



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

*Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica*

**Sviluppo di un sistema di Bulge Test idraulico ad alta pressione e Nakazima Test su lamiera**

**Design of a high pressure hydraulic Bulge Test and Nakazima Test system on sheet metal**

*Relatore: Prof.*  
**MARCO ROSSI**

*Tesi di Laurea di:*  
**ALESSANDRO GRAZIANI**

*Correlatore: Prof.*  
**ATTILIO LATTANZI**

A.A. 2020 / 2021



## INDICE

<b>Capitolo 1: INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
1.1 Prova di Erichsen .....	8
1.2 Bulge Test idraulico .....	9
1.3 Nakazima Test .....	11
1.4 Obbiettivi del progetto.....	17
<b>Capitolo 2: STRUTTURA DEI SISTEMI DI PROVA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Struttura del Bulge Test idraulico .....	18
2.1.1 Flangia base del Bulge Test idraulico .....	20
2.1.2 Flangia superiore Bulge Test idraulico .....	22
2.1.3 Geometria del rompigrinze nel Bulge Test idraulico.....	24
2.2 Struttura del Nakazima Test.....	25
2.2.1 Flangia base del Nakazima Test.....	27
2.2.2 Flangia superiore del Nakazima Test.....	29
2.2.3 Geometria del rompigrinze del Nakazima Test.....	31
<b>Capitolo 3: MODELLI PARAMETRICI .....</b>	<b>33</b>
3.1 Modello parametrico flangia base Bulge Test.....	34
3.2 Modello parametrico flangia superiore Bulge Test.....	35
3.3 Modello parametrico flangia base Nakazima Test.....	36
3.4 Modello parametrico flangia superiore Nakazima Test.....	37
<b>Capitolo 4: BULLONATURA .....</b>	<b>39</b>
4.1 Dimensionamento bullonatura del Bulge Test .....	39
4.2 Dimensionamento bullonatura del Nakazima Test.....	43
<b>Capitolo 5: ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI.....</b>	<b>45</b>
5.1 Scelta dei materiali.....	46
5.2 Definizione della geometria di prova .....	48
5.3 Contatti.....	51
5.4 Mesh.....	55
5.5 Definizione del problema strutturale.....	57

5.6 Risultati.....	60
5.6.1 Spostamenti totali.....	61
5.6.2 Spostamento direzionale .....	62
5.6.3 Deformazione plastica del provino .....	63
5.6.4 Forze di reazione .....	65
<b>Capitolo 6: CONCLUSIONI .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>71</b>
<b>Sitografia .....</b>	<b>72</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>75</b>





## Capitolo 1: INTRODUZIONE

La lamiera è un elemento, tipicamente di acciaio o alluminio, in cui una dimensione è più piccola rispetto alle altre. Tale dimensione è chiamata spessore ed è solitamente dell'ordine di qualche millimetro. Studiare le proprietà di una lamiera metallica risulta assai importante in ambito meccanico, a causa del vastissimo campo di applicazione che trova tale elemento.

Al fine di comprendere le proprietà che caratterizzano le lamiere metalliche, è bene prima capire come questi elementi sono prodotti. Infatti, dal ciclo di produzione di una lamiera ne dipendono poi le sue prestazioni meccaniche.

Le lamiere sono ottenute tramite un ciclo di lavorazione per deformazione plastica detta di *laminazione*, tipicamente eseguita prima in vari step a caldo ed infine, un ultimo ciclo realizzato a freddo.

È la temperatura omologa  $T_h$ , ossia il rapporto tra la temperatura alla quale avviene il processo e la temperatura di fusione del materiale lavorato, che ci fa capire se una lavorazione per deformazione plastica avviene a caldo, a freddo, o a tiepido:

$$T_h = \frac{T_{processo}}{T_{fusione}}$$

La laminazione è una lavorazione per deformazione plastica, divisa in vari cicli, che si può vedere nella *Figura 1.a*. Si parte dai primi step dove un blocco di materiale, di forma, principalmente parallelepipedo e dallo spessore consistente, anche di 500 mm, viene fatta passare tra dei rulli controrotanti che accolgono il materiale e riducono lo spessore del parallelepipedo.

Questi primi step sono necessariamente realizzati a caldo [ $T_h > 0,5$ ] poiché è qui che avviene la deformazione maggiore, passando da uno spessore prominente ad uno spessore, anche, dell'ordine di qualche millimetro. Realizzando il processo di lavorazione a caldo si ottengono grandi deformazioni plastiche pur mantenendo delle forze moderate durante la trasformazione.

L'ultima passata, non necessaria, ove prevista è tipicamente realizzata a freddo [ $T_h < 0,25$ ]. Questo step finale mira ad ottenere una migliore regolarità della sezione trasversale della lamiera.

Dopo la laminazione a freddo il materiale, però, risulterà incrudito in quanto si ottiene una struttura cristallina caratterizzata da grani allungati nella direzione di laminazione, detta in inglese *Rolling Direction*, pertanto il materiale presenterà un comportamento *anisotropo*<sup>1</sup> a meno che non venga sottoposto ad una ricottura post laminazione, per eliminare l'incrudimento subito.

I materiali con cui vengono realizzate le lamiere dipendono dall'industria cui fare riferimento. Nell'industria meccanica si usano principalmente acciai al carbonio, l'industria delle automobili utilizza acciai inox, acciai al carbonio, acciaio altoresistenziali e leghe di alluminio.

---

<sup>1</sup> **Anisotropia:** è la proprietà per cui un certo ente fisico, in questo caso le proprietà meccaniche, ha caratteristiche che dipendono dalla direzione lungo la quale vengono considerate

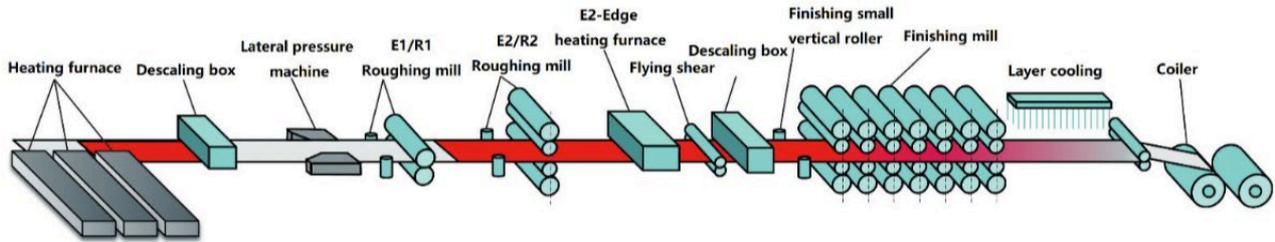


Figura 1.a

Le lavorazioni per deformazione plastica delle lamiere hanno un vastissimo campo di applicazione, basti pensare all'industria automobilistica in particolare, ma anche all'industria degli elettrodomestici bianchi, all'industria aeronautica, aerospaziale e navale.

Per cui risulta di fondamentale importanza studiare il comportamento delle lamiere alla deformazione plastica.

La formabilità delle lamiere è la capacità della lamiera di subire deformazione plastica senza arrivare a rottura. È un aspetto essenziale da conoscere per realizzare un processo di lavorazione. Essa dipende dalle caratteristiche del materiale, per esempio l'anisotropia, ma anche dalle condizioni in cui avviene il processo.

Per studiare la formabilità si usano vari metodi, i più usati solitamente sono la *prova di Erichsen*, il *Bulge Test idraulico* ed il *Nakazima Test*.

L'obiettivo di questa tesi è di progettare una macchina in cui si possono eseguire le prove di Bulge test e Nakazima Test, pertanto, studiamo prima, i loro aspetti in via teorica.

## 1.1 Prova di Erichsen

La prova di Erichsen consiste in un apparato formato da una matrice che accoglie al suo interno un punzone dalla forma emisferica ed un premilamiera.

Il provino, che in questo caso è una lamiera metallica, solitamente a forma di disco, viene bloccato tra la matrice ed il premilamiera con un'opportuna forza agente sul premilamiera. La forza deve essere abbastanza elevata al fine di evitare che il provino subisca uno slittamento dovuto al punzone che lo richiama verso l'interno.

Spesso matrice e premilamiera sono dotate di un dispositivo, detto *rompigrinze*, che provocando una deformazione plastica locale sul provino, riesce a bloccare completamente il flusso radiale centripeto del materiale costituente la lamiera metallica.

A questo punto il punzone inizia la sua corsa dal basso verso l'alto, deformando il provino fino a portarlo alla rottura che avviene sull'estradosso della lamiera, ossia la zona più sollecitata.

Per quantificare la formabilità si utilizza un indice chiamato *indice di formabilità* (anche detto *numero di Erichsen*) che rappresenta la corsa del punzone fino alla rottura del provino.

In questa prova ciò che si ottiene è uno *stato deformativo di stretching biassiale perfettamente bilanciato*. Facendo riferimento a coordinate cilindriche si ricava che la deformazione circonferenziale  $\varepsilon_\theta$  è uguale alla deformazione in direzione radiale  $\varepsilon_r$ , entrambe di trazione, mentre sullo spessore si avrà una deformazione assiale a compressione  $\varepsilon_z$ .

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_r > 0 \qquad \varepsilon_z < 0$$

La prova di Erichsen presenta dei limiti, infatti, essendo il provino completamente bloccato per evitare lo scorrimento della lamiera metallica verso l'interno dell'apparato, la deformazione avviene tutta a spese dello spessore, condizione che non corrisponde alla realtà. Questo tipo di prova studia la formabilità in condizioni assai più severe rispetto alle lavorazioni reali.

Si ha anche un problema di attrito all'interfaccia punzone – provino, le superfici a contatto sono certamente lubrificate, ma l'attrito non si annulla. Inoltre, utilizzare un lubrificante, porta degli ostacoli a livelli pratici. Infatti, per uniformare il test e renderlo confrontabile, ogni laboratorio di prova deve utilizzare un determinato tipo di lubrificante, a fissate condizioni quali temperatura e pressione.

Il limite più grande è che la formabilità è quantificata in una condizione ben precisa, ossia quella di stretching biassiale perfettamente bilanciato, che è ben diverso dalla realtà.

Nella realtà, infatti, quando si esegue una lavorazione per deformazione plastica su lamiera, lo stato tensionale che si ottiene varia da punto a punto sulla lamiera e ciò ha un impatto in modo diverso sulla formabilità.

## 1.2 Bulge Test idraulico

Con la prova Bulge Test idraulico si supera il problema relativo all'attrito tra punzone e lamiera, inevitabilmente presente nella prova di Erichsen.

L'apparato costituente una macchina di Bulge Test idraulico è equivalente alla prova di Erichsen, se non per l'assenza del punzone, che in questa prova viene sostituito da un fluido in pressione. Uno spintore mette in pressione un olio che esercita una pressione sulla lamiera metallica, deformandola nelle medesime condizioni della prova di Erichsen. La configurazione di un sistema di prova di questo tipo si può vedere nella *Figura 1.b*.

La formabilità è misurata con l'*indice di formabilità* che qui è rappresentato dall'altezza della cupola, formata dal provino, a rottura.

Ciò che però rappresenta un reale limite è che si ottiene, come nella prova di Erichsen, uno stato tensionale di stretching biassiale perfettamente bilanciato, uno stato deformativo troppo specifico e ben lontano da quelli che si ottengono durante le lavorazioni per deformazione plastiche di lamiera.

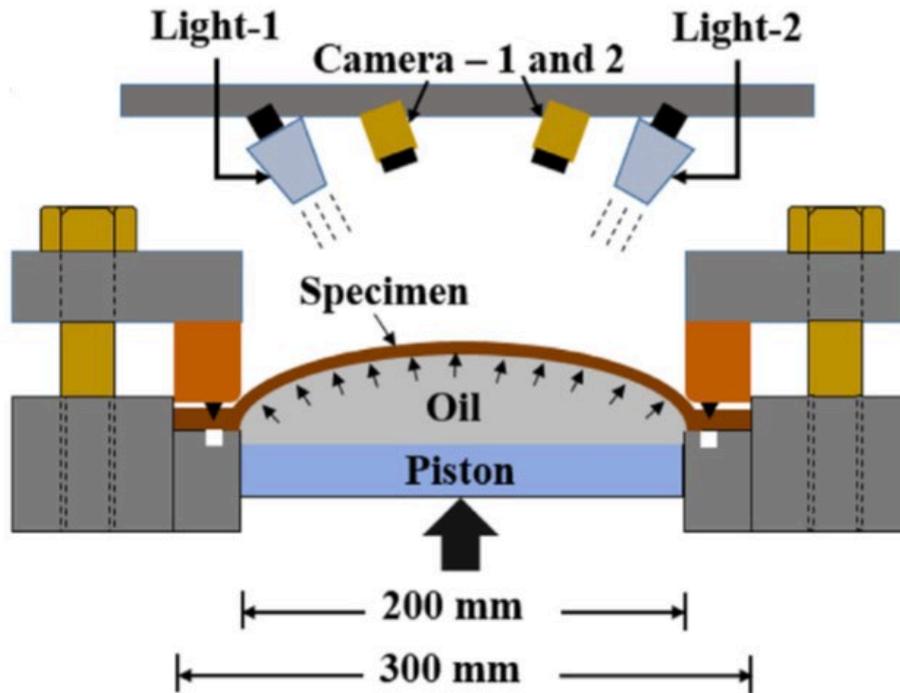


Figura 1.b

Il provino al termine della prova assume la forma di una cupola per cui si ha uno stato di tensione biassiale non piano, in cui le fibre esterne dell'estradosso sono più sollecitate di quelle interne dell'intradosso. Si rivela, a causa della geometria della matrice e del prelamiera, che la sommità della cupola è quasi sferica, per cui si può determinare lo stato tensionale mediante il raggio di curvatura  $R$  e dalla pressione del fluido  $p$ . Facendo riferimento ad un sistema di coordinate cilindriche in cui la direzione circonferenziale è indicata da  $\theta$ , quella radiale da  $r$  e quella assiale da  $z$ , la tensione radiale è pari a:

$$\sigma_r = \frac{pR}{2s}$$

Sella cupola vige uno stato di tensione biassiale la cui componente circonferenziale  $\varepsilon_\theta$  è uguale a quella radiale  $\varepsilon_r$ .

La deformazione istantanea dello spessore  $\varepsilon_z$  (e dunque lo spessore istantaneo  $s$ ) può essere ottenuto dalla misura della deformazione radiale  $\varepsilon_r$  e circonferenziale  $\varepsilon_\theta$  usando la condizione di costanza del volume espressa da:

$$\varepsilon_z = -\varepsilon_r - \varepsilon_\theta$$

## 1.3 Nakazima Test

Il Nakazima test, nell'apparato, si presenta identico alla prova di Erichsen nel funzionamento. Per mostrare l'apparato si riporta il sistema di riferimento definito dalla normativa UNI EN ISO 12004-2

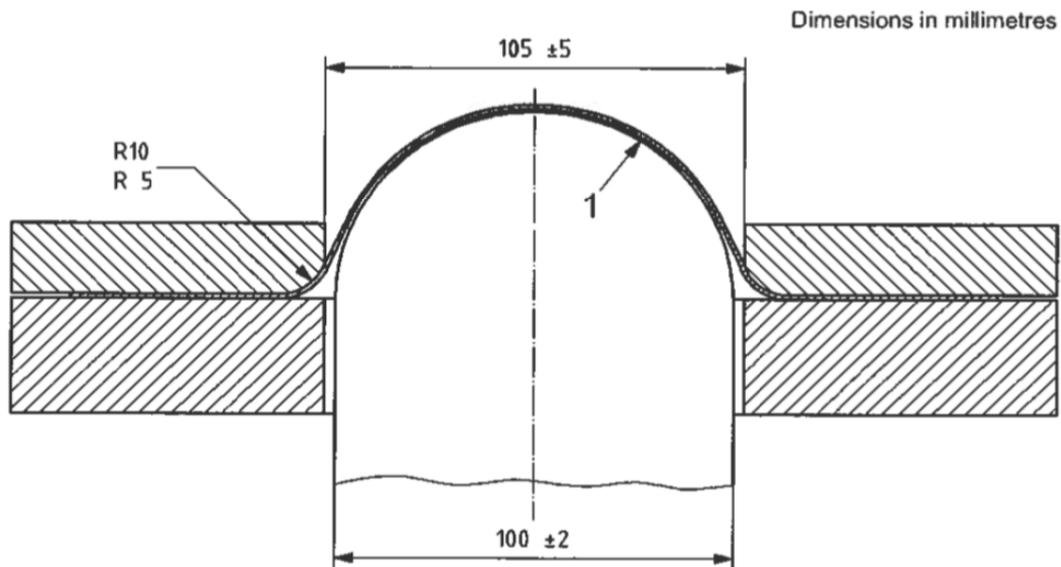


Figura 1.c: Geometria dell'apparato Nakazima Test secondo normativa UNI EN ISO 12004-2

Ciò che differenzia questo test dalla prova di Erichsen e dal Bulge Test idraulico, evolvendo e affinando i risultati ottenuti, è la forma del provino. Vengono effettuate, infatti, diverse prove, usando provini con geometrie differenti. La geometria, di un possibile provino tipo, si può vedere in *Figura 1.d*, recuperata dalla normativa UNI EN ISO 12004-2.

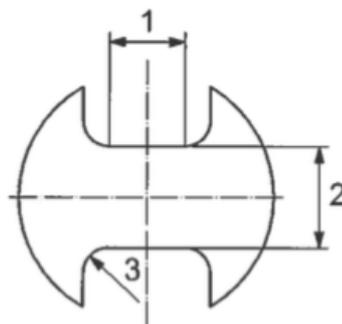


Figura 1.d

Dove si definiscono:

- 1: Lunghezza del provino, che verrà indicata con la lettera  $L$
- 2: Larghezza del provino, che si indenterà con  $W$
- 3: Raggio di raccordo ( $R = 20 \text{ mm} \div 30 \text{ mm}$ )

Si parte dalla prima prova utilizzando un provino a forma di disco, il cui rapporto lunghezza ( $L$ ) su larghezza ( $W$ ) è uguale a 1. Questo primo step è quindi analogo alla prova di Erichsen.

$$\text{Rapporto} = \frac{L}{W}$$

Negli step successivi vengono effettuate numerose prove, variando il rapporto lunghezza ( $L$ ) su larghezza ( $W$ ). In particolare, si riduce la larghezza mantenendo però costante la lunghezza, per cui man mano si aumenta il suddetto rapporto.

Nel primo step quindi la lamiera risulta bloccata su tutto il contorno, poiché è un disco. Nelle prove successive, invece, riducendo progressivamente la larghezza, diminuisce la parte di provino bloccato al contorno dal rompigrinze.

In questo modo si ottengono stati deformativi differenti prova dopo prova, infatti, al variare del rapporto  $\frac{L}{W}$  si riesce a studiare il comportamento del materiale in stati deformativi differenti, colmando così la principale lacuna della prova di Erichsen e del Bulge test idraulico.

Sulle lamiere metalliche viene applicata una griglia con numerosi elementi finiti di forma tipicamente circolare (o anche quadrata). Questa griglia permette di misurare localmente la deformazione che subisce la lamiera metallica.

Si parte dalla prima prova, il rapporto  $\frac{L}{W} = 1$ , il provino ha la forma di un disco, si ottiene in questo caso uno stato tensionale di stretching biassiale perfettamente bilanciato, analogamente alla prova di Erichsen e Bulge test idraulico. In questo caso gli elementi circolari che sono stati applicati sul provino, al termine della prova avranno ancora una forma circolare.

Dalla seconda prova alle successive, viene aumentato il rapporto  $\frac{L}{W}$  riducendo la larghezza  $W$ . Rispetto alla prima prova, ora, minor parte della lamiera è bloccata tra matrice e premilamiera, quindi, riducendo la larghezza mantenendo costante la lunghezza, aumenta la zona della lamiera libera dal rompigrinze.

In queste circostanze la griglia con elementi finiti di forma circolare applicata sul provino, per quantificare la deformazione, alla fine della prova presenterà elementi non più circolari, bensì ellittici. Perciò si misura la deformazione del singolo elemento lungo l'asse maggiore dell'ellisse e lungo l'asse minore, ottenendo così rispettivamente la *deformazione maggiore* (*major strain*  $\varepsilon_1$ ) e la *deformazione minore* (*minor strain*  $\varepsilon_2$ ).

Per ogni provino, al termine di ogni prova, viene misurata la deformazione maggiore e minore. I risultati ottenuti vengono riportati in un diagramma in cui sulle ascisse si ha la deformazione minore e sulle ordinate la deformazione maggiore. Si ottengono una serie di punti che ci mostrano una curva. Tale curva, chiamata *Curva Limite di Formabilità* (in inglese *Forming Limit Curves, FLC*) rappresenta la condizione di rottura del materiale che compone il provino al *variare* dello stato deformativo.

Lo stato deformativo che si ottiene, si è detto essere differente da prova a prova, causa diversa geometria del provino, infatti:

- nella prima prova si ha uno *stato tensionale di stretching biassiale perfettamente bilanciato* in cui la deformazione maggiore e minore si eguagliano e sono entrambe positive, quindi di trazione:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 > 0$$

- riducendo la larghezza del provino viene favorito il flusso radiale centripeto del materiale, poiché meno materiale della lamiera è bloccata dal premilamiera. In questa prova, allora, sull'elemento finito della griglia avremo una deformazione lungo l'asse maggiore di trazione, ed una deformazione lungo l'asse minore sempre di trazione che ora non eguaglia più la deformazione maggiore, ma sarà più piccola.

Per cui non si ha più uno stato tensionale di stretching biassiale perfettamente bilanciato, esso sarà di trazione biassiale ma non più bilanciato:

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > 0$$

- si eseguono più prove, riducendo sempre di più la larghezza del provino fino ad arrivare ad uno stato tensionale in cui la deformazione maggiore sarà di trazione ma la deformazione minore risulta diminuita fino ad ottenere il valore nullo.

Si ottiene quindi uno stato di deformazione piana:

$$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 = 0$$

- nelle prove successive, continuando sempre ad aumentare il rapporto  $\frac{L}{W}$ , si giunge ad una condizione in cui la deformazione maggiore sarà di trazione mentre la deformazione minore continua a decrescere oltre lo zero e sarà quindi di compressione:

$$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0$$

- si arriva così alla prova finale in cui la deformazione minore di compressione sarà pari alla metà della deformazione maggiore cambiata di segno.

Si ottiene così uno stato di trazione monoassiale:

$$\varepsilon_2 = -2\varepsilon_1$$

Nella successiva *Tabella 1*, si vogliono riportare dei provini ottenuti alla conclusione di ogni prova, in cui si può osservare che per i provini in riga A si è ottenuto uno stato di trazione monoassiale, quelli in riga C, si è pervenuto ad uno stato piano ed infine, per i provini in riga E, si è ottenuto uno stato di stretching biassiale perfettamente bilanciato.

Si nota anche la griglia con gli elementi circolari che è stata posizionata sul provino.

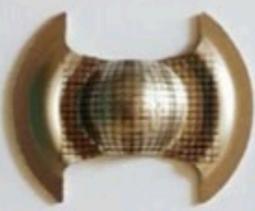
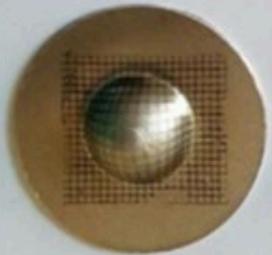
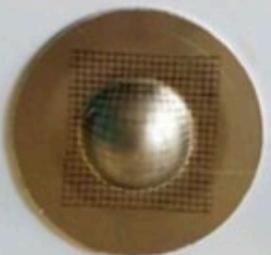
Sample geometry		Punch speed value		
		0.1 mm/s	7500 mm/s	12000 mm/s
A	Uniaxial tension			
B	Near plain strain			
C	Plain strain			
D	Biaxial stretching			
E	Balanced Biaxial stretching			

Tabella 1.1

Per cui il vantaggio del Nakazima Test è che permette di passare attraverso tre stati tensionali differenti, partendo dallo stato di stretching biassiale perfettamente bilanciato, ad uno stato di deformazione piana, ed infine ad uno stato di trazione monoassiale.

Misurando i dati ottenuti durante le prove, graficando in un diagramma tali deformazioni maggiori e minori, si ottengono le curve limite di formabilità (FLC), la cui incertezza dipende dal numero di prove effettuate e riportate nel grafico.

Queste curve sono molto utilizzate da tutti coloro che eseguono e progettano lavorazioni per deformazione plastica sulle lamiere, nonché per simulare le lavorazioni stesse su software FEM dove le FLC sono un fondamentale input da fornire a tali programmi.

La curva del diagramma rappresenta il luogo dei punti in cui la lamiera subisce rottura, per cui divide il grafico in due zone, al di sotto della FLC si ha la così detta “zona safe” in cui non dovrebbe verificarsi rottura e si rientra nei margini di sicurezza. Al di sopra della curva avremo, al contrario, la “zona di failure” corrispondente a rottura.

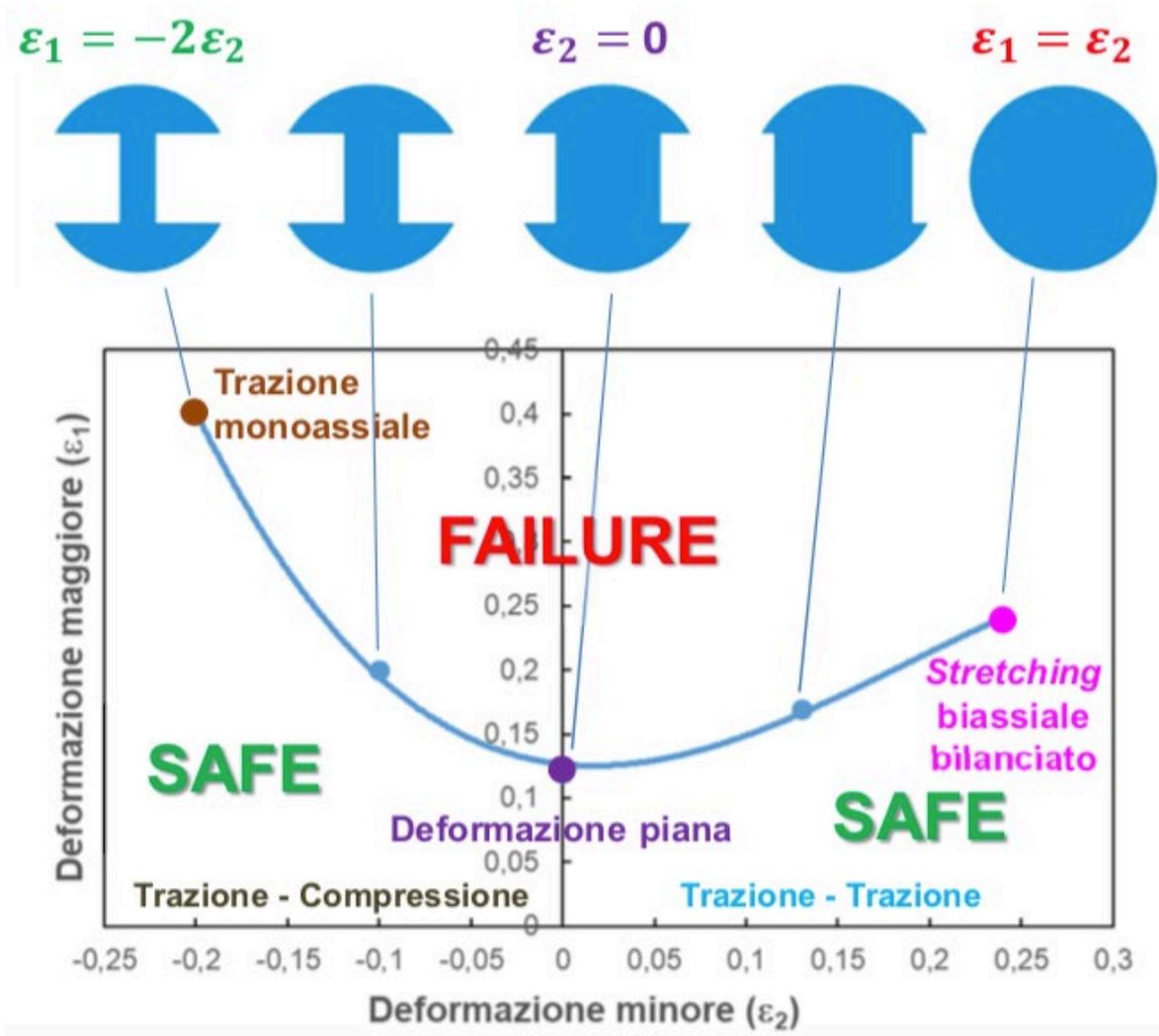


Figura 1.e

Questo è un esempio di una curva limite di formabilità, si vuole evidenziare che lo stato di deformazione piana, dove la minor strain è nulla, è quello più gravoso, poiché la zona safe è minore. Inoltre, si vede che con deformazioni minori di compressione si ottengono deformazioni maggiori più elevate.

Infine, si possono anche ottenere le *curve limite di formabilità approssimate*. Queste curve richiedono meno prove e sono rappresentate, semplicemente, da due rette:

- Una retta inclinata di  $30^\circ$  rispetto la direzione orizzontale nel quadrante di destra
- Una retta inclinata di  $45^\circ$  rispetto l'orizzontale nel quadrante di sinistra

L'origine di entrambe le rette è la condizione di deformazione piana che viene indicata con  $FLC_0$ . L'unica incognita per tracciare la curva approssimata è quindi la posizione di tale origine. Il punto  $FLC_0$  si può conoscere, per via approssimativa, anche senza effettuare prove. Infatti, in letteratura, si può stimare attraverso diversi modelli empirici, un esempio ne è l'equazione empirica di Altan che fornisce il punto  $FLC_0$  in funzione del coefficiente di incrudimento<sup>2</sup> del materiale e dello spessore della lamiera, in particolare risulta che  $FLC_0$  è proporzionale a tali grandezze:

$$FLC_0 = \frac{n}{21} (23,3 + 14,1 \cdot s)$$

$n$  = coefficiente di incrudimento

$s$  = spessore della lamiera

Questa formula empirica mostra che all'aumentare del coefficiente di incrudimento e all'aumentare dello spessore della lamiera la posizione del punto  $FLC_0$  si sposta nel grafico verso l'alto, per cui, aumenta la zona di sicurezza e di conseguenza la formabilità della lamiera.

A titolo esemplificativo, la seguente *Figura 1.f*, mostra una curva limite di formabilità approssimata.

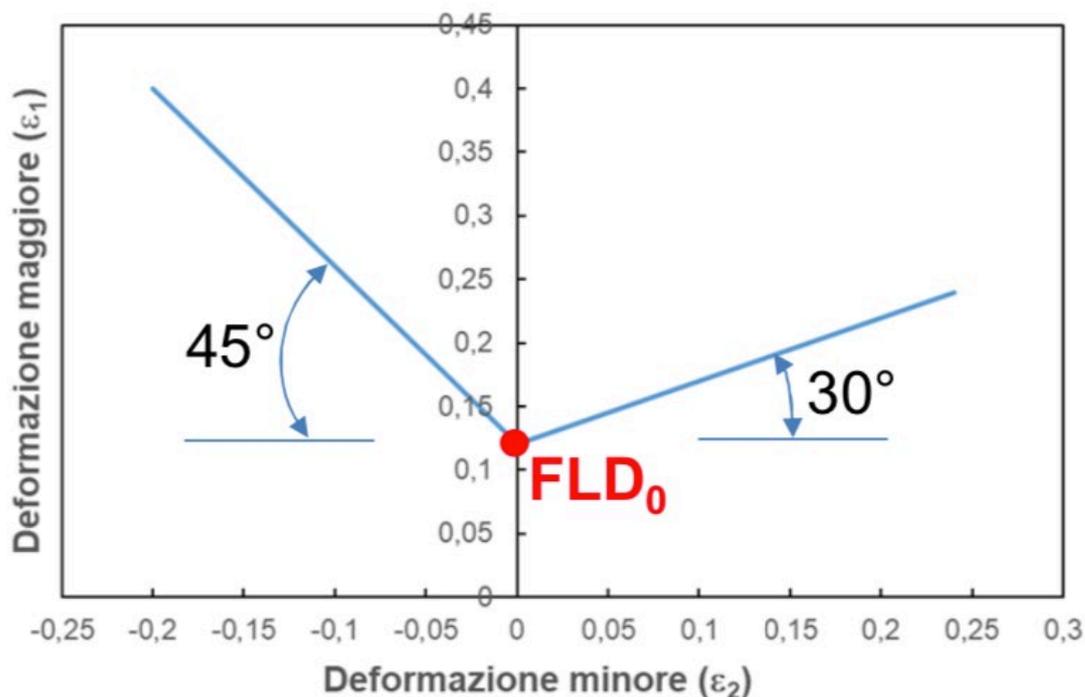


Figura 1.f

<sup>2</sup> **Coefficiente di incrudimento:** l'incrudimento è un fenomeno che ostacola il movimento delle dislocazioni (che sono dei difetti del reticolo cristallino del materiale metallico) aumentando la resistenza a deformazione del pezzo. Gli studiosi hanno dimostrato, grazie ai modelli reologici, che il coefficiente di incrudimento è uguale alla deformazione impartita sul pezzo al presentarsi della strizione localizzata. Quindi al fine di aumentare la lavorabilità è conveniente utilizzare dei materiali con un elevato coefficiente di incrudimento.

## 1.4 Obbiettivi del progetto

Il lavoro è mirato alla progettazione di un banco prova, in cui si possono svolgere il Bulge Test idraulico ed il Nakazima Test, allo scopo di studiare il comportamento delle lamiere metalliche.

Come chiarito nell'introduzione, queste prove sono fondamentali per poter eseguire lavorazioni per deformazione plastica su lamiere. L'obiettivo essenziale di questi test è però quello di ottenere uno stato tensionale in condizioni quanto più simili a quelle che si hanno durante una classica lavorazione.

Proprio a questo scopo, quindi, si è voluto realizzare un banco prova per Bulge Test idraulico con cui si supera il limite causato dall'attrito nella prova di Erichsen, ottenendo uno stato tensionale di stretching biassiale perfettamente bilanciato, uno stato, quindi, in condizione ben precisa.

Il Nakazima Test, invece, ci permette di caratterizzare il materiale di cui è composta una lamiera in stati deformativi differenti, ossia, stato di stretching biassiale perfettamente bilanciato, stato piano e stato di trazione monoassiale. Queste serie di prove ci permettono di ottenere le curve limite di formabilità (FLC). Si è partiti dalla realizzazione di un banco prova in cui l'apparato per Bugle Test idraulico e per Nakazima Test possono essere montati in parallelo e quindi avere il vantaggio di utilizzare un unico gruppo motore in grado di mettere in pressione l'olio, per realizzare la prima prova citata e per movimentare il punzone necessario al Nakazima Test.

In particolare, in questa trattazione, si vuole evidenziare il progetto che ha portato innanzitutto alla realizzazione e dimensionamenti dei modelli delle flange che occorrono al bloccaggio dei provini.

Sono state quindi concepite le componenti, che poi saranno montate sul banco prova. In totale sono stati realizzati quattro parti, due destinate al Bulge Test idraulico e altre due rivolte al Nakazima Test. Di tali componenti si parlerà nel capitolo 2 di questa trattazione.

Durante questa prima fase del lavoro, i modelli sono stati realizzati con il software di CAD Catia. Catia è un programma di Dassault Systèmes. Esso si distingue dalle altre piattaforme similari nell'introduzione dei parametri, fondamentali in fase di progettazione.

Poi, si è dimensionato il sistema di collegamento bullonato che permette il montaggio di questi elementi sul banco prova. La bullonatura è importantissima per una corretta esecuzione dei test, essa deve garantire il corretto serraggio e consentire un completo bloccaggio del provino tra le componenti.

Infine, si è voluto testare l'efficacia di tali flange di bloccaggio, simulando una prova in analisi agli elementi finiti (FEM) così da studiare il comportamento di tutte le parti coinvolte durante lo svolgimento della prova. In particolare, il provino metallico è stato il principale oggetto di studio. Tramite la conclusiva analisi FEM si è potuto conoscere il modo in cui il provino si deforma e se il dimensionamento degli elementi, dedicati ad accogliere provini di materiale metallico, fossero stati opportuni.

## Capitolo 2: STRUTTURA DEI SISTEMI DI PROVA

In questo capitolo si vogliono descrivere il compito delle parti che compongono i sistemi del Bulge Test idraulico e Nakazima Test. Inoltre, si definisce con cura la geometria scelta per tutte le componenti, in particolare quella del dispositivo rompigrinze.

### 2.1 Struttura del Bulge Test idraulico

Le parti che compongono l'attrezzatura del Bulge Test idraulico sono principalmente due. Le componenti in questione, che sono essenzialmente delle flange, saranno poi assemblate su un banco prova tramite un collegamento a viti mordenti.

Il primo componente è la flangia base che ha il compito di accogliere la lamiera metallica, la quale verrà posizionata sopra tale flangia.

Il secondo componente è la flangia superiore: essa ha il compito di bloccare il provino tra le due parti in questione ed impedire lo scorrimento radiale del provino verso l'interno.

Entrambe le parti sono accessoriate con un opportuno dispositivo rompigrinze, formato da un risalto sulla flangia base e da una corrispettiva cavità sulla flangia superiore.

Il rompigrinze tramite una forza, esercitata da una pressa idraulica, alla sommità della flangia superiore, imprime sulla lamiera una deformazione locale che, assieme alla bullonatura, agevola il bloccaggio del provino tra le parti e impedisce completamente il flusso radiale centripeto del materiale costituente la lamiera metallica.

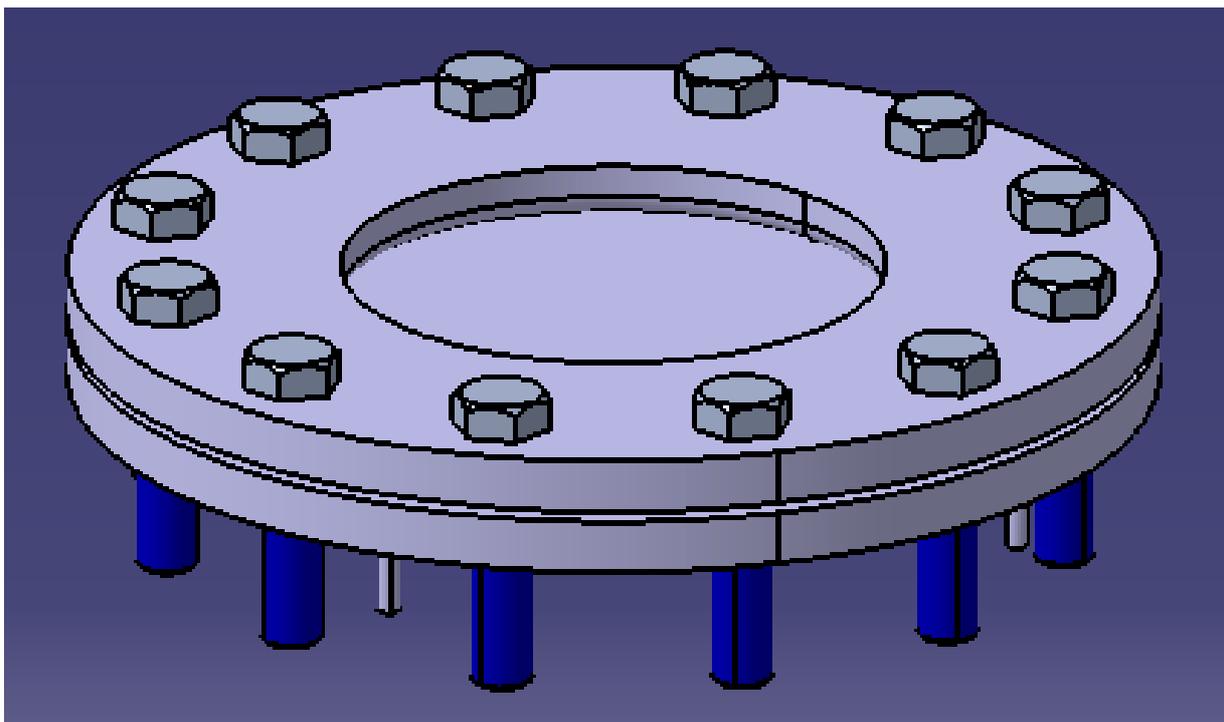


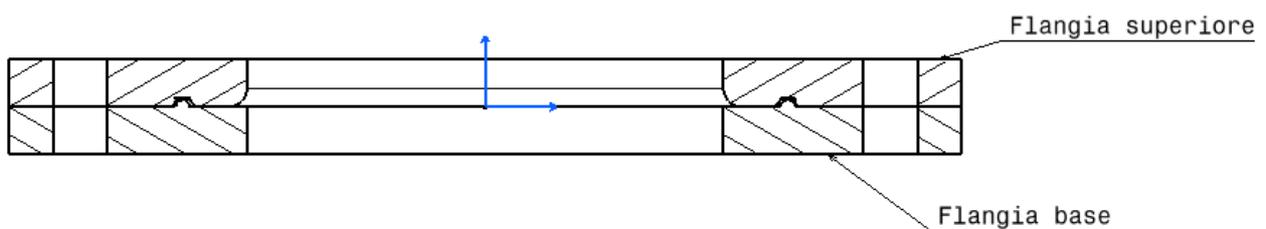
Figura 2.a

In *Figura 2.a* è rappresentato il modello assemblato delle flange che costituiscono la prova Bulge Test idraulico, accessoriate con le viti scelte dopo il dimensionamento, che vedremo nel capitolo dedicato alla bullonatura.

Il sistema è tenuto in posizione da un collegamento a viti mordenti composte da 12 viti M22 classe 10.9. Inoltre, sono presenti sulla Flangia base 4 viti M8 a testa svasata, esse hanno lo scopo solo di serrare una guarnizione ad anello, O – Ring (OR), che si trova tra il banco e la flangia base, necessario a chiudere ermeticamente la camera in cui l'olio sarà in pressione ed evitare possibili trafilamenti di tale fluido.

Le flange sono state dimensionate per poter accogliere un provino dal diametro di 300 mm, con un massimo spessore di 4 mm e per resistere ad una pressione dell'olio pari a 300 bar.

Nei brevi paragrafi successivi vedremo le grandezze fondamentali delle parti.

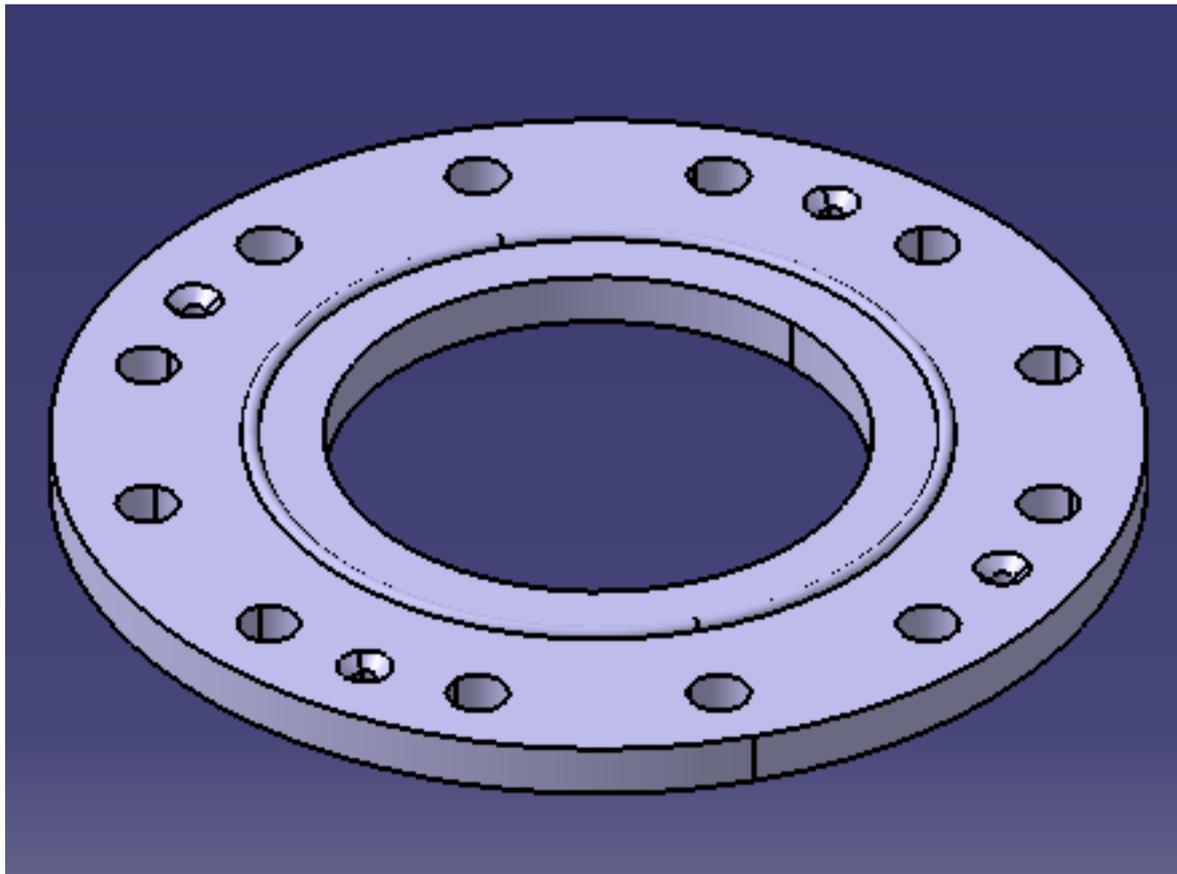


*Figura 2.b: Vista in sezione dell'assemblato Bulge Test idraulico*

### 2.1.1 Flangia base del Bulge Test idraulico

La flangia base si presenta come in *Figura 2.c*.

Le grandezze caratteristiche sono il foro interno di  $200\text{ mm}$ , che accoglierà l'olio in pressione, il diametro esterno da  $400\text{ mm}$ , 12 fori, ricavati su una circonferenza di  $340\text{ mm}$ , dal diametro di  $23\text{ mm}$  per tener conto del gioco necessario all'assemblaggio delle viti M22, ed infine 4 fori con sede svasata per accogliere le viti M8.



*Figura 2.c*

Per una migliore comprensione della geometria si inserisce il disegno tecnico della flangia base in scala 1:2, in cui si evidenzia, nella sezione deviata B – B, la geometria dei fori svasati, con un diametro di  $8,5\text{ mm}$  ed uno smusso caratterizzato da una altezza di  $5\text{ mm}$  ed un angolo di  $49,5^\circ$ .

La flangia presenta un'altezza pari a  $20\text{ mm}$ .

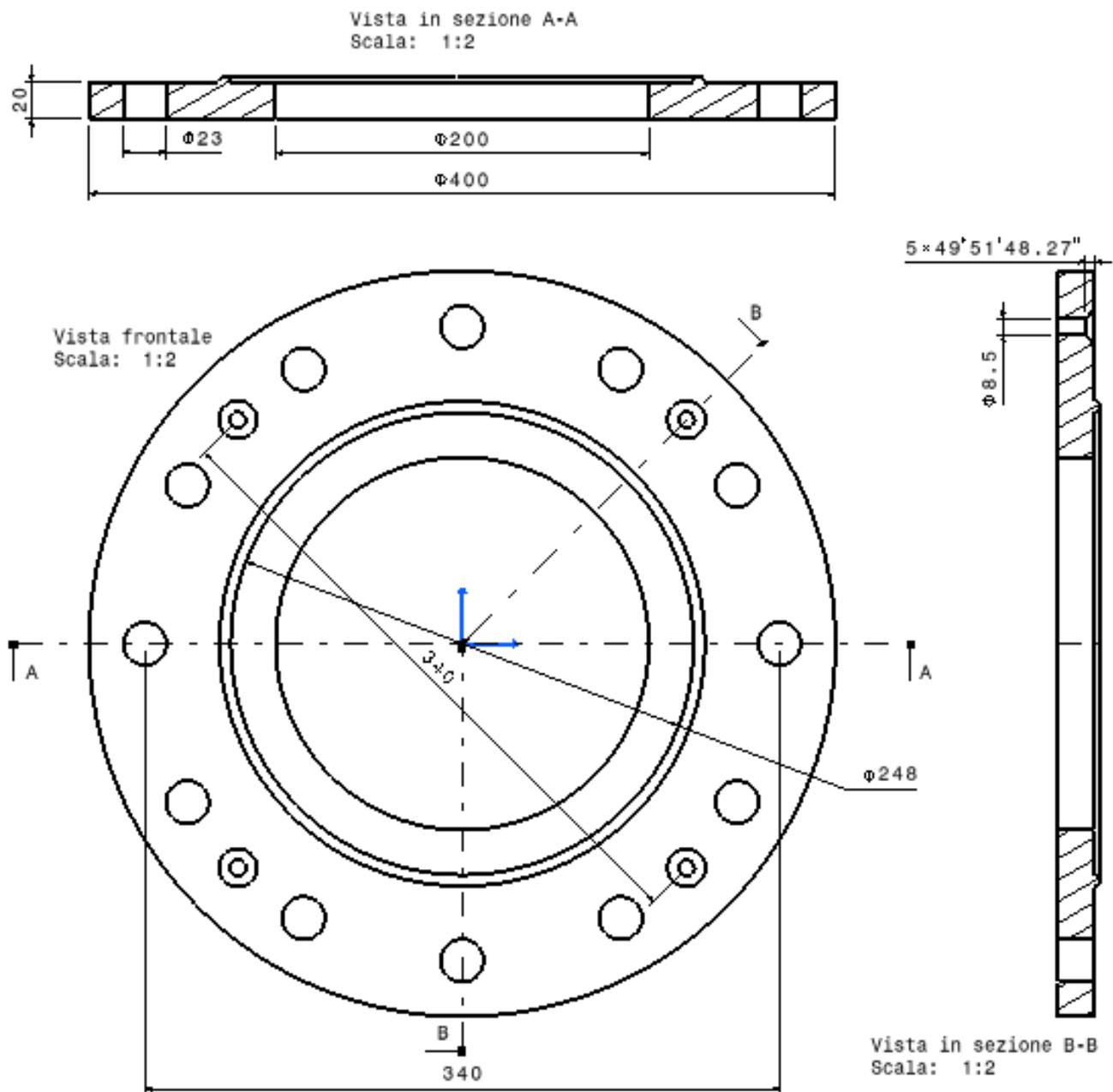


Figura 2.d: Tavola tecnica della flangia base del Bulge Test idraulico

Dalla figura, in particolare dalla sezione A – A si vede anche la presenza del risalto che compone il dispositivo rompigrinze, che in sezione, è costituito da un profilo a cupola.

Nella vista frontale, si vuole evidenziare la posizione del dispositivo rompigrinze che è situato su una circonferenza dal diametro di 248 mm.

## 2.1.2 Flangia superiore Bulge Test idraulico

Come sappiamo essa serve a bloccare il provino tra le parti per il corretto svolgimento della prova.

La flangia è caratterizzata da un foro interno da  $200\text{ mm}$ , per permettere la deformazione del provino, un diametro esterno da  $400\text{ mm}$  ed infine 12 fori da  $23\text{ mm}$  per accogliere le viti M12 che terranno serrate le parti. La flangia presenta un'altezza di  $20\text{ mm}$ .

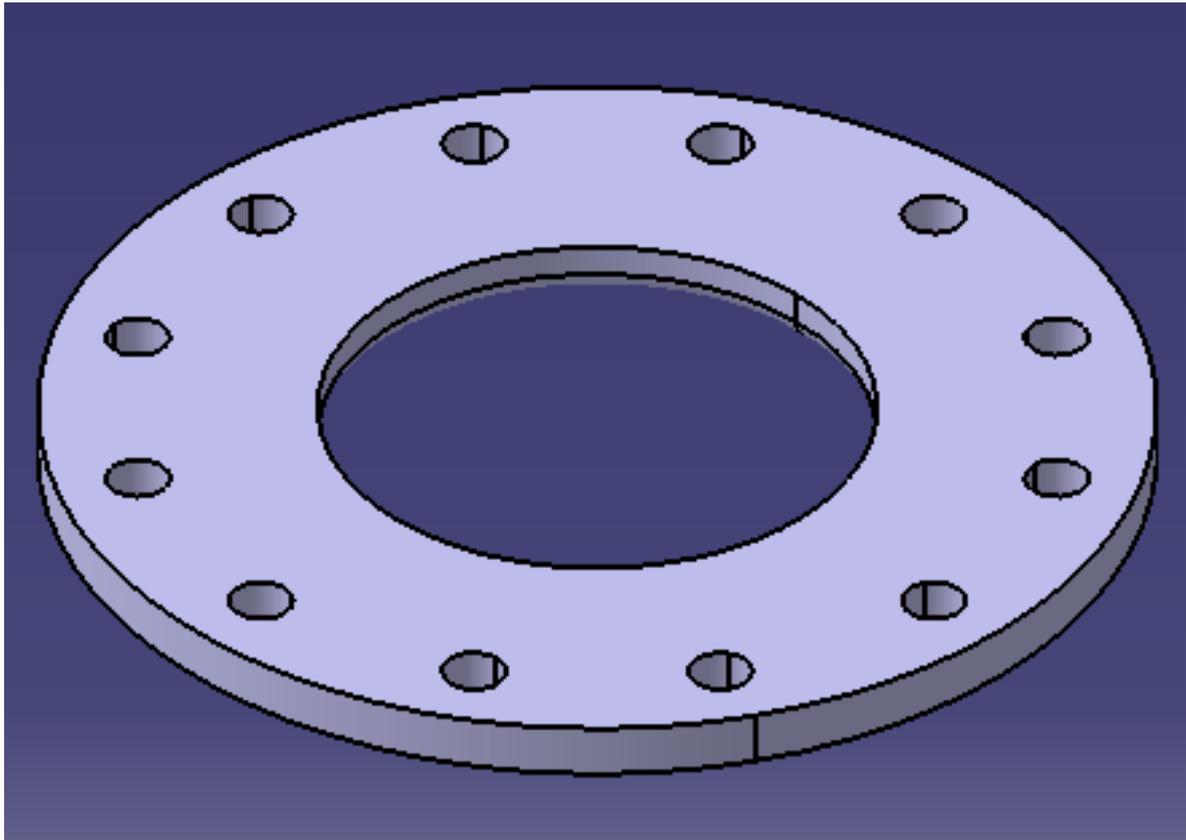


Figura 2.e

La flangia superiore è disposta della cavità che completa il dispositivo rompigrinze, inoltre alla sua base, in concomitanza del foro interno da  $200\text{ mm}$ , è stato inserito un raccordo con un raggio di  $8\text{ mm}$ .

Il raccordo è necessario al fine di evitare una possibile tranciatura del provino, che altrimenti si sarebbe potuta verificare, durante la prova, al contatto tra lamiera metallica e lo spigolo vivo del foro interno della flangia.

Nella pagina che segue è inserito la tavola di tale componente in scala 1:2. Anche qui si evidenzia come i fori siano ricavati su una circonferenza di  $340\text{ mm}$ , per garantire la coassialità dei fori presenti sulla flangia base.

Il dispositivo rompigrinza è caratterizzato da una cavità, come si vede anche dalla sezione A – A, ed è posizionato su una circonferenza dal diametro di 248 mm.

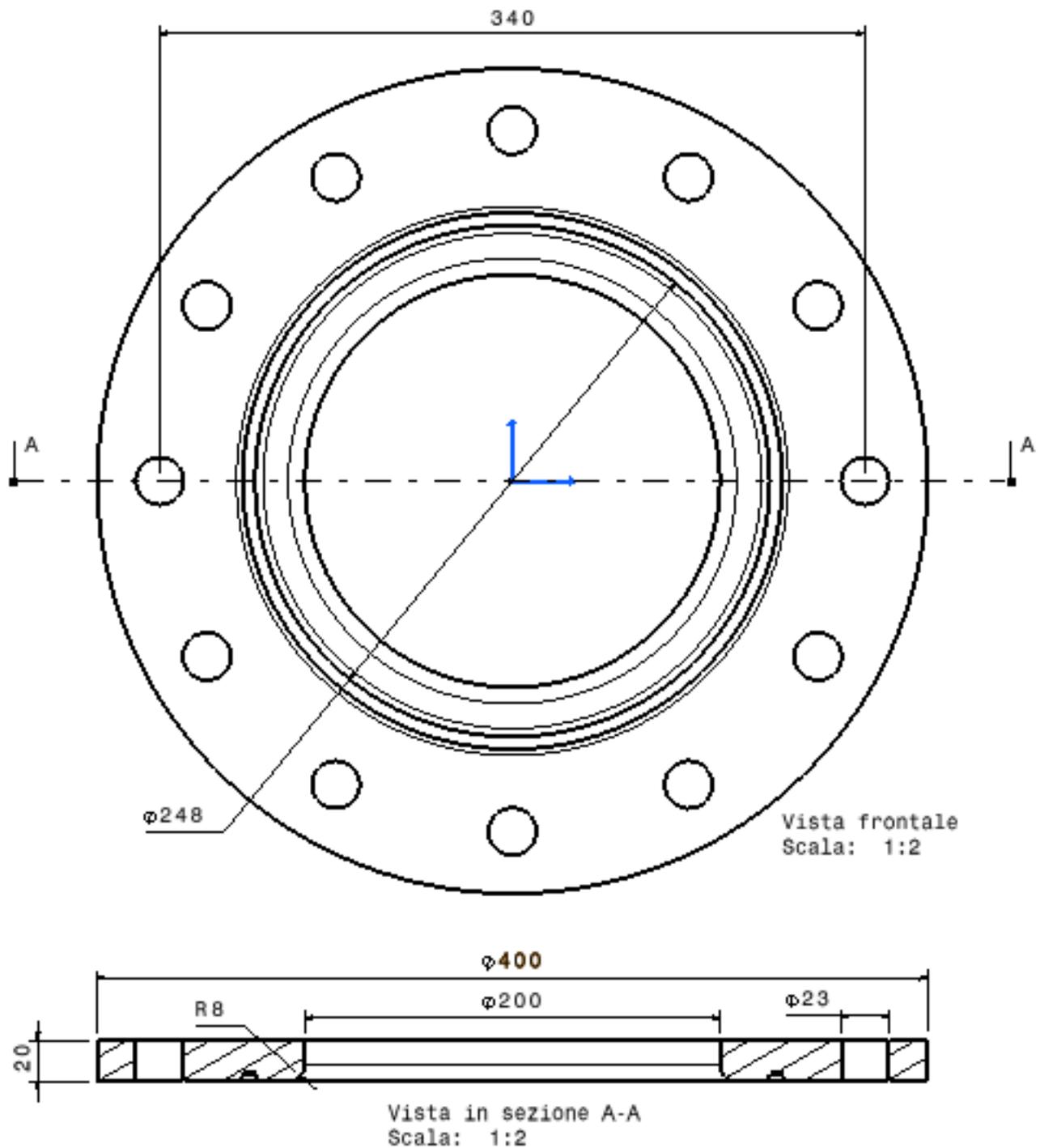


Figura 2.f

Ora si vuole concentrare l'attenzione sulla geometria del dispositivo rompigrinze, per farlo, vengono richiamate le viste in sezione A - A della flangia base e della flangia superiore, in cui sono state evidenziate delle viste in dettaglio.

### 2.1.3 Geometria del rompigrinze nel Bulge Test idraulico



Figura 2.g: Particolare del rompigrinze maschio

In figura si può vedere il risalto maschio del dispositivo rompigrinze: esso è caratterizzato, come si vede dal dettaglio B, da un profilo che richiama la forma di una cupola, presentando un raggio pari a 3 mm.

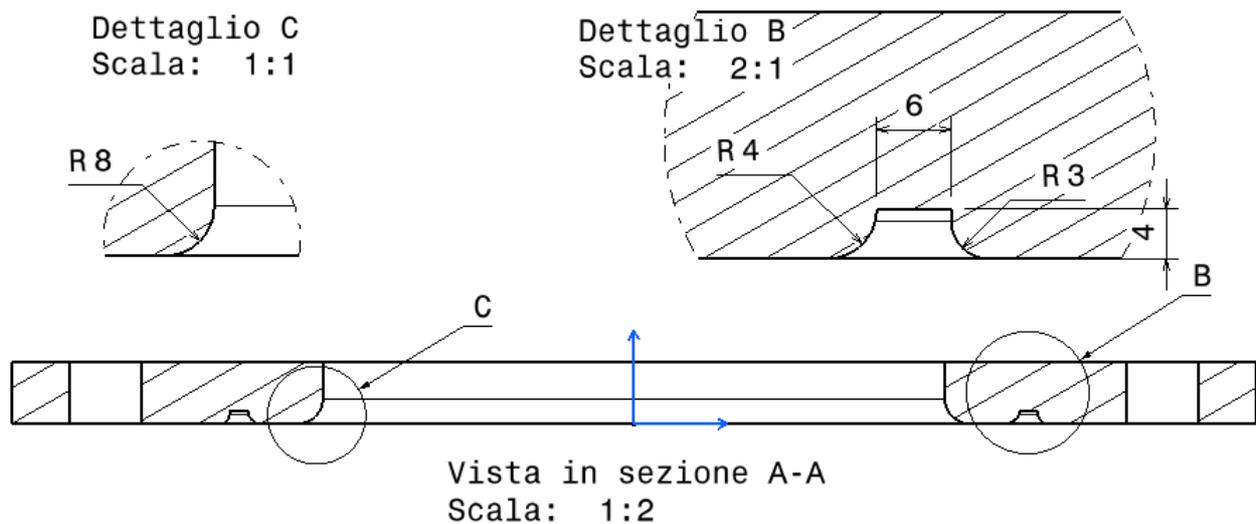


Figura 2.h: Particolare del rompigrinze femmina e del raccordo foro interno

L'obiettivo di questa tavola è invece mostrare la corrispettiva cavità che caratterizza la femmina del dispositivo rompigrinze. La geometria è poco più complessa di quella presente sulla flangia base. Nel dettaglio B si vede come esso abbia una larghezza di 6 mm, pari al diametro del risalto maschio prima

visto, e un'altezza di 4 *mm*. Sono presenti anche due raccordi, uno a destra, di raggio pari a 3 *mm* ed uno a sinistra di raggio 4 *mm*.

Questi raccordi sono necessari per accompagnare la deformazione locale impressa dal rompigrinze sul provino. Se essi non fossero presenti, sarebbero presenti degli spigoli vivi. Tali spigoli, provocherebbero uno scorrimento del materiale metallico del provino, che rischierebbe di raggiungere lo snervamento e portare letteralmente alla tranciatura della lamiera metallica.

Come visto dai disegni tecnici, il dispositivo rompigrinze è ricavato su un diametro di 248 *mm*, questo per garantire un giusto accoppiamento maschio – femmina del dispositivo.

Nel dettaglio C, invece, si vuole notare, con più precisione, il raccordo presente alla base del foro interno della flangia superiore. Esso è raccordato con un raggio di raccordo di 8 *mm* ed ha la stessa funzione, indispensabile, dei raccordi presenti sul rompigrinze femmina, ossia accompagnare la deformazione del provino, questa volta provocato dall'olio in pressione, ed evitare una possibile divisione del materiale costituente il provino metallico.

## 2.2 Struttura del Nakazima Test

In questo paragrafo si vuole porre l'attenzione sulla geometria delle parti che compongono il Nakazima Test.

Le componenti sono sempre due flange, una flangia base ed una flangia superiore che funge da coperchio.

Tali elementi sono stati progettati partendo dai modelli appena visti per il Bulge Test idraulico e modificati opportunamente in base alla norma europea UNI EN ISO 12004-2.

Inoltre, sono stati dimensionati per accogliere una lamiera metallica con diametro massimo di 200 *mm* ed un massimo spessore di 4 *mm*, nonché per resistere ad una forza applicata dal punzone di 70000 *N* in direzione assiale verso l'alto.

Anche questi modelli sono ovviamente provvisti del dispositivo rompigrinze dimensionato analogamente a quello presente nell'apparato Bulge Test idraulico e che anche qui si vedrà in dettaglio alla fine di questo capitolo.

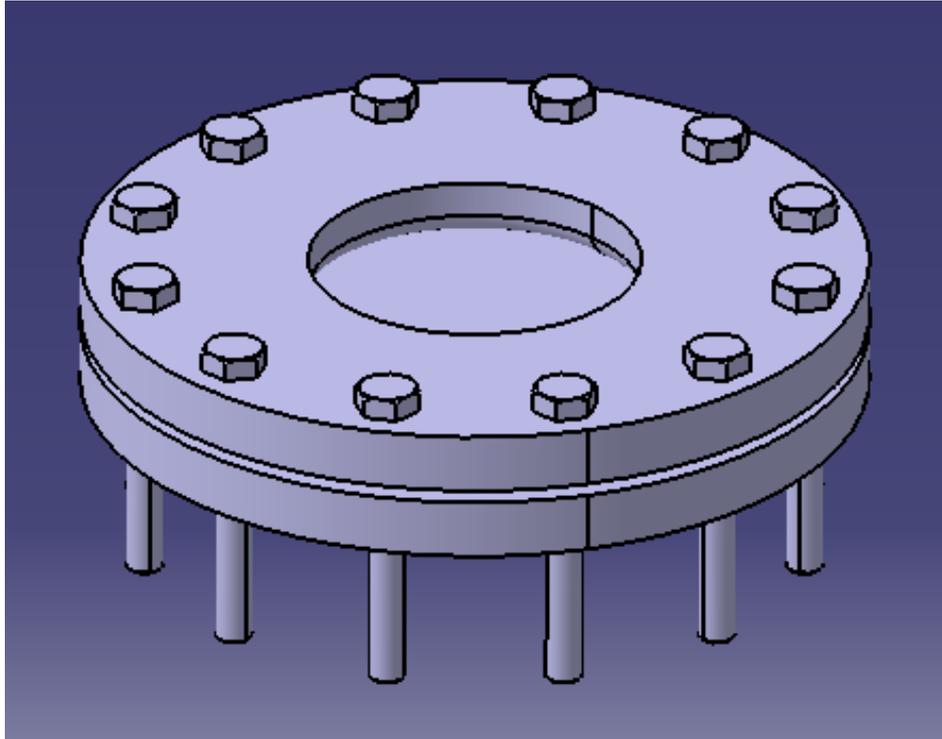


Figura 2.i

In *Figura 2.i* è mostrato il modello assemblato, compreso di provino, della prova Nakazima Test. Tale assemblato verrà poi montato, grazie alle viti presenti in figura, sul banco prova.

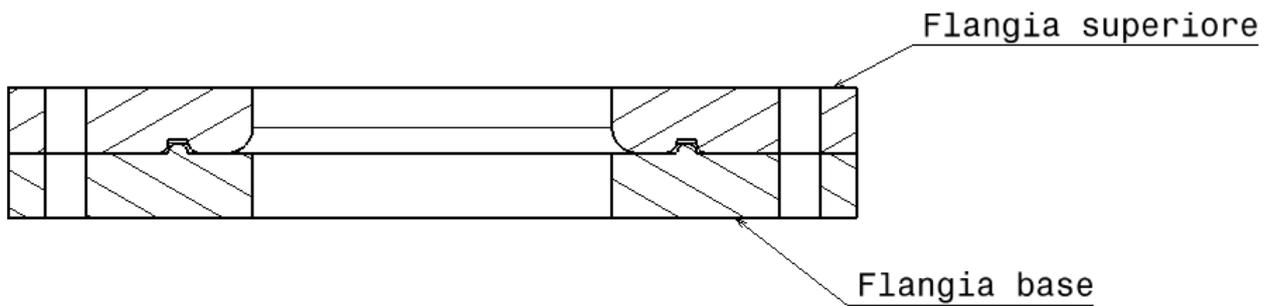


Figura 2.j

## 2.2.1 Flangia base del Nakazima Test

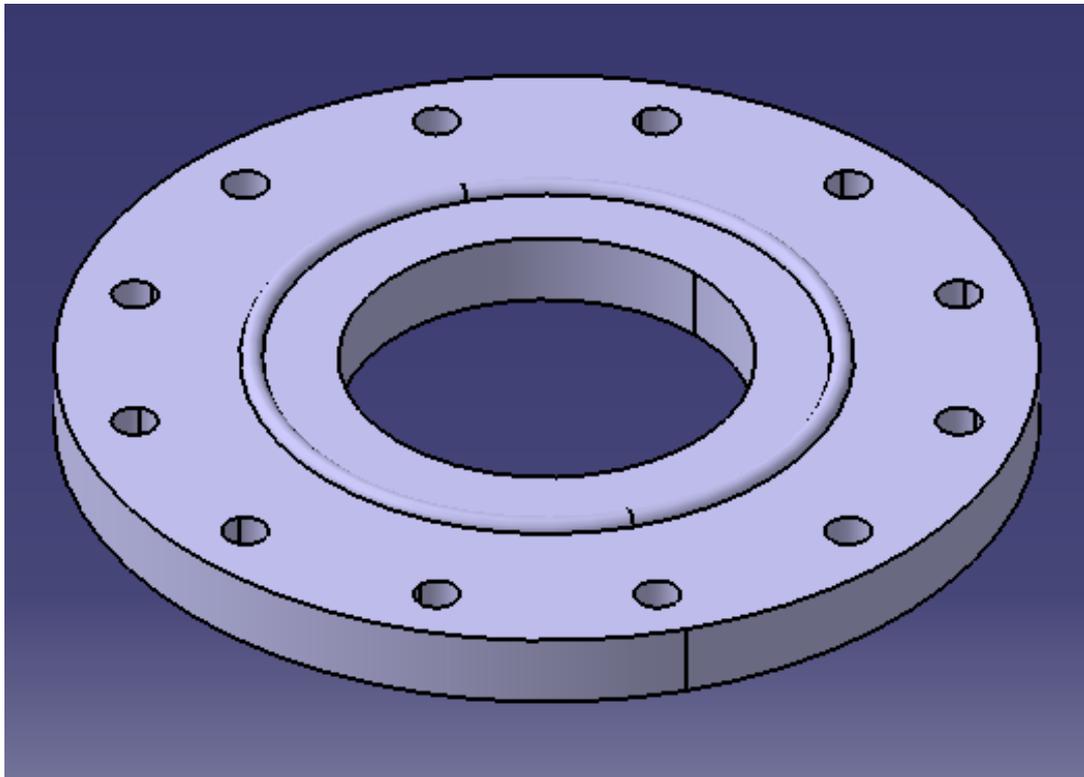
La flangia base presenta un diametro di  $260\text{ mm}$  ed ha un foro di  $110\text{ mm}$ .

Tale foro è stato progettato per accogliere un punzone di forma emisferica dal diametro di  $100\text{ mm}$ . La scelta di maggiorare il foro di  $10\text{ mm}$  è dettata, in base alla norma europea UNI EN ISO 12004-2, per avere volutamente un accoppiamento di gioco tra la superficie laterale del punzone e le flange ed evitare così possibili incastri.

La flangia presenta ovviamente 12 fori disposti su una circonferenza di  $225\text{ mm}$  dal diametro di  $12,5\text{ mm}$  per avere il giusto accoppiamento con le viti M12.

L'elemento ha un'altezza di  $20\text{ mm}$ .

La *Figura 2.k* mostra il modello CAD tridimensionale della flangia base, dimensionata per il Nakazima Test.

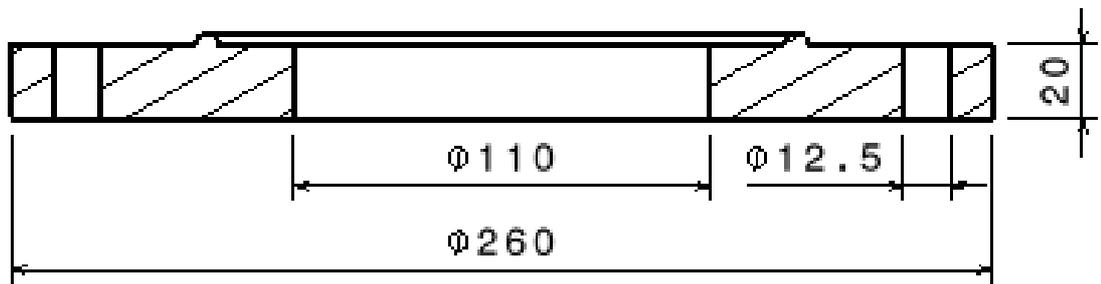


*Figura 2.k*

Come fatto per il Bulge Test idraulico e per un fine di completezza, si riporta la tavola del componente in scala 1:2.

Oltre alle quote che ci caratterizzano le geometrie appena descritte, si nota, nella sezione A – A il risalto che compone il dispositivo rompigrinze, si vede la posizione di tale risalto, ricavato su una circonferenza dal diametro di  $150\text{ mm}$ .

Vista in sezione A-A  
Scala: 1:2



Vista frontale  
Scala: 1:2

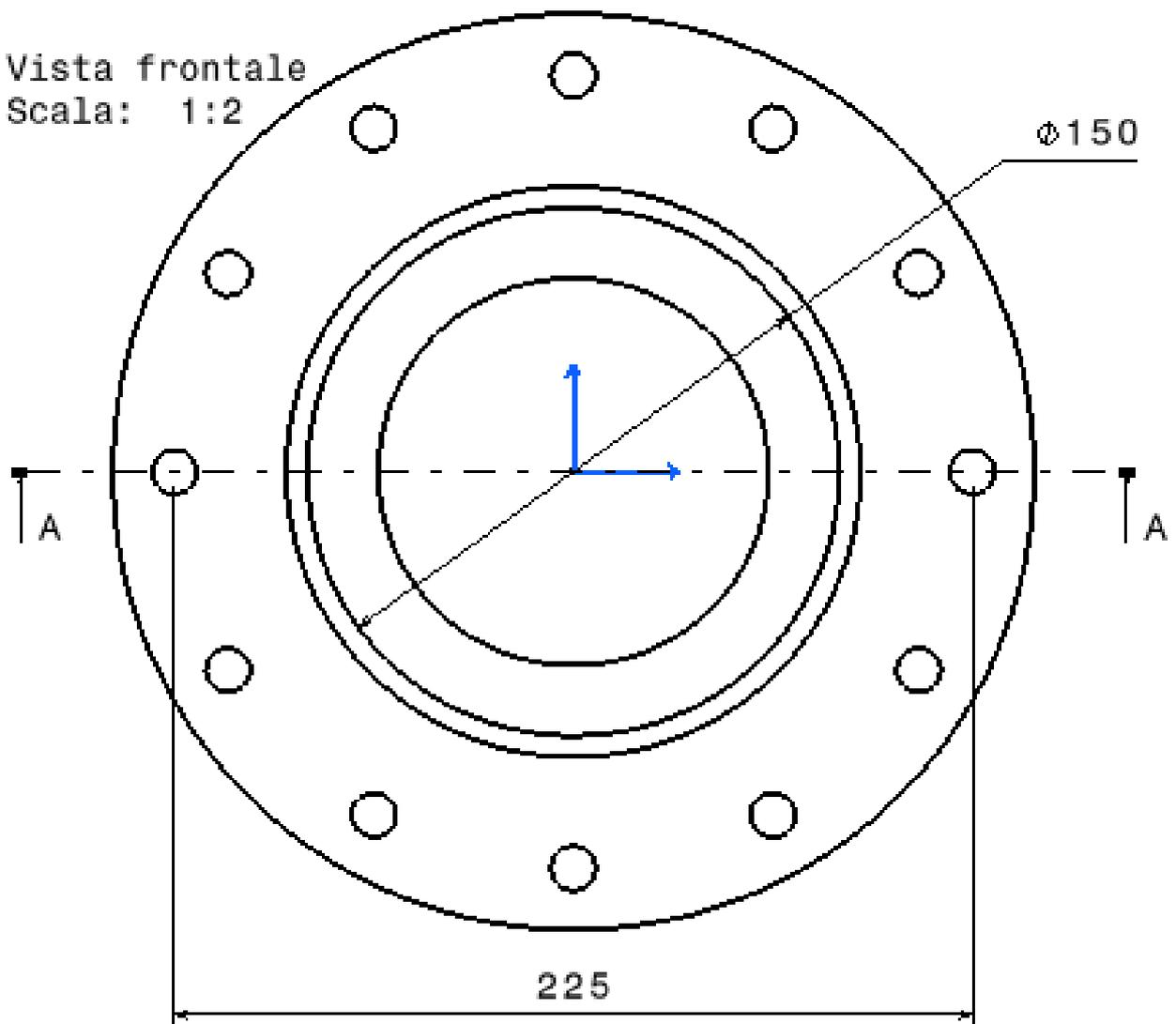


Figura 2.1

## 2.2.2 Flangia superiore del Nakazima Test

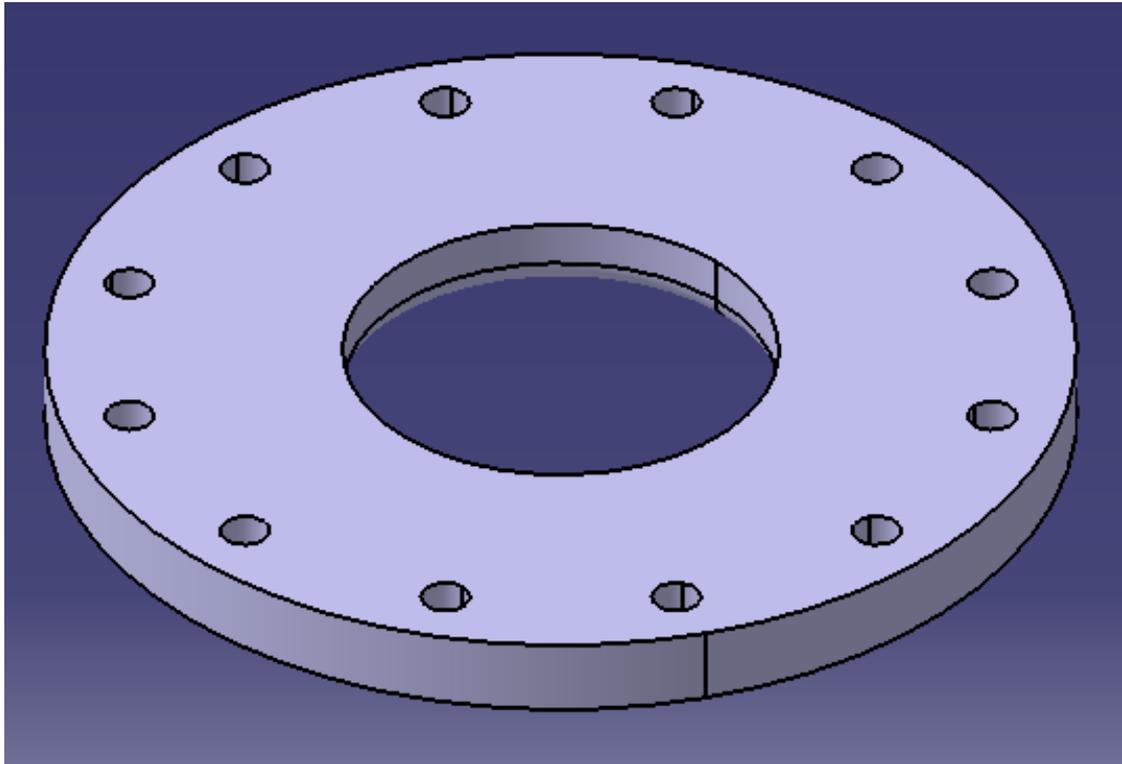


Figura 2.m

La flangia superiore presenta un diametro esterno pari alla flangia base, ossia di  $260\text{ mm}$ .

Ha un foro interno di  $110\text{ mm}$ , sempre per tener conto del gioco punzone – flangia.

È presente il dispositivo rompigrinze sulla faccia inferiore della parte.

La flangia è necessariamente provvista dei 12 fori dal diametro di  $12,5\text{ mm}$ , posizionati su un diametro di montaggio di  $225\text{ mm}$ , garantendo la coassialità dei fori con i fori ricavati sulla flangia base, necessari ad accogliere le viti M12 che serreranno il provino tra le flange e le flange sul banco prova.

Anche questa flangia ha un'altezza di  $20\text{ mm}$ .

Presenta inoltre un raccordo alla base del foro interno, con un raggio di raccordo di  $8\text{ mm}$ .

Questo raccordo, analogamente a quello presente sulla flangia superiore del Bulge Test idraulico, serve ad evitare un possibile pericolo di tranciatura del provino in concomitanza dello spigolo vivo che sarebbe altrimenti presente al contatto tra provino e flangia superiore.

Di seguito il disegno tecnico che mostra tale componente, al fine di comprendere con maggior chiarezza tutte le grandezze appena descritte.

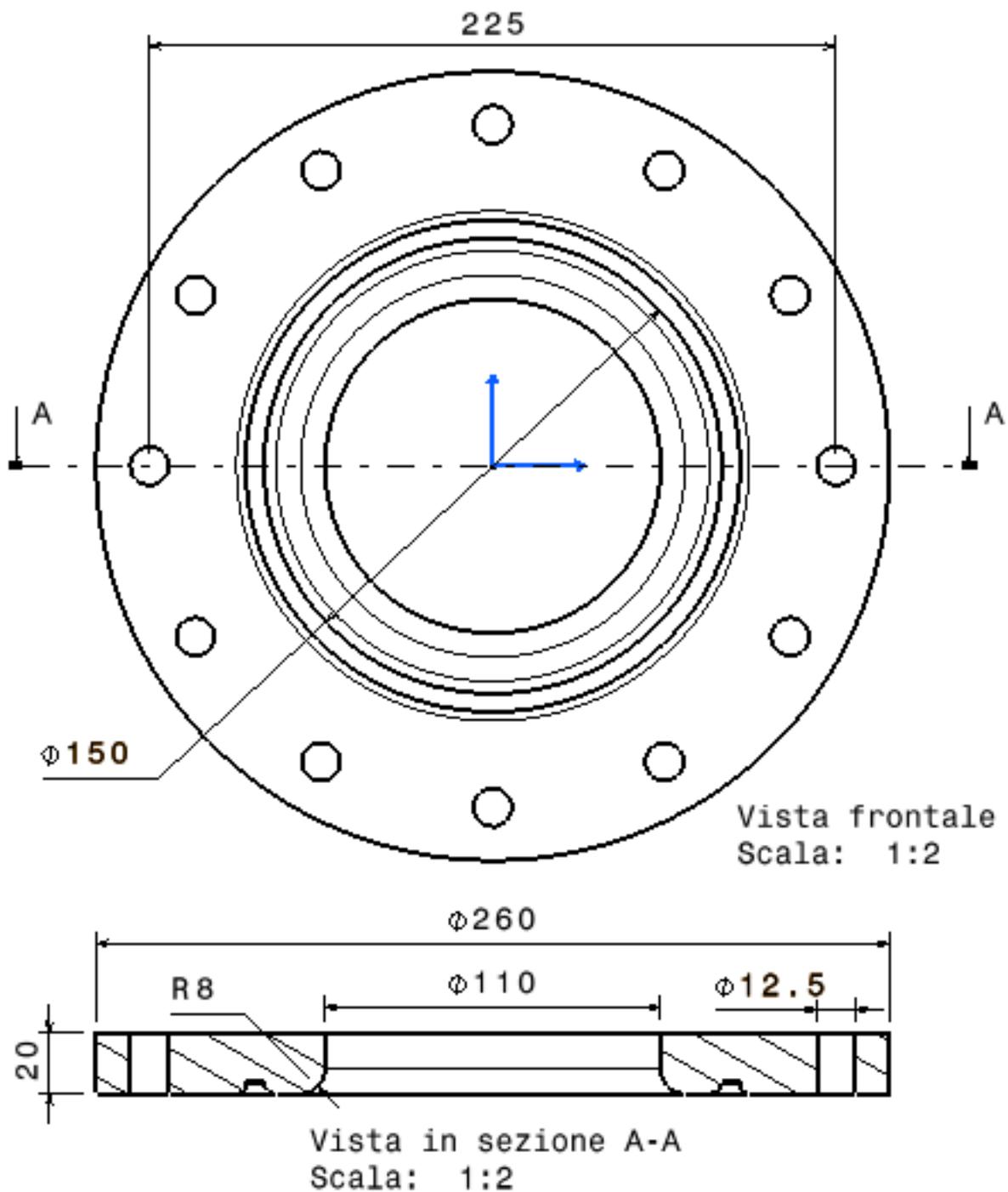


Figura 2.n

Nella tavola tecnica si evidenzia la posizione del rompigrinze, che come sulla flangia base, al fine di garantire il corretto accoppiamento maschio – femmina, è ricavato su un diametro di 150 mm.

### 2.2.3 Geometria del rompigrinze del Nakazima Test

In fine, si riportano con dettaglio, le geometrie che caratterizzano il dispositivo rompigrinze dell'apparato Nakazima Test.

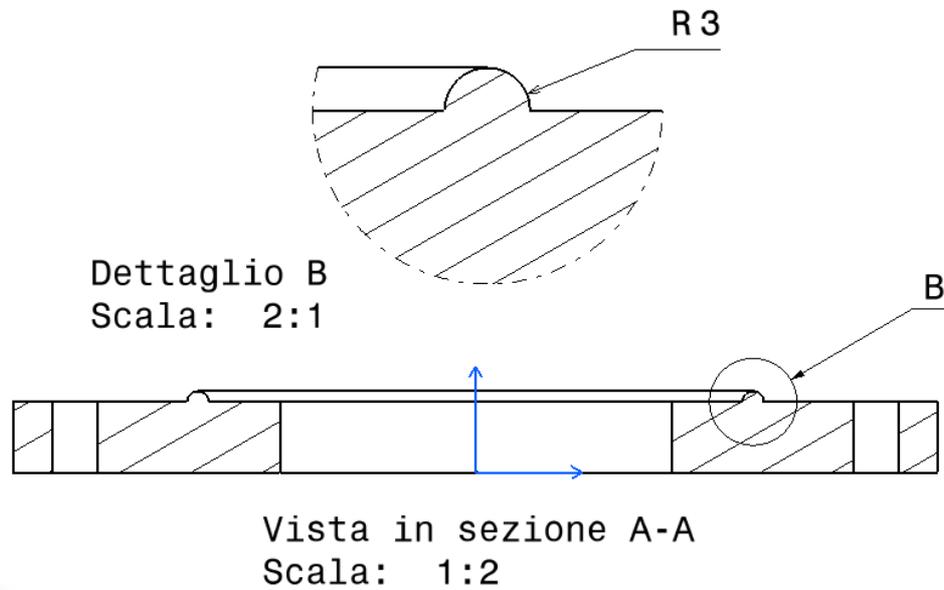


Figura 2.o: Particolare del rompigrinze maschio

Richiamando la sezione A – A della flangia base del Nakazima Test, evidenziando il dettaglio B riportato in scala 2:1, si vede il risalto maschio del rompigrinze, con un profilo a forma di circonferenza avente raggio pari a 3 mm.

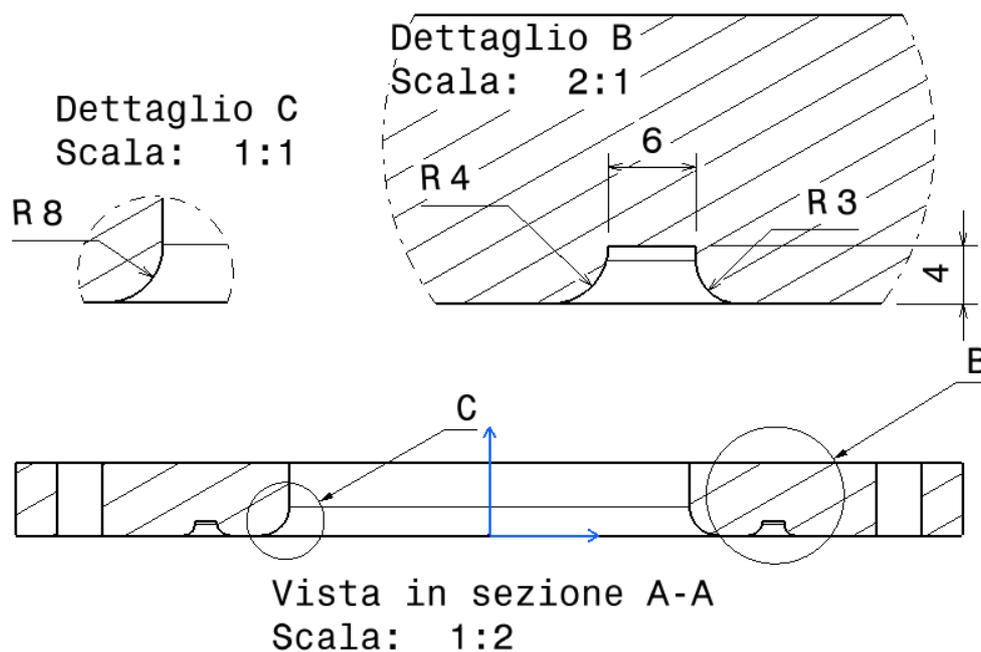


Figura 2.p: Particolare del rompigrinze femmina e del raccordo foro interno

Rammentando invece la sezione A – A relativa alla flangia superiore, si vede il dettaglio B.

Si può notare che la corrispettiva femmina del dispositivo rompigrinze ha una larghezza di 6 *mm* ed un'altezza di 4 *mm*. Presenta due raccordi sul bordo destro e sinistro, su quelli che altrimenti sarebbero degli spigoli vivi. Il raccordo di destra presenta un raggio di 3 *mm*, quello di sinistra di 4 *mm*.

I raccordi sono presenti allo scopo di evitare che il provino si rompa a causa della pressione esercitata dalla flangia superiore.

In realtà, confrontando la geometria di questo dispositivo rompigrinze con quello presente nell'apparato Bulge Test idraulico, si può notare che è identico.

Infine, è stato inserito il dettaglio C, per indicare con più precisione il raccordo presente alla base del foro interno della flangia, il cui scopo è già stato citato.

## Capitolo 3: MODELLI PARAMETRICI

Nella realizzazione dei modelli che costituiscono l'apparato dei due test è stato utilizzato il software CATIA V5.

CATIA V5 si differenzia rispetto gli altri programmi nell'introduzione dei parametri, che risultano molto comodi nel realizzare un modello CAD nel mentre che lo si progetta.

Per cui, i modelli realizzati e che ora vedremo in dettaglio sono tutti dei modelli parametrici.

Nei modelli parametrici sono stati introdotti quelli che vengono chiamati *parametri*, essi sono dei numeri o formule matematiche che vengono associate a delle proprietà del modello.

Variando tali parametri, cambiano le proprietà.

In questi modelli i parametri sono stati associati alle proprietà geometriche fondamentali a caratterizzare la parte.

Con questa scelta, infatti, modificando a nostro piacimento i valori dei parametri associati, il programma varierà autonomamente la dimensione associata a quel determinato parametro.

Questa risulta essere una feature molto comoda per un progettista che spesso si trova a dover revisionare lo schizzo, dopo degli opportuni problemi di dimensionamento, la geometria di un prodotto.

Di seguito vengono riportati dei paragrafi in cui vengono mostrati i parametri inseriti nei modelli CAD delle flange del Bulge Test idraulico e del Nakazima Test.

Nell'introdurre grandezze associate alle misure dei diametri, CATIA V5 ragiona in termini di raggio. Visto che nella pratica risulta più comodo ragionare in termini di diametro, allora si è preferito inserire una formula del tipo  $\frac{D}{2}$ , dove  $D$  è il valore del diametro.

### 3.1 Modello parametrico flangia base Bulge Test

Si illustra in questo paragrafo il modello parametrico della flangia base che costituisce il Bulge Test idraulico, ottenuto mediante modellazione CAD. Si possono esaminare dalla figura che segue i parametri che sono stati inseriti in tale modello.

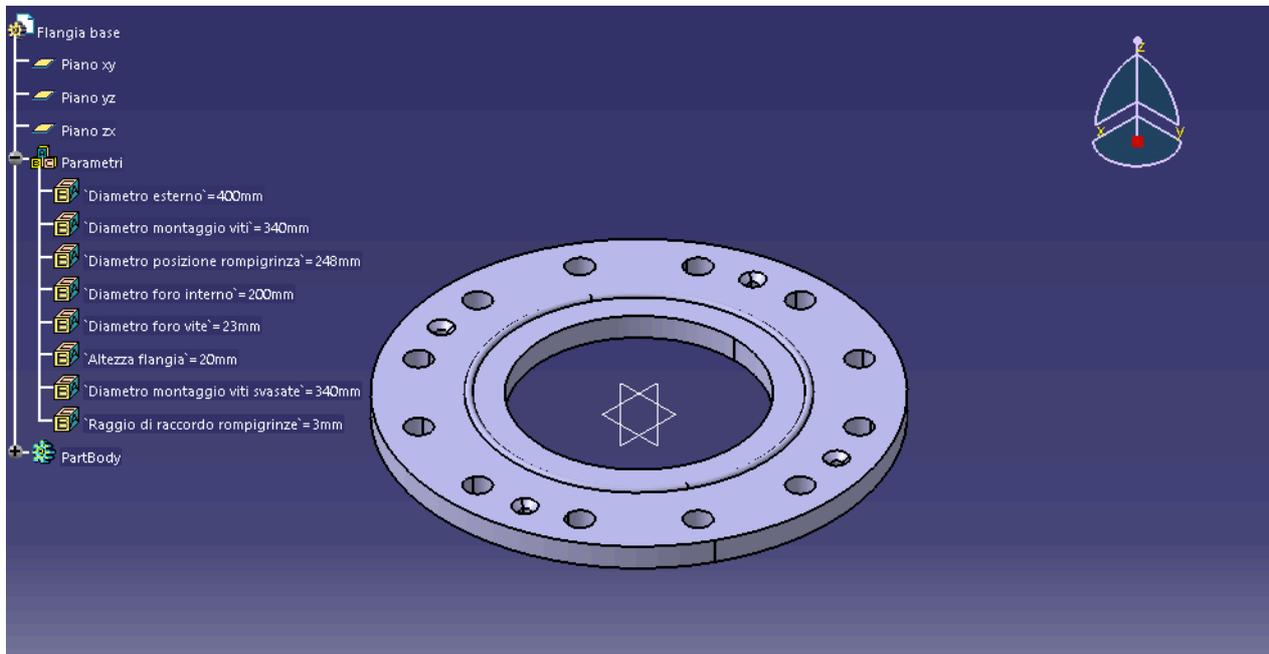


Figura 3.a

Ad ogni parametro inserito corrisponde una quota ben precisa. Se a fine della progettazione dovessimo avere esigenza di modificare queste misure, basta variare il valore della quota per modificare le dimensioni del modello.

Di seguito una tabella in dettaglio con i parametri utilizzati

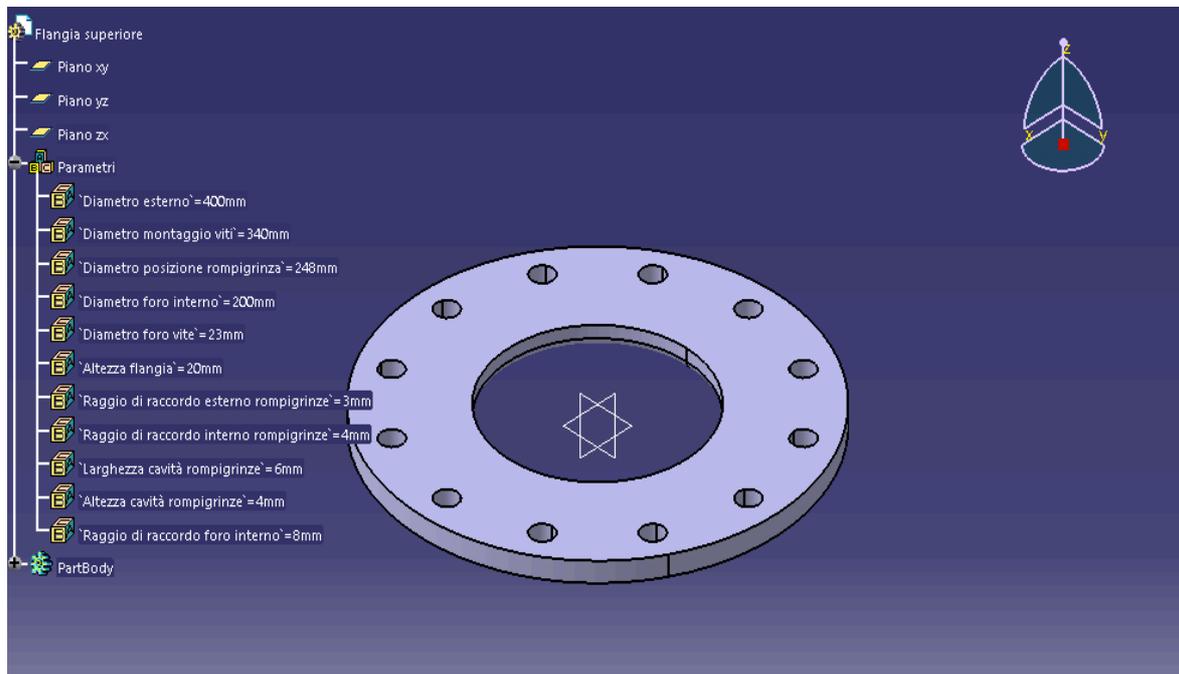
<b>Parametri flangia base Bulge Test idraulico</b>	<b>Valore (con relativa unità di misura)</b>
Diametro esterno	400 mm
Diametro montaggio viti	340 mm
Diametro montaggio viti svasate	340 mm
Diametro posizione rompigrinze	248 mm
Diametro foro interno	200 mm
Diametro foro vite	23 mm
Altezza flangia	20 mm
Raggio di raccordo rompigrinze	3 mm

Tabella 3.1

### 3.2 Modello parametrico flangia superiore Bulge Test

Analogamente al paragrafo precedente, viene realizzato il modello parametrico della flangia superiore per il Bulge Test idraulico, necessario a bloccare la lamiera metallica nella posizione desiderata.

Si riportano, nella *Figura 3.b*, parametri inseriti per definire il suddetto modello parametrico.



*Figura 3.b*

Analogamente al paragrafo precedente, di seguito è inserita una tabella con i parametri utilizzati ed i corrispettivi valori.

<b><i>Parametri flangia superiore Bulge Test idraulico</i></b>	<b><i>Valore (con relativa unità di misura)</i></b>
Diametro esterno	400 mm
Diametro montaggio viti	340 mm
Diametro posizione rompigrinza	248 mm
Diametro foro interno	200 mm
Diametro foro vite	23 mm
Altezza flangia	20 mm
Raggio di raccordo esterno rompigrinze	3 mm
Raggio di raccordo interno rompigrinze	4 mm
Larghezza cavità rompigrinze	6 mm
Altezza cavità rompigrinze	4 mm
Raggio di raccordo foro interno	8 mm

*Tabella 3.2*

Come si vede dalle tabelle, risultano importanti, in particolare, i parametri che riguardano la dimensione del rompigrinze. Infatti, se, dopo l'analisi FEM sulla parte, dovesse verificarsi uno slittamento del provino, si può provvedere a variare questi valori nell'albero logico dell'ambiente di lavoro in CATIA, cambiandone la forma in modo rapido e senza agire sullo schizzo.

### 3.3 Modello parametrico flangia base Nakazima Test

In questo terzo paragrafo dedicato ai modelli parametrici, si vogliono mostrare i parametri utilizzati per la parte che consente l'alloggiamento del provino metallico da utilizzare nella prova Nakazima test, ossia la flangia base. Si riportano nella *figura 3.c* i modelli parametrici adottati.

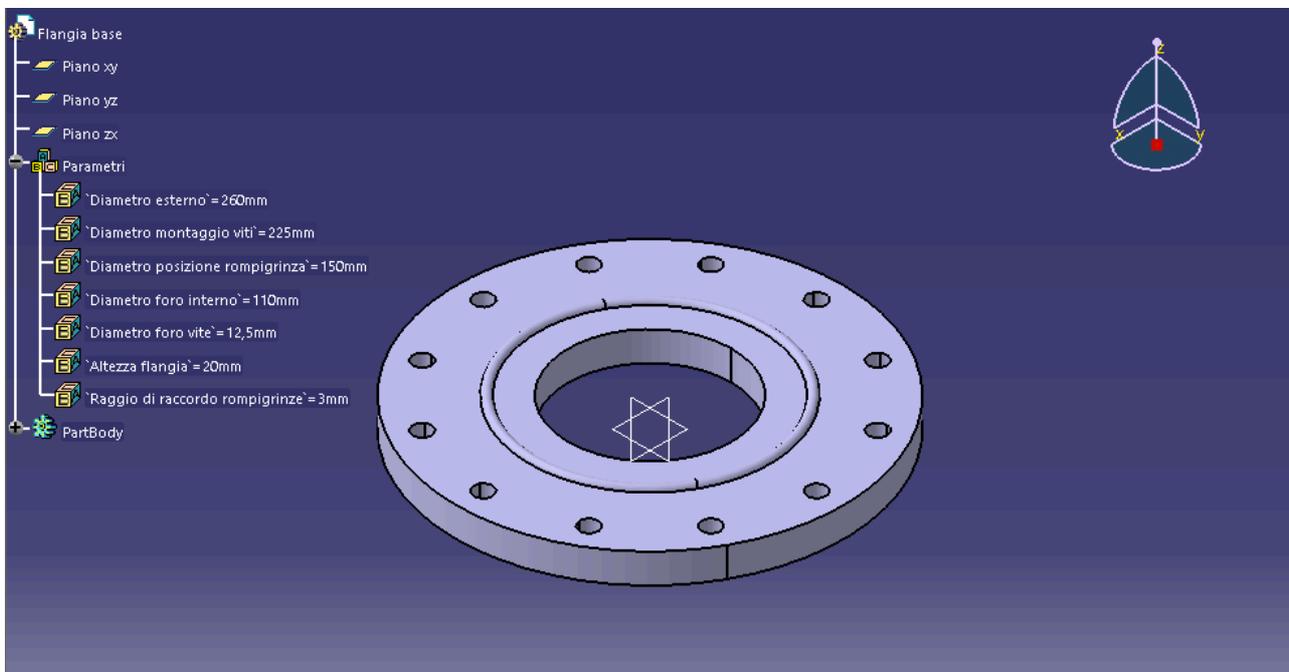


Figura 3.c

Vediamo in dettaglio, nella tabella che segue, i parametri inseriti nel modello parametrico. Tali parametri sono risultati molto utili durante il dimensionamento del prodotto, dove è stato necessario più volte modificare la geometria della parte.

In particolare il parametro relativo al raggio di raccordo del rompigrinze, che può essere modificato velocemente una volta effettuata l'analisi FEM, che verrà affrontata nel capitolo 5 di questa trattazione.

<b>Parametri flangia base Nakazima Test</b>	<b>Valore (con relativa unità di misura)</b>
Diametro esterno	260 mm
Diametro montaggio viti	225 mm
Diametro posizione rompigrinza	150 mm
Diametro foro interno	110 mm
Diametro foro vite	12,5 mm
Altezza flangia	20 mm
Raggio di raccordo rompigrinze	3 mm

Tabella 3.3

### 3.4 Modello parametrico flangia superiore Nakazima Test

In questo ultimo paragrafo dedicato ai modelli parametrici, si vogliono mostrare i parametri utilizzati nel modello CAD del secondo ed ultimo componente dell'apparato Nakazima Test.

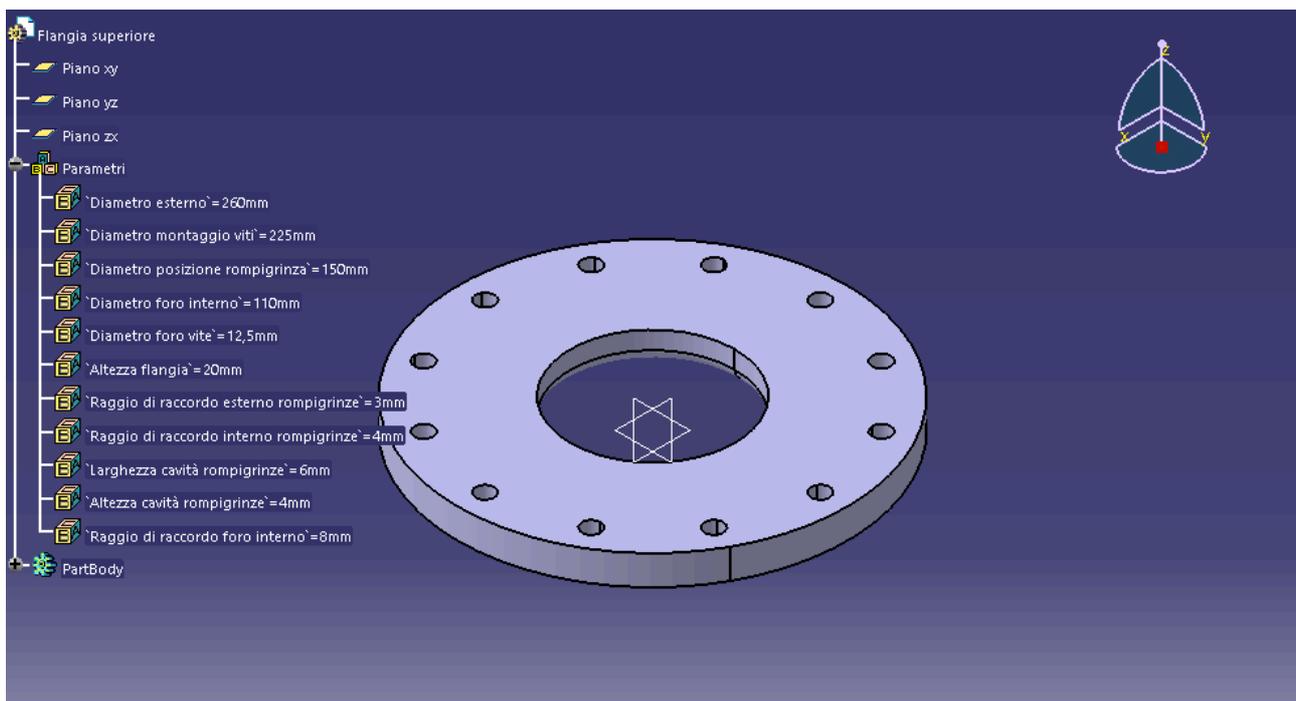


Figura 3.d

Nella *Tabella 3.4*, inserita nella pagina successiva vengono scritti in dettaglio tutti i parametri inseriti in tale modello, analogamente quanto fatto per tutti gli altri elementi.

<b><i>Parametri flangia superiore Nakazima Test</i></b>	<b><i>Valore (con relativa unità di misura)</i></b>
Diametro esterno	260 mm
Diametro montaggio viti	225 mm
Diametro posizione rompigrinza	150 mm
Diametro foro interno	110 mm
Diametro foro vite	12,5 mm
Altezza flangia	20 mm
Raggio di raccordo esterno rompigrinze	3 mm
Raggio di raccordo interno rompigrinze	4 mm
Larghezza cavità rompigrinze	6 mm
Altezza cavità rompigrinze	4 mm
Raggio di raccordo foro interno	8 mm

*Tabella 3.4*

Anche in questo caso sono fondamentali, sia per la flangia base che per quella superiore del Nakazima Test, i parametri riguardo al rompigrinze, allo scopo già citato alla fine del paragrafo 3.2.

## Capitolo 4: BULLONATURA

Nel presente capitolo si vuole riportare il ragionamento che è stato alla base per il dimensionamento della bullonatura degli apparati Bulge Test idraulico e Nakazima Test.

In entrambi i banchi prova, la bullonatura deve svolgere la medesima e fondamentale funzione.

Essa deve, in entrambi i casi, mantenere serrato il provino metallico tra le flange, al fine di impedire lo scorrimento del materiale durante la prova.

Inoltre, deve fungere da collegamento tra l'apparato composto da flangia superiore – provino – flangia base ed il banco prova su cui tale interfaccia verrà montata.

Il suo corretto dimensionamento è quindi indispensabile al fine di completare la prova e garantire una vita utile dello strumento, soggetto ovviamente a carichi ciclici, elevata.

In questa trattazione vedremo separatamente due brevi paragrafi, il primo riguardo la bullonatura dedicato al Bulge Test idraulico, il secondo dedicato al Nakazima Test.

### 4.1 Dimensionamento bullonatura del Bulge Test

Per impostare un problema di bullonatura bisogna conoscere le caratteristiche geometriche del sistema ed i carichi cui esso è soggetto.

Dal paragrafo 2.1 conosciamo la geometria delle flange, inoltre è noto che si sta progettando questo banco per sopportare una pressione dell'olio di massimo 300 *bar* che convertita in megapascal, risulta essere 30 *MPa*.

Dalla geometria si conosce che il foro interno, su cui agisce l'olio in pressione ha un diametro di 200 *mm*, ossia un raggio di 100 *mm*.

Per cui, la forza esercitata dall'olio in pressione è data dalla moltiplicazione tra pressione e area:

$$F = p \cdot A$$

Essendo l'area una circonferenza:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 100^2 = 31415,9 \text{ mm}^2$$

Per cui, la forza dell'olio in pressione è:

$$F = 30 \text{ [MPa]} \cdot 31415,9 \text{ [mm}^2\text{]} = 942477,8 \text{ N}$$

Ipotizzando di utilizzare un numero di viti pari a 12, al fine di ricoprire in modo completo la circonferenza su cui sono montate (dal diametro di 340 mm), allora la forza di separazione agente su ogni singola vite vale:

$$F_i = \frac{F}{n_v} = \frac{942477,8}{12} = 78539,8 \text{ N}$$

In questo problema di dimensionamento bisogna considerare il precarico. Esso mira ad evitare lo scorrimento delle giunzioni bullonate. La bullonatura deve evitare che il materiale del provino fluisca verso l'interno del sistema di prova, aiutato anche dal rompigrinze. Per cui bisogna considerare un precarico almeno maggiore alla forza di separazione massima pari a  $F_i = 78539,8 \text{ N}$

Ipotizzando, quindi, che ogni vite sia precaricata di 80000 N e sommando il carico esterno cui è soggetta ogni singola vite, in realtà, agisce una forza almeno pari a:

$$F_v = 78539,8 + 80000 = 158539,8 \text{ N}$$

Bisogna, quindi, considerare una vite che abbia un carico assiale consigliato  $N_s$  almeno pari alla  $F_v$ , appena calcolato.

Prospetto 4-IV

d mm	$A_{res}$ mm <sup>2</sup>	$T_s$ (N · m)					$N_s$ (kN)					d mm
		4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	
12	84	39	48	58	90	113	16	20	24	38	47	12
14	115	62	77	93	144	180	22	28	33	52	64	14
16	157	96	121	145	225	281	30	38	45	70	88	16
18	192	133	166	199	309	387	37	46	55	86	108	18
20	245	188	235	282	439	549	47	59	71	110	137	20
22	303	256	320	384	597	747	58	73	87	136	170	22
24	353	325	407	488	759	949	68	85	102	158	198	24
27	459	476	595	714	1 110	1 388	88	110	132	206	257	27
30	561	646	808	969	1 508	1 885	108	135	161	251	314	30

Prospetto 4-IV

Facendo riferimento al prospetto 4-IV del catalogo delle viti, ipotizzando di selezionare una vite con diametro  $d = 22 \text{ mm}$  ed una classe di resistenza 10,9, si nota che il carico assiale consigliato è pari a  $N_s = 170 \text{ kN}$  e che presenta una sezione resistente di  $303 \text{ mm}^2$ .

Inoltre, essendo conosciuto che una vite con classe di resistenza 10.9 ha una tensione di snervamento di circa  $\sigma_s = 900 \text{ MPa}$ .

Facendo il rapporto tra  $F_v$  e  $A_{res}$  della vite M22 classe 10.9 si ha:

$$\frac{F_v}{A_{res}} = \frac{158539,8 [N]}{303 [mm^2]} = 523 MPa$$

È possibile affermare, essendo tale tensione molto minore rispetto quella di snervamento che ricordiamo valere  $\sigma_s = 900 MPa$ , che 12 viti M22 10.9 sono in grado di garantire la tenuta rientrando ampiamente nei margini di sicurezza.

Dal catalogo delle tipologie di viti, disponibile sul sito di Bulloneria Emiliana, riportato nella parte dei riferimenti, si può designare la tipologia di vite scelta.



Disegno	Descrizione	ISO	UNI	DIN	Mat./classe	da/a	Rif. cat. gen. pag.
	Viti a testa esagonale con gambo parzialmente filettate Hexagon head bolts	4014	5737	931	A2 A4	M3	101
	Viti a testa esagonale con gambo interamente filettate Hexagon head screws	4017	5739	933	A2 A4	M2,5 M30	103
	Dadi esagonali alti Hexagon nuts		5587	-	A2 A4	M3 M42	146
	Dadi esagonali normali Hexagon nuts		5588	934	A2 A4	M1 M42	147
	Dadi esagonali bassi Hexagon nuts		5589	936	A2 A4	M3 M42	148
	Dadi ad alette Wing nuts		5548	315	A2	M3 M16	154

Figura 4.a: Catalogo Bulloneria Emiliana

Si può concludere che la bullonatura del sistema Bulge Test idraulico dedicata al serraggio è composta da 12 viti a testa esagonale con gambo interamente filettato M22 classe di resistenza 10.9 ISO 4017.

Dal paragrafo relativo alla geometria delle flange del sistema Bulge Test idraulico, sappiamo che sulla flangia base sono presenti anche altre quattro viti a testa svasata.

Queste viti non hanno nessun compito di serraggio, quindi non sono state coinvolte ad un problema di verifica. Esse hanno il solo obbiettivo di centrare la flangia base sul banco in cui sarà montata e stringere una guarnizione O-Ring (OR) tra la flangia base ed il banco di montaggio, al fine di garantire una chiusura ermetica della camera che conterrà l'olio in pressione.

A questo fine sono state scelte delle viti a testa svasata in quanto non devono assolutamente essere coinvolte nella prova e non devono dare fastidio al provino, il cui possibile scorrimento deve essere bloccato solo da rompigrinze e dalla bullonatura composta dalle 12 viti M22.

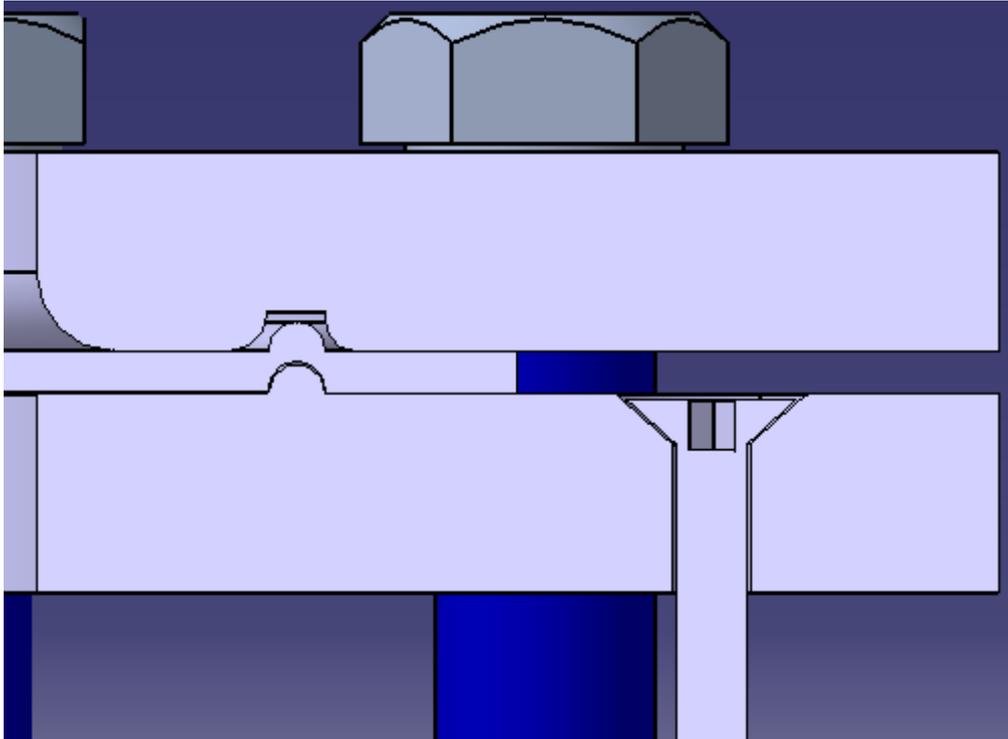


Figura 4.b

Le viti in questione sono state scelte dal catalogo tecnico della Unbrako, reperibile nel loro sito web. Sono state selezionate 4 viti M8 passo 1.25 a testa piana svasata con esagono incassato con gambo parzialmente filettato

VITI TESTA PIANA SVASATA ESAGONO INCASSATO  
ISO METRICO

COUNTERSUNK SOCKET HEAD SCREWS — ISO Metric

**Unbrako**

Angolo svasatura (vedi nota 8)

Cava tornita a discrezione del costruttore

Specifiche Applicabili:  
BS 4168  
DIN 7991

DIMENSIONS AND TIGHTENING TORQUES—ISO Metric Threads

DIMENSIONI E COPPIE DI SERRAGGIO - ISO Metriche

Diametro filetto (B max)	Passo	A Max. (vedi nota 2)	A1 min. (vedi nota 3)	B Max.	G		H Ref.	N Max.	W	Massima coppia di serraggio				Carico di tensiamento kN
					Max.	Min.				Non rivestito		Rivestito		
										Nm	lbf.in.	Nm	lbf.in.	
M3	0.50	6.72	5.82	2.98	5.196	5.191	1.7	0.70	2.0	1.4	12	1.1	9	5.28
M4	0.70	8.96	7.78	3.98	6.976	6.971	2.3	0.91	2.5	3.4	30	2.6	22	9.22
M5	0.80	11.20	9.78	4.98	8.643	8.638	2.8	1.11	3.0	6.8	60	5.1	45	14.90
M6	1.00	13.44	11.73	5.97	10.310	10.305	3.3	1.27	4.0	11.0	97	8.3	73	21.10
M8	1.25	17.92	15.73	7.97	13.756	13.751	4.4	1.65	5.0	28.0	248	21.0	186	38.40

Figura 4.c: Catalogo Unbrako

## 4.2 Dimensionamento bullonatura del Nakazima Test

In questo paragrafo si vuole mostrare come è stato imposto e risolto il problema di dimensionamento della bullonatura dell'apparato Nakazima Test.

Si è capito, dal paragrafo prima dedicato, che la geometria di questo apparato è in dimensioni proporzionali a quello utilizzato nel Bulge Test idraulico. Inoltre, è conosciuto anche il carico che la flangia superiore deve sopportare e di conseguenza quello che deve sopportare la bullonatura.

Si è dimensionato questo apparato per resistere a una forza, applicata dal punzone, pari a 70000 N, valore ben più piccolo rispetto alla forza agente nel Bulge Test idraulico.

Supponendo di voler utilizzare 12 viti, al fine di ricoprire in modo uniforme tutta la corona circolare della flangia superiore, abbiamo che il carico esterno agente sulla singola vite è:

$$F_i = \frac{70000}{12} = 5833,3 \text{ N}$$

Anche in questo caso, bisogna considerare un precarico che agisce sulla vite, al fine di evitare lo scorrimento del collegamento bullonato, almeno maggiore del carico esterno.

Si è ipotizzato un precarico di 7000 N. Per cui ogni vite è soggetta ad una forza di:

$$F_v = 5833,3 + 7000 = 12833,3 \text{ N}$$

Si considera quindi una vite con un precarico consigliato  $N_s$  superiore a  $F_v$ .

Prospetto 4-IV

d mm	$A_{res}$ mm <sup>2</sup>	$T_s$ (N · m)					$N_s$ (kN)					d mm
		4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	
12	84	39	48	58	90	113	16	20	24	38	47	12
14	115	62	77	93	144	180	22	28	33	52	64	14
16	157	96	121	145	225	281	30	38	45	70	88	16
18	192	133	166	199	309	387	37	46	55	86	108	18
20	245	188	235	282	439	549	47	59	71	110	137	20
22	303	256	320	384	597	747	58	73	87	136	170	22
24	353	325	407	488	759	949	68	85	102	158	198	24
27	459	476	595	714	1 110	1 388	88	110	132	206	257	27
30	561	646	808	969	1 508	1 885	108	135	161	251	314	30

Prospetto 4-IV

Riportando il prospetto 4-IV, considerando una vite con diametro  $d = 12 \text{ mm}$  e di classe resistente 8.8, interpolando nel prospetto si vede che il precarico consigliato è  $N_s = 38000 \text{ N}$  e l'area resistente è  $A_{res} = 84 \text{ mm}^2$ .

Dividendo  $F_v$  con l'area resistente si ha:

$$\frac{F_v}{A_{res}} = \frac{12833,3 [N]}{84 [mm^2]} = 153 MPa$$

Ricordando che una vite di classe 8.8 ha uno snervamento di circa  $\sigma_s = 640 MPa$ , risulta che la tensione trovata è di gran lunga minore di quella che porta a snervamento. Per utilizzando 12 viti M12 classe 8.8 si rimane ampiamente nei margini di sicurezza.

In conclusione, la bulloneratura dedicata al serraggio del sistema Nakazima Test, facendo riferimento al catalogo tecnico di Bulloneria Emiliana, è composta da 12 viti M12 classe resistente 8.8 ISO 4017, in particolare, vite a testa esagonale con gambo interamente filettato.

ISO
UNI
DIN

← Indice precedente →

**Gamma standard a magazzino**

Disegno	Descrizione	ISO	UNI	DIN	Mat./classe	da/a	Rif. cat. gen. pag.
	Viti a testa esagonale con gambo parzialmente filettate Hexagon head bolts	4014	5737	931	A2 A4	M3	101
	Viti a testa esagonale con gambo interamente filettate Hexagon head screws	4017	5739	933	A2 A4	M2,5 M30	103
	Dadi esagonali alti Hexagon nuts		5587	-	A2 A4	M3 M42	146
	Dadi esagonali normali Hexagon nuts		5588	934	A2 A4	M1 M42	147
	Dadi esagonali bassi Hexagon nuts		5589	936	A2 A4	M3 M42	148
	Dadi ad alette Wing nuts		5548	315	A2	M3 M12	154

Figura 4.d: Catalogo Bulloneria Emiliana

## Capitolo 5: ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Dopo aver definito la geometria delle parti che compongono la macchina per Bulge Test idraulico e Nakazima Test, si è voluto testare e verificare l'efficienza di tali componenti attraverso *un'analisi agli elementi finiti (FEM dall'inglese Finite Element Method)*.

Sono diversi i programmi che permettono di realizzare questo tipo di analisi.

In questa trattazione, l'analisi è stata interamente svolta con il software ANSYS, una piattaforma di uso tipicamente aziendale, che però mette a disposizione degli studenti una versione gratuita, ossia ANSYS STUDENT, il cui limite è di poter utilizzare fino ad un numero massimo di elementi finiti di 32000.

L'accuratezza dei risultati che si ottengono da uno studio FEM dipende fortemente dal numero di elementi finiti utilizzati, in particolare, la precisione dei risultati aumenterà al crescere del numero di elementi.

Tuttavia, il limite di 32000 elementi finiti, imposto dalla versione di ANSYS destinata agli studenti, risultano essere più che sufficienti al fine delle analisi interessate in questa elaborazione.

Il software ANSYS, che in sé racchiude molti programmi tra cui anche dei basilari software CAD, permette di simulare tantissime condizioni per studiare la durabilità di un prodotto e la sua affidabilità, il tipo di analisi va scelto in base alle esigenze che si hanno.

L'analisi scelta in questa trattazione è di tipo strutturale (chiamata dal programma *Static Structural*). Essa permette di capire come si distribuiscono carichi, tensioni e deformazioni sulla struttura interessata.

Una volta scelto questo, bisogna fornire una serie di informazioni al programma, che vedremo passo passo nei paragrafi dedicati, per arrivare alle conclusioni volute.

Nella figura si osserva quali sono queste informazioni di cui il programma ha bisogno per una corretta analisi.

- *Engineering Data*: bisogna comunicare al programma i materiali che si vogliono utilizzare;
- *Geometry*: si definisce la geometria delle parti interessate;
- *Model*: si assegnano qui i contatti tra i corpi, la mesh delle parti, gli spostamenti cui sono soggetti i componenti;
- *Solution*: vengono impostate le soluzioni che si vogliono ottenere;
- *Results*: il programma offre, infine, delle brevi clip in cui viene mostrato il comportamento del corpo in quella determinata analisi.

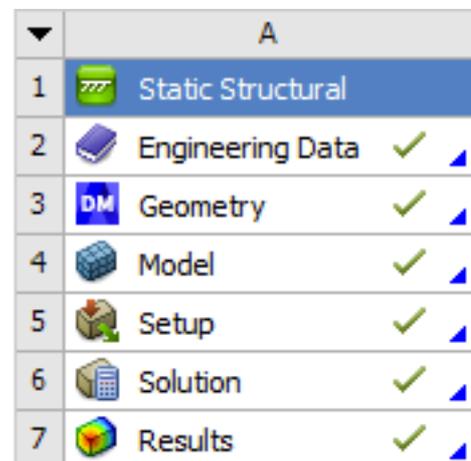


Figura 5.a

L'obiettivo dell'analisi FEM realizzata è cercare di capire innanzitutto come si deforma il provino ed in secondo luogo se sia presente uno scorrimento relativo all'interfaccia provino – flangia base e provino – flangia superiore in entrambe le prove interessate, quindi vedere se effettivamente il dimensionamento del rompigrinze sia efficace o meno.

Nell'attività svolta in questa tesi, piuttosto che rendere ripetitive le analisi FEM per Bugle Test idraulico e per Nakazima Test (che sono configurazioni prettamente identiche), si è preferito farne una unica valida per entrambe.

Ragion per cui si è preferito partire da un'analisi indirizzata al Nakazima Test per poi generalizzarla al Bulge Test idraulico, in quanto le dimensioni dei due apparati sono comparabili, il dispositivo rompigrinze ha grandezza equivalente nei due test ed infine si può pensare alla cupola formata dall'olio in pressione nel Bulge Test idraulico come il profilo del punzone emisferico presente nel Nakazima Test.

## 5.1 Scelta dei materiali

Si parte anzitutto dal corpo che più ci interessa, ossia il provino. Per tale elemento è stato scelto un acciaio inossidabile generico, presente nella banca dati dei materiali di ANSYS, in cui si è preferito idealizzarlo ad un comportamento elasto-plastico con incrudimento lineare.

Due dati sono però stati modificati rispetto al materiale presente nella banca dati, infatti, il Modulo di Young è stato aumentato dal valore di default di 184 GPa a 200 GPa, inoltre è stato inserito il coefficiente di Poisson di 0,3.

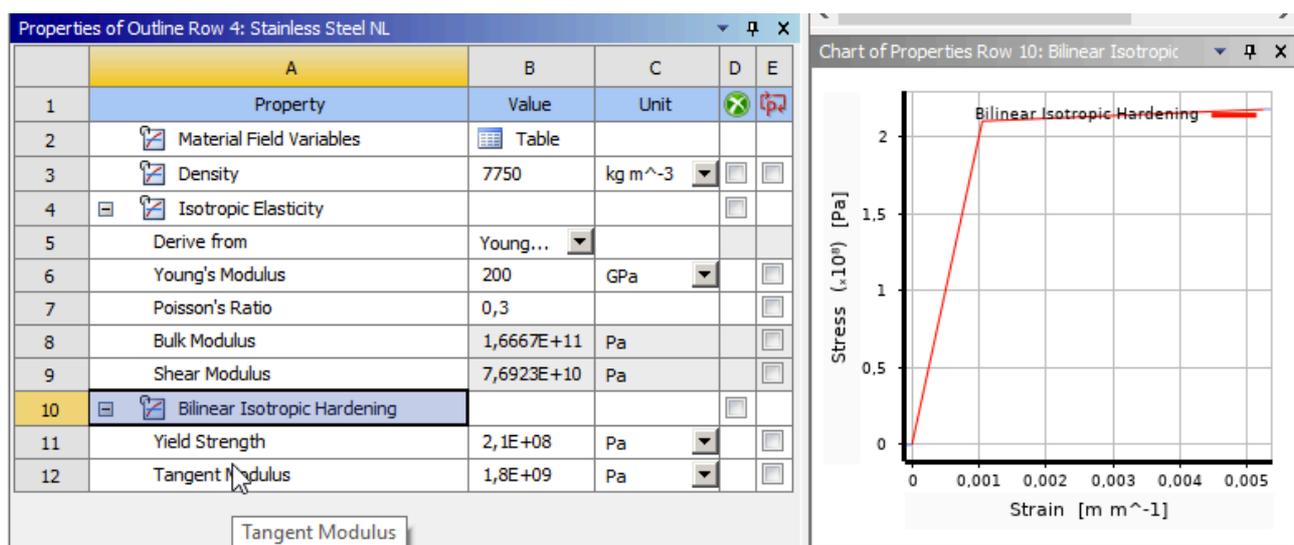
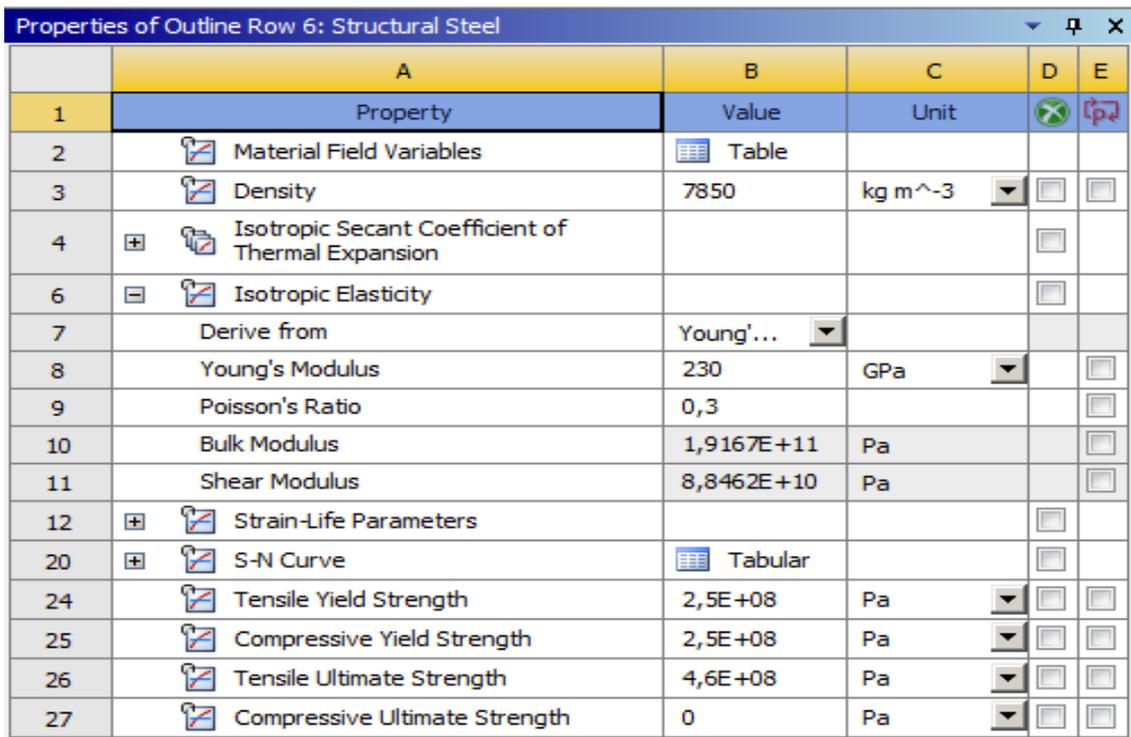


Figura 5.b

Per i materiali che costituiscono le flange ed il punzone, in realtà, era intenzione considerarli come corpi rigidi, però, durante le varie prove di simulazione, si è capito che ANSYS non permette di effettuare un'analisi 2D, così impostata, di cui si parlerà nel paragrafo dedicato alla geometria, con dei corpi rigidi.

A tal fine si è scelto quindi un generico acciaio strutturale presente nella libreria dei materiali di ANSYS, ma si è pensato di assegnare a questo materiale un elevato Modulo di Young, così da aumentarne la rigidità e renderlo *idealmente* rigido rispetto al materiale del provino.

Per cui il Modulo di Young di tale acciaio strutturale è stato scelto di 230 GPa.



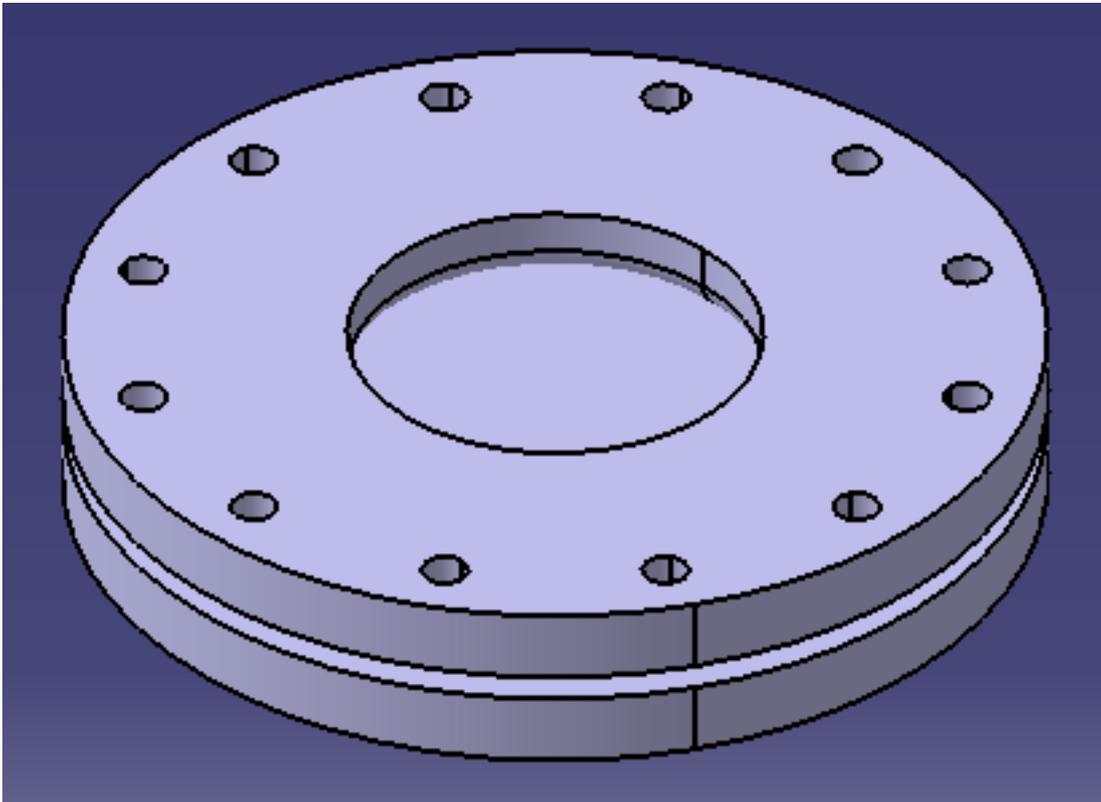
Properties of Outline Row 6: Structural Steel					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
6	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young'...			
8	Young's Modulus	230	GPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0,3			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1,9167E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	8,8462E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	<input checked="" type="checkbox"/> Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>	
20	<input checked="" type="checkbox"/> S-N Curve	Tabular		<input type="checkbox"/>	
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 5.c

In *Figura 5.c* si mostrano le proprietà di tale acciaio strutturale.

## 5.2 Definizione della geometria di prova

In questa analisi, come abbiamo detto prima, si è preso in considerazione la geometria dell'apparato Nakazima Test, quindi si è considerato il modello assemblato di cui richiamo la *Figura 5.d*.



*Figura 5.d*

Si è utilizzato, quindi, per il provino un diametro di  $200\text{ mm}$  e per lo spessore il caso più gravoso ammissibile, ossia  $4\text{ mm}$ .

ANSYS permette di realizzare analisi sia 3D, sia 2D assialsimmetriche e non.

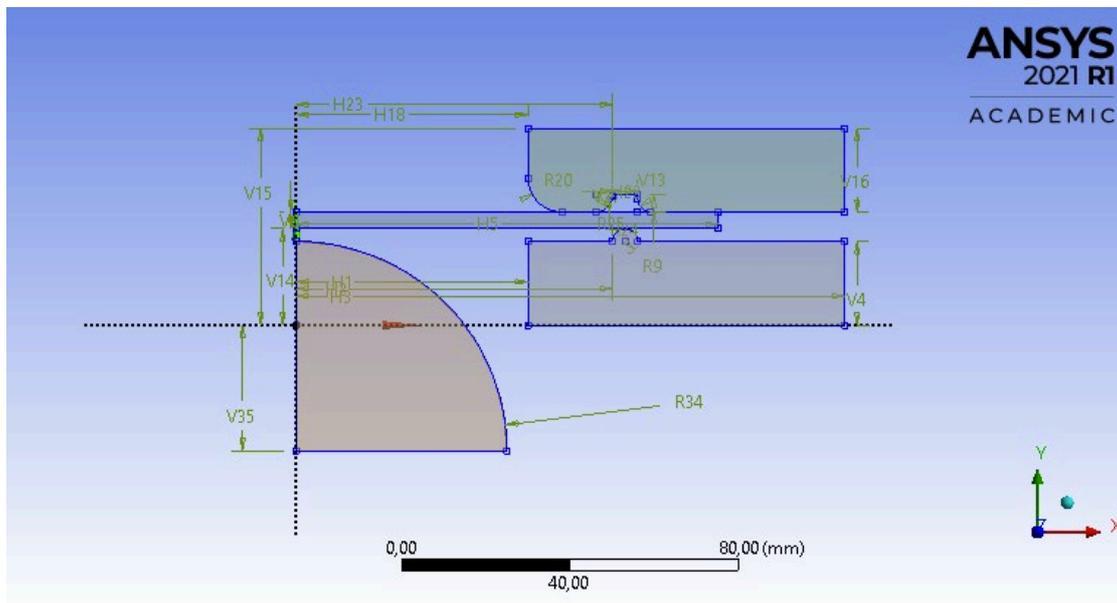
È molto facile cadere, alla fine delle analisi, in un risultato fallace rispetto al problema reale, in quanto comunque il software utilizza un calcolo matematico approssimativo per ottenere la configurazione deformata che dovrebbe avere il corpo, quello che si fa è utilizzare delle approssimazioni, delle ipotesi sul metodo deformativo che ha la parte.

Piuttosto, quindi, di modellare tutto l'apparato nelle sue tre dimensioni, è conveniente realizzare un modello ridotto, che sfrutta anche la simmetria assiale delle componenti.

Tale modello ridotto si ottiene tramite una sezione ricavata immaginando di tagliare i corpi interessati tridimensionali con un piano verticale e perpendicolare alle superfici di flange e provino.

Verrà utilizzata, in realtà, solo metà di tale sezione, poi, impostando nel programma una simmetria assiale, il software capisce in modo autonomo che la geometria schematizzata in 2D sul piano XY è in realtà una parte tridimensionale ottenuta dalla rotazione di tale geometria attorno all'asse Y.

Nella *Figura 5.e* che segue si può vedere la geometria disegnata con Design Modeler, uno dei due piccoli programmi CAD contenuto in ANSYS.



*Figura 5.e*

Una volta immaginata la sezione voluta, in Design Modeler si parte dal disegnare lo schizzo dei componenti dell'apparato sul piano XY. Possiamo vedere dalla figura, infatti, la flangia base, il provino dallo spessore di 4 mm, la flangia superiore e per ultimo viene inserito anche il profilo del punzone che nel caso del Bulge Test idraulico rappresenta il profilo che assumerebbe l'olio in pressione. Ovviamente non può mancare il dispositivo rompigrinze.

Lo schizzo viene opportunamente quotato e semplificato, infatti, si può notare come siano stati eliminati i fori per le viti che sono fuorvianti al fine di quest'analisi.

Dopo aver quotato la geometria, con un comando apposito, si genera una superficie.

In questo modo sono stati ottenuti i 4 corpi che si vedono in figura.

Sistemata la geometria sul programma CAD, bisogna impostare tra le proprietà della geometria un'analisi di tipo 2D, altrimenti ANSYS non riconoscerebbe lo schizzo inserito.

In *Figura 5.f* si mostra il settaggio di tale impostazione nella voce Analysis Type.

Properties of Schematic A3: Geometry		
	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Geometry
4	Directory Name	SYS
5	Notes	
6	Notes	
7	Geometry Source	
8	Geometry File Name	C:\Users\alex9\Desktop\Wakazima\Wakazima_2_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
9	Advanced Geometry Options	
10	Analysis Type	2D
11	Compare Parts On Update	No

*Figura 5.f*

L'ultimo punto che rimane da impostare è fornire al programma la conoscenza che tale modello geometrico 2D sia effettivamente un modello assialsimmetrico rispetto all'asse Y.

Per far questo, una volta avviato il programma ANSYS MECHANICAL, di cui si darà un accenno nel capitolo successivo, tra i dettagli della geometria, bisogna selezionare un'analisi di tipo assialsimmetrica in 2D Behavior.

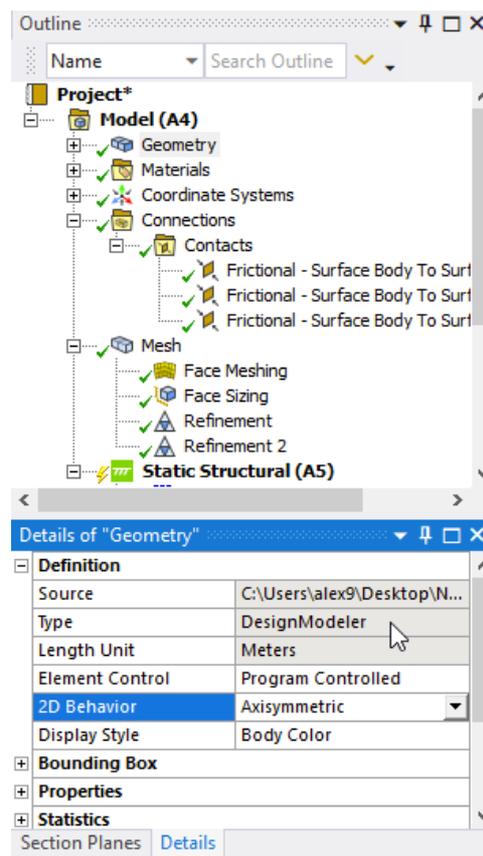


Figura 5.g

Il programma non specifica rispetto a quale asse il modello risulta assialsimmetrico; non lo fa in quanto, come settaggio di default, ANSYS riconosce una assialsimmetria sempre rispetto all'asse Y. Ecco, infine, il motivo per cui la geometria è stata disegnata sul piano XY.

Nei paragrafi che seguiranno si utilizzerà il software ANSYS MECHANICAL: è questo il cuore del programma, dove va definito con attenzione e scrupolosità il problema, al fine di ottenere dei risultati quanto più vicini alla realtà.

## 5.3 Contatti

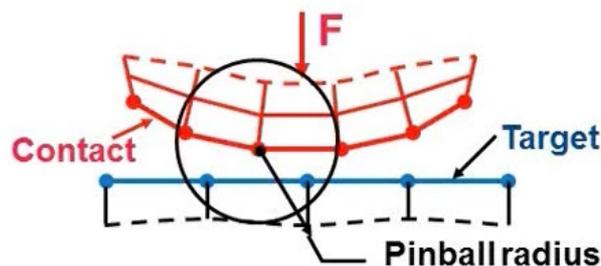
I contatti, se non opportunamente governati, possono indurre in criticità, soprattutto nella convergenza dell'analisi stessa.

Le regioni che saranno in contatto, solitamente, non sono note a priori, infatti, esse sono conosciute solo alla fine dell'analisi. Questo perché a seconda delle condizioni al contorno, le superfici possono entrare a contatto tra loro in modo imprevisto.

L'attrito può determinare altri problemi poiché la risposta a tale fenomeno può essere caotica e portare anche questo ai già citati problemi di convergenza.

Il modello di attrito più utilizzato in genere è quello *Coulombiano*.

Per riconoscere il contatto, una volta definite le superfici che potenzialmente potrebbero entrare in contatto durante l'analisi, il software introduce su queste superfici una serie di elementi chiamati *contact* e *target*. Lo stato del contatto è monitorato all'interno di una regione detta "*pinball region*", una regione sferica, definita da un raggio, detto "*pinball radius*", che circonda ciascun punto di identificazione del contatto (vedi *Figura 5.h*)



*Figura 5.h*

Fisicamente tra i due corpi in contatto non può esistere compenetrazione di materiale, il programma, per assicurare una corretta funzionalità del contatto ed impedire la compenetrazione, ha a disposizione tre diverse formulazioni di contatto:

- *Pure Penalty*
- *Normal Lagrange*
- *Augmented Lagrange*

La *Pure Penalty* è una formulazione del tipo:

$$F_{normal} = k_{normal}x_{penetration}$$

In base a tale definizione la forza perpendicolare alla superficie che si oppone alla compenetrazione è proporzionale alla penetrazione stessa ( $x_{penetration}$ ) tramite un fattore di proporzionalità, ossia la rigidità di contatto ( $k_{normal}$ ).

Il metodo Pure Penalty permette una convergenza migliore rispetto la Normal Lagrange, di contro però ammette compenetrazione di materiale che non vogliamo.

La formulazione di *Normal Lagrange* è differente essa non prevede una rigidità di contatto, ma introduce un grado di libertà aggiuntivo, cioè la pressione di contatto. Questo impone una compenetrazione nulla. Esso è il metodo più accurato, poiché previene ogni tipo di penetrazione. Però oltre ad essere una condizione onerosa dal punto di vista computazionale, può anche essere soggetta al problema di “*chattering*”.

Il *chattering* si ha quando, se dalla formulazione non è permessa alcuna compenetrazione, lo stato del contatto passa da aperto a chiuso secondo una funzione a gradino, questo, come conseguenza, porta a rendere la convergenza molto difficile.

Il metodo *Augmented Lagrange* rappresenta un buon compromesso tra le due formulazioni appena descritte. Esso fa riferimento ad una legge del tipo:

$$F_{normal} = k_{normal}x_{penetration} + \lambda$$

Si aggiunge, rispetto l’espressione Pure Penalty, il termine  $\lambda$ . A causa di questo valore aggiuntivo, il metodo Augmented Lagrange è meno sensibile alla rigidità del contatto.

Si evince che in questo caso è garantita una compenetrazione minore rispetto a Pure Penalty, ma essendo garantita una lieve penetrazione, è più facile ottenere la convergenza poiché è assente il fenomeno di *chattering*.

Questa formulazione è quella che ANSYS MECHANICAL utilizza di default quando si lasciano le impostazioni controllate dal programma, e che verrà anche utilizzata in questa trattazione proprio per i vantaggi che offre.

Quindi si è capito che il contatto, in generale, è un fenomeno non lineare, che prevede sia separazione che scorrimento (attrito).

In ANSYS sono disponibili diversi tipi di contatto, di cui viene riportata una tabella.

<i>Tipologia di contatto</i>	<i>Separazione</i>	<i>Scorrimento</i>
<b><i>Bonded</i></b>	No	No
<b><i>No separation</i></b>	No	Si
<b><i>Frictionless</i> (<math>\mu = 0</math>)</b>	Si	Si
<b><i>Frictional</i> (<math>\mu \neq 0</math>)</b>	Si	Si
<b><i>Rough</i> (<math>\mu = \infty</math>)</b>	Si	No

<i>Lineari</i>
<i>Non lineari</i>

Tabella 5.1: Tipi di contatti lineari e non lineari

Se quindi si vuole linearizzare il problema, ANSYS propone due soluzioni, il contatto Bonded ed il contatto No Separation. Quest'ultimo si distingue dal primo in quanto permette uno scorrimento. Per quanto riguarda il comportamento non lineare è possibile scegliere il contatto di tipo Frictionless, Frictional e Rough.

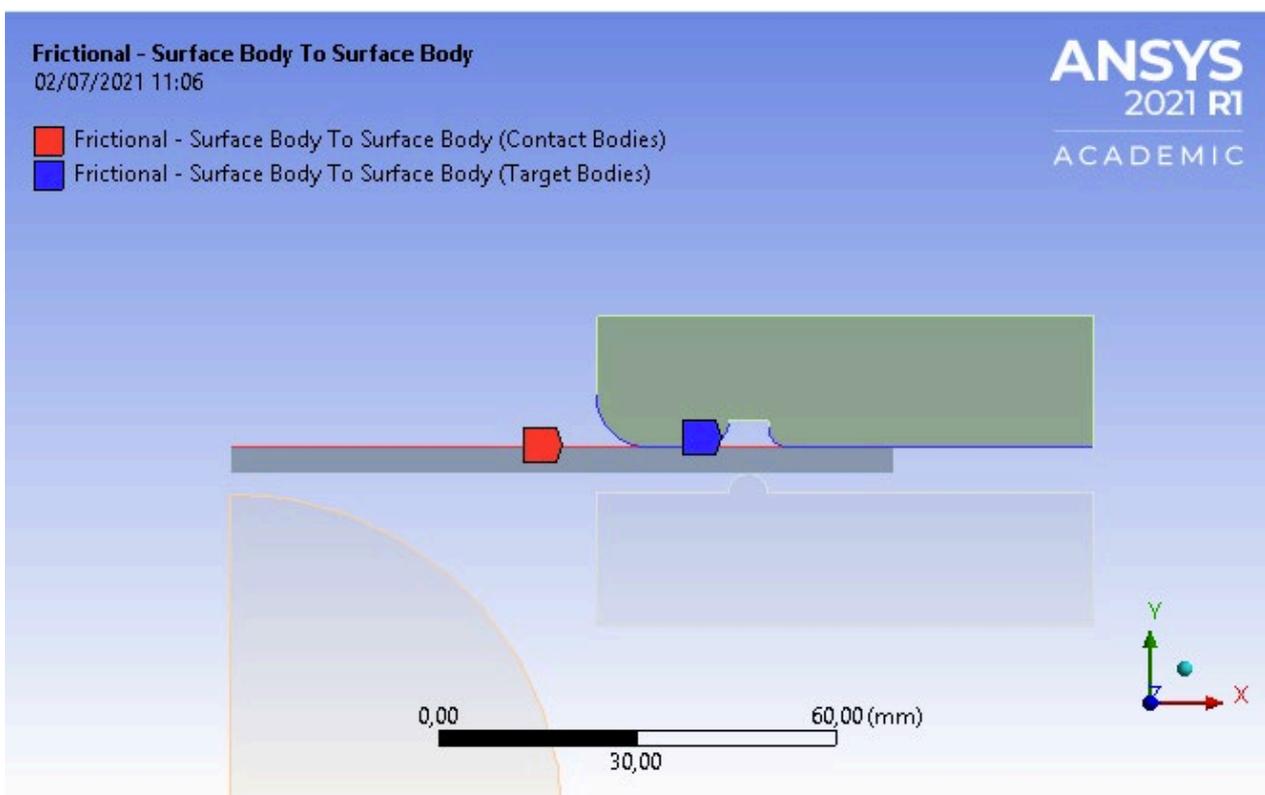
Il tipo di contatto che verrà utilizzato in questa tesi è il tipo non lineare Frictional, in quanto permette uno scorrimento tra le parti tenendo anche conto di un coefficiente di attrito  $\mu$  che è stato ipotizzato pari a 0,3.

Si definiscono, quindi, le superfici contact e target, ossia quelle superfici che probabilmente saranno effettivamente in contatto tra loro.

Il primo contatto avviene all'interfaccia della superficie superiore del provino e la superficie inferiore della flangia superiore. Esso è dovuto alla forza esercitata sul premilamiera (flangia superiore) che occorre a deformare il provino nella zona del rompigrinze, nonché alla forza di serraggio esercitata dalla bullonatura.

Viene scelto il tipo di contatto, ossia Frictional, per le ragioni appena citate.

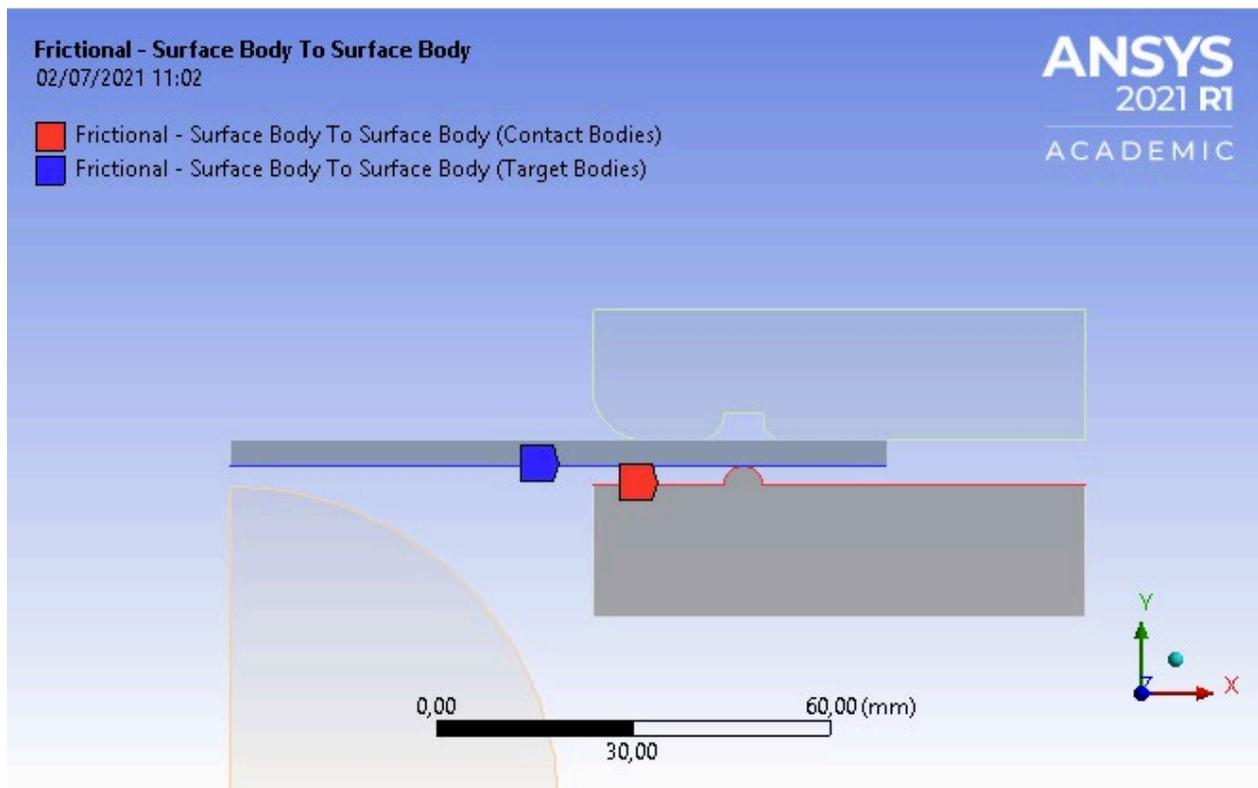
Nella *Figura 5.i* si evidenziano le superfici scelte come Contact Bodies e Target Bodies.



*Figura 5.i*

Si stabilisce il secondo contatto, ossia quello che avviene tra la superficie inferiore del provino e la superficie superiore della flangia base. Questo è ovviamente dovuto allo spostamento che compie la flangia superiore in direzione Y verso il basso e che obbliga il provino e la flangia base ad entrare in contatto. Anche in questo caso il contatto scelto è di tipo Frictional.

Come si può vedere in *Figura 5.j* il programma evidenzia con il colore rosso la superficie scelta come Contact Bodies, con il colore blu la superficie designata come Target Bodies.



*Figura 5.j*

Il terzo ed ultimo contatto è quello necessario a compiere la prova, cioè quello che si verifica tra la superficie del punzone e la superficie inferiore della lamiera metallica.

Anche in questo caso si sceglie un contatto di tipo Frictional le cui superfici Contact e Target vengono evidenziate in *Figura 5.k* alla pagina successiva.

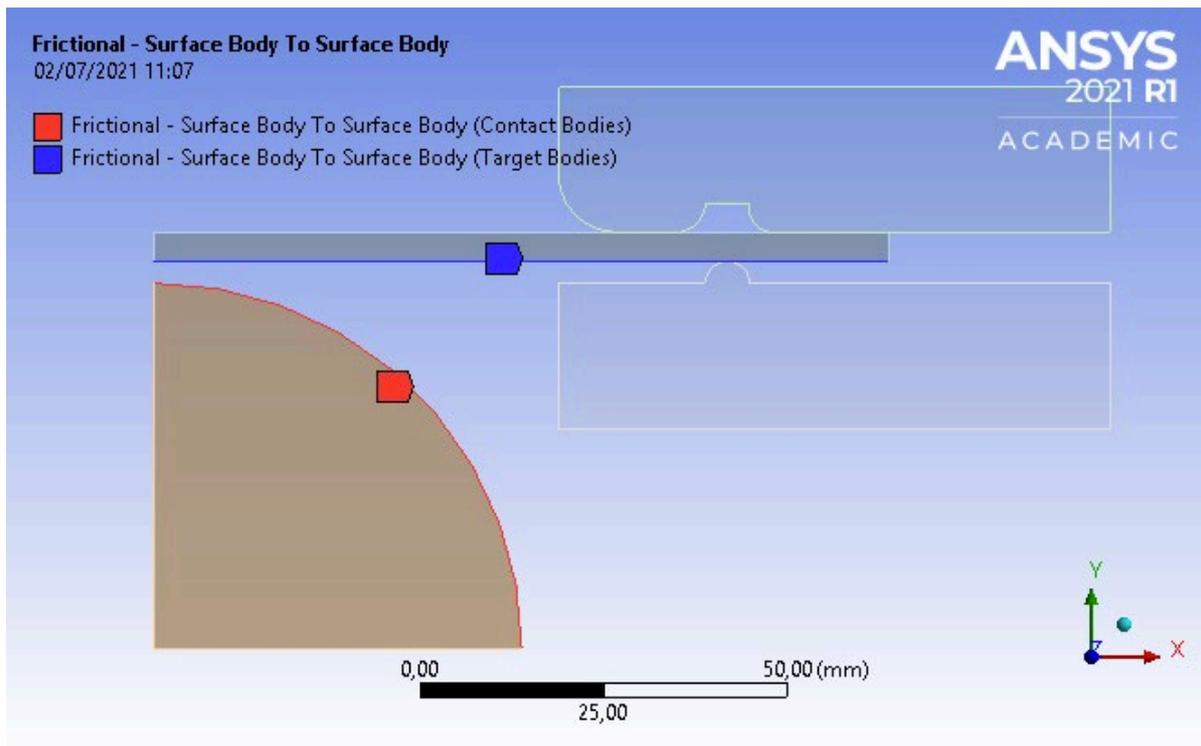


Figura 5.k

In tutti i tre tipi di contatto la formulazione utilizzata, come prima detto, è la Augmented Lagrange. L'impostazione che ANSYS ci fornisce di default e che rappresenta il miglior compromesso tra Pure Penalty e Normal Lagrange, permette una lieve compenetrazione ed evitando il fenomeno di chattering.

## 5.4 Mesh

In questo paragrafo si vuole capire come è stata impostata la mesh dei quattro corpi interessati per compire l'analisi agli elementi finiti.

La mesh è di fondamentale importanza per un buon risultato delle analisi. Tra i quattro corpi in prova, quello di maggior importanza è il provino, per cui è giusto concentrarsi per ottenere una mesh ottimale sul provino, rispetto agli altri corpi, al fine di affinare i risultati ottenuti e renderli quanto più possibile veritieri.

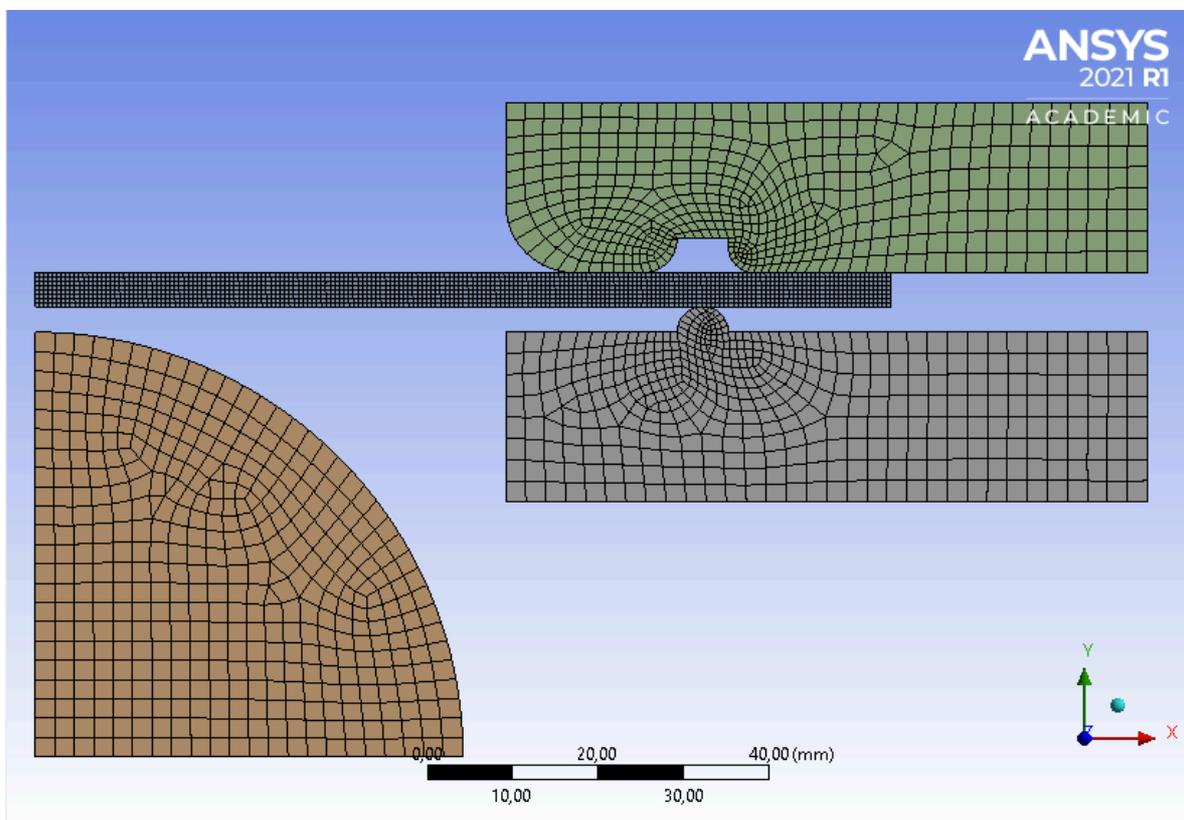
La mesh dei corpi può essere generata con un comando apposito. ANSYS genera una mesh autonomamente. Per migliorare i risultati della prova, sono state apportate delle piccole modifiche a partire dalla mesh predefinita.

Sulla mesh inerente al punzone, alla flangia base e alla flangia superiore è stata proposta una mesh con elementi misti quadrangolari e triangolari. Questi elementi sono stati poi rifiniti con l'apposito comando, chiamato da ANSYS, "*Rifiniment*", per ottenere degli elementi più piccoli.

Sul provino, essendo, visto in sezione, un rettangolo, si è scelta una mesh con elementi a quattro nodi (quadrangolari). La suddetta mesh è stata poi migliorata applicando un affinamento, con la funzione “Rifiniment”, ed inoltre sono state diminuite le dimensioni di ogni singolo elemento, passando da 4,1899 mm, valore di default, alla misura di 1 mm.

Alla fine della configurazione la mesh si presenta come in *Figura 5.1*.

Si evidenzia come sulle flange e sul punzone siano presenti elementi a tre nodi (triangolari) e anche a quattro nodi (quadrangolare). Utilizzando una mesh con elementi misti, il software applica elementi quadrangolari; in alcuni punti, invece, il programma cerca di partizionare le curvature in maniera più omogenea possibile, per cui inserisce autonomamente un elemento triangolare (a tre nodi).



*Figura 5.1*

## 5.5 Definizione del problema strutturale

Impostare il problema strutturale vuol dire comunicare al programma quali sono i vincoli, spostamenti e forze cui sono soggetti i corpi.

Conosciamo ormai il funzionamento dell'apparato che si sta studiando.

In un primo step si ha una forza, applicata da una pressa idraulica, sulla flangia superiore, che deforma il provino localmente in concomitanza del rompigrinze e porta a contatto i tre corpi interessati (flangia superiore, provino, flangia base).

Nel secondo step il profilo del punzone (che nel caso del Bulge Test idraulico può essere assimilato alla cupola di olio in pressione) si muove in direzione Y verso l'alto, entra in contatto con la lamiera metallica e imprime una forza di 70000 N (nel caso del Bulge Test idraulico esso imprime una pressione di 300 bar).

Per facilitare il software e aiutare la convergenza non lineare, piuttosto che ragionare in termini di forze, conviene ragionare in funzione di spostamenti che i corpi subiscono.

Nella prova si vuole deformare il provino, per cui dovremo portare il materiale che compone la lamiera metallica, ossia l'acciaio inossidabile, oltre il suo limite di snervamento  $\sigma_s$ .

Ciò vuol dire che stiamo realizzando un'analisi di tipo non lineare. Questo va comunicato al programma attivando tra le impostazioni dall'analisi quelle che ANSYS chiama "*Large Deflection*".

Nella trattazione si è divisa l'analisi in 35 step, il 1° è relativo al portare a contatto provino e flange, ricreando la chiusura del sistema, dal 2° al 35° si simula l'azione del punzone.

L'azione del punzone sulla lamiera metallica è stata divisa in 34 step poiché, incrementando gradualmente lo spostamento del punzone, è interessante vedere progressivamente come varia il possibile scorrimento che può avere il provino e come cambia anche la forza di reazione esercitata durante la prova sul prelamiera (flangia superiore)

Si può quindi vedere la configurazione del problema, ragionando in spostamenti.

Sono stati inseriti 3 spostamenti, che sono visibili in *Figura 5.m*:

1. *Vincolo A*
2. *Spostamento B*
3. *Spostamento C*

*Vincolo A*: la flangia base deve fungere da supporto di tutto l'apparato, non deve subire alcuno spostamento in nessuna direzione. Esso può essere assimilato ad un vincolo d'incastro.

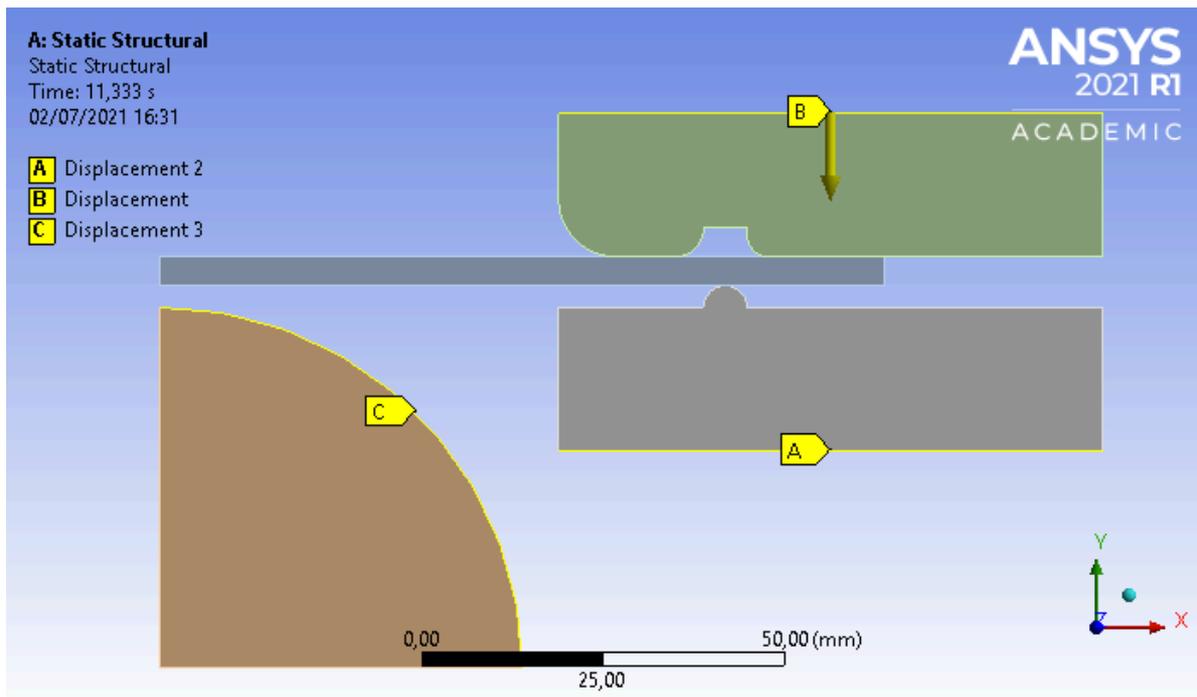


Figura 5.m

*Spostamento B:* la flangia base deve compiere, durante il 1° step, una dislocazione in direzione Y verso il basso dell'ordine di 3 mm. Infatti 3 sono i millimetri che separano la flangia base dal provino. Dopo il primo step, raggiunta la posizione di -3 mm in direzione Y, rimane costante fino al 35° step. Si può osservare lo spostamento che compie la flangia superiore e che compirà anche il provino nel seguente grafico. Ovviamente, lo spostamento in direzione X non è consentito, esso è dunque nullo in ogni step.

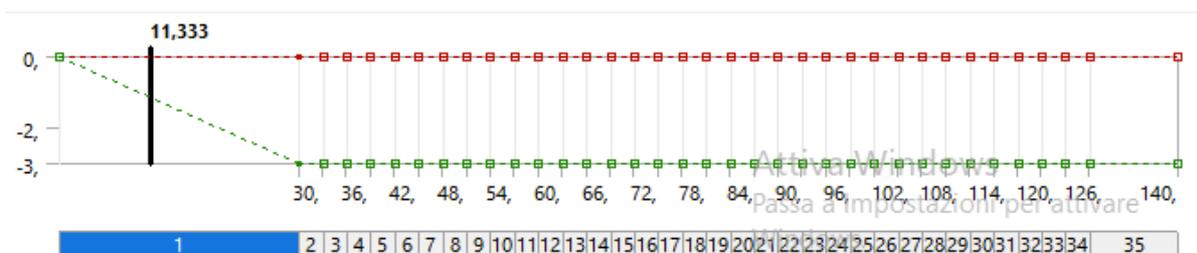


Grafico 5.1

*Spostamento C:* piuttosto di settare una forza sul punzone di 70000 N, si può immaginare che esso compia uno spostamento. Questo spostamento è stato considerato al massimo 50 mm in direzione Y verso l'alto. Tale fase, abbiamo detto essere divisa in più step, per l'esattezza 34. Il movimento del punzone inizia dallo step 2, gli è stato conferito un incremento di 1,5 mm ogni step fino alla fase 32. Lo step 33 di 1 mm. Gli ultimi due step di 2 mm. In totale il suo spostamento è di 50 mm.

Anche in questo caso lo spostamento nella direzione X è impedito.

Si può riportare tale spostamento in una tabella e di cui si inserisce anche il grafico

<i>Steps</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Direzione X [mm]</i>	<i>Direzione Y [mm]</i>
1	0	0	0
2	30	0	0
3	33	0	1,5
4	36	0	3
5	39	0	4,5
6	42	0	6
7	45	0	7,5
8	48	0	9
9	51	0	10,5
10	54	0	12
11	57	0	13,5
12	60	0	15
13	63	0	16,5
14	66	0	18
15	69	0	19,5
16	72	0	21
17	75	0	22,5
18	78	0	24
19	81	0	25,5
20	84	0	27
21	87	0	28,5
22	90	0	30
23	93	0	31,5
24	96	0	33
25	99	0	34,5
26	102	0	36
27	105	0	37,5
28	108	0	39
29	111	0	40,5
30	114	0	42
31	117	0	43,5
32	120	0	45
33	123	0	46
34	126	0	48
35	140	0	50

Tabella 5.2: Spostamenti che subisce il punzone nel tempo.

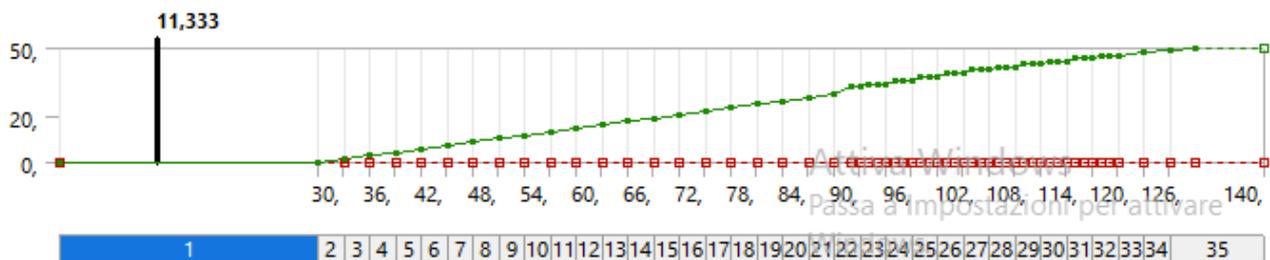


Grafico 5.2

## 5.6 Risultati

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dall'analisi.

Si era detto che l'obiettivo di tale analisi FEM era quello di capire in che modo si deforma la lamiera metallica, di verificare se ci sia un flusso radiale centripeto del materiale costituente il provino ed infine di conoscere come varia la forza di reazione che agisce sulla flangia superiore; elemento che, grazie alla bullonatura, dovrà sopportare la forza esercitata dal punzone sul provino e mantenere serrato l'apparato flangia base – provino – flangia superiore.

Quindi, tra i risultati che ci permette di selezionare il software ANSYS, sono stati scelte quattro tipi di soluzioni, incentrandosi principalmente sul comportamento del provino:

- *Total Deformation* (spostamenti totali)
- *Directional Deformation* (spostamento direzionale)
- *Equivalent Plastic Strain* (deformazione plastica)
- *Force Reaction* (forze di reazione)

Ora li vedremo tutti separatamente in dei brevi, ma utili, paragrafi dedicati.

## 5.6.1 Spostamenti totali

Questa soluzione è un'analisi sugli spostamenti totali, ossia in tutte le tre direzioni, che compie il corpo. In tale analisi sono stati oggetto di studio tutte le componenti della prova, ossia punzone, flangia base e superiore ed infine il provino.

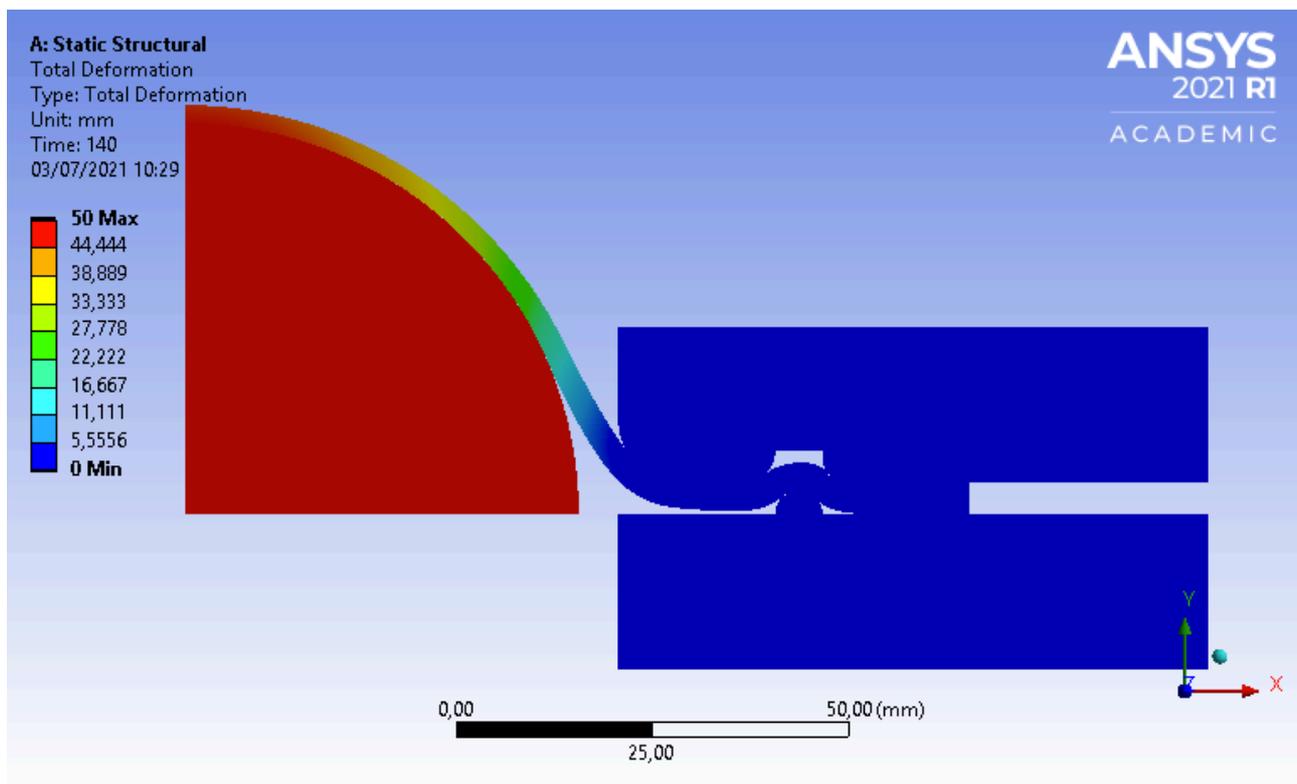


Figura 5.n

In *Figura 5.n* si può osservare il risultato ottenuto dagli spostamenti misurati in millimetri.

Il programma ci mostra delle isocurve con dei colori che dipendono dal valore di minimo spostamento (colore blu) e dal valore di massimo spostamento (colore rosso).

In realtà questa analisi è utile a capire se la simulazione funziona, ossia se la configurazione che si ottiene può essere simile o meno alla realtà.

Il risultato raggiunto mostra come effettivamente l'analisi funzioni, in quanto si ottiene una configurazione compatibile con quella che potrebbe suggerire l'intuito. Si nota un distacco tra flangia base e provino nella zona più vicina al punzone.

## 5.6.2 Spostamento direzionale

Questa analisi ci interessa di più della precedente, infatti, essa ci permette di capire se il provino è completamente bloccato dal dispositivo rompigrinze oppure no.

Il test è un'indagine sullo spostamento misurato in millimetri, compiuto esclusivamente dalla lamiera metallica, valutato nella direzione X.

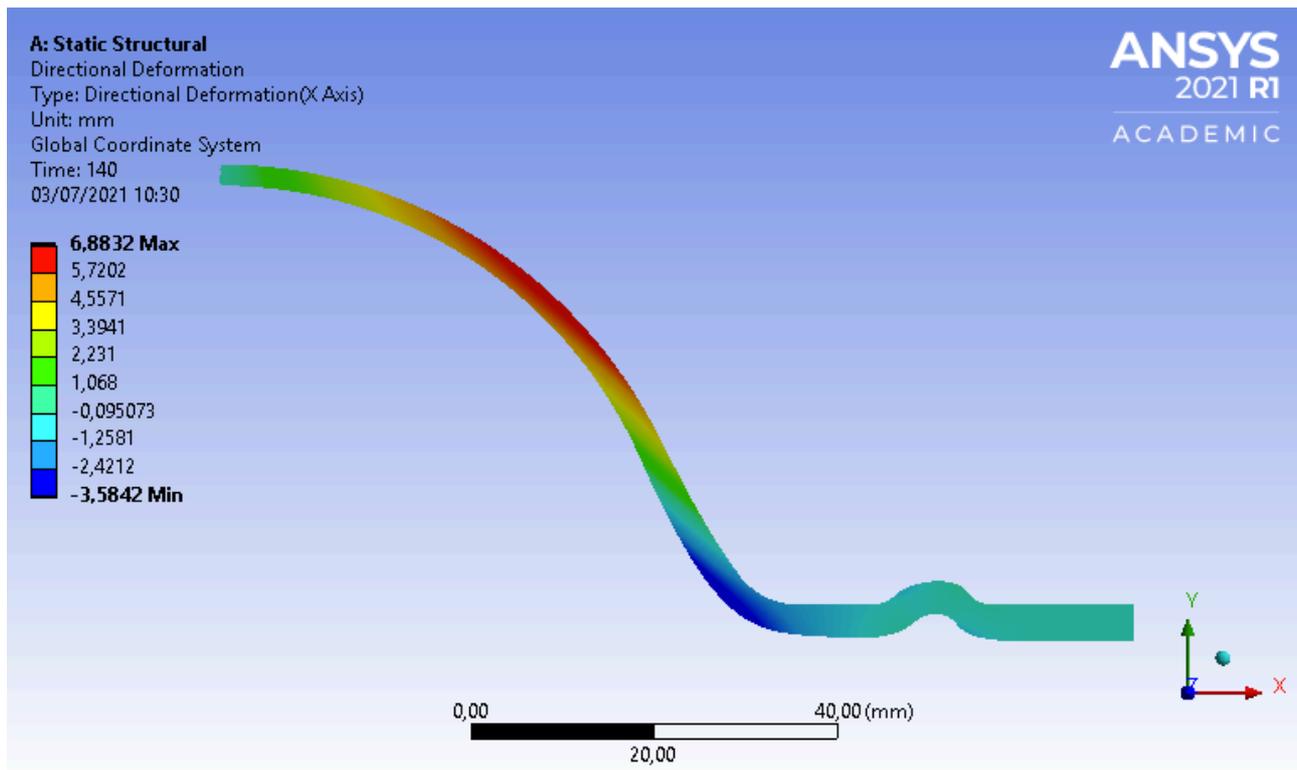


Figura 5.o

La soluzione mostra una breve clip che ci illustra lo spostamento compiuto e che viene riportata in figura la sola configurazione finale della prova (con flange chiuse ed il punzone che ha concluso la sua corsa).

Tralasciando il movimento che il provino compie a sinistra (a causa del punzone), concentrandosi, invece, nella zona del rompigrinze, si nota come l'isocurva sia di colore verde acqua. Facendo riferimento alla scala dei valori minimi e massimi in figura a sinistra, si vede che tale colore è legato ad una entità prossima al valore nullo.

Lo scorrimento in direzione X del provino è quindi trascurabile, esso, infatti è dell'ordine compreso tra zero ed 1 mm.

Ciò vuol dire che la lamiera metallica è completamente bloccata tra le flange, il flusso radiale centripeto del materiale è impedito.

In conclusione, il rompigrinze è stato dimensionato in modo corretto per il suo obiettivo.

### 5.6.3 Deformazione plastica del provino

In questo paragrafo si vuole mostrare la deformazione che il solo provino subisce, prima nella zona rompigrinze, poi a causa del punzone che compie la sua corsa di 50 mm.

Ricordiamo, dal sommario, che durante una prova di formabilità di questo tipo, ci si aspetta che il provino al termine della prova sarà deformato in una cupola, in cui le fibre esterne dell'estradosso sono più sollecitate di quelle interne dell'intradosso. Verrà raggiunta la rottura quindi nella zona in cui le fibre sono più sollecitate.

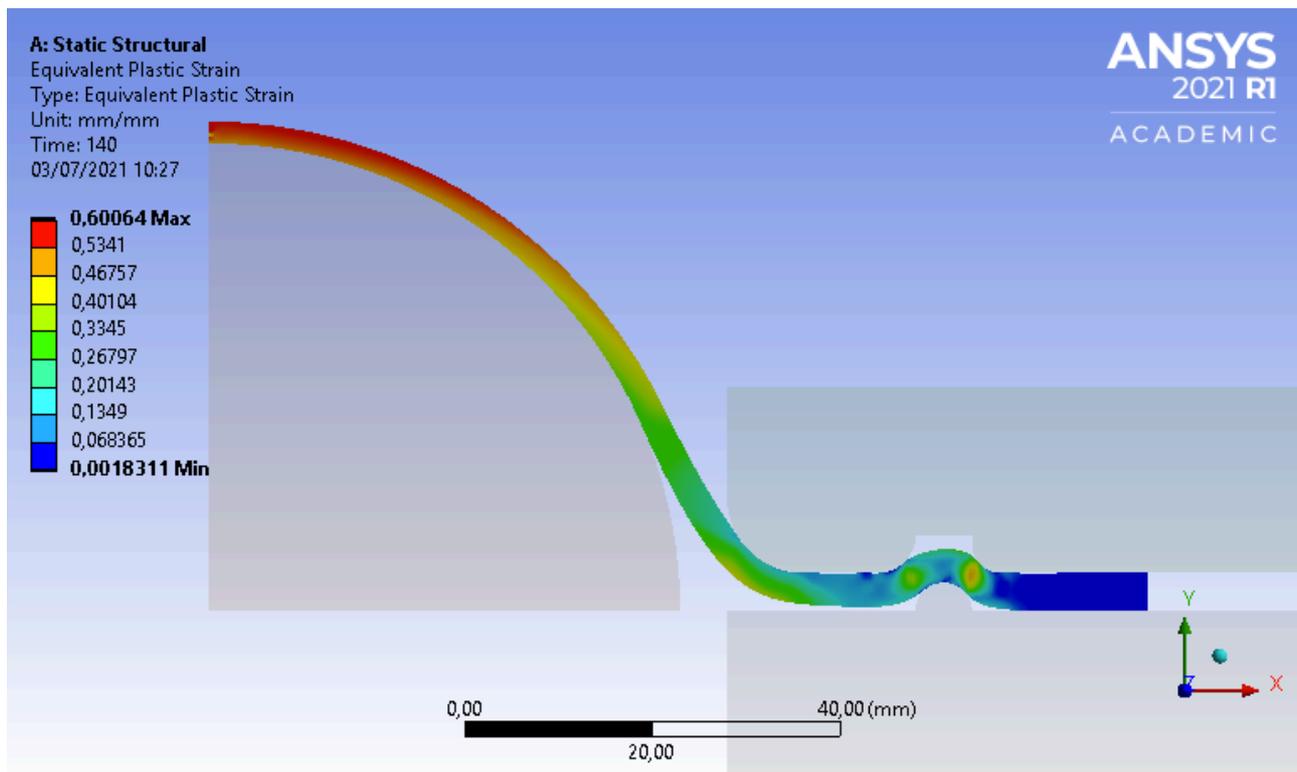


Figura 5.p

I gradienti di deformazione, mostrate dalle zone colorate in *Figura 5.p*, mostra come varia la deformazione che subisce il provino. Si descrive brevemente.

Partendo da destra verso sinistra, si nota che il provino rimane pressochè indeformato, infatti il test è stato impostato solo per avere il contatto in questa zona.

Nella zona del rompigrinze si evidenzia una deformazione più consistente che, ovviamente, ha superato il limite elastico entrando in campo plastico. In alcune zone ristrette più vicine al risalto del rompigrinze i valori di deformazione si avvicinano al valore massimo, tra lo 0,45 e lo 0,5.

Nella zona del raccordo della flangia superiore si nota una deformazione di entità media nell'area interna della lamiera, per poi aumentare sempre di più verso il centro del punzone.

Si evidenzia, infatti, come la deformazione raggiunge i valori più alti in concomitanza della punta del punzone. In particolare, dal gradiente di deformazione, si nota che essa è massima sull'estradosso ed è più grande rispetto a quella che si ha nell'intradosso.

Per cui, raggiunto lo snervamento, il punto che per primo giunge a rottura sarà quello in cui le fibre si trovano sull'estradosso della lamiera, in concomitanza della punta del punzone.

Questo è proprio ciò che si aspettava dalla teoria e che appunto trova conferma dalla analisi agli elementi finiti.

Riportando i valori della deformazione massima e minima in una tabella, si è potuto estrapolare il grafico che rappresenta il valore medio di tale deformazione assunta durante la prova.

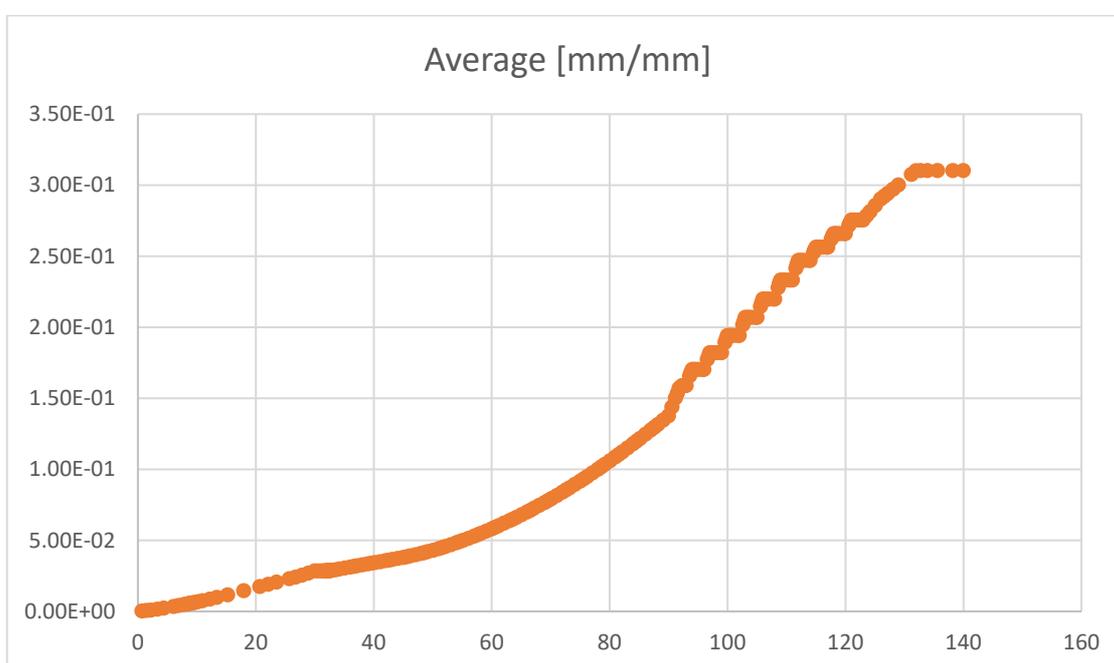


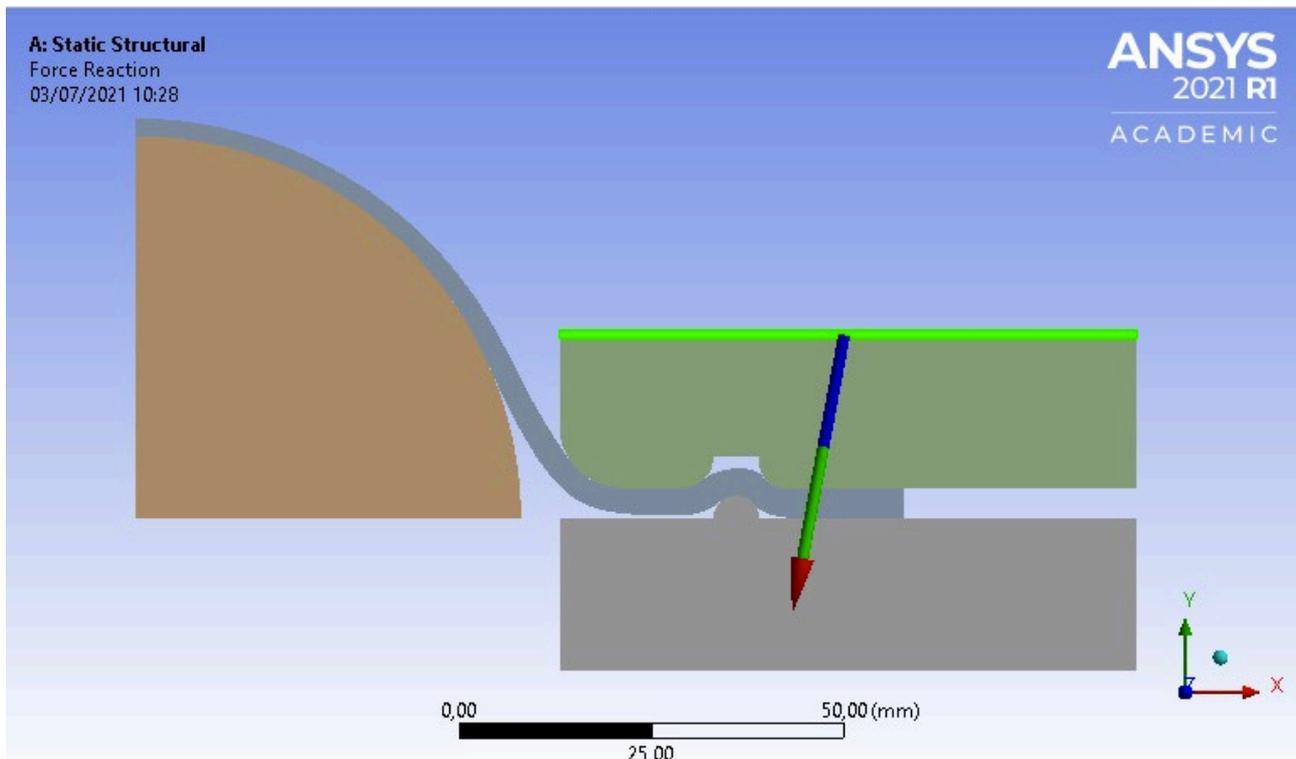
Grafico 5.3

Nel *Grafico 5.3* nelle cui ascisse è presente il tempo, misurato in secondi, e nelle ordinate la *deformazione media* (Average), si vede come il valore della deformazione cresce all'avanzare della prova. Nello specifico, fino al tempo 30 s, quando è conclusa la chiusura del provino tra le flange, la deformazione è contenuta, per poi crescere in modo considerevole grazie al punzone e fino arrivare alla deformazione massima rilevata all'istante di tempo di circa 130 s, per poi rimanere costantemente massima fino al termine della prova.

## 5.6.4 Forze di reazione

L'ultimo paragrafo di questo capitolo vuole concentrarsi sull'analisi eseguita riguardo alle forze di reazione, agenti sulla flangia superiore che dovrà sostenere tale carico assieme alla bullonatura precedentemente dimensionata nel capitolo 4.

Dopo aver selezionato la superficie superiore della flangia superiore, di cui vogliamo conoscere il carico cui è sottoposta, ciò che evince da questa analisi è la seguente *Figura 5.q*



*Figura 5.q*

La figura mostra un vettore che rappresenta direzione e modulo della forza di reazione. Ovviamente il vettore non dà modo di capire quale sia l'ordine delle forze in gioco. Conviene appunto tabulare i valori che la forza assume in direzione X, in direzione Y ed in direzione Z, dove chiaramente sarà nulla.

Una volta scritta la tabella in Excel se ne può estrapolare un grafico, che ora verrà commentato.

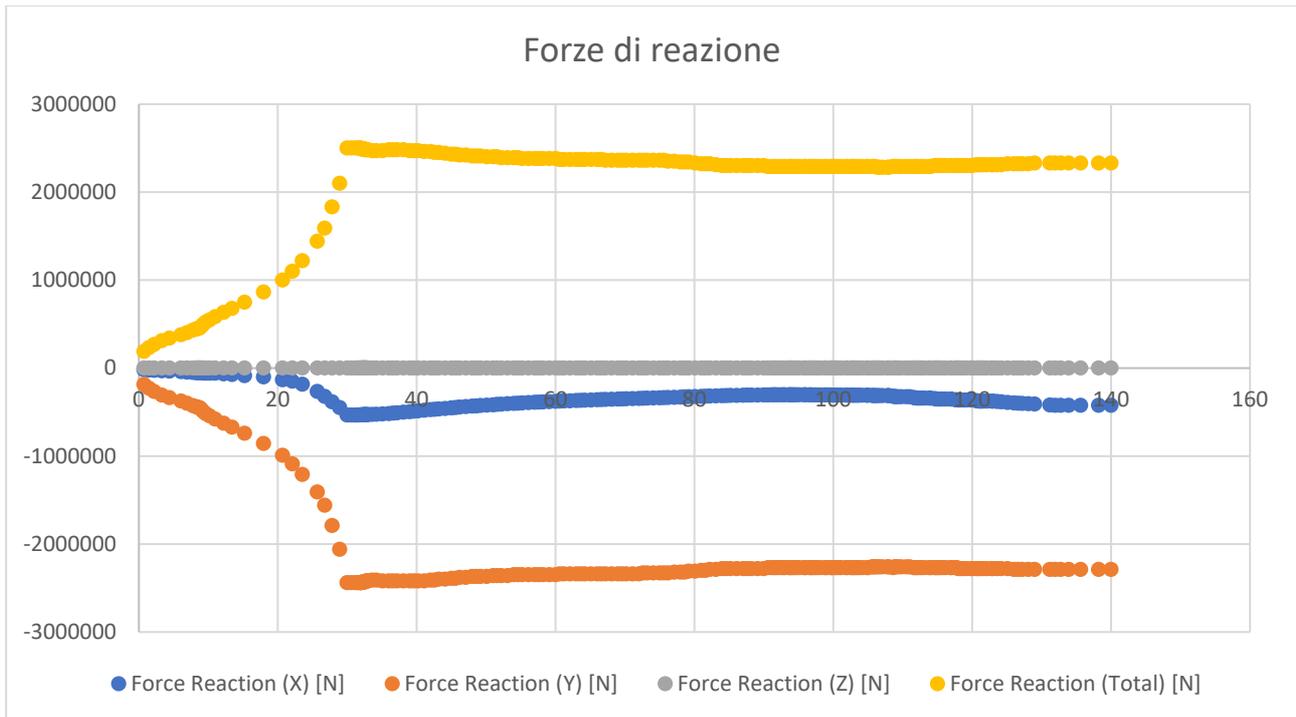


Grafico 5.4

Nel *Grafico 5.4* è riportato il tempo in secondi nelle ascisse e nelle ordinate il valore della forza espressa in Newton.

Si possono osservare quattro curve, di cui tre valgono per le forze valutate in specifiche direzioni, mentre una, quella gialla, riporta la forza di reazione totale.

Anzitutto si nota come la forza di reazione lungo la direzione *Z* è sempre nulla, per cui la forza agisce solo lungo le direzioni *X* e *Y*.

Si vede anche che la forza in direzione *X* e *Y* sono sempre negative, questo perché il vettore in *Figura 5.4* è con verso opposto agli assi *X* e *Y*, al fine di tale analisi possono essere considerati in modulo come positivi.

La forza di reazione lungo *X* è di entità assai minore rispetto quella lungo *Y*.

Quella più interessante è come varia il modulo della forza di reazione totale, la curva gialla.

Richiamando la *Tabella 5.2* è conosciuto che il punzone inizia la sua corsa all'istante  $t = 30$  s.

Si vuole evidenziare come la forza totale cresce considerevolmente dal tempo zero all'istante 30 s secondo una legge non lineare.

Una volta che il punzone inizia la sua corsa verso l'alto, la forza di reazione assume un valore più o meno costante fino alla fine della prova.

## Capitolo 6: CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati progettati due apparati di prova per il Bulge Test idraulico e per il Nakazima Test. I componenti del Bulge Test idraulico sono stati personalizzati al fine di riuscire ad accogliere un provino di materiale metallico dal diametro massimo di 300 *mm* ed un massimo spessore di 4 *mm*. Per le parti del sistema Nakazima Test, si è partito dalla medesima geometria delle componenti del Bulge Test idraulico, ma modificate al fine di accogliere un punzone di forma emisferica dal diametro di 100 *mm* e per un provino, sempre di materiale metallico, dal diametro massimo di 200 *mm* e con il massimo spessore di 4 *mm*. La tesi si è sviluppata in diverse fasi, che sono culminate con l'ottenimento della completa progettazione del banco per l'esecuzione delle due prove di formabilità.

Per prima cosa si è andato ad introdurre il lettore a quello che è il processo di formatura di una lamiera, il concetto di formabilità e le diverse prove che caratterizzano questa proprietà. Riportando, così, la prova di Erichsen, il Bulge Test idraulico ed il Nakazima Test, scoprendo i rispettivi vantaggi a confronto con le altre prove.

Si sono poi sviluppati i quattro singoli componenti delle due prove. Le flange base e superiore del Bulge Test idraulico e le flange base e superiore del Nakazima Test, dimensionata a partire dalla norma UNI EN ISO 12004-2. Entrambi gli apparati possono essere completamente confrontabili, ove la differenza fondamentale è la mancanza del punzone nel Bulge Test, sostituito da un olio in pressione. Infatti, si è dimensionata e verificata la bullonatura per ciascun sistema, scegliendo un accoppiamento bullonato composto da 12 viti M22 classe 10.9 per il Bulge Test idraulico e 12 viti M12 classe 8.8 per il Nakazima Test. In entrambi i sistemi questa bullonatura ha il medesimo scopo:

- 1 Garantire il montaggio delle flange sul banco prova, assicurandone anche la durata nel tempo, dovendo essere la bullonatura soggetta continuamente a carichi ciclici
- 2 Esercitare la forza opportuna sulla flangia superiore per evitare che il provino slitti verso il centro dell'apparato, richiamato dall'olio in pressione o dal punzone.

Allo stesso fine riportato al punto 2, le flange si sono accessoriate con l'apposito dispositivo rompigrinze, caratterizzato da un risalto sulla flangia base e da una corrispettiva cavità sulla flangia superiore, dimensionato in modo opportuno e posizionato in modo da garantire l'accoppiamento maschio – femmina tra le flange.

Si è verificata la bullonatura per resistere nel caso del Bulge Test idraulico ad una pressione dell'olio di 300 *bar*, nel Nakazima Test, invece, per garantire il serraggio con una forza impressa dal punzone pari a 70000 *N*.

La flangia base del Bulge Test idraulico è disposta di 4 fori svasati per accogliere 4 viti M8 a testa svasata. Queste viti hanno come compito quello di stringere una guarnizione O-Ring tra la flangia base ed il banco per evitare perdite di olio. Visto il loro semplice scopo, non sono state oggetto di verifica.

Scelta, quindi, la geometria delle flange si è proceduto con un'analisi attraverso un programma di progettazione agli elementi finiti, ANSYS. Per l'analisi, essendo le due prove molto simili, si è scelto di utilizzare un modello comune e di approssimare il comportamento dell'olio in pressione a quello del punzone. Con questa analisi è stato possibile esaminare le sollecitazioni che si sviluppano durante la prova su tutte le componenti. In particolare, l'obiettivo era quello di studiare la deformazione subita dal provino, considerandolo composto da un generico acciaio inossidabile. Verificare, inoltre, se esistesse un moto relativo tra provino e flange e calcolare le forze di reazione che agiscono sulla flangia superiore e quindi sulla bullonatura.

Le analisi agli elementi finiti hanno fornito dei risultati ottimali, infatti con l'analisi sugli spostamenti direzionali compiuti dal provino lungo l'asse X si è potuto notare come lo scorrimento del provino sia quasi nullo, infatti è dell'ordine massimo di 1 *mm* verso il centro del sistema. Effettuando l'analisi sulla deformazione plastica del provino si è potuto osservare che esso assume una deformata tale che le sue fibre che si trovano in concomitanza della punta del punzone sono quelle più sollecitate, in particolare, è risultato che le fibre che si trovano sull'estradosso sono più sollecitate di quelle che si trovano nell'intradosso. Questo dimostra che l'analisi ha avuto un esito positivo in quanto il risultato trova riscontro con quello che viene dettato dalla teoria. Infine, con l'analisi sulle forze di reazione si è potuto vedere come varia la forza che agisce sulla flangia superiore e quindi sulla bullonatura.

C'è da dire però che la suddetta analisi può dare solo un'idea di come varia la forza nel tempo, ma gli effettivi valori ottenuti non possono essere utilizzati per verificare la bullonatura. Questo perché l'analisi FEM è stata impostata su un modello 2D dell'apparato, quindi le forze che si ottengono sono da considerare come agenti su un settore infinitesimo del reale modello tridimensionale. Per ottenere valori ottimali e migliorare il problema di verifica della bullonatura bisognerebbe ricorrere all'utilizzo di una seconda analisi FEM su un modello 3D.

Si osserva comunque che i sistemi sono composti da parti relativamente semplici e di facile smontaggio, anzi, saranno montati e smontati continuamente per la sostituzione del provino rotto con uno nuovo. Questo comporta un notevole vantaggio durante le operazioni di sostituzione della lamiera metallica e qualora si dovesse sostituire un componente per un eventuale rottura.

Durante le prove, la deformazione subita dal provino può essere misurata con degli *estensimetri*<sup>3</sup> oppure con la più usata tecnica di analisi tramite *DIC*<sup>4</sup> (*Digital Image Correlation*).

Un futuro lavoro potrebbe essere lo studio sul come si comportano le flange durante la prova, vedere quali sono le deformazioni che esse subiscono e quali sono le zone più sollecitate, ponendo attenzione particolare alla zona del rompigrinze e capire come questo dispositivo, così dimensionato, risponde alla sollecitazione imposta dal provino.

Un successivo studio può riguardare la scelta del materiale da utilizzare per realizzare le flange base e superiore del Bulge Test idraulico e Nakazima Test, magari effettuando anche diverse analisi FEM, visto che in questa tesi, per le flange è stato considerato un generico acciaio strutturale il cui Modulo di Young è stato aumentato a 230 *GPa* al fine di renderle idealmente rigide rispetto il provino.

Un ulteriore oggetto di studio può riguardare la tipologia di lamiera da deformare, analizzando in modo specifico gli spessori che possono essere assegnati, per capire quali sono i reali limiti del sistema progettato. Si potrebbe anche effettuare un'indagine nell'utilizzo di diversi materiali costituenti il provino e non solo l'acciaio inossidabile considerato in questa trattazione

Altra sperimentazione, che potrebbe essere di interesse, può riguardare il dimensionamento del motore dedicato alla pressurizzazione dell'olio ed alla movimentazione del punzone nel Nakazima Test. Tale studio deve mirare a garantire il raggiungimento delle giuste pressioni tali da portare il provino a deformazione ed infine a rottura in entrambi gli apparati.

---

<sup>3</sup> **Estensimetro**: è un particolare strumento di misura usato per quantificare le piccole deformazioni che un corpo subisce dopo una sollecitazione meccanica

<sup>4</sup> **DIC**: è una tecnica di misura il cui funzionamento si basa sull'acquisizione di immagini digitali sull'oggetto che si vuole esaminare in diverse condizioni di sollecitazione e sulla successiva elaborazione di tali immagini. Ha come punti di forza la facile acquisizione di dati, il fornire una misura particolarmente densa e la possibilità di misurare campi di deformazioni anche ingenti



## Bibliografia

- **“Experimental and numerical investigation on forming limit curves of AA6082 aluminum alloy at high strain rates”**, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; Michela Simoncini, Archimede Forcellese, Edoardo Mancini, Gianluca Chiappini, Marco Sasso.
- **“Fault Location of Strip Steel Surface Quality Defects on Hot-Rolling Production Line Based on Information Fusion of Historical Cases and Process Data”**, *IEEE Access*; ZHAOPING WANG, JIAN WANG, SEN CHEN.
- **“On the fracture characteristics of advanced high strength steels during hydraulic bulge test”**, *International Journal of Mechanical Science*; Vivek K. Barnwal, Shin-Yeong Lee, Jisik Choi, Jin-Hwan Kim, Frédéric Barlat.
- **Dispense del corso “Costruzione di Macchine”** presso l’Università Politecnica delle Marche tenuto dal Professore Marco Rossi.
- **“Progetto e costruzione di macchine”**, Editore McGraw-Hill Education; Joseph E. Shigley, Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, D. Amodio, G. Santucci.
- **Dispense del corso “Tecnologie Meccaniche”** presso l’Università Politecnica delle Marche tenuto dal Professore Archimede Forcellese.
- **“Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche”**, Editore McGraw-Hill; di F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Micari.
- **Metallic materials – Sheet and strip – “Determination of biaxial stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring systems”**, *ISO/TC 164/SC 2*
- **Materiali metallici – Lamiere e Nastri – “Determinazione delle curve limite di formabilità, Parte 2: Determinazione delle curve limite di formabilità in laboratorio”**, *UNI EN ISO 12004-2*
- **“Misure meccaniche e termiche”**, Carocci Editore; Gianluca Rossi

## Sitografia

- <http://www.bulloneriaemiliana.it/>
- <https://www.ubk.it/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=a4VzallQ9o8>
- <https://www.engineeringvillage.com/>
- <https://link.springer.com/>





## RINGRAZIAMENTI

Questa tesi per me rappresenta il frutto di anni di studio, sacrifici e impegno costante. Vorrei dedicare questo spazio a tutte le persone che, con il loro supporto, mi hanno aiutato in questo meraviglioso percorso di approfondimento delle conoscenze, in un ambito che da sempre mi appassiona.

Ringrazio innanzitutto tutta la mia famiglia, in particolare, mio padre Antonio, mia madre Maria Teresa, mia sorella Valentina e Matteo. Grazie per avermi sempre sostenuto e per avermi permesso di portare a termine gli studi universitari, sia economicamente che mentalmente. Senza di voi non avrei mai avuto la possibilità di studiare e di scrivere questo elaborato.

Ringrazio nonna Lucia, a cui voglio molto bene. So che stava spettando questo momento da tempo e so che ora è fiera di me.

Ai nonni Vincenzo e Fioravante ed a nonna Maria, che purtroppo oggi non possono essere presenti qui con me fisicamente.

Grazie alla mia ragazza Maura, per non aver smesso mai di incitarmi. Grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato. Grazie perché ci sei sempre stata.

Ai tutti i miei amici, soprattutto i più cari, Michael, Matteo, Riccardo, Francesco, da una vita sempre presenti anche in questa ultima fase del mio percorso di studi. Grazie per aver ascoltato i miei sfoghi, grazie per tutti i momenti di allegria.

Ai tutti i miei compagni di università, specie i più stretti, Mateo, Andrea, Eros, Paolo, Gianmarco, David. A voi che mi avete sopportato nei momenti di difficoltà e dato sempre i giusti consigli. Grazie per i momenti di divertimento e spensieratezza che avete scelto di trascorrere assieme a me.

A Luca, mitico coinquilino, con cui, oltre la casa, condivido percorso di studio, notti insonni e passioni. Grazie per avermi sopportato sempre ed aiutato nel momento del bisogno.

Infine, grazie a tutta l'Università Politecnica delle Marche, a tutti i miei professori, al mio relatore Professore Marco Rossi, al mio correlatore Professore Attilio Lattanzi ed al dottorando Ingegnere Luca Morichelli. Grazie a voi, che con la vostra passione e il vostro amore per la materia, siete stati in grado di trasmettermi parte delle vostre conoscenze.