

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche



Progettazione di un dispositivo per prove di Bulge Test su polimeri a memoria di forma

Design of a tool for Bulge Test experiments on shape memory polymers

Relatore: Chiar.mo

Prof. Rossi Marco

Tesi di laurea di:

di Nunzio Livio

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

<i>ELENCO DELLE FIGURE</i>	7
----------------------------------	---

<i>PREMESSA</i>	9
-----------------------	---

CAPITOLO 1: BULGE TEST

<i>1.1: Introduzione</i>	12
<i>1.2: Cenni storici</i>	13
<i>1.3: Importanti progressi</i>	13
<i>1.4: Approccio analitico</i>	14
<i>1.5: Approccio sperimentale</i>	18

CAPITOLO 2: IL BANCO ALLESTITO PER IL BULGE TEST

<i>2.1: Introduzione</i>	21
<i>2.2: Sistema di bloccaggio del provino con schermatura</i>	22
<i>2.3: Circuito idraulico di pompaggio del fluido</i>	24
<i>2.4: Sistema di misura di pressione</i>	27
<i>2.5: Robot antropomorfo con telecamere</i>	28

*CAPITOLO 3: CREAZIONE DEL SISTEMA DI BLOCCAGGIO
TRAMITE IL SOFTWARE SOLID EDGE E CARICHI*

<i>3.1: Introduzione.....</i>	<i>31</i>
<i>3.2: Creazione della flangia inferiore.....</i>	<i>32</i>
<i>3.3: Creazione della flangia superiore.....</i>	<i>34</i>
<i>3.4: Creazione delle rondelle, dadi e bulloni.....</i>	<i>36</i>
<i>3.5: Rigidezza dell'elemento di collegamento.....</i>	<i>41</i>
<i>3.6: Rigidezza delle parti da collegare.....</i>	<i>42</i>
<i>3.7: Carichi agenti sui bulloni e coppia di serraggio.....</i>	<i>44</i>
<i>CONCLUSIONE.....</i>	<i>47</i>
<i>BIBLIOGRAFIA.....</i>	<i>49</i>
<i>RINGRAZIAMENTI.....</i>	<i>50</i>

*Alla mia famiglia, alla mia
ragazza e ai miei nonni*

Elenco delle figure

Figura 1.1 – Sistema di afferraggio visto in sezione

Figura 1.2 – Rappresentazione del provino sottoposto al rigonfiamento idraulico

Figura 1.3 – Sistema di bloccaggio del provino

Figura 2.1 – Circuito idraulico di pompaggio del fluido

Figura 2.2 – Flangia e provino

Figura 2.3 – Flangia bullonata

Figura 2.4 – Schermatura

Figura 2.5 – Schematizzazione del circuito idraulico

Figura 2.6 – Resistenza elettrica

Figura 2.7 – Trasduttore di pressione

Figura 2.8 - Curvatura del provino successivamente all'applicazione di pressione

Figura 2.9 – Robot Comau Smart S4

Figura 2.10 – Robot Comau Smart S4 con telecamere sul polso

Figura 3.1 – Logo Solid Edge

Figura 3.2 – Flangia inferiore vista superiore

Figura 3.3 – Flangia inferiore vista inferiore

Figura 3.4 – Flangia inferiore vista laterale

Figura 3.5 – Provino bloccato tra le flange

Figura 3.6 - Flangia superiore vista inferiore

Figura 3.7 - Flangia superiore vista superiore

Figura 3.8 - Flangia superiore vista laterale

Figura 3.9 - Bullone M14 vista superiore

Figura 3.10 - Bullone M14 vista inferiore

Figura 3.11 - Bullone M14 vista laterale

Figura 3.12 - Dado M14 vista superiore/inferiore

Figura 3.13 - Dado M14 vista laterale

Figura 3.14 - Rondella vista superiore

Figura 3.15 - Rondella vista laterale

Figura 3.16 – Flangia assemblata vista superiore

Figura 3.17 – Flangia assemblata

Figura 3.18 – Collegamento mediante bullone

Figura 3.19 – Calcolo della rigidezza dei bulloni

Figura 3.20 – Compressione flangia

Figura 3.21 – Tronco di cono equivalente forato

Figura 3.22 – Carichi sul bullone

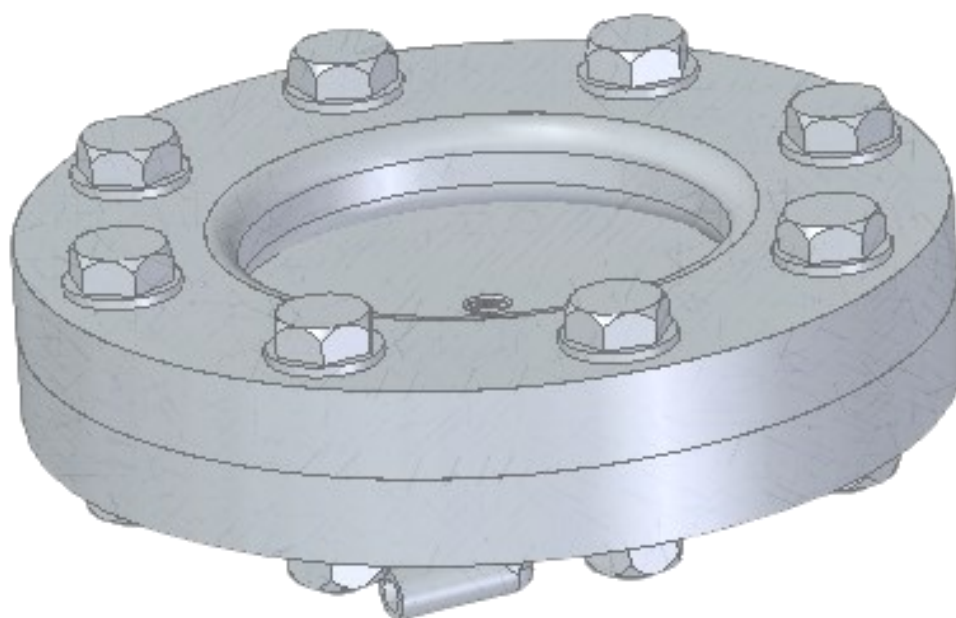
Figura 3.23 - Profilo base per i filetti metrici M e MJ

Figura 3.24 – Vite

Figura 3.25 – Madrevite

Figura 3.26 – Terminologia relativa ai filetti dei bulloni

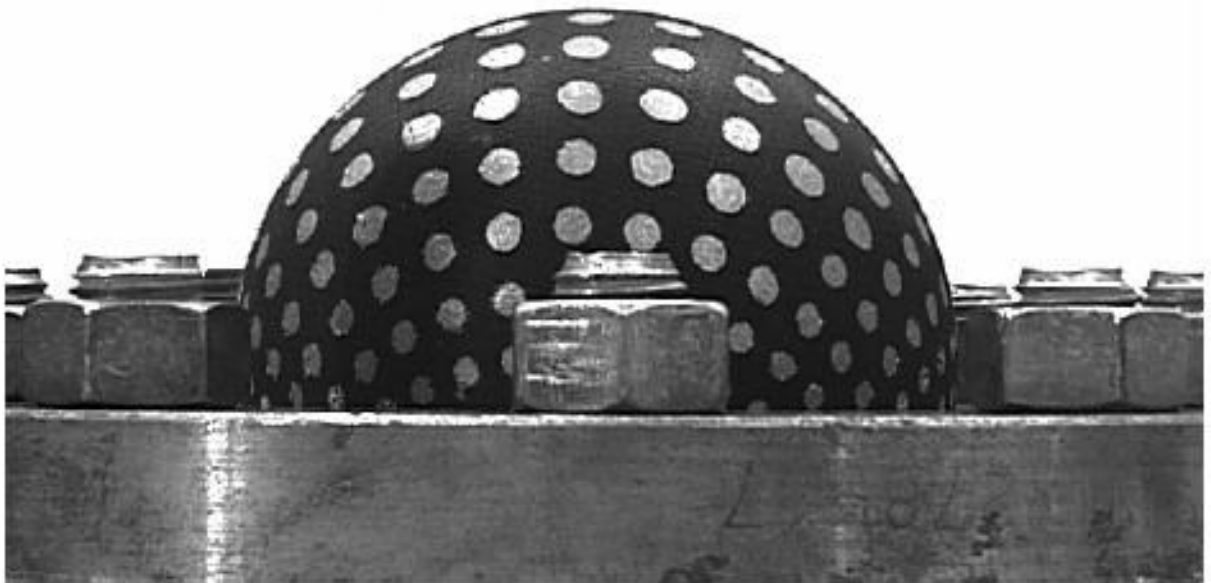
PREMESSA



Lo scopo di questa tesi ha riguardato l'analisi e la progettazione del sistema denominato *Bulge Test* utile per caratterizzare i polimeri a memoria di forma. Tale sistema permette lo studio dettagliato del comportamento dei materiali in condizioni non monoassiali, in grado di realizzare un tipo di prova biassiale. L'analisi e lo sviluppo è stato fondamentale in quanto in tempi relativamente recenti ha avuto un notevole progresso in ambito ingegneristico ed è notevolmente impiegato. In particolare, l'analisi e la progettazione hanno riguardato: l'approccio ideale al problema, l'ideazione e specifiche dettagliate del sistema, realizzazione del modello e verifica dei carichi. Il lavoro è consistito nell'allestimento di un banco prova dove il campione, generalmente con forma di un disco con spessore minimo, viene fissato e deformato dal fluido in pressione iniettato da un circuito idraulico di pompaggio; mediante un robot sul quale sono installate le telecamere, si acquisiscono immagini che permettono di conoscere i livelli di deformazione del provino e attraverso un trasduttore si rileva la pressione di gonfiaggio; è stato poi sviluppato tramite Solid Edge della Siemens il sistema di bloccaggio del provino indispensabile per effettuare la prova e calcoli per verificare la corretta tenuta. L'intero sistema è stato progettato al fine di regolare la portata da inviare al provino in tal modo da ottenere un controllo sulla velocità di deformazione e poter analizzare il comportamento dei materiali. A livello hardware avremo quindi un circuito idraulico attraverso il quale è possibile regolare la portata, mentre a livello software è stato sviluppato il sistema di afferraggio del provino.

Nel primo capitolo troviamo una spiegazione dettagliata dei metodi attraverso i quali è possibile verificare la deformazione subita dal provino. Nel secondo è descritto l'intero banco allestito per la prova del *Bulge Test*. Il terzo capitolo invece, illustra la progettazione del sistema di bloccaggio e la teoria dei relativi carichi.

BULGE TEST



1.1: Introduzione

Il *Bulge Test* consiste in una o più prove di rigonfiamento necessario per la determinazione della curva biassiale tensione-deformazione. Nel tempo, per approfondimenti sulla metodologia, sono stati eseguiti esperimenti di rigonfiamento sia graduali che continui. La pressione, l'altezza polare e il raggio di curvatura sono stati misurati in diverse fasi del processo di deformazione o in registrazione continua durante la prova.

Quasi tutte queste metodologie si basano su formule analitiche per definire lo spessore polare e il raggio di curvatura del provino in relazione a uno o più parametri di processo.

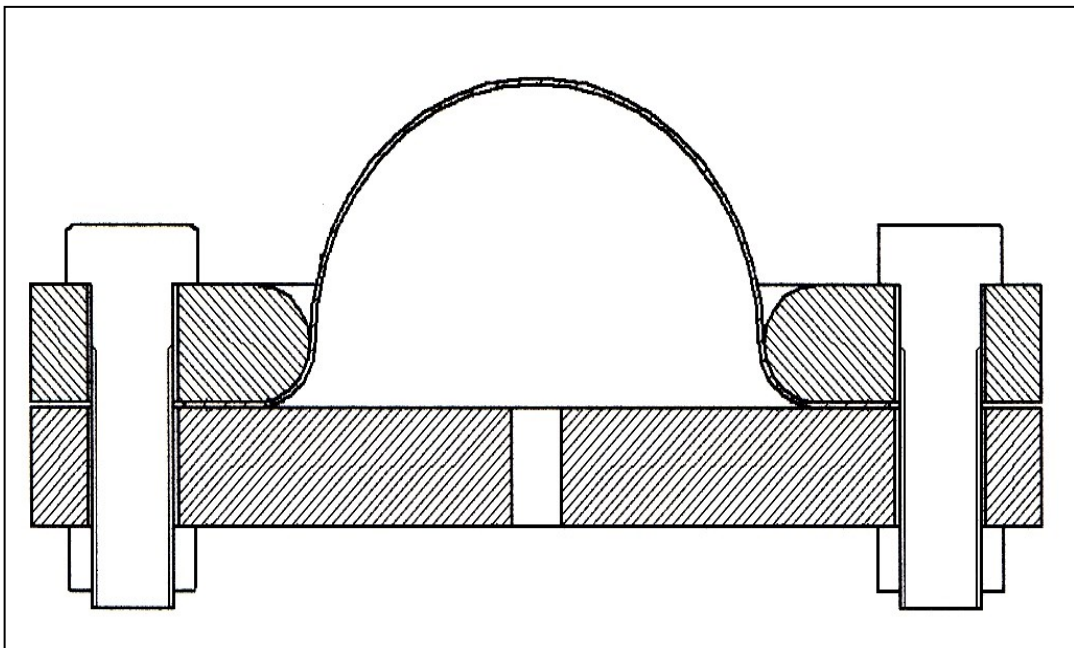


Fig. 1.1 – Sistema di afferraggio visto in sezione

1.2: Cenni storici

Nel corso degli anni, diversi ricercatori hanno sviluppato alcune teorie sul rigonfiamento idraulico tra le quali:

- **Hill** ha sviluppato un modello analitico del processo di rigonfiamento idraulico: lui ammetteva la forma sferica della cupola e trascurava l'influenza dei raggi del raccordo situati all'ingresso della matrice sulla geometria del provino;
- **Panknin** ha eseguito diversi studi sperimentali sul rigonfiamento idraulico. Il suo interesse principale consisteva nella determinazione accurata dei parametri di processo: propose una formula per il calcolo del raggio di curvatura e confrontando i risultati analitici con i dati sperimentali stabilì che il raggio di curvatura calcolato si discosta fino ad un valore massimo del 10% dal valore sperimentale in caso di grandi altezze polari;
- **Chakrabarty** ha migliorato l'accuratezza delle formule precedentemente proposte da *Hill* tenendo conto degli effetti di indurimento;
- **Gologranc** ha eseguito studi sia sperimentali che teorici su rigonfiamento idraulico e notò che i valori dello spessore polare predetto dalla formula di *Hill* erano notevolmente diversi dai suoi risultati sperimentali.

1.3: Importanti progressi

Successivamente, con lo sviluppo dei computer e dei sistemi di acquisizione dati, si sono resi possibili importanti progressi.

Nel caso particolare del rigonfiamento idraulico, i progressi sono stati principalmente legati ai sistemi ottici di misurazione della deformazione. Questi sistemi sono costituiti da CCD telecamere controllate da un software videogrammetrico.

L'obiettivo principale consiste nello sviluppo di una nuova metodologia per la determinazione accurata ed efficiente della curva biassiale di tensione-deformazione mediante il rigonfiamento idraulico. La metodologia si basa su una variante della formula di *Kruglov* in cui si tiene conto della distribuzione non uniforme della tensione sulla superficie del campione mediante l'utilizzo di un fattore di correzione.

1.4: Approccio analitico

La figura di seguita allegata mostra il principio della prova di rigonfiamento idraulico. Il campione circolare è saldamente bloccato sotto l'inserto dello stampo nella parte superiore del sistema di bloccaggio. Durante il processo di rigonfiamento, il provino è deformato dalla pressione in continuo aumento applicata sulla sua superficie inferiore.

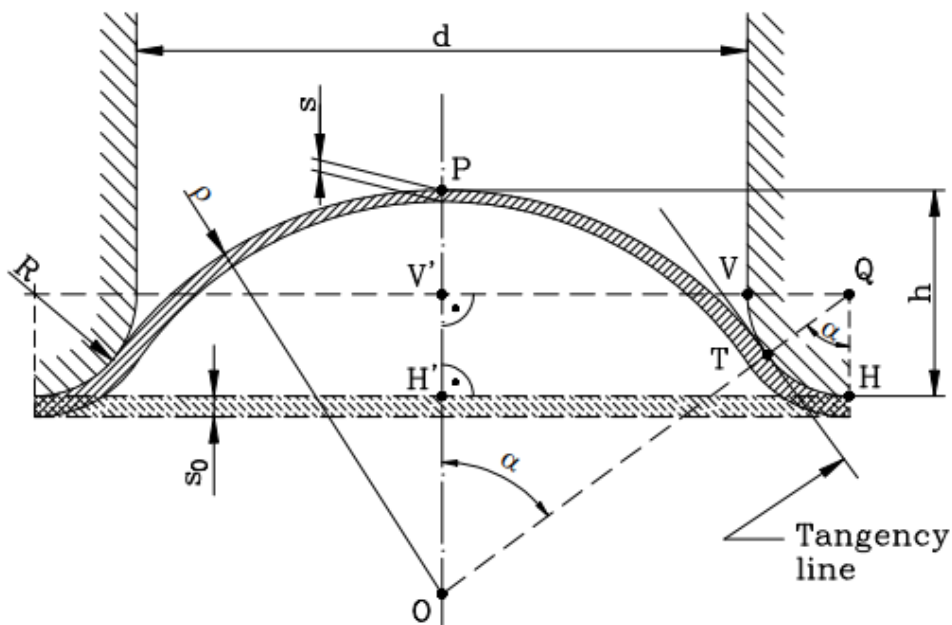


Fig. 1.2 – Rappresentazione del provino sottoposto al rigonfiamento idraulico

d – diametro;

R - raggio di raccordo;

s_0 - spessore iniziale (nominale) del provino;

s - spessore corrente del provino nella regione polare (punto P);

ρ - raggio attuale della superficie della cupola;

h - altezza che definisce la posizione attuale del polo P;

α - angolo compreso tra QH e TQ (α è espresso in radianti).

Sia il diametro d che il raggio di raccordo R sono costanti poiché rappresentano le caratteristiche dimensionali del dispositivo sperimentale. Anche lo spessore iniziale del provino s_0 è costante per un dato sperimentare.

Tutte le altre quantità sopra menzionate (s , ρ , h e α) sono variabili che dipendono dal livello attuale della pressione (p) agente sulla superficie inferiore del provino. Lo stato di carico nella regione polare può essere assimilato alla trazione biassiale. Il valore corrente della tensione superficiale biassiale (σ_b) è definito dalla formula di Laplace:

$$\sigma_b = \frac{p\rho}{2s}, \quad (1)$$

mentre la deformazione dello spessore corrispondente (la cosiddetta deformazione biassiale ε_b) può essere valutata utilizzando la seguente relazione:

$$\varepsilon_b = \ln \frac{s_0}{s}. \quad (2)$$

Le equazioni precedentemente esposte possono essere utilizzate per ottenere un diagramma biassiale tensione-deformazione solo se le quantità p , ρ ed s sono misurati o derivati da altri dati sperimentali. L'attuale livello di pressione (p) può essere facilmente misurato attraverso l'utilizzo di un sensore di pressione collegato alla camera idraulica del dispositivo. Le altre variabili di processo, ovvero il raggio di curvatura ρ e lo spessore polare s , sono inferiormente accessibili alla determinazione diretta. È più conveniente ottenere i loro valori in modo indiretto utilizzando le formule approssimative che coinvolgono il valore corrente dell'altezza polare h . Il raggio di curvatura ρ può essere ottenuto con la formula di *Panknin*:

$$\rho = \frac{1}{2h} \left(\frac{d}{2} + R \right)^2 + \frac{h}{2} - R. \quad (3)$$

Gli studi sperimentali eseguiti negli anni hanno dimostrato che tra le numerose relazioni che possono essere utilizzate per calcolare il valore corrente dello spessore polare s , la formula di *Kruglov* fornisce i risultati migliori: questa relazione si basa sull'ipotesi della conservazione del volume. In corrispondenza della regione polare, tale vincolo può essere scritto come segue:

$$\varepsilon_b = 2 \varepsilon_m, \quad (4)$$

dove ε_m è la deformazione media. Secondo l'approccio di *Kruglov*, si suppone che ε_m possa essere calcolato utilizzando l'approssimazione:

$$\varepsilon_m = \ln \frac{\widehat{TP} + \widehat{TH}}{HH'} \quad (5)$$

L'equazione appena descritta sarebbe rigorosamente valida se la deformazione media fosse distribuita uniformemente sulla superficie della cupola. Generalmente, questo non accade, poiché lo spessore locale del campione diminuisce gradualmente dal profilo di serraggio verso il polo (punto P).

Scrivendo $\widehat{TP} = \rho \alpha$, $\widehat{TH} = R \alpha$, $HH' = \frac{d}{2} + R$,

otteniamo che $\sin \alpha = \frac{VQ}{OQ} = \frac{\frac{d}{2} + R}{\frac{1}{2h} \left(\frac{d}{2} + R \right)^2 + \frac{h}{2}}$,

e quindi $\alpha = \arcsin \frac{\frac{d}{2} + R}{\frac{1}{2h} \left(\frac{d}{2} + R \right)^2 + \frac{h}{2}}$.

In definitiva, possiamo scrivere $\varepsilon_b = 2 \ln \frac{\alpha}{\sin \alpha}$. (6)

L'equazione appena scritta è la formula proposta da *Kruglov* che combinata con l'equazione (2), consente la valutazione dello spessore polare:

$$s = s_0 \exp(-\varepsilon_b) = s_0 \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} \right)^{-2} \quad (7)$$

e dagli studi effettuati si è dimostrato che queste relazioni sono in buon accordo con i dati sperimentali. Tuttavia, la precisione della formula di *Kruglov* è ancora migliorabile se l'equazione (5) viene modificata come segue:

$$\varepsilon_m = (1 + c \alpha) \ln \frac{\widehat{TP} + \widehat{TH}}{HH'}$$

dove il coefficiente c è una costante strettamente positiva che tiene conto della non uniformità della distribuzione delle sollecitazioni medie sulla superficie della cupola.

Dopo aver sostituito ε_m , si ottiene la seguente espressione della deformazione polare:

$$\varepsilon_b = 2(1 + c \alpha) \ln \frac{\alpha}{\sin \alpha} \quad (8)$$

La differenza tra l'equazione (8) e la formula di *Kruglov* (vedi equazione (6)) consiste solo nella presenza di un fattore di correzione che coinvolge il parametro costante c . Combinata con l'equazione (2), la relazione consente la valutazione dello spessore polare corrente:

$$s = s_0 \exp(-\varepsilon_b) = s_0 \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} \right)^{-2(1+c\alpha)} \quad (9)$$

Il coefficiente c può essere facilmente stabilito misurando il valore finale dello spessore polare s_{\min} dopo aver rimosso il campione dal dispositivo di rigonfiamento idraulico. La determinazione dello spessore può essere eseguita utilizzando un misuratore che entra in contatto con le superfici superiore ed inferiore del campione. Siano rispettivamente h_{\max} e α_{\max} l'altezza polare e l'angolo entrambe le quantità corrispondenti alla fase finale del processo di rigonfiamento:

$$s_{\min} = s_0 \left(\frac{\alpha_{\max}}{\sin \alpha_{\max}} \right)^{-2(1+c\alpha_{\max})} \quad (10)$$

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{\frac{d}{2} + R}{\frac{1}{2h_{\max}} \left(\frac{d}{2} + R \right)^2 + \frac{h_{\max}}{2}} \quad (11)$$

Allora l'equazione (10) porta alla seguente formula per la valutazione del coefficiente c :

$$c = \frac{\ln \sqrt{\frac{s_0}{s_{\min}}} - \ln \frac{\alpha_{\max}}{\sin \alpha_{\max}}}{\alpha_{\max} \ln \frac{\alpha_{\max}}{\sin \alpha_{\max}}}$$

1.5: Approccio sperimentale

Le prove di rigonfiamento idraulico sono state eseguite utilizzando il dispositivo sperimentale. I componenti principali del sistema sono il sistema di afferraggio, il circuito idraulico e il sistema di misura ottica ARAMIS.

La prima prova di test consiste in esperimenti di rigonfiamento graduale. In questo caso, il processo di deformazione è stato interrotto a diversi valori dell'altezza polare ed è stato anche registrato il livello corrispondente della pressione di rigonfiamento. Dopo aver rimosso il campione dal dispositivo di rigonfiamento, la superficie deformata è stata ispezionata con una macchina di misurazione a coordinate 3D, con l'obiettivo di determinarne lo spessore minimo, l'altezza polare e il raggio di curvatura.

Questi risultati sperimentali sono stati utilizzati per il calcolo dei punti discreti appartenenti al diagramma della curva biassiale tensione-deformazione.

Il secondo tipo di test consiste in esperimenti continui di rigonfiamento utilizzando un'ottica 3D sistema di misura ARAMIS. In questo caso, l'evoluzione della pressione e dell'altezza polare è stata registrata rispettivamente da un sensore di pressione e da due telecamere CCD. Anche in quest'ultimo caso, i dati sperimentali sono stati utilizzati per la determinazione della curva biassiale tensione-deformazione.

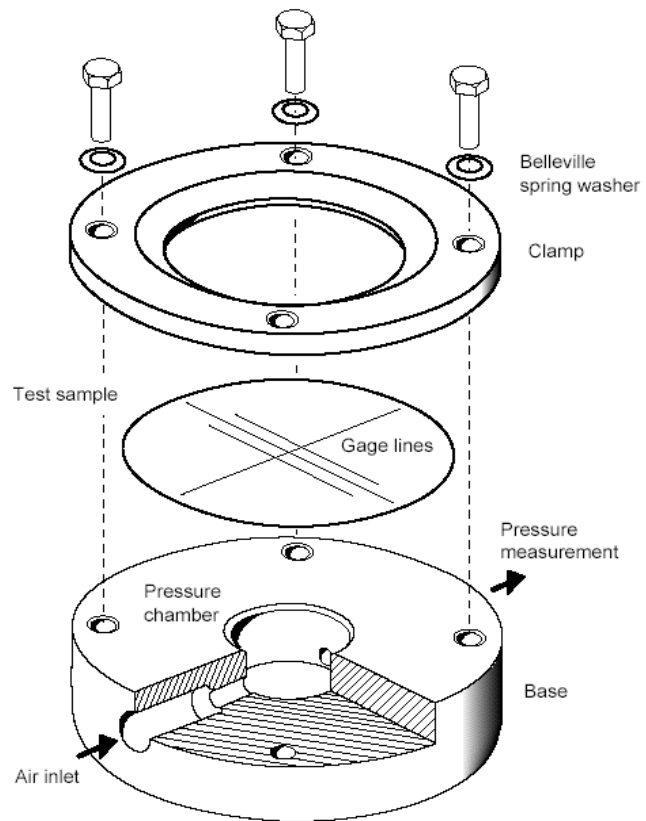


Fig. 1.3 – Sistema di bloccaggio del provino

IL BANCO ALLESTITO PER IL BULGE TEST



2.1: Introduzione

Il *banco di prova* comprende tutta la componentistica fisica necessaria per effettuare le prove di Bulge Test.

Il *banco di prova* è stato assemblato utilizzando gli elementi precedentemente impiegati per effettuare una medesima prova; il gran numero di componenti, indicati anche in figura 2.1, sono riutilizzati mentre altri sono stati sostituiti per effettuare i dovuti miglioramenti.

Il *banco di prova* è costituito da:

- Sistema di bloccaggio del provino con schermatura;
- Circuito idraulico di pompaggio del fluido;
- Sistema di misura della pressione;
- Sistema antropomorfo con telecamere;



Fig. 2.1: Circuito idraulico di pompaggio del fluido

2.2: Sistema di bloccaggio del provino con schermatura

Il sistema di bloccaggio del provino ha un duplice scopo: tener fermo ed evitare che il provino si muova durante l'applicazione della pressione e che garantisca la tenuta del campione evitando fermamente la fuoriuscita del fluido; la schermatura invece, serve ad evitare che, nel caso di prova a rottura e/o fuoriuscita del fluido, esso o eventuali parti di provino si distribuiscano in maniera incontrollata nel laboratorio compromettendo le strutture circostanti e la salute degli operatori.

Il sistema di afferraggio del provino avviene attraverso l'utilizzo di due flange: quella superiore, costituita da un foro dipendente dalle dimensioni della stessa, in grado di permettere al provino di deformarsi e quella inferiore, disposta con un foro filettato al centro necessario per permettere il passaggio del fluido in pressione proveniente dal circuito di pompaggio. Il provino verrà stretto fra le due flange a contatto tra loro attraverso l'utilizzo di dadi e bulloni, con un momento di serraggio tale da garantire la non fuoriuscita del liquido fino alla pressione massima di rottura del provino ed un attrito sufficientemente elevato ad evitare che il provino scorra verso il foro della flangia superiore sotto la spinta della pressione. Se solo uno dei due casi si verificasse, la prova risulterebbe compromessa: la non tenuta non renderebbe possibile il completamento della prova, mentre lo scorrimento del provino renderebbe falsata la misura della deformazione attraverso le telecamere. Ulteriore accorgimento dovrà riguardare il raccordo sul bordo interno della flangia superiore; nel caso in cui essa presentasse uno spigolo vivo, entrando in contatto con il provino in espansione, genererebbe tensioni locali troppo elevate che porterebbero al falsamento della prova e l'obiettivo è quello di avere le tensioni massime sulla sommità dove deve verificarsi la rottura.

Questo tipo di flange possono essere acquistate facilmente online oppure presso i rivenditori e la loro dimensione varia a seconda della pressione nominale di esercizio e del diametro esterno.

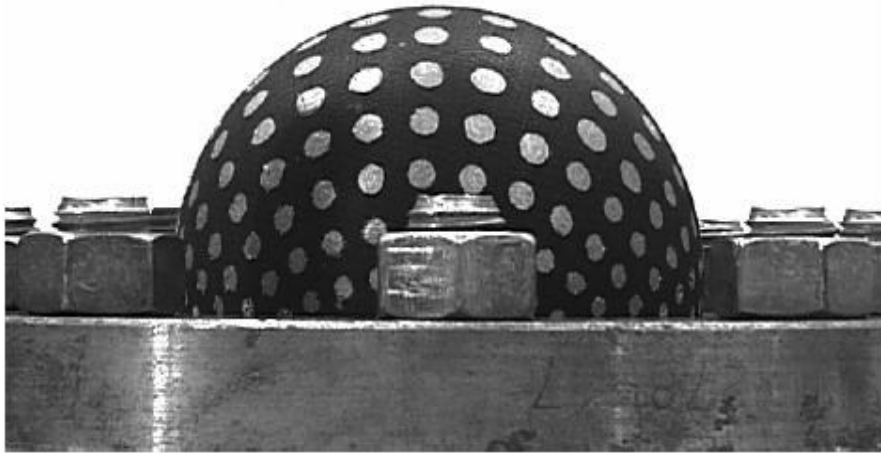


Fig. 2.2: Flangia e provino

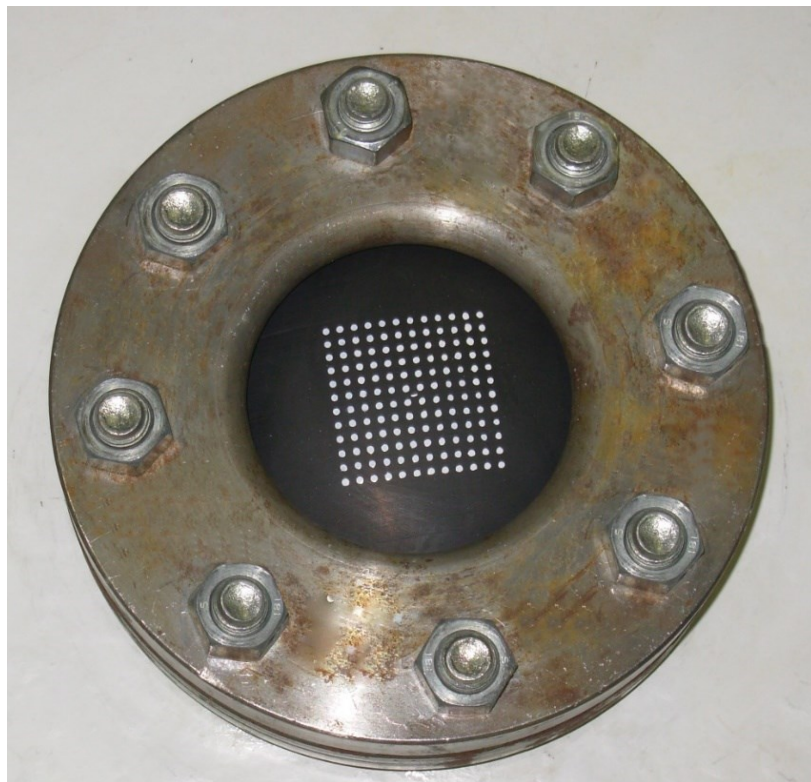


Fig. 2.3: Flangia bullonata

Il sistema di schermatura impiegato è illustrato in figura 2.4 ed oltre a svolgere una funzione protettiva dispone di un piano d'appoggio che ha il compito di supportare le flange che hanno la mansione di bloccare il provino; le 4 facce laterali sono realizzate con plexiglas trasparente di spessore 5mm, altezza 92mm e larghezza 72mm, le quali hanno un'ottima funzione protettiva; la trasparenza è indispensabile, in quanto consente all'utente di monitorare costantemente l'evoluzione della prova in atto e permette alla zona in corrispondenza del campione di essere ben illuminata, requisito di grande importanza per una buona acquisizione da parte delle telecamere.

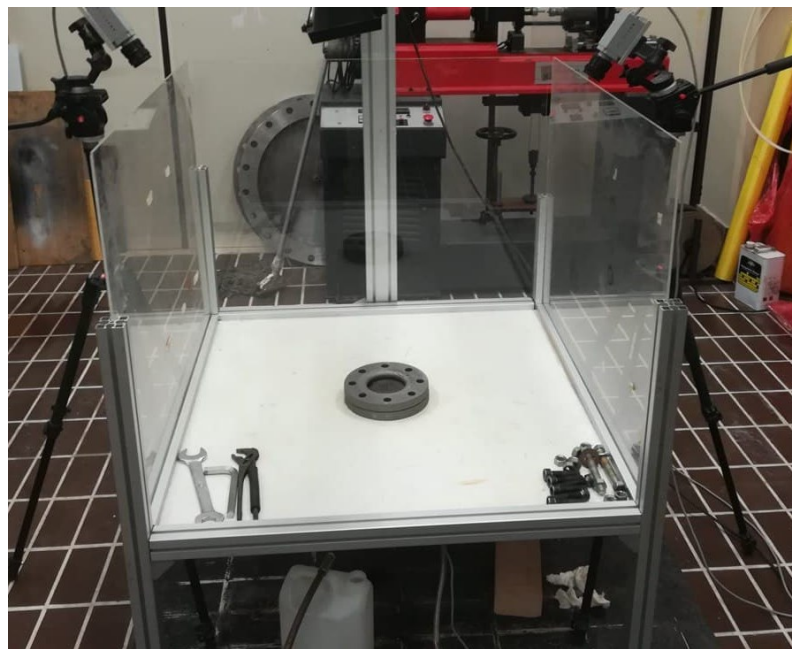


Fig. 2.4: Schermatura

2.3: Circuito idraulico di pompaggio del fluido

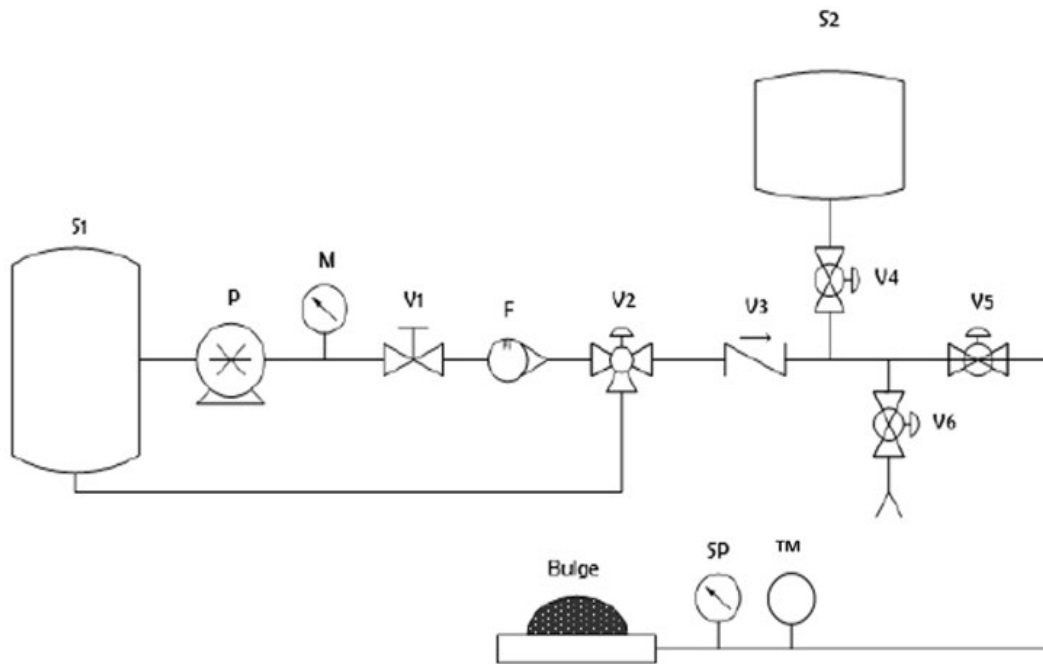
Il sistema di pompaggio idraulico del Bulge Test è stato idealizzato sulla base di regolare la portata da inviare al provino, in modo da poter studiare il materiale in esame alle diverse velocità di applicazione della pressione.

Per via puramente teorica abbiamo dedotto che, per ottenere una velocità di deformazione costante del provino, cosa fondamentale se si vuole analizzare e studiare gli effetti di essa sulla curva del materiale, la portata di gonfiaggio deve essere altrettanto costante. Inoltre, per avere

un test dettagliato delle tensioni che agiscono sul provino in esame, è indispensabile l'esecuzione di più prove alle diverse temperature del fluido; ciò è possibile attraverso l'impiego di una resistenza posta all'interno del serbatoio S1 di alimentazione del fluido.

Il resto dell'impianto è costituito da:

- Serbatoio S1 di alimentazione del fluido;
- Manometro M che misura la pressione in prossimità della mandata della pompa;
- Valvola di strozzamento V1 che introduce una perdita di carico localizzata regolabile;
- Flussometro F che indica la pressione e funge da ulteriore strozzamento regolabile;
- Valvola a 3 vie V2 che permette di effettuare un ricircolo del fluido escludendo il provino. Ciò è utile nella fase iniziale di settaggio per regolare in maniera opportuna gli strozzamenti in modo da ottenere la portata voluta e per evitare che gli effetti del *colpo d'ariete* all'avvio della pompa si ripercuotano sulla membrana;
- Serbatoio di parzializzazione S2 necessario per poter effettuare delle prove lente in condizioni quasi statiche della durata di 15 minuti. Infatti la portata in grado di sviluppare la pompa, anche con le valvole in posizione di massimo strozzamento, risulta eccessiva per questo tipo di prove. Questo serbatoio ha quindi il compito di accumulare parte del fluido che sarebbe destinato al provino, riducendo così la portata effettiva che arriva a quest'ultimo;
- Valvola di non ritorno V3 per evitare che un riflusso possa causare una caduta di pressione nel provino;
- Tre valvole di intercettazione V4, V5 e V6: la prima permette di escludere il serbatoio di parzializzazione S2 per le prove veloci, la seconda isola la parte finale del circuito dove è presente la membrana, mentre l'ultima funge da rubinetto e permette lo svuotamento dell'intero impianto;
- Trasduttore di pressione SP ad elevata sensibilità per ottenere una misura accurata di essa in prossimità del provino;
- Termostato TM che indica la misura della temperatura in prossimità del provino nel caso si vogliano effettuare delle prove con fluido surriscaldato.



- S1 serbatoio di accumulo
- P pompa volumetrica
- M manometro
- V1 valvola a spillo
- F flussometro
- V2 valvola a tre vie
- V3 valvola di non ritorno
- S2 serbatoio di parzializzazione
- V4, V5, V6 valvola a sfera
- S scarico aperto
- TM termostato
- SP sensore di pressione
- Bulge provino

Fig. 2.5: Schematizzazione circuito idraulico



Fig. 2.6 Resistenza elettrica

2.4: Sistema di misura della pressione

La pressione che agisce sul provino durante la prova è una grandezza che deve essere continuamente monitorata per poter conoscere lo stato tensionale di ogni punto del provino. Per fare questo è necessario l'installazione di un trasduttore di pressione che funziona attraverso un materiale di tipo piezoelettrico che ha la proprietà di accumulare cariche elettriche sulla sua superficie se soggetto ad una forza. Il sensore di pressione, come si può ben vedere dalla figura 2.7, è installato in prossimità del provino, al di sotto del piano sul quale poggiano le due flange.



Fig. 2.7: trasduttore di pressione

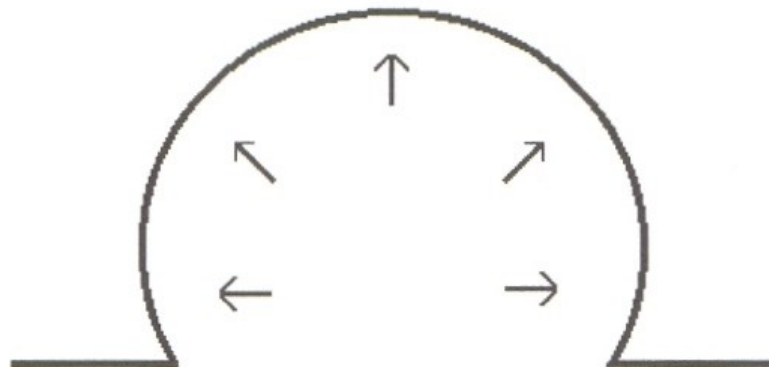


Fig. 2.8: Curvatura del provino successivamente all'applicazione di pressione

2.5: Robot antropomorfo con telecamere

Il robot antropomorfo con due telecamere installate sul polso è impiegato per misurare le deformazioni e tensioni che agiscono sul provino. Le telecamere sono disposte in stereoscopia, ossia in grado di acquisire simultaneamente l'immagine del campione che si deforma da due punti distinti dello spazio. Sicuramente non è l'unica soluzione per conoscere tensioni e deformazioni del provino in esame, ma è sicuramente un'opzione valida.

È consigliabile montare le due telecamere mobili sul polso del robot piuttosto che installarne due fisse per diversi validi motivi. Come si è potuto constatare nel paragrafo precedente, la struttura che sostiene e blocca il provino non è fissa e solidale al terreno ma è fissata alla struttura della schermatura, quindi la mobilità del braccio del robot permette sempre un corretto e preciso posizionamento delle telecamere rispetto al provino. Inoltre, per ottenere un'immagine dettagliata con un'elevata risoluzione spaziale che permette una precisa misura della deformazione, le telecamere devono essere posizionate piuttosto vicine al campione; ciò comporta che durante la prova, mentre esso si gonfia in seguito all'applicazione di pressione ed aumenta la sua altezza, anche le telecamere dovranno effettuare uno spostamento della stessa quantità per evitare che con il provino sia troppo vicino all'obiettivo e la fotocamera non riesca ad inquadrare correttamente il provino in esame.

Il robot consigliato per l'esecuzione di tale prova è un *Comau Smart S4* a sei assi di rotazione e fa parte della categoria dei robot antropomorfi, così definiti poiché hanno la caratteristica di riprodurre il movimento del braccio umano.

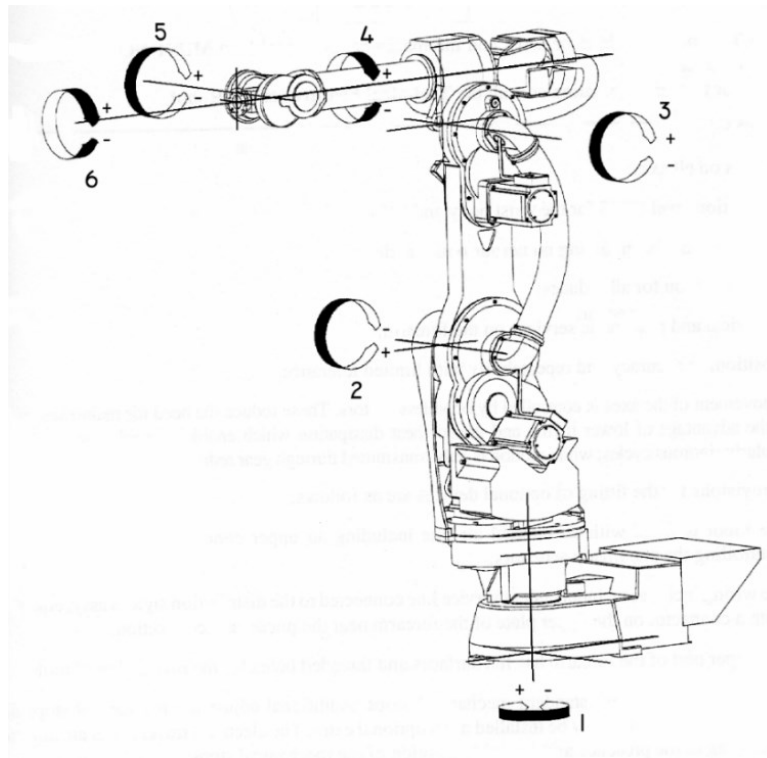


Fig. 2.9: Robot Comau Smart S4

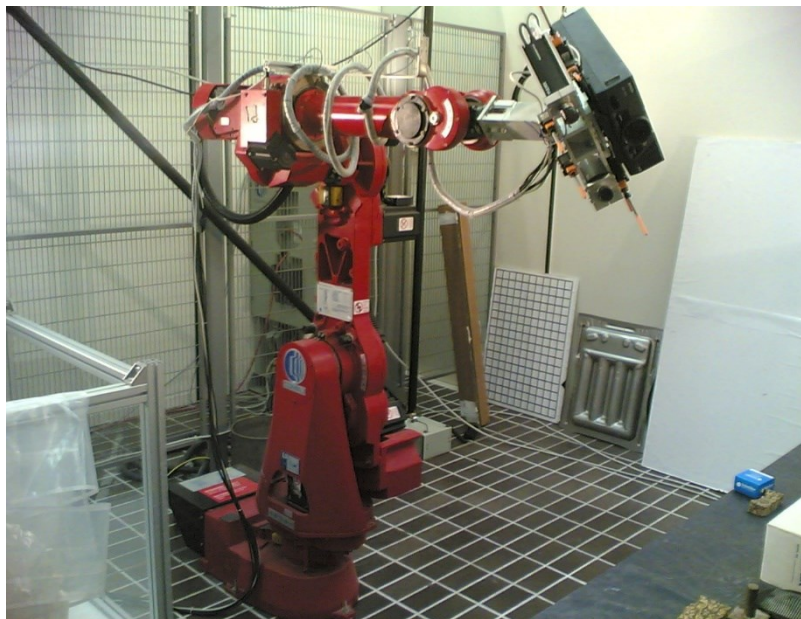
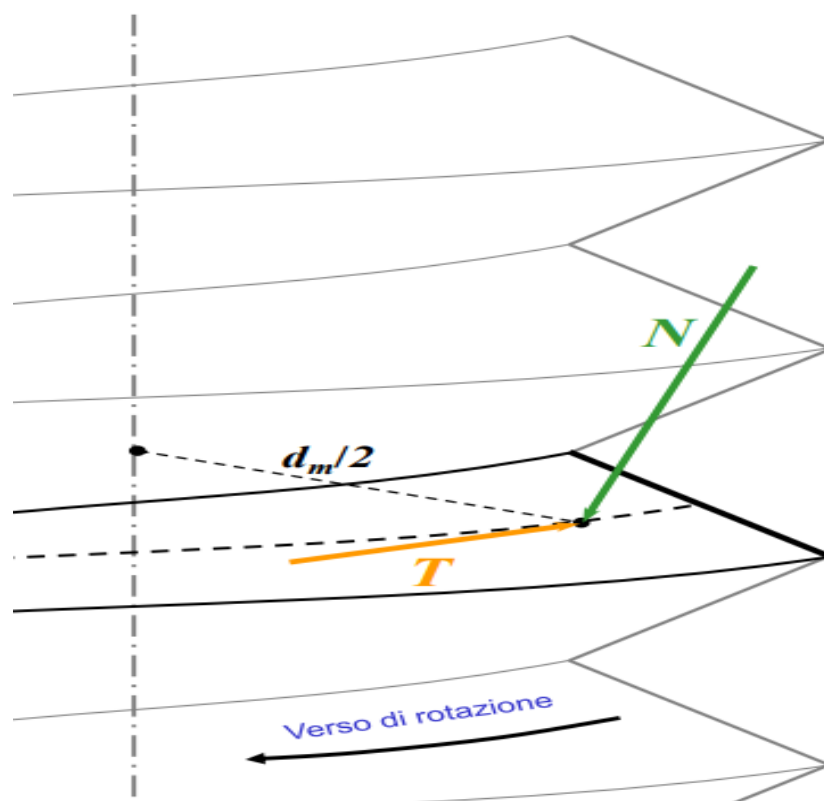


Fig. 2.10: Robot Comau Smart S4 con telecamere sul polso

*CREAZIONE DEL SISTEMA
DI BLOCCAGGIO
TRAMITE IL SOFTWARE
SOLID EDGE E CARICHI*



3.1: Introduzione

In questo paragrafo illustreremo la creazione del sistema di bloccaggio del provino tramite l'impiego del software CAD e in particolare Solid Edge. Tale software è molto impiegato anche in ambito ingegneristico in quanto permette la creazione di molteplici componenti. I sistemi CAD hanno come obiettivo la creazione di modelli, soprattutto 3D, del manufatto. Inoltre un modello 3D, esso può essere utilizzato per calcoli quali analisi statiche, dinamiche e strutturali ed in tal caso si parla di Computer Aided Engineering (CAE), disciplina più vasta di cui il CAD costituisce il sottoinsieme di azioni e strumenti volti alla realizzazione puramente geometrica del modello. La nascita dei sistemi di modellazione 3D è molto recente (1960): una delle prime rappresentazioni tridimensionali su calcolatore è stata realizzata da William Fetter in cui rappresentò un insieme di linee che descrivevano la sagoma virtuale di un pilota aereo.

Le lavorazioni necessarie per la realizzazione del sistema di afferraggio sono di seguito elencate:

- Creazione della flangia inferiore;
- Creazione della flangia superiore;
- Creazione del tubo con un'estremità filettata attraverso il quale il fluido che scorre al suo interno metterà in pressione il campione;
- Creazione delle rondelle, dadi e bulloni.



Fig. 3.1: Logo Solid Edge

3.2: Creazione della flangia inferiore

Il primo componente realizzato è stata la flangia inferiore. Tramite il comando “estrudi” è stato creato un cerchio di raggio 110 mm e altezza 22 mm; le misure sono state prese dai valori tabellati delle flange disponibili in commercio ma la dimensione di quest’ultima può essere modificata in corrispondenza del tipo di prova che si desidera eseguire. Successivamente alla creazione della flangia inferiore piena, si è provveduto alla creazione dei fori, ad una distanza pari di 90 mm dall’asse centrale della flangia, nei quali verranno inseriti i bulloni che bloccheranno il provino. In seguito si è creato il foro centrale filettato passante, al quale sarà avvitato il tubo contenente il fluido in pressione. L’ultimo lavoro eseguito è stato la creazione delle scanalature che hanno la funzione di evitare che il provino, durante l’applicazione di gonfiaggio di quest’ultimo, scorra verso il centro della flangia superiore falsando i risultati ottenuti dalla prova. Le scanalature possono essere realizzate in direzione perpendicolare al piano della flangia oppure in direzione obliqua; ciò dipende fondamentalmente dal materiale del campione in esame in quanto, l’elevato momento di serraggio, potrebbe intaccare il provino.

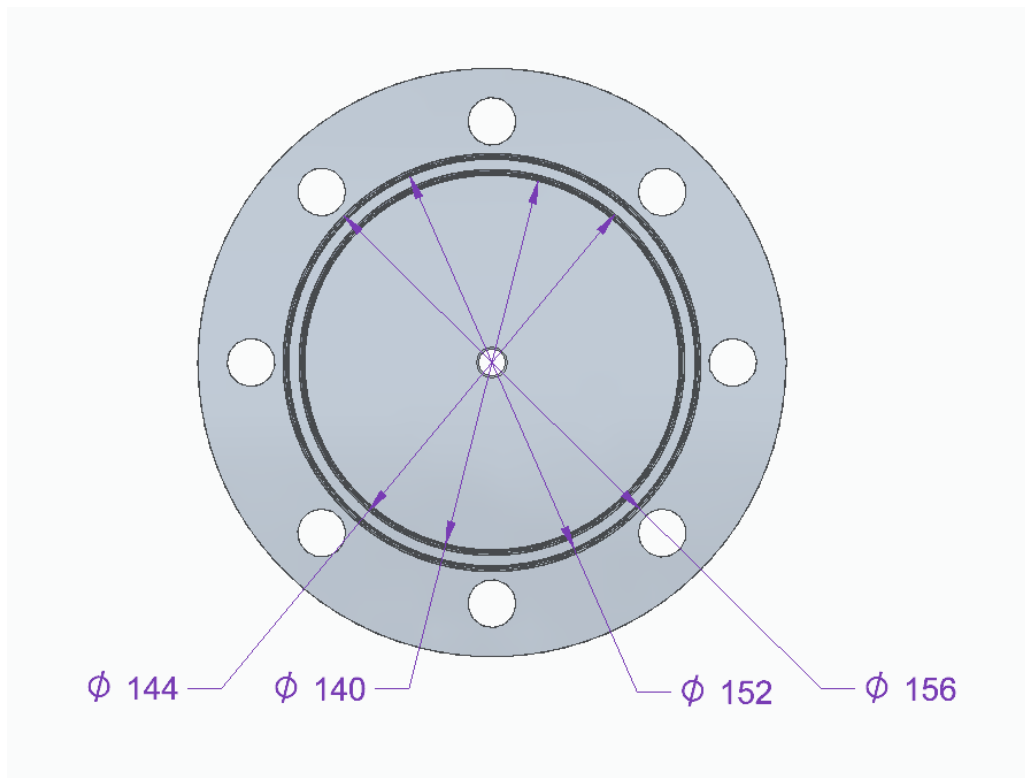


Fig. 3.2: Flangia inferiore vista superiore

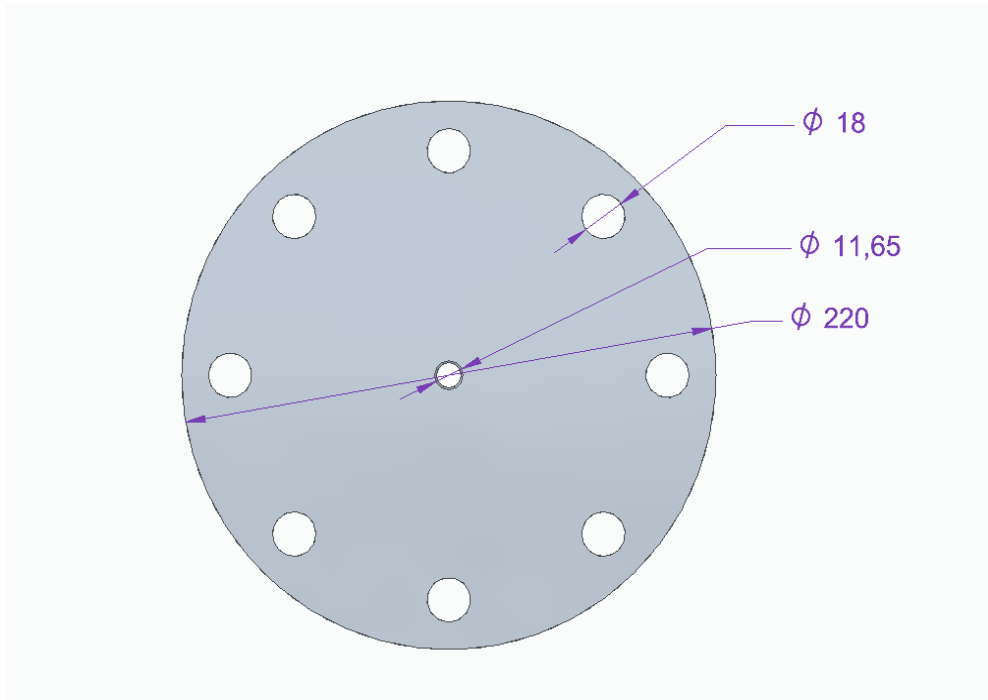


Fig. 3.3: Flangia inferiore vista inferiore



Fig. 3.4: Flangia inferiore vista laterale

3.3: Creazione della flangia superiore

Il passo successivo alla creazione della flangia inferiore è stato lo sviluppo della flangia superiore.

Come indicato nel paragrafo precedente, sono state disegnate due circonferenze di dimensioni 110 mm per la circonferenza esterna e 58 mm per l'interna. In seguito, si è proceduto alla realizzazione dei fori passanti attraverso i quali saranno inseriti i bulloni. A differenza della flangia inferiore, nella flangia superiore è necessario raccordare gli spigoli vivi interni a quest'ultima, soprattutto per lo spigolo inferiore: durante la prova, il campione in espansione dovuto alla pressione di gonfiaggio, entra in contatto con il foro centrale della flangia e la non realizzazione del raccordo interno, pari a 9 mm, comporterebbe un'alterazione della prova falsificando la curva ottenuta. Infine, nella faccia inferiore della flangia, si è provveduto alla realizzazione delle scanalature.

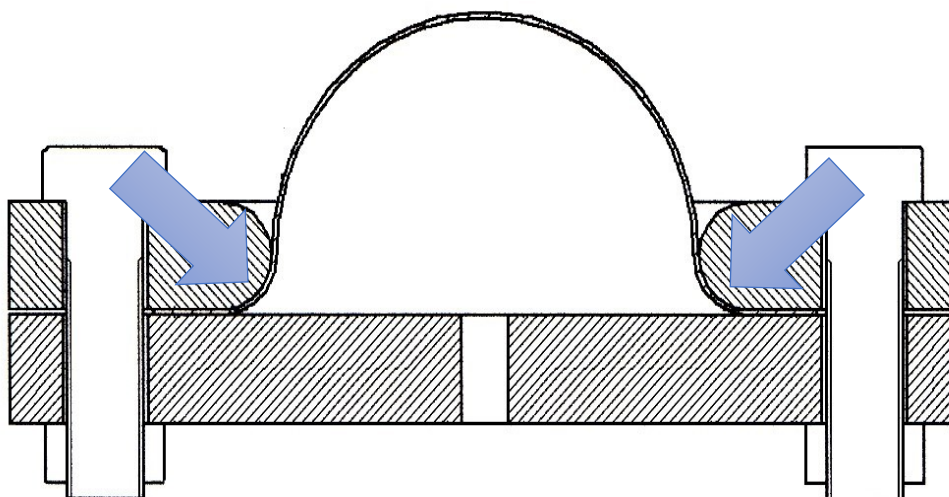


Fig. 3.5: Provino bloccato tra le flange

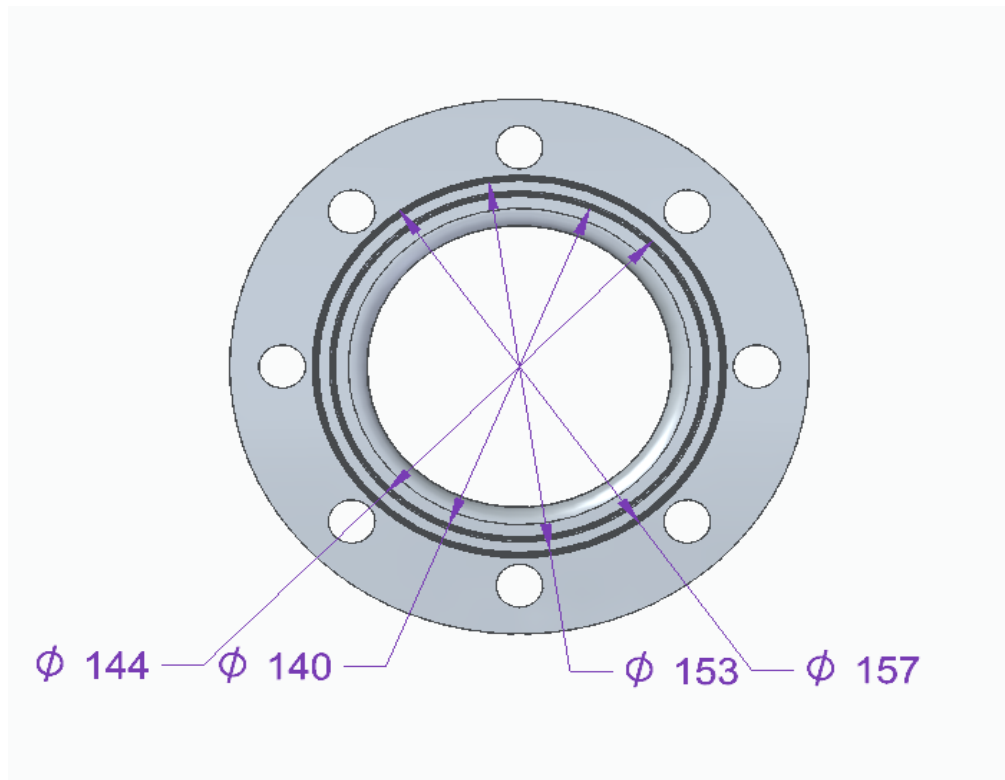


Fig. 3.6: Flangia superiore vista inferiore

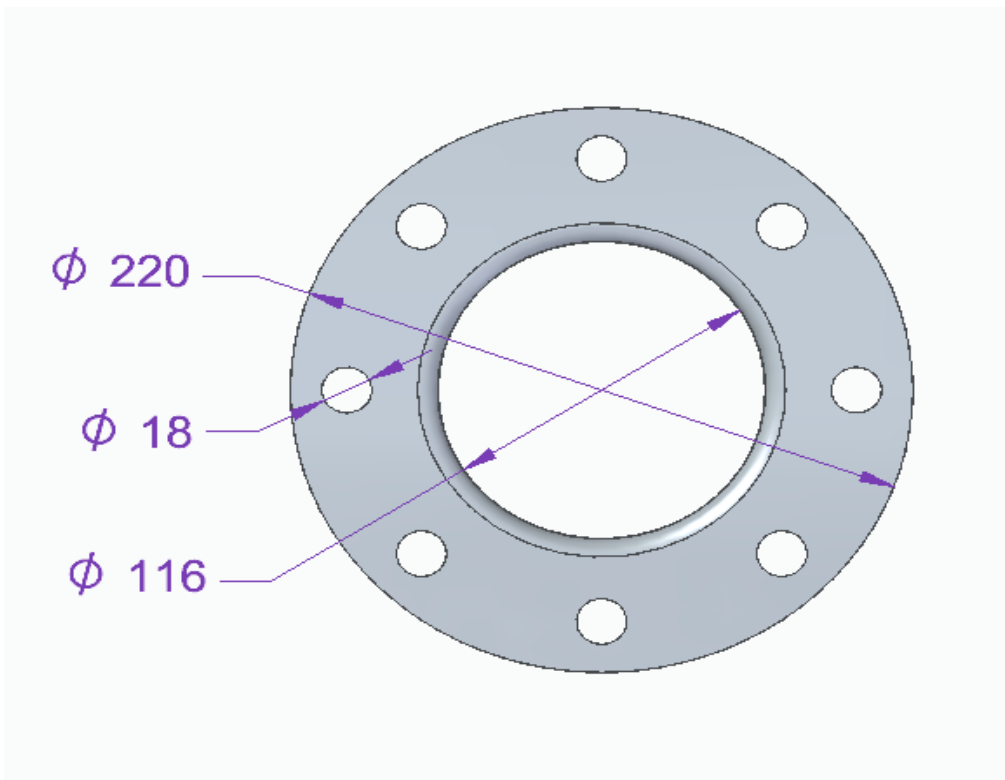


Fig. 3.7: Flangia superiore vista superiore

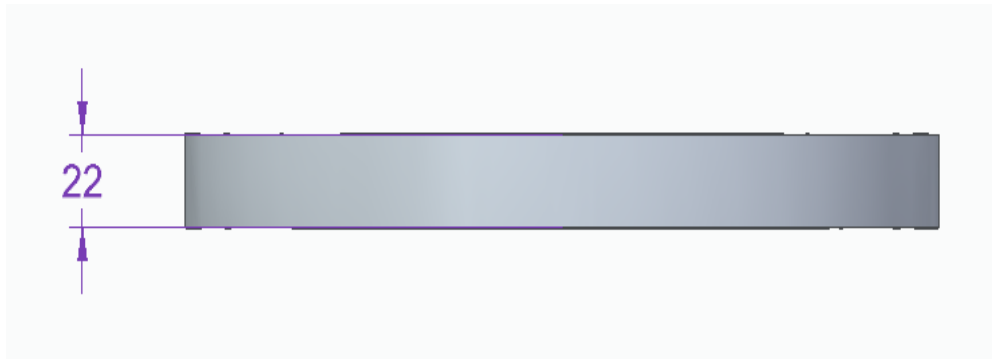


Fig. 3.8: Flangia superiore vista laterale

3.4: Creazione delle rondelle, dadi e bulloni

In seguito alla realizzazione della flangia superiore ed inferiore, si è proceduto con la creazione del bullone M14 a passo grosso (passo 2 mm). Le dimensioni del bullone sono pari a 60 mm per il gambo e 34 mm per la parte filettata di quest'ultimo; inoltre, l'altezza della testa del bullone è pari a 9 mm. Oltre alla realizzazione del bullone, è stato realizzato il dado necessario per stringere le due flange a contatto ed infine si è provveduto con lo sviluppo della rondella piana, la cui altezza è pari a 2,5 mm. Sapendo che nel bullone si hanno le concentrazioni delle tensioni in corrispondenza del raccordo, del principio del filetto e del raccordo di gola si è provveduto al montaggio della rondella in quanto i fori passanti della flangia presentano degli spigoli vivi che possono mordere il filetto e aumentare le concentrazioni di tensioni; per questo motivo è opportuno il montaggio della rondella sotto la testa del bullone e anche sopra al dado. La scelta di impiegare il bullone di tali dimensioni è stata effettuata considerando l'attrito necessario per bloccare lo scorrimento del campione e il dimensionamento ottimale che prevede che solo uno o due filetti sporgano dal dado successivamente al serraggio.

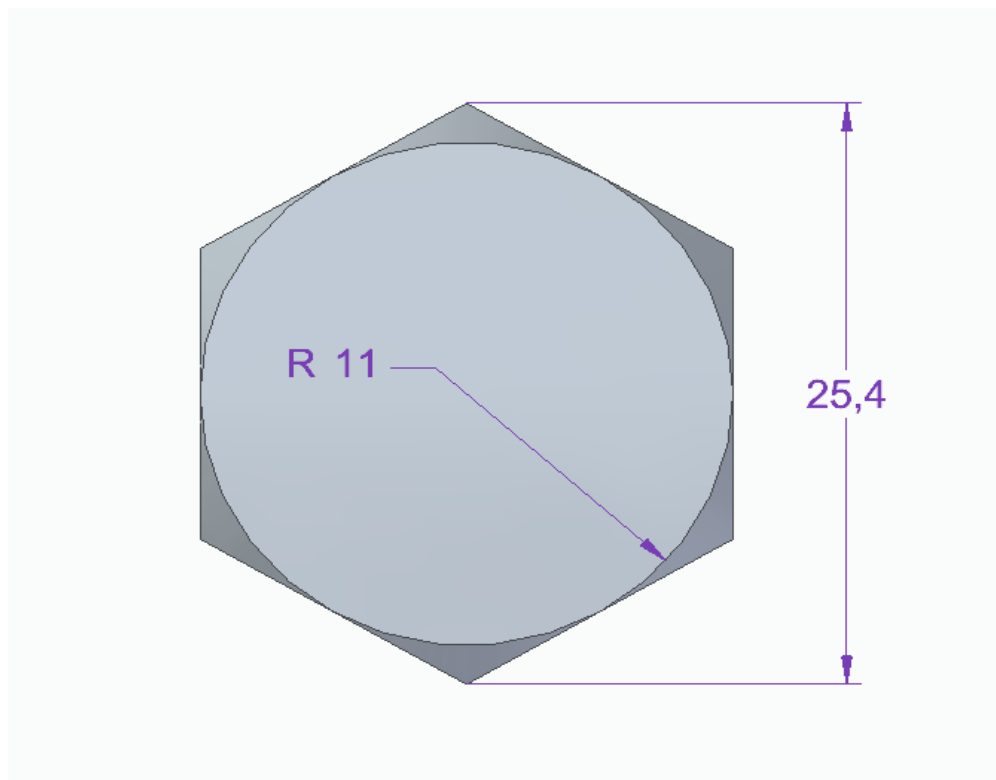


Fig. 3.9: Bullone M14 vista superiore

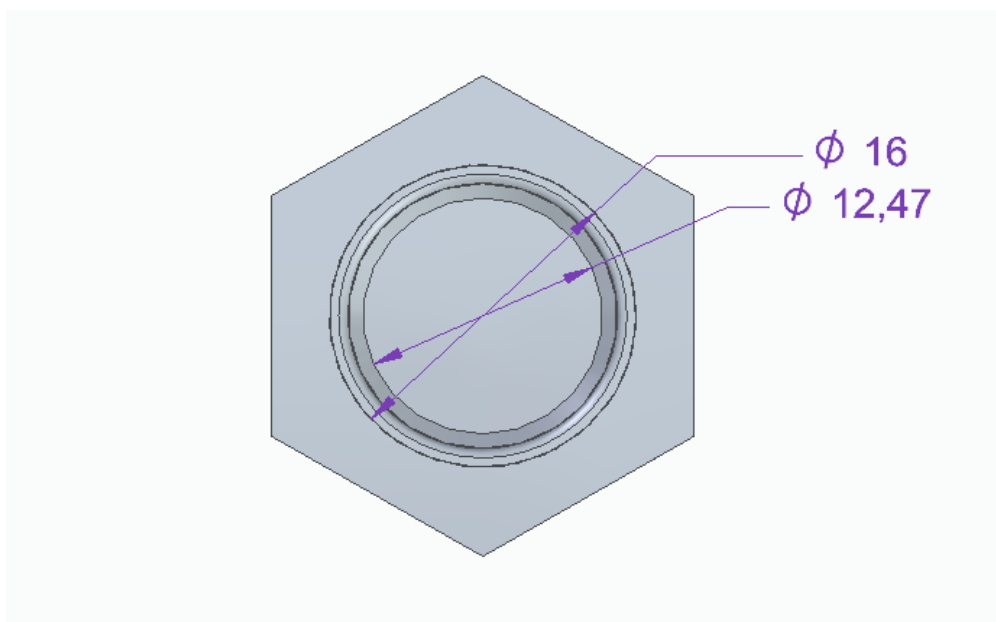


Fig. 3.10: Bullone M14 vista inferiore

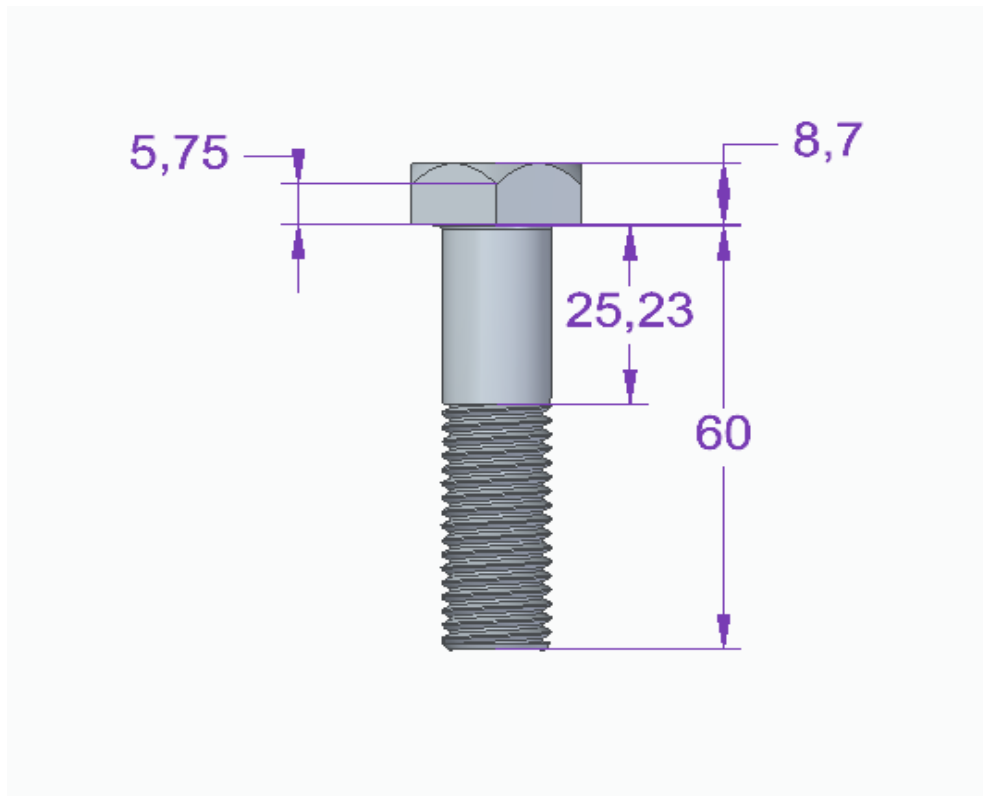


Fig. 3.11: Bullone M14 vista laterale

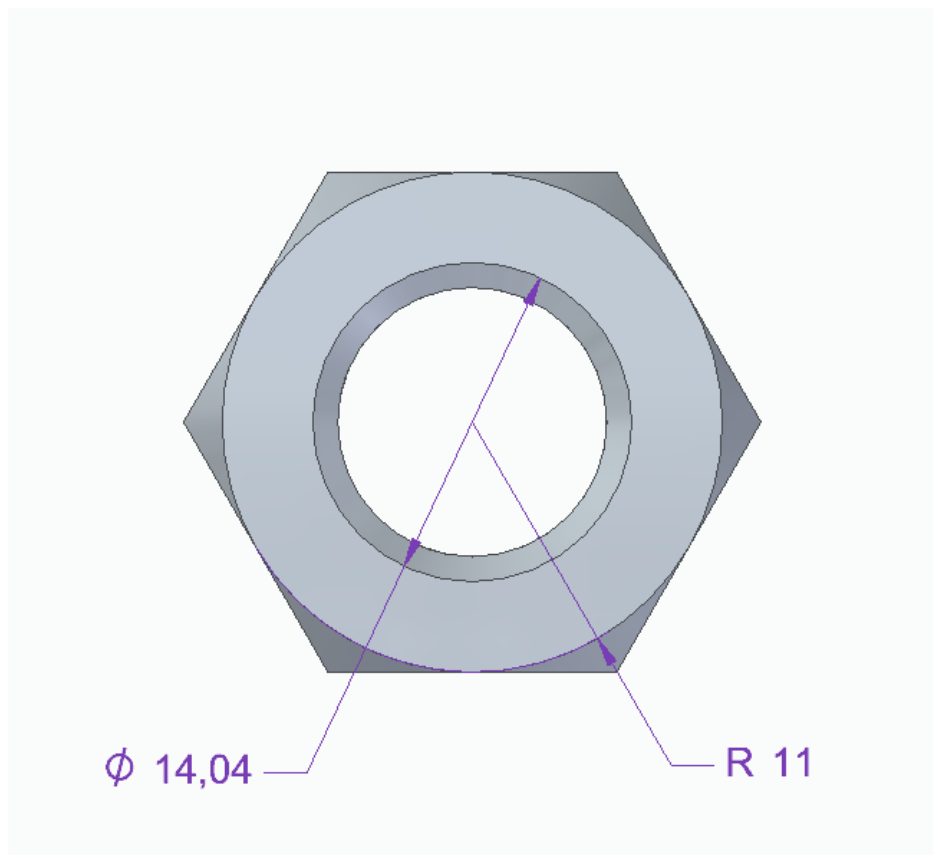


Fig. 3.12: Dado M14 vista superiore/inferiore

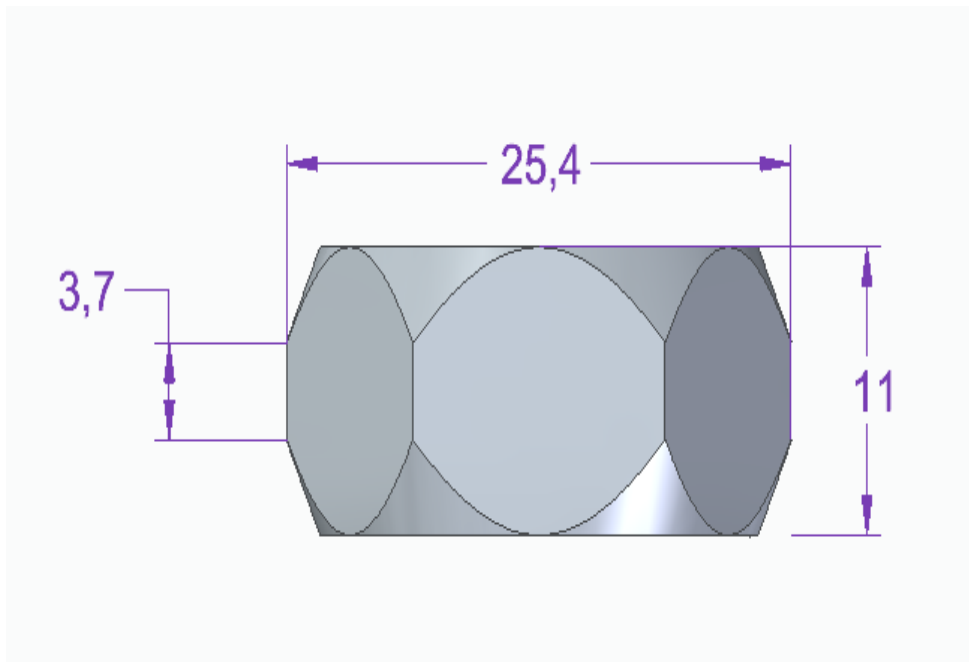


Fig. 3.13: Dado M14 vista laterale

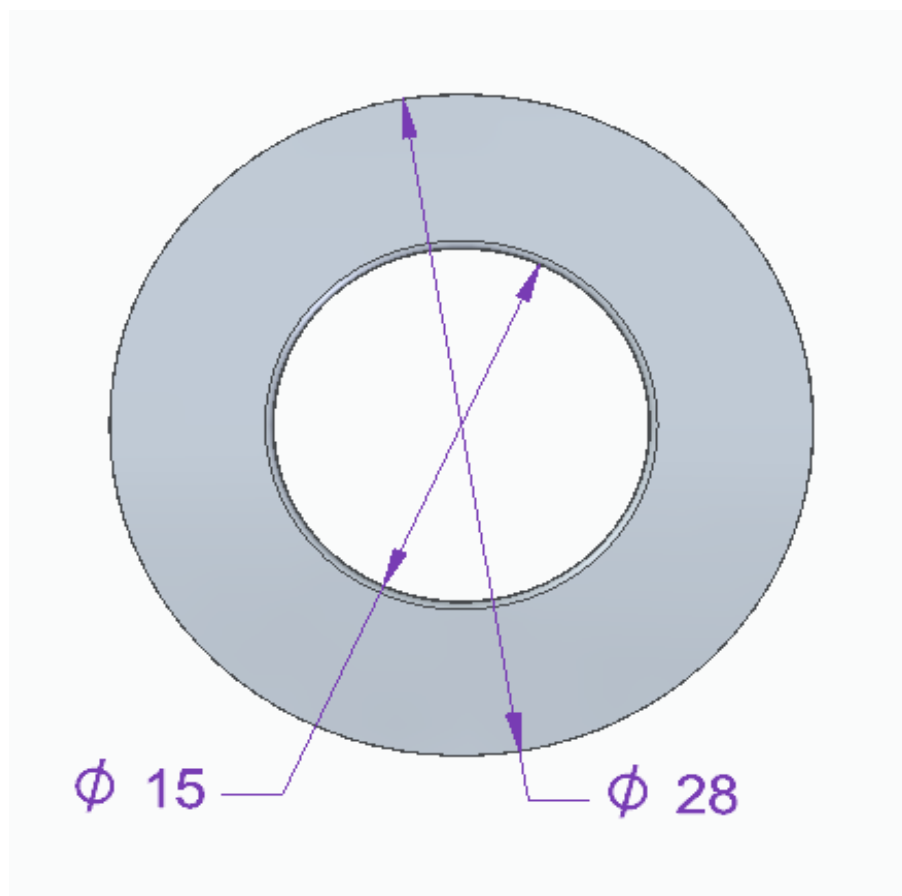


Fig. 3.14: Rondella vista superiore



Fig. 3.15: Rondella vista laterale

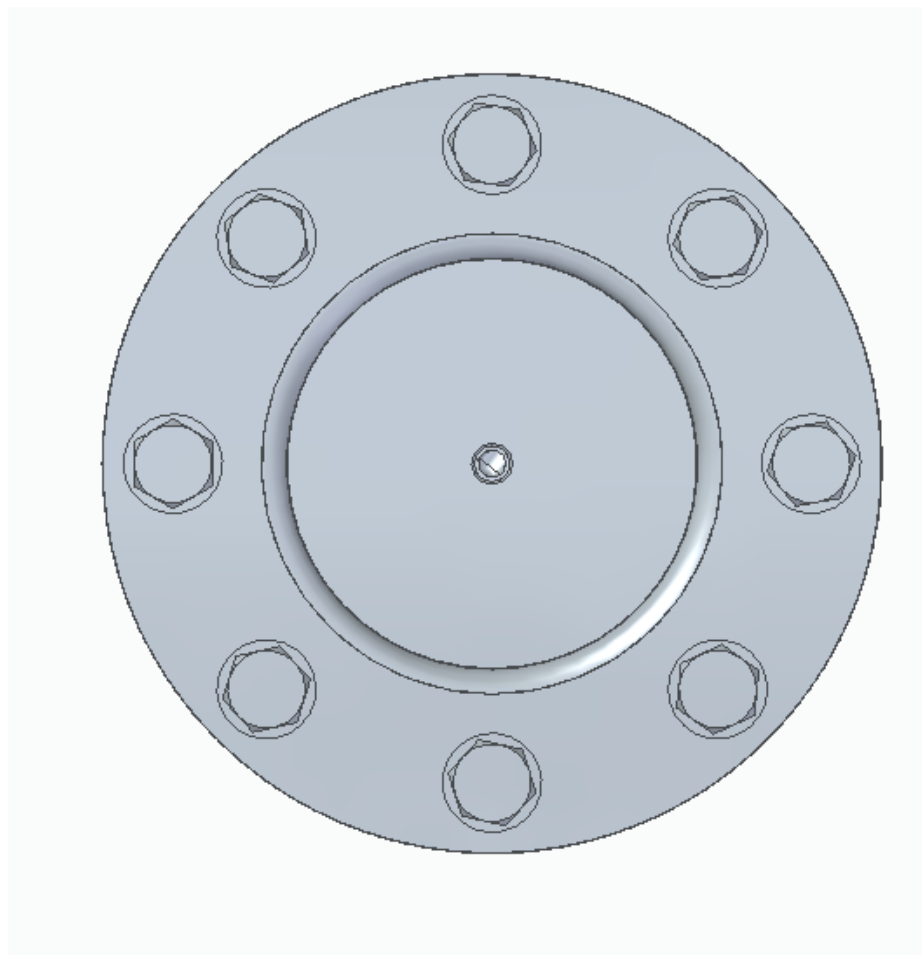


Fig. 3.16: Flangia assemblata vista superiore

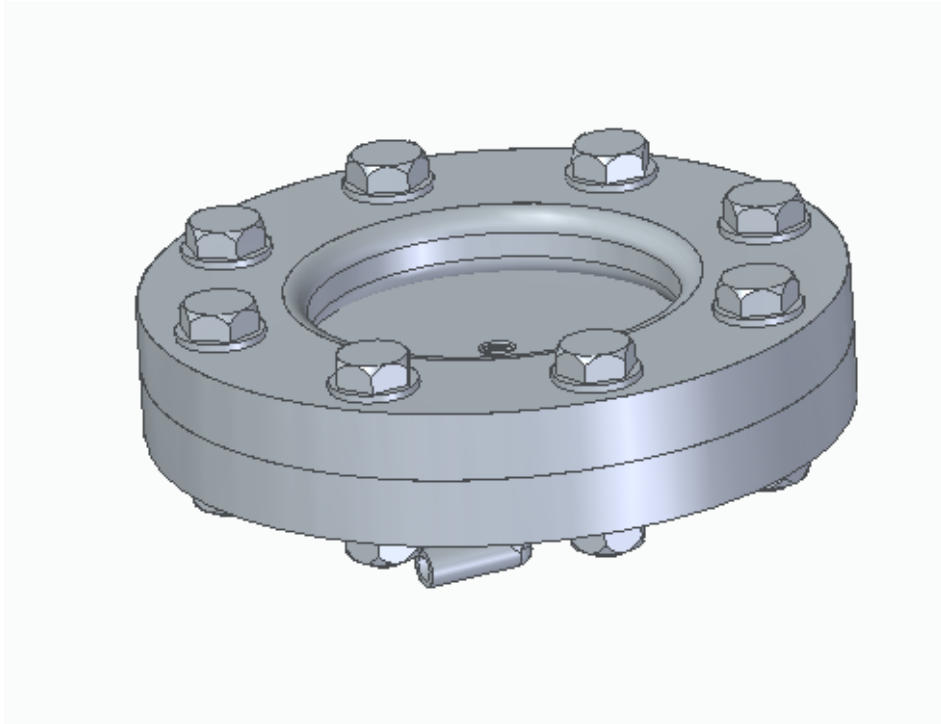


Fig. 3.17: Flangia assemblata

3.5: Rigidezza dell'elemento di collegamento

Ogni qual volta è necessario un collegamento capace di resistere ad elevati carichi esterni, e che allo stesso tempo consenta un facile smontaggio senza danneggiare le parti, una buona soluzione è rappresentata dal collegamento per mezzo di bulloni. Stringendo il dado si produce una forza (detta *precarico* o *pretensionamento*) che preme fra loro le parti da collegare, ed esiste indipendentemente dalla presenza del carico esterno P . Durante l'operazione di bullonatura, il bullone è sottoposto a trazione mentre le parti collegate risultano compresse. Indicando la *rigidezza* come il rapporto tra la forza applicata e la deformazione prodotta in un corpo dalla forza stessa, essa si può calcolare della parte filettata e non del bullone come:

$$k_t = \frac{A_t E}{l_t} \quad k_d = \frac{A_d E}{l_d}$$

dove:

- A_t è la sezione resistente;
- l_t è la lunghezza della parte filettata facente parte dell'accoppiamento;

- A_d è la sezione della parte non filettata;
- l_d è la lunghezza della parte non filettata facente parte dell'accoppiamento.

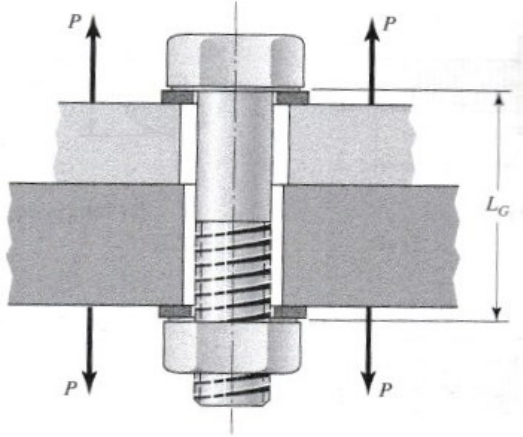


Fig. 3.18: Collegamento mediante bullone

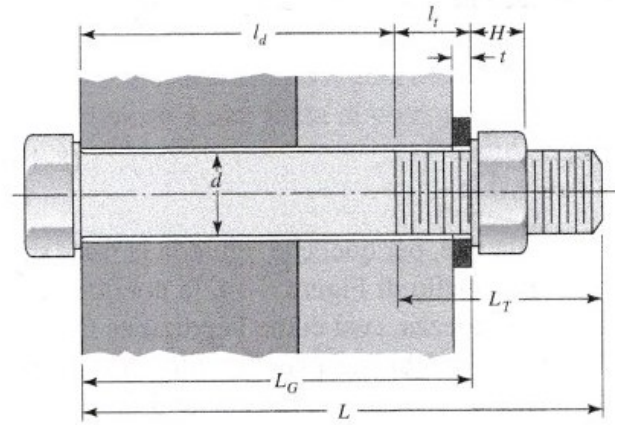


Fig. 3.19: Calcolo rigidezza dei bulloni

3.6: Rigidezza delle parti da collegare

La conoscenza della *rigidezza* delle parti da collegare è fondamentale se si vuol conoscere l'effetto di un carico esterno sull'accoppiamento; il comportamento delle parti da collegare è assimilabile a quello di più molle in serie in cui la rigidezza complessiva la si può scrivere come:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_i}$$

Negli anni sono state effettuate molte ricerche in merito alla distribuzione delle pressioni in corrispondenza delle parti da collegare. La figura di seguito allegata mostra la geometria del tronco di cono forato equivalente: quando la compressione è limitata alla faccia di un anello di appoggio si deve considerare un angolo compreso tra i 25 e i 33 gradi. Per le parti in acciaio è consigliato l'utilizzo di un angolo pari a 30 gradi.

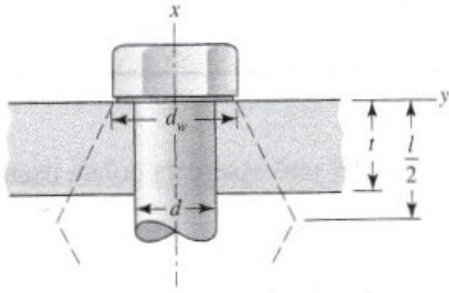


Fig. 3.20: Compressione flangia

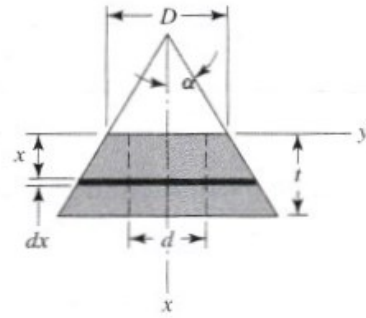


Fig. 3.21: Tronco di cono equivalente forato

La contrazione che esso subisce vale:

$$d\delta = \frac{P dx}{EA}$$

L'area dell'elemento è pari a:

$$\begin{aligned} A &= \pi (r_o^2 - r_i^2) = \pi \left[\left(x \tan \alpha + \frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] \\ &= \pi \left(x \tan \alpha + \frac{D+d}{2} \right) \left(x \tan \alpha + \frac{D-d}{2} \right) \end{aligned}$$

Sostituendo il valore dell'area nella formula della contrazione ed integrando su tutto lo spessore t , si ottiene la rigidezza del tronco di cono:

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{\pi E d \tan \alpha}{\ln \frac{(2t \tan \alpha + D - d)(D + d)}{(2t \tan \alpha + D + d)(D - d)}}$$

Considerando che i membri hanno lo stesso modulo di Young e lo stesso spessore t , il comportamento è quello di due molle in serie, quindi $K_m = K/2$. Inoltre, se il diametro

dell'anello di appoggio è circa 1,5 quello del bullone è possibile porre $d_w = 1,5d$. Per un angolo di 30 gradi otteniamo:

$$k_m = \frac{0.5774\pi Ed}{2 \ln \left(5 \frac{0.5774l + 0.5d}{0.5774l + 2.5d} \right)}$$

3.7: Carichi agenti sui bulloni e coppia di serraggio

Le forze scambiate tra vite e madrevite durante l'avvitamento possono essere studiati pensando che tali carichi agiscano solo sull'elica media del filetto e composti da due azioni:

- la forza N , diretta secondo la normale alla superficie di interfaccia;
- la forza T (attrito radente), diretta secondo la tangente all'elica media in verso opposto alla rotazione tra vite-madrevite.

Le componenti T ed N sono legate dalla seguente relazione:

$$T = fN$$

dove f è il coefficiente di attrito radente il cui valore è compreso tra 0,15 e 0,20

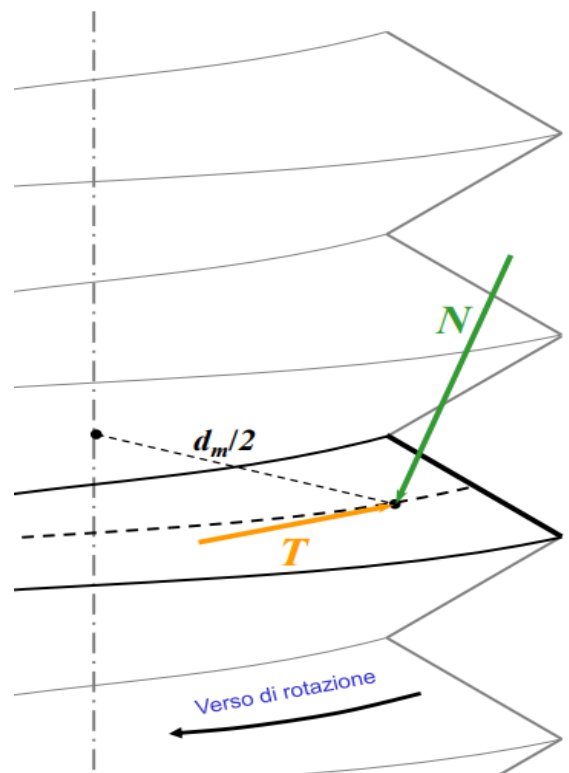


Fig. 3.22: Carichi sul bullone

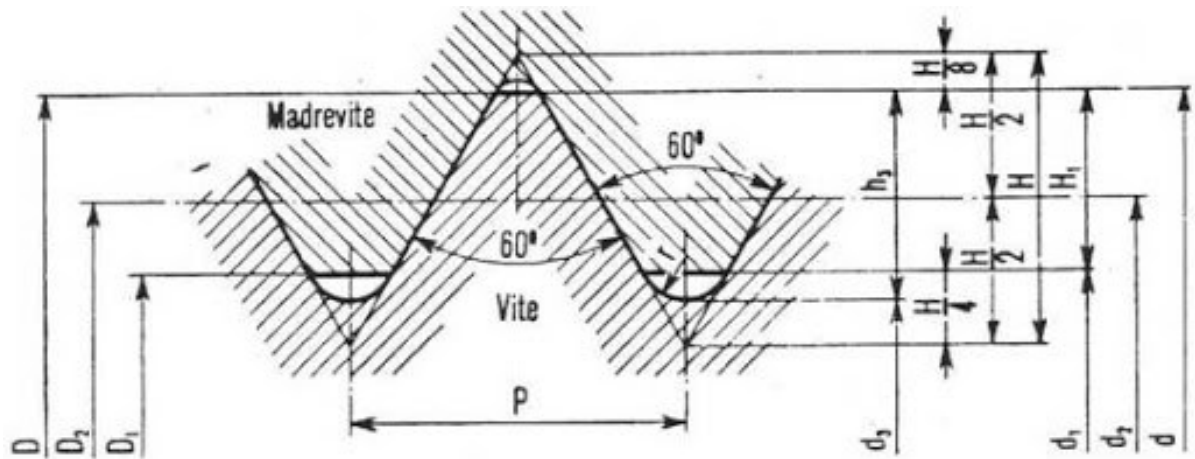


Fig. 3.23: Profilo base per i filetti metrici M e MJ

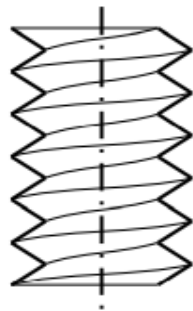


Fig. 3.24: Vite

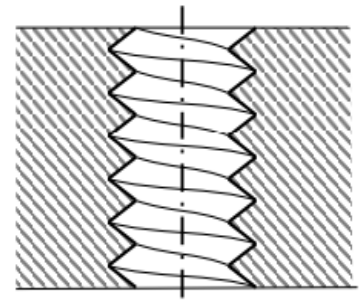


Fig. 3.25: Madrevite

Il legame tra il carico assiale sul bullone F e il momento di serraggio T_R è:

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right)$$

dove d_m è il *diametro medio*. Inoltre, considerando l'interazione tra la testa del bullone e la superficie di appoggio avremo il contributo T_C :

$$T_C = \frac{F f_c d_c}{2}$$

dove d_c indica il *diametro medio* della testa del bullone e f_c è il *coefficiente di attrito*.

Infine, la coppia richiesta è data dalla combinazione di T_C e T_R :

$$T = \frac{F_i d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + \frac{F_i f_c d_c}{2}$$

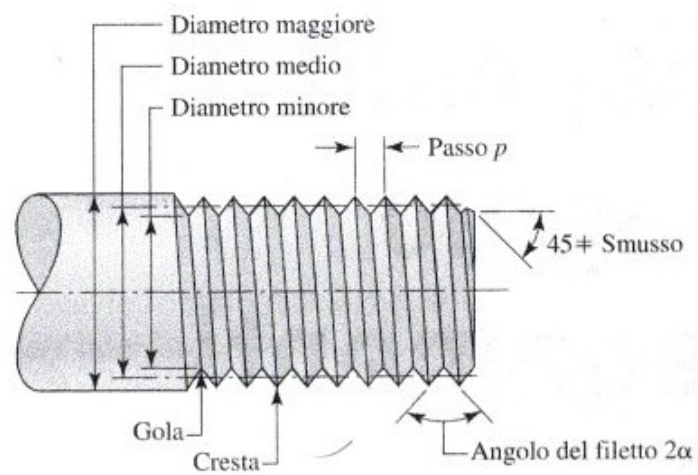
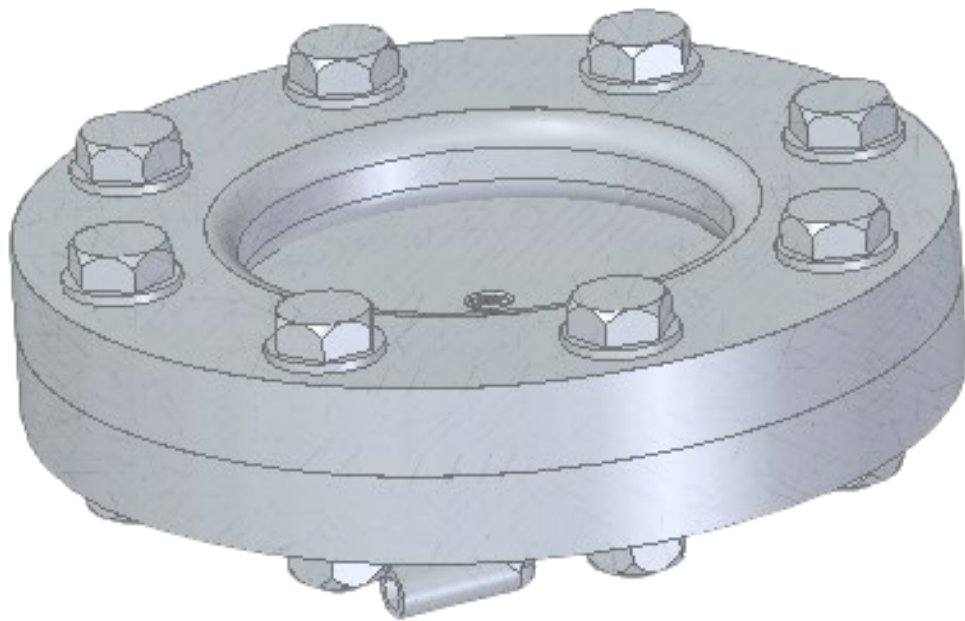


Fig. 3.26: Terminologia relativa ai filetti dei bulloni

CONCLUSIONE



Con il lavoro svolto in questa tesi, si è perfezionato un sistema in grado di effettuare delle prove di tipo biassiale, frequentemente note come *Bulge Test*.

L'analisi approfondita e le ricerche svolte contribuiscono alla intuizione del metodo migliore da adottare in conseguenza agli elementi che si hanno a disposizione. Inoltre, con la realizzazione del banco prova, si è permesso lo studio del comportamento della deformazione del provino attraverso un circuito idraulico in grado di regolare la portata destinata al campione. Con lo sviluppo del sistema di bloccaggio del campione e relativi carichi, si sono espresse le forze che agiscono sul sistema quando al provino viene applicata la pressione derivante dal circuito idraulico.

Un'ulteriore miglioria che può essere apportata al banco prova per accurare la velocità di deformazione durante la prova è l'installazione di una pompa volumetrica con variatore di giri, attraverso la quale si garantisce la portata costante con la prevalenza e contemporaneamente permette di eseguire diverse prove a portata differente grazie al variatore.

In definitiva, un obiettivo per il futuro è quello isolare termicamente i tubi del circuito idraulico in modo tale da poter effettuare delle prove di trazione biassiale sui vari campioni a temperature elevate e confrontare i dati ottenuti con le prove precedentemente effettuate, prove in cui il fluido non è sottoposto a surriscaldamenti.

Bibliografia

- Lazarescu, Lucian, Dan Sorin Comsa, and Dorel Banabic. "Analytical and experimental evaluation of the stress-strain curves of sheet metals by hydraulic bulge tests." *Key Engineering Materials*. Vol. 473. Trans Tech Publications Ltd, 2011;
- Vitu, Ludovic, et al. "Flange bulging test of zinc alloy: comparison of analyses with analytical models and with stereo-correlation technique." *Procedia Manufacturing* 15 (2018): 884-891;
- Shigley, Joseph Edward, et al. *Progetto e costruzione di macchine*. McGraw-Hill, 2009;
- Tesi di laurea di Eugenio Riccioni "Sviluppo di un sistema per la caratterizzazione di elastomeri mediante analisi di immagine", 06/07

Ringraziamenti

Ed ora che sono arrivato alla fine della mia tesi colgo l'occasione per ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine in questi anni di Università e non hanno mai smesso di credere in me. Vorrei ringraziare in primis la mia *famiglia*, perché mi è sempre stata accanto continuando ininterrottamente a sostenermi ed incoraggiarmi. Senza di loro non sarei mai diventato quel che sono e non avrei potuto coronare i miei molteplici sogni. Grazie papà **Mario**, perché mi sei sempre stato accanto, aiutandomi e confortandomi nei momenti difficili senza mai smettere di credere in me. Grazie mamma **Costantina**, perché mi hai sempre coccolato e continuato a sostenermi in qualche occasione anche con parole forti. Grazie ad entrambi perché siete i genitori migliori al mondo e con il vostro amore avete dato vita ad una *famiglia* fantastica. Grazie a mio fratello **Michele**, un fratello speciale, bravo e coccolone sempre pronto ad aiutarti. Un ringraziamento speciale alla mia ragazza **Felicia**, perché ci sei sempre stata e col tuo carattere dolce e comprensivo sei sempre riuscita a capirmi ed incoraggiarmi. Grazie ai miei nonni **Rosa** e **Michele**, non avrei potuto desiderare nonni migliori di voi, siete speciali. Un ulteriore ringraziamento è per il mio ex coinquilino **Marco**, un amico dal cuore grande disponibile sempre a chiarirmi ogni dubbio in qualunque momento. Ringrazio infinitamente il relatore **Rossi Marco** e il correlatore **Coccia Mattia** per avermi aiutato nello sviluppo e nella stesura della tesi.

Vorrei inoltre ringraziare i miei amici/ex coinquilini con i quali ho condiviso diversi momenti e un'infinità di risate che non dimenticherò mai. Infine, ringrazio tutte le persone che non ho esplicitamente citato ma che hanno avuto un ruolo importante nella mia vita.