



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Progetto di un sistema di afferraggio
universale da accoppiare ad una macchina
di trazione/torsione**

**Design of a universal gripping system to
be coupled with a traction/torsion
machine**

Candidato:
Gasparoli Lorenzo

Relatore:
Prof. Rossi Marco

Anno Accademico 2018-2019



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Progetto di un sistema di afferraggio
universale da accoppiare ad una macchina
di trazione/torsione**

**Design of a universal gripping system to
be coupled with a traction/torsion
machine**

Candidato:
Gasparoli Lorenzo

Relatore:
Prof. Rossi Marco

Anno Accademico 2018-2019

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

*A Sonia, Giuliano
e le mie Valentine*

Ringraziamenti

Il raggiungimento di questo traguardo è merito anche di chi mi è stato vicino in questi 3 anni, dandomi la giusta tranquillità per affrontare questo percorso. Grazie alla mia famiglia: ai miei genitori e a mia sorella, che mi hanno sempre supportato, sempre pronti ad aiutarmi e i primi a gioire con me. A voi è dedicata la gioia di questo giorno. Grazie ai miei nonni, zii e cugini, sempre presenti con parole di conforto e di incoraggiamento. Grazie a Valentina per avermi sopportato e stimolato anche a distanza, per avermi dato quel pizzico di irrazionalità che a volte serve. Grazie a Sebastiano e Daniele, compagni di viaggio preziosi durante le interminabili ore di lezione e di treno. Grazie ai miei amici e a tutti quelli che mi hanno donato anche un solo secondo del loro tempo, per un incoraggiamento, una critica o una pacca sulla spalla.

Infine un ringraziamento al Professor Rossi, per l'aiuto fornito durante l'attività di tirocinio collegata a questo elaborato e durante la stesura della tesi stessa, oltre che per la sua disponibilità.

Ancona, Ottobre 2019

Gasparoli Lorenzo

Abstract

This document was written to illustrate all the features and all the various steps that led to the realization of the project carried out by the undersigned and by Sebastiano Donini, both students of the Bachelor of Mechanical Engineering degree, during our experience as trainees at the Department of Industrial Engineering and Mathematical Sciences of the Polytechnic University of Marche, attended by us.

The work we had to do for the Department consisted of designing a grasping system for a machine capable of performing mechanical tests on materials.

In fact, in order to be able to study the material properties more completely, the Department intends to purchase a multi-axial testing machine, ie capable of simultaneously exerting multiple types of load on the test piece, in our case both a tensile load and a torque moment: since these machines are sold without their own grasping system, instead of buying it separately, it was preferred to design it internally, to have the various components manufactured by a workshop.

But what are the requirements that a grabbing system must meet? There are two, simplicity and functionality.

In fact it is not only important that the grip is able to perform the function assigned to it, that is the transmission of loads on the test specimen, but also that the procedure for inserting and removing the specimen is adequately fast, and therefore quite simple: this does not only as a matter of convenience, but also because very long times of insertion and removal of the specimen would clash with the short duration of the test itself.

Furthermore, given the maximum loads that can be exerted by the machine, it is important to be careful that the various components that make up the system are not stressed too much, given that the grip should not only not break during the test, but must be able to be used at least for a fairly high number of tests.

That is why, having to carry out the design from scratch, it was decided to work in pairs, because the aspects to be taken into consideration would not have been few and the work would have been quite complex.

My colleague and I have always worked together on the project, seeing ourselves both in the Department and outside the University, taking advantage of the proximity of our homes. The supervision of Professor Rossi was also fundamental, to which we have always shown the progress of our work and asked for advice on how to solve the problems we encountered. Although it was not easy to carry out this project as this was our first experience in the world of design, which is why we often made mistakes whose correction took time and effort, we believe that this experience was very educational, given that it made us touch the phases of a project, the problems to be faced and the analyzes to carry out in order to consider the work valid. Moreover, we also had to work a lot on the computer, with programs from the engineering world like Ansys, which we had never had the opportunity to use before.

Since the project was carried out in pairs, it was decided to collaborate also for the drafting of this document: my colleague and I shared equally the topics to be written and the final product is nothing but the whole of what we both have product.

Going further into the content of the thesis, we can say that it develops into seven chapters, which show step by step what was the evolution of our project.

- The first chapter contains all the research work carried out at the beginning of our internship regarding the mechanical tests and the grasping systems used by the machines that execute them, necessary to have a good knowledge of the field in which we would work. After an initial part in which we talk in general about the various types of mechanical tests, we enter more specifically in the description of the tensile and torsion tests, which are the types of tests that the machine the Department want to buy can perform either separately or in a combined way. In the final part of the chapter, on the other hand, we show what types of machines and grips can be used for this type of most common tests.
- In the second chapter, we go into more detail about our project, as it contains all the specifications regarding the machine for which we designed the grips. Among the various features shown (such as the dimensions, the types of load cells present, the protection barriers ...) there is one particularly important, namely the maximum intensity of the tensile and torsion loads that the machine can exert: these data they will then be fundamental for structural analysis.
- Within the third chapter all the ideas received during the ideation phase of the grabbing are reported. In fact, the final project was not the only idea that came to mind, but we had other ideas too, some similar to the one actually developed, others less so. In the chapter they are not only shown, but also the reasons that led to their abandonment are explained.
- With the fourth chapter we enter more specifically into the idea that we have elaborated, in fact it is here that the grab we have designed is dealt with in detail: not only are the components that form it listed and described, but also the principles that are the basis of its operation. Particular space is devoted to explaining how it is able to transmit the tensile and torsion loads to the specimen, and to the procedure for inserting and removing the latter.
- In the fifth chapter are reported the results of the analyzes done to know which are the maximum tension values perceived by the grip during the exercise, very important information to be able to correctly choose the material with which to make the various components. In order to have very faithful results, various analyzes have been carried out, each of them aimed at determining the tension intensity suffered by a specific group of components.
- Within the sixth chapter is made a purely technical description of the gripping, in fact, here for each component are listed the quantity, the material with which it must be made and the types of work it must undergo. Knowing what types of workings are necessary for the creation of components is particularly important because it gives us an idea of the complexity of the production process and therefore of the cost that will be incurred for their production.
- The seventh chapter is the final chapter of the document, which contains our reflections on the work done.

- In the final part of the thesis an appendix has been added, which contains the dimensional drawing of all the components of the grip.

Sommario

Questo elaborato è stato scritto al fine di illustrare tutte le caratteristiche e tutti i vari passaggi che hanno portato alla realizzazione del progetto svolto dal sottoscritto e da Sebastiano Donini, entrambi studenti del corso di Laurea Triennale di Ingegneria Meccanica, durante la nostra esperienza da tirocinanti presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche, da noi frequentata.

Il lavoro che abbiamo dovuto svolgere per il Dipartimento consisteva nella progettazione di un sistema di afferraggio per una macchina capace di eseguire prove meccaniche sui materiali. Infatti il Dipartimento, per poter studiare in modo più completo le proprietà materiali, ha intenzione di acquistare una macchina per prove multiassiali, ovvero capace di esercitare contemporaneamente più tipologie di carico sul provino, nel nostro caso sia un carico di trazione che un momento di torsione: essendo però queste macchine vendute senza sistema di afferraggio proprio, invece di acquistarlo separatamente si è preferito progettarlo internamente, per farne realizzare i vari componenti da un'officina.

Ma quali sono i requisiti che un sistema di afferraggio deve soddisfare? Di fatto sono due, la semplicità e la funzionalità.

Infatti non è importante solo che l'afferraggio riesca a svolgere la funzione ad esso assegnato, ovvero la trasmissione dei carichi sul provino da testare, ma anche che la procedura di inserimento e rimozione del provino sia adeguatamente veloce, e quindi abbastanza semplice: questo non solo per una questione di comodità, ma anche perché tempi molto lunghi di inserimento e rimozione del provino stonerebbero con la corta durata della prova stessa.

Inoltre, noti i carichi massimi esercitabili dalla macchina, è importante stare attenti che i vari componenti che formano il sistema non vengano sollecitati in modo troppo eccessivo, visto che l'afferraggio non solo non deve rompersi durante la prova, ma deve poter essere utilizzato almeno per un numero abbastanza elevato di prove.

Ecco perché, dovendo realizzare la progettazione partendo da zero, si è deciso di lavorare in coppia, perché gli aspetti da dover tenere in considerazione non sarebbero stati pochi e il lavoro sarebbe stato abbastanza complesso.

Io e il mio collega abbiamo di fatto lavorato sempre insieme sul progetto, vedendoci sia in Dipartimento che al di fuori dell'Università, approfittando della vicinanza delle nostre abitazioni. Fondamentale è stata anche la supervisione del Professor Rossi, a cui abbiamo sempre mostrato i progressi del nostro lavoro e chiesto consigli su come risolvere i problemi che abbiamo incontrato.

Nonostante realizzare questo progetto non sia stato semplice in quanto questa è stata la nostra prima esperienza nel mondo della progettazione, motivo per cui abbiamo commesso spesso degli errori la cui correzione ha necessitato tempo e impegno, riteniamo che questa esperienza sia stata molto formativa, visto che ci ha fatto toccare con mano quelle che sono le fasi di realizzazione di un progetto, le problematiche da affrontare e le analisi da dover svolgere per ritenere il lavoro valido. Inoltre, abbiamo dovuto anche lavorare tanto al computer, con programmi appartenenti al mondo dell'ingegneria come Ansys, che non avevamo mai avuto occasione di usare prima.

Essendo stato il progetto svolto in coppia, si è deciso di collaborare anche per la stesura di questo documento: io e il mio collega ci siamo divisi equamente gli argomenti da scrivere e il prodotto finale non è altro che l'insieme di quello che entrambi abbiamo prodotto.

Entrando più nel merito del contenuto della tesi, si può dire che essa si sviluppa in sette capitoli, che mostrano passo passo quella che è stata l'evoluzione del nostro progetto.

- Il primo capitolo contiene tutto il lavoro di ricerca svolto all'inizio del nostro tirocinio riguardo alle prove meccaniche e ai sistemi di afferraggio utilizzati dalle macchine che le eseguono, necessario per avere una buona conoscenza del campo in cui avremmo lavorato. Dopo una parte iniziale in cui si parla in generale delle varie tipologie di prove meccaniche, si entra più nello specifico nella descrizione delle prove di trazione e di torsione, che sono i tipi di test che la macchina che si vuole acquistare può eseguire sia separatamente che in modo combinato. Nella parte finale del capitolo, invece, si mostrano quali sono le tipologie di macchine e di afferraggi utilizzabili per questo tipo di prove più diffusi.
- Nel secondo capitolo si entra più nel dettaglio nel nostro progetto, in quanto in esso sono contenute tutte le specifiche riguardanti la macchina per cui vanno progettati gli afferraggi. Tra le varie caratteristiche mostrate (come le dimensioni, i tipi di celle di carico presenti, le barriere di protezione...) ce n'è una particolarmente importante, ovvero la massima intensità dei carichi di trazione e torsione che la macchina può esercitare: questi dati saranno poi fondamentali per l'analisi strutturale.
- All'interno del terzo capitolo vengono riportate tutte le idee avute durante la fase di ideazione dell'afferraggio. Infatti quella del progetto finale non è stata l'unica idea che ci era venuta in mente, ma ne avevamo avute anche altre, alcune simili a quella poi effettivamente sviluppata, altre meno. Nel capitolo non solo esse vengono mostrate, ma vengono anche spiegati i motivi che hanno portato a un loro abbandono.
- Con il quarto capitolo si entra più nello specifico dell'idea che abbiamo elaborato, infatti è qui che viene trattato nel dettaglio l'afferraggio che abbiamo progettato: non solo vengono elencati e descritti i componenti che lo formano, ma vengono spiegati anche i principi che stanno alla base del suo funzionamento. Particolare spazio viene dedicato alla spiegazione di come esso riesca a trasmettere i carichi di trazione e torsione al provino, e alla procedura di inserimento e rimozione di quest'ultimo.
- Nel quinto capitolo sono riportati i risultati delle analisi fatte per conoscere quali sono i massimi valori di tensione percepiti dall'afferraggio durante l'esercizio, informazione molto importante per poter scegliere in modo corretto il materiale con cui realizzarne i vari componenti. Per avere dei risultati molto fedeli alla realtà sono state effettuate varie analisi, ciascuna delle quali volta a determinare l'intensità tensionale subita da uno specifico gruppo di componenti.
- All'interno del sesto capitolo viene fatta una descrizione puramente tecnica dell'afferraggio, infatti qui per ogni componente ne viene elencata la quantità, il materiale con cui deve essere realizzato e le tipologie di lavorazioni che deve subire. Conoscere quali sono i tipi di lavorazioni necessari per la creazione dei componenti è particolarmente importante perché ci dà un'idea della complessità del processo di realizzazione e quindi del costo che andrà sostenuto per la loro produzione.
- Il settimo capitolo è il capitolo conclusivo del documento, in cui vengono riportate le nostre riflessioni sul lavoro svolto.

- Nella parte finale della tesi è stata aggiunta un'Appendice, la quale contiene il disegno quotato di tutti i componenti dell'afferraggio.

Indice

1. Introduzione: prove meccaniche e macchine di prova	1
1.1. Prove meccaniche monoassiali	1
1.1.1. Prova di trazione	2
1.1.2. Prova di torsione	7
1.2. Prove meccaniche multiassiali	8
1.3. Macchine per test di materiali	9
1.3.1. Macchine di prova di trazione, compressione e flessione	12
1.3.2. Macchine di prova di torsione	14
1.3.3. Macchine di prova di fatica	14
1.3.4. Macchine di prova multiassiali	16
1.4. Afferraggi (Grips)	18
2. Specifiche del progetto	23
2.1. Macchina e carichi	23
2.2. Specifiche tecniche e contenuto del preventivo	24
3. Progetto funzionale	27
3.1. Afferraggio con sistema a cunei	27
3.2. Afferraggio con doppia piastra	31
3.3. Afferraggio con pinze	35
3.3.1. Afferraggio con pinze a L	35
3.3.2. Afferraggio con pinze a T	36
3.4. Afferraggio con slitte e boccola filettata	39
4. Progetto definitivo	43
4.1. Funzionamento generale	45
4.2. Componenti	48
4.2.1. Piastra superiore	48
4.2.2. Piastra inferiore	49
4.2.3. Provino	49
4.2.4. Boccola	50
4.2.5. Ghiera	51
4.2.6. Slitta	51
4.3. Sequenza di montaggio	52
5. Verifiche strutturali	55
5.1. Introduzione	55
5.2. Analisi combinata per la verifica del collegamento macchina-afferraggio	56
5.3. Analisi a trazione	59
5.4. Analisi a torsione	63
5.5. Le tensioni sulla piastra inferiore	65

Indice

6. Distinta base	67
6.1. Lavorazioni meccaniche.	68
7. Conclusioni	71
A. Appendice	75

Elenco delle figure

1.1. Provino in trazione	2
1.2. Esempi di provino per la prova di trazione	3
1.3. Parti del provino	4
1.4. Misurazione dell'allungamento del provino	4
1.5. Diagramma tensione-deformazione	5
1.6. Strizione	6
1.7. Diagrammi di varie tipologie di acciaio bonificato	6
1.8. Esempio di momento torcente	7
1.9. Diagrammi torsione-angolo	7
1.10. Esempi di test su materiali non metallici.	9
1.11. Macchine di prova universali.	11
1.12. Dispositivi di misura.	12
1.13. Macchina di trazione orizzontale.	13
1.14. Cella di carico bidirezionale.	13
1.15. Macchina di torsione orizzontale e torsionometro.	14
1.16. Schema di macchine per prove di fatica.	15
1.17. Sollecitazioni durante prove di fatica.	16
1.18. Macchina modulare per prove multiassiali.	17
1.19. Principali afferraggi per prove di trazione.	19
1.20. Afferraggio meccanico a cuneo.	19
1.21. Afferraggio a morse.	20
1.22. Afferraggio a vite.	21
1.23. Piatto per compressione.	21
1.24. Flessione a 3 e 4 punti.	22
1.25. Afferraggio per torsione.	22
2.1. Macchina Allround Line da 30 a 100 kN.	23
2.2. Controllo remoto con display.	24
2.3. Cella di carico Xforce.	25
3.1. Esempio afferraggio cunei.	27
3.2. Provino e Cuneo del sistema progettato.	28
3.3. Contatto tra provino e cuneo	28
3.4. Modello afferraggio con cunei	29
3.5. Tensioni che si vengono a sviluppare negli elementi dell'afferraggio.	30
3.6. Piastra Trazione	31
3.7. Piastra Torsione	31
3.8. Provino	32
3.9. Step per il collegamento del provino alla macchina.	32
3.10. Elementi modificati che costituiscono una variante al sistema a due piastre.	33
3.11. Collegamento modificato a doppia piastra	34

Elenco delle figure

3.12. Afferraggio con pinze a L	35
3.13. Provino per pinze a L	36
3.14. Collegamento tra provino e pinze a L	36
3.15. Pinza a T	37
3.16. Blocchi che formano l'afferraggio caratterizzato dalla presenza delle pinze a T.	37
3.17. Afferraggio col sistema delle pinze a T	37
3.18. Provino per pinze a T	38
3.19. Collegamento tra provino e pinze a T	38
3.20. Afferraggio realizzato dall'Università di Roma	39
3.21. Provino per afferraggio dell'Università di Roma	40
3.22. Sistema di trasmissione della torsione nell'afferraggio dell'Università di Roma.	40
3.23. Sistema di trasmissione della trazione nell'afferraggio dell'Università di Roma.	41
4.1. Logo del programma Solid Edge.	43
4.2. Esploso dell'afferraggio	44
4.3. Vista complessiva dell'afferraggio	44
4.4. Meccanismo di accoppiamento tra macchina e afferraggio.	45
4.5. Provino e boccola divisa a metà.	46
4.6. Sezione del meccanismo di trazione: piastra inferiore, ghiera e boccola.	46
4.7. Veduta interna dell'afferraggio	47
4.8. Sezione dell'afferraggio per comprensione del meccanismo di torsione.	47
4.9. Piastra superiore con perno di montaggio e le sei viti M10.	48
4.10. Piastra inferiore.	49
4.11. Provino cavo utilizzato per prove combinate.	50
4.12. Boccola divisa nelle due metà.	50
4.13. Ghiera: vista esterna e sezione.	51
4.14. Slitta con fori: uno filettato e uno liscio.	51
4.15. Afferraggio completo a montaggio ultimato.	52
5.1. Ansys	55
5.2. Sistema di collegamento tra macchina e afferraggio.	56
5.3. Mesh.	57
5.4. Carichi e vincoli	57
5.5. Tensioni sull'intero sistema	58
5.6. Tensioni sulla piastra superiore del lato dell'afferraggio su cui sono applicati i carichi.	58
5.7. Tensioni della piastra lato incastro	59
5.8. Tensioni sul perno lato carichi	59
5.9. Tensioni perno lato incastro	59
5.10. Giochi tra boccola, provino e ghiera	60
5.11. Modello utilizzato per l'analisi a trazione.	61
5.12. Posizionamento dei carichi e dei vincoli nell'analisi a trazione.	61
5.13. Distribuzione delle tensioni percepite dalle boccole.	62
5.14. Distribuzione delle tensioni percepite dalle ghiera.	62
5.15. Modello per l'analisi a torsione	63
5.16. Posizionamento dei carichi per l'analisi a torsione	64
5.17. Tensioni sulle slitte	64

5.18. Tensioni nella piastra inferiore 65

Elenco delle tabelle

5.1. Tensioni massime dei componenti.	65
6.1. Distinta componenti.	67

Capitolo 1.

Introduzione: prove meccaniche e macchine di prova

1.1. Prove meccaniche monoassiali

Le prove meccaniche sono dei test necessari per conoscere il comportamento di un determinato materiale soggetto a forze di natura statica o dinamica. Esse vengono eseguite in laboratorio con macchine specifiche su campioni del materiale stesso chiamati comunemente provini o provette.

Queste prove risultano essere indispensabili qualora, ad esempio, si vogliano:

- Conoscere determinate proprietà del materiale, come il suo comportamento elastico, plastico, la resistenza allo snervamento o alla rottura, la tenacità, la resilienza, la durezza o la resistenza alla fatica;
- Capire se il materiale, data una determinata forza, si comporti in modo elastico (cioè si deformi in modo reversibile) o anelastico (ovvero si deformi in modo irreversibile);
- Certificarne la qualità;
- Verificare che il materiale rispetti determinati requisiti di norme ed a esigenze di lavorazione specifiche.

La gamma di prove esistenti è particolarmente ampia e possono essere classificate in varie maniere.[1] Un esempio di classificazione può essere quello che le suddivide in:

- Prove convenzionali, che forniscono valori con cui i vari materiali vengono confrontati, catalogati e caratterizzati;
- Prove simulate o reali, che riproducono nel modo più fedele possibile le condizioni di utilizzo del materiale.

Un'altra tipologia di classificazione tende a suddividere le varie prove in base alla modalità di applicazione dei carichi.[1] Si parla infatti di:

- Prove statiche quando essi vengono applicati in modo graduale e per un tempo abbastanza lungo. In questa categoria rientrano, per citarne alcune, le prove di trazione, di compressione e di durezza.
- Prove dinamiche quando vengono applicati in un tempo breve. Tra queste ci sono le prove d'urto.

- Prove a carico oscillante, usate per verificare il comportamento a fatica del materiale, ovvero quando è sottoposto a dei carichi variabili nel tempo.
- Prove d'attrito quando vengono effettuate tra due corpi striscianti o rotolanti;
- Prove a carico insistente, come quella di scorrimento a caldo;
- Prove periodiche, quando si ripetono nel tempo con frequenza elevata.

È facile capire come, ad esempio durante un lavoro di progettazione, questi test abbiano un'importanza cruciale, in quanto è tramite i loro risultati che il progettista può studiare e scegliere il materiale più adeguato al suo progetto. Per questo motivo le prove meccaniche vengono eseguite nel rispetto di standard o norme ben precise, emesse da Enti appositi. Tra gli organismi di normalizzazione va citato sicuramente l'UNI (l'Ente Nazionale Italiano di Unificazione) e l'organismo competente a livello europeo, il CEN (Comitato Europeo di Normazione) che emette le norme EN che devono essere adottate come norme nazionali da tutti i paesi che fanno parte del CEN. A livello internazionale l'organismo competente è l'ISO (Organizzazione Internazionale per la Normazione), le cui norme possono essere adottate come norme nazionali (ad esempio UNI ISO) o europee (UNI EN ISO). Ovviamente, per effettuare ogni tipologia di prova, serve una determinata macchina capace di svolgerla. In relazione a questo progetto, la macchina per la quale devono essere progettati gli afferraggi è capace di svolgere una prova combinata, ovvero di applicare contemporaneamente durante il test una forza di trazione e un momento torcente. Questi test combinati sono particolarmente utili perché riescono a replicare in modo fedele alla realtà lo stato tensionale che poi effettivamente quel dato materiale andrà a subire in esercizio.[2] In seguito vengono analizzate separatamente le due prove.

1.1.1. Prova di trazione

Stando a quanto riportato dalle norme la prova di trazione statica, effettuata a temperatura costante, consiste nel sottoporre una provetta ad un carico di trazione applicato con una certa velocità d'incremento fino a provocare la rottura, allo scopo di determinare le caratteristiche di resistenza, elasticità e deformabilità del materiale.

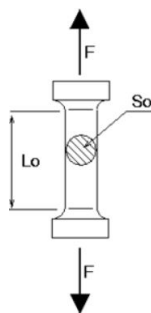


Figura 1.1.: Provino in trazione.

In meccanica, viene definita forza di trazione quella forza esercitata su un corpo che, fissato ad un estremo, viene tirato dall'altro (Figura 1.1). La sollecitazione applicata è di tipo statico, cioè gradualmente crescente, e la prova è di natura distruttiva in quanto provoca la distruzione del provino sulla quale si effettua. [3]

E' la prova meccanica più importante in quanto permette di misurare le fondamentali proprietà meccaniche con le quali si classificano, si designano e si scelgono i materiali metallici. In particolare, mediante questa prova, sono ricavati dati come il carico unitario di snervamento, il carico unitario di rottura e l'allungamento percentuale a rottura.

La prova di trazione si compie anche su elementi quali catene, ganci, asole, funi, giunzioni saldate, chiodature. Inoltre, questa prova costituisce il mezzo di controllo dei processi tecnologici (stampaggio, fucinatura, saldatura, laminazione, trafilatura, trattamenti termici, ecc.) offrendo al progettista valori di riferimento per il calcolo e il dimensionamento degli organi di macchine.[4]

I provini per effettuare la prova devono essere prelevati e preparati conformemente alle prescrizioni delle norme europee relative ai diversi materiali e alle sezioni dei pezzi che si andranno a testare.

Con il termine "saggio" si intende la parte di materiale, prelevata dall'elemento di cui si vuole effettuare il collaudo, in quantità sufficiente per ricavare da esso uno o più provini. Si definisce "barrotto" la parte del saggio, che ha subito un trattamento meccanico ed eventualmente un trattamento termico, destinato alla preparazione dei provini. Il provino è, quindi, parte di un "saggio" e ha forma e dimensioni fissate, portato allo stato voluto per subire una determinata prova. Il materiale da esaminare (saggio) e la preparazione del provino devono avvenire in modo da non alterare le caratteristiche del materiale. Di regola il provino è ottenuto 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 lucidati.[5]

I prodotti di sezione costante come profilati, barre e fili possono essere sottoposti alla prova di trazione senza essere stati preventivamente lavorati: si parla, in questo caso, di "provini non sagomati".

I provini utilizzati per la prova di trazione possono essere a sezione cilindrica o piatti; quelli a sezione cilindrica vengono usati generalmente per test su materiali metallici, mentre per materiali polimerici si preferiscono quelli a sezione rettangolare. Inoltre, essi si differenziano anche in base alla forma delle loro estremità, ovvero in base al tipo di collegamento che hanno con l'afferraggio della macchina che esegue la (Figura 1.2) .

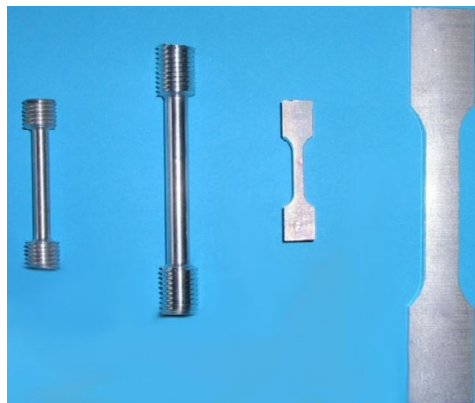


Figura 1.2.: Esempi di provini utilizzabili per la prova di trazione.

Un provino risulta essere caratterizzato da più elementi:

- La lunghezza della parte centrale, chiamata “lunghezza centrale calibrata” (L_c in Figura 1.3);
- La lunghezza iniziale utile tra due riferimenti presenti sulla parte centrale, realizzati tramite un’apposita macchina tracciatrice (L_0);
- Il diametro della parte calibrata, da cui si può ricavare l’area della sezione della parte calibrata;
- Le teste di serraggio;
- I raccordi tra parte centrale e teste di serraggio, utili ad evitare pericolose concentrazioni di sforzi che influirebbero sul risultato della prova;
- La lunghezza totale del provino (L_t).

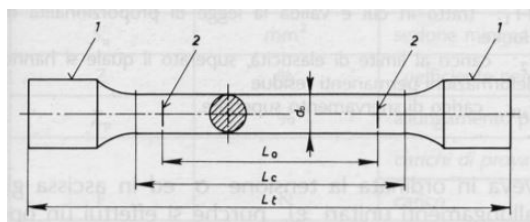


Figura 1.3.: Parti del provino.

La prova, come già detto, porta il provino a rottura. Per misurare l’allungamento totale bisogna semplicemente fare la differenza tra la lunghezza ultima del provino e la lunghezza iniziale utile.

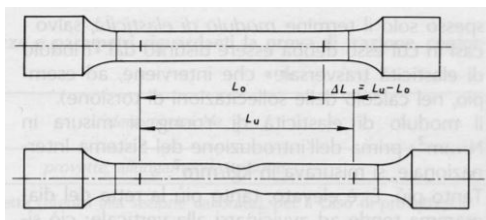


Figura 1.4.: Misurazione dell’allungamento del provino.

La lunghezza ultima non è altro che la distanza tra i riferimenti del provino dopo la rottura, misurata portando a far combaciare i due spezzoni.

Nella prova di trazione il provino è sottoposto ad un carico gradualmente crescente fino alla rottura. Contemporaneamente all’allungamento, che verrà misurato al termine della prova come enunciato sopra, va inevitabilmente sottolineato che il provino subisce anche una diminuzione delle sue dimensioni trasversali, d’altronde il volume dello stesso deve rimanere costante.

La prova è effettuata per individuare le caratteristiche di resistenza, deformabilità ed elasticità di un materiale, individuabili tramite un diagramma chiamato “tensioni-deformazioni”, che pone nell’asse delle ascisse la deformazione in allungamento e in quello delle ordinate l’intensità della tensione percepita dal provino.[5]

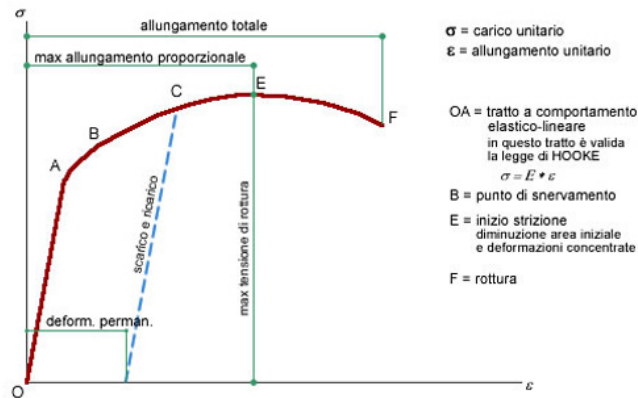


Figura 1.5.: Diagramma tensione-deformazione.

Il diagramma permette l'identificazione di tre regioni, dette regimi, che evidenziano un comportamento differente del materiale al variare del carico. Questi regimi sono tre, e sono: il regime elastico, elasto-plastico e plastico.

Nel regime elastico (che arriva fino al punto A del diagramma in Figura 1.5) l'applicazione di un carico determina un proporzionale allungamento del provino: il diagramma risulta dunque essere rettilineo; le deformazioni, inoltre, sono elastiche: dopo l'eliminazione della forza il provino riacquista le dimensioni iniziali.

In questa parte della prova, in sintesi, tutta l'energia che viene "scaricata" sul pezzo, affinché nasca un certo allungamento, rimane completamente utile per la fase di ritorno, dove il pezzo riacquista la forma e le dimensioni originarie (deformazione inversa). L'elasticità è quindi la proprietà che ha un corpo metallico di deformarsi per effetto di un carico esterno e di riacquistare forma e dimensioni originarie quando cessa il carico stesso.

In questo tratto è valida la "legge di Hooke", che enuncia come la tensione sul provino e il suo allungamento siano legate da una costante di proporzionalità E, pari alla pendenza del diagramma stesso, chiamata Modulo di Young. Superato il regime elastico la legge di Hooke non risulta più valida, perciò in questo caso cessando la proporzionalità tra carichi e allungamenti si andrà incontro a delle deformazioni di tipo plastico.

Ciò avviene perché l'energia meccanica utilizzata per effettuare l'allungamento del provino non viene riutilizzata completamente per il riposizionamento della struttura a causa di un dissipamento termico dovuto alla trasformazione dell'energia meccanica in energia termica (calore) la quale viene in parte dispersa all'esterno della struttura. Bisogna però ricordare che non avviene una deformazione completamente plastica, ma solo in parte, perché parte della struttura tende a ritornare alla posizione di origine. Qui ci troviamo ancora sotto il punto B del diagramma, nel regime elasto-plastico, oltre al quale si va incontro a delle deformazioni effettivamente di tipo plastico, mentre qua sono praticamente ancora nulle.

L'ultimo tratto del diagramma è, come detto, il regime plastico: superato il punto B, va scomparendo l'elasticità e si evolve un fenomeno di deformazione plastica che con l'aumentare del carico si manifesta in maniera sempre più evidente e che porterà poi alla rottura del provino.

Quando il carico raggiunge il punto B del diagramma, le distanze interatomiche del reticolo cristallino sono divenute così grandi che, anche quando dovesse cessare l'applicazione del carico, gli atomi non riprendono più la posizione primitiva. Dopo il punto B, quindi, ha

inizio la deformazione plastica in quanto le deformazioni sono irreversibili.

Il carico associato al punto B è detto “carico di snervamento”, ed è appunto il carico oltre il quale il materiale comincia a deformarsi plasticamente.

Nel punto E la tensione raggiunge il valore massimo, anche detta tensione di rottura: essa rappresenta la massima tensione sopportata dal provino durante il test. Perciò superato il punto E ci si avvicina sempre più alla rottura del materiale sottoposto alla prova. Oltre il tratto E si ha un allungamento localizzato del provino anche se il carico diminuisce. Tale allungamento è tanto più grande quanto più duttile è il materiale e porta a una restrizione visibile della sezione, ovvero al cosiddetto fenomeno della “strizione” (Figura 1.6). Nel punto F si ha la rottura del provino e la tensione che la determina è detta “tensione ultima”. [3]

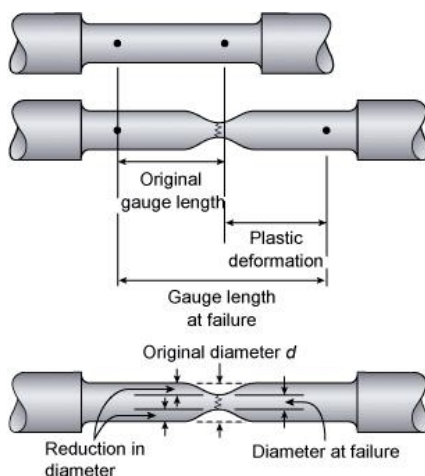


Figura 1.6.: Strizione.

Ovviamente a seconda del materiale testato si otterranno diagrammi differenti, che evidenzieranno le loro differenti caratteristiche e proprietà.

Ecco, ad esempio, dato un acciaio bonificato, come cambia il diagramma a seconda della quantità di carbonio in esso contenuto (Figura 1.7).

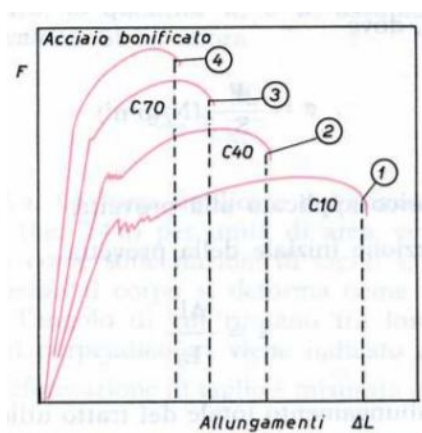


Figura 1.7.: Diagrammi di varie tipologie di acciaio bonificato.

1.1.2. Prova di torsione

Un solido è sollecitato a torsione quando le sue sezioni trasversali tendono a ruotare mutuamente per effetto di due coppie di forze, uguali e contrarie che agiscono in piani normali all'asse longitudinale del solido, ad una certa distanza tra loro. Per essere soggetto a torsione, su un solido, deve esercitarsi un momento torcente agente nel piano perpendicolare all'asse del solido stesso.

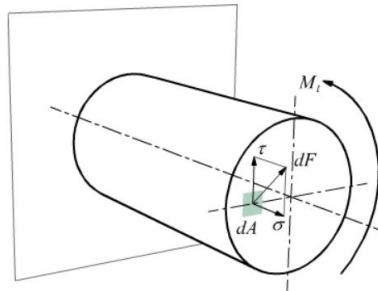


Figura 1.8.: Esempio di momento torcente.

Una prova di torsione può essere condotta sulla maggior parte dei materiali per determinare le proprietà torsionali del materiale. Queste proprietà comprendono, ad esempio:

- Modulo di elasticità a taglio;
- Resistenza di snervamento al taglio (la tensione limite oltre la quale cominciano le deformazioni plastiche);
- Resistenza ultima al taglio (la tensione più elevata che si ha prima della rottura);
- Duttilità (misura in cui un materiale può sostenere una deformazione plastica senza rompersi).[6]

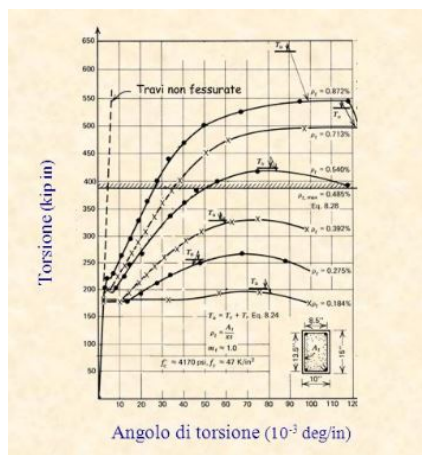


Figura 1.9.: Diagrammi torsione-angolo.

Sebbene non sono uguali, sono analoghe alle proprietà che possono essere determinate durante una prova di trazione. Infatti, il “diagramma della coppia di torsione in funzione

dell'angolo" sembra molto simile ad una curva "sforzo e deformazione" che potrebbe essere generata da una prova di trazione (Figura 1.9).

Molti prodotti e componenti sono sottoposti a forze di torsione durante il loro funzionamento. Prodotti come tubi biomedicali di catetere, interruttori, giunzioni, e assi automobilistici dello sterzo sono solo alcuni dispositivi soggetti a tali sollecitazioni torsionali. Per testare questi prodotti in torsione, i produttori sono in grado di simulare le reali condizioni della vita in servizio, controllare la qualità del prodotto, verificare i progetti, e garantire adeguate tecniche di produzione. [2] La torsione può essere eseguita applicando solo un moto rotatorio o applicando entrambe le forze assiali (trazione o compressione) e torsionali. [1] I tipi di prove di torsione variano da prodotto a prodotto, ma in genere appartengono sempre a una delle seguenti famiglie:

- Prova di sola torsione: effettuata applicando solo carichi torsionali al provino.
- Prova di torsione assiale: realizzata applicando entrambe le forze assiali (trazione o compressione) e torsionale al provino.
- Prova fino alla rottura del provino: caratterizzata dalla torsione del prodotto, componente o del provino fino alla rottura. La rottura può essere classificata come una rottura fisica o una piega/ difetto del provino.
- Prove di Snervamento Convenzionale: consiste nell' applicazione di un carico torsionale e tenendo questo carico torsionale per una data quantità di tempo.
- Prove di Funzionamento: esse sono le prove su assemblati completi o su prodotti come tappi di bottiglia, penne, interruttori di selezione o asse sterzo per verificare che il prodotto funzioni come previsto sotto i carichi di torsione.

1.2. Prove meccaniche multiassiali

Per quanto concerne i test di materiali metallici, è noto che il cedimento finale è strettamente legato all'accumulo di deformazione plastica e al danneggiamento duttile. Questi ultimi sono significativamente influenzati dal tipo di sollecitazione applicata. Negli ultimi anni, alcuni cedimenti strutturali inaspettati di componenti sottoposti a sollecitazioni combinate, hanno evidenziato la necessità di elaborare nuovi modelli numerici per la caratterizzazione del comportamento dei materiali metallici. Si è così sviluppata una modellistica nuova, in grado di tener conto nel legame costitutivo di dipendenze più complesse dello stato di sollecitazione. In questo contesto, al fine di una corretta validazione su base sperimentale dei nuovi modelli introdotti e per poter eventualmente elaborarne di nuovi, si è reso necessario sviluppare prove che sottopongono il materiale a sollecitazioni di tipo misto. Pertanto fare affidamento soltanto sulla classica prova di trazione standard o sulle altre prove monoassiali non è più sufficiente e anzi spesso porta ad approssimazioni non accettabili, descrivendo erroneamente il comportamento del materiale. [7]

Tra le prove multiassiali che più di altre si sono imposte, c'è quella mista di trazione-torsione, prova per la quale è predisposta la macchina che l'Università acquisterà, e che quindi assume particolare rilievo per questo studio.

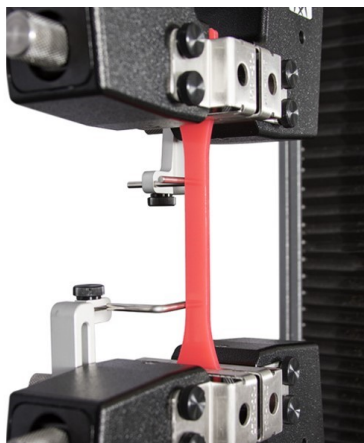
Da queste prove si ottengono tutte le grandezze di carico e di spostamento progressive fino alla rottura, come per le altre prove. Questi risultati, che possono essere integrati con informazioni aggiuntive ricavate da analisi FEM, vengono usati direttamente per calibrare

dei modelli numerici: quelli per la descrizione del legame costitutivo e quelli per prevedere l'evoluzione del danneggiamento duttile. L'utilità di queste nuove prove consiste poi anche nel fatto di poter ricostruire con precisione il percorso di carico verificatosi su alcuni punti critici di componenti reali. [5] Questo è consentito dalla possibilità di imprimere stati di sollecitazione anche molto complessi, permettendo una verifica sperimentale diretta della resistenza di componenti finiti (e non solo provini). Sono chiari quindi i vantaggi ottenuti dall'introduzione di queste nuove prove:

- Migliore caratterizzazione del comportamento elasto-plastico dei materiali metallici.
- Migliore caratterizzazione del danneggiamento duttile dei materiali metallici.
- Possibilità di calibrare o convalidare nuovi modelli numerici per testare le risposte meccaniche e le resistenze ultime dei materiali metallici.
- Riproduzione in laboratorio delle esatte condizioni di sollecitazione (in particolar modo stati di tensione multiassiali) di provini o componenti finiti: in questo modo si è in grado di ricavare dati su alcuni punti critici quando il pezzo viene portato alle condizioni limite di esercizio. Inoltre è possibile utilizzare queste prove come verifica sperimentale diretta durante lo stadio di progettazione, ricavando informazioni dalle quali dedurre immediatamente fattibilità e grado di sicurezza dei prodotti finali. Tutto ciò avviene anche con un ovvio risparmio di tempi e costi.[7]

1.3. Macchine per test di materiali

La fase di test di un materiale, finalizzata a dedurne le proprietà che lo caratterizzano, assume sempre più importanza oggi giorno, considerando la vastità di materiali diversi utilizzati nei vari campi della tecnica e l'incessante sperimentazione su di essi. Pertanto, prove meccaniche di vario tipo risultano utili, oltre che sui metalli, anche su materiali ceramici, plastica, gomma, carta, legno, materiali tessili, componenti elettronici. [4]



(a) Prova di trazione su materiale plastico.



(b) Prova di flessione su legno.

Figura 1.10.: Esempi di test su materiali non metallici.

Allo stesso tempo, dato un determinato materiale, si potranno effettuare su di esso tutte le principali prove meccaniche, che comprendono ad esempio: resistenza a trazione

e compressione, flessione, torsione, puncture test, resistenza a taglio, durezza e prove di fatica.[1] Tutte queste prove sono standardizzate (in Italia si fa riferimento, per i metalli, alla UNI 556 per la trazione, UNI 558 per la compressione e UNI 559 per la flessione statica) e viene definito un procedimento unificato sia per quanto riguarda la preparazione dell'attrezzatura sia per lo svolgimento del test vero e proprio e le relative condizioni (come ad esempio quelle di temperatura e umidità dell'ambiente).

Questo porta quindi all'esistenza di una grande varietà di macchine per soddisfare le varie esigenze di test. Tali macchine si differenziano innanzitutto per tipo di prova e massimo carico applicabile: sono infatti queste le principali caratteristiche che definiscono forma e dimensioni di un macchinario. A queste vanno ad aggiungersi poi le varie attrezzature specifiche per ogni tipo di materiale (non sempre, a volte gli stessi elementi di una macchina sono ugualmente efficaci per più di un materiale): un particolare tipo di afferraggi o un diverso meccanismo per la rilevazione delle deformazioni. Infine anche la dotazione software della macchina potrebbe differire a seconda dell'applicazione. È bene inoltre indicare che da diversi anni ormai si è diffusa anche la pratica, in tanti laboratori, di effettuare test diretti sul componente finito piuttosto che su un provino dello stesso materiale. Questa pratica è impiegata soprattutto per pezzi di strutture particolarmente critici, per i quali è necessario simulare le reali condizioni di esercizio. Naturalmente per effettuare tali prove si ha bisogno di macchine e attrezzature speciali, spesso realizzate su misura, per poter applicare i vari carichi e impartire le deformazioni prescelte su pezzi di forme anche molto diverse. Detto ciò, è anche giusto riportare che in realtà si è sempre cercato di fabbricare macchine che fossero compatibili con più materiali e che avessero la capacità di svolgere più tipologie di test, visti anche i costi spesso elevati di una singola macchina. Pertanto spesso si incontrano macchine cosiddette "universali" le quali presentano ad esempio: attacchi standardizzati per il montaggio di diversi tipi di afferraggio, compatibilità con vari sistemi di misura e anche con diversi software gestibili dal pannello di controllo.

Considerando quindi una generica macchina di prova, possiamo distinguere alcuni elementi comuni:

- La parte fissa, costituita dal telaio: dimensionato in base ai carichi da sopportare, può presentare una struttura ad 1 colonna (per carichi molto bassi), 2 colonne (la configurazione più largamente utilizzata) o anche a 4 (si può trovare in macchine per prove di torsione perché dona più rigidità torsionale all'intero telaio)
- L'elemento mobile (traversa o pistone attuatore)
- Il meccanismo di movimento con velocità regolabile (elettromeccanico o idraulico)
- Gli afferraggi (maggiormente approfonditi alla sezione 1.3)
- Dispositivi di misura
- Il pannello di controllo

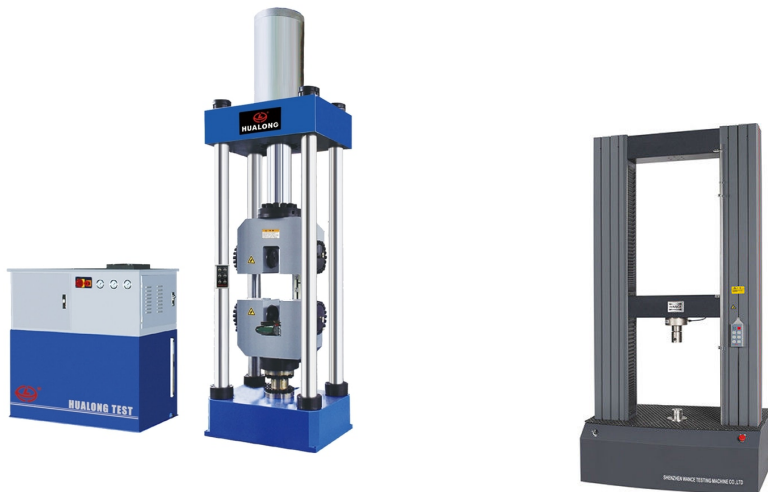
Le caratteristiche meccaniche più rilevanti di una macchina sono il carico massimo applicabile, la velocità massima di applicazione del carico e lo spostamento massimo (corsa) dell'elemento mobile. Si possono distinguere le macchine in elettromeccaniche o servoidrauliche, in base al meccanismo di movimento:

- Elettromeccaniche: un motore elettrico viene collegato alla traversa mobile tramite ingranaggi. Sono adatte a prove di tipo statico ma non dinamico, presentano maggiore

1.3. Macchine per test di materiali

semplicità e sicurezza, hanno una corsa massima della traversa mobile molto più lunga e vengono preferite per carichi bassi ($<4\text{kN}$) perché più convenienti.

- **Servoidrauliche:** il fluido in pressione proveniente da una pompa idraulica aziona il pistone attuatore, tramite una valvola si regola la portata e quindi anche la forza applicata. Sono utilizzate per carichi più elevati ($>20\text{kN}$) e presentano lo svantaggio di pompe anche molto ingombranti per macchine ad elevata capacità di carico.



(a) Macchina universale servoidraulica.

(b) Macchina universale elettromeccanica.

Figura 1.11.: Macchine di prova universali.

I dispositivi di misura previsti su una normale macchina ci consentono di ricavare dati importanti (durante il test e a prova finita) riguardanti forza, spostamento e deformazione:

- **Forza.** I dati sulla forza si ricavano mediante la cella di carico, collegata ad uno degli afferraggi. Tale cella è in sostanza un elemento elastico del quale misuriamo la deformazione tramite estensimetri opportunamente applicati. Tramite relazioni matematiche siamo in grado di ricavare la tensione agente e quindi la forza applicata. Esistono celle di carico diverse, soprattutto in relazione al carico massimo misurabile (fondo scala): in generale è consigliabile utilizzare celle con fondo scala non eccessivamente più alto del carico applicato ($>80\%$) per diminuire l'incertezza di misura.
- **Spostamento.** Lo spostamento dell'elemento mobile si misura tramite un dispositivo LVDT: la traslazione di un elemento metallico immerso in un campo magnetico generato da un avvolgimento in cui viene fatta passare corrente alternata, genera una variazione di corrente indotta misurabile. Da quest'ultima si risale al valore dello spostamento. L'LVDT è uno strumento molto preciso in sé, ma il valore dello spostamento ricavato in questo caso tiene conto anche di deformazioni della macchina e degli afferraggi.
- **Deformazione.** La deformazione viene in genere misurata tramite un dispositivo detto estensometro. Questo presenta due coltelli posti a contatto col provino, dei quali uno è mobile. Durante la deformazione si misura lo spostamento del coltello mobile con un principio simile a quello che utilizza l'LVDT. Gli estensometri sono necessari e a volte prescritti dalle norme perché se la deformazione fosse misurata sulla base dello spostamento della traversa mobile, avremmo una misura molto grossolana poiché

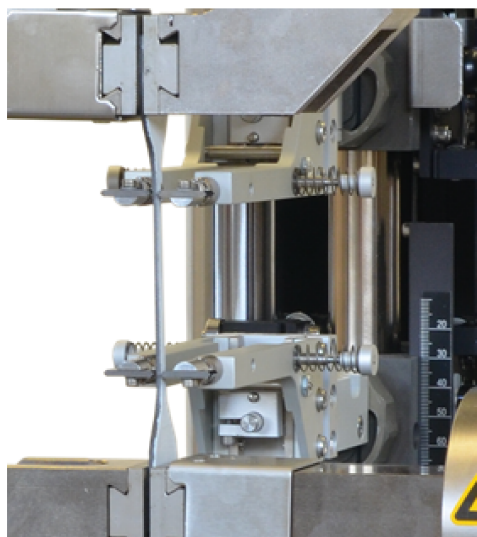
tale valore non tiene conto infatti dei giochi, della deformazione del telaio, dei minimi disallineamenti delle viti. [4]



(a) Cella di carico ad S.



(b) LVDT.



(c) Estensometro.

Figura 1.12.: Dispositivi di misura.

Nell'ambito di questo studio siamo maggiormente interessati alle proprietà statiche e cicliche dei materiali metallici e ad alcune delle principali prove meccaniche effettuate su di essi, perciò si riportano esempi di macchine utilizzate per le seguenti prove:

- Prove statiche: trazione, compressione, flessione, torsione
- Prove cicliche: fatica

1.3.1. Macchine di prova di trazione, compressione e flessione

La forma di una comune macchina di trazione è sostanzialmente quella descritta a proposito delle macchine universali, proprio perché questa prova è la più semplice e diffusa.

1.3. Macchine per test di materiali

Una prima distinzione si può fare tra macchine orizzontali e macchine verticali: le prime si rendono necessarie quando si vogliono testare provini molto lunghi (anche fino a 10m) quindi, ad esempio, nel caso di funi, catene, cavi. Le seconde sono le più diffuse e la lunghezza massima del provino dipende dalla macchina, anche se molto raramente raggiunge i 2m.[8] I meccanismi di movimentazione sono gli stessi descritti per le macchine universali, quindi



Figura 1.13.: Macchina di trazione orizzontale.

elettromeccanico o servoidraulico.

Le celle di carico normalmente utilizzate sono del tipo “ad S” visibili in Figura 1.12a oppure come quelle di Figura 1.14, bidirezionali e quindi utilizzabili anche per prove di compressione.

Per misurare la deformazione si utilizzano gli estensometri, già descritti in precedenza, di



Figura 1.14.: Cella di carico bidirezionale.

cui si può vedere un esempio in Figura 1.12c. Generalmente le macchine di trazione sono anche in grado di effettuare prove di compressione, poiché è sufficiente applicare il carico in direzione opposta. Non è neppure richiesta la sostituzione della cella di carico nel caso in cui se ne utilizzi una di tipo bidirezionale. L'unica vera modifica sta nel sostituire gli afferraggi della prova di trazione con dei piatti fabbricati appositamente per la prova di compressione, quindi con una finitura superficiale tale da garantire determinate condizioni di attrito all'interfaccia piatto-provino. Tuttavia, molte proprietà dei metalli, come limite elastico e di snervamento, sono già deducibili dalla prova di trazione poiché il comportamento a compressione è, con buona approssimazione, simmetrico. Per tale motivo questa prova è ben più importante per i materiali ceramici.[8]

Sulle stesse tipologie di macchine (considerando però soltanto quelle verticali) è possibile effettuare poi anche prove di flessione. Come facilmente intuibile, anche in questo caso la

cella di carico può rimanere la stessa ma si dovranno montare degli accessori specifici (visibili al capitolo 1.3) in sostituzione dei classici afferraggi. Anche questa prova è in realtà poco diffusa per materiali metallici, infatti si usa ad esempio per risalire alla tensione massima di trazione di materiali ceramici, per i quali la prova di trazione standard risulta difficoltosa (ad esempio per il problema di come afferrare il provino).

1.3.2. Macchine di prova di torsione

Le macchine di prova di torsione pura differiscono per quanto riguarda la forma da quelle di trazione o universali viste finora, la classica configurazione è infatti quella orizzontale che garantisce una maggiore rigidità: per lo stesso motivo, nel caso in cui la macchina sia verticale, si adatterà una soluzione a 4 colonne (anziché le 2 delle macchine di trazione).[9] Come gli altri tipi di macchine, anche queste possono essere elettromeccaniche o servoidrauliche con gli stessi pro e contro visti all'1.2. Gli altri elementi che differenziano le macchine per torsione pura dalle macchine universali sono il tipo di afferraggi, la cella di carico e il sistema di misurazione della deformazione del provino. Per misurare il carico applicato istante per istante ci si affida a celle di carico (torsimetri) specifiche per la torsione, simili a quella di Figura 1.15; il sistema di afferraggio sarà concettualmente diverso da quelli per trazione perchè deve impedire il moto relativo di rotazione tra provino e afferraggio, quindi non si può fare affidamento su una filettatura, ma spesso si utilizzano degli elementi posti a contatto con le facce del provino e successivamente serrati tramite viti o pneumaticamente; la deformazione viene misurata tramite estensimetri oppure tramite delle versioni angolari degli estensimetri utilizzati per la trazione.

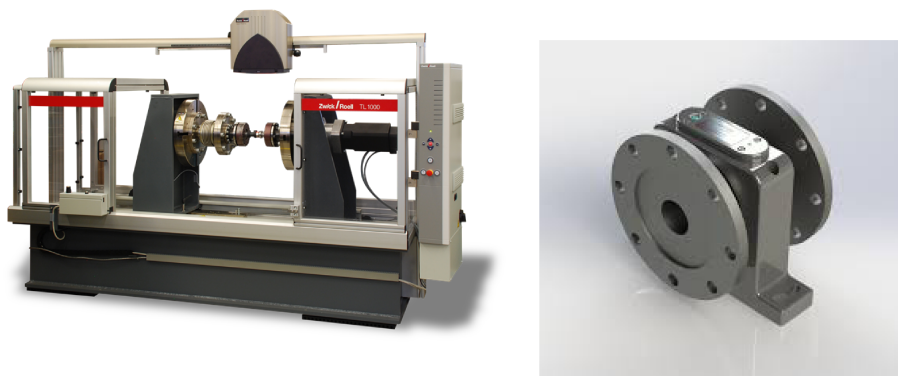


Figura 1.15.: Macchina di torsione orizzontale e torsimetro.

1.3.3. Macchine di prova di fatica

Le prove di fatica si possono svolgere su un pezzo meccanico reale, su un modello in scala oppure su di un provino. Per determinare la resistenza del materiale sotto l'azione di carichi di fatica esso viene sottoposto a forze variabili ciclicamente nel tempo. Le macchine di prova più comuni producono uno stato tensionale monoassiale ed applicano uno dei seguenti carichi: flessione piana alternata, flessione rotante, trazione-compressione, torsione alternata.[10]

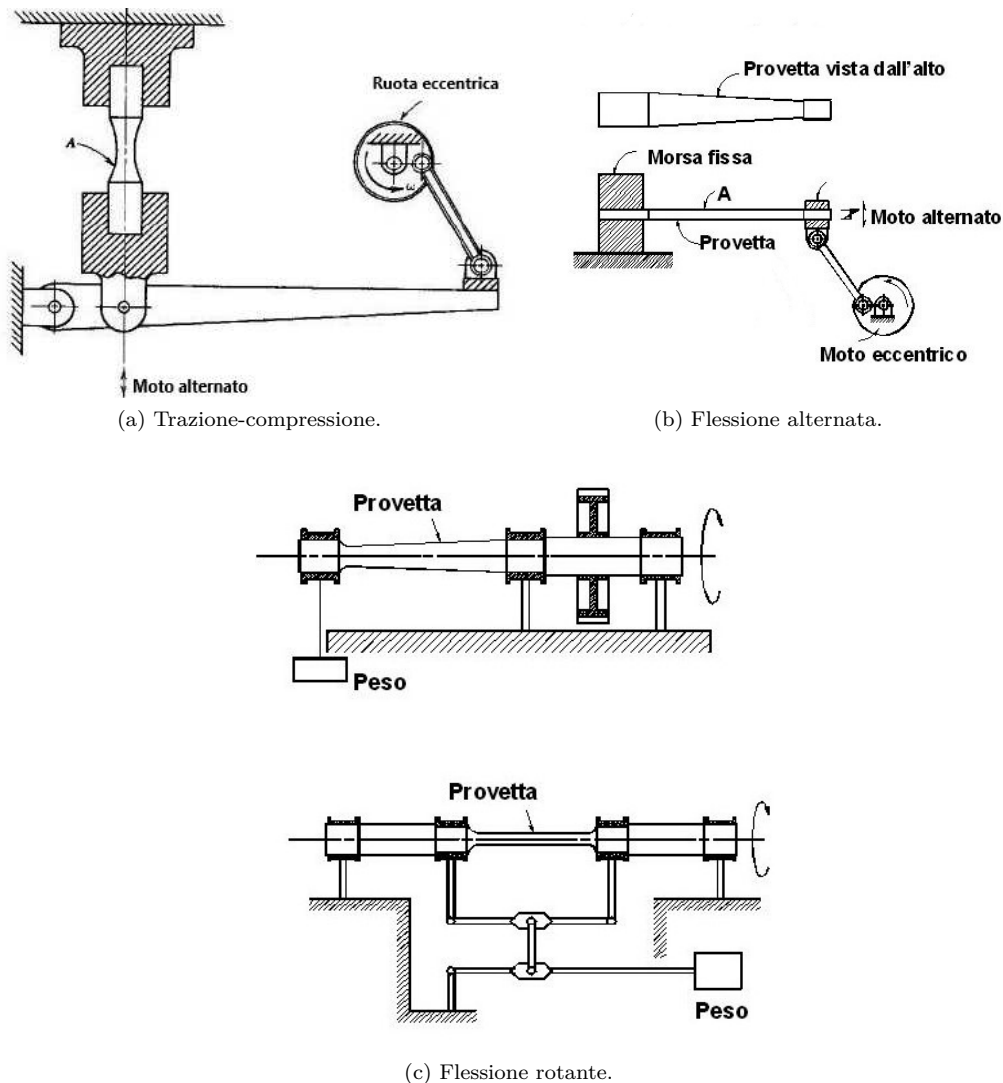


Figura 1.16.: Schema di macchine per prove di fatica.

Oltre che per la modalità di carico esse differiscono per il meccanismo che fa da attuatore (elettromeccanico o servoidraulico) ed in base al controllo che effettuano durante il test (di carico o di spostamento), cioè in base alla grandezza che grazie al controllo viene mantenuta costante. Anche se maggiormente versatili rispetto alle altre, le servoidrauliche normalmente richiedono costi iniziali, operativi e di manutenzione più alti.

Un componente fondamentale per i test a fatica è sicuramente lo strumento di misura della deformazione della sezione di test del provino. Tale misura viene effettuata dall'estensimetro (strain gauge), che può essere di tipo meccanico, elettrico a resistenza, oppure ottico.

Le prove elencate sopra producono sul provino le seguenti sollecitazioni:

- Flessione piana: solo i punti nelle zone superiori ed inferiori della sezione;
- Flessione rotante: tutti i punti più esterni della sezione;
- Torsione alternata: tutti i punti più esterni della sezione;

- Trazione-compressione: tutti i punti della sezione.

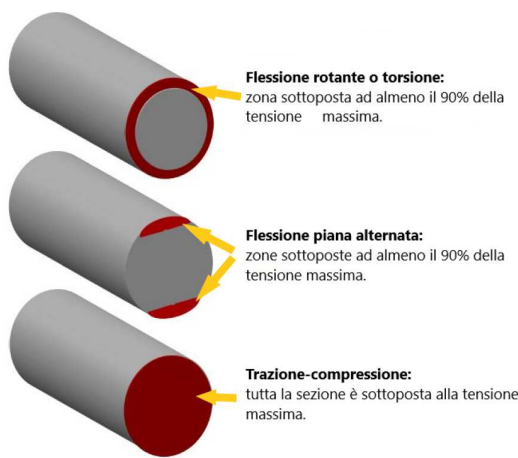


Figura 1.17.: Sollecitazioni durante prove di fatica.

Le macchine a flessione sono probabilmente quelle più largamente utilizzate. Sono semplici e poco costose e permettono estensivi programmi di test con un basso investimento. Esse si suddividono in macchine per flessione piana e rotante. Nelle prove a flessione piana si prende un provino e lo si sottopone ad un movimento flettente agente sempre nello stesso piano. In figura (quella delle macchine di fatica) è visibile lo schema di una macchina per flessione piana alternata ad attuazione meccanica, dove l'attuatore è costituito da un meccanismo biella-manovella. Le macchine a flessione piana sono molto utilizzate tutt'oggi e possono operare sia con controllo di spostamento che con quello di carico. Le macchine a flessione rotante costituiscono la prima tipologia di macchine per test a fatica mentre ad oggi vengono utilizzate occasionalmente. Nella flessione rotante il provino (di sezione circolare) viene ancorato ad un albero posto in rotazione al quale viene applicata una forza costante ortogonale all'asse di rotazione.

Nelle prove a trazione-compressione tutta la sezione trasversale del provino è soggetta al carico massimo. A parità di sezione del pezzo da testare, la macchina per questo tipo di prova deve applicare un carico più grande rispetto ad una prova a flessione per ottenere lo stesso sforzo. Le macchine servoidrauliche offrono un'eccellente precisione nell'applicazione del carico, monitoraggio dei parametri fondamentali e versatilità nel funzionamento. Altre tipologie sono quelle in cui l'attuatore è di tipo meccanico o elettromeccanico.[10]

1.3.4. Macchine di prova multiassiali

Queste macchine nascono dalla nuova necessità di effettuare prove con carichi di tipo misto su provini o addirittura su prodotti finiti per testarne in via diretta la resistenza meccanica. Come si è visto all'1.2, nell'ambito dei materiali metallici queste prove stanno assumendo sempre più importanza per la caratterizzazione del comportamento elasto-plastico e del danneggiamento duttile, perché offrono la possibilità di calibrare e validare nuovi modelli numerici sviluppati e infine perché consentono la verifica sperimentale diretta di componenti riproducendone le esatte condizioni di sollecitazione.[7]

Le macchine per effettuare queste prove risultano essere più complicate per il semplice fatto di dover gestire almeno due tipi di sollecitazioni diverse, con ciò che ne consegue a livello di struttura, celle di carico, dispositivi di misura e anche software. Alcune di queste macchine

sono state ottenute in primis modificando macchine già esistenti, aggiungendo in pratica un meccanismo di sollecitazione aggiuntivo. Questa operazione risulta essere non facile in quanto potrebbe portare a rivedere completamente il meccanismo di movimentazione: nel caso di macchine elettromeccaniche parliamo di modifiche al motore elettrico (se non sostituzione) e agli organi di trasmissione del moto (soprattutto in caso di introduzione di un asse torsionale), nel caso di servoidrauliche intendiamo operazioni analoghe sulla pompa e rivisitazione dei circuiti idraulici. Anche le celle di carico vanno completamente sostituite con delle nuove in grado di leggere i carichi provenienti da più direzioni. Infine vanno aggiunti nuovi dispositivi di misura per avere informazioni sulla sollecitazione aggiuntiva e in generale anche un software di gestione dati più potente, per poter combinare tutti i dati ricavati dalla prova.

Una seconda soluzione più comoda è quella di acquistare macchine per prove multiassiali già in commercio, progettate quindi fin dall'inizio con l'intento di gestire più sollecitazioni e conseguentemente più dati su forze, spostamenti e deformazioni. Rispetto alla soluzione precedente, in questo caso si guadagna in tempo perché ci si risparmia la progettazione e la realizzazione delle modifiche e si guadagna probabilmente anche in affidabilità, garantita dall'azienda fornitrice della macchina.

Il trend più seguito dalle ditte del settore è oggi sempre più quello di produrre macchine modulari. Con questo termine si intende una macchina capace di effettuare prove multiassiali ma con meccanismi indipendenti di sollecitazione, gestiti insieme all'occorrenza dal software di controllo. In Figura 1.18 viene mostrata una macchina modulare Zwick per prove di trazione-torsione o compressione-torsione, simile a quella che l'Università intende acquistare.



Figura 1.18.: Macchina modulare per prove multiassiali.

Dall'immagine è visibile il concetto di modularità: la struttura principale è quella di una normale macchina per prove di trazione e compressione. A questa viene aggiunta un'unità indipendente in grado di garantire la torsione. Questa unità si aggancia alla traversa mobile, andando a formare una macchina per prove di tipo misto. La particolarità risiede anche nel fatto che, contrariamente a quanto visto in precedenza, le celle di carico sono due e separate (una per ogni tipo di sollecitazione) così come i dispositivi per le varie misurazioni. Tutti i dati sono gestiti e rielaborati da un computer a bordo macchina. In questo modo, tali tipi di macchine possono effettuare indipendentemente prove monoassiali (senza perdite di prestazioni) e prove combinate, risultando sostanzialmente 3 macchine in una.

1.4. Afferraggi (Grips)

Essendo questo progetto finalizzato alla realizzazione di un sistema completo di afferraggi, ci soffermiamo ora su questi componenti per sottolinearne l'importanza per la buona riuscita di una prova meccanica. Riferendosi principalmente a test su provini in acciaio, vediamo poi quali sono ad oggi le tipologie più diffuse di afferraggi, alcune delle quali sono state di ispirazione per questo stesso progetto.

Gli afferraggi (grips in inglese) permettono di afferrare sulla macchina provini di spessore e di forma diversi. È fondamentale per l'accuratezza dei test, disporre di un sistema di ancoraggio (o afferraggio) ben progettato: esso deve permettere un facile inserimento dei provini e trasmettere correttamente la sollecitazione al pezzo stesso (senza danneggiarlo) ed alla cella di carico. Per fare ciò, sono previsti anche eventuali accessori da aggiungere agli afferraggi. Questi inoltre, devono garantire un ottimo allineamento ed essere capaci di sopportare le condizioni ambientali associate al test.

Lo sforzo può essere trasmesso tangenzialmente alla superficie del provino per attrito o normalmente per pressione. Nel primo caso (la maggior parte delle prove di trazione) il provino viene stretto in ciascun afferraggio tra due superfici (ammorsato). L'ampiezza della superficie di contatto, le caratteristiche di tali superfici su afferraggi e provini, e la pressione applicata determinano l'efficacia dell'ammorsaggio. Nel secondo caso (prove di flessione e compressione, prove di trazione con utilizzo di perni), il carico viene trasmesso dall'estremità dell'afferraggio per pressione sulla superficie del provino.[4]

Un'ulteriore distinzione che può essere fatta all'interno degli afferraggi funzionanti per attrito è quella tra meccanici e pneumatici/idraulici. Nei primi il serraggio viene effettuato stringendo manualmente un meccanismo a vite mentre in quelli pneumatici viene effettuato tramite la pressione dell'aria o di un fluido. In quest'ultimo tipo di afferraggi, nettamente più costosi, la pressione può essere controllata per ottenere la forza di serraggio richiesta. Essi sono usati spesso per prove di fatica con cicli alternati, dove è necessario che siano nulli i giochi tra sistema di afferraggio e provino nell'istante in cui il carico cambia di segno.

La fase di ammorsaggio del provino in molti casi è l'operazione più critica della prova. Per migliorare la trasmissione del carico le superfici degli afferraggi destinate al contatto con il provino sono generalmente seghettate e le superfici dei provini devono essere ben pulite. Questo non scongiura però del tutto il pericolo di slittamento del provino o quello di rottura del provino nella zona di ammorsaggio, che sono i due problemi più comuni. Lo slittamento accade più frequentemente utilizzando morse meccaniche azionate a vite con superfici piatte. La rottura all'afferraggio accade quando il campione dentro le morse è danneggiato da eccessive forze di serraggio o da superfici seghettate che incidono troppo profondamente.[4]

Soluzioni per il problema dello slittamento:

- Assicurarsi che la superficie dell'afferraggio sia abbastanza larga da coprire tutta l'estensione del provino.
- Coprire la superficie con nastro adesivo o vari gradi di carta smerigliata.
- Sperimentare differenti superfici di contatto; ad esempio una piatta, una coperta di gomma e una seghettata.

Soluzioni per il problema della rottura all'afferraggio:

- Assicurarsi di non applicare una forza eccessiva durante il serraggio delle morse a vite. Utilizzare una chiave dinamometrica o passare a morse pneumatiche.

- Usando morse pneumatiche, abbassare la pressione mantenendosi appena al di sopra del valore che causa lo scivolamento.
- Usando superfici seghettate, passare a superfici aventi più dentelli per unità di superficie meno profondi.
- Usando superfici seghettate, coprire con nastro adesivo o materiali simili. Questo attenuerà il morso prevenendo il danneggiamento del provino.

Afferraggi per prove di trazione:

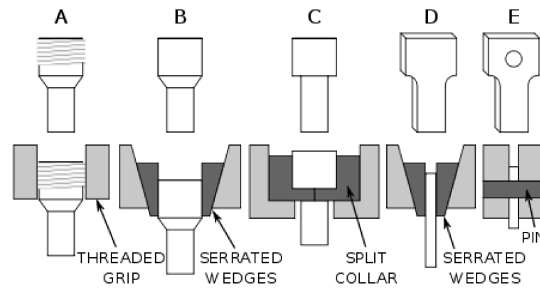


Figura 1.19.: Principali afferraggi per prove di trazione.

- **A cuneo (wedges).** Gli afferraggi a cuneo autostringenti, come suggerisce il nome,

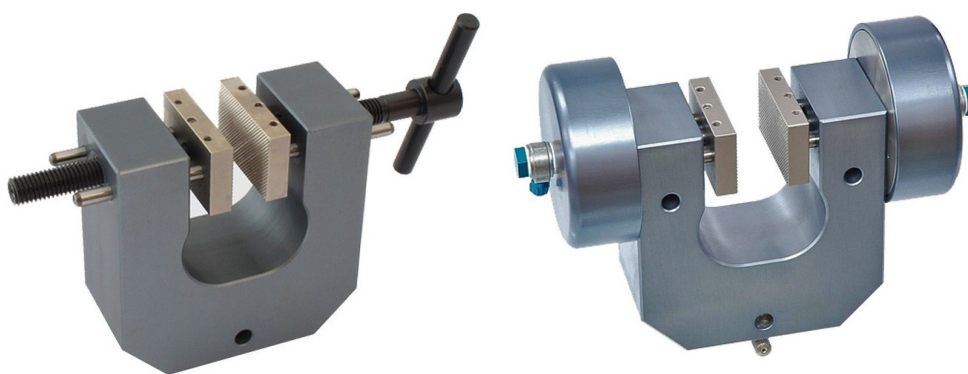


Figura 1.20.: Afferraggio meccanico a cuneo.

sfruttano le superfici inclinate dei propri morsetti per ottenere dalla forza di trazione una componente che serra il provino garantendone la presa. Il vantaggio di questo dispositivo è dato dalla comodità operativa di avere la forza di chiusura che aumenta con la trazione: è sufficiente fornire un minimo precarico per avere una prova a basso rischio di scivolamento (a patto che i morsetti siano idonei alla prova). Lo svantaggio più evidente è che questo tipo di teste non possono essere usate per forze con carichi alternati: alla riduzione, o peggio all'inversione della forza, si ottiene un rilassamento dei morsetti che non serrano più il provino, con il pericolo di svincolarlo completamente dall'afferraggio. Un altro difetto consiste nell'incapacità di regolare o limitare lo sforzo

sul provino, che potrebbe essere danneggiato dalla chiusura prima ancora di arrivare al punto di rottura per trazione. Sono una delle tipologie più utilizzate.

- **A morse.** Questi afferraggi con teste a chiusura parallela sono, per molti aspetti, complementari alle teste a cuneo. Come svantaggio rispetto a queste ultime richiedono una regolazione iniziale della forza di chiusura. In questa tipologia si trovano teste manuali adatte per campioni in polimeri o per prove di adesione; sono tuttavia disponibili anche grossi dispositivi ad azionamento idraulico, necessari per macchine di potenza elevata.



(a) Variante di tipo meccanico.

(b) Variante di tipo pneumatico.

Figura 1.21.: Afferraggio a morse.

- **Ad accoppiamento perno-foro.** Un'altra tipologia in cui il posizionamento del provino risulta piuttosto semplice. In questo caso il carico è trasmesso per pressione. Particolare attenzione va riservata alla zona forata del provino, che potrebbe essere soggetta a rotture anticipate.
- **Ad interferenza.** Questo meccanismo prevede un "collare" diviso in due che viene stretto attorno al provino prima dell'estremità di quest'ultimo, che è di dimensioni maggiorate rispetto al resto del provino. La forza viene così trasferita per pressione.
- **A vite.** In questo caso le estremità del provino presentano una filettatura agli estremi per essere montati facilmente sul foro, ugualmente filettato, degli afferraggi. Il carico è quindi trasmesso per attrito anche in questo caso. E' la soluzione più pratica e utilizzata per prove su campioni cilindrici, specialmente metallici.

Nel caso di prove di compressione e flessione si utilizza il termine "afferraggio" inteso come accessorio che si interpone tra macchina e provino assicurando la giusta trasmissione del carico.



Figura 1.22.: Afferraggio a vite.

Afferraggi per prove di compressione:

- **Piatti.** Sono elementi che trasferiscono il carico per pressione alla faccia superiore o a quella inferiore del provino (in genere cilindrico) e possono essere in acciaio oppure in alluminio. Importante è la finitura superficiale e la lubrificazione delle superfici, in quanto con attriti elevati tra piatto e provino viene accentuato il fenomeno della barilottatura con conseguente aumento della forza necessaria per portare a termine il test. In commercio si trovano anche piatti con dei giunti sferici alla base per permettere un migliore allineamento del provino.



Figura 1.23.: Piatto per compressione.

Afferraggi per prove di flessione (bending):

- **Banchi di flessione.** Disponibili in varie lunghezze a seconda delle dimensioni del provino, consentono di verificare il comportamento di un materiale sottoposto ad una freccia. Si possono simulare diverse situazioni di deformazione sfruttando la distanza regolabile degli appoggi e anche il fatto che la prova può essere effettuata con un solo

cuneo cilindrico solidale alla traversa mobile (prova a 3 punti) o con due ravvicinati (prova a 4 punti).

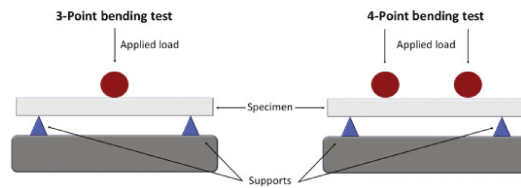


Figura 1.24.: Flessione a 3 e 4 punti.

Afferraggi per prove di torsione:

- **Afferraggi.** Nel caso di carichi bassi, gli afferraggi previsti per la trazione possono funzionare bene anche per la torsione (soprattutto quelli a morse regolate a vite o pneumatiche). Tuttavia, specialmente nel caso di test su acciai, si producono afferraggi specifici: tutti sono basati sul concetto di stringere il provino tra due facce piane, opportunamente serrate in vari modi (quelli già visti: con vite o con la pressione dell'aria o di un fluido) per eliminare qualsiasi gioco. Alcuni sono molto simili a quelli utilizzati in un comune tornio meccanico per le lavorazioni per asportazione di truciolo.

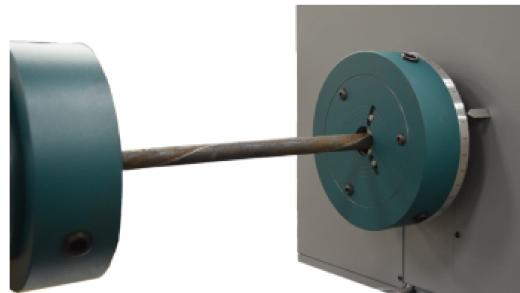


Figura 1.25.: Afferraggio per torsione.

Capitolo 2.

Specifiche del progetto

2.1. Macchina e carichi

Gli afferraggi oggetto di questo progetto vanno installati su una macchina per prove meccaniche multiassiali che sarà acquistata dal Dipartimento di Ingegneria industriale e Scienze matematiche dell'Università Politecnica delle Marche. Tale macchina andrà a sostituire un'altra macchina per prove di sola trazione già posseduta dall'Università ma che risulta ormai obsoleta. Considerando il fatto che con la nuova macchina si potranno effettuare prove combinate simulando meglio le reali condizioni di esercizio dei materiali, e che potrà essere utilizzata anche da altri dipartimenti per effettuare, ad esempio, test su materiali ceramici, è evidente la convenienza dell'acquisto. Nella realizzazione degli afferraggi si è dovuto tener conto, ovviamente, dei massimi carichi applicabili dalla macchina (50 kN di forza e 200 Nm di coppia), della geometria e dimensioni della parte di macchina alla quale vanno assicurati gli afferraggi e più in generale si è cercato di progettare degli elementi sufficientemente rigidi e con alto coefficiente di sicurezza per rimanere in linea con gli standard, già alti, del resto della macchina e relativi accessori. La macchina in esame è prodotta dalla Zwick/Roell e sfrutta i vantaggi di una soluzione modulare per poter effettuare prove combinate o separate, vista l'indipendenza dei meccanismi di azionamento assiale e torsionale.



Figura 2.1.: Macchina Allround Line da 30 a 100 kN.

Parliamo infatti di una macchina della serie Allround Line per test di trazione-compressione che possiede specifici attacchi per il montaggio di un azionamento torsionale aggiuntivo: si ottiene così la multiassialità della prova. Il tutto va integrato con un opportuno sistema software in grado di gestire i due meccanismi di azionamento e le misure in tempo reale di carico, spostamento e velocità di quest'ultimo.

2.2. Specifiche tecniche e contenuto del preventivo

Di seguito si riportano i dati tecnici della macchina e tutto ciò che è compreso nel preventivo di acquisto posseduto dall'Univpm. Quest'ultimo comprende:

- Una macchina per prove meccaniche del tipo Z050 THW AllroundLine Table-Top Machine: la macchina può applicare un carico massimo di 50kN; possiede un area di lavoro di 640 x 1325mm (larghezza x altezza); gestisce velocità di test da 0,0005 a 600mm/min, con velocità di ritorno massima di 1000mm/min; l'altezza dell'area di test è regolabile a vantaggio dell'ergonomia. Sono inclusi inoltre:
 - Una traversa mobile aggiuntiva tC2/AR640 per il montaggio della guida di torsione da 200Nm
 - Una coppia di profili per le gambe con montaggio laterale sul telaio di carico e altezza regolabile
 - Una scatola di collegamento per arresto di emergenza: permette il collegamento di diversi sistemi di arresto (chiamati Slaves) ad uno principale; l'unità principale può accendere o spegnere le unità secondarie (Slave) oppure attivare l'arresto di emergenza.
 - Controllo remoto (telecomando) con display: può essere usato come telecomando o come pannello operativo, il display può mostrare varie informazioni sullo stato del test.



Figura 2.2.: Controllo remoto con display.

- Marchio CE e dichiarazione di conformità, documentazione, attacco ethernet
- Celle di carico:

2.2. Specifiche tecniche e contenuto del preventivo

- Una cella di carico del tipo Xforce K con capacità 50kN, diametro del perno di montaggio di 36mm, classe di precisione 1 secondo la ISO 7500-1 da 100N, classe 0.5 da 500N. Precisione tipica >99%. Altamente insensibile a forza trasversali, momenti flettenti e torcenti.
- Un trasduttore di coppia da 200Nm che accetta forze di trazione/compressione fino a 50KN. Diametro di collegamento di 36mm



Figura 2.3.: Cella di carico Xforce.

- Azionamento di torsione:
 - Azionamento con coppia massima applicabile di 200Nm da montare sulla traversa superiore di una macchina per prove di tipo Table-Top o da pavimento (Floor Mounting). Velocità da 0,002 a 20rpm, massimo carico assiale sopportabile di 50KN. Include un adattatore con perno di montaggio da 36mm, sistema testControl II per misurazione e controllo
 - Scatola di collegamento per arresto di emergenza e controllo da remoto della torsione con le stesse funzioni di quelli descritti sopra.
- Protezioni di sicurezza: anteriore e posteriore con blocco elettronico, per applicazioni con potenziale pericolo per l'operatore.
- Pacchetto Software TestXpert III che comprende:
 - Programma base in italiano per: test di trazione e compressione fino a massimo carico o fino alla massima corsa; test manuale in cui posizione finale e velocità sono variabili durante il test; statistiche e valutazione dei risultati del test; correzione della deformazione della macchina; connessione di strumenti per la misurazione delle dimensioni del provino.
 - Programma "Master" per test fino a 2 assi lineari e uno torsionale. All'interno di una sequenza di test possono essere definiti fino a 50 step differenti caratterizzati da posizione finale e velocità, oppure step graduali di temperatura nel caso sia previsto un dispositivo dedicato.
 - Programma testXpert III per la determinazione della curva di correzione e calibrazione dei sensori
- Un PC:
 - HP ELITEDESK 800 G3 TWR Win 7 Ultimate 64 bit

Capitolo 2. Specifiche del progetto

– Schermo LED 23” risoluzione 1920x1080

Inoltre sono previste anche le necessarie calibrazioni dei vari elementi ed in particolare:

- Calibrazioni a trazione e compressione della cella di carico da 50 KN
- Calibrazione di una cella torsionale aggiuntiva per coppie da 20 a 2000Nm
- Calibrazione della corsa della traversa mobile

Capitolo 3.

Progetto funzionale

3.1. Afferraggio con sistema a cunei

Un'idea sulla quale si era pensato di lavorare era quella che prevedeva una modifica dell'afferraggio tramite morsetti a forma di cuneo già presente in laboratorio e utilizzato per effettuare prove di singola trazione.

Trovare una soluzione di questo tipo sarebbe stato particolarmente conveniente in quanto ciò che si sarebbe dovuto effettivamente fare non era la progettazione di tutto l'afferraggio, ma solamente la modifica di alcune caratteristiche dei cunei facendo in modo che fossero capaci di trasmettere, oltre alla trazione, anche un moto torsionale: questo avrebbe sicuramente limitato di parecchio le spese da sostenere (visto che modificare i cunei sarebbe costato molto meno di realizzare un afferraggio partendo da zero) ma, nonostante il lavoro svolto, non si è riusciti a trovare una soluzione veramente efficace.

Si ricorda brevemente il funzionamento di questo tipo di afferraggio per la prova di trazione: le teste a cuneo autostringenti, come suggerisce il nome, sfruttano le superfici inclinate dei propri morsetti per ottenere dalla forza di trazione una componente che serra il provino garantendone la presa.



Figura 3.1.: Un' esempio di sistema di afferraggio che utilizza morsetti a forma di cuneo

Il vantaggio di questo dispositivo è dato dalla comodità operativa di avere la forza di chiusura che aumenta con la trazione: è sufficiente fornire un minimo precarico per avere una prova a basso rischio di scivolamento (a patto che i morsetti siano idonei alla prova), oltre ad una buona velocità operativa e scarso rischio di errore (l'operatore non deve preoccuparsi di determinare la forza di chiusura delle teste).

Lo svantaggio più evidente è che questo tipo di teste non possono essere usate per forze con carichi alternati: alla riduzione, o peggio all'inversione della forza, ottengo un rilassamento dei morsetti che non serreranno più il provino, con il pericolo di svincolarlo completamente dall'afferraggio.

Ovviamente un provino, per poter essere collegato a questo tipo di afferraggio, deve risultare essere squadrato alle estremità, per permettere ai cunei di avere una superficie piana su cui aderire.

L'idea avuta prevedeva la realizzazione di uno scavo rettangolare sul morsetto nella superficie adibita al contatto col provino (Figura 3.2b), profondo qualche millimetro e largo all'incirca un centimetro, al fine di creare una sorta di alloggiamento per l'estremità del provino, la quale sarebbe dovuta essere di fatto un parallelepipedo a base quadrata con lato di un centimetro circa e coincidente con la distanza delle superfici laterali dello scavo (Figura 3.2a).

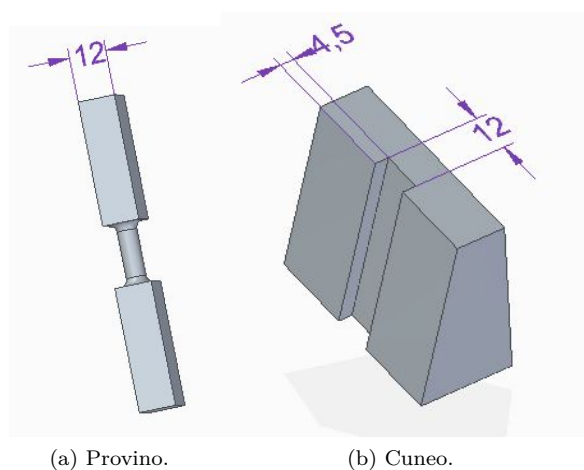


Figura 3.2.: Provino e Cuneo del sistema progettato.

La superficie larga circa un centimetro dello scavo sarebbe stata adibita alla trasmissione sul provino del carico di trazione, aderendo alla sua superficie proprio come succede per le prove di singola trazione, mentre le superfici laterali dello scavo avrebbero avuto il compito di trasmettere il momento di torsione (Figura 3.3).

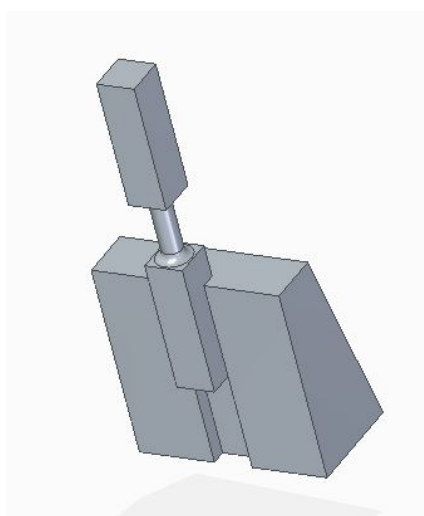


Figura 3.3.: Rappresentazione di come il morsetto afferra il provino

3.1. Afferraggio con sistema a cunei

La struttura di alloggiamento dei cunei (Figura 3.4), come già detto, sarebbe stata la stessa che si usa per la prova di singola trazione e, di conseguenza, sarebbe stato uguale anche il metodo con cui i cunei vanno ad aderire sul provino, ovvero tramite l'applicazione di una forza di serraggio con un'apposita leva.

Ovviamente il dimensionamento dello scavo dei cunei e dell'estremità del provino si sarebbe dovuto fare in modo che il serraggio possa essere completato senza che i cunei si tocchino: infatti, se lo scavo fosse stato troppo profondo, i due cunei durante il loro avvicinamento sarebbero entrati in contatto tra loro, bloccandosi a vicenda e impedendo quindi un corretto serraggio.

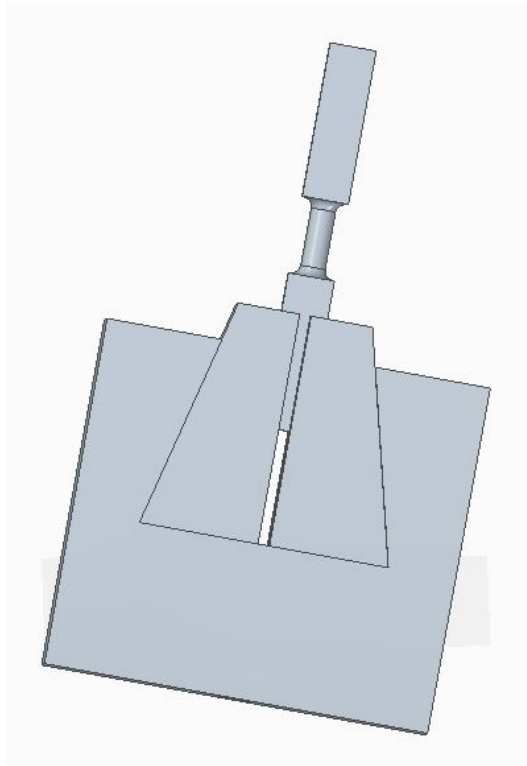


Figura 3.4.: Riproduzione, con sistema di alloggiamento dei cunei, dell'afferraggio.

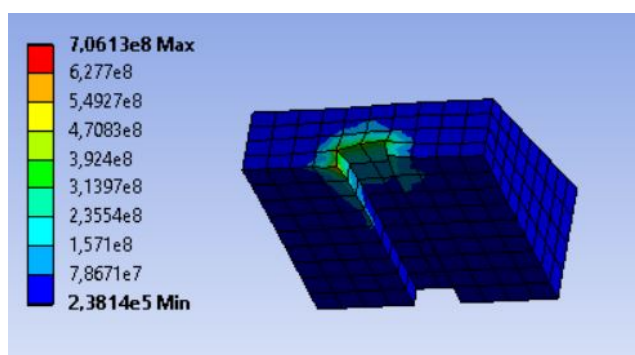
La condizione da cui dipende il corretto funzionamento del sistema sopra descritto è una condizione difficilmente rispettabile nella realtà, e che quindi ha portato inevitabilmente all'accantonamento di questa idea: essa consiste nell'uguaglianza tra la larghezza dello scavo e il lato dell'estremità del provino. Essi infatti devono coincidere per far sì che le superfici laterali dello scavo siano totalmente in contatto con quelle del provino, così facendo infatti la trasmissione della torsione avverrebbe tramite un perfetto contatto superficiale e si eviterebbe lo sviluppo di tensioni troppo eccessive.

La totale assenza di giochi tra provino e cuneo è ovviamente una condizione impossibile da ottenere, in quanto anche la lavorazione più precisa lascia un minimo di rugosità nelle superfici e un po' di incertezza sulle lunghezze. Mentre per la trasmissione della trazione la completa adesione tra provino e morsetto è garantita dal carico di serraggio del sistema di alloggiamento dei cunei, per quello che riguarda la torsione non c'è modo di evitare l'inevitabile presenza di giochi tra provino e superfici laterali dello scavo, motivo per cui la superficie di contatto tra essi in esercizio non sarà pari all'area della superficie laterale dello

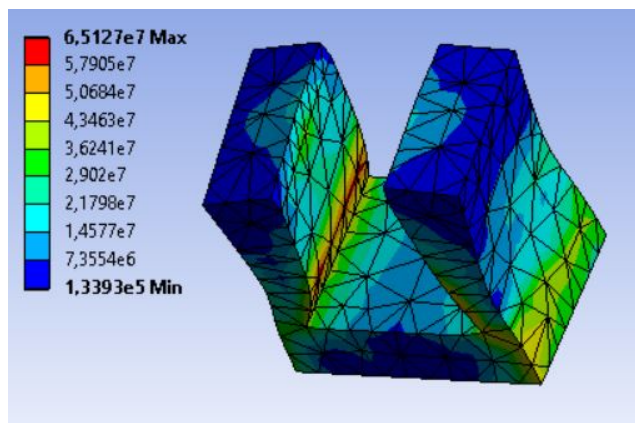
scavo come nel caso ideale, ma sarà decisamente minore, portando allo sviluppo di tensioni di intensità particolarmente elevata e, quindi, ad un danneggiamento dei morsetti che dovranno essere sostituiti dopo un numero ridotto di utilizzi.

Nonostante la bocciatura dell'idea una veloce e sommatoria analisi strutturale per avere un'idea delle entità delle tensioni che si sarebbero sviluppate è stata effettuata.

Il modello utilizzato non presentava alcun tipo di gioco tra provino e morsetto ma, nonostante ciò, applicando al sistema i massimi carichi esercitabili dalla macchina si sono riscontrati valori di tensione particolarmente elevati nei cunei (Figura 3.5a), nello specifico in corrispondenza degli spigoli dello scavo in contatto col provino (arrivando ad avere intensità attorno ai 700 MPa), mentre per quello che riguarda la struttura in cui essi alloggiavano le tensioni risultano essere abbastanza moderate, con i valori più alti nella parte in cui essa è in contatto con i cunei (Figura 3.5b).



(a) Tensioni nel cuneo.



(b) Tensioni nella struttura di alloggiamento dei cunei.

Figura 3.5.: Tensioni che si vengono a sviluppare negli elementi dell'afferraggio.

Per quanto scartata, l'idea di riuscire a progettare un afferraggio per prove combinate di trazione e torsione partendo dal sistema a cunei usato per le prove di sola trazione non risulta essere poi così utopistica anzi, magari in futuro quelli che sono i concetti elaborati nelle pagine precedenti verranno rielaborati portando ad avere, quindi, una soluzione valida e accettabile. D'altronde, il vero ostacolo riscontrato non sta tanto nei valori di tensione, i quali in fondo non sono poi così preoccupanti, ma nella necessità di serrare le superfici laterali dello scavo nei cunei all'estremità del provino. L'auspicio è che qualcuno riesca a trovare una soluzione a questo problema.

3.2. Afferraggio con doppia piastra

Viste le difficoltà incontrate nel cercare, come ad esempio nel tentativo di progettazione dell'afferraggio tramite morsetti a forma di cuneo, di far sì che trazione e torsione venissero trasmesse da un unico elemento (che nel caso precedente era, appunto, il cuneo), si è pensato di scindere i due concetti e fare in modo che esse venissero riportate al provino tramite elementi differenti.

Questa intuizione sarà anche alla base del progetto poi effettivamente sviluppato, ma prima di arrivare all'idea "vincente" ce ne sono state altre che la hanno preceduta, abbandonate poi per motivi differenti.

Una delle idee avute consisteva nella realizzazione di un afferraggio cosiddetto a "doppia piastra", ovvero costituito di fatto soltanto da due piastre, una adibita alla trasmissione della trazione e l'altra alla torsione. Questa è stata sicuramente l'idea pensata concettualmente più "semplice", nel senso che le componenti dell'afferraggio sarebbero state solamente due e i collegamenti sia tra le piastre che tra piastre e provino non sarebbero stati nulla di così complicato, ma forse proprio a causa della sua semplicità sono venute a galla delle problematiche che hanno portato poi al suo accantonamento.

In questo sistema la trazione veniva trasmessa, come già detto, da un'apposita piastra tramite filettatura (Figura 3.6), infatti in essa era presente un foro filettato al centro, nel quale poi si sarebbe avvitato il provino.

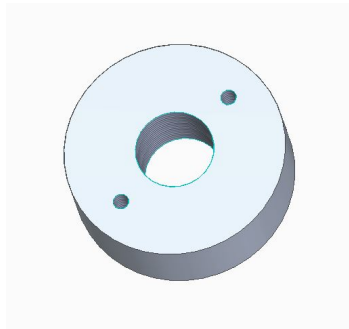


Figura 3.6.: Piastra adibita alla trasmissione della trazione.

Per quello che riguarda, invece, la torsione, essa veniva esercitata sul provino tramite una protrusione a base quadrata presente al centro della piastra apposita, che si inseriva nell'estremità del provino tramite un apposito scavo (Figura 3.7).



Figura 3.7.: Piastra adibita alla trasmissione della torsione

Il provino da usare per questo tipo di sistema, quindi, risultava avere delle estremità cilindriche filettate esternamente con uno scavo più profondo della lunghezza della protrusione della piastra (così da favorire il totale inserimento della protrusione nello scavo), ma con un'identica sezione, al centro (Figura 3.8).

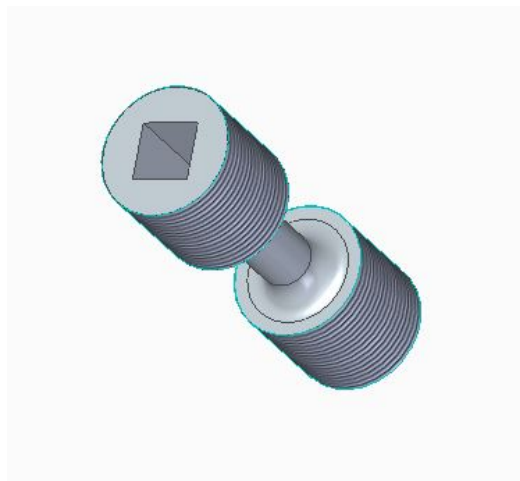
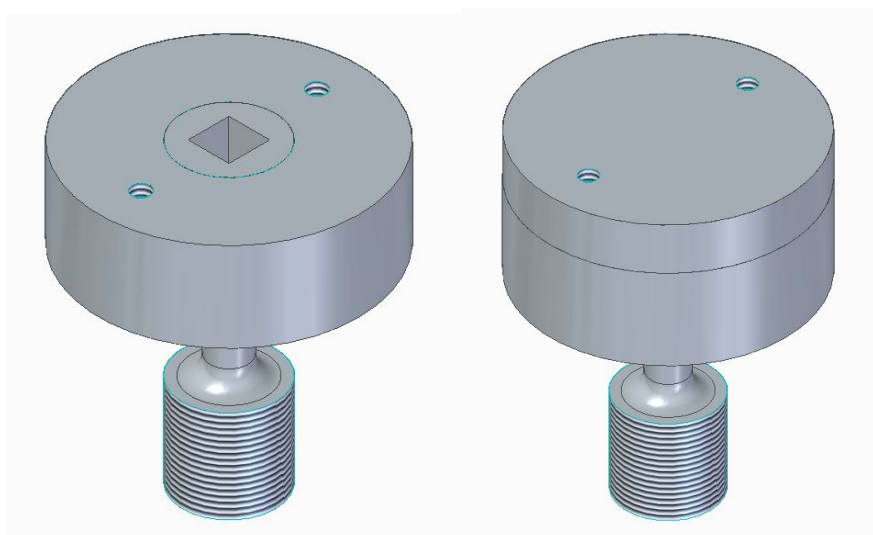


Figura 3.8.: Provino utilizzato per il collegamento con le due piastre.

Dal punto di vista pratico, però, come si sarebbe effettuato l'inserimento del provino sulla macchina? Prima di elencare quali sarebbero stati gli step da seguire, va fatta una premessa doverosa: mentre le piastre per la trasmissione di torsione sarebbero rimaste sempre collegate direttamente alla macchina senza venir mai rimosse da essa, le piastre per la trazione possono di fatto essere considerate come un elemento “mobile”, che cioè andava scollegato completamente dalla macchina durante la fase di rimozione del provino e ricollegato ad essa durante la fase di inserimento.



(a) Collegamento tra provino e piastra per la trazione. (b) Collegamento del provino con entrambe le piastre.

Figura 3.9.: Step per il collegamento del provino alla macchina.

3.2. Afferraggio con doppia piastra

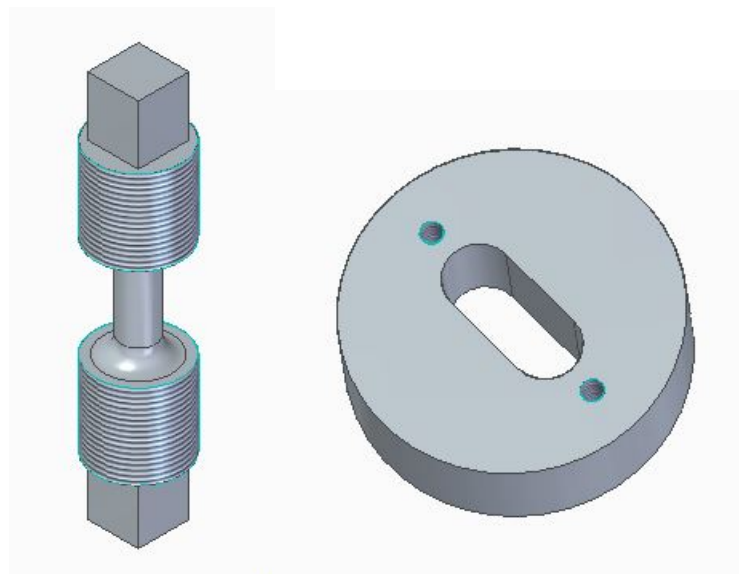
Gli step per inserire il provino nella macchina così da poter effettuare il test su di esso sarebbero stati i seguenti:

1. Avvitare la piastra con il foro filettato sul provino (Figura 3.9a);
2. Inserire il provino nella piastra per la torsione (già collegata, come detto, alla macchina) tramite l'accoppiamento protrusione-scavo (Figura 3.9b);
3. Collegare le due piastre con le viti utilizzando i fori realizzati appositamente.

Terminati i seguenti passaggi, il provino sarebbe stato ben fissato alla macchina e si sarebbe potuto dare inizio alla prova.

All'idea sopra spiegata potrebbe essere apportata una modifica che non cambierebbe nulla dal punto di vista funzionale, ma che semplicemente faciliterebbe il lavoro di realizzazione del provino e della piastra che trasmette la torsione: infatti si potrebbe tranquillamente sostituire nel provino lo scavo con la protrusione a sezione quadrata (Figura 3.10a) e realizzare nella piastra, al posto della protrusione, un'asola (Figura 3.10b) nella quale si andrebbe a inserire la protrusione.

Ovviamente, proprio come nell'idea originale lo scavo nel provino doveva essere più profondo della lunghezza della protrusione della piastra al fine di favorire l'inserimento completo di quest'ultima nello scavo, per lo stesso motivo nel caso del sistema modificato sarà l'asola a dover avere una profondità maggiore rispetto alla lunghezza della protrusione del provino.



(a) Provino in cui, al posto dello scavo, è stata realizzata la protrusione. (b) Piastra in cui, al posto della protrusione, è realizzata un'asola.

Figura 3.10.: Elementi modificati che costituiscono una variante al sistema a due piastre.

Per quello che riguarda la procedura di inserimento del provino nella macchina, i passaggi sarebbero rimasti di fatto gli stessi, infatti per prima cosa si sarebbe dovuto avvitare la piastra filettata nel provino, poi si inserire la protrusione di quest'ultimo nell'asola, e infine collegare le due piastre tramite viti.

Il risultato finale sarebbe stato molto simile a quello dell'idea precedente (d'altronde l'asola e la protrusione una volta montato il provino non sono più visibili dall'esterno), e viene mostrato in Figura 3.11, col provino collegato a solo uno dei due afferraggi.

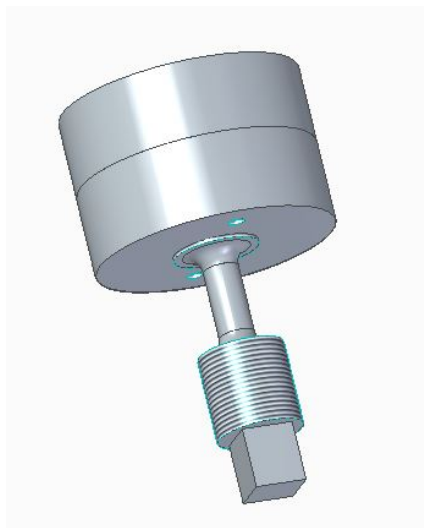


Figura 3.11.: Rappresentazione del collegamento tra provino e afferraggio secondo l'idea modificata.

Perché l'idea dell'afferraggio a doppia piastra è stata scartata? Le motivazioni sono principalmente due.

La prima motivazione è la stessa che ha portato alla bocciatura dell'idea riguardante la modifica del sistema a cunei, ovvero la presenza di giochi, in questo caso tra provino e piastra per la trasmissione di torsione.

Infatti parlare di larghezza dell'asola uguale a quella della protrusione del provino (o di scavo del provino di sezione identica a quella della protrusione della piastra, a seconda della versione dell'afferraggio che si vuol considerare) risulta essere fortemente approssimativo, in quanto alle varie dimensioni sarà sempre associato un certo grado di incertezza.

Anche in questo caso la presenza di giochi non fa altro che portare l'afferraggio a trasmettere in modo non corretto la torsione, favorendo lo sviluppo di tensioni particolarmente elevate durante la prova sia nel provino che nella piastra, rischiando di alterare l'esito del test e di danneggiare in modo troppo consistente la piastra stessa, causandone l'obbligatoria sostituzione dopo un numero non troppo elevato di utilizzi.

La seconda causa della bocciatura dell'idea riguarda la piastra usata per la trasmissione della trazione, più nello specifico il suo non rimanere sempre attaccata alla macchina: infatti, come già detto, essa stessa deve essere rimossa per poter togliere il provino dopo un test, così come deve essere inizialmente scollegata totalmente dall'altra piastra per poterlo inserire.

Questo difetto del sistema non è poi così banale, infatti non solo la procedura di inserimento e rimozione del provino risulta essere troppo lunga rispetto ai tempi necessari generalmente per svolgere questo tipo di funzione, ma non è neanche particolarmente semplice, visto che si tratta comunque di dover maneggiare una piastra di dimensioni non così piccole, e quindi abbastanza pesante. Il tipo di afferraggio che si vuole progettare deve avere la procedura di montaggio e smontaggio del provino più rapida e semplice possibile, senza parti dell'afferraggio che devono essere ogni volta montate o smontate.

3.3. Afferraggio con pinze

L'idea di dar vita a un afferraggio "a pinza" è nata al fine di ovviare al problema della trasmissione della torsione: infatti diverse idee avute sono state scartate proprio perché essa non veniva trasmessa correttamente, a causa ad esempio della presenza di giochi tra provino e afferraggio. Il sistema "a pinza" è di fatto contraddistinto dalla possibilità di regolare la distanza tra gli elementi predisposti alla trasmissione della torsione, permettendo così di garantire un perfetto contatto tra essi e il provino e, quindi, una corretta esecuzione della prova.

L'idea di trasmettere la torsione tramite elementi dalla distanza regolabile sarà poi alla base anche dell'afferraggio effettivamente elaborato, nel quale vengono utilizzate delle slitte. Qui in seguito vengono riportate le prime due idee avute per questo tipo di sistema, idee che sono state scartate, ma che sicuramente hanno contribuito all'elaborazione del progetto finale.

3.3.1. Afferraggio con pinze a L

In questo tipo di sistema l'afferraggio era costituito da un blocco cilindrico in cui era presente uno scavo che fungeva da guida per le due pinze a L, il cui movimento poteva essere regolato per mezzo di una vite di manovra (Figura 3.12).

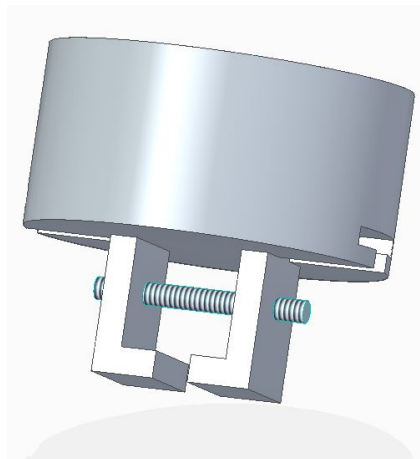


Figura 3.12.: Sistema di afferraggio del provino tramite pinze a L.

Per far sì che il provino potesse essere afferrato dalla macchina (Figura 3.13), esso doveva avere le estremità costituite da due parti:

- La parte più esterna, di forma cilindrica;
- Una parte squadrata, considerabile come un prisma a base rettangolare, con area di base più piccola di quella cilindrica.

Le pinze avrebbero fatto presa sulla parte squadrata delle estremità, che avrebbe permesso la trasmissione della torsione, mentre il contatto con la parte cilindrica avrebbe consentito la trasmissione della trazione.

Per questo motivo la forma delle pinze è ad L e la regione cilindrica del provino è più larga di quella prismatica perché, per far sì che la macchina riesca a trasmettere entrambi i carichi

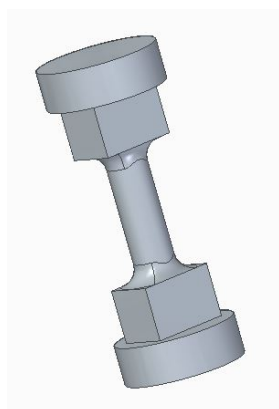


Figura 3.13.: Provino da usare per l'afferraggio con pinze a L.

sul provino, deve essere garantita l'interazione sia tra pinza e regione prismatica che tra pinza e regione cilindrica (Figura 3.14).

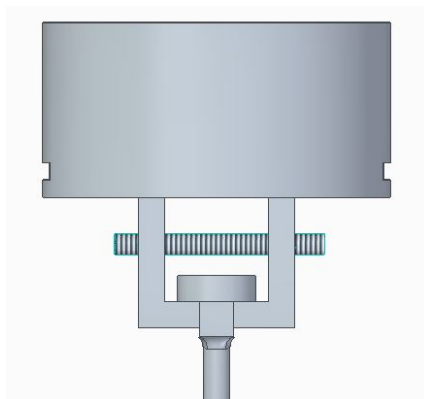


Figura 3.14.: Rappresentazione del collegamento tra provino e macchina tramite afferraggio con pinze a L.

In questa idea, esattamente come nel caso del sistema a cunei trattato nelle pagine precedenti, l'organo destinato alla trasmissione dei carichi era soltanto uno (le pinze), di conseguenza decidere di sviluppare questo tipo di soluzione sarebbe stato conveniente non solo per la semplicità del sistema, ma anche per la velocità di montaggio e smontaggio del provino dalla macchina, la quale sarebbe stata non solo semplice, ma anche piuttosto veloce.

3.3.2. Afferraggio con pinze a T

Questa tipologia di afferraggio presenta delle importanti similitudini con il sistema di cui si è parlato precedentemente, ma anche delle notevoli differenze.

Per quello che riguarda i punti in comune, il più importante è che anche questo sistema sfrutta delle pinze dalla distanza regolabile tramite una vite di manovra per fare presa su una parte squadrata dell'estremità del provino e trasmettere così la torsione.

Le differenze invece possono essere riassumersi in due punti:

- La diversa forma delle pinze, che in questo caso non sono a L ma a T (Figura 3.15);

- Il modo di trasmettere la trazione, di cui stavolta non si occupano le pinze, ma un collegamento filettato.

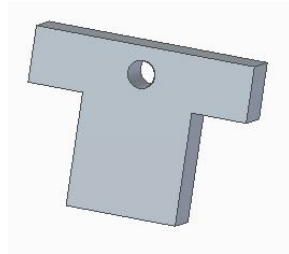


Figura 3.15.: Pinza a T.

Entrando nello specifico del sistema di afferraggio, esso è costituito da due blocchi (Figura 3.16): un blocco superiore di forma cilindrica in cui, nella parte più bassa, è stato realizzato uno scavo a T allo scopo di fare da guida alle pinze, e un blocco inferiore, sempre cilindrico ma con un'altezza minore dell'altro, con un foro filettato al suo centro.

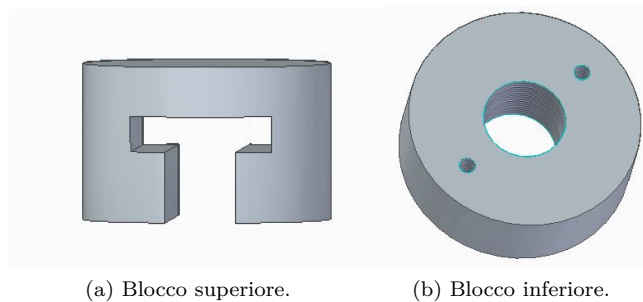


Figura 3.16.: Blocchi che formano l'afferraggio caratterizzato dalla presenza delle pinze a T.

Il blocco superiore era direttamente collegato con la macchina, mentre quello inferiore si collegava in modo permanente ad esso (cioè senza mai dover essere smontato per estrarre o inserire il provino nella macchina) tramite delle viti, dando vita al sistema mostrato nella Figura 3.17.

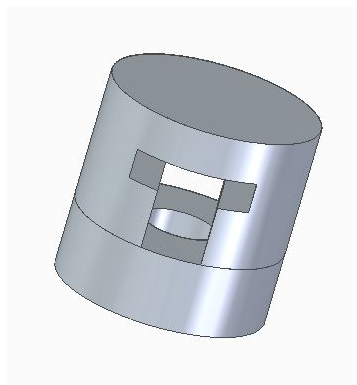


Figura 3.17.: Afferraggio usato nel sistema che usa le pinze a T.

Il provino, essendo la torsione trasmessa con le pinze e la trazione con un collegamento filettato, avrebbe presentato nelle estremità una parte filettata e, una parte terminale squadrata per dare alle pinze un'area su cui fare presa (Figura 3.18).

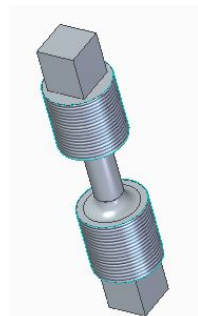


Figura 3.18.: Provino da usare in un afferraggio con pinze a T.

La procedura di inserimento del provino nella macchina dotata di questo sistema di afferraggio sarebbe risultata essere piuttosto semplice, infatti la prima cosa da fare sarebbe stata avvitare il provino nel blocco assicurandosi che le superfici delle squadrature fossero parallele a quelle delle pinze, e poi stringere le pinze in modo da fargli fare presa sul provino garantendo quindi una corretta trasmissione della torsione (Figura 3.19). Infatti se non ci fossero le pinze o se non venissero strette correttamente l'unico elemento di collegamento tra afferraggio e provino sarebbe la filettatura, che però non è in grado di trasmettere la torsione, per cui di fatto il provino si sviterebbe progressivamente dalla macchina fino a staccarsi completamente.

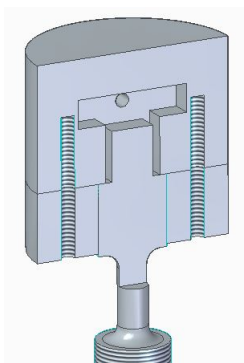


Figura 3.19.: Rappresentazione in sezione del collegamento tra provino e macchina tramite afferraggio con pinze a T.

L'idea dell'afferraggio con le pinze a T è un'idea tutto sommato valida, nel senso che i difetti che ha, con delle piccole modifiche, possono essere eliminati.

A dimostrazione di ciò basti pensare che, nell'idea su cui si basa il progetto svolto, il sistema di trasmissione della torsione è di fatto identico a quello elaborato in questo tipo di afferraggio, se non per una modifica apportata: infatti, nel progetto si è preferito sostituire le pinze a forma di T con delle slitte per fare in modo che il collegamento tra esse (tramite vite) si trovasse indicativamente alla stessa altezza dell'estremità squadrata del provino così da evitare che le slitte venissero sollecitate a flessione dalla forza di serraggio, cosa che avviene nei due sistemi trattati finora in questa sezione, visto che la vite che collega le pinze si trova più in alto della regione di contatto tra slitte e provino.

Un altro difetto presente in questa idea sta nel modo in cui viene trasmessa la trazione. Infatti, per quanto sia del tutto lecito usare un collegamento filettato, sarebbe opportuno evitare un collegamento diretto tra provino e afferraggio, in quanto questo impone che ogni provino su cui si voglia fare un test debba avere le estremità avvitali sull'afferraggio. Quindi, ad esempio, un provino con l'estremità filettata di diametro nominale minore di quella del foro del blocco non può essere usato. La possibilità di poter usare provini con dimensioni delle estremità variabili in un certo range è una caratteristica del sistema sviluppato poi nel progetto.

3.4. Afferraggio con slitte e boccola filettata

Un punto di riferimento per lo svolgimento di questo progetto è stata senza dubbio l'Università di Roma, la quale in passato si è già trovata di fronte al problema di dover realizzare un sistema di afferraggio per una macchina capace di svolgere prove multiassiali. Il sistema da loro elaborato, infatti, è stato per noi fonte di ispirazione al fine di riuscire a correggere quei difetti presenti in generale nelle nostre idee, riguardanti soprattutto la trasmissione della torsione e la possibilità di utilizzare per i vari test provini con caratteristiche dimensionali differenti.

Parlando brevemente dell'afferraggio realizzato a Roma (Figura 3.20), il suo funzionamento risulta essere molto simile a quello pensato nell'idea con le pinze a T, infatti anche in esso la trasmissione della trazione avviene tramite un collegamento filettato del provino con l'afferraggio, mentre la torsione è trasmessa facendo presa sul provino con degli elementi appositi.

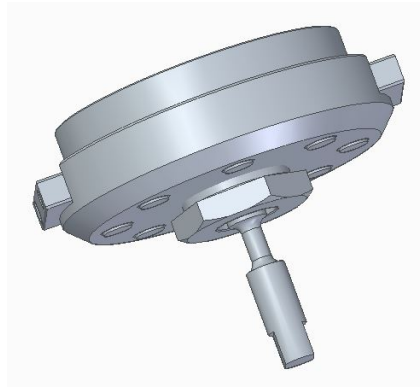


Figura 3.20.: Afferraggio realizzato dall'Università di Roma.

Ecco perché, date appunto queste analogie tra i due sistemi, i provini risultano di fatto essere identici: infatti, anche nel progetto dell'Università di Roma esso presenta delle estremità con una filettatura e una squadratura, necessari rispettivamente per consentire la trasmissione della trazione e della torsione (Figura 3.21).

Le caratteristiche dell'afferraggio realizzato dall'Università di Roma che più hanno influenzato il nostro progetto sono due, e riguardano:

- Gli elementi usati per trasmettere la torsione;
- L'utilizzo di boccole per il collegamento tra afferraggio e provino.

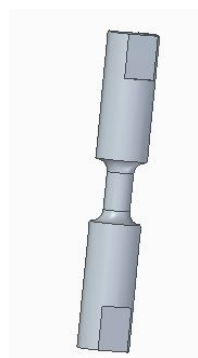


Figura 3.21.: Provino da usare per l'afferraggio dell'Università di Roma.

Per quello che riguarda la torsione, gli elementi preposti a trasmetterla sono delle slitte, strutturate in modo tale che la forza di serraggio esercitata su esse non le solleci a flessione, cosa che accadeva nel caso dei sistemi a pinze da noi pensati (Figura 3.22).

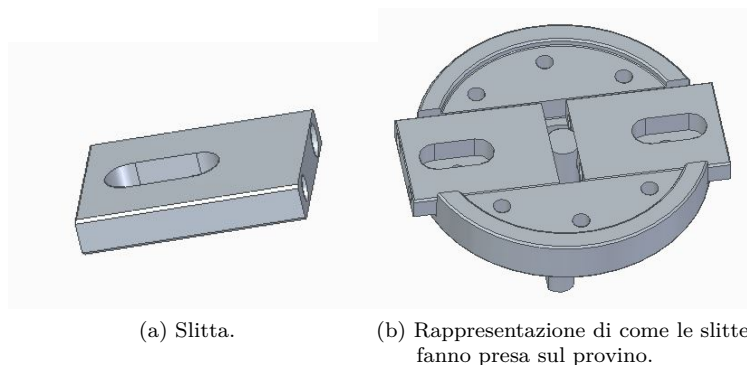


Figura 3.22.: Sistema di trasmissione della torsione nell'afferraggio dell'Università di Roma.

Riguardo invece la trasmissione della trazione, essa avviene sì tramite un accoppiamento filettato, ma a differenza dell'idea con le pinze a T esso non risulta essere direttamente tra provino e piastra inferiore dell'afferraggio (Figura 3.23).

Infatti al foro filettato dell'afferraggio è collegata una ghiera, al cui interno alloggia una boccola su cui invece si andrà ad avvitare il provino.

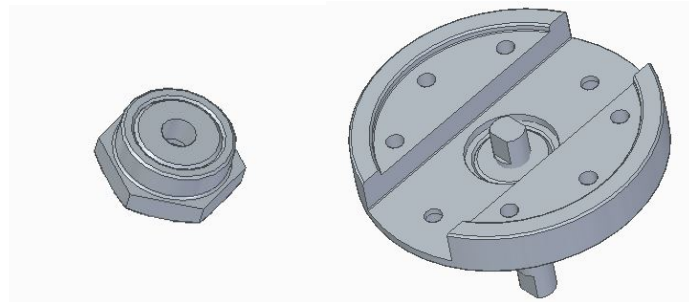
Per quanto più complicato possa sembrare il sistema che porta di fatto a trasmettere la trazione al provino, in realtà garantisce un vantaggio enorme, che consiste nel poter inserire nella macchina provini con diametro nominale della parte filettata variabile in un certo range.

Infatti, mentre nel sistema con le pinze a T l'avvitamento diretto tra provino e piastra inferiore dell'afferraggio imponeva che i due diametri nominali fossero obbligatoriamente uguali, in questo caso, dato il diametro nominale della filettatura del provino, basta scegliere la boccola opportuna e il test può essere tranquillamente svolto.

L'uso di boccole tramite le quali trasmettere la trazione è un'idea che noi abbiamo applicato nel nostro progetto anche se in modo diverso da quello fatto nel sistema di Roma: la nostra elaborazione, che non prevede un collegamento filettato tra esse e il provino, è stata sviluppata anche grazie a un colloquio avuto con il Professore dell'Università di Roma Luca Cortese, che aveva curato personalmente la realizzazione del loro afferraggio e sapeva quali

3.4. Afferraggio con slitte e boccola filettata

potessero essere dei miglioramenti da applicare al sistema.



(a) Ghiera con la boccola all'interno.
(b) Piastra inferiore collegata alla ghiera e alla boccola, collegata a sua volta col provino.

Figura 3.23.: Sistema di trasmissione della trazione nell'afferraggio dell'Università di Roma.

Capitolo 4.

Progetto definitivo

Il programma utilizzato per la progettazione dell'afferraggio è Solid Edge.



Figura 4.1.: Logo del programma Solid Edge.

Solid Edge è un software di progettazione ibrida 2D/3D sviluppato da Siemens Software, che offre evolute funzionalità di modellazione e di progettazione dei componenti e degli assiemi, gestione trasparente dei dati e un ambiente integrato di analisi ad elementi finiti. Il caposaldo del portfolio Solid Edge è la sua applicazione CAD (Computer-Aided Design) leader del mercato. Sviluppato come uno strumento aperto ed estensibile, Solid Edge con Tecnologia sincrona è uno strumento CAD che fornisce libertà e facilità di progettare in modo naturale e iterativo, indipendentemente dal fatto che si stia lavorando su un nuovo design o si stiano modificando parti, assiemi o prodotti già esistenti. Questo perché la tecnologia sincrona contiene intelligenza integrata che interpreta l'intento progettuale a prescindere da dove ha origine il progetto.

Sviluppato con lungimiranza, Solid Edge con tecnologia sincrona consente anche la collaborazione professionale. Nell'attuale ambiente di progettazione digitale aperto e altamente connesso, l'interoperabilità diventa essenziale. Componenti aggiuntivi al centro di Solid Edge includono tecnologie rivoluzionarie come la progettazione generativa, la modellazione convergente e il reverse engineering. Profondamente incorporate in Solid Edge, queste robuste funzionalità stanno modificando il modo in cui i prodotti vengono sviluppati. L'edizione di Solid Edge utilizzata in questo progetto è la versione studenti, scaricabile gratuitamente dal sito della Siemens e utilizzabile per tutti gli studenti attivi. Ovviamente, rispetto alla versione a pagamento, la versione per studenti risulta avere delle notevoli limitazioni, che però non hanno ostacolato il lavoro che si è dovuto svolgere.

Dopo una attenta analisi e valutazione delle varie alternative, si è giunti alla soluzione definitiva che meglio riuscisse a soddisfare le esigenze del progetto. In particolare si è preferita una soluzione che non lasciasse spazio alla formazione di giochi negli accoppiamenti, dovuti all'usura causata dalla ripetizione delle prove, soprattutto per quanto riguarda il meccanismo di bloccaggio del provino a torsione. Si è tenuto conto inoltre della praticità dell'afferraggio, ovvero si è ritenuto che tale soluzione fosse quella che permetteva di avere

una fase di preparazione della macchina per il test più breve e più semplice, con meno operazioni da svolgere e non particolarmente complicate. Infine nel pensare la geometria dei vari componenti si è cercato di non pervenire a forme eccessivamente complesse e che richiedessero lavorazioni meccaniche troppo difficili, tutto ciò al fine di poter commissionare la realizzazione del progetto ad una comune officina meccanica senza particolari problemi.

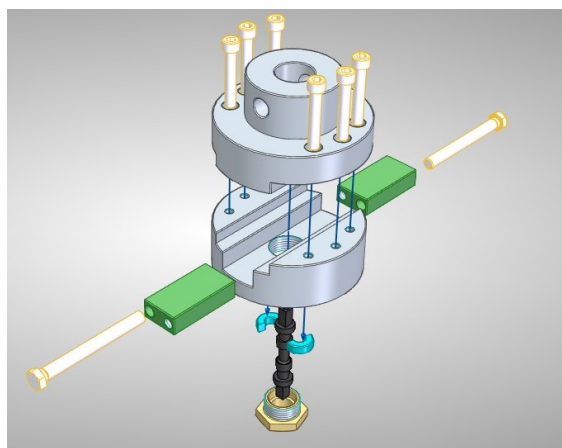


Figura 4.2.: Esploso dell'afferraggio

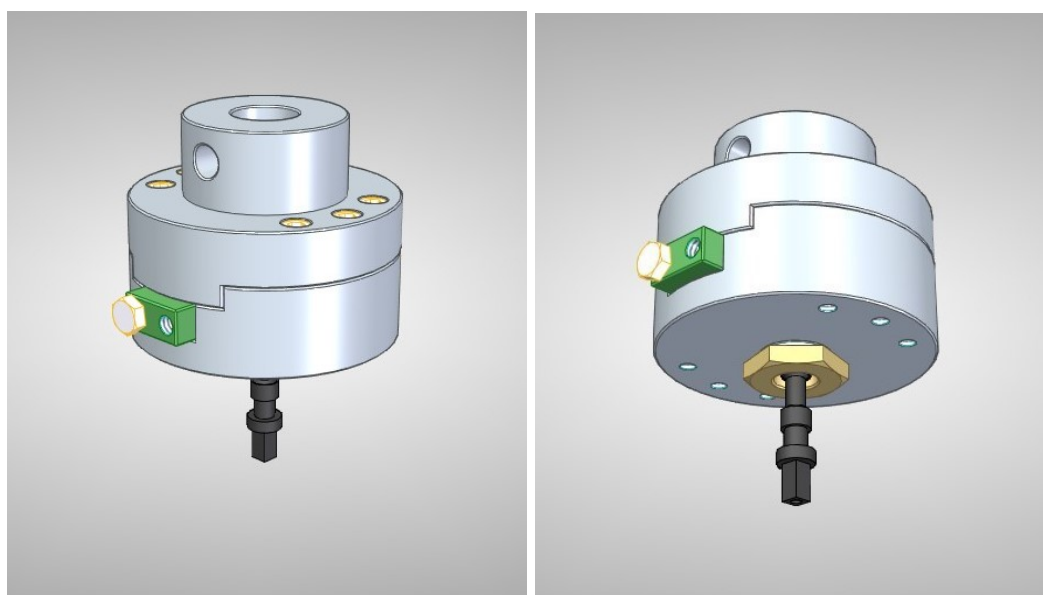


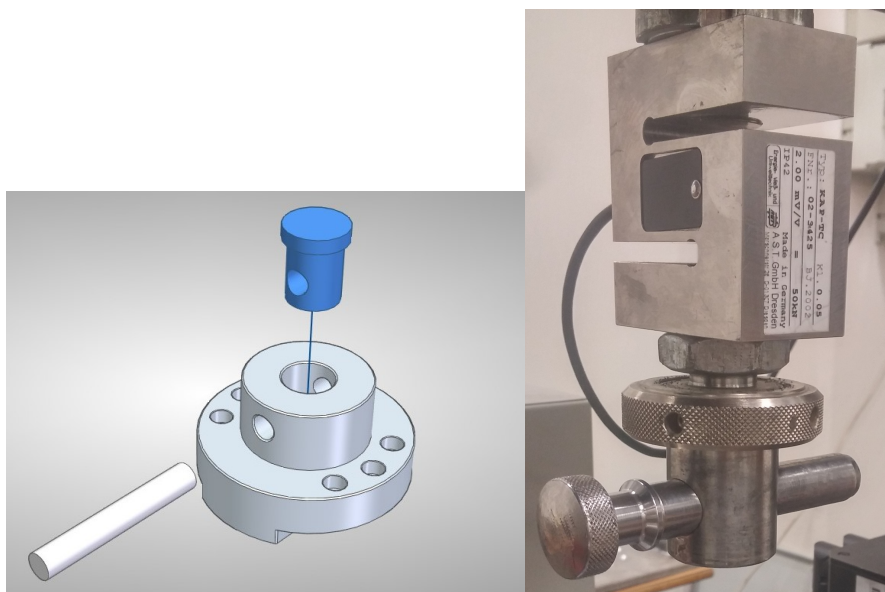
Figura 4.3.: Vista complessiva dell'afferraggio

Il materiale previsto per tutti i componenti è l'acciaio C40 o di qualità superiore, fatta eccezione per le boccole che andranno invece realizzate in acciaio 40NiCrMo2 o superiore : di nuovo si è voluto utilizzare materiali abbastanza comuni per non creare problemi in fase di realizzazione e cercare allo stesso tempo di contenere i costi evitando così acciai più pregiati e quindi meno economici dove non strettamente necessario. Gli unici componenti per i quali è stato previsto un acciaio diverso sono, come già detto, le boccole perché dalle analisi FEM effettuate su Ansys è stata evidenziata una tensione massima troppo alta, si è preferito

dunque un acciaio al nichel, cromo e molibdeno con limite di snervamento più alto (540-835 MPa) per restare in condizioni di sicurezza con buon margine. Il peso complessivo stimato di tutto il sistema di afferraggio (i due afferraggi veri e propri compresi di parti mobili e viti) è di circa 25 kg.

4.1. Funzionamento generale

L'afferraggio in esame è facilmente accoppiabile alla macchina per prove combinate prodotta dalla Zwick che l'Univpm intende acquistare, tramite un accoppiamento perno-foro (vedi Figura 4.4a, la parte blu rappresenta la parte terminale della macchina). La parte superiore dell'afferraggio termina quindi con un corpo cilindrico cavo provvisto di un foro passante trasversale all'asse di trazione per l'inserimento del perno che garantisce il collegamento alla macchina. Le dimensioni di foro, perno e tutte le altre necessarie sono state misurate sul campo, dal momento che l'Università possiede già una macchina per prove di trazione della stessa marca, ed è stato confermato dalla stessa Zwick che il sistema di collegamento è identico anche per la macchina per prove combinate (Figura 4.4b). Si è inoltre verificato che le tensioni accumulate sul perno, vale a dire la parte più sollecitata di tale sistema di collegamento, siano ben al di sotto del limite di sicurezza anche in condizioni di massimo carico.



(a) Esploso del meccanismo di accoppiamento: l'elemento blu rappresenta la parte terminale della macchina.
 (b) Il meccanismo di accoppiamento della macchina già posseduta dall'Univpm, identico a quello della nuova macchina.

Figura 4.4.: Meccanismo di accoppiamento tra macchina e afferraggio.

Il provino è collegato al sistema di afferraggio tramite 2 meccanismi differenti e indipendenti: uno per la sollecitazione a trazione e uno per quella a torsione. Questo è indubbiamente un vantaggio in quanto è possibile effettuare, oltre alle prove combinate multiassiali, anche prove di trazione pura e di torsione pura, senza che vengano modificate le prestazioni dello

stesso sistema di afferraggio.

La trazione sul provino è ottenuta per interferenza: una piccola boccola (divisa in 2 metà accostate durante la fase di preparazione al test) viene posizionata attorno al provino in una parte di quest'ultimo con diametro appositamente ridotto (Figura 4.5)

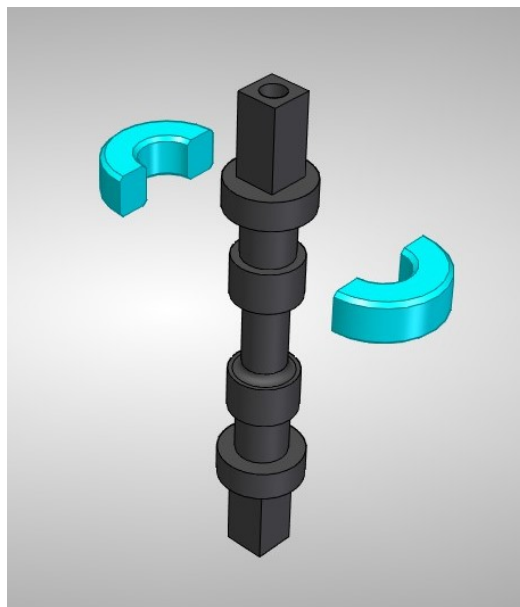


Figura 4.5.: Provino e boccola divisa a metà.

Durante il montaggio la boccola viene portata a battuta col provino e vengono a contatto così due superfici piane attraverso le quali la boccola riesce a applicare la trazione sul provino. La boccola è portata a battuta da una particolare ghiera, cava internamente e filettata esternamente per poter essere avvitata tramite filettatura metrica alla piastra inferiore (Figura 4.6)

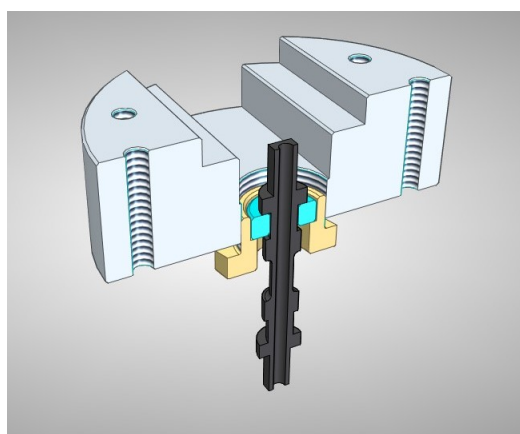


Figura 4.6.: Sezione del meccanismo di trazione: piastra inferiore, ghiera e boccola.

Una volta posizionato il tutto correttamente, la macchina applica il carico di trazione che è trasferito alla parte superiore dell'afferraggio tramite l'accoppiamento perno-foro visto in precedenza, e poi alla piastra inferiore tramite sei viti M10. Essendo la ghiera avvitata alla

4.1. Funzionamento generale

piastra inferiore, risente anch'essa del carico di trazione e lo trasmette conseguentemente alla boccola, da cui infine viene applicato al provino. L'utilizzo di questa soluzione, che può sembrare piuttosto elaborata per la presenza di diversi componenti, si è reso necessario per risolvere il problema, non banale, di dover fissare il provino ad entrambe le estremità. Altri sistemi alternativi con meno componenti coinvolti sono soltanto all'apparenza più semplici, poiché presentano una fase di montaggio del provino meno immediata.

La torsione è invece garantita da un sistema composto da due "slitte" accostate al provino e poi opportunamente serrate tramite viti. In particolare si vede come il provino presenti alle estremità delle zone in cui la sezione è di forma quadrata. Tra le due piastre che costituiscono il corpo principale dell'afferraggio è stata ricavata un'apertura che permette l'inserimento di tali slitte di forma regolare. Le facce piane di queste ultime vengono quindi accostate alle facce del provino. I fori praticati sulle slitte permettono di fissarle tramite lunghe viti M12 (Figura 4.7 e Figura 4.8)

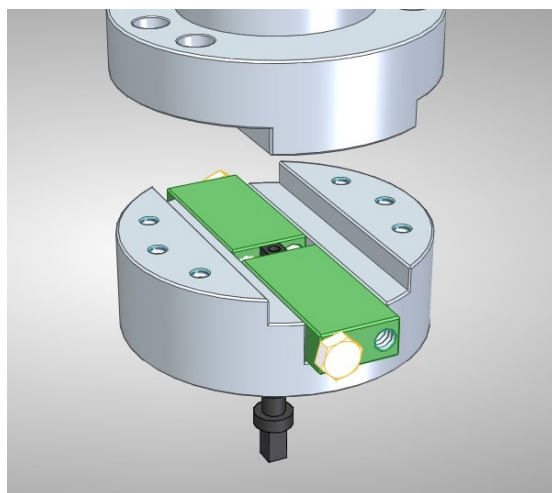


Figura 4.7.: Veduta interna dell'afferraggio

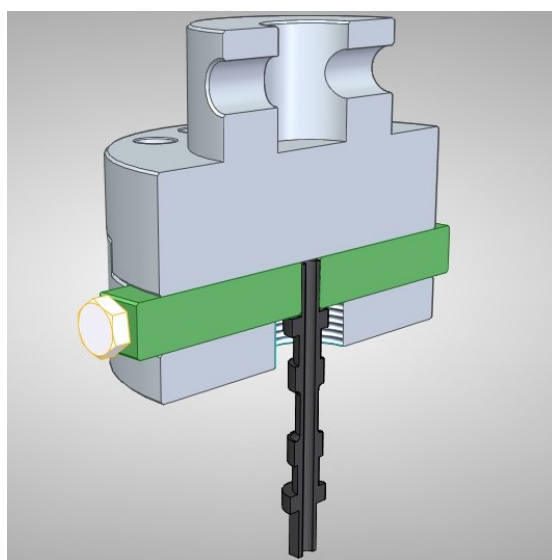


Figura 4.8.: Sezione dell'afferraggio per compressione del meccanismo di torsione.

Così facendo si eliminano eventuali giochi di accoppiamento all'interfaccia slitta/provino semplicemente aumentando la coppia di serraggio delle viti. È questo uno dei vantaggi per il quale è stato scelto questo sistema di afferraggio. Essendo le slitte solidali alle piastre (lo spazio per le slitte è dimensionato per lasciare pochissimo gioco), il carico di torsione è immediatamente trasferito dalle piastre alle slitte e subito al provino.

Come già evidenziato in precedenza è chiara l'indipendenza dei due sistemi di trasferimento del carico dalla macchina al provino poiché nessuno influenza l'altro, di conseguenza il sistema di afferraggio risulta valido anche per prove singole di trazione o torsione.

4.2. Componenti

4.2.1. Piastra superiore

Il componente in esame è una delle due piastre che insieme costituiscono il corpo principale del sistema di afferraggio. Questa in particolare svolge l'importante compito di assicurare il collegamento dell'afferraggio alla macchina per prove multiassiali. Tale collegamento è garantito da un accoppiamento perno-foro comune anche ad altre macchine prodotte dalla stessa azienda. Il materiale utilizzato è il C40 e la piastra in sé non è soggetta, stando ai dati delle simulazioni, a tensioni troppo elevate, lavorando sempre al di sotto anche del limite di fatica.

Nella parte centrale è stata prevista una protrusione a scalino che andrà ad interagire con un opportuno scavo realizzato nel componente "piastra inferiore". Tutto ciò al fine di affidare in parte la trasmissione del carico di torsione, per ragioni di ulteriore sicurezza, anche ai corpi delle due piastre e non soltanto all'attrito garantito dal serraggio delle viti.

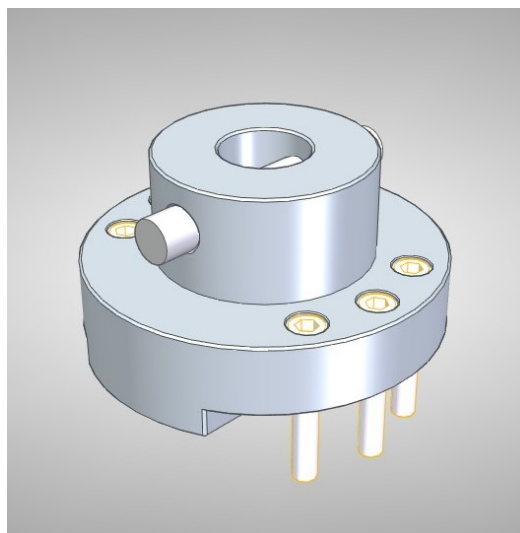


Figura 4.9.: Piastra superiore con perno di montaggio e le sei viti M10.

Le sei viti M10 previste dal progetto collegano le due piastre garantendo la trasmissione dei carichi impartiti dalla macchina alla parte inferiore dell'afferraggio, in questa piastra i fori sono lisci. I calcoli sono stati eseguiti considerando viti di classe di resistenza 10.9 del tipo a testa cilindrica con esagono interno, come da figura, azionabili da una classica chiave esagonale, in genere anche meno ingombrante da manovrare rispetto ad altre chiavi.

4.2.2. Piastra inferiore

Questa piastra è collegata a quella superiore tramite gli accoppiamenti filettati descritti sopra, pertanto i sei fori visibili in figura presentano una normale filettatura metrica. Si noti inoltre la cavità centrale che attraversa trasversalmente il corpo cilindrico, composta da due “gradini”: il primo partendo dall’alto è la sede della protrusione ricavata sull’altra piastra, il secondo va a costituire uno spazio vuoto che si vedrà essere l’alloggiamento delle slitte che bloccano il provino a torsione. Il grosso foro centrale è filettato per permettere il montaggio della ghiera, che assieme alla boccola costituisce il meccanismo di bloccaggio a trazione. (Figura 4.10)

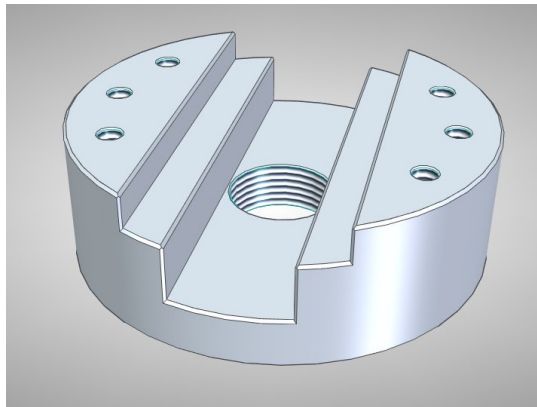


Figura 4.10.: Piastra inferiore.

Anche nel caso di questo componente le simulazioni su Ansys in condizioni di massimo carico non evidenziano tensioni troppo alte.

4.2.3. Provino

In Figura 4.11 è riportato il provino utilizzato per prove di sollecitazione di tipo combinato. La forma delle due estremità, con zone a diametri diversi e parti a sezione quadrata, è progettata per accoppiarsi correttamente al sistema di afferraggio e garantirne il funzionamento descritto al paragrafo 4.1. Pertanto si potranno posizionare le boccole per la trazione (vedi Figura 4.5) e accostare le slitte alle superfici piane per assicurare la torsione. La parte centrale del provino è la vera e propria area di test del materiale, dalla quale ricaviamo il comportamento elastico e plastico dell’acciaio in esame, così come la resistenza ultima dello stesso. La forma è di tipo cilindrico raccordata agli estremi, come previsto dalle norme.

Data la possibilità di effettuare prove di trazione o torsione pura con la medesima attrezzatura, come detto al 4.1, la geometria del provino potrebbe differire in alcuni aspetti. In primo luogo si preferisce avere un provino con una cavità cilindrica nel caso delle prove combinate, in cui è possibile testare sia il limite di snervamento sia quello di resistenza ultima del materiale in un’ampia gamma di sollecitazioni, grazie alla modulabilità del rapporto assiale/torsionale. Per le convenzionali prove assiali e torsionali si continua ad utilizzare invece un provino pieno.

Nel caso in cui si voglia effettuare una torsione pura sul provino, inoltre, non è necessario ricavare su di esso la riduzione di diametro per la boccola, ed il test può essere eseguito anche senza montare la ghiera, in quanto la funzione principale è svolta dalle due slitte.

Analogamente, nelle prove di pura trazione, non è necessario utilizzare provini con sezione quadrata alle estremità e può essere evitato il posizionamento delle slitte in quanto si rendono necessarie soltanto la ghiera e la boccola.

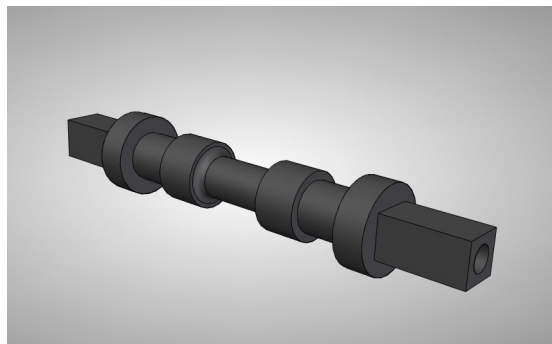


Figura 4.11.: Provino cavo utilizzato per prove combinate.

4.2.4. Boccola

La boccola, componente fondamentale per la trasmissione della sollecitazione di trazione, è un semplice corpo cilindrico cavo al centro, diviso in due parti (due “C”, vedi Figura 4.12) che vengono accostate manualmente avvolgendo il corpo del provino. Queste due parti vengono poi tenute insieme dalla ghiera, che ha una cavità interna di diametro pari a quello esterno della boccola. Durante il funzionamento della macchina, la faccia piana inferiore della boccola riceve il carico di trazione dalla ghiera, la faccia piana superiore trasferisce invece lo stesso carico al provino.

Le tensioni che si sviluppano su questo componente sono di sotto del limite di snervamento di un comune acciaio, tuttavia si è scelto di optare per un materiale migliore come il 40NiCrMo2 per una maggiore sicurezza, considerando il fatto che gran parte del carico di trazione (max 50 kN) ricade su questa piccola boccola. Inoltre si riesce in questo modo a donare maggior rigidità al sistema contenendo ancor di più le deformazioni.

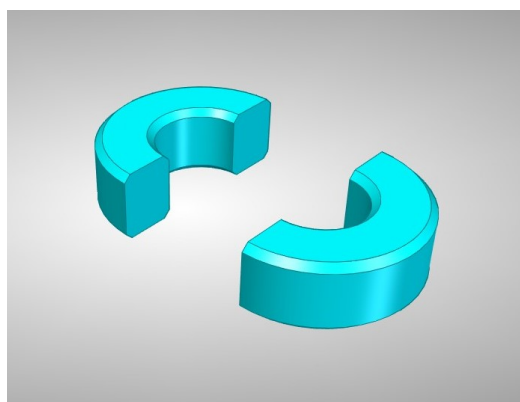


Figura 4.12.: Boccola divisa nelle due metà.

4.2.5. Ghiera

La ghiera è in sostanza un grosso dado con testa esagonale, parte esterna filettata e parte interna cava e liscia. La filettatura, come già visto, serve per accoppiarsi con la piastra inferiore. La cavità interna costituisce l'alloggiamento della boccola.

La testa esagonale è forata al centro per permettere ovviamente l'inserimento del provino. Si noti che tale foro è di diametro volutamente più grande del provino considerato in questo progetto, per consentire in un secondo momento di ripetere il test anche su provini di dimensioni maggiori: nella maggior parte dei casi il resto dei componenti può rimanere invariato, in altri può essere necessario progettare una nuova boccola con dimensione del foro centrale più grande. (Figura 4.13)

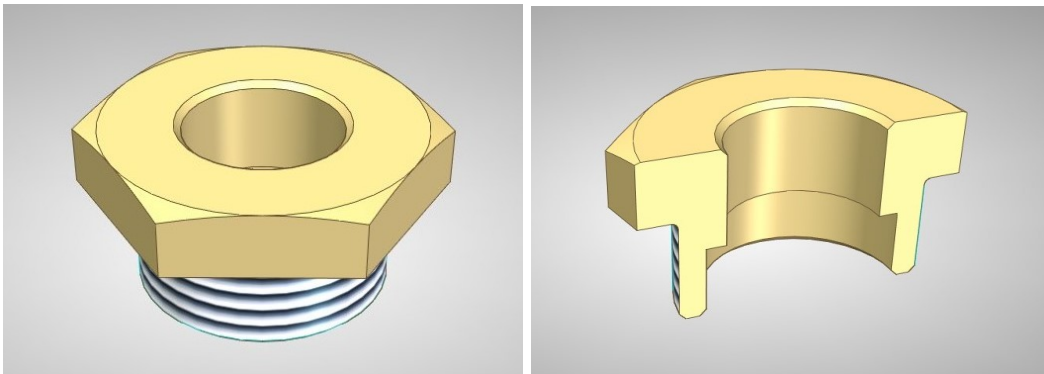


Figura 4.13.: Ghiera: vista esterna e sezione.

4.2.6. Slitta

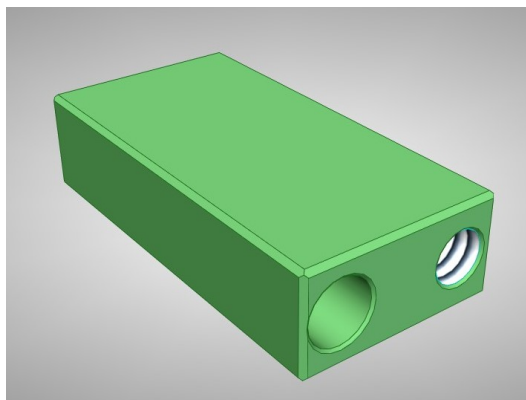


Figura 4.14.: Slitta con fori: uno filettato e uno liscio.

Le due slitte altro non sono che due parallelepipedi, di dimensioni tali da potersi inserire con precisione nello spazio che si viene a creare tra le due piastre, una volta montate insieme con le viti.

Così facendo le slitte vanno ad accostarsi alle facce piane ricavate sul provino. Inoltre, come si nota nella Figura 4.14, sono praticati due fori longitudinali su ognuna di esse, che servono per l'inserimento di due lunghe viti M12 che, serrate opportunamente, bloccano la traslazione

relativa di tali slitte garantendo la presa sul provino e l'eliminazione così di ogni possibile gioco durante l'applicazione della torsione.

4.3. Sequenza di montaggio

Di seguito viene riportata la corretta sequenza di montaggio del provino e di tutti i componenti del sistema di afferraggio.

- Unione delle piastre inferiori con quelle superiori tramite le sei viti M10.
- Montaggio delle piastre superiori sulla macchina tramite accoppiamento perno-foro.
- Montaggio del sistema boccola e ghiera ad una estremità del provino, quindi avvitamento della ghiera sull'afferraggio montato sulla parte fissa della macchina.
- Ripetizione del procedimento precedente, questa volta per l'afferraggio collegato alla traversa mobile della macchina. Le due ghiera non sono progettate per arrivare a battuta con la testa sulla piastra, avere cura pertanto di imprimere circa gli stessi giri di avvitamento da una parte e dall'altra del sistema di afferraggio.
- Inserimento delle slitte nell'apposito vano con eventuale rotazione manuale del provino per allineare le facce piane di quest'ultimo a quelle delle slitte. Uno dei due fori sulla slitta presenta filettatura metrica M12 mentre l'altro è liscio: inserire quindi le slitte ruotate di 180 gradi l'una rispetto all'altra in modo da non far combaciare i fori lisci con quelli filettati.
- Inserire una vite M12 per ogni lato e serrarle. Tale configurazione garantisce un miglior bilanciamento della presa sul provino. La figura 18 mostra l'aspetto del sistema di afferraggio una volta completate le precedenti operazioni.
- Azionare la macchina.

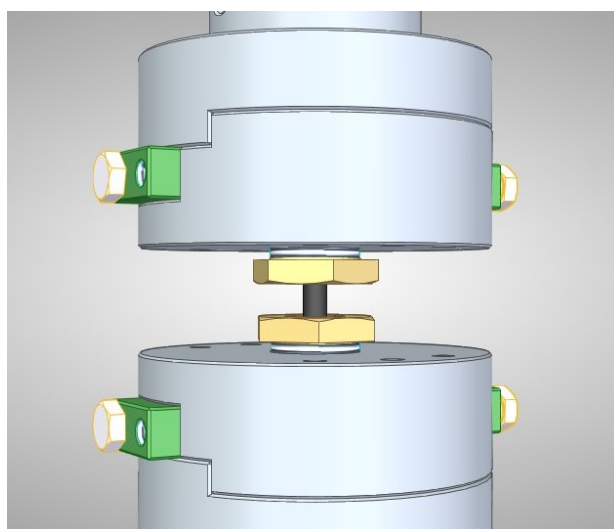


Figura 4.15.: Afferraggio completo a montaggio ultimato.

L'intero procedimento di inserimento del provino risulta essere abbastanza semplice e richiede in totale soltanto alcuni minuti: tutto ciò è in linea con la durata delle prove che si

4.3. Sequenza di montaggio

vogliono effettuare con la macchina che utilizzerà questi afferraggi, per le quali risulterebbe inopportuno un tempo di montaggio molto lungo.

All'atto pratico, considerando che il corpo dell'afferraggio costituito dalle due piastre resterà quasi sempre montato sulla macchina, le uniche parti da inserire di volta in volta sono: boccola e ghiera per prove di trazione pura; slitte e relative viti per prove di torsione pura; tutti e tre nel caso di prove multiassiali combinate.

Capitolo 5.

Verifiche strutturali

5.1. Introduzione

L'analisi strutturale è stata effettuata al fine di conoscere le tensioni massime che si vengono a sviluppare nei vari componenti del sistema di afferraggio progettato, così da permetterne un corretto dimensionamento e un'opportuna scelta dei materiali con cui realizzarne le varie parti.

Per questi studi è stato utilizzato "Ansys" (Figura 5.1), un software di simulazione ingegneristica che permette di effettuare analisi secondo il metodo degli elementi finiti.



Figura 5.1.: Logo di Ansys, il software utilizzato per le analisi strutturali.

Il metodo degli elementi finiti (detto anche FEM) è una tecnica dell'Analisi numerica volta a dare soluzione a problemi di natura complessa per cui non è possibile trovare una soluzione alle equazioni differenziali che lo descrivono a causa, ad esempio, delle irregolarità delle geometrie prese in esame.

Infatti, qualora si voglia studiare cosa avviene in un corpo soggetto a un determinato fenomeno, variabili come velocità, spostamento o pressione sono funzione di ciascun generico punto del dominio di definizione del problema (ossia della superficie del corpo stesso), assegnando così all'analisi del caso un numero infinito di incognite.

Il FEM semplifica lo studio del problema suddividendo il dominio di definizione in elementi finiti tramite una griglia denominata "mesh", definendo poi all'interno di ogni elemento delle funzioni approssimanti che ne descrivano il comportamento. Questo metodo, nato negli Anni '60, grazie al notevole sviluppo dei sistemi informatici negli ultimi cinquant'anni è usato non solo per problemi di ingegneria Strutturale, ma anche di Fisica, Astronomia, Bioingegneria... e viene usato non solo in ambito Accademico, ma anche nel mondo dell'Industria. [11]

Per effettuare l'analisi FEM in Ansys i passaggi da seguire sono i seguenti:

1. Realizzazione del modello in un software CAD;
2. Importo del modello in Ansys;
3. Creazione della mesh sul modello che divide la superficie in elementi finiti;
4. Scelta del tipo di collegamento tra i vari componenti (saldati, senza o con attrito...);

5. Inserimento dei carichi e vincoli relativi al problema preso in esame.

Una volta eseguiti questi passaggi, il software studia il caso e riporta le tensioni (nell'ordine del MPa) che si sono sviluppate, colorando ogni elemento finito con un colore diverso a seconda dell'intensità della tensione rilevata in esso. Ovviamente ad ogni tonalità di colore corrisponde un determinato range di MPa, riportato a fianco del modello studiato in una legenda apposita.

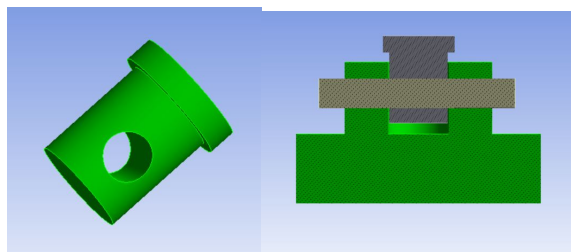
Entrando nello specifico del nostro progetto, le verifiche tensionali effettuate sono tre, ciascuna volta a uno scopo ben preciso, e sono le seguenti:

- Verifica del collegamento tra afferraggio e macchina, realizzato tramite l'accoppiamento foro-perno;
- Verifica a trazione e analisi delle tensioni sulle boccole e sulle ghiere;
- Verifica a torsione sulle slitte.

E' doveroso aggiungere che nello studio fatto la versione del software Ansys utilizzata è quella Accademica, dunque con diverse limitazioni, tra cui (la più importante) un numero piuttosto limitato di elementi finiti, ma considerato comunque sufficientemente ampio per le analisi effettuate.

5.2. Analisi combinata per la verifica del collegamento macchina-afferraggio

La seguente analisi è stata realizzata per avere ben chiaro quali sono le tensioni che si sviluppano nella parte della piastra superiore dell'afferraggio collegata alla macchina tramite perno. Infatti fin da subito si è immaginato che la regione di contatto tra perno e piastra avrebbe sviluppato tensioni piuttosto elevate, tant'è vero che, durante la progettazione stessa, dati i primi risultati delle analisi le dimensioni della regione della piastra adibita al collegamento sono state modificate più volte per ottenere dei risultati accettabili. Nell'analisi strutturale il collegamento tra afferraggio e macchina è stato replicato realizzando appositamente e importando in Ansys non solo il perno, ma anche la porzione della macchina adibita al collegamento, così da rendere il più attendibili possibili i risultati ottenuti (Figura 5.2).



(a) Estremità della macchina su cui si collega l'afferraggio. (b) Sezione del collegamento tra macchina e afferraggio, che avviene tramite perno.

Figura 5.2.: Sistema di collegamento tra macchina e afferraggio.

5.2. Analisi combinata per la verifica del collegamento macchina-afferraggio

La simulazione è stata realizzata effettuando un'analisi combinata, ovvero considerando il caso in cui i carichi di trazione e torsione siano entrambi applicati al loro massimo, che corrisponde nel caso della trazione a una forza di 50 000 N e nel caso della torsione a un momento di 200 Nm.

Per lo studio del caso si è proceduto nella seguente maniera: una volta importato in Ansys, sottoforma di file step, il modello dell'afferraggio realizzato con il programma CAD "Solid Edge", si è creata per prima cosa la mesh per permettere l'analisi ad elementi finiti del sistema (Figura 5.3), si sono impostati tutti i collegamenti tra le varie componenti come "bonded" (cioè saldati) e, infine, si sono posizionati i vincoli e i carichi.

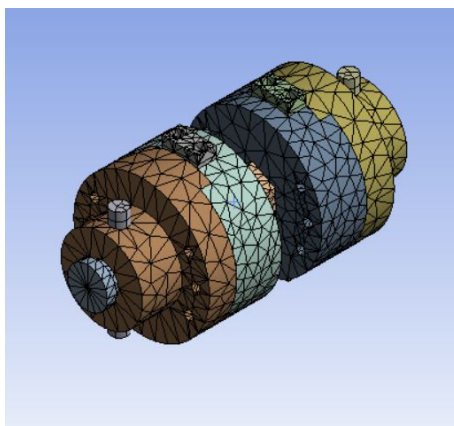


Figura 5.3.: Mesh creata sul modello per l'analisi del collegamento tra macchina e afferraggio

Per quello che riguarda i carichi e i vincoli, essi sono stati posizionati alle estremità del modello, nello specifico nella parte della macchina a trazione-torsione presente in esso (Figura 5.4). D'altronde, l'afferraggio in sé trasmette al provino carichi che a sua volta gli sono stati trasmessi dalla macchina tramite il perno, motivo per cui questa scelta di posizionamento di carichi e vincoli risulta essere la più appropriata. Ovviamente, per rendere la simulazione il più fedele possibile alla realtà, la forza e il momento sono stati collocati entrambi nella stessa estremità del modello, mentre il vincolo (incastro) è collocato nell'altra estremità.

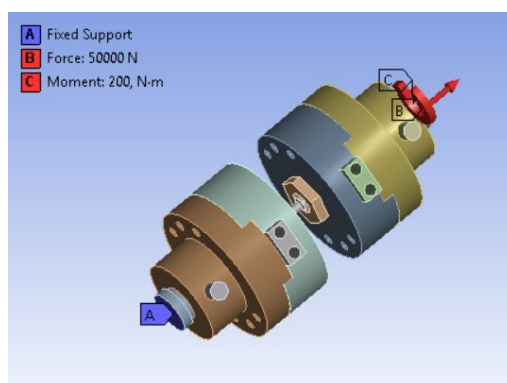


Figura 5.4.: Posizionamento dei carichi e dei vincoli per l'analisi tensionale.

Dopo aver collocato i carichi e i vincoli nelle giuste posizioni, il software ha elaborato il tutto e ha riportato le distribuzioni tensionali sui vari componenti.

La prima cosa che si rileva è che, effettivamente, non solo il provino è l'elemento più sollecitato dell'intero sistema, ma che risulta essere soggetto a tensioni molto più elevate rispetto agli altri componenti: questo significa che, nella realtà, difficilmente si svilupperanno questi valori di tensione, in quanto il provino si romperà prima e la macchina arresterà il suo funzionamento prima di applicare effettivamente i carichi massimi applicabili (Figura 5.5).

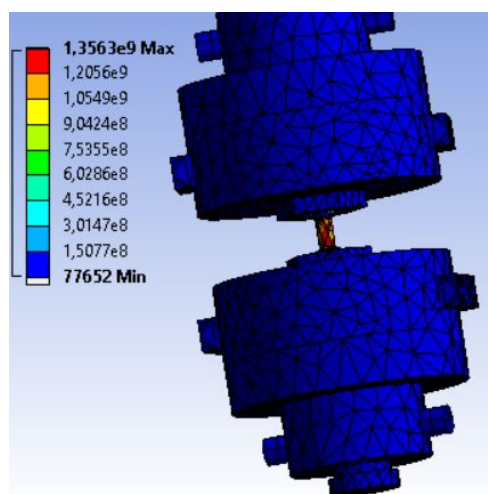
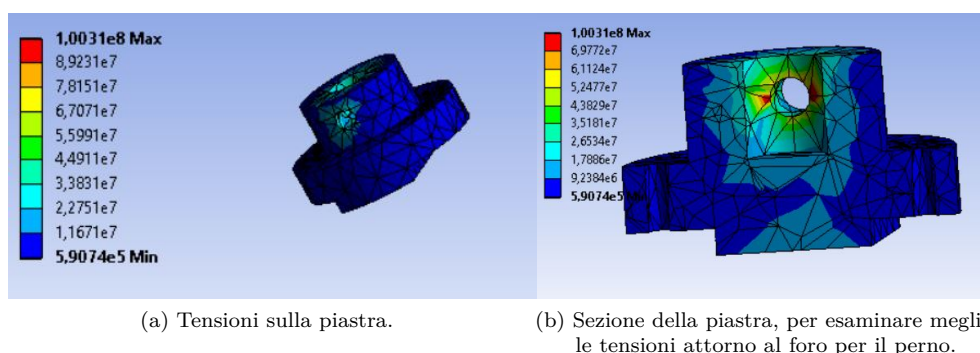


Figura 5.5.: Analisi della distribuzione delle tensioni sull'intero sistema.

Per quello che riguarda le piastre superiori dell'afferraggio, l'analisi ha mostrato come i valori massimi di tensione siano presenti nella piastra collegata all'estremità della macchina che trasmette i carichi di trazione e torsione, nella zona di contatto con il perno. Le intensità riscontrate risultano essere abbondantemente accettabili, essendo il massimo attorno ai 100 MPa (Figura 5.6).



(a) Tensioni sulla piastra.

(b) Sezione della piastra, per esaminare meglio le tensioni attorno al foro per il perno.

Figura 5.6.: Tensioni sulla piastra superiore del lato dell'afferraggio su cui sono applicati i carichi.

Sull'altra piastra superiore (Figura 5.7), invece, le tensioni risultano essere piuttosto basse e non creano alcun tipo di preoccupazione (il valore massimo si aggira sui 30 MPa, ed è circa di tre volte inferiore al parametro massimo rilevato nell'altra piastra).

Anche per quello che riguarda i perni, le tensioni maggiori si hanno in quello collegato al lato macchina adibito alla trasmissione dei carichi, mentre l'altro perno risulta essere molto meno sollecitato.

I valori massimi delle tensioni sono concentrati nella zona di contatto con la macchina e

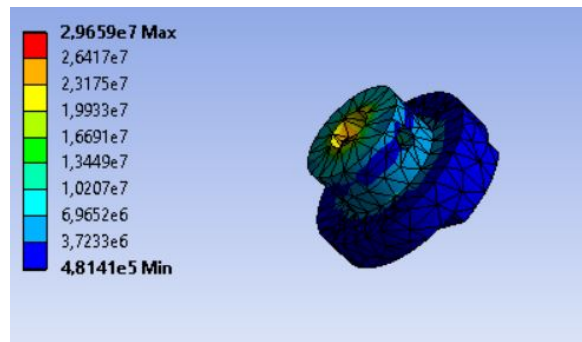


Figura 5.7.: Tensioni sulla piastra nel lato dell'afferraggio in cui è presente l'ncastro.

risultano essere, nel perno più sollecitato, più elevati rispetto a quelli presenti nelle piastre, infatti sono di poco inferiori ai 300 MPa (Figura 5.8): bisognerà quindi scegliere in modo appropriato il materiale con cui realizzarli.

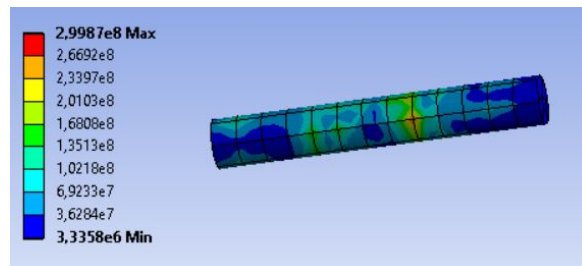


Figura 5.8.: Tensioni sul perno del lato dell'afferraggio in cui vengono applicati i carichi.

Nel perno vicino all'ncastro, invece, l'intensità della sollecitazione è di gran lunga minore di quella dell'altro perno, essendo all'incirca dieci volte più piccola (Figura 5.9).

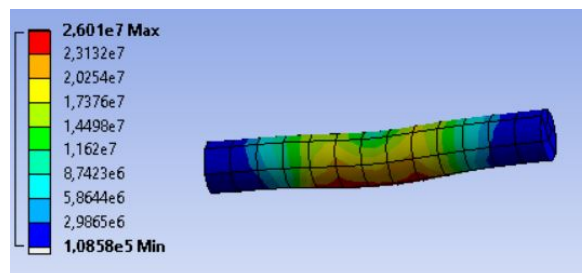


Figura 5.9.: Tensioni sul perno del lato dell'afferraggio su cui è applicato l'ncastro.

5.3. Analisi a trazione

L'analisi a trazione dell'afferraggio viene effettuata al fine di esaminare e conoscere quali sono le tensioni massime che si vengono a sviluppare in esercizio sugli elementi adibiti al trasferimento dello sforzo di trazione sul provino, ovvero le boccole e le ghiera.

Si ricorda infatti come il carico di trazione venga trasmesso dalla macchina al provino: la macchina trasmette lo sforzo tramite il collegamento perno-foro alla piastra superiore, che a sua volta lo trasmette alla piastra inferiore grazie alle viti con cui sono collegate. La piastra

inferiore riesce a esercitare il carico sulla ghiera con la filettatura con cui sono collegati. Infine, grazie alla presenza delle boccole che alloggiano internamente alla ghiera, il carico arriva al provino, in contatto con le boccole tramite una superficie apposita.

Prima di entrare nello specifico della verifica strutturale, è necessario fare una premessa: infatti, per rendere il più veritiera possibile l'analisi, si è deciso di elaborare il modello con il programma CAD in modo tale da far sì che la trazione venisse trasmessa esclusivamente dalle superfici adibite a ciò.

Infatti la boccola risulta essere in contatto con il provino e con la ghiera solo tramite la superficie inferiore e quella superiore, e non tramite le superfici laterali a causa dei giochi inevitabilmente presenti nella realtà: se si fosse impostato il diametro esterno della boccola, ad esempio, uguale al diametro interno della ghiera, la superficie laterale di quest'ultima avrebbe inevitabilmente contribuito alla trasmissione della trazione sulla boccola, alterando il risultato dell'analisi FEM.

Ecco che quindi il diametro esterno della boccola risulta essere minore di quello interno della ghiera, mentre il diametro interno è più grande di quello del provino (Figura 5.10).

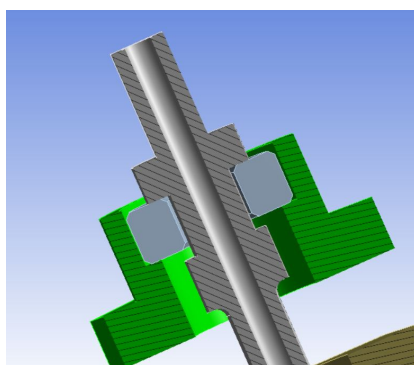
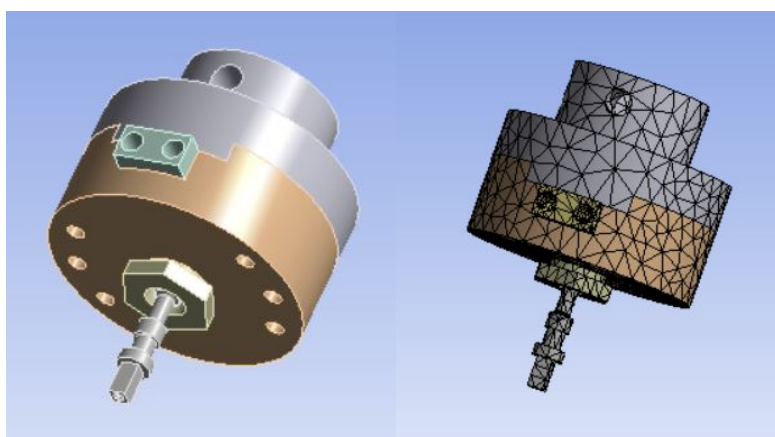


Figura 5.10.: Giochi presenti tra boccola e provino e tra boccola e ghiera.

La verifica strutturale parte, come nel caso precedente, dall'importazione del modello sul software Ansys, nel quale viene creata per prima cosa la mesh. Il modello utilizzato per questa verifica risulta essere molto diverso rispetto a quello usato per l'analisi delle distribuzioni tensionali sulle piastre superiori e sui perni: infatti in questo caso il provino ha una sola estremità fissata all'afferraggio, mentre l'altra risulta essere libera.

Questa scelta è stata fatta per avere un'analisi più precisa delle tensioni percepite dalle boccole, sicuramente uno degli elementi più sollecitati del sistema: essendo infatti la mesh costituita da un numero fisso di elementi finiti, minore è il numero di componenti del sistema, maggiore sarà la quantità di elementi finiti associata a ogni componente.

Una volta realizzata la mesh, si sono create le varie tipologie di contatti tra i componenti del modello: anche in questo caso tutti i contatti sono stati impostati come "bonded", in quanto tutte le posizioni relative tra le superfici dei vari componenti in contatto nel modello, durante l'esercizio, rimangono effettivamente invariate (come se, appunto, fossero saldate). Questa impostazione dei contatti è resa lecita dal fatto che nella preparazione del modello sono stati lasciati dei giochi tra ghiera, provino e superfici laterali delle boccole: se esse fossero state in contatto, infatti, andava impostato una tipologia di vincolo che tenesse conto che ci potrebbero essere dei movimenti relativi tra le superfici, come il contatto "frictionless", che di fatto pone la condizione di assenza di attrito tra esse (Figura 5.11).



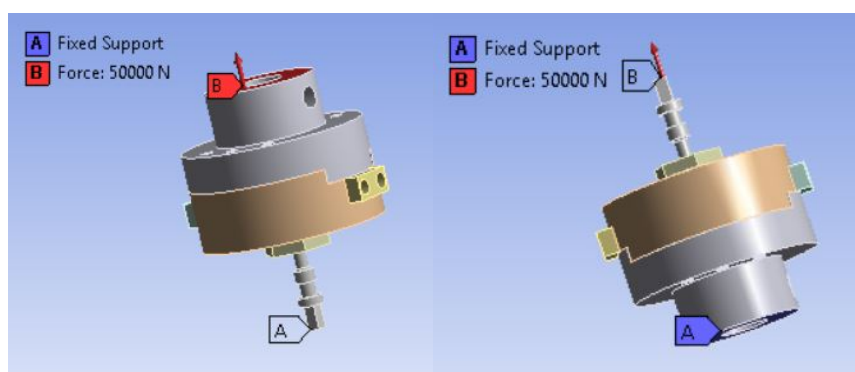
(a) Modello per l'analisi a trazione. (b) Mesh creata per l'analisi a trazione.

Figura 5.11.: Modello utilizzato per l'analisi a trazione.

Scelti i contatti, si passa all'impostazione dei carichi e vincoli: essendo, come detto, un'analisi a trazione, l'unico carico presente è quello di trazione, con intensità pari al suo massimo, ovvero di 50'000 N.

Il modello scelto per l'analisi rende necessario lo svolgimento di due verifiche separate al fine di conoscere le tensioni su boccole e ghiera sia del lato dell'afferraggio fisso, che su quello in cui sono applicati i carichi, visto che il provino è afferrato solo ad un'estremità:

- Per conoscere la distribuzione tensionale sugli elementi dell'afferraggio in cui sono applicati i carichi va posizionata la forza di trazione nella piastra superiore e l'incastro sull'estremità libera del provino. (Figura 5.12a)
- Per la distribuzione tensionale sui componenti dell'afferraggio fisso, invece, è la forza che si va a posizionare nell'estremità libera del provino, e l'incastro va a collocarsi nella piastra superiore (Figura 5.12b).



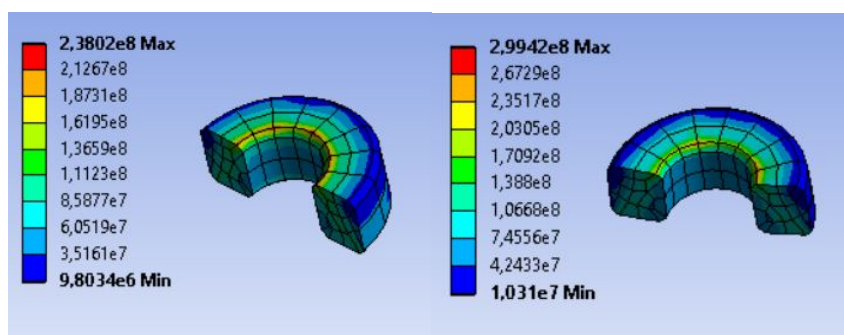
(a) Sistemazione dei carichi nell'analisi dell'afferraggio su cui sono applicati i carichi. (b) Sistemazione dei carichi nell'analisi dell'afferraggio fisso.

Figura 5.12.: Posizionamento dei carichi e dei vincoli nell'analisi a trazione.

Una volta elaborati dal software i risultati delle analisi, si possono esaminare i dati e fare quindi varie considerazioni.

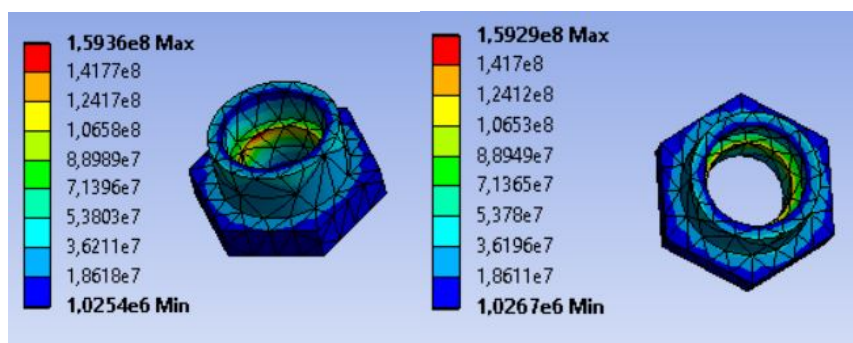
Per prima cosa quello che si nota è che tra la boccola e la ghiera, l'elemento su cui sono rilevati i valori di tensione più elevati risulta essere la boccola, anche a causa della ridotta area di contatto sia con la ghiera che col provino.

In termini di intensità, tra le boccole presenti nella parte di afferraggio vicine alla forza e quelle vicine all'incastro non sono rilevate grandi differenze dal punto di vista della massima tensione percepita, il cui valore risulta essere attorno ai 300 MPa (Figura 5.13).



(a) Tensioni subite dalle boccole della parte dell'afferraggio su cui sono esercitati i carichi. (b) Tensioni subite dalle boccole della parte dell'afferraggio fisso.

Figura 5.13.: Distribuzione delle tensioni percepite dalle boccole.



(a) Tensioni subite dalla ghiera della parte dell'afferraggio su cui sono esercitati i carichi. (b) Tensioni subite dalla ghiera della parte dell'afferraggio fisso.

Figura 5.14.: Distribuzione delle tensioni percepite dalle ghiera.

La ghiera invece risulta essere meno sollecitata, con valori massimi inferiori ai 200 MPa, concentrati nella zona di contatto con la boccola (Figura 5.14).

I valori riscontrati non sono particolarmente preoccupanti, e questo risulta essere decisamente confortante in vista della scelta dei materiali con cui realizzarli.

Ovviamente, mentre per le ghiera si potrà utilizzare un acciaio comune come nel caso della

maggior parte dei componenti, per le boccole probabilmente converrà scegliere un acciaio più resistente, viste le loro maggiori sollecitazioni.

5.4. Analisi a torsione

Questa tipologia di analisi viene effettuata per conoscere quali sono i valori tensionali che si vengono a sviluppare negli elementi predisposti al trasferimento della torsione sul provino, ovvero le slitte.

Essendo questa un'analisi a torsione, non è necessario importare tutto l'afferraggio, ma solo quella parte che contribuisce alla trasmissione del carico applicato: per questo motivo, nel modello importato su Ansys, le boccole e le ghiera risultano essere assenti (Figura 5.15).

La scelta di eliminare dei componenti dall'afferraggio non viene presa solo per avere a che fare con un modello più semplice, ma anche per avere un'analisi tensionale più accurata: infatti, come già detto nella parte dedicata all'analisi a trazione, essendo il numero di elementi finiti che compone la mesh fisso, minore è la superficie su cui si deve distribuire, più piccoli saranno le dimensioni degli elementi, e quindi sarà possibile conoscere in modo più preciso quali sono le distribuzioni delle tensioni nei vari componenti del sistema.

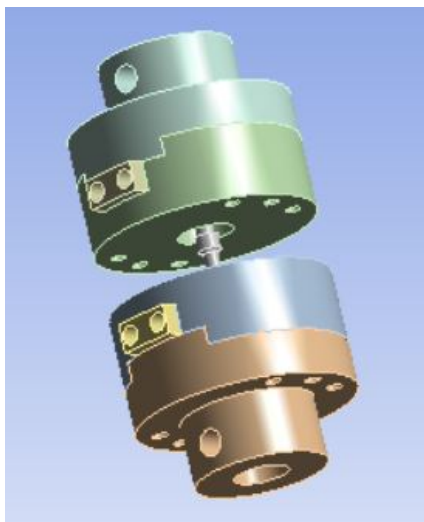


Figura 5.15.: Modello per l'analisi a torsione.

Dopo aver importato il modello e creato la mesh, si sono scelte le tipologie di contatti tra le varie parti dell'afferraggio e, a differenza di quanto fatto nell'analisi a trazione, in questo caso non sono stati impostati tutti come bonded: infatti, per rendere più veritiera l'analisi, i contatti tra slitte e piastre sono stati impostati "frictionless".

Scegliere il contatto di tipo frictionless significa evidenziare come le slitte non solo non siano fissate in alcun modo alle piastre (ad esempio tramite viti...), ma anche che alcune delle loro superfici potrebbero non essere proprio in contatto, a causa ad esempio della presenza di giochi.

Un'alternativa all'impostazione dei contatti frictionless sarebbe potuta essere la riduzione della larghezza e dell'altezza delle slitte: in tal caso i giochi si sarebbero creati "manualmente". Si è preferito però procedere modificando le tipologie di contatto in quanto essa risulta essere la procedura più semplice e veloce.

Dopo aver scelto i contatti, si sono posizionati nel modello carichi e vincoli: analogamente a quanto fatto nelle altre prove, essi sono stati posizionati nelle estremità dell'afferraggio. Ovviamente, l'unico carico da impostare in questa prova è quello di torsione, alla sua intensità massima, che si ricorda essere di 200 Nm (Figura 5.16).

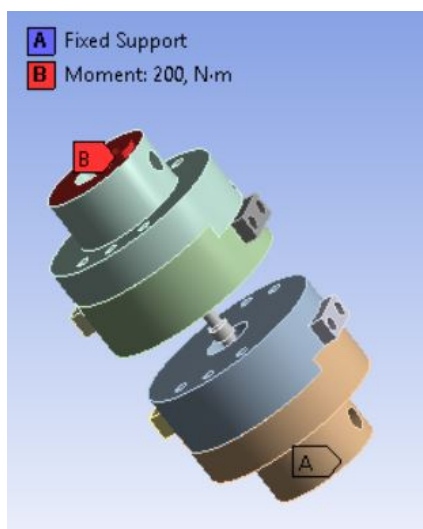


Figura 5.16.: Posizionamento dei carichi per l'analisi a torsione.

La distribuzione delle tensioni elaborata dal software ha mostrato come le slitte siano veramente poco sollecitate.

Infatti tutte e quattro le slitte presenti nell'afferraggio sentono una tensione massima di intensità attorno ai 6 MPa concentrata nella zona di contatto tra esse e il provino, un valore molto basso soprattutto se comparato con quello associato agli altri componenti (Figura 5.17).

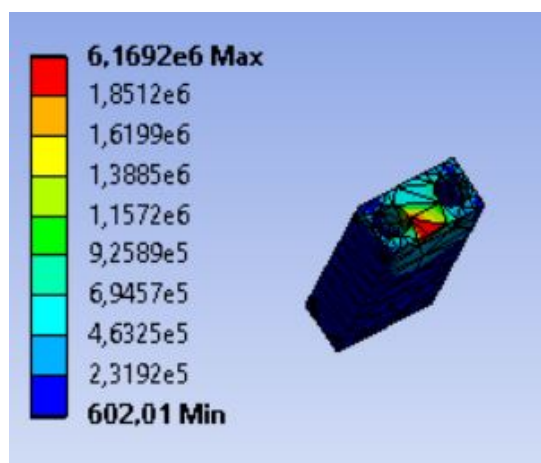


Figura 5.17.: Tensioni sulle slitte.

Il fatto che le slitte siano poco sollecitate è sicuramente un dato molto positivo, in quanto questo permetterà di farle realizzare in officina con un materiale con tensione di snervamento non troppo alta, e quindi poco costoso.

5.5. Le tensioni sulla piastra inferiore

L'unico elemento per cui non sono state fatte analisi tensionali specifiche è la piastra inferiore: infatti, data la sua forma e le tipologie di contatti tra essa e gli altri componenti dell'afferraggio, non suscita grandi preoccupazioni.

Qualora si volesse comunque avere un'idea delle tensioni che subisce durante l'esercizio, si può considerare valida la distribuzione tensionale ottenuta con la prova a carichi combinati usata per lo studio delle piastre superiori e dei perni: come emerge da quei risultati, la sollecitazione massima, che risulta essere attorno ai 50 MPa, si ha in corrispondenza del foro centrale su cui si inserisce la ghiera (Figura 5.18).

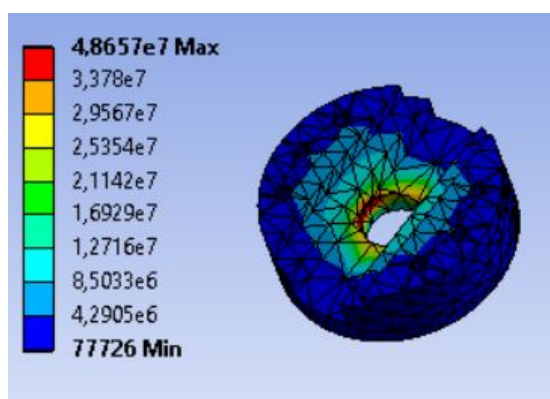


Figura 5.18.: Tensioni nella piastra inferiore.

Riesaminando i risultati delle varie analisi effettuate, quello che emerge in conclusione è che, nel caso in cui la macchina applicasse i carichi di trazione e di torsione con la massima intensità possibile, nella maggior parte dei componenti dell'afferraggio si svilupperebbero tensioni non troppo elevate (minori cioè di 200 MPa.).

Gli unici elementi che risentono di tensioni effettivamente elevate sono le boccole e i perni di collegamento, per i quali quindi bisognerà avere un occhio di riguardo quando si sceglieranno i materiali con cui realizzarli: infatti, mentre per tutti gli altri componenti si potrà utilizzare un acciaio con tensione di snervamento almeno attorno ai 300 MPa (il che rende la scelta piuttosto semplice visto che la maggior parte degli acciai soddisfano questa richiesta), per quello che riguarda le boccole e i perni sarà opportuno usare un acciaio con tensione di snervamento maggiore di 450 MPa, cosa che porterà a scegliere un acciaio con una composizione chimica più elaborata rispetto a quelli di uso comune.

In seguito è riportata una tabella che riassume le tensioni massime per ogni componente del sistema di afferraggio.

Tabella 5.1.: Tensioni massime dei componenti.

Componente	Tensione massima (MPa)
Piastra superiore	100
Piastra inferiore	48
Slitta	6,17
Boccola	299
Ghiera	159

Capitolo 6.

Distinta base

Si riportano tutte le informazioni tecniche utili per la produzione del sistema di afferraggio descritto.

La Tabella 6.1 è una distinta componenti. Le principali caratteristiche di ogni pezzo sono quindi riassunte per averne una percezione più immediata. La colonna "dimensioni" riporta gli ingombri massimi dei componenti a lavorazioni ultimate.

Tabella 6.1.: Distinta componenti.

Codice prodotto	Nome	Dimensioni	Quantità	Materiale	Note
01	Piastra superiore	Ø150 x 86	2	C40	
02	Piastra inferiore	Ø150 x 50	2	C40	
03	Boccola	Ø30 x 10	2	40NiCrMo2	
04	Ghiera	Ch 48 x 26	2	C40	
05	Slitta	80 x 40 x 20	4	C40	
06	Vite M10 TCEI	M10 x 60	12		Classe 10.9
07	Vite M12 TE	M12 x 120	4		Classe 10.9

Non entrano a far parte della distinta componenti alcuni pezzi che abbiamo comunque visto menzionare.

In primo luogo i perni per il montaggio dell'afferraggio alla macchina: il motivo risiede nel fatto che questi perni sono compresi nell'acquisto della macchina e quindi sono già dimensionati per resistere ai carichi massimi applicabili. Tuttavia, non è detto che questi perni siano sufficientemente lunghi per poter essere compatibili con il nostro afferraggio, perciò si è provveduto in via preventiva a fare un dimensionamento e un'analisi tensionale, sulla base della quale si è deciso che vengano realizzati con lo stesso materiale della boccola (40NiCrMo2). Per quanto riguarda il provino, si è già visto come le caratteristiche di questo possano variare a seconda delle prove previste. Il modello CAD mostrato è adatto per prove

combinare, nel caso di prove singole di trazione o torsione si può utilizzare un provino pieno (e non cavo) con alcune semplificazioni di forma (nessuna sezione quadrata agli estremi per prove di sola trazione, nessuna sede per le boccole in caso di sola torsione)

6.1. Lavorazioni meccaniche.

Fatta eccezione per le viti, che sono componenti commerciali, tutti gli altri componenti necessitano di lavorazione alle macchine utensili. Vediamo quindi il processo produttivo di ognuno di essi.

- **Piastra superiore:** le minime dimensioni consigliate di materiale grezzo da cui iniziare la lavorazione sono $\varnothing 160 \times 95$ mm. La lavorazione inizia al tornio, su cui è possibile fare: intestatura delle facce piane da entrambi i lati; tornitura per portare il diametro esterno a 150 mm; tornitura per creare la zona di aggancio con la macchina (si tratta di un corpo cilindrico con $\varnothing 90$ mm esteso per 44 mm a partire dalla faccia superiore); foro cieco $\varnothing 36 \times 44$ mm, coassiale al corpo della piastra. Dopo l'eliminazione delle bave, la lavorazione prosegue su una fresatrice. Su quest'ultima si effettuano il gradino sulla faccia inferiore, largo 70 mm e alto 12 mm; e i 6 fori $\varnothing 10,5$: essi sono posizionati a 60 mm dal centro, 2 sull'asse passante per il centro perpendicolare al gradino, gli altri 4 a 20 gradi dai primi 2. Dall'altro lato si applica il foro per l'inserimento del perno ($\varnothing 18$ mm) e le sedi per le teste delle viti ($\varnothing 16 \times 11$ mm) sui 6 fori precedenti. L'ultimo passaggio consiste nello smussare tutti gli spigoli vivi.
- **Piastra inferiore:** in questo caso si consiglia di partire da un grezzo cilindrico $\varnothing 160 \times 60$ mm. Anche qui la prima lavorazione è al tornio: intestatura delle due facce piane, tornitura per portare il diametro esterno a 150 mm, il grosso foro destinato alla ghiera. Quest'ultimo dovrà essere di $\varnothing 35$ mm \times 20 mm e subito dopo verrà effettuata la filettatura M39. Spostando il pezzo su una fresatrice si riescono ad effettuare le lavorazioni mancanti: il primo gradino (alto 12 mm e largo 70 mm), il secondo (alto 20 mm e largo 40 mm), i 6 fori passanti di $\varnothing 8,5$ con disposizione identica a quella descritta nella piastra superiore, la filettatura M10 per ognuno dei 6 fori. Seguono smussi sugli spigoli vivi.
- **Boccola:** si consiglia di partire da un cilindro $\varnothing 35 \times 14$ mm. Il componente viene creato come un unico corpo e solo alla fine tagliato in due metà. Al tornio si effettuano le intestature e l'adeguamento di diametro per arrivare alle dimensioni di progetto di $\varnothing 30 \times 10$ mm. Il foro interno è passante e di $\varnothing 14$ mm, anch'esso fatto al tornio. Infine i soliti smussi degli spigoli.
- **Ghiera:** : per la fabbricazione si parte da una barra esagonale Ch 48 di almeno 30 mm. Montata sul tornio si effettuano tutte le lavorazioni della parte inferiore: tornitura $\varnothing 39 \times 16$ mm con raccordo di raggio 1 mm, filettatura M39, foratura per sede della boccola ($\varnothing 30 \times 11$ mm). Dall'altro lato si asporta materiale per arrivare alla lunghezza finale del pezzo di 26 mm, si rifinisce l'esagono e si effettua il foro passante di $\varnothing 24$ mm. Infine gli smussi.

6.1. Lavorazioni meccaniche.

- **Slitta:** la lavorazione viene effettuata completamente su fresatrice. Dal grezzo si effettuano progressive fresature su tutti i lati per arrivare alle dimensioni finali di 80 x 40 x 20 mm. I due fori sono passanti. Il foro liscio ha diametro di 12,5 mm per permettere il passaggio agevole della vite M12, il foro filettato viene ricavato eseguendo un foro di $\varnothing 10,25$ mm, sul quale effettuare poi la maschiatura M12. Seguono smussi degli spigoli e svasature dei fori.

Capitolo 7.

Conclusioni

Con questo elaborato si sono illustrate tutte le fasi e le specifiche del progetto di un nuovo sistema di afferraggio da accoppiare ad una macchina che si vuole acquistare in futuro. La macchina è adatta a prove combinate di materiali, perciò gli afferraggi devono essere in grado di resistere contemporaneamente e con sicurezza a determinati carichi di trazione e torsione. Tutto ciò è stato voluto dal Dipartimento di Ingegneria industriale e Scienze matematiche dell'Università Politecnica delle Marche al fine di avere un progetto e uno studio concreto sulla base del quale produrre internamente o commissionare a terzi gli afferraggi di cui sopra, non compresi nella macchina. Naturalmente l'Università si riserva di effettuare successive modifiche al progetto qualora ritenesse di poter migliorare quest'ultimo con opportuni accorgimenti.

L'obiettivo primario era naturalmente quello di realizzare afferraggi che bloccassero il provino a trazione e a torsione allo stesso tempo. Inoltre, dato che la macchina può effettuare anche prove indipendenti di trazione e torsione pure, anche gli afferraggi dovevano permettere queste funzioni separate e non limitare l'impiego della macchina. La funzionalità del progetto doveva tener conto inoltre di comodità, semplicità, costi, durata temporale dell'intero sistema. Con comodità si intende principalmente la facilità, velocità e allo stesso tempo precisione della fase di montaggio del provino che non può richiedere troppo tempo a fronte di una durata complessiva della prova relativamente breve. La semplicità delle forme dei componenti e dei meccanismi di funzionamento è stata perseguita poiché presenta vantaggi in fase di progettazione, sotto l'aspetto economico e perché influenza anche la comodità. I costi comprendevano quelli delle materie prime, quelli dei componenti commerciali come le viti, quelli delle lavorazioni da effettuare per ottenere le geometrie descritte nel progetto, ed infine quelli di manutenzione (sostituzione periodica di componenti) strettamente collegati alla durata temporale stimata di ogni singolo pezzo.

Essendo questa la nostra prima vera esperienza di progettazione meccanica, tutti gli aspetti di cui tener conto hanno rappresentato una sfida che siamo riusciti ad affrontare meglio lavorando in coppia. L'impostazione generale della tesi rispecchia fedelmente l'intero processo affrontato nella realizzazione di questo progetto.

La prima fase (riportata nei capitoli 1 e 2) è stata quindi di studio e documentazione, per raccogliere quante più informazioni possibili riguardo al mondo delle prove meccaniche. L'obiettivo era avere una panoramica più completa possibile su come vengono svolte le principali prove e più in particolare quella di trazione e di torsione. Inoltre buona parte del tempo è stata spesa anche sullo studio dei tipi di macchine per le varie prove che si trovano attualmente in commercio per capire come funzionano e di che dispositivi ausiliari necessitano (celle di carico, misuratori di deformazione, software), tutto al fine di raccogliere informazioni che avrebbero potuto rivelarsi utili in un secondo momento. Una volta avute tutte le specifiche sulla macchina per prove combinate che verrà acquistata (con 50 kN di

trazione massima e 200 Nm di coppia massima) e tutti gli accessori compresi nel preventivo, abbiamo potuto restringere il campo di ricerca e concentrarci su macchine con caratteristiche simili alla nostra che effettuassero le stesse prove. Particolare attenzione è stata poi dedicata ovviamente ai vari tipi di afferraggi che si possono trovare su ognuna di queste macchine. Questa fase di studio consisteva nel cercare di capire i motivi che avevano portato alle soluzioni costruttive degli esempi di afferraggi trovati in internet. Quindi, analizzando le varie geometrie, meccanismi di azionamento, materiali e altre caratteristiche adottate più di frequente da aziende con lunga esperienza nel settore, si è avuta una prima idea di quali potessero essere più adatte per i nostri carichi e per il materiale da testare nel nostro caso. Terminata questa fase preliminare ci siamo concentrati quindi sulla formulazione di varie ipotesi costruttive dell'afferraggio (capitolo 3). Il procedimento è stato quello di cercare di includere in una stessa struttura due meccanismi di bloccaggio del provino (uno per la trazione e uno per la torsione) sulla base di quanto trovato durante le ricerche, oppure formulando idee completamente nuove. La difficoltà di questa fase risiedeva anche nel fatto che in rete si trovano pochissimi esempi di afferraggi per prove combinate in grado di sopportare i carichi della nostra macchina. Per ragioni di inesperienza, che ci hanno portato a non considerare alcuni aspetti che invece erano molto importanti, gran parte di queste idee sono state scartate. Con l'aiuto del Professor Rossi abbiamo capito il motivo dell'inefficacia di queste soluzioni e siamo giunti alla definizione di massima dell'aspetto definitivo degli afferraggi. L'idea alla base del funzionamento generale è in parte ispirata anche a un sistema di afferraggio analogo, progettato dall'Università La Sapienza di Roma con la quale abbiamo avuto modo di entrare in contatto per consigli e delucidazioni. Chiarito quindi il funzionamento di base dell'afferraggio, il passaggio successivo era quello di definire con precisione tutte le dimensioni di ogni singolo componente (capitolo 4). Questa fase è strettamente collegata a quella delle verifiche strutturali (capitolo 5) tanto che le potremmo accorpate in una unica. Il *modus operandi* è stato infatti quello di ipotizzare le dimensioni dell'afferraggio costruendone un modello CAD su Solid Edge e importarlo subito su Ansys per verificare che le tensioni che si sviluppavano fossero al di sotto del limite di snervamento. Il processo è stato quindi iterativo, assorbendo buona parte del tempo totale dedicato al progetto, considerando anche il fatto che Ansys era per noi un programma completamente nuovo ed era la prima volta che ci cimentavamo in una analisi FEM. Le tensioni sono state valutate singolarmente su ogni singolo componente, effettuando prove con sollecitazioni singole di trazione e torsione, e con sollecitazioni miste. Si è cercato di mantenere più bassi possibile i valori di tensione, con coefficienti di sicurezza che arrivano anche a 1,5 per alcuni componenti, in modo da poter realizzare l'afferraggio quasi interamente con un acciaio comune. Così facendo si riducono i costi ma le dimensioni complessive, e quindi il peso, possono essere maggiori di un equivalente realizzato con materiale con resistenza allo snervamento più alta. Tuttavia si è deciso di procedere in questo modo considerando che l'ingombro dell'afferraggio è comunque piccolo rispetto allo spazio disponibile e che probabilmente non verrà quasi mai smontato dalla macchina. Tutto il sistema possiede resistenza a fatica molto alta: gli unici componenti che potrebbero richiedere sostituzione sono anche i più piccoli e semplici (boccola e slitte) e quindi anche più economici. Una volta decise le dimensioni definitive si è effettuato un ultimo dimensionamento per decidere numero, diametro e classe di resistenza delle viti necessarie per l'assemblaggio.

Gli strumenti tecnici che sono stati utilizzati sono, come già visto, Solid Edge e Ansys. Il primo è un programma di modellazione CAD con il quale avevamo già preso confidenza durante un apposito corso dell'Università. Il secondo permette di effettuare analisi FEM di diversi

tipi anche se noi l'abbiamo usato solo per verifiche strutturali statiche. Indispensabile è stato poi il supporto del Professor Rossi che ci ha seguito durante l'intero progetto consigliandoci e correggendoci, oltre all'aiuto offertoci dall'Università La Sapienza di Roma nelle fasi iniziali. Come risultato finale questo sistema di afferraggio innovativo:

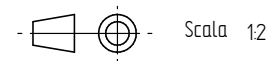
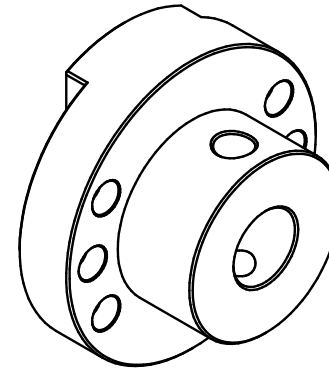
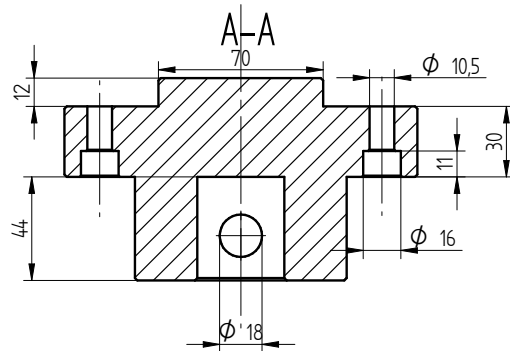
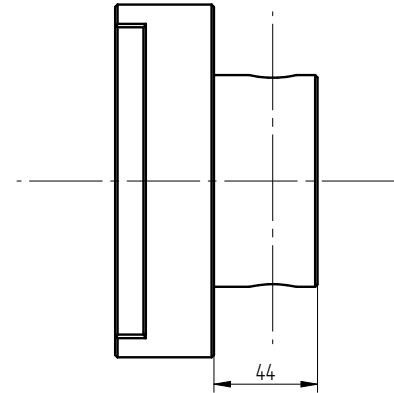
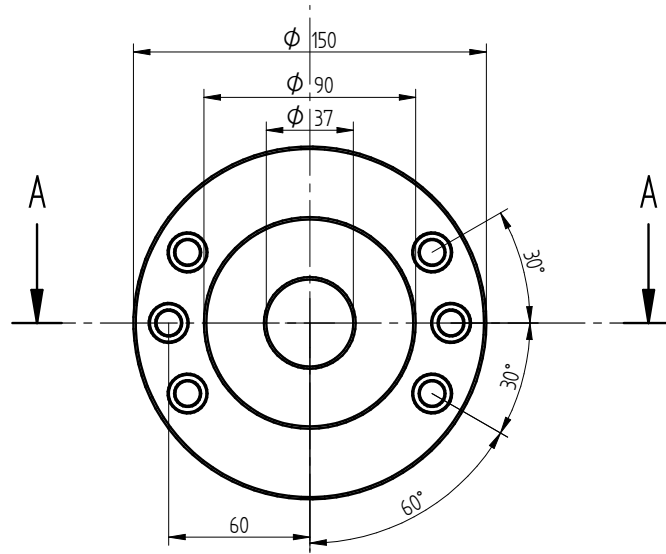
- Permette di effettuare prove combinate di trazione-torsione bloccando il provino senza alcun gioco.
- Permette prove indipendenti di trazione o torsione senza modifiche ulteriori ma anzi con semplificazione del provino e meno componenti da montare.
- Resiste ampiamente ai carichi massimi di 50 kN e 200 Nm con coefficienti di sicurezza alti.
- Assicura un alto numero di cicli effettuabili, con simulazioni che evidenziano vita a fatica infinita per alcuni dei componenti.
- Presenta deformazioni molto contenute, quindi è sufficientemente rigido da assorbire soltanto in piccola parte il carico della macchina.
- Necessita di poche semplici lavorazioni alle macchine utensili per essere costruito.
- Pesa in totale circa 25 kg.
- Viene montato sulla macchina con un semplice passaggio: l'inserimento di un perno.
- Consente un montaggio del provino veloce, con pochi passaggi semplici e intuitivi.
- Consente all'Università di risparmiare denaro se confrontato al costo degli afferraggi generalmente venduti insieme alla macchina.

Nel complesso questa esperienza di progettazione in prima persona è stata molto utile perché ci ha permesso di comprendere concretamente quali sono le difficoltà che si incontrano durante un intero processo di progettazione, dalla prima idea passando per la necessaria fase di studio fino alla definizione degli ultimi dettagli. Ci ha sottolineato come, nell'ambito dell'Ingegneria, ci sia un costante processo di miglioramento e quanto sia importante, per la buona riuscita di un progetto, riuscire ad avvalersi di consigli di persone di esperienza e soprattutto riuscire a tener conto contemporaneamente di tanti fattori diversi.

Appendice A.

Appendice


Si riportano di seguito i disegni dei componenti che vanno a costituire il sistema di afferraggio presentato nell'elaborato. Non sono presenti le tavole delle viti in quanto componenti commerciali. Viene invece riportato il disegno quotato del provino pensato per prove combinate di trazione e torsione. Come già illustrato, si parla di uno dei diversi tipi di provini compatibili con l'afferraggio: altre versioni possono avere diametri e lunghezze della zona di test differenti; possono essere pieni anzichè cavi; possono presentare modifiche e semplificazioni della geometria nel caso in cui vengano realizzati per test costituiti da sollecitazioni singole.

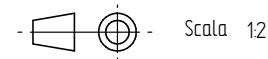
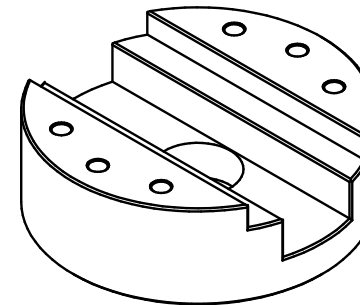
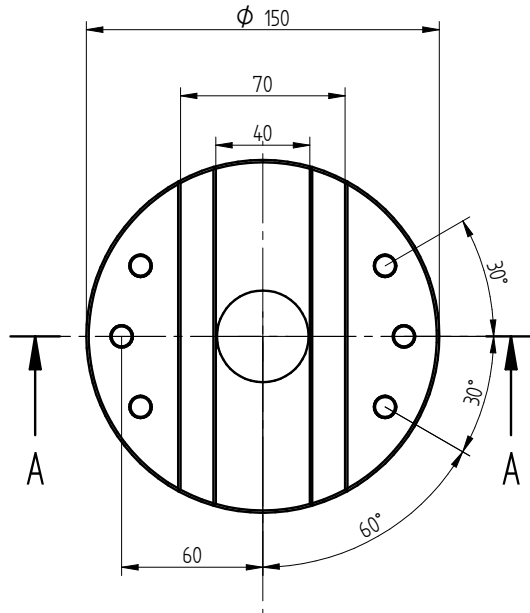
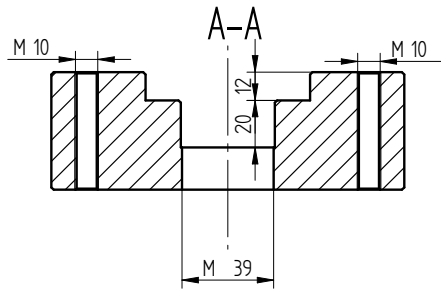


ISO 2768-mK
ISO 8015

A3

SOLID EDGE ACADEMIC CO


	Proprietario legale	Autore Lorenzo Gasparoli	File disegno File parte	Componente 01 Piastra Superiore	
		Verificatore Prof. Mandorli	Disegno: Codice 1	Ultimo salvataggio 24/09/2019	n. Rev. 1
		Tipo di documento	Parte: Codice	Ultimo salvataggio 18/07/2019	n. Rev.

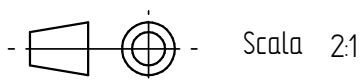
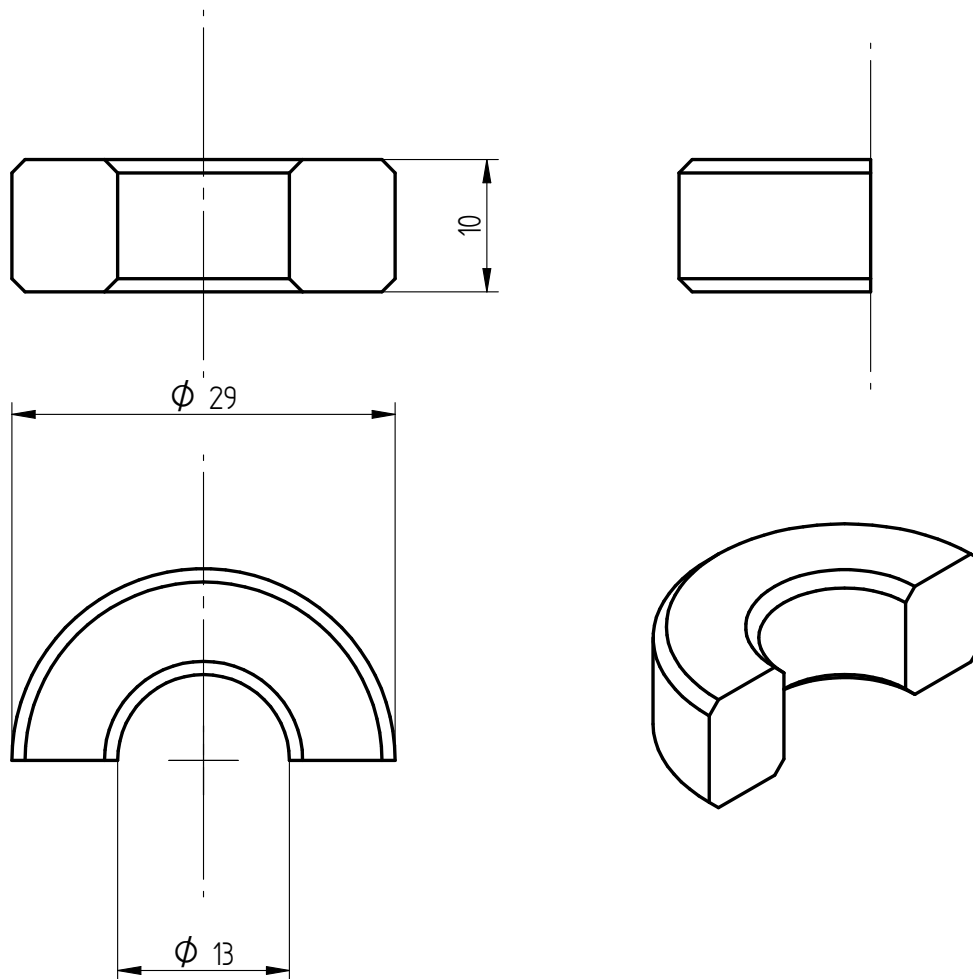


ISO 2768-mK
ISO 8015

A3


SOLID EDGE ACADEMIC CO

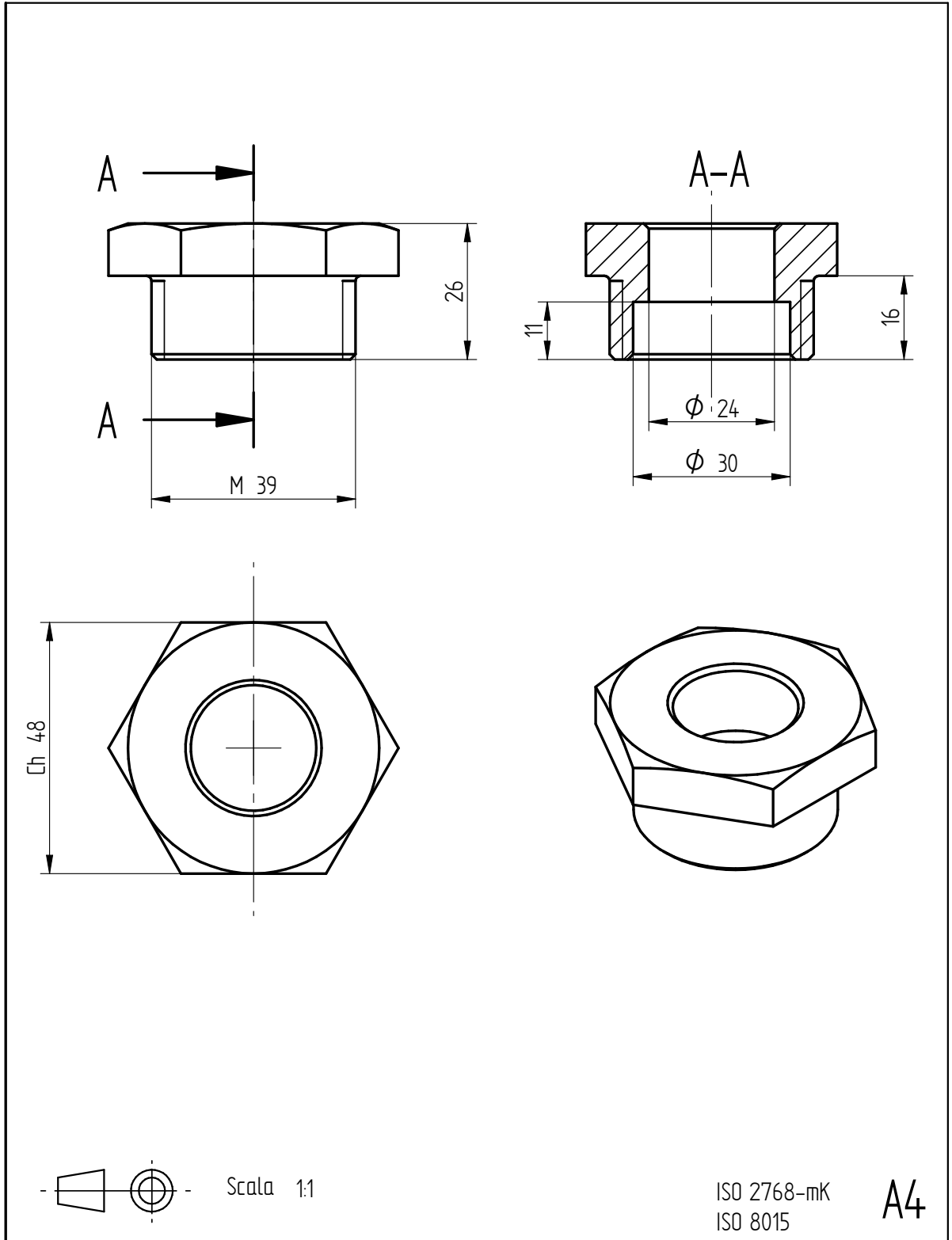
	Proprietario Legale	Autore Lorenzo Gasparoli	File disegno File parte	Componente 02 Piastra inferiore	
		Verificatore Prof. Mandorli	Disegno: Codice 1	Ultimo salvataggio 24/09/2019	n. Rev. 1
		Tipo di documento	Parte: Codice	Ultimo salvataggio 18/07/2019	n. Rev.




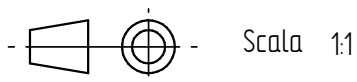
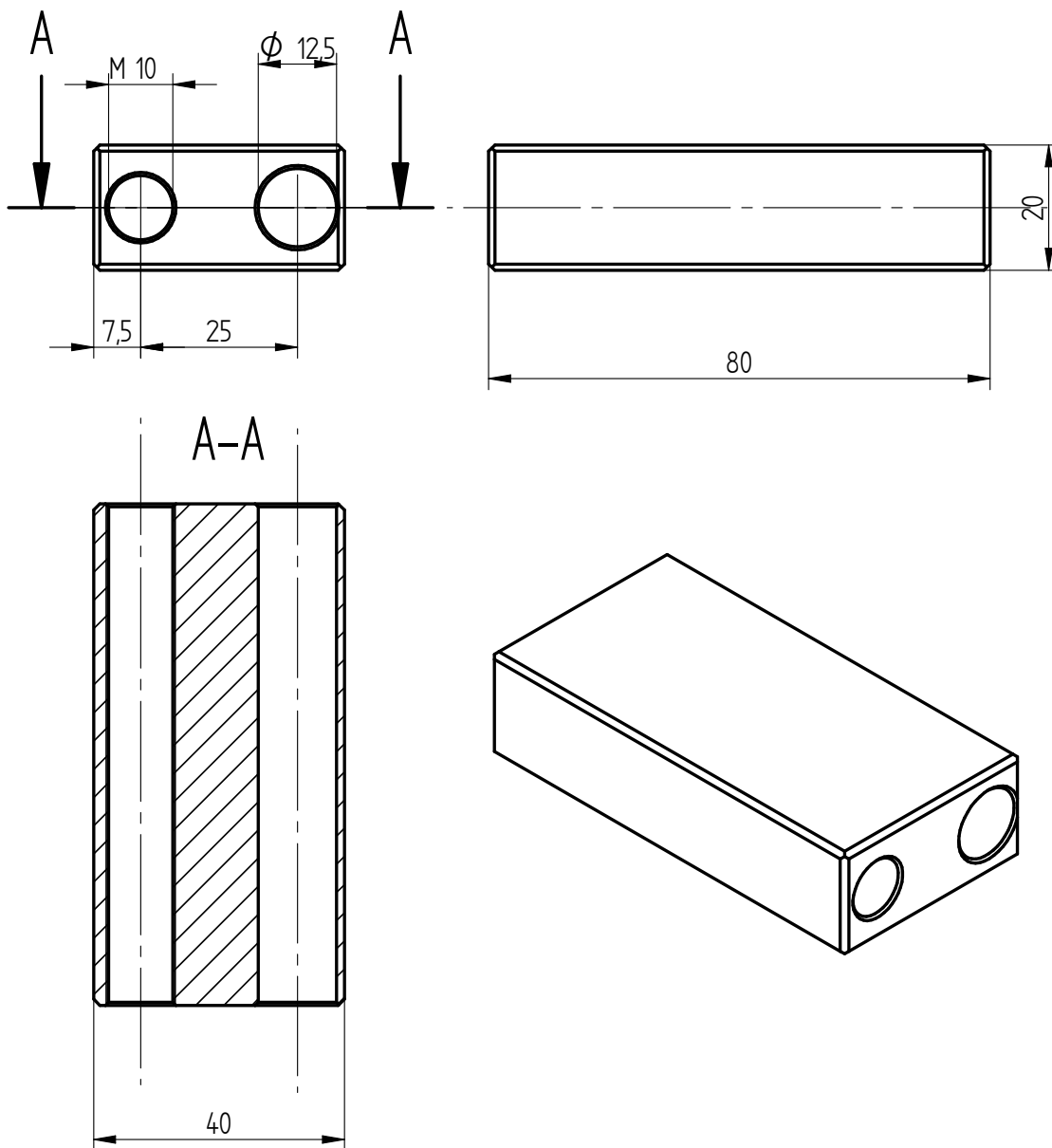
ISO 2768-mK
ISO 8015

A4

	Proprietario legale	Autore Lorenzo Gasparoli	File disegno File parte	Componente 03 Boccola	
		Verificatore Prof. Mandorli	Disegno: Codice 1	Ultimo salvataggio 24/09/2019	n. Rev. 1
		Tipo di documento	Parte: Codice	Ultimo salvataggio 18/07/2019	n. Rev.




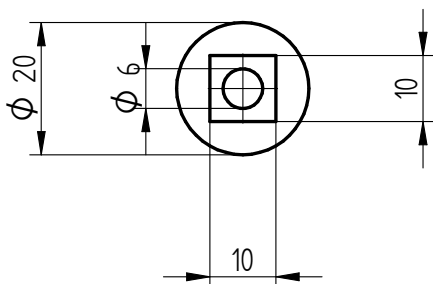
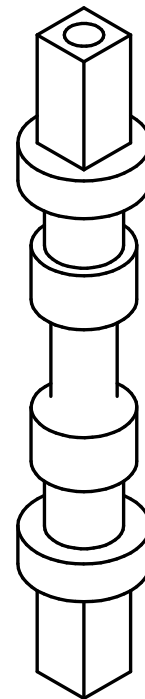
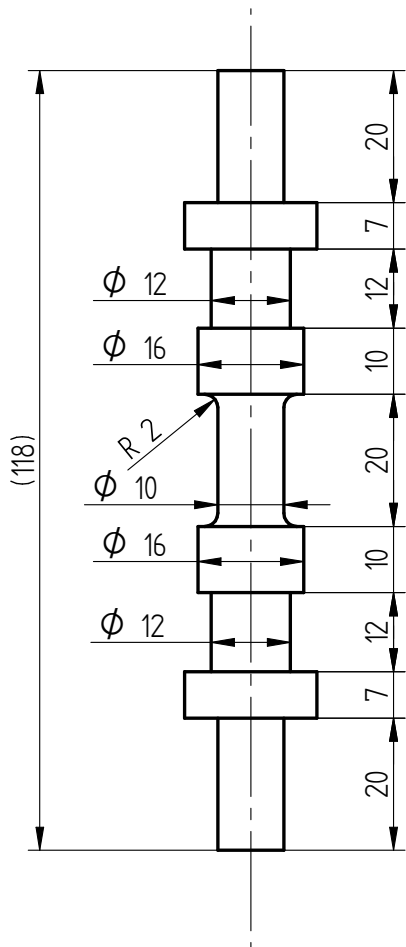
	Proprietario legale	Autore Sebastiano Donini	File disegno File parte	Componente 04 Ghiera	
		Verificatore Prof. Mandorli	Disegno: Codice	1 1	Ultimo salvataggio 24/09/2019
		Tipo di documento	Parte: Codice		Ultimo salvataggio 18/07/2019
					n. Rev. 1
					n. Rev.

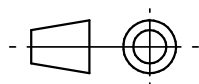


ISO 2768-mK
ISO 8015

A4


	Proprietario legale	Autore Sebastiano Donini	File disegno File parte	Componente 05 Slitta	
		Verificatore Prof. Mandorli	Disegno: Codice 1	Ultimo salvataggio 24/09/2019	n. Rev. 1
		Tipo di documento	Parte: Codice	Ultimo salvataggio 18/07/2019	n. Rev.




 Scala 1:1

ISO 2768-mK
ISO 8015

A4

	Proprietario legale	Autore Sebastiano Donini	File disegno File parte	Componente 08 Provino	
		Verificatore Prof. Mandorli	Disegno: Codice 1	Ultimo salvataggio 25/09/2019	n. Rev. 1
		Tipo di documento	Parte: Codice	Ultimo salvataggio 18/07/2019	n. Rev.

Bibliografia

- [1] Claudia De Rosso. Prove meccaniche sui materiali. 2011.
- [2] L. Bertini, C. Carmignani, and A. Lanciotti. Prove meccaniche su materiali e strutture. *Ingegneria Ferroviaria*, 2003.
- [3] EW Hart. Theory of the tensile test. *Acta metallurgica*, 15, 1967.
- [4] G Petrucci. Lezioni di costruzione di macchine. 2007.
- [5] M Cavallini. Dalla frattura alla scienza dei metalli. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2, 2008.
- [6] GR Canova, UF Kocks, and JJ Jonas. Theory of torsion texture development. *Acta Metallurgica*, 32, 1984.
- [7] GB Broggiato and L Cortese. Sviluppo di un sistema di prova biassiale per la caratterizzazione del legame elasto-plastico e del danneggiamento duttile. In *Proceedings of XXXVII AIAS, 37th conference of italian association for stress analysis, Sapienza Università di Roma, Rome*, 2008.
- [8] Sune Bergs. Tensile testing machine, 2000. US Patent 6,148,676.
- [9] José Divo Bressan and Ricardo Kirchhof Unfer. Construction and validation tests of a torsion test machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 2006.
- [10] Francesco Perugini. *Studio di un'attrezzatura per prove di ultrafatica*. PhD thesis.
- [11] Andrea Bacchetto. Introduzione al metodo degli elementi finiti e alla modellazione fem.