in ghisa (componente verde in figura 9.1) dal blocco di cemento in quanto i due componenti insieme superavano il carico massimo consentito dalle due macchine successivamente utilizzate: una capretta meccanica e un muletto.

Successivamente, mediante l'ausilio della capretta meccanica si è dapprima proceduto alla movimentazione del blocco in ghisa spostandolo su una struttura di supporto temporanea. Successivamente mediante il muletto si è posto in loco il componente.



Figura 9.2: Movimentazione blocco in ghisa

La stessa procedura è stata effettuata per il blocco di cemento. Una volta messo in posizione il blocco di cemento, sono stati rimontati i componenti del basamento e sono stati fissati ad esso i montanti.



Figura 9.3: Basamento con montanti

Capitolo 10

Costi

In questo capitolo viene presentata una breve lista con i costi principali dei componenti acquistati. Per maggiori dettagli fare riferimento ai preventivi in allegato.

Telaio	2985.81	CHF
Pedana	398.00	CHF
Componenti vari	481.55	CHF
TOTALE	3865.36	CHF

Tabella 10.1: Costi

Capitolo 11

Conclusioni

Dopo la revisione la macchina è stata montata e ne è stato realizzato il modello CAD. A seguito di una ricerca e analisi delle normative sulla sicurezza, sono stati individuati i punti critici e sono stati progettati dei sistemi in grado di sopperire ad essi. I sistemi ideati non necessitano l'ausilio di corrente elettrica per il loro funzionamento, ma una possibile implementazione di sensori e/o sistemi di sollevamento motorizzati potrà garantire una sicurezza e un'ergonomia maggiore.

Successivamente sono state analizzate le forze scambiate durante l'impatto della mazza con il provino, e dopo un'analisi delle deformazioni è stato possibile identificare il tipo di estensimetro più indicato per la strumentazione della mazza.

Infine sono stati applicati gli estensimetri ed è stata messa in funzione la catena di misura e dopo l'esecuzione di test statici del punzone è stata effettuata la calibrazione del sistema di misura.

Non è stato possibile effettuare il montaggio dei componenti dei sistemi di sicurezza a causa della mancata consegna dei componenti, dato il periodo estivo, inoltre, non è stato possibile effettuare la campagna sperimentale su un materiale dato in quanto il pendolo è risultato successivamente inagibile a causa di lavori nel locale.

Capitolo 12

Allegati

- Disegni costruttivi componenti da realizzare
- Preventivi ITEM:
 - Telaio e porta
 - Pedana
- Preventivo MISUMI:
 - Componenti vari
- Schema di assemblaggio:
 - Telaio
 - Porta
 - Pedana
- Altro:
 - La via ai trasduttori - HBM
 - Sistema di acquisizione dati del laboratorio - GEN2i
 - Scheda tecnica materiale S235JR+C SPAETER

Bibliografia

- [1] Parlamento Europeo. Direttiva macchine 2006/42/ce, 2006.
- [2] Parlamento Europeo. Direttiva macchine 2018, 2018.
- [3] Parlamento Italiano. D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 - testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106, Rev. novembre 2020.
- [4] Ing. Marco Maccarelli. *Direttiva macchine e norme tecniche consolidato Ed. 12.0 2018*. Certifico S.r.l., 2018.
- [5] INAIL Maialetti R. and Panaro P. Conoscere il rischio - "lifting and carrying". 2019.
- [6] A. Garg. T.R. Water, V. Putz-Anderson. *Application manual for the revised NIOSH lifting equation*. U.S. Department of health and human services, January 1994.
- [7] UNI. Uni iso 11228, 09 aprile 2009.

Appendices

Appendice A

Tabelle di riferimento capitolo 5 paragrafo 5.1

Le tabelle seguenti sono ricavate dal testo "*Application manual for the revised NIOSH lifting equation*" [6].

Popolazione lavorativa	Massa di riferimento [kg]
Maschi (18-45 anni)	25
Femmine (18-45 anni)	20
Maschi giovani (fino 18 anni) ed anziani (oltre 45)	20
Femmine giovani (fino 18 anni) ed anziane (oltre 45)	15

Tabella A.1: Masse di riferimento in kg in condizioni di sollevamento manuale ideale per genere e per classe deducibile dalle norme tecniche ISO 1128 e UNI EN 1005-2

h [cm]	h_m
≤25	1.00
28	0.89
30	0.83
32	0.78
34	0.74
36	0.69
38	0.66
40	0.63
42	0.60
44	0.57
46	0.57
48	0.52
50	0.50
52	0.48
54	0.46
56	0.45
58	0.43
60	0.42
63	0.40
>63	0.00

Tabella A.2: Moltiplicatore orizzontale h_m

v [cm]	v_m
0	0.78
10	0.81
20	0.84
30	0.87
40	0.90
50	0.93
60	0.96
70	0.99
80	0.99
90	0.96
100	0.93
110	0.90
120	0.87
130	0.84
140	0.81
150	0.78
160	0.75
170	0.72
175	0.70
>175	0.00

Tabella A.3: Moltiplicatore verticale v_m

d [cm]	d_m
≤ 25	1.00
40	0.93
55	0.90
70	0.88
85	0.87
100	0.87
115	0.86
130	0.86
145	0.85
160	0.85
175	0.85
> 175	0.00

Tabella A.4: Moltiplicatore distanza d_m

a [°]	a_m
0	1.00
15	0.95
30	0.90
45	0.86
60	0.81
75	0.76
90	0.71
105	0.66
120	0.62
135	0.57
> 135	0.00

Tabella A.5: Moltiplicatore asimmetrico a_m

Frequenza sollevamenti/min (f)	Durata lavoro					
	≤ 1 ora		> 1 ma ≤ 2 ore		> 2 ma ≤ 8 ore	
	v < 75 [cm]	v ≥ 75 [cm]	v < 75 [cm]	v ≥ 75 [cm]	v < 75 [cm]	v ≥ 75 [cm]
≤0.2	1.00	1.00	0.95	0.95	0.85	0.85
0.5	0.97	0.97	0.92	0.92	0.81	0.81
1	0.94	0.94	0.88	0.88	0.75	0.75
2	0.91	0.91	0.84	0.84	0.65	0.65
3	0.88	0.88	0.79	0.79	0.55	0.55
4	0.84	0.84	0.72	0.72	0.45	0.45
5	0.80	0.80	0.60	0.60	0.35	0.35
6	0.75	0.75	0.50	0.50	0.27	0.27
7	0.70	0.70	0.42	0.42	0.22	0.22
8	0.60	0.60	0.35	0.35	0.18	0.18
9	0.52	0.52	0.30	0.30	0.00	0.15
10	0.45	0.45	0.26	0.26	0.00	0.13
11	0.41	0.41	0.00	0.23	0.00	0.00
12	0.37	0.37	0.00	0.21	0.00	0.00
13	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
>15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella A.6: Moltiplicatore frequenza f_m

Tipo di accoppiamento	Moltiplicatore accoppiamento	
	v < 75 [cm]	v ≥ 75 [cm]
Buono	1.00	1.00
Giusto	0.95	1.00
Scarso	0.90	0.90

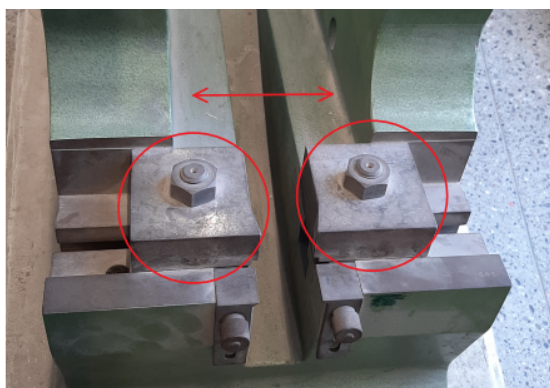
Tabella A.7: Moltiplicatore accoppiamento c_m

Appendice B

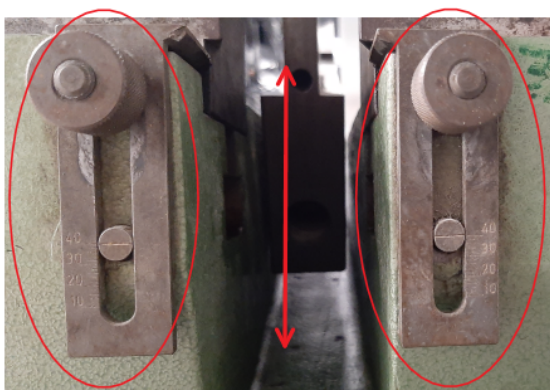
Manuale di utilizzo del pendolo

B.1 Preparazione della sede del provino

1. Regolare l'apertura dei blocchi dello spallamento.



2. Regolare l'altezza delle piastrine di appoggio del provino per allineare il punto d'impatto con il centro del provino.



B.2 Procedura di utilizzo

1. Aprire la porta.
2. Tenendo premuta la leva del dente della traversa di posizionamento sollevare la traversa fino alla posizione desiderata.



3. Sollevare la mazza fino all'aggancio alla traversa.



4. Inserire la spina di bloccaggio. Se necessario avvalersi dell'utilizzo della pedana.
5. Posizionare il provino da testare.
6. Rimuovere la spina di bloccaggio.
7. Chiudere la porta.

8. Resettare il sistema di misura iniziando dalla scala graduata (1) e poi resettare l'indicatore (2).



9. Tirare il cavo di azionamento.



10. Attendere il completo arresto della macchina.

11. Rilevare la misura.

12. Aprire la porta.

13. Tenendo premuta la leva del dente della traversa di posizionamento abbassare la traversa fino alla posizione di riposo.



14. Chiudere la porta.