



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Sviluppo di un sistema di supporto
motorizzato per una telecamera con
obiettivo telecentrico da installare su
macchine per prove di trazione**

**Development of a motorized support
system for a telecentric lens camera to be
installed on tensile testing machines**

Tesi di laurea di:
Cicchetti Lorenzo

Relatore:
Prof. Rossi Marco

Correlatore:
Ing. Morichelli Luca

Anno Accademico 2022-2023



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Sviluppo di un sistema di supporto
motorizzato per una telecamera con
obiettivo telecentrico da installare su
macchine per prove di trazione**

**Development of a motorized support
system for a telecentric lens camera to be
installed on tensile testing machines**

Tesi di laurea di:
Cicchetti Lorenzo

Relatore:
Prof. Rossi Marco

Correlatore:
Ing. Morichelli Luca

Anno Accademico 2022-2023

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Ringraziamenti

Durante questo percorso fantastico, ma allo stesso tempo molto faticoso, durato 3 anni, sicuramente sento di dover ringraziare in primis la mia famiglia e la mia ragazza Elena poiché mi sono sempre stati vicino durante tutti i momenti di difficoltà, credendo sempre e fortemente in me.

Sono sempre stati pronti a sostenermi e a sdrammatizzare anche quei momenti più bui del mio percorso: senza di loro questo “piccolo traguardo “ non sarebbe stato possibile.

Un ‘ altro ringraziamento va a tutti i miei compagni del gruppo di studio: Luca, Gabriel, Alessandro, con cui ho condiviso emozioni di ogni genere in questi anni . Abbiamo sempre sofferto e gioito insieme.

Una menzione particolare va a Gabriel Gonzalez Tobon con cui ho condiviso il tirocinio e la stesura della tesi: la nostra amicizia è stata fondamentale per riuscire a lavorare bene e in armonia.

Infine un ringraziamento speciale va al Prof. Rossi e all’Ing. Morichelli, in quanto sono sempre stati disponibili e sono stati fondamentali durante il nostro percorso, per tutto l’aiuto datoci sia durante il tirocinio che durante la stesura della tesi.

Abstract

This paper has been written to illustrate all the phases that have led to the realization of the project carried out by the undersigned and my colleague Gabriel Gonzalez Tobon, both students of the Bachelor's Degree in Mechanical Engineering, in the course of our experience as trainees in the Department of Industrial Engineering and Mathematical Sciences of the Marche Polytechnic University. The task for us carried out consisted in the design of a support equipped with a special system motorization for supporting a video camera, and the corresponding remote control lens trico, used for tensile tests that exploit the D.I.C. based on the measure of the deformations of the specimen. The telecentric lens, larger in size than to the camera, it is indispensable for carrying out the tests in order to be able to cancel perspective errors that would erroneously change the relative values to the deformations of the specimen. What are the basic characteristics required for the creation of such support? We were asked to make a stand that was easy to create, suitable for the machine present in the university laboratories and, if possible, also reusable for other camera with different size and characteristics. As for the motorization system this had been required to be able to allow the camera to follow the center of the specimen to prevent necking, and subsequent breakage, did not occur within the portion of space framed from the camera. Given the difficulty of the project it was decided, differently from most projects, to assign it not to an individual trainee but rather to two. My colleague and I have therefore always worked in pairs without any type of difficulty as already fellow students and, in the course of our activity, there we meet on a weekly basis with Prof. Rossi to be able to discuss the work done and possible points to improve on our project e more generally to our ideas. This having been our first experience in the field of design, errors have not been lacking but nevertheless we are always been ready to correct them following the advice of the professor and thus succeeding in satisfy all the requests necessary for the realization of the support by finding the right compromise between the various needs. Despite the many difficulties I feel to say that I am satisfied with the work done as it was a practical experience which led us to become familiar with some programs that probably they will serve us for the future such as Solid Edge, which we use for the realization of the CAD drawing after having performed numerous freehand sketches. Having always worked as a couple, my work partner and I decided to proceed together also with regard to the drafting of this final paper ix equally dividing the work to be able to illustrate in the best way how much done. Going to analyze in more depth the content of the thesis, we can say that this is divided into five chapters in which

we will illustrate all the work done to implement the project

- in the first chapter we are going to illustrate everything related to the tests of traction and in particular the D.I.C. to make it clearer what it was the object of our study. After generally analyzing the evidence of traction we will focus more on the description of the camera and the objective telecentric connected to it
- in the second chapter we will describe all the components we designed, going to analyze all the work done with regard to the study of architecture of the support. In particular we will show the functionality of each single piece and we will report some sketches we made first freehand and subsequently with the use of CAD programs such as Solid Edge
- in the third chapter we will analyze all the solutions adopted to add stand the details of the structure as, after having broadly defined the shape of the holder, we have been focusing on finding detail solutions to solve some problems that arose both at the beginning of our work and during the realization of the project
- in the fourth chapter we will instead analyze the whole part of choosing the components, indispensable for deciding which components to use for the movement of the camera in the three directions of space, arriving finally to opt for the use of runners and slides for movement on the surface horizontal and a jack, coupled to a special electric motor, for the movement in the vertical direction
- in the fifth chapter we will analyze the entire verification part

To close the thesis we have provided an appendix in which we will report all the sketches made by us and the drawings of the components used for the realization of the project.

Sommario

Questo elaborato è stato redatto per illustrare tutte le fasi che hanno portato alla realizzazione del progetto svolto dal sottoscritto e dal collega Gabriel Gonzalez Tobon, entrambi studenti del corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, durante la nostra esperienza da tirocinanti presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche. Il compito da noi svolto consisteva nella progettazione di un supporto dotato di un apposito sistema di motorizzazione per il sostegno di una telecamera, e il corrispettivo obiettivo telecentrico, utilizzata per prove di trazione che sfruttano l'analisi D.I.C. basata sulla misura delle deformazioni del provino. L'obiettivo telecentrico, di dimensioni superiori rispetto alla telecamera, è indispensabile per lo svolgimento delle prove per poter annullare gli errori di prospettiva che andrebbero a compromettere i valori relativi alle deformazioni del provino.

Quali sono le fondamentali caratteristiche richieste per la realizzazione di tale supporto? Ci è stato chiesto di progettare un supporto facile da realizzare, adatto alla macchina presente nei laboratori dell'università e, se possibile, riutilizzabile anche per altre telecamera con dimensioni e caratteristiche differenti.

Per quanto riguarda il sistema di motorizzazione questo era stato richiesto per poter permettere alla telecamera di seguire il centro del provino per evitare che la strizione, e la successiva rottura, non avvenissero all'interno della porzione di spazio inquadrata dalla telecamera. Data la difficoltà del progetto si è deciso, diversamente dalla maggior parte dei progetti, di assegnarla non a un singolo tirocinante ma bensì a due. Io e il mio collega abbiamo quindi lavorato sempre in coppia senza nessun tipo di difficoltà in quanto già compagni di studio e, nel corso della nostra attività, ci siamo confrontati con cadenza settimanale con il Prof. Rossi per poter discutere del lavoro svolto e dei possibili punti da migliorare relativamente al nostro progetto e più in generale alle nostre idee. Essendo stata questa la nostra prima esperienza nell'ambito della progettazione gli errori non sono mancati ma nonostante ciò siamo stati sempre pronti a correggerli seguendo i consigli del professore e riuscendo così a soddisfare tutte le richieste necessarie per la realizzazione del sostegno trovando il giusto compromesso fra le varie necessità. Nonostante le numerose difficoltà mi sento di dire di essere soddisfatto del lavoro svolto in quanto è stata un'esperienza pratica che ci ha portato a prendere confidenza con alcuni programmi che probabilmente ci serviranno per il futuro come ad esempio Solid Edge, da noi utilizzato per la realizzazione del disegno CAD dopo aver eseguito numerosi schizzi a mano libera. Avendo lavorato sempre in coppia io e il mio compagno di lavoro abbiamo deciso di

procedere insieme anche per quanto riguarda la stesura di questo elaborato finale dividendoci equamente il lavoro per poter illustrare nel migliore dei modi quanto fatto. Andando ad analizzare in maniera più approfondita il contenuto della tesi, possiamo dire che questa si articola in cinque capitoli in cui illustreremo tutto il lavoro svolto per poter realizzare il progetto.

- Nel primo capitolo andremo a illustrare tutto ciò che riguarda le prove di trazione e in particolare l'analisi D.I.C. per rendere più chiaro qual'è stato l'oggetto del nostro studio. Dopo aver analizzato in generale le prove di trazione ci concentreremo più sulla descrizione della telecamera e dell'obiettivo telecentrico ad essa collegato.
- Nel secondo capitolo descriveremo tutti i componenti da noi progettati, andando ad analizzare tutto il lavoro fatto per quanto riguarda lo studio dell'architettura del supporto. In particolare mostreremo la funzionalità di ogni singolo pezzo e riporteremo alcuni schizzi da noi realizzati prima a mano libera e successivamente con l'utilizzo di programmi CAD come Solid Edge
- Nel terzo capitolo andremo ad analizzare tutte le soluzioni adottate per definire i dettagli della struttura in quanto, dopo aver stabilito a grandi linee la forma del supporto, ci siamo concentrati sulla ricerca di soluzioni di dettaglio per risolvere alcuni problemi sorti sia all'inizio del nostro lavoro che durante la realizzazione del progetto
- Nel quarto capitolo andremo invece ad analizzare tutta la parte di scelta dei componenti , indispensabile per decidere quali componenti utilizzare per la movimentazione della telecamera nelle tre direzioni dello spazio, arrivando infine a optare per l'utilizzo di pattini e slitte per la movimentazione nel piano orizzontale e un martinetto, accoppiato a un apposito motore elettrico, per la movimentazione nella direzione verticale
- Nel quinto capitolo andremo ad analizzare tutta la parte di verifica

A chiudere la tesi abbiamo previsto un'appendice in cui andremo a riportare tutti gli schizzi da noi realizzati e i disegni dei componenti utilizzati per la realizzazione del progetto.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Prove meccaniche monoassiali	1
1.1.1	Prova di trazione	2
1.2	Macchine di prova	8
1.2.1	Macchine per prove di trazione	12
1.3	Analisi DIC	14
1.3.1	Introduzione all'analisi DIC	14
1.3.2	Principio di funzionamento analisi DIC	14
1.3.3	Prove 2D-DIC	16
1.3.4	Prove 3D -DIC	17
1.3.5	Preparazione delle superfici	19
1.3.6	Determinazione del campo di spostamenti	20
1.4	Ottiche telecentriche	21
1.4.1	Introduzione alle ottiche telecentriche	21
1.4.2	Principio di funzionamento e differenza rispetto alle ottiche tradizionali	22
1.4.3	Set-up utilizzato inizialmente per la raccolta delle misurazioni	25
2	Definizione dell'architettura	29
2.1	Schizzi iniziali della struttura	29
2.2	Soluzioni iniziali per la movimentazione	31
2.3	Suddivisione della struttura in parte fissa e parte mobile	32
3	Soluzione di dettaglio	35
3.1	Realizzazione del CAD dei vari pezzi	35
3.1.1	CAD parte fissa	36
3.1.2	CAD parte mobile(smontabile)	39
3.1.3	CAD alloggiamento martinetto e motore	40
3.1.4	CAD pezzo di collegamento tra il martinetto e l'alloggiamento di telecamera e obiettivo	42
3.1.5	CAD della piastra collegata al sistema frenante ,su cui sono montati il pattino e la slitta centrali	44
3.1.6	CAD pezzo di collegamento pignone e piastra e CAD bloccaggio pignone	45
3.1.7	CAD alloggiamento telecamera	46

Indice

3.2	Manifattura additiva	48
3.2.1	Motivi e campi di impiego della manifattura additiva	49
3.2.2	Principio di funzionamento della manifattura additiva	50
4	Scelta componenti	55
4.1	Scelta martinetto	55
4.1.1	Definizione dell'applicazione	57
4.1.2	Verifica del carico di punta	57
4.1.3	Calcolo della coppia di avvio	58
4.1.4	Caratteristiche costruttive del martinetto scelto	58
4.2	Scelta pattino e slitta per la movimentazione sul piano	60
4.2.1	Varie tipologie di guide lineari	60
4.2.2	Capacità di carico	62
4.2.3	Componenti scelti per il progetto	64
4.2.4	Vita attesa e manutenzione	66
4.3	Scelta del sistema di serraggio e frenatura	68
4.3.1	Varie tipologie di freni	68
4.4	Scelta di pignone e cremagliera per la movimentazione del pattino centrale	72
4.5	Scelta del motore da accoppiare al martinetto elettrico	75
4.5.1	Principio di funzionamento di un motore asincrono monofase	76
4.6	Scelta del giunto di trasmissione	78
5	Ultimazione del progetto , verifica e conclusioni	81
5.1	Realizzazione del cad definitivo	81
5.2	Verifica strutturale	83
6	CONCLUSIONI	87
7	APPENDICE	89

Elenco delle figure

1.1	Esempi di sforzo di trazione e compressione	2
1.2	Esempi di vari provini di sezione e lunghezza differenti	3
1.3	Analisi delle parti caratteristiche di un provino	4
1.4	Diagramma tensione-deformazione	5
1.5	Provino prima e dopo la strizione	6
1.6	Diagrammi tensione deformazione di diversi materiali	7
1.7	esempio di macchina per prove meccaniche	8
1.8	Macchine di trazione servoidraulica ed elettromeccanica a confronto	11
1.9	Dispositivi utilizzati per la misura di forza, spostamento e deformazione	12
1.10	Esempio di definizione dei subset nella tecnica DIC (sinistra) e dei campi di spostamento (centro) e deformazione (destra) ottenuti dall'analisi di una serie di immagini.	14
1.11	La figura mostra l'assottigliamento di un provino in seguito ad una sollecitazione di trazione	16
1.12	Set-up schematizzato di una correlazione di immagini 2D	17
1.13	Set-up schematizzato di una correlazione di immagini 3D, evidenziando la differenza con il set-up di una prova 2D DIC	18
1.14	Esempi di speckle pattern. Da sinistra :speckle di 5 px(diametro) con un coverage factor di 0.3; al centro speckle di 5 pixel con un coverage factor di 0.5 e infine speckle 9 pixel	19
1.15	Concetto di spostamento e deformazione di un subset (sinistra) e esempio di funzione di correlazione (destra)	20
1.16	La figura mostra la differenza tra le lenti convenzionali e quelle telecentriche, evidenziando l'importanza delle ultime nei campi in cui sia richiesta un'elevata precisione	22
1.17	La figura evidenzia la differenza tra gli angoli che si formano tra fascio laser e superficie da marcare.	23
1.18	La figura mostra la differenza tra i due campi di marcatura	24
1.19	La figura mostra la differenza tra le due messe a fuoco	24
1.20	Prima inquadratura	25
1.21	Seconda inquadratura	25
1.22	26
1.23	27
2.1	Schizzi realizzati inizialmente a mano libera	29

Elenco delle figure

2.2	Schizzo con correzioni del sistema di sollevamento con carrucole . . .	31
2.3	Suddivisione in parte fissa e parte mobile 1	33
2.4	Suddivisione in parte fissa e mobile 2	34
3.1	La figura mostra i 4 fori di fissaggio presenti sulla macchina di trazione	36
3.2	CAD parte fissa, da accoppiare alla macchina di trazione tramite i 4 fori di collegamento	37
3.3	CAD della parte mobile, da accoppiare con la parte fissa tramite i 3 fori di collegamento	39
3.4	Assemblaggio parte fissa-mobile	40
3.5	CAD del contenitore di martinetto e motore	40
3.6	CAD del collegamento tra martinetto e alloggiamento di telecamera e obiettivo	42
3.7	CAD della piastra	44
3.8	CAD del pezzo che unisce il pignone alla piastra	45
3.9	CAD del pezzo per il bloccaggio del pignone	45
3.10	Cad dell'alloggio della telecamera	46
3.11	CAD definitivo dell'alloggio telecamera-obiettivo	47
3.12	Una delle prime stampanti 3d	48
3.13	Stampa stereolitografica	51
3.14	Stampa per fusione a letto di polveri	51
3.15	Stampa per sovrapposizione di strati di materiale	52
3.16	Stampa per fusione di filamento	52
3.17	Pezzo stampato con la stampante 3D	53
4.1	Installazione del martinetto sulla struttura	55
4.2	Esplosivo martinetto	56
4.3	Tabella di potenza SJM184	58
4.4	Disegno tecnico del pezzo	58
4.5	Terminali asta trapezia	59
4.6	Immagine organi volventi	60
4.7	Direzioni principali di carico	62
4.8	La figura mostra il caso più sfavorevole, ossia quando il carico è inclinato di 45° oppure quando i carichi in direzione verticale ed orizzontale sono di pari entità	63
4.9	CAD di tutto il sistema per lo spostamento nelle due direzioni del piano ortogonale alla macchina	64
4.10	Uno dei due pattini con 2 fori	64
4.11	Installazione delle slitte	65
4.12	Pattino centrale con 6 fori	65
4.13	Freno idraulico	69
4.14	Freno pneumatico	70
4.15	Freno meccanico	70

4.16	Meccanismo pignone e cremagliera	73
4.17	CAD della cremagliera	74
4.18	CAD del pignone accoppiato con la cremagliera	74
4.19	Motore asincrono monofase scelto per la movimentazione	75
4.20	Elemento utilizzato per trasmettere la coppia dal motore all'alberino del martinetto elettrico	78
4.21	La figura mostra i possibili disallineamenti , risolti tutti tramite l'utilizzo di un giunto a stella	79
5.1	CAD definitivo del supporto	81
5.2	Software utilizzato per l'analisi strutturale	83
5.3	Mesh creata sul modello per l'analisi FEM	83
5.4	Caratteristiche del materiale utilizzato per la realizzazione del supporto per la telecamera e l'obiettivo telecentrico	84
7.1	Tavola parte fissa	90
7.2	Tavola parte mobile	91
7.3	Tavola del contenitore di martinetto e motore	92
7.4	Tavola della piastra per il bloccaggio	93
7.5	Tavola dell'attacco tra pignone e piastra per il bloccaggio	94
7.6	Tavola della parte di sotto del sostegno di telecamera e obiettivo	95
7.7	Tavola della parte di sopra del sostegno di telecamera e obiettivo	96
7.8	Tavola della parte a forma di C	97

Elenco delle tabelle

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Prove meccaniche monoassiali

Le prove meccaniche sono delle prove effettuate per studiare il comportamento di un determinato materiale sottoposto a sforzi di tipo statico o dinamico. Queste prove vengono eseguite con macchinari specifici su dei campioni di materiale che vengono chiamati provini. Queste prove possono essere effettuate per vari scopi come:

- Per catalogare alcune proprietà del materiale come ad esempio la tensione di snervamento o di rottura, la tenacità, la resilienza, la durezza e la resistenza a fatica (prove cicliche)
- Per capire se la deformazione subita dal materiale sotto l'effetto di un determinato carico è una deformazione elastica (reversibile) o plastica (irreversibile)
- Certificare in generale la qualità di un determinato materiale

Le prove meccaniche possono essere di vario tipo e quindi possono essere classificate prendendo in considerazione vari parametri. Una prima suddivisione che si può fare delle prove è in:

- Prove convenzionali, quando vengono fatte delle prove per ottenere valori utili per la catalogazione e il confronto dei materiali
- Prove simulate o reali, quando vengono effettuate delle prove che riproducono nel miglior modo possibile quelle che sono le condizioni di utilizzo del materiale

Un'ulteriore suddivisione che si può fare delle prove meccaniche viene fatta in base alla tipologia di carico applicata al provino e ci permette di dividere le prove in:

- Prove statiche, viene applicato un carico costante o lentamente crescente nel tempo
- Prove cicliche, il valore oscilla tra un valore massimo e un valore minimo per un numero di volte elevato
- Prove a urto, il carico viene applicato in un intervallo di tempo molto piccolo per valutare la capacità dei materiali di assorbire l'energia dell'impatto

È quindi evidente come le prove meccaniche siano di fondamentale importanza per lo studio e la classificazione dei materiali. Proprio per la loro importanza risulta indispensabile la necessità di standard e norme emesse da appositi enti che ne regolarizzino lo svolgimento. Tra gli organismi che emettono tali normative troviamo l'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), l'organismo competente a livello europeo CEN (Comitato europeo di Normazione) che emette le norme EN che devono essere rispettate come norme nazionali da tutti i paesi che fanno parte del CEN. A livello internazionale l'organismo più importante è l'ISO (Organizzazione Internazionale per la Normazione) le cui norme possono essere adottate come norme nazionali (UNI ISO) o europee (UNI EN ISO).

1.1.1 Prova di trazione

La prova di trazione statica consiste nel sottoporre, a temperatura costante in quanto sennò avremmo una variazione dei moduli di resistenza e deformazione, un provino a un carico di trazione applicato con una certa velocità di incremento fino a provocarne snervamento, strizione e infine rottura per poterne poi determinare, attraverso lo studio dei dati acquisiti, le caratteristiche di resistenza, elasticità e deformabilità.

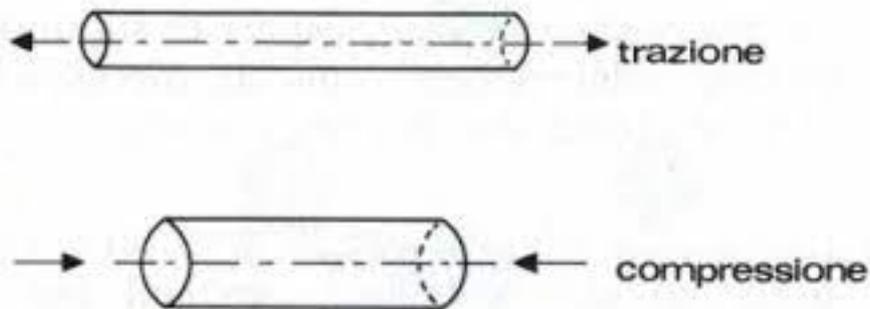


Figura 1.1: Esempi di sforzo di trazione e compressione

Possiamo andare quindi a definire uno sforzo di trazione in meccanica come uno sforzo tale che, preso un provino fissato a un estremo, tende a tirare e quindi allontanare l'altro estremo; invece lo sforzo applicato nell'altro verso viene definito di compressione e può provocare anch'esso, con meccaniche differenti, la rottura del provino. La sollecitazione applicata è una sollecitazione statica perché cresce gradualmente nel tempo e possiamo dire che la prova di trazione è una prova di tipo distruttivo in quanto provoca la rottura del provino utilizzato per la prova.

La prova di trazione è probabilmente la prova più importante in quanto ci permette di definire le principali proprietà meccaniche con le quali si classificano e si scelgono i materiali da utilizzare perché ci permette di definire dati come il carico unitario di snervamento, di rottura e l'allungamento percentuale a rottura.

Per la realizzazione dei provini da sottoporre alle prove di trazione bisogna tenere in considerazione le normative europee che indicano come preparare in maniera conforme un provino in base al tipo di materiale e alla sezione utile da sottoporre alla prova.

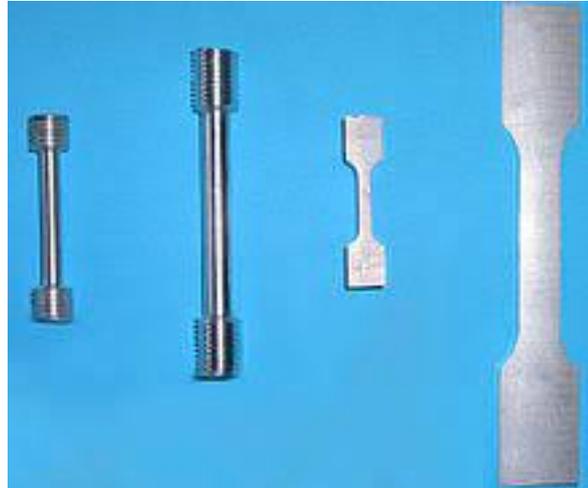


Figura 1.2: Esempi di vari provini di sezione e lunghezza differenti

I provini possono essere ricavati da un pezzo pieno e avere quindi sezione circolare, o da una lamiera e presentare una sezione rettangolare; in entrambi i casi possiamo definire il concetto di "saggio" che descrive la parte di materiale prelevata dall'elemento da sottoporre allo studio per realizzare uno o più provini. Con il termine "barrotto" andremo invece a indicare la parte di saggio sottoposta a trattamenti termici o meccanici necessari per la realizzazione del provino. Il materiale da esaminare (saggio) e la preparazione della provetta devono avvenire in modo da non alterare le caratteristiche del materiale. Di regola la provetta è ottenuta mediante lavorazione meccanica a freddo di un saggio prelevato da un prodotto colato, evitando che il materiale subisca riscaldamenti o incrudimenti, che modificherebbero le proprietà meccaniche originarie. I provini lavorati non devono presentare tracce di utensile e rigature in quanto, per l'effetto intaglio, abbasserebbero i valori delle caratteristiche meccaniche: per questo è bene che siano lucidate. I prodotti di sezione costante possono essere sottoposti alla prova di trazione senza essere stati preventivamente lavorati (spezzoni grezzi). Si parla, in questo caso, di "provini non sagomati".

Nei provini possiamo individuare delle parti caratteristiche:

- La "parte centrale calibrata" la cui lunghezza viene solitamente indicata con L_c
- La "lunghezza iniziale" che viene definita come una porzione della lunghezza della "parte centrale calibrata" e viene indicata con L_0
- Il diametro d della parte calibrata che ci permette di definire una sezione S_0 (questo nel caso di provini circolari, nel caso di provini rettangolari vengono definiti larghezza a e altezza b)

- Le "teste di afferraggio" che si trovano alle estremità del provino e servono per permettere l'afferraggio del provino attraverso le ganasce presenti sulla macchina con la quale si va ad effettuare la prova
- I raccordi tra la parte calibrata e le teste per evitare pericolose concentrazioni di sforzi che altererebbero i risultati della prova
- La "lunghezza totale" L_t

Tutti gli elementi sopra indicati sono riportati nella figura 1.3

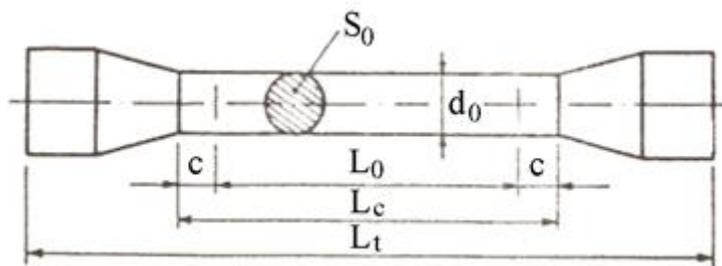


Figura 1.3: Analisi delle parti caratteristiche di un provino

L'esperienza ha evidenziato che la forma e le dimensioni del provino influenzano notevolmente le deformazioni. È necessario quindi assumere la lunghezza L_0 in modo da garantire un'uniforme distribuzione dello sforzo sull'intero tratto. La distanza tra i riferimenti dopo la rottura, misurata portando a far combaciare i due spezzoni, è detta "lunghezza ultima" L_u . L'allungamento totale verrà quindi definito come la differenza tra la lunghezza ultima del provino e la lunghezza utile iniziale

$$ALLUNGAMENTO = L_u - L_0 \quad (1.1)$$

Lo scopo di queste prove, come detto in precedenza, è quindi quello di individuare le caratteristiche di resistenza, deformabilità ed elasticità individuabili tramite un diagramma definito come diagramma "tensione-deformazione" che pone sull'asse delle ascisse gli allungamenti percentuali e sull'asse delle ordinate le tensioni esercitate dalla macchina.

All'interno del diagramma possiamo andare a individuare vari campi che vengono definiti tecnicamente "regimi", e possiamo individuarne tre: regime elastico, regime elasto-plastico e regime plastico. Attraverso l'analisi di questi tre regimi si possono individuare le caratteristiche del materiale quali la deformabilità, la resistenza e l'elasticità che variano quindi al variare dell'estensione dei vari regimi.

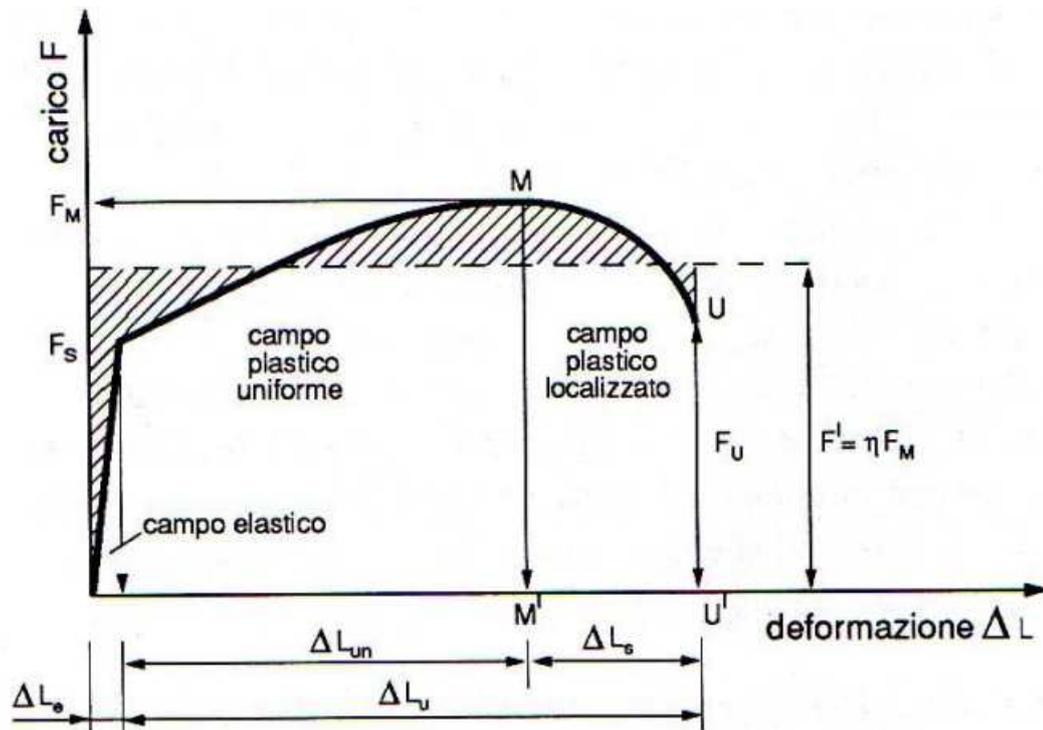


Figura 1.4: Diagramma tensione-deformazione

- Nel tratto elastico, definito tecnicamente "tratto di elasticità e proporzionalità", l'applicazione di un carico determina un proporzionale allungamento del provino e ciò comporta che il diagramma sia rettilineo cioè la deformazione varia linearmente con il carico. In questo tratto le deformazioni sono di tipo elastico; ciò significa che alla rimozione del carico il provino torna alle sue dimensioni iniziali e perciò possiamo definire l'elasticità come la proprietà di un materiale di deformarsi e, una volta rimosso il carico, riacquistare le sue dimensioni originarie. In questo tratto possiamo dire inoltre che è valida la legge di Hooke secondo cui le deformazioni provocate dalle sollecitazioni sono proporzionali a quest'ultime e sono legate da una costante di proporzionalità E chiamata "Modulo di Young" e che rappresenta la pendenza del tratto lineare del diagramma
- Nel tratto elasto-plastico, definito tecnicamente "tratto di elasto-plasticità", andando ad aumentare il carico oltre il valore limite F_s le deformazioni non saranno più direttamente proporzionali ai carichi applicati; il diagramma subisce uno spostamento verso destra in quanto le deformazioni subiranno un incremento maggiore rispetto ai carichi, e agli allungamenti elastici si sommeranno anche gli allungamenti permanenti (plastici)
- Nel tratto plastico, definito tecnicamente di "plasticità", che si verifica una volta superato il punto M , scompare la plasticità del materiale e evolve sempre di più il fenomeno della deformazione plastica che, con l'aumentare del carico,

aumenterà sempre di più fino a portare il provino a rottura. L'aumento della plasticità quindi tende ad annullare sempre di più il comportamento elastico del materiale fino ad arrivare a un punto, individuabile come punto M nel grafico riportato in figura, in cui le deformazioni saranno solo di tipo plastico. Queste deformazioni plastiche si verificano perchè le distanze intermolecolari del reticolo del nostro provino aumentano a tal punto che, al cessare della sollecitazione, gli atomi non riprendono più la loro posizione primitiva

Lo snervamento si verifica quando il carico necessario a vincere le forze intermolecolari secondarie è minore di quello necessario a rompere i legami intermolecolari. Le molecole cominciano a districarsi e a scorrere le une rispetto alle altre e il provino continua ad allungarsi fino a quando non si verifica un'orientazione delle molecole sufficiente a far sì che il carico venga contrastato dai legami primari.

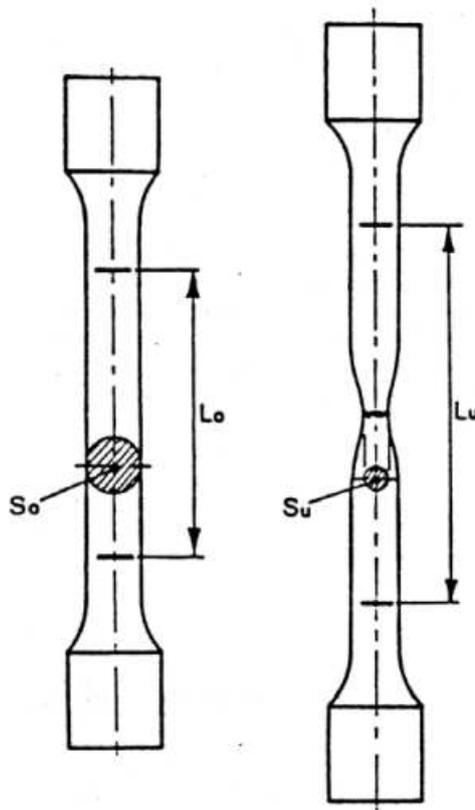


Figura 1.5: Provino prima e dopo la strizione

Nell'intervallo MU invece si ha un allungamento localizzato del provino anche se dal grafico si può notare che il carico diminuisce. La sezione del provino diminuisce in modo considerevole dando luogo al fenomeno della strizione che ci permette di individuare anche la posizione in cui si verificherà la rottura del provino.

Una volta arrivati nel punto M quindi la tensione raggiunge il suo valore massimo, cioè la "tensione di rottura", che rappresenta la massima forza sopportata dal provino durante il test e possiamo di conseguenza definire anche il "carico unitario di rottura" come il rapporto tra il carico massimo e l'area della sezione iniziale.

È evidente come a seconda del materiale che si sottopone alla prova di trazione si possono ottenere vari diagrammi con caratteristiche differenti che ci permettono di stabilire le differenti proprietà dei materiali.

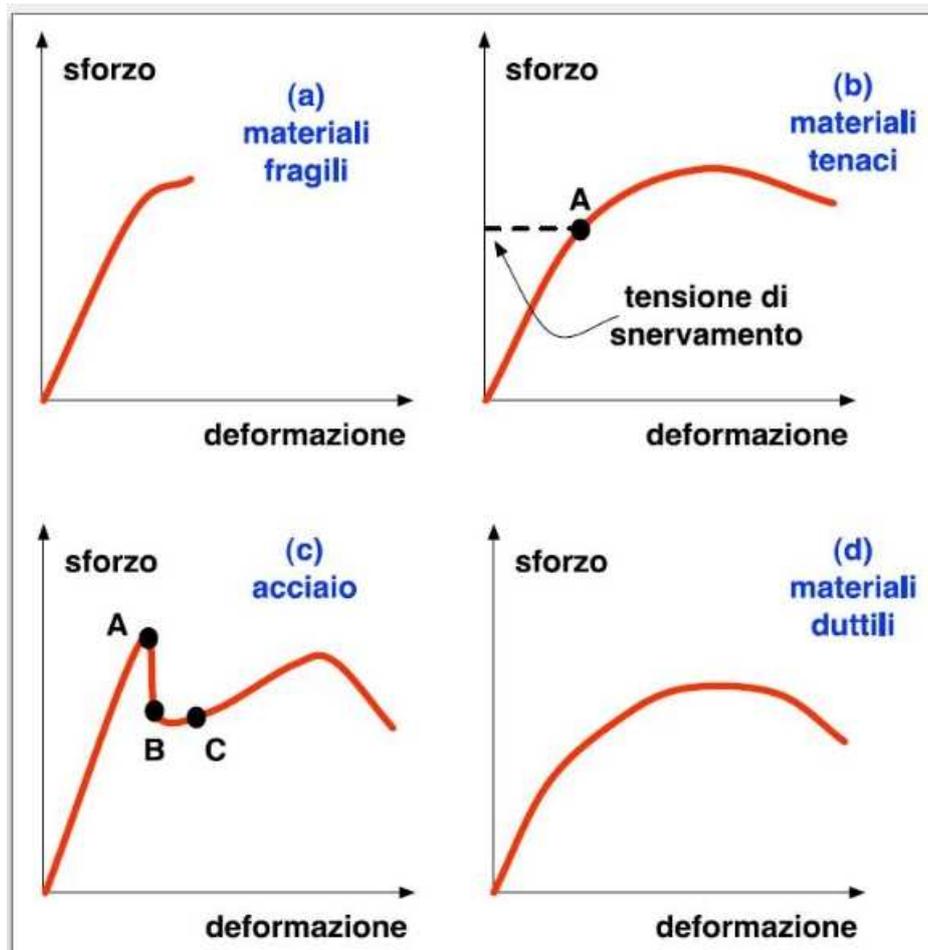


Figura 1.6: Diagrammi tensione deformazione di diversi materiali

1.2 Macchine di prova

Nel corso del tempo il compito affidato alle macchine di prova è sempre stato quello di qualificare i materiali impiegati dagli ingegneri. Si sono quindi dovute definire con il tempo opportune norme, parametri da tenere sotto controllo, condizioni di prova e indicazioni sulle dimensioni dei provini come già detto in precedenza.

La gamma di materiali impiegati in ogni ambito va sempre più aumentando per cui le prove meccaniche risultano sempre più utili non solo per lo studio dei metalli ma anche per tutti gli altri tipi di materiali (plastiche e materiali ceramici sono degli esempi).



Figura 1.7: esempio di macchina per prove meccaniche

Oltre a una vasta gamma di materiali abbiamo anche un'altrettanta vasta varietà di prove meccaniche da poter svolgere per ogni singolo materiale. Tra le varie prove meccaniche possiamo trovare: prove di resistenza a trazione e compressione, flessione, torsione e prove di durezza e resistenza a fatica. Tutte queste prove, come ogni cosa nell'ingegneria, sono quindi standardizzate e regolarizzate da norme e sappiamo che viene inoltre seguito un iter ben preciso sia per la preparazione del macchinario e del provino, sia per lo svolgimento vero e proprio della prova. Le macchine di prova quindi possono essere classificate in svariati modi e una loro enumerazione descrittiva non è semplice sia per la varietà di prove che possono essere eseguite sia per la vastità di materiali che si possono sottoporre a tali prove. Una prima grande suddivisione che si può fare delle macchine di prova riguarda quella fatta prendendo in considerazione l'asse del provino e ci permette di individuare due grandi gruppi: macchine di prova verticali e macchine di prova orizzontali.

Le macchine di prova verticali sono le più diffuse e solitamente il provino non supera la lunghezza di 2 metri; le macchine di prova orizzontali vengono invece usate per studiare funi, cavi o catene la cui lunghezza può arrivare anche a 10 metri.

Un'altra fondamentale suddivisione che può essere fatta riguarda il tipo di prova e il massimo carico applicabile.

Da diversi anni inoltre è pratica sempre più comune quella di testare direttamente i componenti studiati piuttosto che ricavare da questi dei provini da sottoporre a determinati test. Questa pratica viene eseguita in particolare quando i componenti da testare sono prelevati da strutture critiche per cui è necessario studiarne il comportamento in situazioni che riproducano al meglio le condizioni reali. Come è facile intuire queste prove sono le migliori, ma richiedono delle macchine fatte su misura solo per poter effettuare test su determinati componenti perciò il più delle volte si ricorre all'utilizzo di macchinari standardizzati che permettono di svolgere test su più tipi di materiali e più tipi di provini di dimensioni di poco variabili. Per questo motivo, per evitare costi troppo eccessivi per la realizzazione dei macchinari, si ricorre la maggior parte delle volte a macchinari standardizzati su cui poter montare vari tipi di afferraggi e che possono essere collegate a diversi software gestibili dal pannello di controllo.

Andando quindi ad analizzare una generica macchina di prova possiamo individuare dei componenti comuni presenti su tutti i macchinari:

- Telaio, questo rappresenta la parte fissa del nostro macchinario e viene dimensionato in base al carico che deve essere applicato sui nostri provini, può essere quindi a 1 colonna, a 2 colonne o a 4 colonne
- Elemento mobile, che permette di imprimere al nostro provino la forza necessaria
- Meccanismo di movimentazione, che permette di imprimere alla parte mobile una velocità variabile in base alle nostre esigenze. Proprio in base alla velocità di questo componente abbiamo dovuto regolare la velocità di movimento del supporto da noi progettato.
- Afferraggi, che permettono il fissaggio del provino
- Dispositivi di misura
- Pannello di controllo, grazie al quale possiamo impostare e controllare i vari parametri della nostra prova

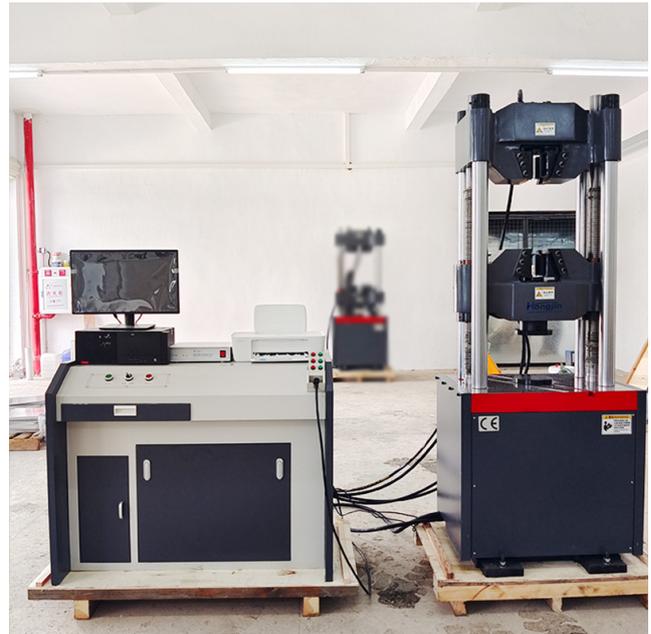
Altra importante suddivisione che può essere fatta delle macchine è quella che riguarda il meccanismo di movimentazione e che ci permette di dividere le macchine in servoidrauliche ed elettromeccaniche:

- Servoidrauliche, queste permettono di applicare una forza tramite un fluido messo in pressione grazie a una pompa idraulica che, tramite una valvola, permette di regolare la portata di tale fluido e di conseguenza la forza. Il vantaggio di tali macchine è che permettono di applicare carichi molto elevati che possono superare anche i 20 kN ma con lo svantaggio dell'ingombro delle pompe

- Elettromeccaniche, queste permettono invece di applicare la forza attraverso un motore elettrico collegato tramite ingranaggi alla traversa mobile. La corsa massima della traversa mobile è di gran lunga maggiore rispetto a quelle servoidrauliche e presentano una maggiore sicurezza e semplicità ma non permettono il raggiungimento di carichi troppo elevati; vengono infatti preferite quando i carichi da applicare sono minori di 4kN



(a) Macchina di trazione elettromeccanica



(b) Macchina di trazione servoidraulica

Figura 1.8: Macchine di trazione servoidraulica ed elettromeccanica a confronto

I dispositivi di misura installati sulle macchine di trazione consentono di ricavare i dati di cui abbiamo bisogno sia durante lo svolgimento della prova che a prova terminata e i dati che possiamo ricavare sono:

- Forza, questa viene rilevata attraverso la cella di carico che è costituita da un elemento elastico di cui viene misurata la deformazione attraverso degli estensimetri poiché una volta misurata la deformazione si riesce facilmente a risalire alla tensione e di conseguenza alla forza applicata. Esistono vari tipi di celle di carico in base alla forza da misurare e vengono classificate in base alla forza massima misurabile definita come fondo scala
- Spostamento, che viene misurato grazie all'utilizzo di un LVDT che sfrutta lo spostamento di un elemento metallico immerso in un campo magnetico generato da un avvolgimento in cui viene fatta scorrere corrente elettrica: lo spostamento comporta una variazione del campo magnetico indotto grazie alla quale siamo in grado di definire il valore dello spostamento

- Deformazione, che viene misurata impiegando degli estensometri, particolari dispositivi formati da due parti a contatto con il provino di cui una mobile che ci permette di misurarne lo spostamento e quindi la deformazione. Questi dispositivi sono indispensabili per ottenere una misura della deformazione molto più precisa che tenga conto dei micro spostamenti che avvengono solo all'interno del provino



(a) Esempio di cella di carico



(b) Esempio di LVDT



(c) Esempio di estensometro

Figura 1.9: Dispositivi utilizzati per la misura di forza, spostamento e deformazione

1.2.1 Macchine per prove di trazione

La forma più comune tra le macchine utilizzate per la prova di trazione è quella precedentemente descritta a 2 colonne in grado di sopportare dei carichi abbastanza elevati. La principale suddivisione che viene fatta di queste macchine è quella prima citata che vede due grandi gruppi cioè: macchine orizzontali e verticali. Per la movimentazione di queste macchine si può ricorrere anche qui a macchine di tipo elettromeccanico o servoidraulico e le celle di carico più comuni sono quelle del tipo mostrato nella figura 1.9.

La maggior parte delle volte i macchinari per le prove di trazione possono essere utilizzati senza problemi anche per prove di compressione in quanto basta invertire il verso in cui si muove la parte mobile. Nel caso in cui questi venissero utilizzati per prove di compressione basterà quindi sostituire gli afferraggi utilizzati per lo svolgimento delle prove di trazione con dei piatti progettati apposta per le prove di compressione, e che creano quindi delle condizioni di attrito tra piatto e provino tali da permettere lo svolgimento della prova di compressione senza alcun problema.

Un ulteriore utilizzo che può essere fatto di queste macchine è quello di prove di

flessione dove, anche qui, l'unica accortezza necessaria è la sostituzione degli afferraggi con degli appositi sistemi di fissaggio.

Le prove di flessione e compressione sono meno utilizzate per i materiali metallici in quanto per questi tipi di materiali è molto più comune e facile da svolgere la prova di trazione da cui riusciamo a ottenere tutte le specifiche relative al materiale; le prove di compressione e flessione sono invece molto più comuni per tutti gli altri materiali e in particolare per quelli dove risulta più difficoltoso lo svolgimento della prova di trazione.

1.3 Analisi DIC

1.3.1 Introduzione all'analisi DIC

L'analisi DIC (Digital Image Correlation) è una tecnica utilizzata per misurare la deformazione di un provino tramite una sequenza di immagini digitali. Questa tecnica viene spesso impiegata nell'ambito della meccanica dei materiali e della scienza dei materiali per analizzare il comportamento di strutture sotto carico.

1.3.2 Principio di funzionamento analisi DIC

L'analisi DIC è una tecnica basata sull'ottica, utilizzata per misurare l'evoluzione delle coordinate 2D o 3D a tutto campo sulla superficie di un provino durante una prova meccanica. Il principio di funzionamento è il seguente: si considera un'immagine di riferimento, presa nell'istante in cui sul provino non è applicato nessun tipo di carico. Successivamente, dopo l'applicazione del carico, vengono prese delle immagini del provino e confrontate con quelle di riferimento: in particolare, si traccia il movimento di ciascun punto dell'immagine di riferimento, andando a cercare nelle immagini successive il punto che massimizza una certa funzione di somiglianza. Per tracciare il movimento di ciascun punto della superficie durante la deformazione, bisogna applicare un pattern, ossia un elevato numero di macchioline nere (tramite appositi spray ecc.), in modo tale da ottenere una serie di marcatori, che permettano di identificare in modo univoco tutti i punti.

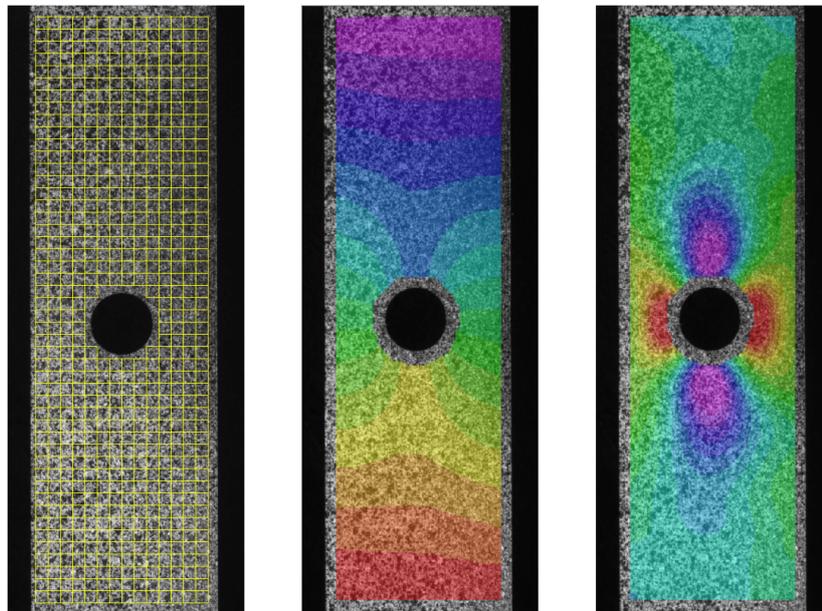


Figura 1.10: Esempio di definizione dei subset nella tecnica DIC (sinistra) e dei campi di spostamento (centro) e deformazione (destra) ottenuti dall'analisi di una serie di immagini.

Idealmente si vorrebbero avere delle macchie (pattern) coincidenti con i singoli pixel in modo da riuscire ad ottenere il movimento e di conseguenza la deformazione di ognuno di essi. Tuttavia ciò non accade poichè il livello di grigio di un singolo pixel può essere ritrovato in migliaia di altri pixel in un'immagine successiva. Pertanto, le deformazioni vengono determinate considerando il movimento di piccoli gruppi di pixel, definiti subset; affinché si ottengano dei buoni risultati i subset non devono essere troppo grandi, in modo da avere una buona risoluzione spaziale. Il movimento di un subset viene tracciato considerando lo spostamento di un suo punto (solitamente quello centrale). I punti utilizzati per la correlazione sono definiti a intervalli regolari (step), in modo che subset vicini possano o meno sovrapporsi. Sfruttando i punti così definiti, i subset nell'immagine di riferimento vengono correlati numericamente con quelli di ogni immagine successiva. Da questa correlazione si ricavano infine le quantità di interesse. I subset devono essere sufficientemente grandi da poter essere distinti da tutti gli altri contenuti nella zona di interesse. Solitamente si assume come dimensione minima del subset 21×21 pixel, in modo da tenere in considerazione eventuali disomogeneità del pattern: infatti, non tutte le macchie avranno esattamente la stessa dimensione e la loro densità potrebbe non essere uniforme. La dimensione degli step è solitamente compresa tra un terzo e la metà della dimensione dei subset.

Il processo di analisi DIC può essere suddiviso in diverse fasi:

- Preparazione delle immagini: le immagini vengono acquisite utilizzando una telecamera o un altro dispositivo di imaging. È importante assicurarsi che le condizioni di illuminazione siano adeguate
- Tracciamento dei punti: i punti caratteristici sull'oggetto vengono selezionati e tracciati in entrambe le immagini. Questi punti dovrebbero essere distintivi e facilmente riconoscibili (nel nostro caso i punti fondamentali erano quelli al centro del provino, poichè rappresentavano meglio il comportamento del provino a strizione e snervamento in quanto quest'ultimo avviene in prossimità del centro del tratto utile)
- Calcolo dello spostamento: utilizzando algoritmi di tracciamento dell'immagine, viene calcolato lo spostamento dei punti tra le due immagini, fornendo informazioni sulla deformazione del provino
- Analisi dei dati: i dati di spostamento vengono analizzati per determinare le deformazioni e le tensioni locali sull'oggetto. Questo può includere il calcolo dei gradienti di deformazione, la generazione di mappe di tensione e l'identificazione di aree critiche o di interesse

1.3.3 Prove 2D-DIC

Ciò che caratterizza l'analisi DIC 2D è che può essere effettuata solamente in presenza di superfici piane, opportunamente levigate e con un'elevata finitura superficiale, riconducibili ad oggetti aventi 2 dimensioni. Tramite l'applicazione di questa tecnica si ottengono campi di spostamento e deformazione di superfici piane attraverso una singola camera. Un altro requisito per la determinazione accurata dei campi di spostamento è che la camera impiegata per l'acquisizione delle immagini sia posizionata con l'asse ottico perpendicolare alla superficie di misura (nel nostro caso la distanza tra obiettivo telecentrico e provino per la messa a fuoco era di 11 cm). Inoltre è richiesto che anche durante il suo spostamento o la sua deformazione la superficie di misura resti piana.

Il principio fisico alla base del funzionamento dell'analisi 2D DIC è il seguente: le telecamere sfruttano una proiezione centrale (prospettica) per ottenere sul sensore un'immagine 2D dello spazio tridimensionale inquadrato. Le caratteristiche di questo tipo di proiezione fanno sì che oggetti a diversa distanza dal sensore siano proiettati in un'immagine con diverso ingrandimento. Infatti quando un provino viene trazonato nella direzione assiale, per la legge di conservazione del volume subisce una contrazione nelle due direzioni ortogonali al suo asse: quest'effetto è chiamato "effetto Poisson".

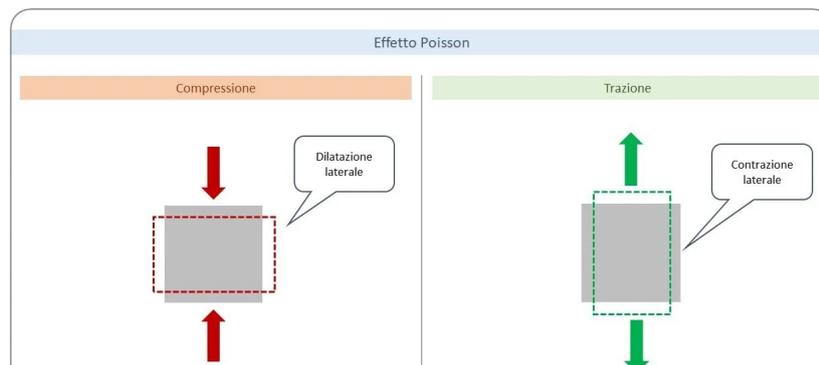


Figura 1.11: La figura mostra l'assottigliamento di un provino in seguito ad una sollecitazione di trazione

Pertanto tramite l'analisi DIC e l'utilizzo di lenti telecentriche si eliminano tutti gli errori dovuti alla prospettiva e ciò rappresenta un fattore molto importante per la corretta riuscita della prova. L'utilizzo di superfici non piane o non parallele al sensore della camera si traduce in regioni dell'oggetto a distanze diverse dal sensore: la tecnica DIC, anche se ugualmente funzionante, restituisce allora mappe di spostamenti distorte.

Un'ulteriore attenzione che deve essere posta nell'utilizzo di immagini per la misura dei campi di spostamento è la presenza di distorsioni ottiche nelle immagini stesse, queste modificano la posizione delle proiezioni rispetto al caso ideale. Tali distorsioni possono in genere essere compensate, a patto di conoscerne le caratteristiche. Per

questo motivo, le camera impiegate per l'acquisizione delle immagini sono in genere sottoposte a un processo di calibrazione, in cui un oggetto noto viene ripreso: la conoscenza della geometria dell'oggetto e dell'immagine generata dalla camera permette di ottenerne le caratteristiche, tra cui i parametri necessari a descrivere e compensare le distorsioni.

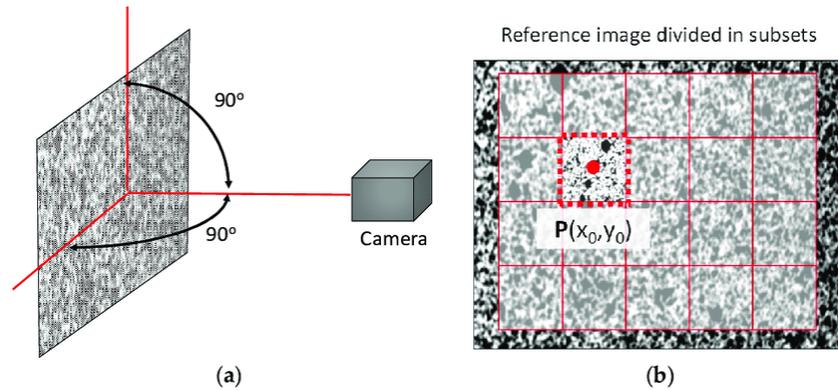


Figura 1.12: Set-up schematizzato di una correlazione di immagini 2D

1.3.4 Prove 3D -DIC

L'analisi DIC (Digital Image Correlation) 3D è una tecnica avanzata utilizzata per analizzare lo spostamento e la deformazione di oggetti tridimensionali tramite l'elaborazione di immagini digitali.

Rispetto alla DIC 2D, la DIC 3D coinvolge l'acquisizione e l'analisi di immagini tridimensionali dell'oggetto in studio tramite l'utilizzo di più telecamere o di un sistema di imaging 3D, per catturare la geometria e le deformazioni dell'oggetto da diverse angolazioni.

Il processo di analisi DIC 3D comprende diverse fasi:

- Acquisizione delle immagini 3D: queste vengono acquisite utilizzando un sistema di imaging 3D, che può coinvolgere telecamere multiple o tecnologie come sistemi laser. Così come nelle prove 2D, vengono dapprima prese le immagini in assenza di carichi esterni. Successivamente, dopo l'applicazione del carico, vengono prese ulteriori immagini e confrontate con quelle di riferimento (iniziali)
- Preparazione delle immagini: le immagini 3D acquisite vengono elaborate per rimuovere il rumore, allineare le diverse viste e ottenere una rappresentazione coerente dell'oggetto. Questo può richiedere la calibrazione delle telecamere o l'uso di algoritmi di registrazione per allineare le immagini
- Tracciamento dei punti: una volta ottenute le immagini 3D elaborate, vengono selezionati i punti caratteristici sull'oggetto e tracciati sulle diverse immagini. Questi punti possono essere identificati utilizzando algoritmi di riconoscimento

dei punti chiave o attraverso il posizionamento di marcatori sulle superfici dell'oggetto.

- Calcolo dello spostamento 3D: utilizzando le informazioni di tracciamento dei punti, viene calcolato lo spostamento 3D di questi sull'oggetto tra le diverse immagini. Questo calcolo tiene conto delle diverse prospettive fornite dalle telecamere o dalle diverse viste 3D
- Analisi dei dati: i dati di spostamento 3D possono essere utilizzati per calcolare le deformazioni locali e globali dell'oggetto, generare mappe di deformazione tridimensionale, misurare le tensioni e condurre analisi specifiche dell'applicazione. L'analisi può coinvolgere la valutazione della forma, la misurazione delle distorsioni, la verifica di modelli teorici o la validazione di simulazioni numeriche

L'impiego della tecnica 3D è strettamente vincolato al Set-up dell'operazione e in particolare alla posizione reciproca tra le due telecamere. La configurazione delle camere nella pratica è ottenuta attraverso una procedura di calibrazione, che consiste nell'acquisizione con entrambe le camere contemporaneamente di una serie di immagini di un oggetto. La conoscenza della geometria e delle dimensioni del target di calibrazione permette di ricavare la posizione relativa delle camere (parametri estrinseci), in aggiunta ai parametri intrinseci delle singole camera necessari per la compensazione delle distorsioni ottiche in modo analogo al caso 2D.

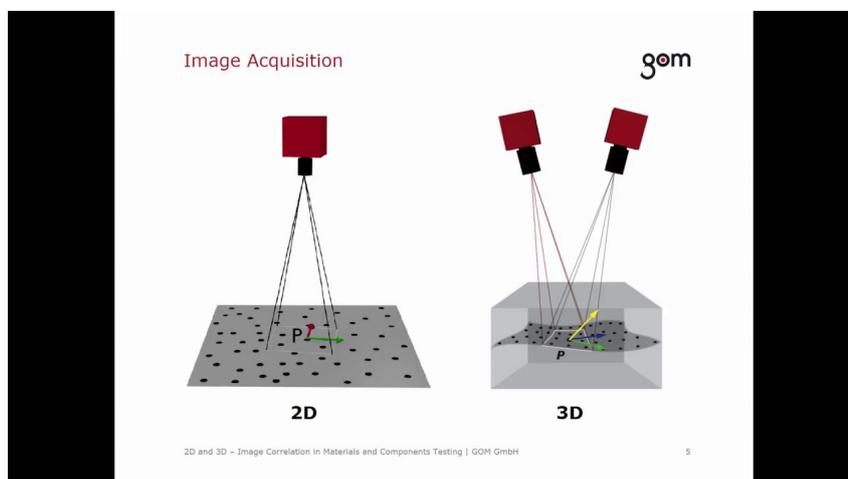


Figura 1.13: Set-up schematizzato di una correlazione di immagini 3D, evidenziando la differenza con il set-up di una prova 2D DIC

1.3.5 Preparazione delle superfici

L'impiego della tecnica DIC presuppone l'utilizzo di immagini che presentino un elevato gradiente di grigi. Al contrario l'analisi di immagini monocromatiche non permette di misurare spostamenti in quanto non è possibile definire nessun punto di riferimento per il tracciamento del movimento. Al fine di ottenere una buona correlazione, le superfici degli oggetti da analizzare devono quindi presentare alcune caratteristiche, in particolare:

- alternare zone cromatiche ad elevato contrasto, in modo da ottenere forti gradienti nei valori di intensità luminosa
- avere un carattere il più possibile random, in modo da evitare ambiguità nella ricerca delle corrispondenze tra subset

Nell'ambito pratico esistono degli oggetti che potrebbero dare dei risultati non attendibili e veritieri: per questo motivo devono essere preparati con l'applicazione di uno speckle. Si tratta di motivi tipicamente formati da uno sfondo bianco su cui vengono realizzate macchie nere (o viceversa, macchie bianche su sfondo nero) di forma e dimensione variabili in base alla tecnica impiegata per la realizzazione, e al tipo di immagini da acquisire. La realizzazione dello speckle può essere effettuata in diversi modi, in base alle esigenze del caso specifico: nel caso di test meccanici macroscopici sono comuni le realizzazioni con spray di vernice. Un parametro importante è il "coverage factor" (fattore di riempimento) che fornisce il valore dei pixel scuri rispetto alla totalità dei punti acquisiti; se compreso tra 0.4 e 0.7 allora la misura è ottimale.

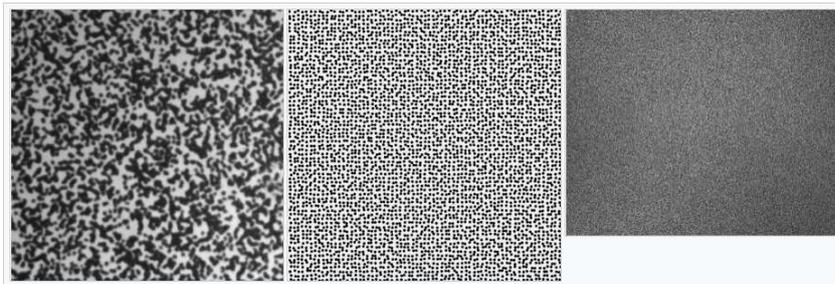


Figura 1.14: Esempi di speckle pattern. Da sinistra :speckle di 5 px(diametro) con un coverage factor di 0.3; al centro speckle di 5 pixel con un coverage factor di 0.5 e infine speckle 9 pixel

1.3.6 Determinazione del campo di spostamenti

Nel caso di una prova DIC 2D, le coordinate dei punti prima e dopo la deformazione possono essere rappresentate in un piano cartesiano. Indichiamo con x^* e y^* le coordinate del generico subset dopo la deformazione, con (x_i, y_i) le coordinate di riferimento del subset, ossia quelle in assenza di carichi esterni ed infine con (x_c, y_c) le coordinate del centro del subset. La relazione può essere approssimata mediante una trasformazione affine 2D:

$$x_i^* = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x}(x_i - x_c) + \frac{\partial u}{\partial y}(y_i - y_c)$$

$$y_j^* = y_j + v + \frac{\partial v}{\partial x}(x_i - x_c) + \frac{\partial v}{\partial y}(y_j - y_c)$$

Nella formula sopra riportata u e v indicano le traslazioni in direzione x e y dei centri dei subset. Quindi, per definire completamente il movimento di un generico subset si introduce un vettore \mathbf{P} composto da 6 componenti; i primi due rappresentano gli spostamenti mentre i restanti 4 indicano le deformazioni

$$\mathbf{P} := \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Dopo aver definito questi parametri il software, tramite degli algoritmi, identifica le immagini simili in base ai vari valori di intensità associati ai subset ed elabora una funzione di correlazione.

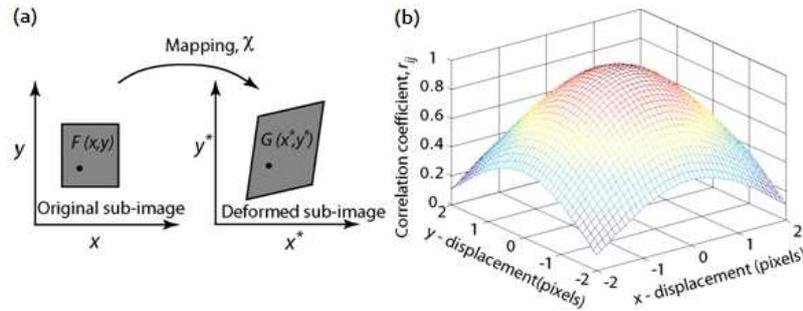


Figura 1.15: Concetto di spostamento e deformazione di un subset (sinistra) e esempio di funzione di correlazione (destra)

1.4 Ottiche telecentriche

1.4.1 Introduzione alle ottiche telecentriche

Negli ultimi anni le lenti telecentriche hanno preso sempre più piede nelle aziende e nei laboratori; queste, rispetto alle normali lenti, presentano dei miglioramenti nel software e nei sistemi di illuminazione. I campi di applicazione sono molteplici e possono essere di qualsiasi genere:

- Misurazione e ispezione industriale: sono ampiamente impiegate nella misurazione dimensionale e nell'ispezione di componenti industriali
- Imaging medico: sono utilizzate in applicazioni mediche come la microscopia e l'endoscopia
- Visione artificiale e robotica: sono impiegate in sistemi di visione artificiale e robotica per la misurazione e l'ispezione automatizzata
- Microfabbricazione e microelettronica: nella produzione di dispositivi elettronici e micro-componenti, le ottiche telecentriche sono utilizzate per l'ispezione dei wafer, la marcatura laser, la saldatura e altre operazioni di microfabbricazione
- Imaging scientifico: sono impiegate in vari campi della ricerca scientifica, come l'astronomia, la biologia e la fisica

1.4.2 Principio di funzionamento e differenza rispetto alle ottiche tradizionali

Le ottiche telecentriche sono una particolare tipologia di ottiche progettate per ricevere solo raggi di luce paralleli all'asse ottico.

Tramite queste lenti, si riducono al minimo gli errori dovuti alla prospettiva e la distorsione è minima. Usando un'ottica telecentrica, la grandezza dell'immagine rimane inalterata finché l'oggetto si muove entro una certa distanza definita come "profondità di campo". Questo è dovuto al particolare percorso ottico dei raggi luminosi: solo i fasci di raggi il cui raggio baricentrico (o "raggio principale") rimane parallelo all'asse opto-meccanico del sistema vengono raccolti dall'obiettivo. Per questo motivo il diametro della lente frontale deve essere almeno grande quanto la diagonale del campo oggetto.

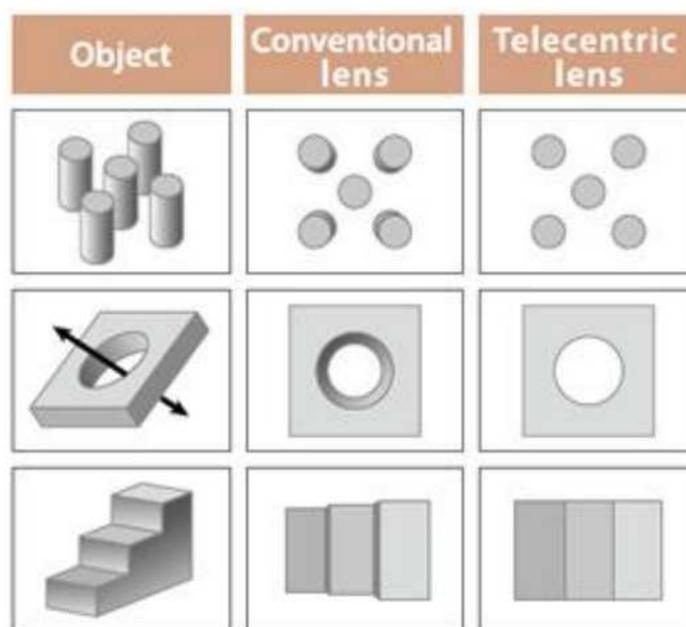


Figura 1.16: La figura mostra la differenza tra le lenti convenzionali e quelle telecentriche, evidenziando l'importanza delle ultime nei campi in cui sia richiesta un'elevata precisione

1.4 Ottiche telecentriche

Una differenza sostanziale rispetto alle lenti standard è determinata dall'angolo che si forma tra il fascio laser ed il piano di marcatura: con una lente normale l'angolo varia da 90° al centro del campo di marcatura fino a 60° all'estremità del campo. Questa differenza di angolazioni causa degli errori di prospettiva che non possono esistere nei campi di esercizio ad alta precisione. Invece nelle lenti telecentriche il fascio laser è sempre perpendicolare alla superficie da marcare.

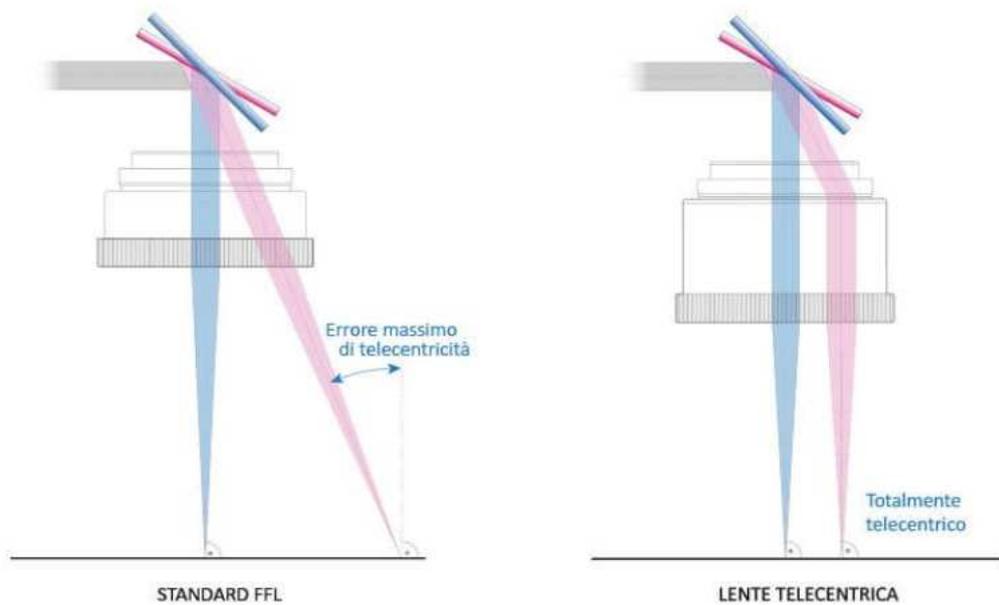


Figura 1.17: La figura evidenzia la differenza tra gli angoli che si formano tra fascio laser e superficie da marcare.

Un'altra differenza è rappresentata dall'area di marcatura: nelle lenti tradizionali l'area di marcatura risulta maggiore rispetto al diametro della lente a causa dell'inclinazione dei raggi; si ottengono quindi di campi di lavoro differenti. Nelle lenti telecentriche invece l'area di marcatura è inferiore rispetto alla dimensione della lente stessa e rimane costante nello spazio, fino al raggiungimento dell'oggetto da misurare.



Figura 1.18: La figura mostra la differenza tra i due campi di marcatura

L'ultima differenza che vale la pena citare è rappresentata dalla messa a fuoco: nelle lenti telecentriche il punto di fuoco è sempre uniforme e circolare su tutto il campo; invece nelle lenti standard la dimensione del punto di fuoco è variabile a causa della variazione dell'angolo tra fascio laser e piano di marcatura

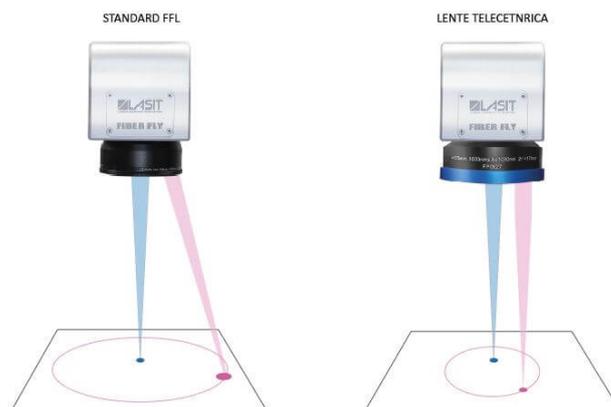


Figura 1.19: La figura mostra la differenza tra le due messe a fuoco

1.4.3 Set-up utilizzato inizialmente per la raccolta delle misurazioni

Prima di sviluppare il supporto motorizzato, la disposizione del set-up per la misura delle deformazioni appariva in questo modo:



Figura 1.20: Prima inquadratura



Figura 1.21: Seconda inquadratura

Notiamo che il sistema telecamera-obiettivo veniva poggiato su due treppiedi; sul primo veniva avvitata la telecamera, mentre sul secondo veniva appoggiato l'obiettivo. Inoltre anche l'illuminazione svolgeva un ruolo molto importante, infatti quest'ultima è necessaria per l'ottenimento di misure attendibili: il provino veniva illuminato tramite due lampade da lavoro poste rispettivamente a destra e sinistra

rispetto all'obiettivo. L'obiettivo telecentrico utilizzato aveva una messa a fuoco fissa: quest'ultimo infatti doveva essere posizionato ad una distanza di 11 cm dal provino. Obiettivo e telecamera vengono fissati tramite una filettatura presente nella parte terminale della telecamera. Di seguito troviamo le caratteristiche dei due strumenti. Telecamera:

- Model:Blackfly S BFS-U3-88S6M
- Firmware:1803.0.36.0
- Serial Number:21226067
- Part Number:BFS-U3-88S6M



(a) Telecamera vista da dietro



(b) Telecamera vista lateralmente

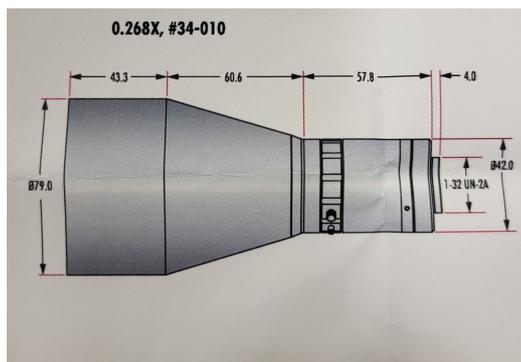
Figura 1.22

Obiettivo:

- Stock Number :34-010
- Serial Number:32247
- Mount: C-Mount
- Image Circle:16 mm
- Magnification nominal : 0.268x
- Magnification Measured: 0.268x
- Working distance nominal: 110.0 mm
- Working distance measured:110.0 mm



(a) Obiettivo telecentrico utilizzato per la misura di deformazioni



(b) Dimensioni telecentrico

Figura 1.23

Capitolo 2

Definizione dell'architettura

2.1 Schizzi iniziali della struttura

Per quanto riguarda il sistema di supporto che ci è stato chiesto di realizzare, questo deve essere applicato su una macchina di trazione presente nel laboratorio del dipartimento di Ingegneria industriale e Scienze matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

Agli inizi del tirocinio quindi abbiamo provato a realizzare degli schizzi che ci permettessero di decidere quale fosse la struttura migliore per la progettazione del supporto.

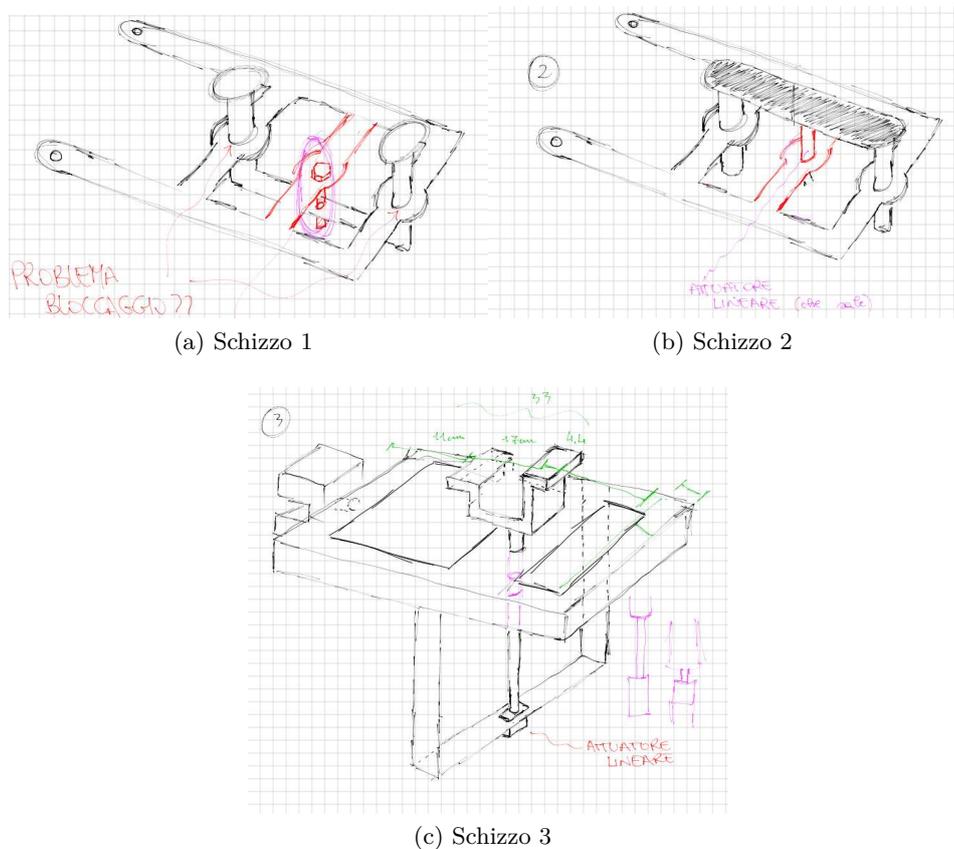


Figura 2.1: Schizzi realizzati inizialmente a mano libera

Capitolo 2 Definizione dell'architettura

Avevamo bisogno di una struttura stabile, che si potesse facilmente applicare al macchinario e che sostenesse la telecamera e l'obiettivo permettendo anche una loro movimentazione in direzione verticale per consentire alla telecamera e all'obiettivo di seguire il provino nella sua deformazione e per aumentare la probabilità che strizione e rottura fossero inquadrare. Il supporto doveva quindi potersi muovere con una velocità variabile, in quanto le prove possono essere svolte con velocità differenti, e doveva quindi essere collegato a un motore con velocità regolabile. Una volta realizzati numerosi schizzi a mano libera ci siamo confrontati con il Prof. Rossi per individuare insieme quale fosse la soluzione migliore per la definizione dell'architettura.

Inizialmente si era deciso di realizzare un pezzo unico che rimanesse fisso al macchinario e dotarlo di un attuatore lineare che permettesse la movimentazione in verticale. Andando ad installare un attuatore lineare però sarebbe risultata difficile la regolazione della velocità e inoltre, con le strutture da noi realizzate inizialmente, sarebbe stato impossibile effettuare una regolazione nelle altre due direzioni per permettere di centrare o avvicinare/allontanare la telecamera al provino. Si può notare inoltre, dagli schizzi sopra riportati, che erano state pensate due modalità di fissaggio del supporto al macchinario; avevamo pensato in primo luogo di fissare il supporto attraverso dei collegamenti filettati sfruttando dei fori già presenti sul macchinario e, come seconda opzione, era stato anche pensato di fissare il supporto attraverso una morsa che, opportunamente collegata al supporto, andasse a fissare la struttura alla macchina.

Dopo aver realizzato questi schizzi ci siamo quindi recati in laboratorio per poter prendere le varie misure:

- Misure del macchinario, che ci permettessero di decidere:
 - la distanza dei fori di fissaggio del supporto alla macchina in quanto su quest'ultima erano già presenti dei fori filettati
 - l'altezza del macchinario per poter valutare quanta corsa dare all'organo di movimentazione e quanto si dovesse rialzare/ribassare il supporto rispetto alla posizione del provino
- Misure della telecamera, per poterne progettare correttamente l'alloggio
- Misure dell'obiettivo, per poterne anche qui progettare correttamente l'alloggio

2.2 Soluzioni iniziali per la movimentazione

Una volta prese le misure, abbiamo iniziato a disegnare qualche componente sul CAD e nel mentre, dopo un confronto con il Prof. Chiappini, avevamo iniziato a valutare l'opzione di movimentazione il supporto attraverso un sistema di carrucole che, collegato alla parte mobile della macchina di trazione, permettesse di sollevare telecamera e obiettivo a una velocità pari alla metà della velocità di salita della parte mobile.

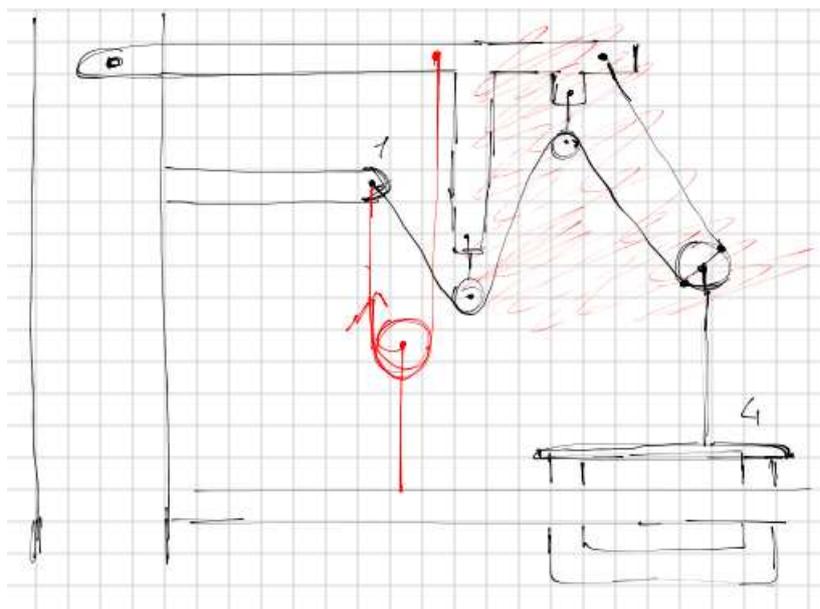


Figura 2.2: Schizzo con correzioni del sistema di sollevamento con carrucole

Accantonata però questa idea delle carrucole in quanto troppo complessa da realizzare, abbiamo deciso, per quanto riguarda il sistema di movimentazione, di introdurre un sistema formato da un martinetto lineare e un motore che ne permettesse la movimentazione con velocità regolabile.

Abbiamo quindi iniziato ad apportare delle modifiche alla struttura in maniera tale da poter introdurre martinetto e motore al posto dell'attuatore lineare scelto in precedenza. Una volta scelto il sistema di movimentazione verticale quindi ci siamo confrontati con il Prof. Rossi per valutare ulteriori modifiche per la struttura.

2.3 Suddivisione della struttura in parte fissa e parte mobile

Abbiamo dovuto quindi pensare a una soluzione per far sì che questo supporto fosse composto da una parte fissa e una parte mobile che potesse essere installata e rimossa senza troppi problemi; questa richiesta ci è stata fatta dal professore perché se avessimo realizzato il supporto come un pezzo unico questo sarebbe dovuto essere montato e smontato per ogni singola prova e questo, oltre a risultare scomodo e poco efficiente, avrebbe probabilmente anche rovinato i fori filettati già presente sul macchinario.

Abbiamo quindi iniziato a realizzare numerosi schizzi che riportassero anche qui quali erano le nostre idee per la realizzazione del supporto suddiviso in due parti, che poi abbiamo fatto visionare al Prof per poter capire quale soluzione fosse la migliore.

Una prima idea era quella di realizzare una parte che andasse fissata alla struttura attraverso degli organi filettati in maniera tale da sfruttare i fori già presenti sul macchinario senza dover stare però sempre a installare e rimuovere le viti necessarie per questo fissaggio. Su questo pezzo avevamo pensato di realizzare delle cavità che permettessero alla parte mobile di incastrarsi al suo interno in maniera tale da poterla collocare senza troppi problemi. Il vantaggio di questa soluzione era senza dubbio la semplicità di montaggio e smontaggio della parte mobile mentre i principali svantaggi erano la stabilità della struttura e la complessità della realizzazione di tali pezzi in quanto, nel corso della progettazione, dovevamo tener conto anche di come i pezzi da noi pensati potessero essere realizzati senza troppi problemi.

2.3 Suddivisione della struttura in parte fissa e parte mobile

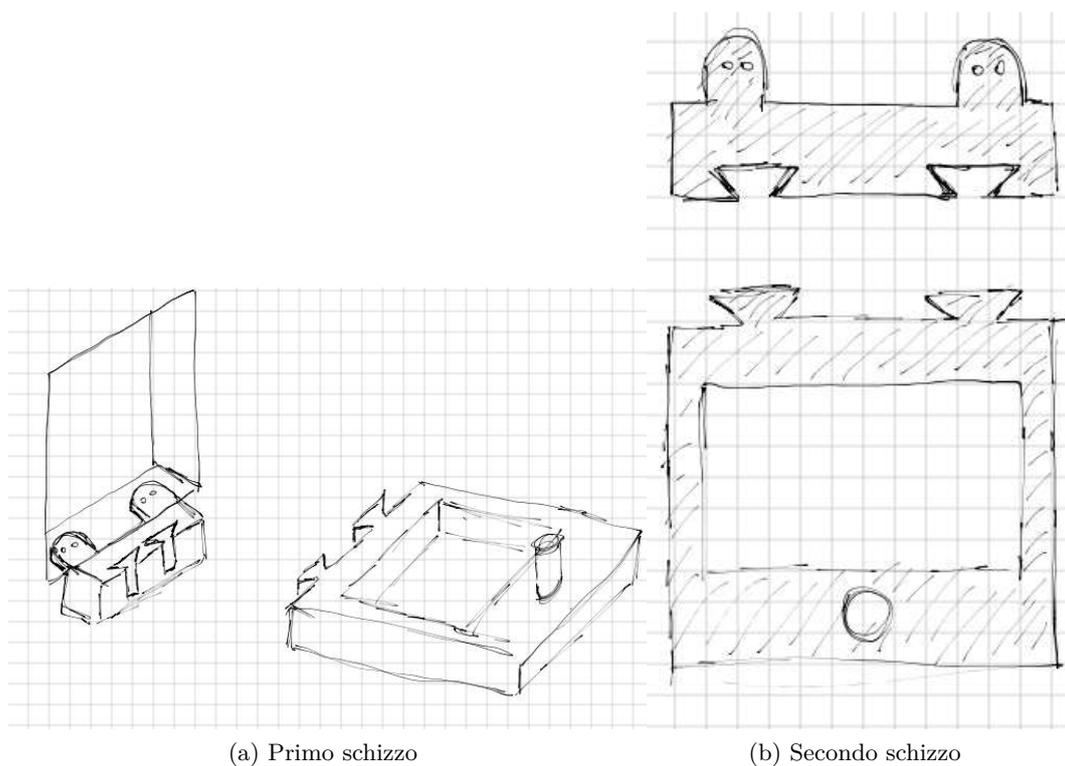


Figura 2.3: Suddivisione in parte fissa e parte mobile 1

Una seconda soluzione che è stata da noi presentata, e che successivamente è stata scelta come quella da realizzare, prevede il fissaggio con organi filettati sia della parte fissa al macchinario sia della parte mobile alla parte fissa.

La struttura riportata in figura rappresenta una prima idea di come poterla realizzare; andando avanti nel nostro lavoro abbiamo apportato delle modifiche alla struttura disegnata nello schizzo. I fori saranno posizionati in maniera tale da risultare allineati una volta posizionata la parte mobile sulla parte fissa mandandola a battuta.

Conclusa quindi questa prima fase di descrizione della struttura generale, nel capitolo successivo andremo ad analizzare più nel dettaglio ogni singolo componente del supporto riportando anche i disegni realizzati in maniera più dettagliata grazie all'impiego del software Solid Edge.

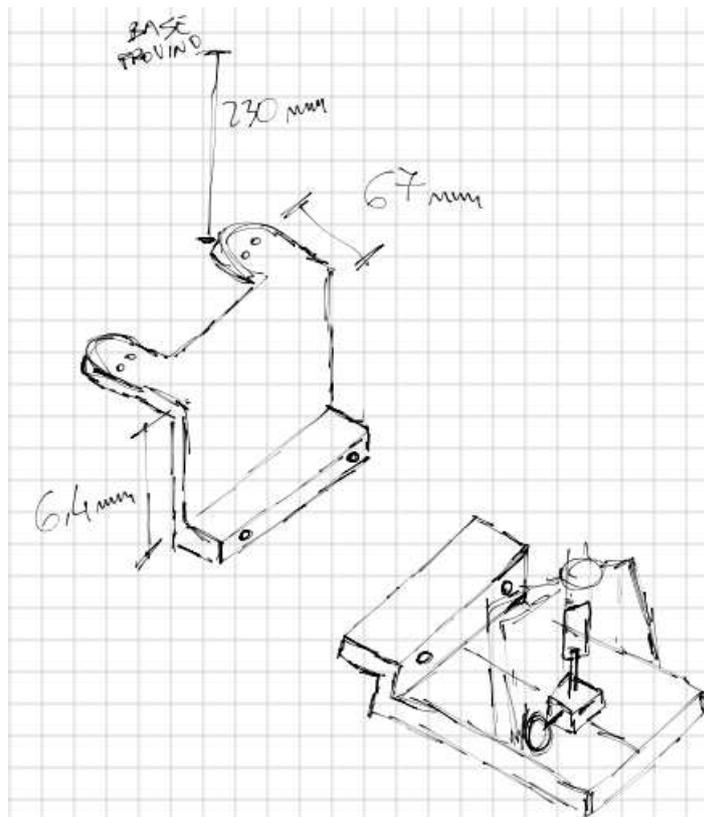


Figura 2.4: Suddivisione in parte fissa e mobile 2

Capitolo 3

Soluzione di dettaglio

3.1 Realizzazione del CAD dei vari pezzi

Dopo aver realizzato degli schizzi a mano libera ed esserci confrontati con il prof. Rossi, abbiamo iniziato a realizzare tramite il programma Solid Edge la geometria definitiva del supporto. Il supporto realizzato doveva essere facile da montare; in particolare doveva essere dotato di una parte fissa, da accoppiare con la macchina di trazione, e una parte mobile che potesse essere smontata e rimontata. L'iter che abbiamo seguito nella realizzazione del pezzo è stato questo:

- Realizzare un pezzo con una geometria facile, realizzabile tramite piegatura o altre tecniche di lavorazione facilmente applicabili
- Prevedere opportuni riferimenti, soprattutto sulla parte mobile, in modo da facilitarne il montaggio
- Prevedere dei raccordi per la saldatura, in modo da saldare quei pezzi che formavano geometrie più complesse
- Realizzare pezzi il più possibile universali, in modo che il supporto potesse essere utilizzato anche in applicazioni diverse da quelle per cui è stato progettato
- Realizzare parti smontabili, in modo da adattare anche i singoli pezzi alle diverse esigenze

3.1.1 CAD parte fissa

Dopo aver preso tutte le varie misure, abbiamo provveduto a realizzare il CAD del primo pezzo: la parte fissa del supporto.

Questo componente deve essere permanente: abbiamo deciso di realizzare una parte fissa e una mobile anzichè un pezzo unico per non rovinare i 4 fori di fissaggio presenti sulla macchina di trazione, visibili nell'immagine sotto riportata



Figura 3.1: La figura mostra i 4 fori di fissaggio presenti sulla macchina di trazione

3.1 Realizzazione del CAD dei vari pezzi

I fori interni sono posti ad una distanza di 164 mm, mentre quelli esterni distano 204 mm; tutti hanno un diametro di 9 mm.

Per avere una maggiore facilità durante il montaggio, abbiamo previsto sul supporto fisso due fori ad asola.

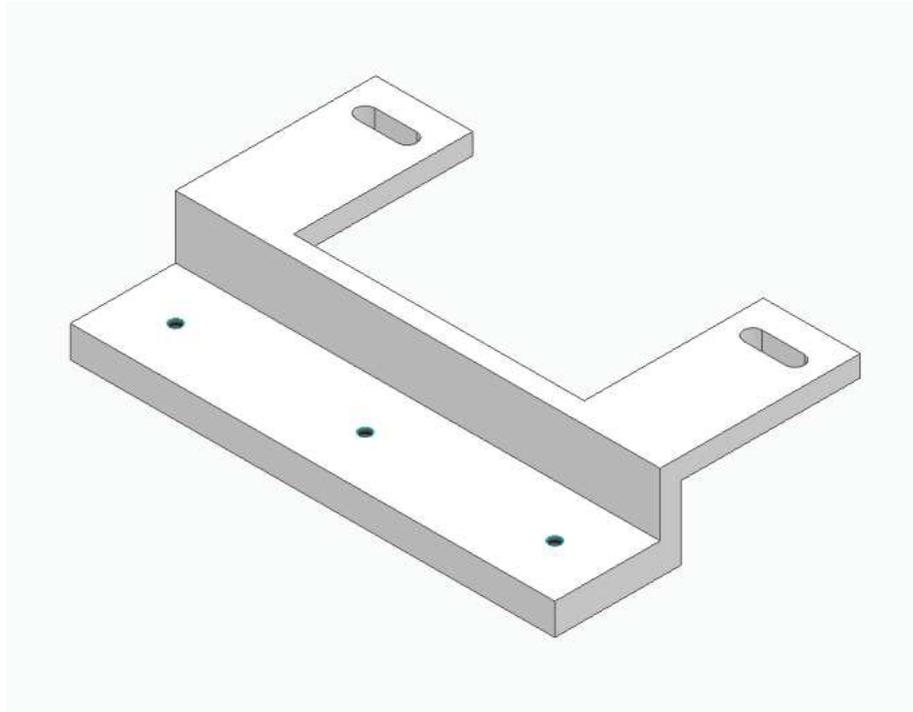


Figura 3.2: CAD parte fissa, da accoppiare alla macchina di trazione tramite i 4 fori di collegamento

Come si nota dalla figura sopra riportata, il pezzo presenta una superficie centrale che si estende verticalmente; questa superficie è stata realizzata in modo tale che il componente potesse andare a battuta con la macchina, garantendo il perfetto allineamento del supporto e quindi una maggiore precisione nel montaggio.

I 3 fori filettati di diametro 6 mm presenti sulla parte terminale invece permettono il collegamento della parte fissa alla parte mobile.

La parte fissa è quella che deve sorreggere tutto il peso della struttura; abbiamo previsto uno spessore di 15 mm in quanto questo componente, più degli altri, deve resistere ad una sollecitazione di flessione.

Capitolo 3 Soluzione di dettaglio

Tramite dei calcoli approssimativi, utilizzando la formula di Navier Stokes, abbiamo ottenuto le tensioni agenti sulla struttura.

$$\sigma_z = \frac{M_x}{I_{xx}} y$$

Dove:

σ_z è la tensione unitaria di sforzo normale, di dimensioni [N/m²]

M_x è il momento flettente agente lungo l'asse x, di dimensioni [Nm]

y è la distanza di un'area elementare dall'asse neutro

$J = I_{xx}$ è il momento d'inerzia (di superficie) lungo l'asse neutro

Dopo aver calcolato le tensioni agenti e averle confrontate con quella di snervamento, abbiamo calcolato lo spessore prevedendo un elevato coefficiente di sicurezza.

3.1.2 CAD parte mobile(smontabile)

Dopo aver realizzato la parte permanente, abbiamo proseguito con la realizzazione di una parte mobile. Questo componente è dotato di:

- 3 fori filettati, di diametro 6 mm che ne permettono il fissaggio alla parte fissa
- 8 fori lisci di diametro 4.5 mm, che permettono il fissaggio delle slitte poste alle due estremità del componente, necessarie per la movimentazione del supporto lungo una specifica direzione
- Una parte cava presente nel centro del pezzo; è stata realizzata per alleggerire il supporto, evitare di sprecare materiale e permettere il passaggio della vite trapezoidale del martinetto

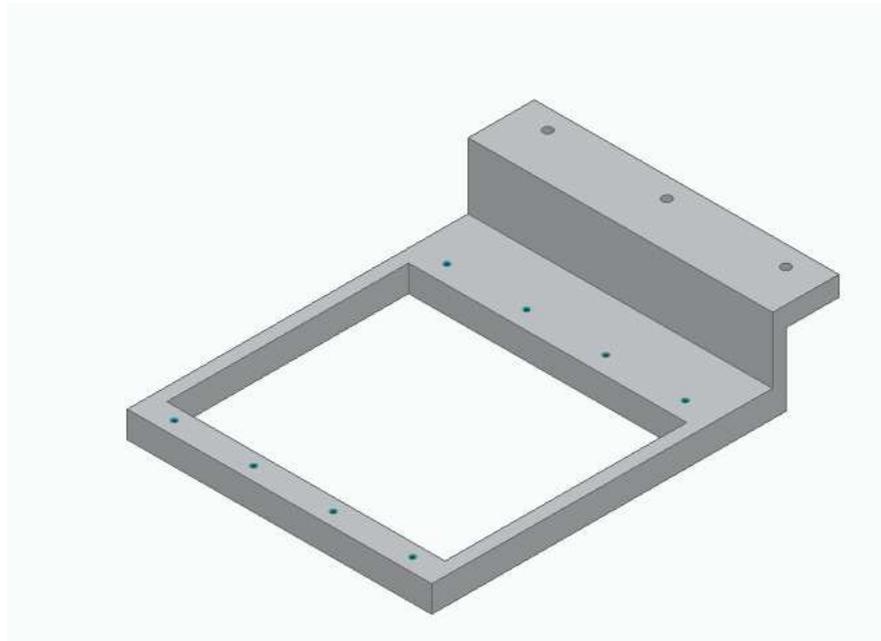


Figura 3.3: CAD della parte mobile, da accoppiare con la parte fissa tramite i 3 fori di collegamento

L'accoppiamento tra parte fissa e mobile costituisce lo "scheletro" del supporto: sulla parte mobile poi verranno montati tutti i componenti per la movimentazione che vedremo nel capitolo successivo.

Un fattore che bisogna considerare è il perfetto allineamento tra le due superfici che vengono accoppiate per garantire un'estrema precisione nelle misure.

Inoltre la parte che si estende verticalmente è stata progettata per andare a battuta con la parte terminale del componente fisso.

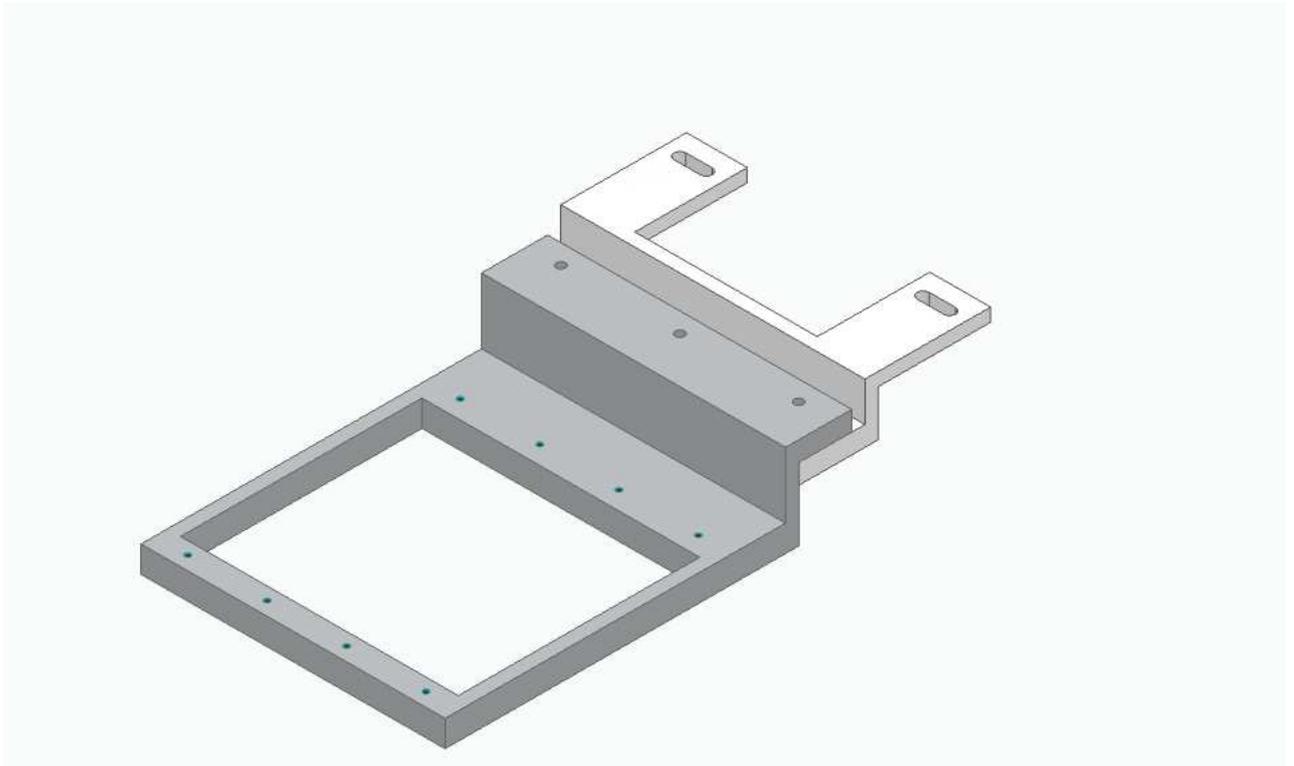


Figura 3.4: Assemblaggio parte fissa-mobile

3.1.3 CAD alloggiamento martinetto e motore

Il componente che andremo a descrivere in questo paragrafo è stato pensato per poter permettere di collocare all'interno del supporto il martinetto accoppiato al motore elettrico. Questo pezzo verrà poi collegato, attraverso dei collegamenti filettati, a un pattino che ne permette la movimentazione sul piano in direzione ortogonale al macchinario.

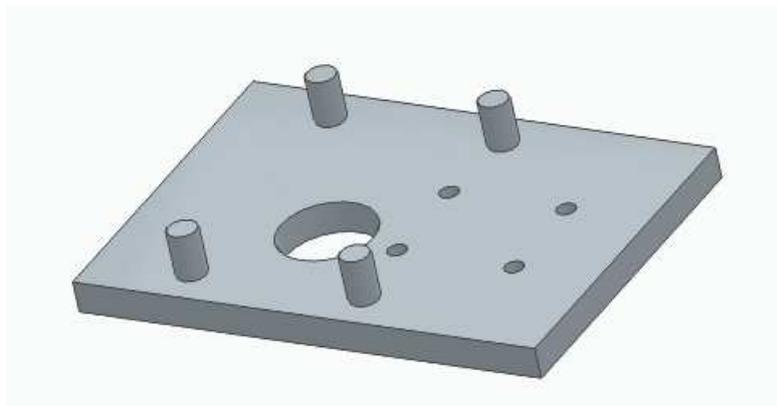


Figura 3.5: CAD del contenitore di martinetto e motore

Come si può vedere dal CAD questo pezzo è stato dotato di:

3.1 Realizzazione del CAD dei vari pezzi

- Un foro più grande, per permettere il passaggio della vite del martinetto che deve poter scendere e salire senza nessun problema. Questo foro è stato realizzato non filettato con un diametro di 30 mm appunto perchè, una volta scelto il martinetto, la vite di quest'ultimo avrà una dimensione tale da doverci passare all'interno
- 4 fori più piccoli, realizzati per il fissaggio del contenitore al pattino. Il loro diametro di 6 mm è stato deciso, anche qui, tenendo conto della dimensione dei fori presenti sul pattino; fori non filettati per permettere il passaggio delle viti che poi andranno a esercitare una pressione sul contenitore rendendolo solidale al pattino;
- 4 piccoli cilindri estrusi, di diametro 9 mm, realizzati in quanto nella parte inferiore del martinetto sono presenti 4 fori di tale diametro: tramite l'inserimento di questi 4 cilindri estrusi all'interno di tali fori si riesce a mantenere il martinetto fermo una volta collocato sulla piastra contenitore.

Lo spessore di questo componente è stato scelto con l'intento di rendere la struttura più leggera possibile in quanto non deve sopportare grandi carichi ma deve solo permetterci di collocare martinetto e motore nel modo corretto nel nostro supporto ed essendo questi di un peso non troppo eccessivo non c'era bisogno di uno spessore troppo elevato.

3.1.4 CAD pezzo di collegamento tra il martinetto e l'alloggio di telecamera e obiettivo

Questo pezzo è stato realizzato per permettere di collegare la vite del martinetto al pezzo superiore su cui andremo ad alloggiare la telecamera e l'obiettivo. Prima di decidere come realizzare questo pezzo abbiamo dovuto scegliere tra vari tipi di teste del martinetto in quanto, in base alla testa del martinetto scelta, questo componente sarebbe dovuto essere realizzato in un determinato modo.

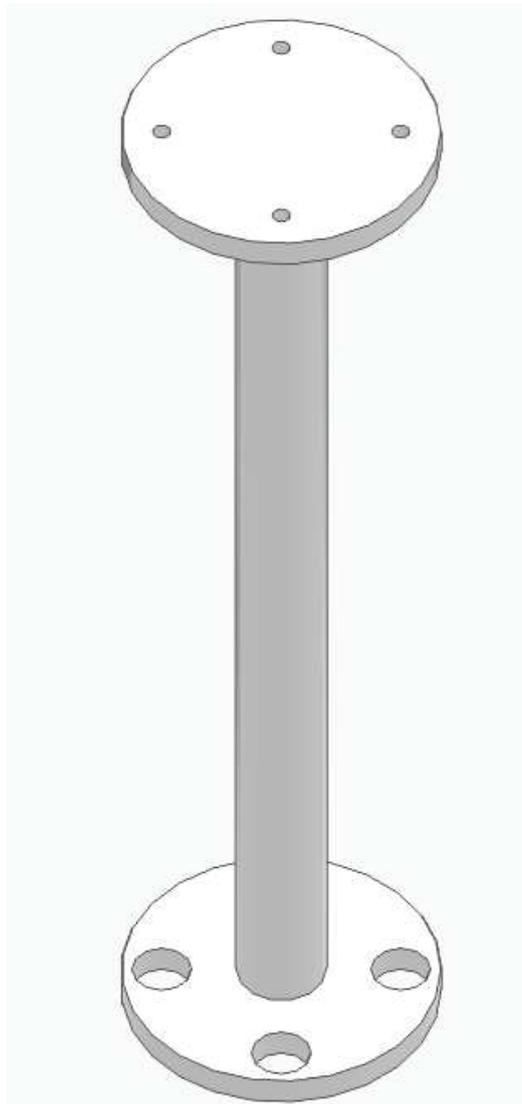


Figura 3.6: CAD del collegamento tra martinetto e alloggio di telecamera e obiettivo

I fori sulle due superfici, come si può notare, sono di diametri differenti perchè:

- I fori più grandi posti nella superficie inferiore (8 mm), sono stati realizzati di quel diametro per permettere il collegamento al martinetto

3.1 Realizzazione del CAD dei vari pezzi

- I fori sulla faccia superiore, di diametro più piccolo (3 mm), necessari per il fissaggio del componente al contenitore di telecamera e obiettivo,

Per quanto riguarda questo componente è stato fatto di un'altezza tale che, quando il martinetto si trova a riposo, la telecamera si trovi più o meno all'altezza del provino. Bisogna inoltre per questo pezzo, come ancora di più il martinetto, tenere sotto controllo l'altezza in quanto questi potrebbero essere soggetti a valori critici di oscillazione o potrebbero, nel peggiore dei casi, cedere per carico di punta, il che nel nostro caso non è possibile in quanto la forza peso esercitata dai componenti posti sopra di esse non è di entità così eccessivamente elevate.

Inizialmente questo pezzo non era stato previsto in quanto si era pensato di fare di questo e del contenitore di telecamera e obiettivo un pezzo unico ma successivamente, per far fronte a un'eccessiva difficoltà che si sarebbe potuta presentare una volta andati a realizzare il componente, abbiamo optato per realizzare due pezzi separati per semplificarne la realizzazione.

3.1.5 CAD della piastra collegata al sistema frenante ,su cui sono montati il pattino e la slitta centrali

Il progetto del supporto continua con la realizzazione della piastra collegata al sistema frenante.



Figura 3.7: CAD della piastra

Come si nota dalla figura il componente è dotato di diversi fori: i 4 fori visibili in basso nell'immagine sopra riportata, di diametro 4 mm, permettono il collegamento diretto della piastra al sistema frenante , permettendo così il serraggio.

Nella parte centrale notiamo la presenza di altri fori: quelli di diametro maggiore, lisci e con diametro 4.5 mm, garantiscono il montaggio della slitta tramite degli appositi perni.

I fori più piccoli invece , lisci e di diametro 3.5 mm permettono il collegamento diretto ai pattini, permettendo così il movimento della piastra. Questo pezzo, come vedremo nel capitolo successivo, è molto funzionale in quanto permette l'utilizzo di un solo freno meccanico anzichè due.

3.1.6 CAD pezzo di collegamento pignone e piastra e CAD bloccaggio pignone

Il componente mostrato nella figura sottostante ha una geometria molto semplice ma un ruolo fondamentale: si tratta di un piccolo pezzo che permette di rendere solidali tra loro il pignone, che andremo ad analizzare successivamente, e la piastra trattata nel sottocapitolo precedente. Questo componente viene reso solidale alla piastra necessaria per il bloccaggio attraverso una saldatura o, nel caso non fosse possibile, vengono realizzati due fori non filettati su questo pezzo e due filettati sulla piastra per collegarli.

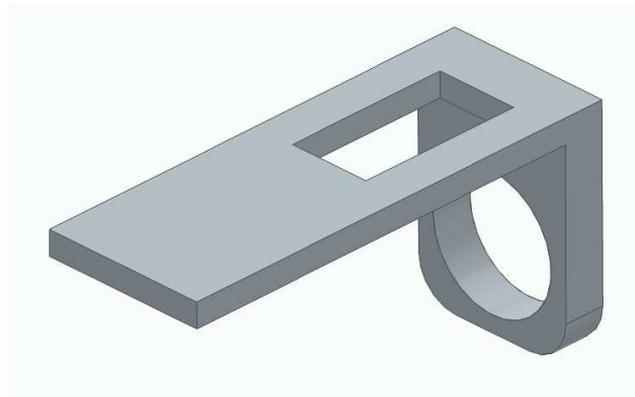


Figura 3.8: CAD del pezzo che unisce il pignone alla piastra

In questo pezzo sono stati realizzati un foro circolare all'interno del quale deve passare l'alberino che, mosso manualmente, permette la rotazione del pignone e un foro rettangolare all'interno del quale bisogna inserire il pezzo necessario per bloccare la rotazione del pignone.

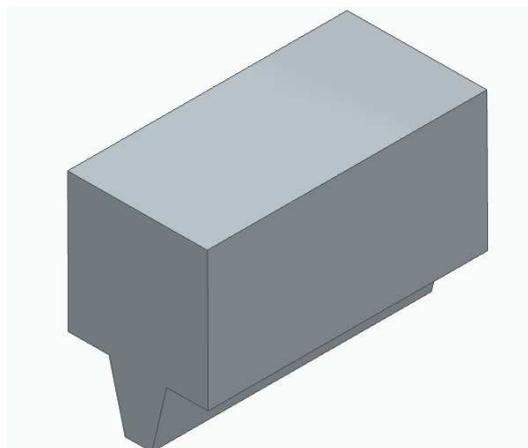


Figura 3.9: CAD del pezzo per il bloccaggio del pignone

Questo pezzo è stato progettato in maniera tale da essere inserito tra due denti del pignone impedendone quindi la rotazione.

3.1.7 CAD alloggiamento telecamera

L'ultimo componente realizzato è stato l'alloggio della telecamera: questo pezzo tramite 4 fori di collegamento viene accoppiato al pezzo cilindrico verticale, in modo da renderlo solidale con tutta la parte della struttura in movimento. Notiamo la presenza di un foro ad asola nella parte terminale della struttura; questo foro permette il fissaggio della telecamera e ne consente anche la regolazione, tramite un dado e una vite posti al di sotto del foro. Nell'estremità opposta si nota invece la presenza di una superficie cilindrica scavata, che permette l'alloggio dell'obiettivo telecentrico. I 4 fori presenti sono lisci, con un diametro di 3 mm; nel pezzo cilindrico verticale sottostante invece sono stati previsti fori filettati.

Il CAD del pezzo appare in questo modo:

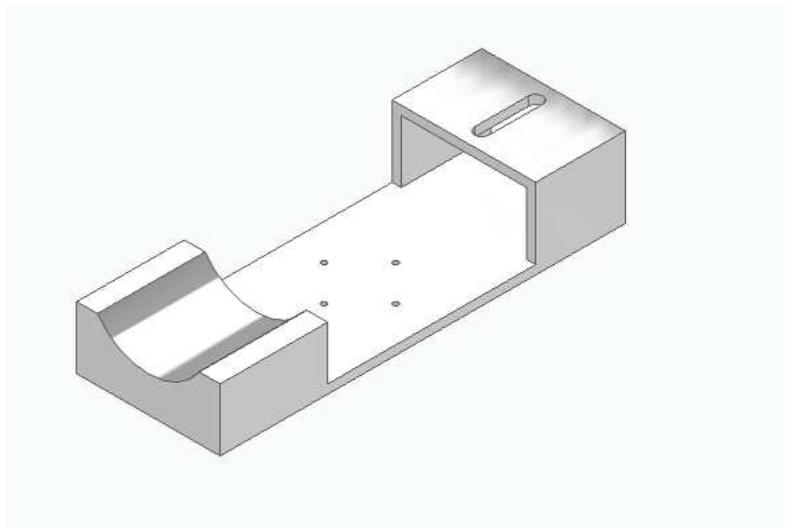


Figura 3.10: Cad dell'alloggio della telecamera

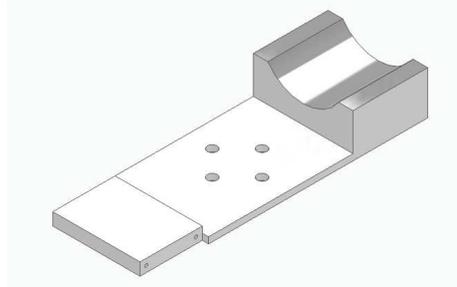
Dopo esserci confrontati con il Prof. Rossi e l'Ing. Morichelli, abbiamo deciso di realizzare questo pezzo tramite stampa 3D.

In questo modo il pezzo diventava molto più leggero perché in plastica e non più in acciaio come il resto della struttura; inoltre diventava intercambiabile e quindi adattabile a diverse situazioni.

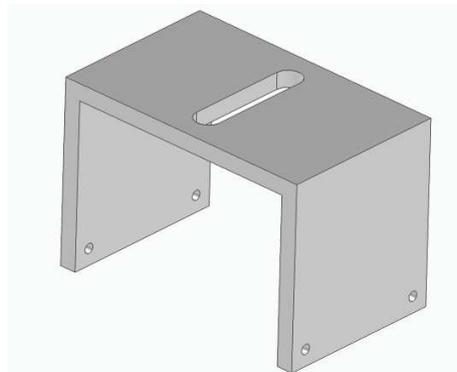
A questo punto nasceva un problema: la stampante 3D non era in grado di realizzare un pezzo unico; in particolare si verificavano dei problemi nella parte contenente il foro ad asola, in quanto la macchina non era in grado di creare questa parte superiore, che formava un angolo di 90° con le due superfici laterali. Questo accadeva perché la stampante 3D crea degli strati che poi si consolidano: nella parte superiore questi strati non riuscivano a consolidarsi in quanto mancava una superficie di appoggio.

3.1 Realizzazione del CAD dei vari pezzi

Per svincolarci dal problema, abbiamo deciso di realizzare due pezzi differenti, prevedendo altri 4 fori di fissaggio necessari per il collegamento dei due. In questa maniera il pezzo contenente il foro ad asola veniva realizzato con la parte superiore poggiata sul piano di stampa.



(a) Parte 1



(b) Parte 2

Di seguito riportiamo il CAD definitivo dell'alloggio della telecamera, ottenuto fissando i due pezzi tramite i 4 fori di collegamento

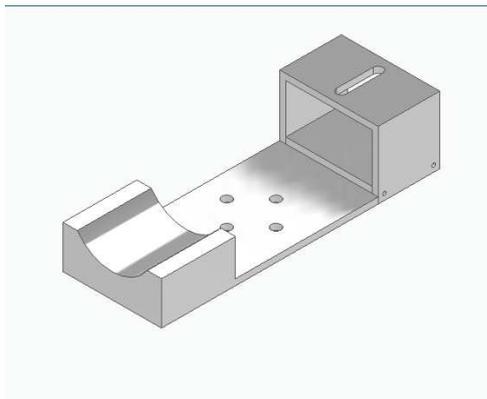


Figura 3.11: CAD definitivo dell'alloggio telecamera-obiettivo

3.2 Manifattura additiva

La manifattura additiva utilizza tecnologie anche molto diverse tra loro generando e sommando strati successivi di materiale anzichè utilizzare metodi classici di sottrazione del materiale. I vantaggi sono innumerevoli ma come andremo a vedere questo metodo porta con sè anche qualche svantaggio.

Dal punto di vista della produzione si tratta di un'importantissima evoluzione nell'ambito della più ampia tendenza alla digitalizzazione della manifattura, messa in atto grazie alla comunicazione tra computer e macchine.

La manifattura additiva non è un'innovazione recente in quanto sappiamo che sin dalla prima metà degli anni '80 viene utilizzata nella prototipazione rapida, ma negli ultimi anni le opportunità di utilizzo di questa tecnologia si sono molto ampliate grazie alla possibilità di produrre oggetti di dimensioni maggiori in una gamma molto più ampia di materiali e con tempi di produzione di molto inferiori rispetto al passato. Con il tempo anche il costo delle macchine è diminuito notevolmente rendendole più accessibili a tutti.

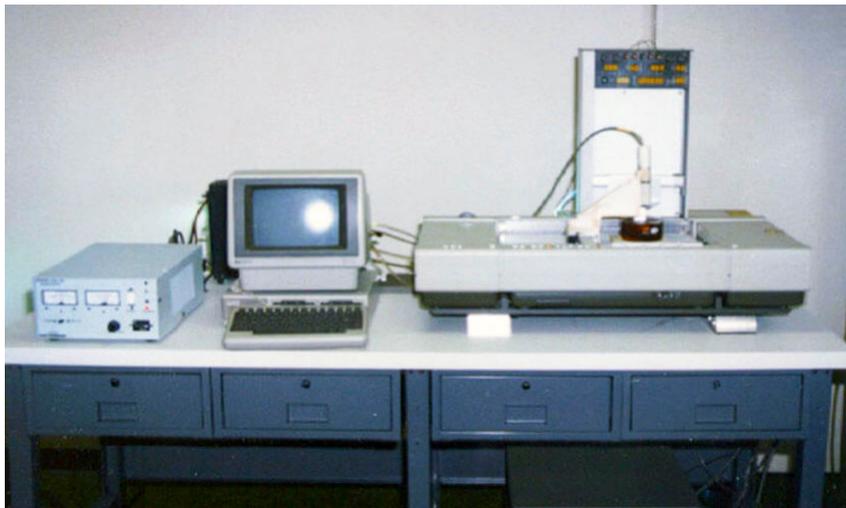


Figura 3.12: Una delle prime stampanti 3d

Per comprendere al meglio le potenzialità della manifattura additiva vanno considerati due fattori:

- Il primo fattore è la possibilità di produrre componenti con geometrie molto complesse e impossibili da produrre come un pezzo singolo in altro modo con le tecniche tradizionali, modificandone la struttura con un minore impiego di materie prime (in quanto non avremo bisogno di andare a sottrarre materiale una volta terminata la lavorazione), maggiori prestazioni e possibilità di utilizzare materiali diversi da quelli più comunemente utilizzati oggi
- Il secondo è quello di far sì che i costi di realizzazione rispetto a un modello base siano sostanzialmente nulli

Questi fattori ci permettono di affermare che la manifattura additiva sia poco indicata per la produzione di grandissima serie ma che possa aprire nuove possibilità alla "personalizzazione di massa" permettendo la produzione massiva di pezzi con geometrie personalizzate.

3.2.1 Motivi e campi di impiego della manifattura additiva

In base a quanto detto la manifattura additiva risulta quindi più adatta nei settori in cui:

- È la tecnologia più indicata, cioè quando questa permette di ridurre i costi permettendo comunque di realizzare oggetti con caratteristiche tecniche uguali o superiori, o addirittura di ottenere standard qualitativi unici non ottenibili con tecniche tradizionali
- È la tecnologia più competitiva sui costi solo a condizione di modificare il disegno dell'oggetto da realizzare. Le modifiche del design permettono di valorizzare al massimo il potenziale della manifattura additiva senza compromettere le caratteristiche tecniche dell'oggetto. Si tratta di una fattispecie con una potenzialità di applicazione nei settori più svariati, a condizione che la progettazione o la re-ingegnerizzazione costruttiva siano con le potenzialità delle tecnologie adattive
- Quando la tecnologia non è competitiva in termini assoluti ma può essere economicamente vantaggiosa per altre motivazioni

Tre casi particolarmente rilevanti sono da prendere in considerazione:

- Quando il pezzo stampato in 3D costa di più ma la manifattura additiva permette di "immagazzinare file" anziché prodotti permettendo quindi di ottenere un notevole risparmio per quanto riguarda i costi di magazzino
- Quando la manifattura additiva permette di far fronte alla improvvisa mancanza di componenti per la produzione in linea
- Quando la manifattura additiva permette la re-ingegnerizzazione costruttiva di pezzi più efficienti e più costosi che consentono di aumentare la produttività di impianti industriali già esistenti

3.2.2 Principio di funzionamento della manifattura additiva

Come precedentemente detto, la manifattura additiva utilizza tecnologie anche molto diverse tra loro generando e sommando strati successivi di materiale. La possibilità di passare da un file di testo a una stampa su carta fa parte ormai da decenni delle nostre pratiche di uso quotidiano mentre la possibilità di "stampare" un oggetto a partire da un disegno CAD appartiene per ora all'esperienza di un numero notevolmente più basso di operatori.

Il processo di manifattura additiva solitamente inizia quindi con la creazione di un modello 3D del prodotto desiderato utilizzando software di progettazione assistita dal computer (CAD). Il file CAD viene quindi suddiviso in strati sottili e inviato alla stampante 3D.

Possiamo quindi individuare vari passaggi per la stampa 3D:

- **Modellazione 3D:** viene creato un modello digitale tridimensionale dell'oggetto desiderato utilizzando software di modellazione CAD (Computer-Aided Design) o tramite tecniche di scansione 3D
- **Preparazione del file:** il modello 3D viene trasformato in un file che può essere letto dalla stampante 3D. Durante questa fase è possibile impostare diversi parametri, come la densità degli strati o il riempimento interno dell'oggetto
- **Stampa:** il file viene caricato nella stampante 3D, che inizia a costruire l'oggetto strato dopo strato, seguendo le istruzioni del modello digitale. A seconda della tecnologia utilizzata, possono essere impiegati diversi processi, come la deposizione di filamenti fusi (FDM), la fotopolimerizzazione (SLA) o la sinterizzazione laser selettiva (SLS)
- **Rifinitura:** una volta completata la stampa, l'oggetto può richiedere delle operazioni di rifinitura, come la rimozione di supporti di stampa o la levigatura delle superfici

Ci sono quindi diversi metodi di stampa 3D disponibili, ma i principali sono:

- Stereolitografia (SLA): Utilizza un laser per solidificare uno strato di resina fotosensibile, creando uno strato solido. Successivamente, il piano di lavoro si abbassa e un nuovo strato di resina viene applicato sopra quello precedente. Questo processo viene ripetuto fino a completare l'oggetto

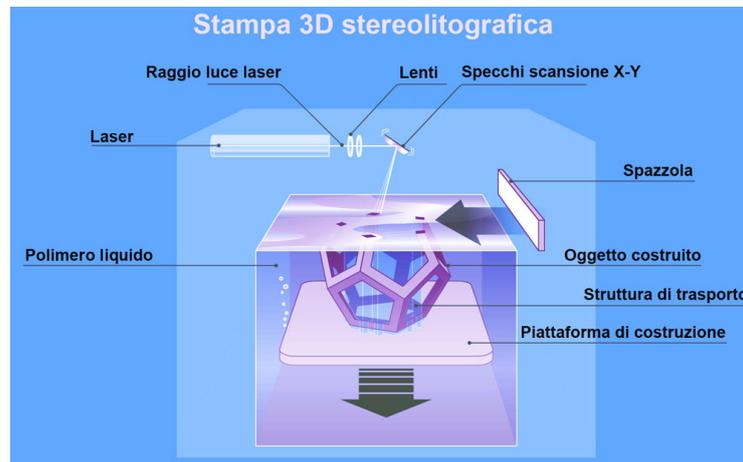


Figura 3.13: Stampa stereolitografica

- Fusione a letto di polveri (SLS): Un laser fonde selettivamente uno strato di polvere, sollevando il piano di lavoro di un piccolo incremento e applicando un nuovo strato di polvere. La fusione dei punti desiderati continua fino a ottenere l'oggetto completo

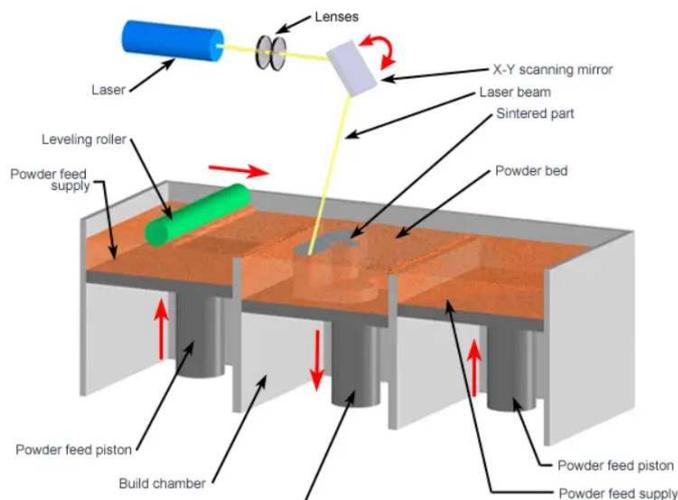


Figura 3.14: Stampa per fusione a letto di polveri

- Fusione diretta di metallo (DMLS): Simile alla tecnologia SLS, ma utilizza polveri metalliche invece di polveri di plastica. Un laser fonde il materiale metallico strato dopo strato per creare l'oggetto finale

Capitolo 3 Soluzione di dettaglio

- Per sovrapposizione di strati di materiale (LOM): un processo di manifattura additiva meno conosciuto rispetto a quelli citati finora è la LOM. Questo processo consiste nel tagliare un rotolo di materiale (il più comune è la carta) e mediante una resina che fa da collante sovrapporre strato su strato questi “fogli” di materiale tagliato

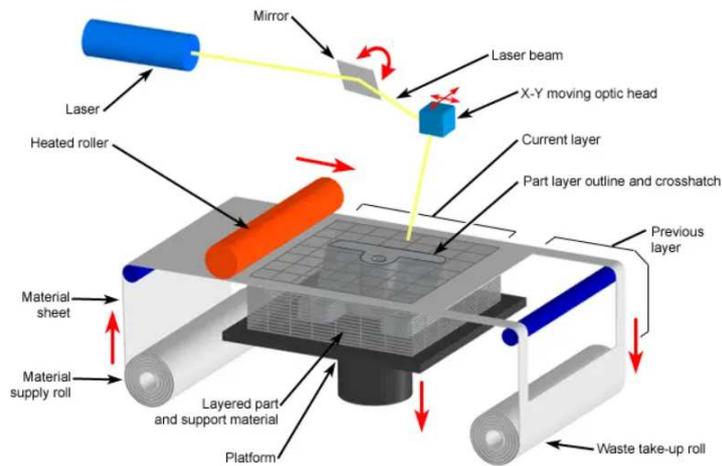


Figura 3.15: Stampa per sovrapposizione di strati di materiale

- Deposizione di materiale fuso (filamento) (FDM): Utilizza un filamento di materiale polimerico termoplastico che viene fuso e depositato in strati sovrapposti per costruire l'oggetto

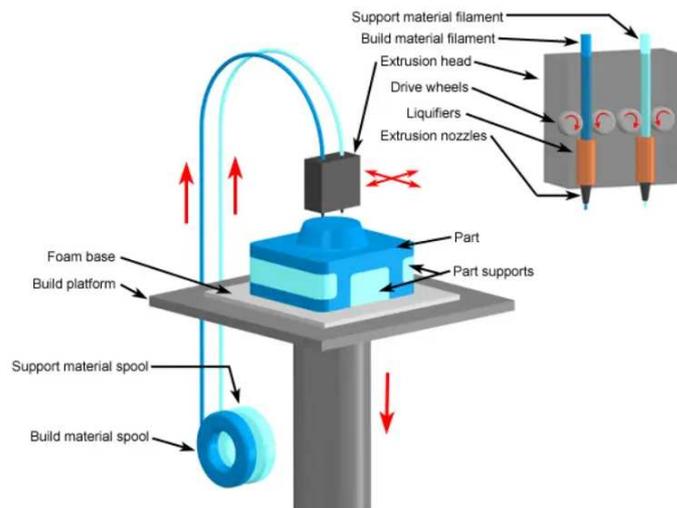
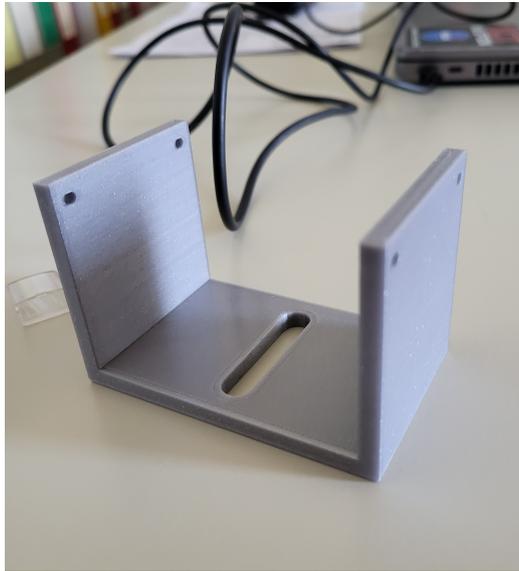


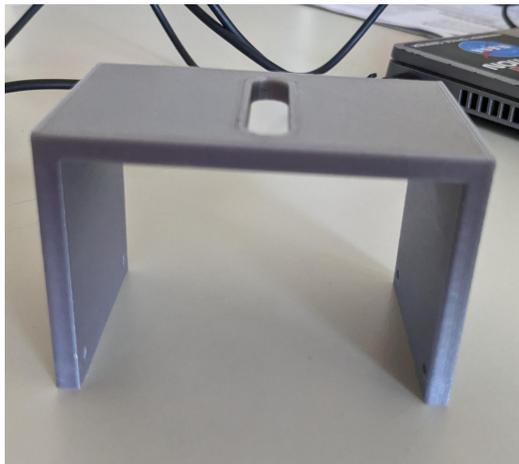
Figura 3.16: Stampa per fusione di filamento

È proprio questa la tecnica utilizzata dalla stampante 3D con cui abbiamo potuto realizzare i due componenti necessari per il sostegno della telecamera e dell'obiettivo.

Riportiamo quindi di seguito alcune foto di uno dei pezzi realizzati con la nuova stampante 3D presenti all'università politecnica delle Marche



(a) Prima foto del pezzo stampato con stampante 3D



(b) Seconda foto del pezzo stampato con stampante 3D

Figura 3.17: Pezzo stampato con la stampante 3D

Capitolo 4

Scelta componenti

4.1 Scelta martinetto

L'idea iniziale era quella di scegliere un attuttore lineare per la movimentazione verticale ma per motivi dovuti alla difficoltà di regolazione della velocità abbiamo optato per un martinetto. Il primo elemento scelto per la movimentazione è stato quindi il martinetto elettrico, che consente di convertire un movimento rotatorio impartitogli da un motore elettrico in un movimento traslatorio verticale della vite trapezoidale.

Il movimento dell'asta trapezia trasferisce il moto al supporto cilindrico verticale che a sua volta permette la salita e la discesa del componente su cui alloggia la telecamera. Tramite questo movimento la telecamera riesce sempre a seguire la parte centrale del provino trazionato di cui si vuole misurare la deformazione.

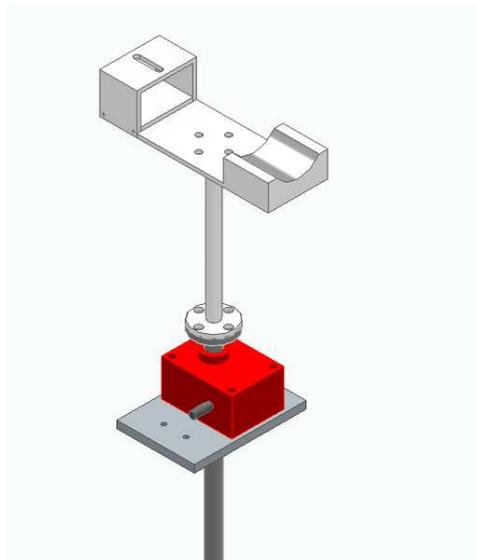


Figura 4.1: Installazione del martinetto sulla struttura

Capitolo 4 Scelta componenti

I martinetti elettrici sono adatti a carichi non troppo eccessivi con cicli brevi, inoltre garantiscono un'estrema precisione. Il martinetto scelto è quello mostrato nella figura sottostante:

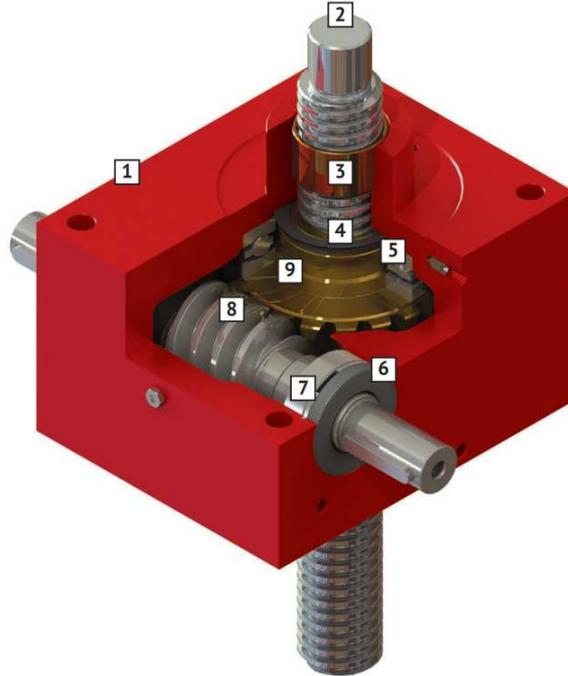


Figura 4.2: Esploso martinetto

- 1 - CORPO: in lega di alluminio ENAC-AlSi10Mg
- 2 - VITE TRAPEZOIDALE: in C45E EN10083
- 3 - BOCCOLA ANTIFRIZIONE: in bronzo per favorire lo scorrimento o la rotazione della vite
- 4 - ANELLO DI TENUTA FRONTALE: in gomma nitrilica. Disponibile anche in Viton per elevate temperature di impiego
- 5 - CUSCINETTO PER VITE TRAPEZOIDALE: per sostenere i carichi applicati al martinetto
- 6 - ANELLO DI TENUTA: in gomma nitrilica. Disponibile anche in Viton per elevate temperature di impiego
- 7 - CUSCINETTI PER ALBERO DI INGRESSO: per garantire una precisa rotazione ad elevate velocità
- 8 - VITE SENZA FINE: in acciaio da cementazione 17NiCrMo6-4 EN10084:2008
- 9 - RUOTA ELICOIDALE E MADREVITE: in lega di bronzo CuSn12Ni2-C

4.1.1 Definizione dell'applicazione

Per procedere nella scelta più adatta del martinetto è necessario individuare i dati propri dell'applicazione.

- CARICO NOMINALE [N]: il primo parametro da prendere in considerazione per il dimensionamento del martinetto è il carico nominale, ovvero la forza massima applicata allo stesso
- CORSA [mm]: identifica di quanto il carico deve essere movimentato. In funzione del tipo di applicazione, di martinetto o della presenza di alcuni accessori, può non coincidere con la lunghezza totale dell'asta
- VELOCITÀ DI TRASLAZIONE [mm/s]: la velocità con cui il carico viene spostato è fondamentale per la corretta scelta del martinetto, poiché in base ad essa vengono determinate le velocità di rotazione dell'ingranaggio e la potenza necessaria al motore
- SCHEMA DI IMPIANTO: data la grande versatilità di impiego dei martinetti, è possibile utilizzarli in diverse configurazioni e impianti più o meno complessi. La scelta dello schema di impianto influenzerà le prestazioni e dunque il dimensionamento del martinetto
- FATTORI AMBIENTALI: a seconda delle condizioni in cui opera il martinetto si avranno prestazioni differenti. I parametri ambientali più importanti sono: temperatura, vibrazioni, pulizia, elevata umidità e lubrificazione

4.1.2 Verifica del carico di punta

La vite trapezoidale del martinetto è soggetta ad un carico assiale di compressione da parte del carico che si vuole sollevare. Il carico di punta dipende fortemente dalla lunghezza dell'asta.

La formula di Eulero: $F = \pi^2 EI/L$, dove :

E = modulo di elasticità (acciai 206 GPa);

I = il minimo fra i momenti di inerzia assiali baricentrici della sezione;

L = lunghezza libera d'inflessione o equivalente

Nel nostro caso , il martinetto deve sollevare piccoli carichi: si parla di forze variabili tra i 50 e i 100 N.

4.1.3 Calcolo della coppia di avvio

All'avvio del martinetto il carico da considerare è differente rispetto a quello nominale. Si definisce quindi il carico statico come la forza massima applicata al martinetto in condizioni di fermo. Tale forza risulta utile per il calcolo della coppia allo spunto del motore .

La coppia T risulta:

$T = C p / 2 \pi n i$, dove C è il carico statico [kN], p indica il passo della vite[mm], n è il rendimento all'avvio e i il rapporto di riduzione.

4.1.4 Caratteristiche costruttive del martinetto scelto

Il martinetto scelto, modello SJM184, è dotato di un rapporto di riduzione di 1/16 . Di seguito riportiamo una tabella che esprime la velocità di traslazione verticale dell'asta in funzione della velocità di rotazione trasmessa all'alberino del martinetto. Abbiamo scelto questo rapporto di riduzione per poter ottenere una velocità di traslazione verticale compresa tra 1 mm/min e 50 mm/min in quanto questo è il range più utilizzato.

RAPPORTO 1/16													
CARICO [daN]		50		100		200		300		400		500	
Numero di giri IN [rpm]	Vel. traslaz. asta [mm/s]	Potenza IN [kW]	Momento IN [Nm]										
50	0,21	0,001	0,12	0,0010	0,20	0,0019	0,36	0,0028	0,53	0,0037	0,70	0,0046	0,89
100	0,42	0,001	0,12	0,0021	0,20	0,0038	0,37	0,0056	0,53	0,0073	0,70	0,0093	0,89
300	1,25	0,004	0,13	0,0066	0,21	0,0117	0,37	0,0169	0,54	0,0222	0,71	0,0280	0,89
500	2,08	0,007	0,14	0,0113	0,22	0,0197	0,38	0,0284	0,54	0,0371	0,71	0,0468	0,89
750	3,13	0,011	0,14	0,0172	0,22	0,0298	0,38	0,0428	0,54	0,0557	0,71	0,0702	0,89
1000	4,17	0,015	0,15	0,0232	0,22	0,0398	0,38	0,0571	0,55	0,0744	0,71	0,0937	0,90
1500	6,25	0,024	0,15	0,0351	0,22	0,0601	0,38	0,0859	0,55	0,1117	0,71	0,1407	0,90

Figura 4.3: Tabella di potenza SJM184

Il disegno tecnico del pezzo, con le opportune quote, è riportato nella figura sottostante:

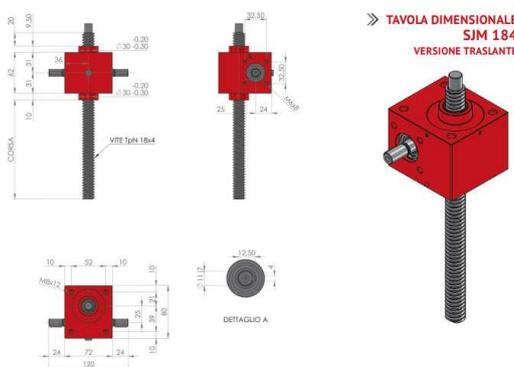


Figura 4.4: Disegno tecnico del pezzo

La parte terminale dell'asta trapezia è dotata di un terminale:

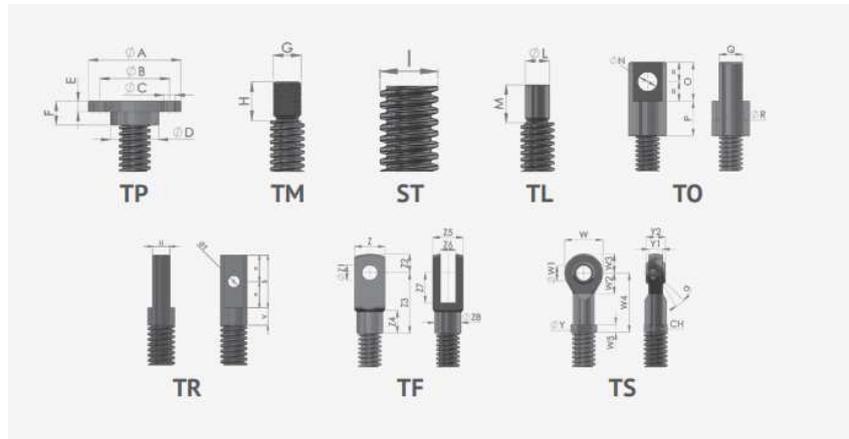


Figura 4.5: Terminali asta trapezia

Tra tutte le possibili configurazioni , abbiamo scelto il terminale TP; tramite questo componente, si riesce ad accoppiare la vite trapezoidale al pezzo su cui alloggia la telecamera, trasmettendogli il movimento.

4.2 Scelta pattino e slitta per la movimentazione sul piano

Per quanto riguarda la movimentazione della telecamera nelle direzioni parallele al piano del supporto abbiamo deciso di utilizzare delle slitte e dei pattini con appositi sistemi di bloccaggio. Inizialmente avevamo optato per una slitta micrometrica ma, visto che non avevamo necessità di una precisione così elevata, abbiamo deciso di applicare slitta e pattino da spostare manualmente nella direzione parallela alla macchina e con l'ausilio di un pignone e di una cremagliera per la direzione ortogonale al macchinario. Andiamo quindi a vedere i meccanismi di funzionamento attraverso lo studio della tecnica lineare necessaria per tali dispositivi.

I pattini da noi scelti utilizzano dei ricircoli di sfere tra la parte fissa e la parte mobile e, maggiore è il numero di ricircoli maggiore sarà la capacità di carico e la rigidità della guida considerando corpi volenti delle stesse dimensioni.

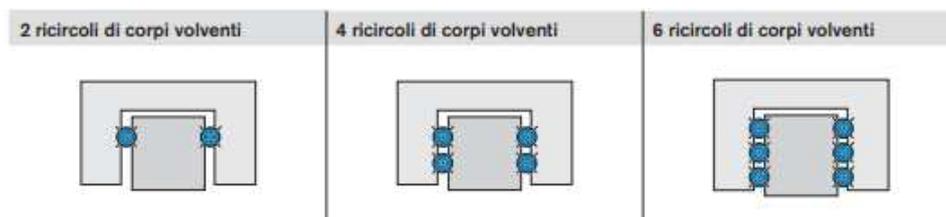


Figura 4.6: Immagine organi volenti

I sistemi lineari sono quindi delle unità di guida pronte per l'installazione e in grado di facilitare chi ne usufruisce nelle fasi di progettazione e assemblaggio per le loro applicazioni.

4.2.1 Varie tipologie di guide lineari

Le guide lineari possono essere suddivise in base al principio fisico di funzionamento e alla tipologia di contatto:

- Guide volenti:
 - A sfere, tra le parti fisse e quelle mobili si trovano gli organi volenti a forma di sfere
 - A rulli, tra le parti fisse e quelle mobili si trovano gli organi volenti a forma di rulli
 - A rotelle, tra le parti fisse e quelle mobili si trovano le rotelle sorrette da cuscinetti a sfera

4.2 Scelta pattino e slitta per la movimentazione sul piano

- Guide di scorrimento idrodinamiche:
 - Metallo/metallo, entrambe le parti della macchina vengono a contatto in posizione di arresto. Con l'inizio del movimento si crea gradualmente uno strato di lubrificazione tra le parti. La completa separazione tra le parti fissa e mobile per mezzo del liquido lubrificante avviene solo a elevate velocità di scorrimento
 - metallo/plastica, il sistema di funzionamento è lo stesso della tipologia precedente ma la coppia metallo plastica riduce l'attrito all'inizio del movimento fino a quando non si giunge alla formazione di uno strato uniforme di lubrificante
- Guide di scorrimento fluidostatiche:
 - Guida idrostatica, in questi tipi di guide una pompa fornisce del lubrificante liquido nella guida e la componente mobile della macchina si solleva. Tra le parti mobile e quelle fisse della macchina si andrà quindi a formare uno strato di lubrificante in pressione.
 - Guida aerostatica, un componente inserisce aria compressa nella guida che permette di mantenere separate parte fissa e parte mobile
- Guide magnetiche:
 - Le parti mobili e quelle fisse della macchina vengono separate da una forza magnetica. La parte mobile della macchina fluttuerà e di conseguenza avremo che la guida sarà senza contatto

Ognuno di questi tipi di pattini trova un compromesso tra le varie proprietà che possono essere: carico, rigidità, precisione, scorrevolezza, velocità, capacità ammortizzanti, sicurezza di funzionamento, standardizzazione, durata a fatica e costi.

4.2.2 Capacità di carico

In relazione alle direzioni del carico, queste guide presentano un angolo di contatto di 45° . Grazie a questa caratteristica si ottengono in tutte le quattro principali direzioni di sollecitazione le stesse capacità di carico. I pattini possono essere sollecitati con forze e momenti.

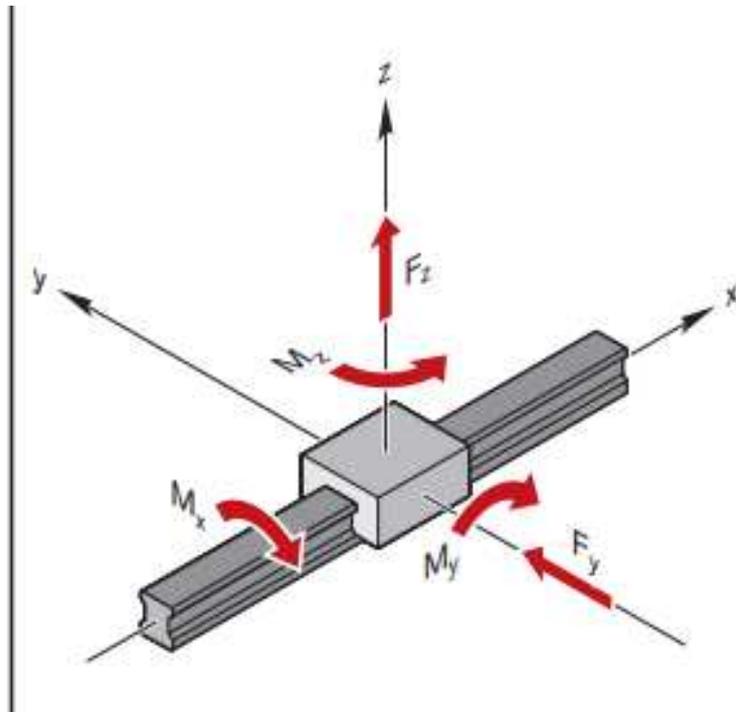


Figura 4.7: Direzioni principali di carico

La capacità di carico delle guide lineari viene descritta tramite il fattore di carico statico C_0 e il fattore di carico dinamico C : i fattori di carico sono i parametri fondamentali che descrivono il rendimento del sistema.

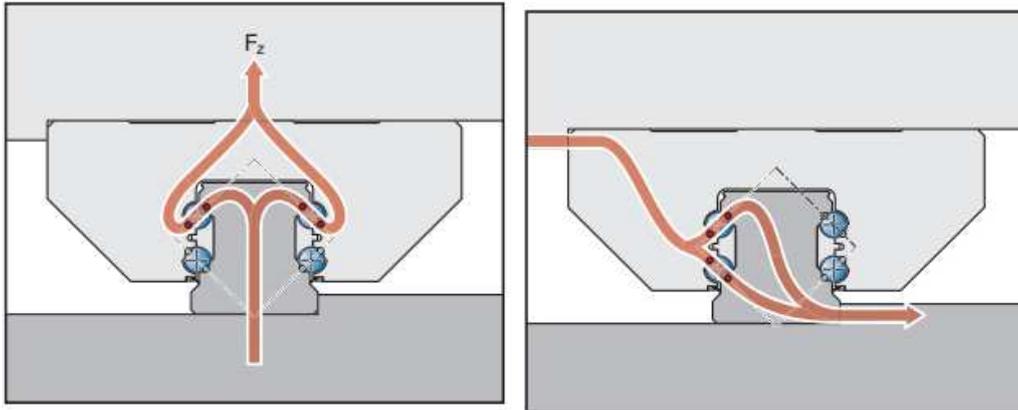
Il fattore di carico dinamico C è il carico ortogonale costante in modulo e direzione che un componente volvente può sopportare.

Il fattore di carico statico C_0 è il carico ortogonale che produce una deformazione permanente al centro della superficie di contatto tra il corpo volvente e la superficie di rotolamento pari a circa 0.0001 volte il diametro del corpo volvente.

Dai fattori di carico, dalla geometria, dal numero di ricircoli di corpi volventi e dall'angolo di contatto si calcolano i momenti di carico dinamico e statico. Questi valori sono importanti nel caso di pattini soggetti a momenti torcenti.

4.2 Scelta pattino e slitta per la movimentazione sul piano

Oltre che nelle 4 direzioni principali di carico, i pattini possono essere sollecitati secondo un qualunque angolo rispetto al piano della guida.



(a) Flusso di forza nel carico a trazione F lungo z (b) Flusso di forza nel carico laterale F lungo y

Le battute di riferimento ed i piani di appoggio consentono di trasmettere carichi verticali ed orizzontali; il carico complessivo risultante è la somma vettoriale fra il vettore della forza verticale e orizzontale.

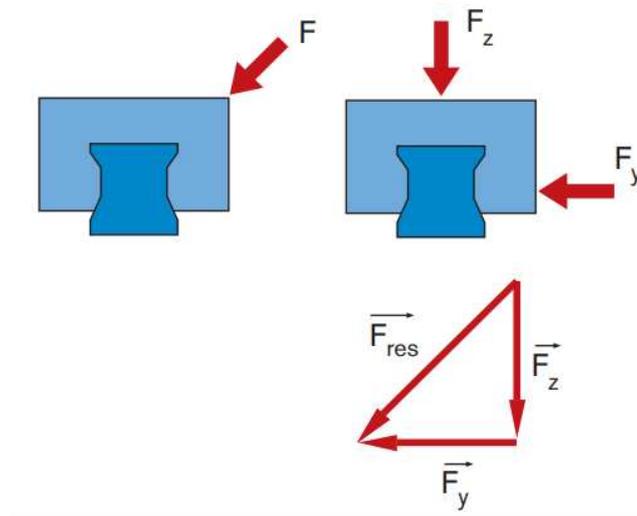


Figura 4.8: La figura mostra il caso più sfavorevole, ossia quando il carico è inclinato di 45° oppure quando i carichi in direzione verticale ed orizzontale sono di pari entità

Inoltre bisogna considerare che, se le rotaie sono sottoposte ad un carico inclinato, hanno una capacità di carico inferiore rispetto al caso di carico applicato lungo una sola delle due principali direzioni di carico.

4.2.3 Componenti scelti per il progetto

Dopo aver analizzato alcune delle proprietà e averle confrontate con quelle necessarie per il nostro progetto abbiamo deciso di optare per dei pattini a sfera per entrambe le direzioni:

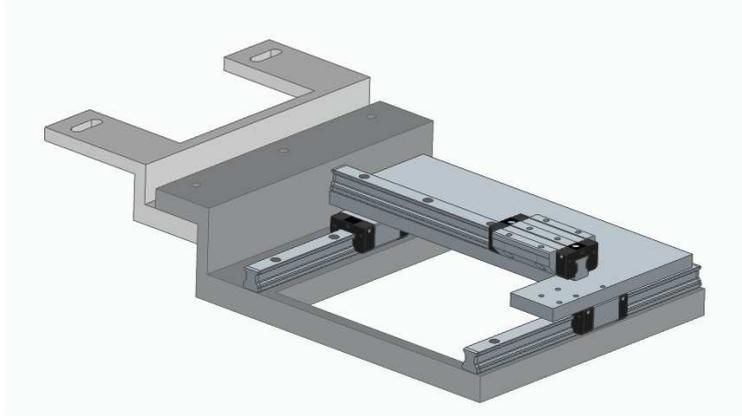


Figura 4.9: CAD di tutto il sistema per lo spostamento nelle due direzioni del piano ortogonale alla macchina

- Due pattini a sfera accoppiati con due slitte per permettere lo spostamento in direzione parallela alla macchina, dotati di soli due fori di cui uno utilizzato per il fissaggio di una piastra, necessaria per il bloccaggio, su cui andrà posta un'altra slitta con il pattino per lo spostamento nell'altra direzione.

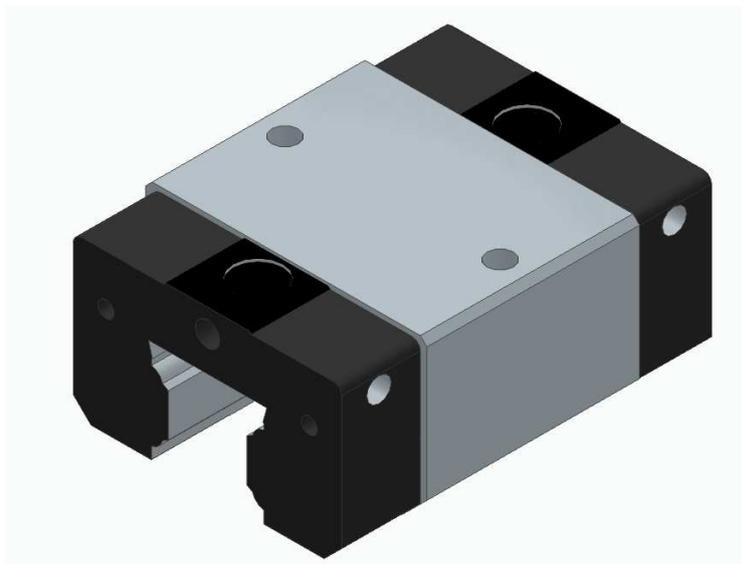


Figura 4.10: Uno dei due pattini con 2 fori

4.2 Scelta pattino e slitta per la movimentazione sul piano

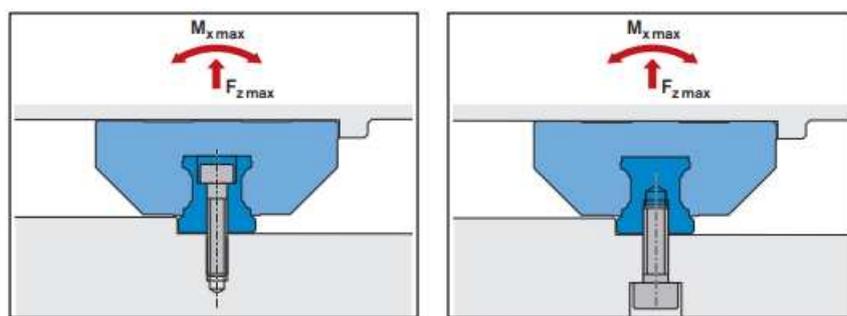


Figura 4.11: Installazione delle slitte

Il montaggio delle slitte viene effettuato fissandole a dei fori previsti sulla parte mobile della struttura attraverso dei perni che vengono forniti insieme alle slitte. Durante il montaggio delle slitte bisogna porre particolare attenzione al parallelismo di queste in quanto è una condizione necessaria per il corretto funzionamento dell'intero sistema. I perni possono essere montati sia dalla parte superiore che dalla parte inferiore della slitta e possono essere dotati di un nastro di protezione per prevenire qualsiasi tipo di inconveniente; per il montaggio vengono fornite delle guide

- Un pattino a sfera con la rispettiva slitta (che andrà a poggiare sopra la piastra precedentemente citata) dotato di 6 fori, di cui 4 necessari per il fissaggio della piastra di appoggio per martinetto e motore trattata nel capitolo precedente (sezione 3.1.3).

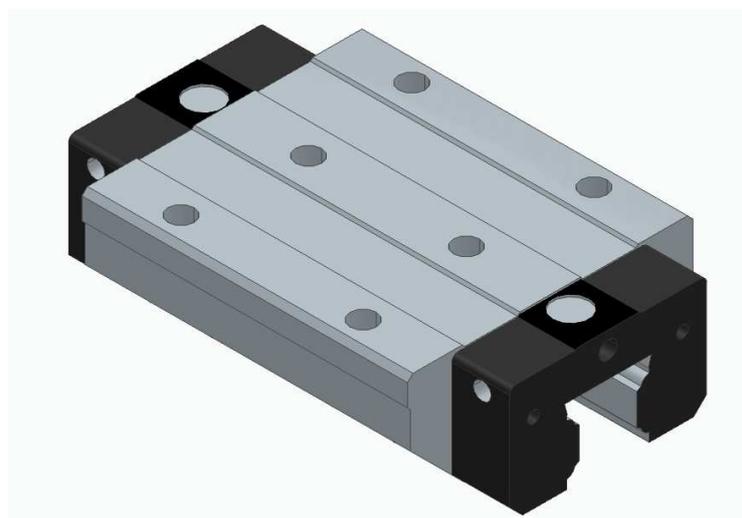


Figura 4.12: Pattino centrale con 6 fori

Per tutti i pattini abbiamo scelto una dimensione di 15 che ci permetteva di trovare il giusto compromesso tra la stabilità della struttura e l'ingombro di questi dispositivi.

4.2.4 Vita attesa e manutenzione

Ovviamente questi sono dei componenti che necessitano di una manutenzione e che devono essere cambiati periodicamente in base all'utilizzo che se ne fa ed è per questo che l'azienda fornitrice ci offre dei cataloghi che ci permettono di calcolare la durata di vita attesa in base alle condizioni di utilizzo di tali dispositivi. A tal proposito è stata sviluppata una formula che permette di calcolare la durata nominale a fatica attesa in funzione del carico di un componente volvente

$$L = (C / F)^p$$

- L= durata nominale a fatica (100 km nelle guide lineari)
- C= fattore di carico dinamico (N)
- F= carico applicato al componente e/o somma delle componenti delle forza esterne che agiscono sul componente
- p= esponente dell'equazione della durata a fatica in funzione del tipo di corpo volvente

Tra le varie condizioni che influenzano la durata a fatica possiamo riconoscere:

- Condizioni ambientali, con cui si intendono tutte le impurità e i detriti portati dall'esterno (come segatura o polvere) che provocano una maggiore usura delle superfici di rotolamento e nel peggiori dei casi potrebbero anche comportare il bloccaggio dei corpi volventi. Oltre a queste impurità le condizioni ambientali devono tenere in considerazione anche fattori come umidità, temperatura, sostanze chimiche e passaggio di correnti elettriche. A seconda del grado di impurità presenti nell'ambiente andranno poi scelte le guarnizioni
- Condizioni di esercizio, queste comprendono tutte le condizioni che riguardano gli organi volventi durante il loro funzionamento e sono:
 - Lubrificazione
 - Velocità e numero di giri
 - Corsa breve
 - Vibrazioni
 - Urti e sovraccarichi
- Condizioni di installazione, questi fattori riguardano in generale la struttura e l'assemblaggio in quanto, laddove queste non rispettino le tolleranze dimensionali richieste, i componenti potrebbero essere soggetti a sollecitazioni interne

4.2 Scelta pattino e slitta per la movimentazione sul piano

Tra le varie tipologie di guasti, considerando il fatto che la struttura dovrebbe essere utilizzata in laboratorio, è raro che i corpi volventi siano soggetti a corrosione sia generale sia puntiforme mentre è più probabile che i dispositivi vadano incontro a guasti del tipo: bloccaggio dei corpi volventi, distruzione della zona di ricircolo o dei corpi volventi stessi, impronta plastica o appiattimento locale dei corpi volventi e rottura per fatica.

4.3 Scelta del sistema di serraggio e frenatura

Dopo aver scelto i dispositivi che permettevano la movimentazione sul piano, abbiamo individuato il sistema di bloccaggio più adatto alle nostre esigenze.

Come già descritto nella precedente section, la movimentazione sul piano è manuale; dopo aver regolato la posizione della telecamera tramite i pattini e garantito la messa a fuoco tramite il freno si blocca la movimentazione e si è pronti per l'acquisizione delle misure di deformazione.

4.3.1 Varie tipologie di freni

Le unità di serraggio sono state progettate per arrestare le guide lineari durante la movimentazione e mantenerle in stato inerte. Questi elementi non hanno alcuna funzione di guida. Ci sono tre tipologie di elementi di serraggio e frenatura:

- Idraulico: il freno idraulico è una tipologia di freno in cui è utilizzato un fluido adatto, tipicamente contenente glicole etilenico, che trasferisce la pressione da un'unità di controllo al meccanismo frenante.
 - Forze di bloccaggio assiali molto elevate
 - Stabilizzazione dinamica e statica in direzione dell'asse
 - Serraggio con pressione
 - Parte filettata su entrambi i lati del raccordo idraulico
 - Supporto massiccio e rigido in acciaio, chimicamente nichelato
 - Elevata precisione di posizionamento
 - Protezione completa con guarnizioni integrate
 - Tecnologia speciale con membrana di pressione per massima sicurezza di funzionamento senza perdita di pressione e perdite
 - Profili di contatto integrati, ad accoppiamento ed estesi su grande superficie, per massima rigidità assiale
 - 10 milioni di cicli di serraggio (valore B10d)

4.3 Scelta del sistema di serraggio e frenatura

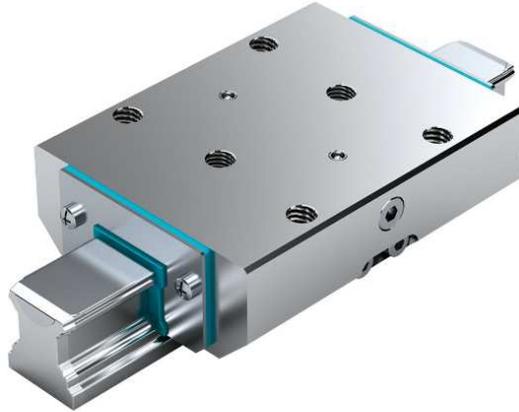


Figura 4.13: Freno idraulico

Questo sistema di bloccaggio è stato escluso poichè prevedeva l'utilizzo di un fluido adatto e non era di facile applicazione

- Pneumatico : è un sistema di frenata chiamato anche freno ad aria compressa. Funziona sfruttando la pressione dell'aria compressa per attivare i meccanismi di frenata.
Nei sistemi dotati di freno pneumatico, un compressore alimenta un serbatoio d'aria compressa. Questo serbatoio accumula l'aria compressa che viene utilizzata per il funzionamento del sistema frenante.
 - Elevate forze di bloccaggio assiali con modello corto
 - Stabilizzazione dinamica e statica in direzione dell'asse
 - Serraggio senza pressione (con energia elastica) in caso di caduta di pressione tramite un ingranaggio a cuneo di scorrimento a doppia azione con due pacchetti di molle
 - Supporto in acciaio chimicamente nichelato
 - Elevata rigidità assiale e orizzontale
 - Posizionamento preciso
 - Forza di tenuta maggiore attraverso la connessione aria positiva
 - Rilassamento pneumatico. Pressione di apertura 5,5 - 8 bar
 - 5 milioni di cicli di serraggio (valore B10d)



Figura 4.14: Freno pneumatico

Questa tipologia di freno è stata esclusa poichè prevede l'utilizzo di un compressore e quindi risulta di difficile applicazione.

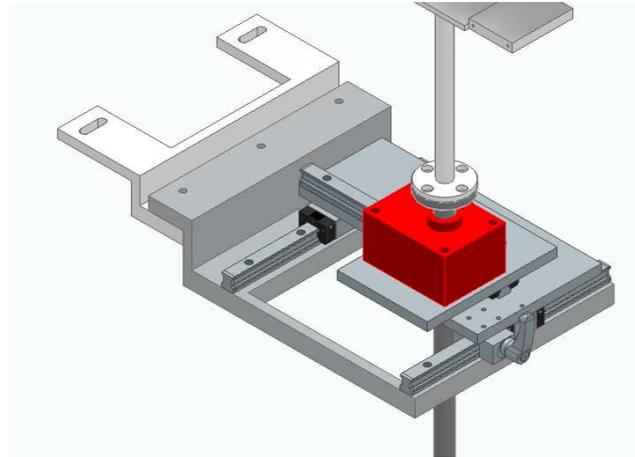
- Meccanico : il freno meccanico è quello con l'installazione e il funzionamento più semplice. Il suo funzionamento è basato sull'attrito: tramite una leva si aziona manualmente il freno e si blocca il movimento del pattino.
 - Costruzione semplice e sicura in modello compatto
 - Elemento di serraggio azionato manualmente senza energia ausiliaria
 - Leva di serraggio manuale a regolazione libera
 - Posizionamento preciso
 - Blocco manuale
 - 500.000 cicli di serraggio (valore B10d)



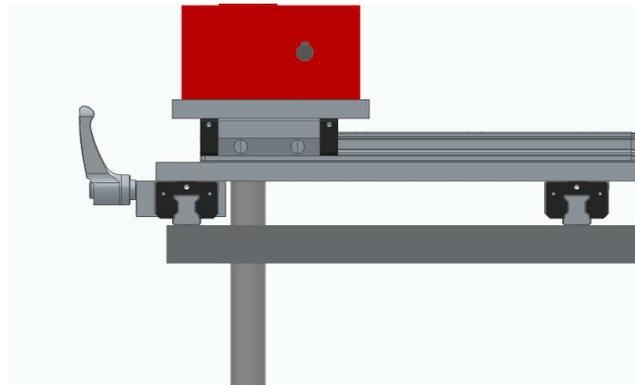
Figura 4.15: Freno meccanico

4.3 Scelta del sistema di serraggio e frenatura

Nel supporto realizzato abbiamo quindi inserito un freno meccanico, perchè era quello che si adattava meglio alle nostre esigenze.



(a) Installazione del freno sul supporto



(b) Vista laterale

Inizialmente avevamo previsto due freni sulla rotaia posteriore, posti rispettivamente a destra e sinistra del pattino: infatti per bloccare la movimentazione bastava bloccare un solo pattino, perchè i due erano rigidamente collegati.

Per risparmiare spazio, abbiamo deciso di utilizzare solamente un freno meccanico collegato tramite 4 fori alla piastra su cui alloggiano la slitta e il pattino centrale, che consentono la movimentazione nella direzione ortogonale all'asse del binario su cui alloggia il freno. Siccome la piastra collegata al freno è accoppiata a sua volta con il pattino, allora basta un solo freno per bloccare il movimento in direzione parallela all'asse della slitta su cui è montato il dispositivo di bloccaggio.

4.4 Scelta di pignone e cremagliera per la movimentazione del pattino centrale

Per quanto riguarda la movimentazione del pattino centrale avevamo bisogno di un sistema che ci permettesse di regolarne lo spostamento per poter portare la telecamera a una distanza tale da poter mettere a fuoco senza problemi il provino.

Dopo esserci confrontati con il Prof. Rossi e l'Ing. Morichelli e aver valutato la precisione di cui avevamo bisogno, abbiamo deciso di optare per un sistema formato da un pignone e una cremagliera che, accoppiati nel modo opportuno, permettessero di spostare la telecamera per avvicinarla o allontanarla all'occorrenza senza problemi. In particolare il sistema pignone e cremagliera è un meccanismo di trasmissione del moto utilizzato per convertire il movimento rotatorio in movimento lineare, o viceversa.

È composto da due elementi principali: il pignone, che è una ruota dentata a denti dritti o obliqui, e la cremagliera, che è una barra piatta o un profilo con denti corrispondenti al pignone.

La velocità angolare del pignone

$$(\omega)$$

è legata alla velocità lineare della cremagliera (v) attraverso la seguente equazione:

$$v = \omega * R \quad (4.1)$$

dove R è il raggio del pignone.

Il momento del pignone (M) generato dalla forza applicata è invece dato dalla formula:

$$M = F * R \quad (4.2)$$

dove F è la forza applicata al pignone e R è il raggio del pignone.

I denti del pignone si incastrano quindi con i denti della cremagliera. Quando il pignone ruota, la cremagliera si sposta in avanti o indietro lungo il suo asse in modo lineare. Nel nostro caso specifico la cremagliera è fissa quindi a muoversi in direzione lineare a causa della sua stessa rotazione sarà il pignone.

4.4 Scelta di pignone e cremagliera per la movimentazione del pattino centrale



Figura 4.16: Meccanismo pignone e cremagliera

Questo meccanismo è ampiamente utilizzato in diverse applicazioni, come ad esempio:

- **Ascensori:** I sistemi di pignone e cremagliera sono spesso utilizzati nei meccanismi di sollevamento degli ascensori, in cui il pignone ruota per far muovere la cremagliera e consentire l'ascensione o la discesa dell'ascensore
- **Treni a cremagliera:** In alcune linee ferroviarie con forti pendenze o terreni difficili, vengono utilizzati treni a cremagliera per superare le salite ripide. Il pignone azionato dal treno ingaggia la cremagliera posizionata lungo i binari, fornendo la trazione necessaria per superare l'ostacolo
- **Attrezzature industriali:** Il sistema pignone e cremagliera può essere utilizzato in attrezzature industriali come macchine per la movimentazione dei materiali, stampanti 3D, macchine utensili e altro ancora, per convertire il movimento rotatorio del motore in movimento lineare per scopi specifici

Uno dei vantaggi del sistema pignone e cremagliera è la sua capacità di trasmettere movimento lineare con precisione e senza slittamento. Per la nostra struttura il pignone deve essere dotato di un piccolo manico che permetta di ruotare manualmente il pignone e muovere di conseguenza il supporto di telecamera e obiettivo.

Come prima cosa abbiamo quindi cercato una cremagliera che avesse un passo tale da permetterci la precisione negli spostamenti di cui avevamo bisogno. Abbiamo poi fornito le varie dimensioni in relazione al resto del progetto per poi scaricare il CAD e inserirlo all'interno del supporto. Dopo aver trovato la cremagliera ci siamo quindi



Figura 4.17: CAD della cremagliera

concentrati sulla ricerca del pignone semplicemente cercandone uno che avesse lo stesso passo e che si accoppiasse senza problemi alla cremagliera. Abbiamo inoltre scelto un pignone che avesse un alberino per permette di ruotarlo manualmente e spostare la struttura senza troppi problemi.

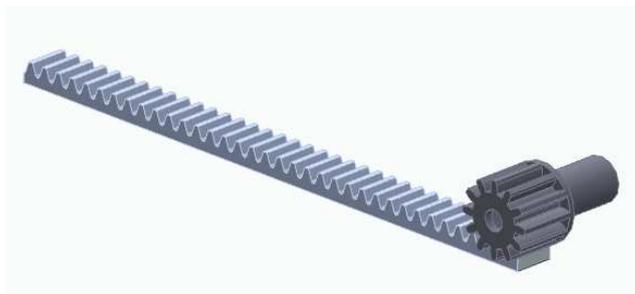


Figura 4.18: CAD del pignone accoppiato con la cremagliera

Una volta scelti entrambi questi componenti abbiamo progettato un pezzo (trattato nel sottocapitolo 3.1.6) che ci permettesse di collegare il pignone alla piastra su cui alloggia la slitta del pattino centrale per poterli rendere solidali affinché si muovano insieme; abbiamo dovuto inoltre progettare un pezzo che, inserito opportunamente tra i denti del pignone, andasse a frenare quest'ultimo bloccandone la rotazione (sottocapitolo 3.1.6)

4.5 Scelta del motore da accoppiare al martinetto elettrico

Un componente essenziale per la movimentazione della telecamera in direzione verticale è il motore elettrico: infatti, accoppiando il motore all'alberino del martinetto elettrico, si riesce a produrre un movimento verticale dell'asta trapezia.

Il problema principale che abbiamo affrontato è legato alla velocità di rotazione del motore: infatti, siccome la velocità di deformazione del provino è variabile tra 0 e 50 mm/min ed è quindi molto bassa, non si riusciva a trovare un motore che potesse arrivare a velocità così basse tramite il rapporto di riduzione pari a 1/16; inoltre, se la velocità di rotazione dovesse essere ancora troppo elevata, c'è la possibilità di inserire un riduttore accoppiato all'alberino del martinetto.

Abbiamo scelto un motore elettrico con una velocità di rotazione variabile con continuità, adattabile alle nostre esigenze. Il motore scelto è quello mostrato nella figura sottostante:



Figura 4.19: Motore asincrono monofase scelto per la movimentazione

Di seguito elenchiamo le specifiche del prodotto:

- Modello: M590-502
- Materiale: metallo
- Peso: 5250 g
- Tipo di prodotto: motore asincrono monofase
- Numero di poli: 4 poli
- Potenza nominale: 90W
- Tensione nominale: 220V AC 50 / 60Hz (Opzionale)
- Velocità di minimo pari a 14 rpm con una coppia pari a 20 Nm

4.5.1 Principio di funzionamento di un motore asincrono monofase

I due elementi caratterizzanti un motore elettrico sono lo statore e il rotore. In un motore asincrono:

- il rotore funge da indotto, e la corrente nei rispettivi avvolgimenti viene generata per effetto dell'induzione magnetica degli avvolgimenti di statore. L'indotto è sede delle forze elettromotrici create dal campo prodotto dall'induttore
- lo statore funge da induttore, creando il campo magnetico tramite magneti permanenti o avvolgimenti nei quali scorre la corrente

Tramite il campo magnetico generato dall'induttore si crea una coppia, proporzionale all'intensità del campo magnetico, che mette in rotazione il rotore.

A differenza della macchina sincrona, in cui lo scorrimento è nullo, qui è presente uno scostamento relativo tra la velocità del rotore e quella del campo rotante:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

dove n_1 rappresenta la velocità di rotazione del campo magnetico, n_2 invece rappresenta quella del rotore.

Quando il rotore è fermo, lo scorrimento è massimo ed è uguale ad 1; al contrario, quando il rotore accelera e si porta alla velocità di rotazione del campo magnetico, lo scorrimento è nullo.

4.5 Scelta del motore da accoppiare al martinetto elettrico

In una macchina asincrona il rotore può essere:

- avvolto: il rotore contiene tre avvolgimenti analoghi a quelli di statore, con uguale numero di poli
- a gabbia di scoiattolo: in ogni cava alloggia un conduttore (sbarra) in alluminio pressofuso e le sbarre sono collegate tra loro in corrispondenza di ciascuna testata mediante due anelli che le chiudono permanentemente in cortocircuito. Semplici da costruire e robuste, sono preferite nei motori di piccola e media potenza.

L'avviamento di un motore elettrico asincrono è garantito se la coppia resistente del carico risulta inferiore a quella elettromeccanica sviluppata dal motore .

Se la coppia resistente è elevata, si possono utilizzare due soluzioni:

1. Reostato di avviamento, utilizzato in presenza del rotore avvolto. In questo caso dei resistori con resistenza variabile vengono collegati agli avvolgimenti di rotore mediante anelli e spazzole striscianti: all'avviamento vengono inserite, e progressivamente ridotte fino ad escluderle mano a mano che il rotore accelera
2. Rotore a doppia gabbia, utilizzato quando si ha il rotore a gabbia di scoiattolo. In questo caso non si può inserire un reostato in quanto il rotore è sempre in corto circuito ; per questo motivo si utilizzano rotor a doppia gabbia , in cui le gabbie sono disposte in parallelo

4.6 Scelta del giunto di trasmissione

Dopo aver scelto il motore e aver realizzato il CAD del supporto, bisognava trovare un elemento che permettesse di trasferire il moto dal motore elettrico al martinetto: un giunto.

Un problema da considerare era il possibile disallineamento radiale, assiale o angolare tra asse del giunto e albero del motore: infatti, in caso di urto, potrebbe accadere che il motore assorba tutta l'energia, arrivando così alla rottura.

La caratteristica principale che il giunto doveva avere era la possibilità di assorbire l'energia derivante da un urto: per questo motivo, abbiamo scelto un giunto a stella. Questi giunti infatti garantiscono una sicura trasmissione di coppia e sono torsionalmente elastici, in grado quindi di assorbire urti derivanti dalle macchine collegate .

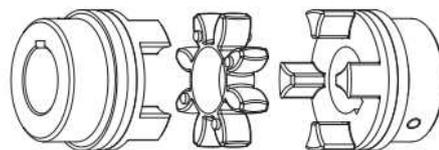
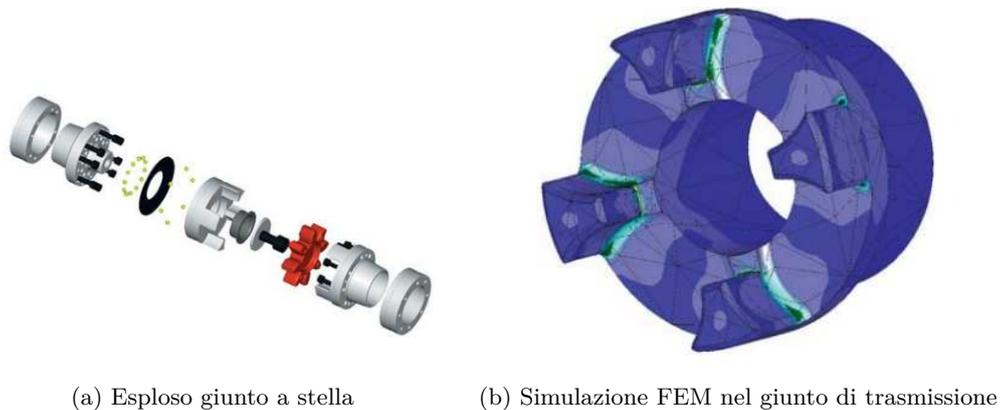


Figura 4.20: Elemento utilizzato per trasmettere la coppia dal motore all'alberino del martinetto elettrico

4.6 Scelta del giunto di trasmissione

Oltre all'assorbimento dell'energia in caso di urto, il giunto deve avere anche altre caratteristiche, quali:

- trasmissione del moto a "gioco zero"
- smorzamento delle vibrazioni da albero motore a condotto
- bassa conducibilità termica ed elettrica
- facilità e velocità di montaggio
- ridotti momenti di inerzia
- razionalità di impiego

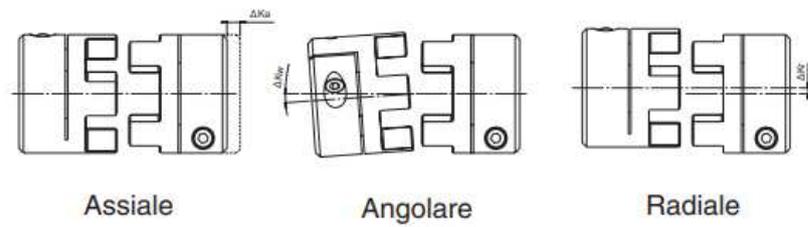


Figura 4.21: La figura mostra i possibili disallineamenti, risolti tutti tramite l'utilizzo di un giunto a stella

Capitolo 5

Ultimazione del progetto , verifica e conclusioni

5.1 Realizzazione del cad definitivo

Dopo aver progettato tutti i vari pezzi e scelto tutti i componenti, lo sviluppo del progetto è terminato.

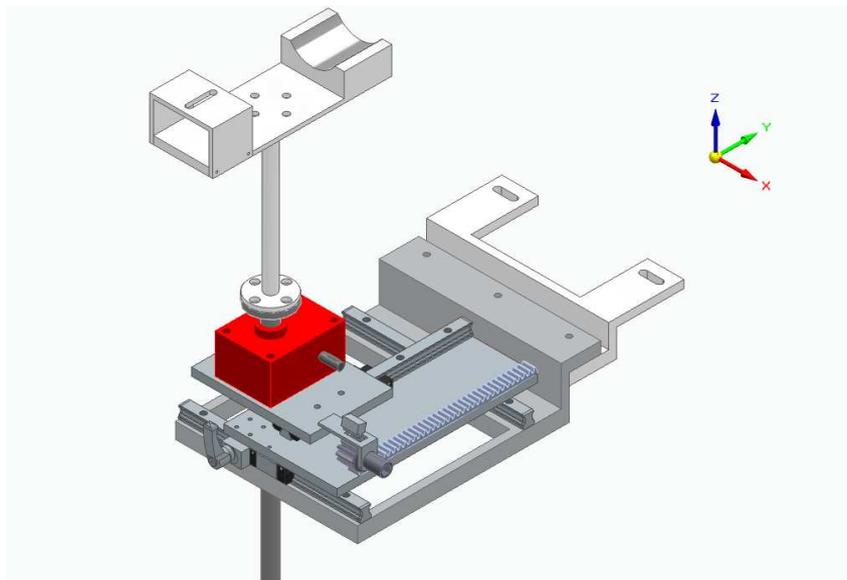


Figura 5.1: CAD definitivo del supporto

Il supporto quindi è pronto per essere realizzato .

Il fissaggio del supporto alla macchina di trazione avviene tramite i 2 fori ad asola presenti sulla parte fissa, mentre il collegamento tra parte fissa e mobile avviene tramite i 3 fori presenti sulle due parti.

La movimentazione in direzione x avviene muovendo manualmente i pattini, mentre in direzione y avviene girando manualmente l'alberino uscente dal pignone.

Notiamo che la movimentazione lungo l'asse x è continua, mentre lungo l'asse y è discreta, in quanto dipende dal passo del pignone.

Capitolo 5 Ultimazione del progetto , verifica e conclusioni

Per questo motivo, abbiamo previsto anche un foro ad asola nel componente in cui alloggia la telecamera che garantisce la sicura messa a fuoco della telecamera.

Il bloccaggio della movimentazione in direzione x avviene girando manualmente la leva del freno meccanico; in direzione y invece si inserisce un componente che blocca la rotazione del pignone.

In direzione z la movimentazione avviene tramite un martinetto elettrico, accoppiato a sua volta ad un motore elettrico: il trasferimento di coppia avviene tramite un giunto a stella .

Per bloccare il movimento dell'asta trapezia basta spegnere il motore e trasmettere una coppia nulla, in quanto il martinetto è autobloccante.

5.2 Verifica strutturale

L'analisi strutturale è stata fatta al fine di conoscere le tensioni massime che si sviluppavano nel supporto progettato, permettendo così un corretto dimensionamento di questo. L'analisi è stata effettuata tramite il programma "Ansys", un software ingegneristico che simula il funzionamento del supporto e permette di effettuare un'analisi agli elementi finiti (FEM).



Figura 5.2: Software utilizzato per l'analisi strutturale

Per analisi FEM si intende una serie di strumenti software che permettono di effettuare simulazioni ingegneristiche .

Questi strumenti riproducono un vero e proprio "banco di prova", dove il pezzo può subire delle sollecitazioni statiche o dinamiche (nel nostro caso statiche).

La differenza sostanziale rispetto a un banco di prova è che, in un'analisi FEM, siamo in un ambiente virtuale e quindi il CAD del pezzo può essere modificato continuamente ed essere sottoposto a nuovi test.

Tra i principali vantaggi troviamo sicuramente la riduzione del numero di prototipi fisici da realizzare, annessi costi e soprattutto tempi di sviluppo.

Come si realizza un'analisi FEM?

- 1: il primo passo è la realizzazione di un file CAD, solitamente in formato STEP: da qui viene realizzata una mesh, ossia una suddivisione della geometria che vogliamo analizzare in elementi base che costituiscono il punto di partenza per la risoluzione matematica del problema. La qualità della mesh influenza i risultati della prova

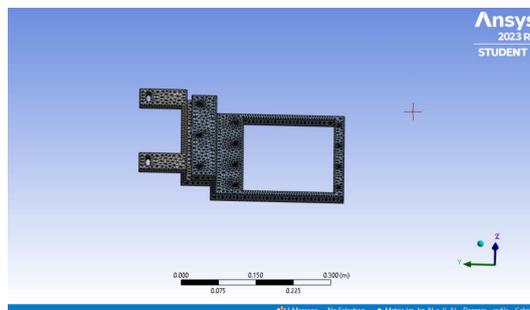


Figura 5.3: Mesh creata sul modello per l'analisi FEM

- 2: il secondo passo prevede la definizione delle proprietà del materiale. Solitamente si utilizzano materiali che hanno una risposta uguale in tutte le direzioni, come i metalli.

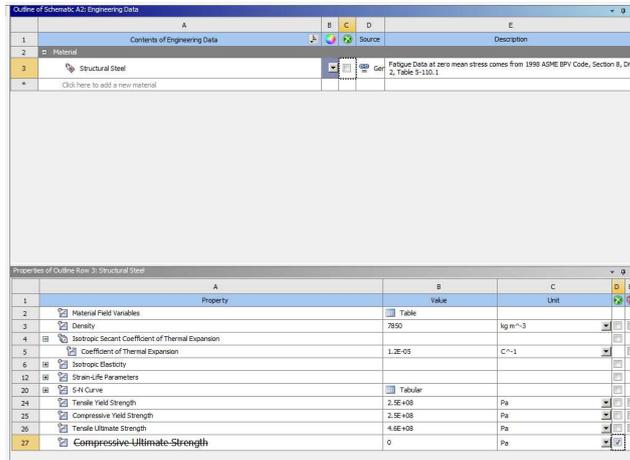


Figura 5.4: Caratteristiche del materiale utilizzato per la realizzazione del supporto per la telecamera e l'obiettivo telecentrico

- 3: il terzo passo prevede la definizione dei vincoli e dei carichi del sistema: tramite i vincoli il pezzo viene fissato e caricato con forze e pressioni coincidenti con quelle reali di esercizio
- 4: il quarto passo prevede la visualizzazione delle tensioni e delle deformazioni presenti nel pezzo

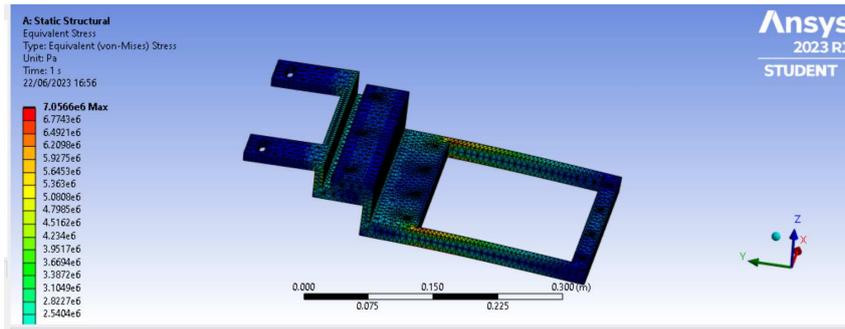
Entrando nello specifico del nostro progetto , abbiamo deciso di visualizzare la tensione equivalente di Von Mises in tutti i tratti del supporto, così definita:

$$\sigma_{id,VM} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

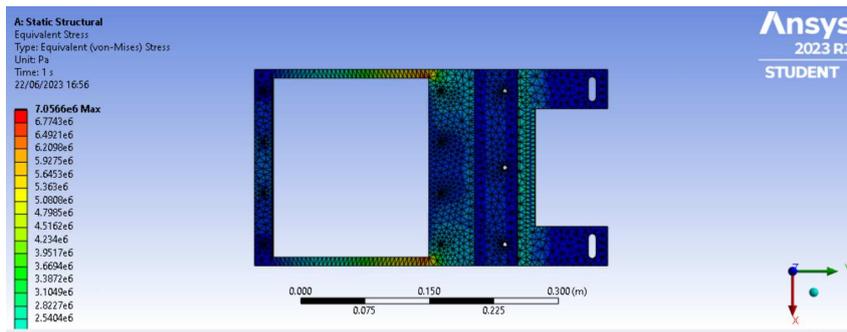
L' analisi FEM è stata effettuata sul sistema parte fissa-parte mobile, ipotizzando che i due pezzi fossero saldati tra loro, considerandoli quindi come un componente unico.

Abbiamo incastrato la struttura in prossimità dei 2 fori ad asola presenti sulla parte fissa: in questo modo la struttura risultava isostatica e quindi impossibilitata a muoversi.

L'analisi FEM è stata effettuata considerando un carico complessivo di 150 N, posto in prossimità del baricentro del supporto e corrispondente quindi alla sua forza peso.



(a) Analisi FEM del supporto



(b) Analisi FEM del supporto visto dall'alto

Come si nota dalle figure sopra riportate, le sollecitazioni a cui è soggetto il supporto sono molto più basse rispetto a quella di snervamento del materiale.

La parte in cui lo stato tensionale risulta più severo è quella colorata in arancione: le tensioni agenti sono dell'ordine di 6.2-6.5 MPa e risultano molto inferiori rispetto alla tensione di snervamento. Prevedendo un elevato coefficiente di sicurezza, possiamo affermare che le dimensioni scelte per il supporto sono adeguate e l'analisi è andata a buon fine.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Siamo quindi arrivati al termine di questo elaborato in cui abbiamo illustrato tutto il percorso svolto per lo studio e la progettazione del supporto necessario per l'utilizzo della telecamera con il rispettivo obiettivo telecentrico.

Come detto in precedenza questo supporto ci è stato richiesto dal Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche per poter avere un progetto concreto e realizzabile da poter sviluppare o all'interno dell'università o ricorrendo all'aiuto di aziende esterne all'università. Il progetto ovviamente potrebbe richiedere delle migliorie che potrebbero essere apportate successivamente una volta deciso di realizzare il pezzo.

Le caratteristiche richieste erano quindi quelle di una struttura che:

- Fosse comoda da montare e smontare in base alla necessità
- Non danneggiasse la macchina per le prove di trazione, altro punto che ci ha spinti ancor di più a realizzare il supporto diviso in due parti
- Non fosse troppo ingombrante, in quanto durante lo svolgimento delle prove di trazione bisogna potersi muovere senza troppi problemi vicino alla macchina e senza correre il rischio di poter urtare/rompere qualcosa
- Non fosse troppo complicata da realizzare, in quanto ,come detto in precedenza, se possibile si vorrebbe provare a realizzare la struttura all'interno dell'università
- Non fosse troppo costoso, sia per quanto riguarda i componenti esterni da acquistare, sia per quanto riguarda le lavorazioni necessarie per la realizzazione dei pezzi propriamente progettati da noi. Abbiamo dovuto trovare il giusto compromesso tra economicità e qualità del progetto

Essendo stata questa la nostra prima esperienza di progettazione meccanica ovviamente non è stato semplicissimo riuscire a soddisfare tutte le esigenze ma, lavorando in coppia, siamo riusciti a risolvere al meglio tutti i problemi che si sono presentati durante il percorso e abbiamo comunque trovato un compromesso che riuscisse a soddisfare in egual misura tutte le esigenze; in fondo è questo il compito di un

Capitolo 6 CONCLUSIONI

ingegnere.

Nel primo capitolo quindi abbiamo trattato in generale le prove meccaniche e in particolare quella di trazione, l'analisi DIC e il funzionamento delle ottiche telecentriche. Questa prima parte del nostro elaborato è stata perlopiù teorica ma è stata fondamentale al fine di raccogliere più informazioni possibili sui temi che saremmo andati a trattare durante il nostro lavoro, e avere informazioni di base di cui avremmo dovuto tenere conto durante la realizzazione del supporto.

Nel secondo capitolo è stata invece riassunta tutta la prima vera parte del nostro lavoro, quindi tutte le fasi di definizione della struttura generale per poter trovare un'idea che fosse il più possibile funzionale a quelle che erano le nostre esigenze.

Nel terzo capitolo è stata raccolta tutta la parte di lavoro che ci ha visti impegnati nella progettazione e quindi nel disegno dei CAD dei vari pezzi, che abbiamo progettato e che dovranno essere realizzati o nei laboratori dell'università o di altre aziende. Al termine di questo capitolo abbiamo aggiunto una piccola parentesi sulla manifattura additiva in quanto abbiamo avuto la fortuna di poter realizzare, grazie alla collaborazione dell'Ing. Utzeri, alcuni dei pezzi da noi progettati attraverso la stampa 3D.

Nel quarto capitolo invece abbiamo riassunto tutta la parte relativa alla scelta dei componenti che avremmo dovuto comprare da aziende esterne, e in questa parte ci siamo anche messi in contatto con esse per poter valutare in maniera concreta i costi di questi componenti e, talvolta, anche per ottenere i disegni CAD di alcuni pezzi che non avremmo potuto realizzare in maniera autonoma, in quanto troppo complessi.

Nel quinto capitolo sono state invece riassunte: tutta la parte di realizzazione del CAD definitivo che è stato ottenuto assemblando tutti i componenti su Solid Edge e andando quindi a inserire tutti i vincoli necessari e tutta la parte di verifica della struttura andando a studiare gli sforzi e le deformazioni a cui questa sarà soggetta in fase di utilizzo.

Come detto in precedenza lavorare in coppia non è stato complicato in quanto io e il mio collega eravamo già abituati a collaborare facendo parte dello stesso gruppo di studio.

Nonostante ciò, durante tutto il percorso, sono stati indispensabili il supporto e i consigli del Prof. Rossi e dell'Ing. Morichelli che sono stati disponibili ad aiutarci nel migliore dei modi in ogni momento.

In conclusione ci riteniamo soddisfatti del progetto da noi sviluppato e ci auguriamo che questo possa essere un giorno realizzato.

Capitolo 7

APPENDICE

In questa sezione finale abbiamo riportato tutte le tavole dei componenti da noi progettati per la realizzazione del supporto. Non abbiamo riportato invece le tavole di tutti quei componenti che dovrebbero essere acquistati da aziende esterne.

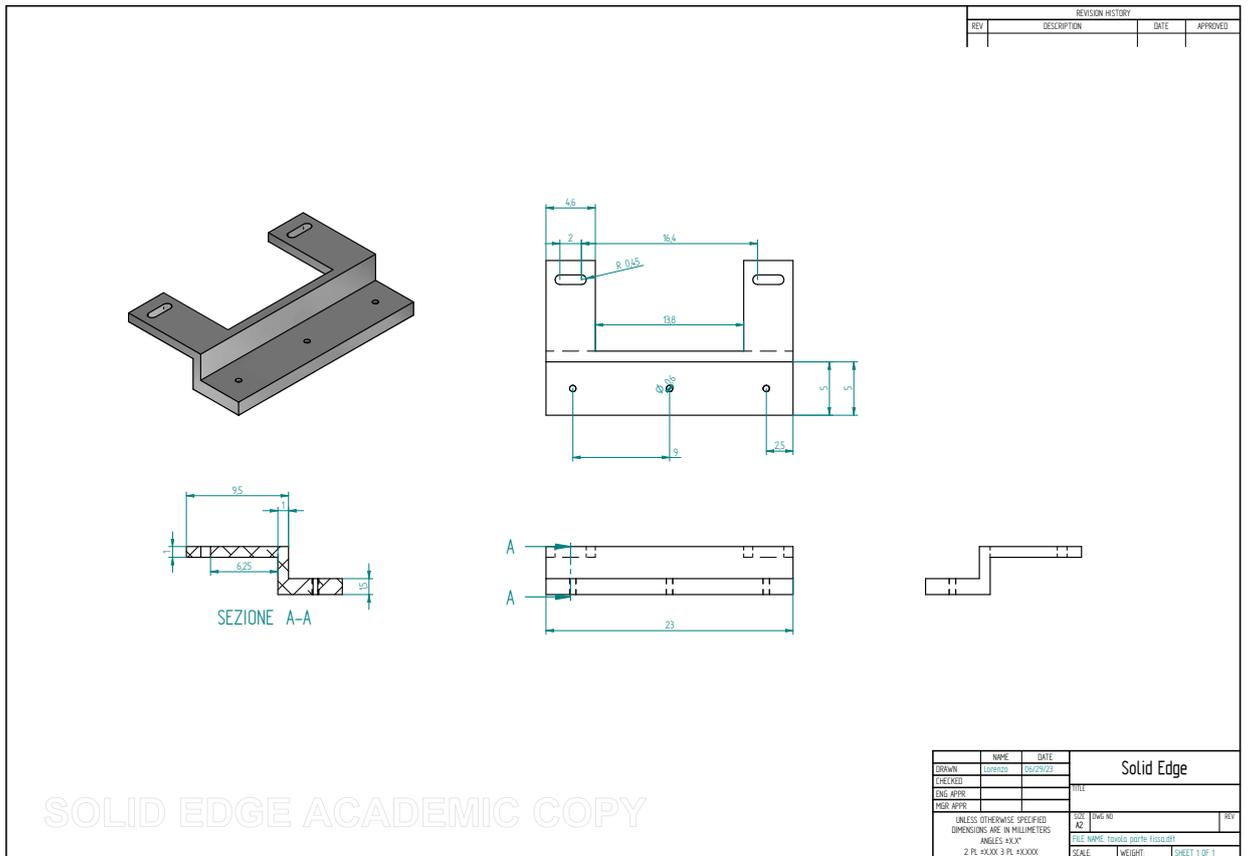


Figura 7.1: Tavola parte fissa

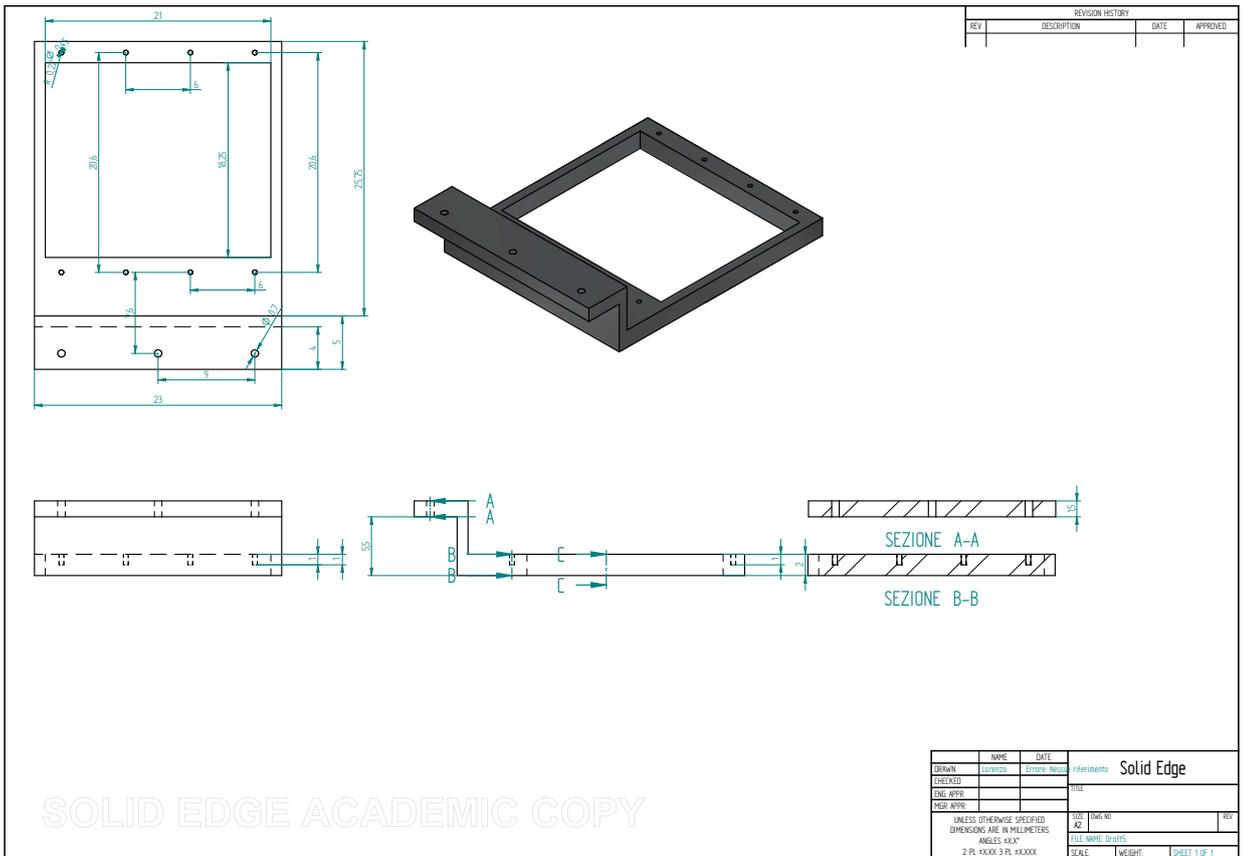


Figura 7.2: Tavola parte mobile

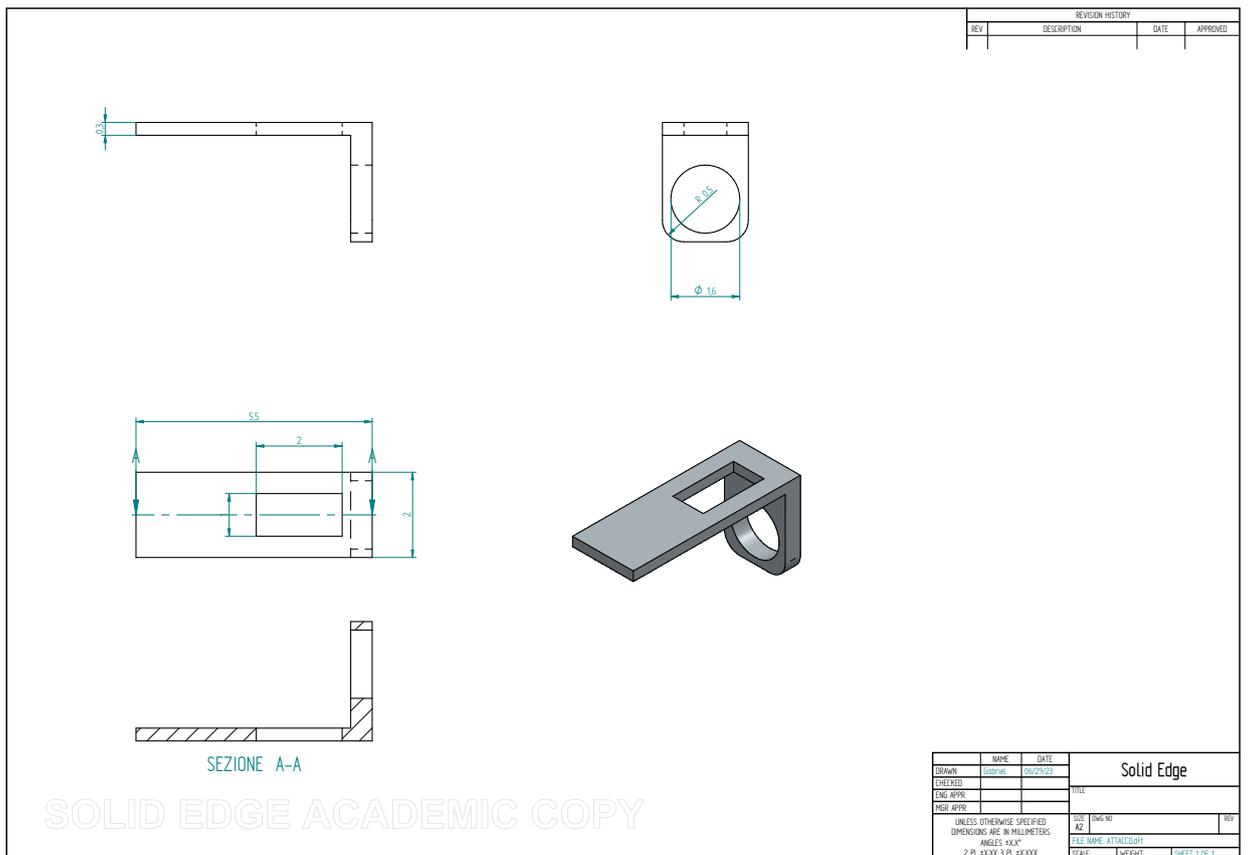


Figura 7.5: Tavola dell'attacco tra pignone e piastra per il bloccaggio

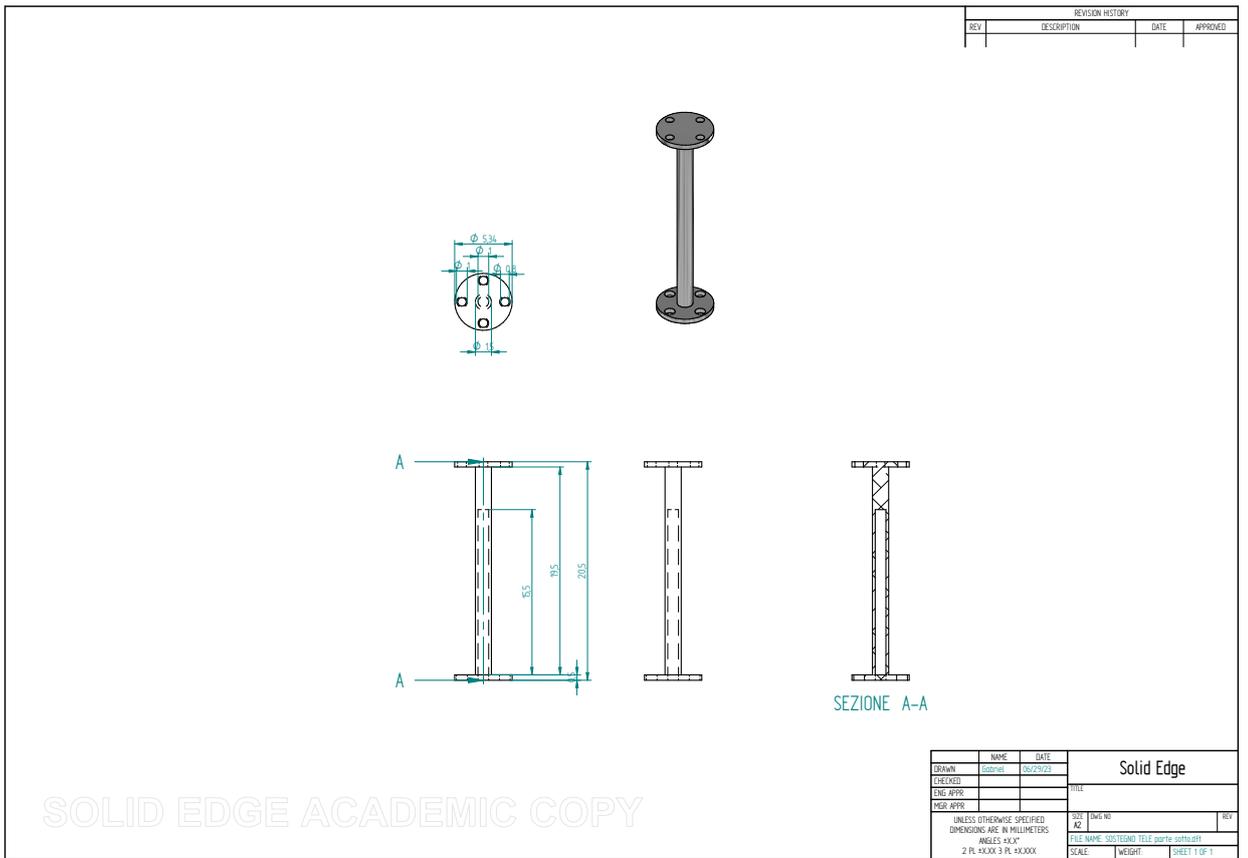


Figura 7.6: Tavola della parte di sotto del sostegno di telecamera e obiettivo

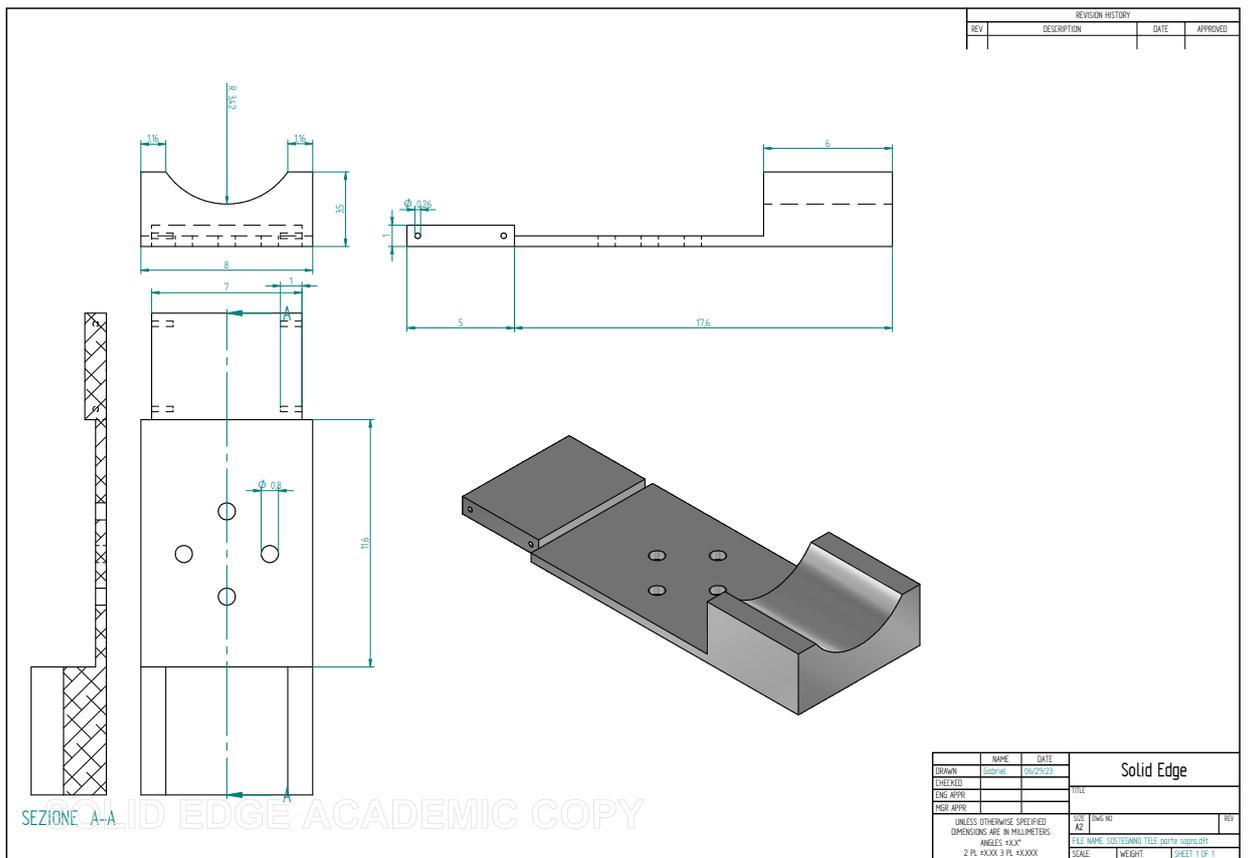


Figura 7.7: Tavola della parte di sopra del sostegno di telecamera e obiettivo

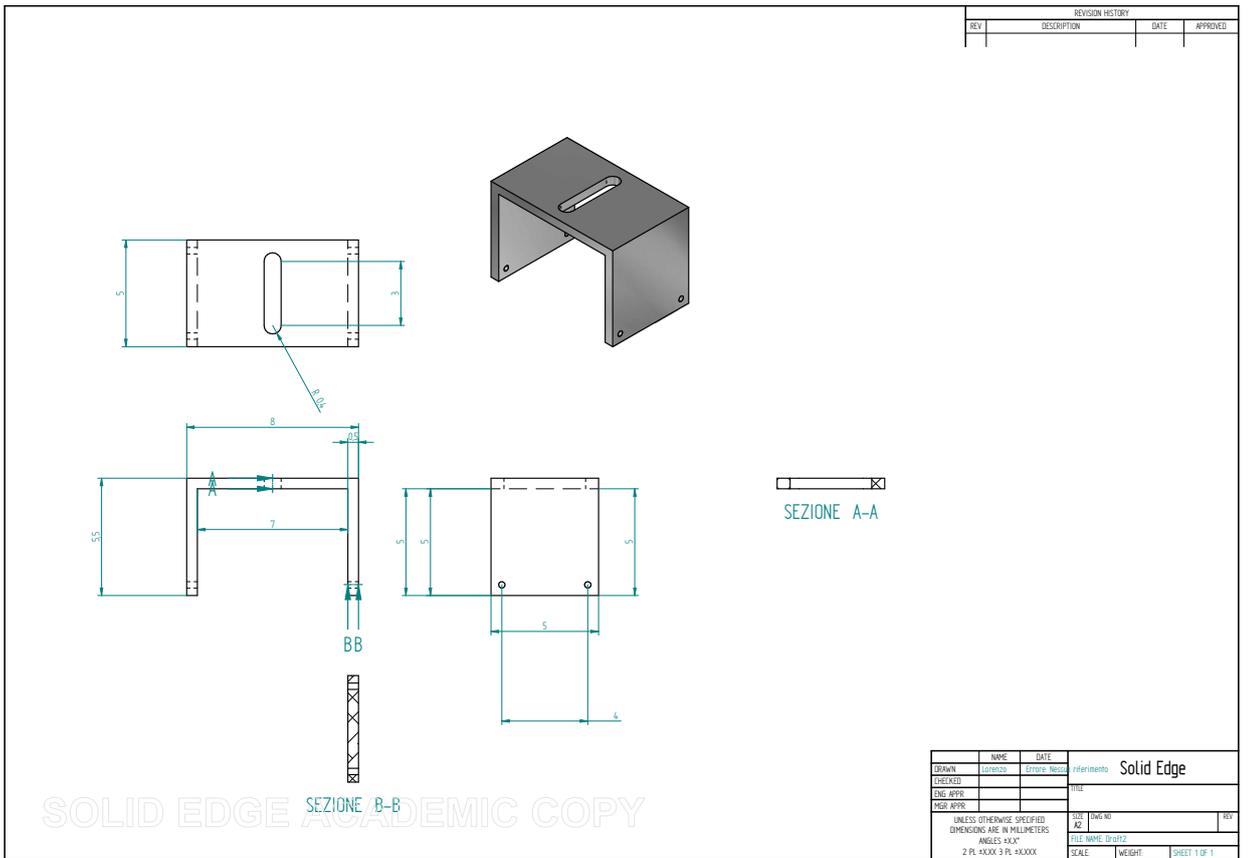


Figura 7.8: Tavola della parte a forma di C

Bibliografia

1. Progetto e costruzione di macchine di Joseph E. Shigley e Richard G. Budynas
2. Costruzione di macchine di Marco Giglio , Massimiliano Gobbi
3. Guide profilate Di Rexroth Bosch Group
4. Guide lineari con manicotti a sfere Di Rexroth Bosch Group
5. Manuale di tecnica lineare Di Rexroth Bosch Group
6. Azionamenti a vite Di Rexroth Bosch Group
7. Guide a sfere su rotaia Di Rexroth Bosch Group
8. Rexroth IndraDrive Mi Drive Systems with KCU02, KSM02, KMS02 Di Rexroth Bosch Group
9. Motori sincroni 1FK7, generazione 2 Di Siemens
10. Giunti elastici senza gioco Di TRASCO ES
11. Martinetti meccanici a vite SJM Catalogo generale Di Marzorati
12. Additive manufacturing;le applicazioni industriali della Stampa 3D di Andreas Gebhardt, Julia Kessler, Laura Thurn
13. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation Di International Digital Image Correlation Society (iDICs)