

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

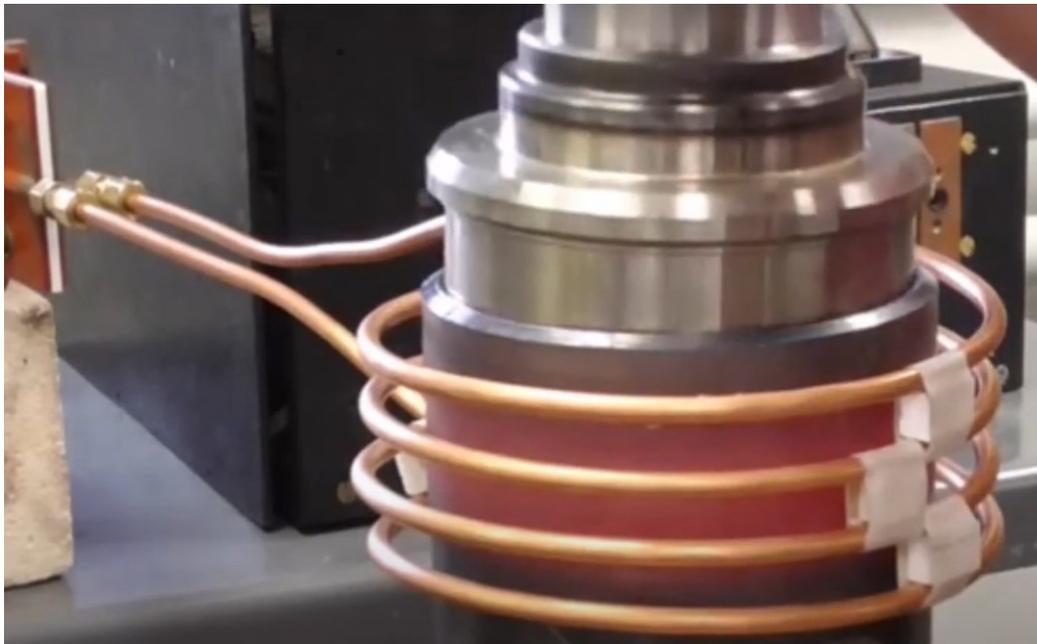
Calettamento a freddo in stampi da forgiatura: studio e verifica di fattibilità

Tutor universitario: *Prof. Ghiotti Andrea*

Padova, 20/09/2024

Laureando: *Sopracolle Nicola 2009635*

Per calettamento, nel mondo della tecnologia meccanica, si intende quella lavorazione per la quale due componenti vengono collegati tra loro (appunto calettati) per la trasmissione del moto o per definire una connessione ad incastro, in modo tale da garantire una stabilità tra i due pezzi.



Esempio di calettamento a caldo tramite induzione di una camicia



Esempio di calettamento criogenico in azoto di una camicia

Calettamento a caldo

- Dilatazione uniforme
- Riscaldamento localizzato o completo
- Controllo attento alla temperatura tramite termocoppie ($\approx 300^{\circ}\text{C}$)
- Lavorazioni con temperature al di sotto di rinvenimento
- Operazione relativamente semplice e costi economici contenuti

Calettamento a freddo

- Contrazione uniforme
- Raffreddamento completo
- Temperatura di lavoro ($\approx -200^{\circ}\text{C}$)
- Non ci sono problemi con trattamenti termici effettuati in precedenza
- Reperibilità e stoccaggio Azoto
- Operazione relativamente semplice e costi contenuti

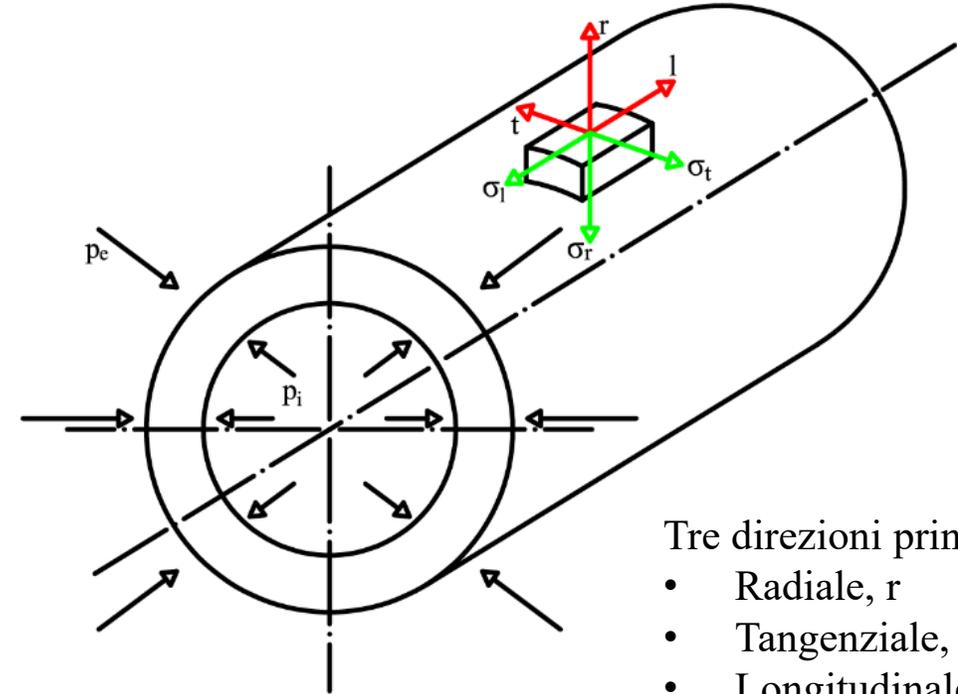
Obiettivi della prova:

- Studio teorico dell'operazione di calettamento
 - Dimensionamento degli spessori minimi
 - Calcolo tensioni minime raggiungibili
- Analisi grafica andamento tensioni-spessore
 - Realizzazione di un prototipo
 - Valutazione e considerazioni finali

Teoria dei gusci spessi

Ipotesi applicative:

- Assial-simmetria di carichi e geometria
- Carichi e geometria uniforme lungo L
- Tensione longitudinale uniforme lungo L
- Materiale con comportamento elastico
- $\sigma_L = 0$, poiché priva di fondi



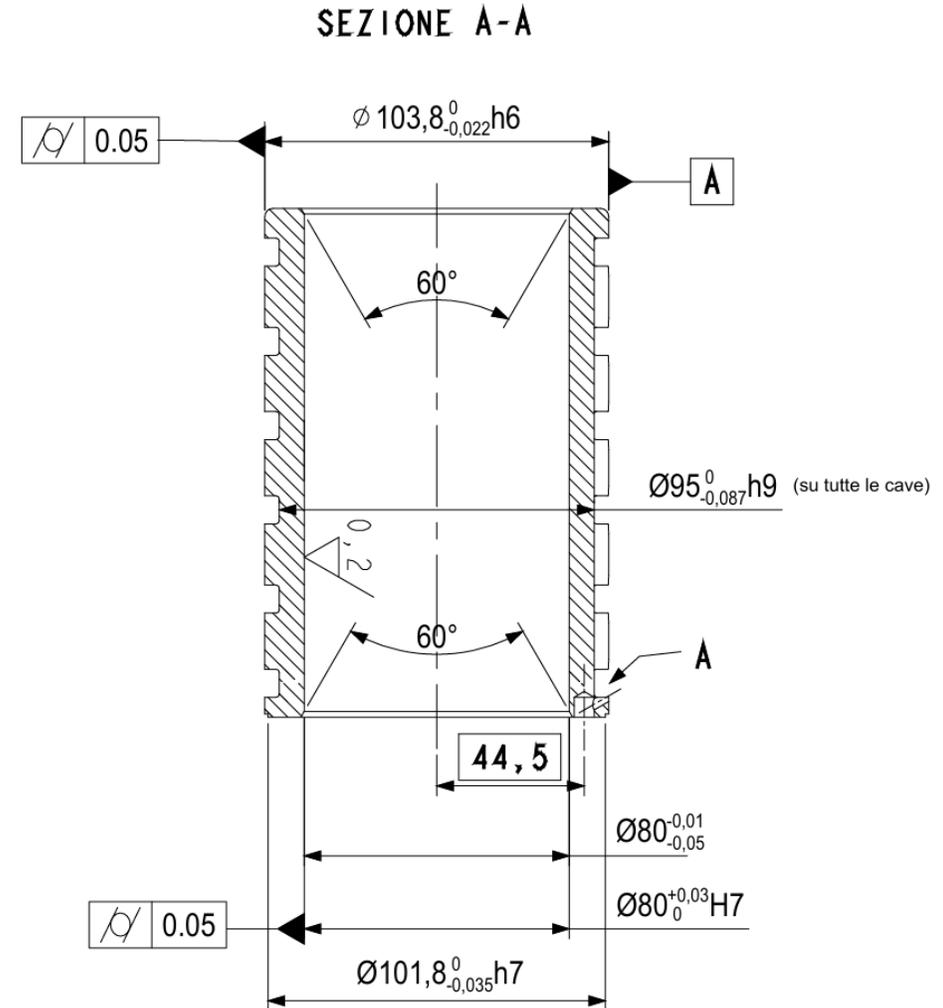
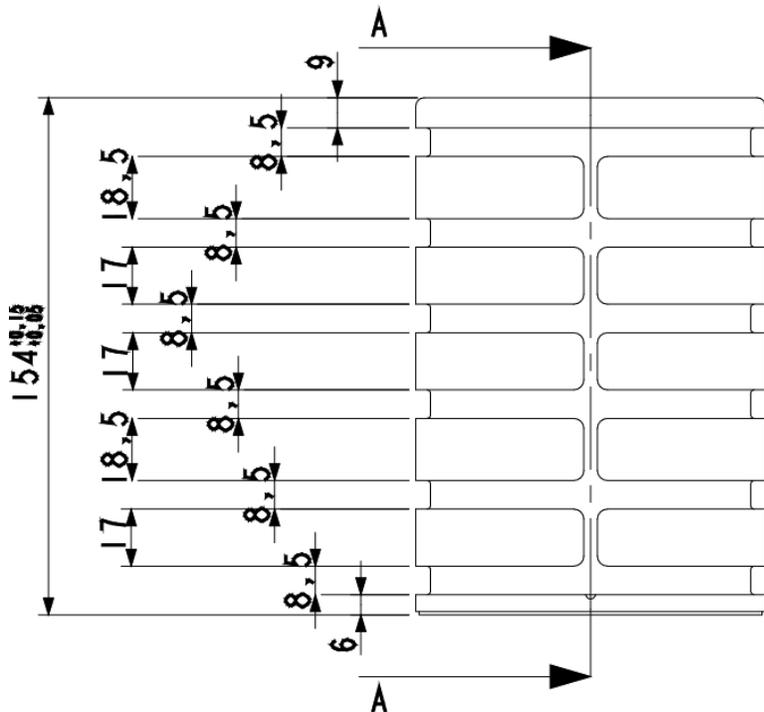
Tre direzioni principali:

- Radiale, r
- Tangenziale, t
- Longitudinale, l

Costanti di Lamè	}	=	{	$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} - (p_i - p_e) \frac{r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2}$
Condizioni di contorno				

Problematiche principali:

1. Protezione avvolgimento esterno
2. Dimensioni di ingombro ridotte
3. Necessità di adattamento a corse differenti



Per lo studio tecnico è stato realizzato un foglio di calcolo Excel che permette di valutare per qualsiasi condizione di lavoro, quale siano le tensioni che si sviluppano lungo uno spessore t per una determinata pressione e per un certo materiale.

INPUT:

- Tensione di snervamento del materiale \rightarrow tensione ammissibile $\sigma_{amm} = \sigma_s / 1,5$ [Mpa]
- Pressione interna ed esterna (ipotesi di $P_e = 0$ [Mpa]) e pressione di contatto $P_c = 10 \div 15$ [Mpa]
- Interferenza \cong decimo di millimetro
- Dimensioni di massima, diametro interno $\varnothing 80$ mm e diametro esterno $\varnothing 103,8$ mm

Calcolo della forza di calettamento $F_C = P \cdot \mu \cdot d \cdot \pi \cdot L$ [N] $P =$ pressione di contatto in N/mm^2

$d =$ diametro nominale di accoppiamento in mm

$\mu =$ coefficiente di attrito statico per contatto bussola – camicia

$L =$ lunghezza di calaggio in mm

Dilatazione termica lineare: $\Delta R = R_i \cdot \Delta T \cdot \alpha$

con α coefficiente di dilatazione termica lineare dell'acciaio $\approx 1,25 \cdot 10^{-5}$ [1/K]

- Calettamento a caldo $\Delta T = 250/300$ °C
- Calettamento a freddo $\Delta T = -196$ °C

OUTPUT:

- Valore limite minimo dello spessore t delle camice [mm]
- Forza necessaria per il calettamento [N]

Dall'equazione inversa di Lamè si ottiene il valore del raggio esterno della camicia, ponendo $\sigma_t = \sigma_{amm}$

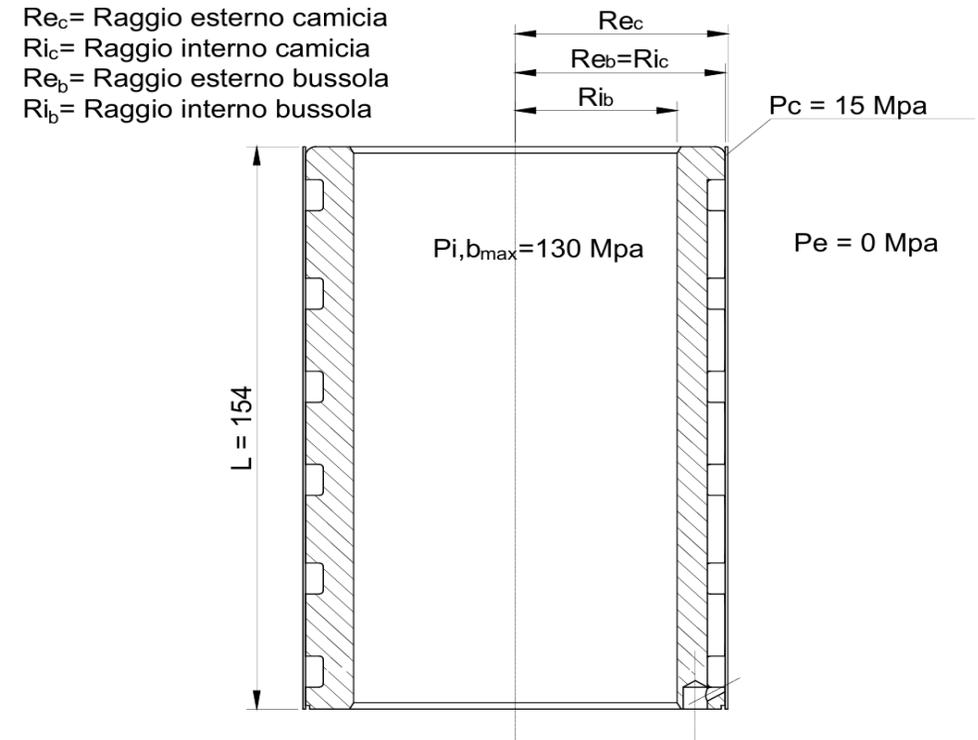
$$R_{e,c} = \sqrt{\frac{R_{i,c}^2 \cdot (P_i + \sigma_{amm})}{\sigma_{amm} - P_i + 2 \cdot P_e}}$$

Avendo il raggio interno della camicia uguale al raggio esterno della bussola.

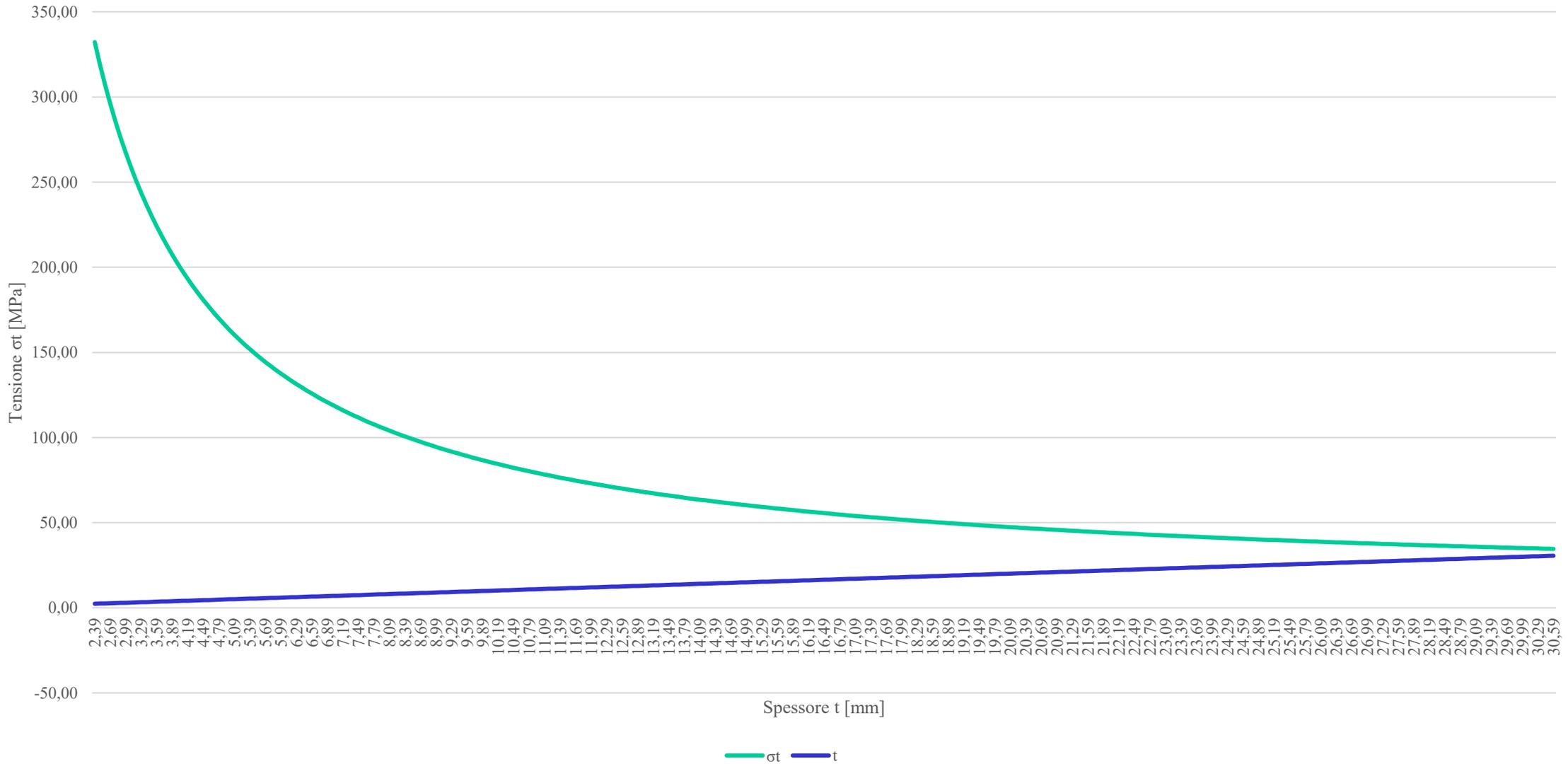
Si calcola lo spessore $t = R_{e,c} - R_{i,c}$ [mm]

Come riportato nelle slide iniziali l'obiettivo della prova è raggiungere lo spessore minimo mantenendo le tensioni minime, quindi dalle equazioni di Lamè si può concludere che la tensione tangenziale deve essere minore della tensione ammissibile del materiale.

Verifica finale : $\sigma_t < \sigma_{amm}$



Andamento tensione σ e spessore t



Scelte operative

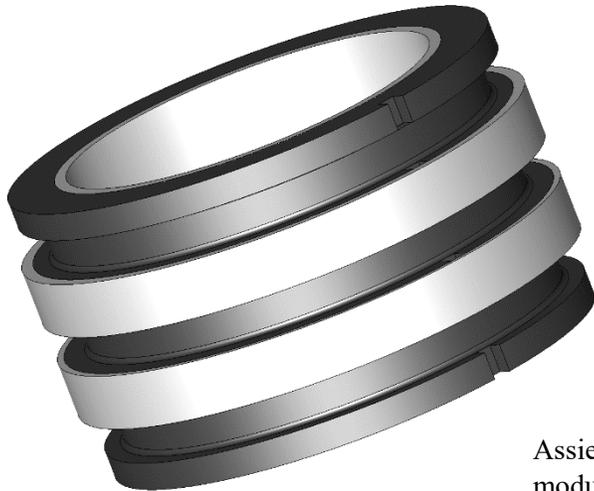
Studio di un prototipo componibile a moduli

Realizzazione di camicia interna ed esterna

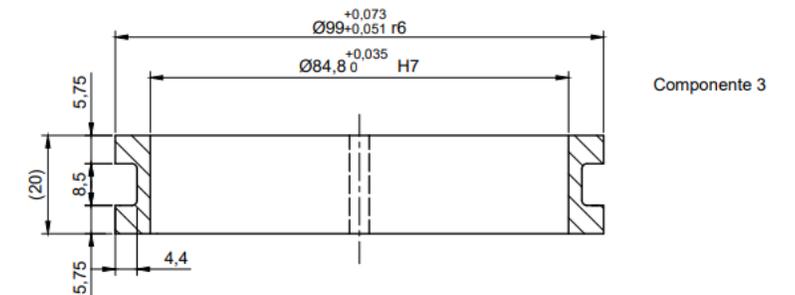
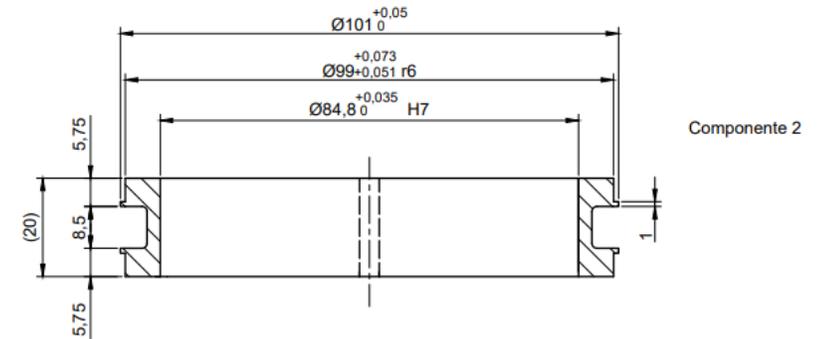
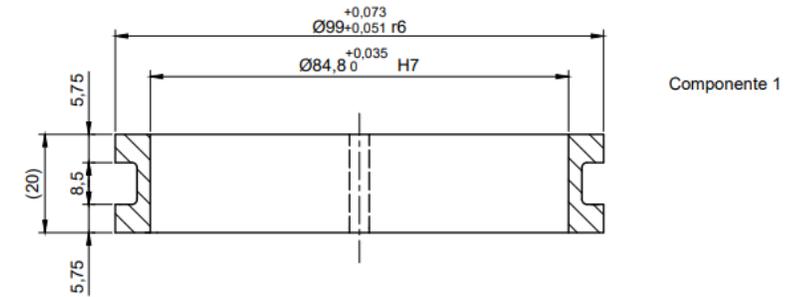
Tolleranze di interferenza tra camicia interna e bussola, e camicia esterna di contenimento e bussola

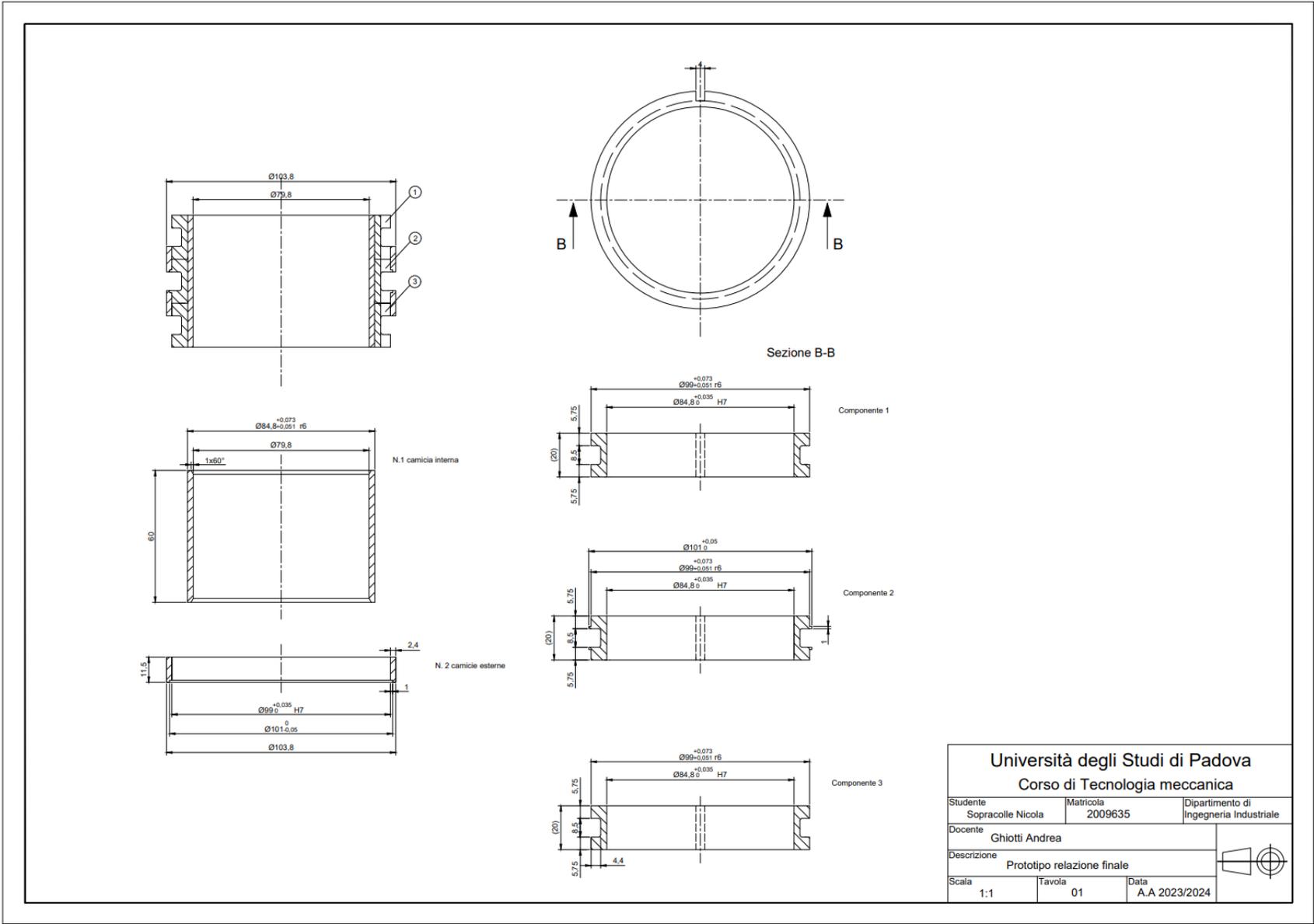
Utilizzo di software Cad e di modellazione solida per la progettazione del prototipo

Scelta materiale : Acciaio C45 con $\sigma_s = 500 \text{ N/mm}^2$



Assieme dei componenti modulari «Bussole»





Obiettivi prova

Studio e progettazione:

- Analisi della teoria dei gusci spessi
- Studio per la creazione del prototipo
- Disegni e costruzione in officina meccanica

Prototipazione:

- Realizzazione di 3 componenti modulari
- Particolare attenzione alle tolleranze di progetto
- Utilizzo di lavorazioni tecnologiche quali asportazioni di truciolo ed EDM

Sviluppi futuri

- Scelta del materiale ottimale in termini di qualità e costi
- Analisi di deformazione dello stampo
- Introduzione di lavorazioni automatiche
- Produzione in larga scala di componenti modulari per stampi da forgiatura

Grazie per l'attenzione!