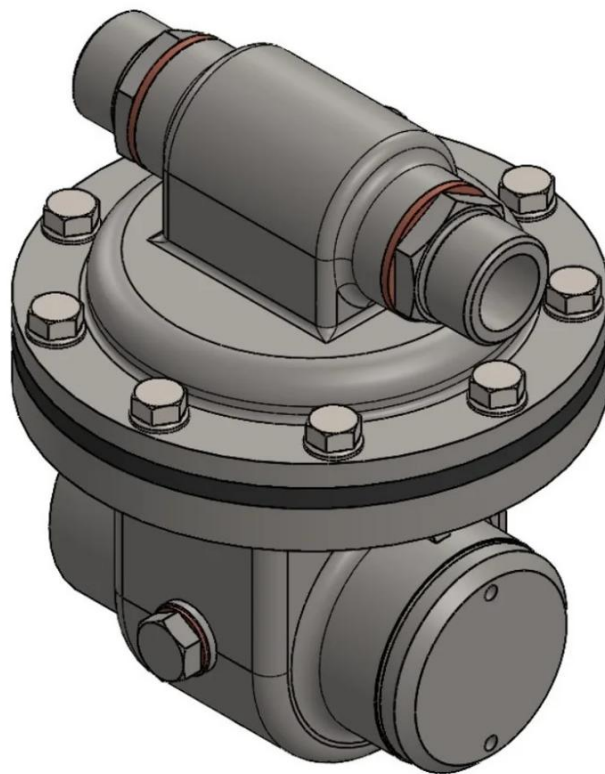




UNIVERSITÀ DI PISA

RELAZIONE TECNOLOGIE DI PRODUZIONE

Pompa a Membrana



A.A. 2024/2025

INGEGNERIA PER IL DESIGN INDUSTRIALE

Progetto a cura di Milla Lanzoni e Alessia Scordato

INDICE

INTRODUZIONE	5
PROCESSO DI FUSIONE	6
Coperchio pompa	6
Scelta del processo di formatura	7
Scelta del tipo di terra	8
Inserimento dei sovrametalli	9
Scelta del piano di divisione	10
Modifiche del pezzo: angoli di sformo e raggi di raccordo	11
Ingrandimento del greggio	13
Progettazione di anima e portate d'anima	14
Studio della solidificazione del getto	16
1) Metodo della suddivisione del pezzo in più solidi elementari	17
2) Metodo dei cerchi di Heuvers	21
3) Prima simulazione con InspireCast	22
Materozze e raffreddatori	24
Dimensionamento della materozza	25
Dimensionamento dei raffreddatori	30
Sistema di colata	33
Dimensionamento collare d'attacco	33
Dimensionamento sistema di colata	34
Simulazione della colata	36
Staffe	40
Spinte metallostatiche	40
Disegni delle placche modello	43
Tempi di produzione	44
Costi di produzione	46
PROCESSO PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO	50
Albero	50
Scelta del materiale	50
Suddivisione delle superfici e scelta del processo	52
Scelta dei macchinari	54
Scelta utensili e parametri di taglio	61
Utensili per sgrossatura leggera, finitura e smussi	62
◆ Parametri di taglio per sgrossature leggere, finiture e smussi	64

Utensili per sgrossatura pesante	69
◆ Parametri di taglio per sgrossature pesanti.....	71
Utensili per rettifica	73
◆ Parametri di taglio per rettifiche.....	73
Utensili per filettatura esterna	75
◆ Parametri di taglio per filettature	77
Utensili per fresatura	79
◆ Parametri di taglio per fresature.....	83
Strumenti per il controllo dimensionale	85
Tempi di produzione	87
Costi di produzione.....	96
PROCESSO DI DEFORMAZIONE PLASTICA.....	99
Disco contenitore membrana	99
Materiale della lamiera di partenza	100
Calcolo della dimensione del lamierino di partenza	100
Imbutitura.....	101
Tranciatura	107
Scelta del macchinario	109
Tempi di produzione	109
Costi di produzione.....	110
PROCESSO DI SALDATURA.....	111
Biella	111
Scelta del tipo di saldatura	111
Disegno tecnico aggiornato	112
Scelta della saldatrice	113
Materiale d'apporto e ulteriori utensili	114
Parametri di saldatura	115
Preparazione del metallo.....	115
Tempi di produzione	116
Costi di produzione.....	116
PROCESSO DI STAMPA 3D	117
Membrana	117
Scelta del processo di stampa.....	117
Scelta del materiale.....	117
Scelta della stampante.....	118
Scelta dei parametri di stampa.....	118

Tempi di produzione	119
Costi di produzione.....	120
FOGLI DI FASE E DI CICLO	121
DISEGNI TECNICI	128
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	146

INTRODUZIONE

Il presente progetto si colloca nel contesto di una piccola-media impresa con l'obiettivo di produrre 2000 pompe a membrana destinate al settore agricolo. Per la nostra analisi, abbiamo assunto un prezzo di vendita unitario di circa 500 € a pompa.

Considerando che, attraverso le lavorazioni che andremo ad analizzare (fusione, asportazione di truciolo, deformazione plastica, saldatura e stampa 3D), realizzeremo 5 dei 34 componenti che costituiscono la pompa, abbiamo stimato un prezzo di vendita pari a 75 € per il "set" di 5 pezzi prodotti.

Questo porta a un potenziale guadagno massimo annuo di circa 150.000 €, di cui una parte significativa verrà assorbita dai costi di produzione, comprendenti lavorazioni, manodopera e consumo di energia elettrica.

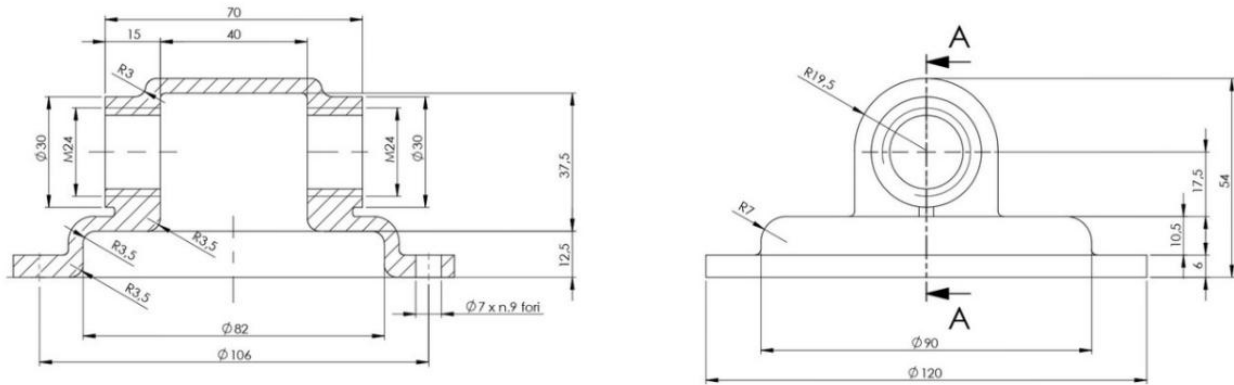
In generale, per una piccola-media impresa "in positivo", il margine operativo rappresenta circa il 20% del fatturato totale. Nel nostro caso, le spese operative si sono rivelate essere di circa 125.000 €, lasciando quindi un margine congruo, circa il 17% di guadagno, che conferma la sostenibilità economica del progetto.

PROCESSO DI FUSIONE

Coperchio pompa

24. Coperchio pompa

SEZIONE A-A



Raccordi non quotati R1,5

Il processo per la realizzazione del coperchio pompa (componente n. 24) è stato scelto inizialmente analizzando la forma e il materiale del pezzo.

Quello che otterremo sarà un modello però grezzo, che verrà rifinito post fusione per realizzare i 9 fori presenti sul disco grande, le filettature interne nei due cilindri nei quali andranno ad inserirsi le due valvole e la finitura della base del disco maggiore.

Il coperchio è in ghisa grigia lamellare EN-GJL-200, un materiale dalla buona resistenza meccanica, facile da lavorare e colare. È inoltre un materiale in grado di smorzare vibrazioni e resistente all'usura e alla corrosione (aspetto importante nel nostro caso in quanto il pezzo preso in analisi si trova a diretto contatto con l'acqua).

GJL200	Carico di rottura R_m [N/mm ²]	Allung. A%	Resistenza a trazione R_m (su provino) [N/mm ²]	Durezza HB (30)	Densità [g/ cm ³]
	200	1 - 3	da 200 a 300	150 - 210	7,2

Scelta del processo di formatura

Per la produzione di circa 2000 coperchi all'anno, è stato necessario valutare diversi processi di formatura, tenendo conto della geometria simmetrica e regolare del pezzo, della quantità da produrre, delle caratteristiche del materiale e delle esigenze dimensionali e funzionali.

Alla fine, abbiamo concluso che la **formatura con terra sintetica** è il procedimento più adatto nel nostro caso. Risulta infatti economicamente vantaggioso (sia per quanto riguarda i materiali che le attrezzature impiegate) e ampiamente consolidato per la produzione di getti in ghisa con geometrie non eccessivamente complesse. Questo processo permette inoltre di ottenere una buona qualità interna del getto senza dover ricorrere a tecnologie più avanzate ed è adatto per serie medio-piccole.

L'unico aspetto che potrebbe risultare svantaggioso è l'inferiore precisione dimensionale rispetto ad altri processi (genera infatti superfici più ruvide).

Nel nostro caso, però, il coperchio non richiede una finitura superficiale particolarmente fine se non nelle parti in cui si trova a contatto con altri componenti.

Queste zone sono:

- le due pareti interne a contatto con le sedi della valvola di mandata e della valvola di aspirazione per le quali abbiamo previsto una successiva lavorazione al tornio che permetterà di realizzare le filettature (aspetto che non analizzeremo in questa relazione).
- la base del disco grande a diretto contatto con la membrana realizzata in TPU (come vedremo nella fase di produzione tramite stampa 3D) che beneficia delle proprietà intrinseche di questo materiale rendendolo particolarmente adatto ad adattarsi e compensare eventuali micro-irregolarità o rugosità della superficie del disco, garantendo un accoppiamento funzionale ed efficace. Nonostante ciò, in quanto all'interno del coperchio pompa è presente dell'acqua, abbiamo preferito considerare una possibile finitura al tornio per evitare eventuali perdite.

Inizialmente abbiamo valutato anche altri metodi di formatura, che tuttavia sono stati scartati per le seguenti motivazioni:

- Formatura in fossa: inadatta per produzioni di media entità, in quanto molto lenta e adatta solo a pezzi di grandi dimensioni o unici (aspetto che vale anche per la formatura in sabbia-cemento).
- Formatura al CO₂: offre una buona resistenza del getto e una discreta finitura, ma presenta costi maggiori rispetto alla sabbia.
- Cold-box e shell molding: garantiscono un'elevata precisione e ottima finitura superficiale (per noi non necessarie), ma richiedono impianti specializzati, catalizzatori chimici e costi operativi più elevati, non giustificabili per la nostra tipologia di pezzo.

- Microfusione e Policast: sebbene molto precisi, sono più adatti a componenti di piccole dimensioni e richiedono cicli di lavorazione complessi e costosi, non adatti alla scala e alla funzione del nostro prodotto.

Alla luce di quanto analizzato sopra, la formatura in sabbia verde si configura come la soluzione più razionale ed efficiente per soddisfare i requisiti funzionali e produttivi del nostro componente, ottimizzando al contempo i costi e la semplicità di esecuzione.

Scelta del tipo di terra

Il tipo di terra scelto per lo stampo è la terra verde così composta:

- Sabbia silicea: 90-94%
- Bentonite sodica: 5-8%
- Polverino di carbone: 2-4%
- Acqua: 2-4%
- Eventuali additivi: <1%

Questo tipo di terra viene spesso utilizzata per la realizzazione di oggetti in ghisa.

Inserimento dei sovrametalli

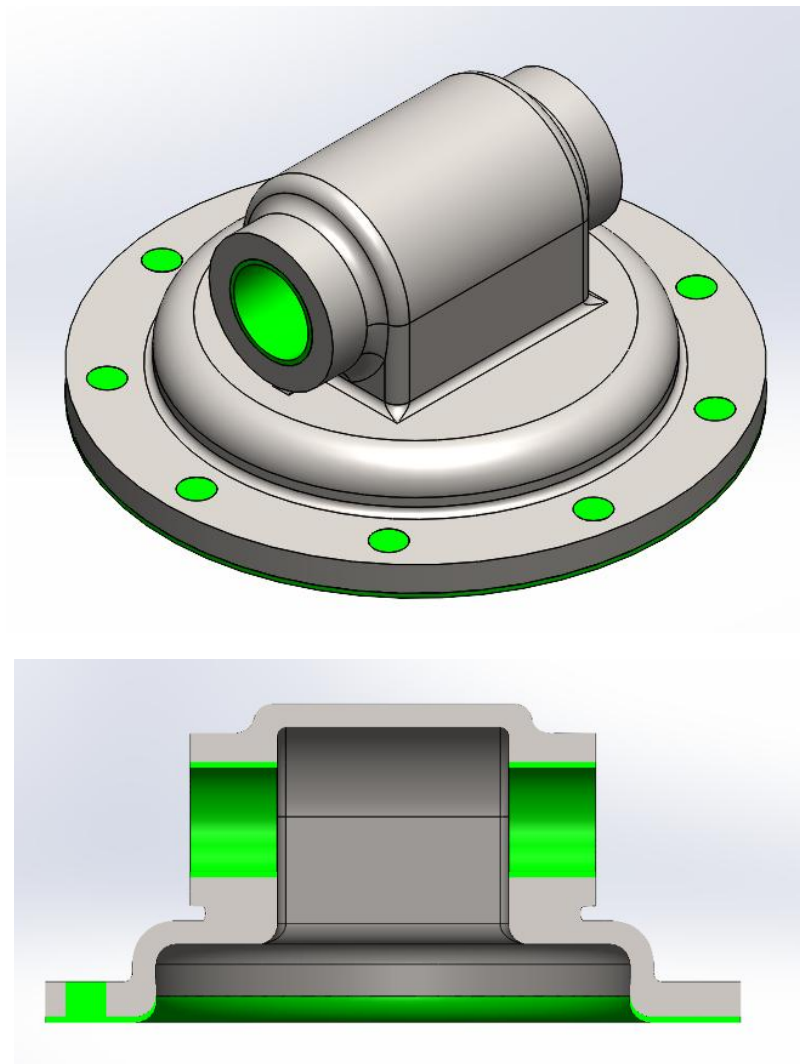
Considerazioni economiche e di spreco.

Nelle pareti interne dei due cilindri nei quali andranno ad inserirsi le due sedi delle valvole abbiamo deciso di inserire un sovrametallo di 1 mm in modo da poter realizzare la filettatura con lavorazioni successive.

Nella parte inferiore del disco maggiore andiamo ad aggiungere sempre 1 mm di sovrametallo in quanto sufficiente per una lavorazione successiva al tornio.

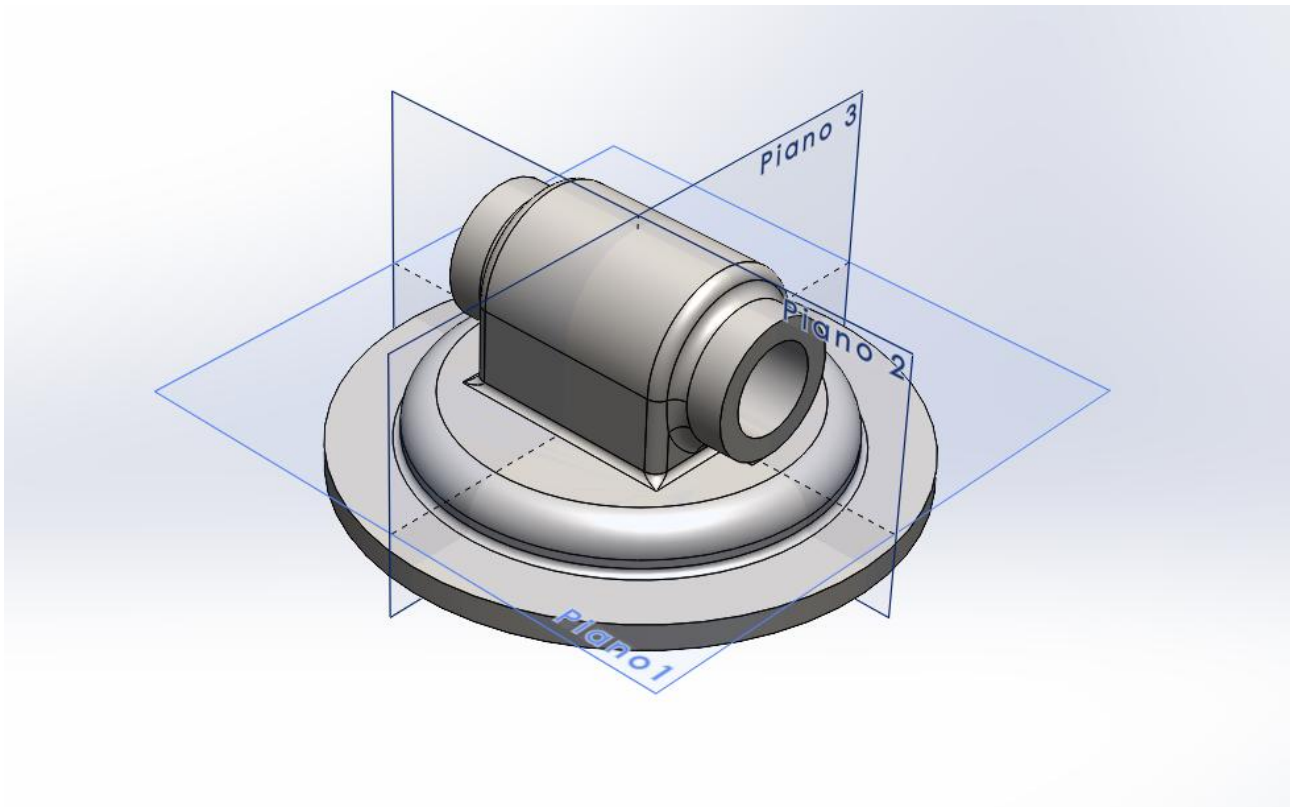
Per quel che riguarda i 9 fori da 7mm di diametro, considerando il piccolo diametro, l'idea di realizzarli durante il processo stesso di fusione comporterebbe una scelta meno vantaggiosa rispetto all'esecuzione delle forature in un secondo momento che permetterebbe di ottenere una realizzazione più precisa.

In figura abbiamo inserito in verde i sovrametalli.



Scelta del piano di divisione

Per la scelta del piano di divisione abbiamo analizzato tre possibili alternative valutando gli aspetti positivi e negativi.



Con la scelta dei piani 2 e 3 abbiamo tenuto in considerazione le simmetrie del pezzo, mentre il piano 1 è stato scelto per poter dividere la parte dei due dischi di ampiezza maggiore dal corpo dai due cilindri cavi sopra.

In quest'ultimo caso però si riscontrano problemi di sottosquadro nel disco maggiore alla base del pezzo e nella parte inferiore dei due cilindri cavi.

Il piano 2 sembrerebbe invece non presentare sottosquadri se non per quanto riguarda la realizzazione dell'interno del pezzo e dei fori laterali. Per queste parti si potrebbe pensare di realizzare delle anime o un'unica anima interna.

Anche il piano 3 non presenta sottosquadri se prevediamo l'inserimento dell'anima sempre nelle parti descritte per il piano 2. Pensando però ad una possibile progettazione di quest'ultima potrebbero riscontrarsi problemi di posizionamento e centraggio con lo stampo stesso.

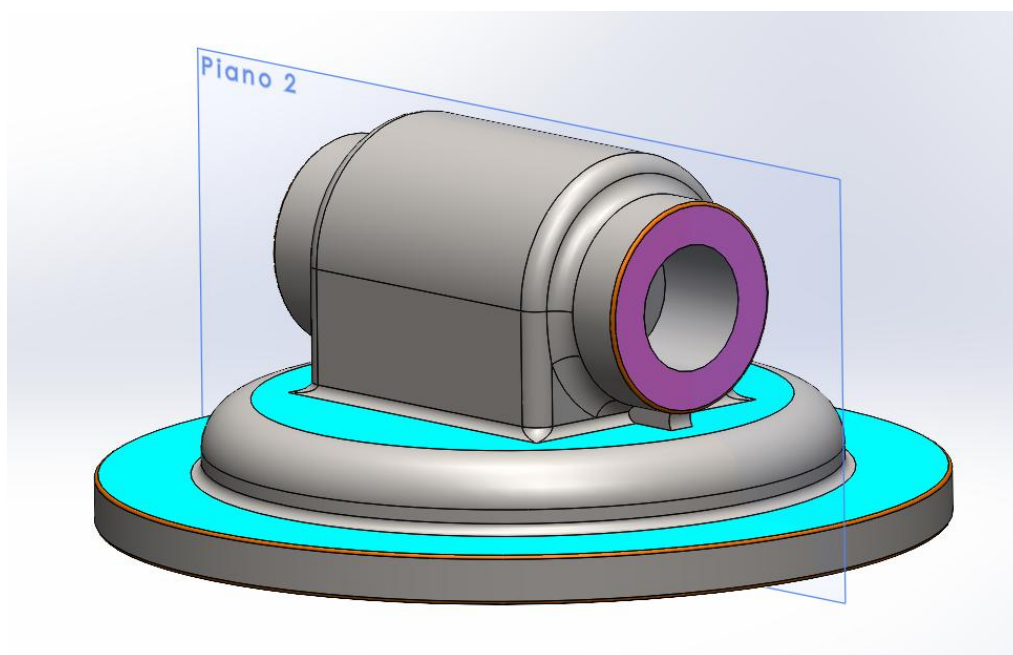
In conclusione, per una maggiore comodità e facilità nell'inserimento dell'anima, abbiamo pensato fosse meglio scegliere il piano 2 come piano di divisione.

Modifiche del pezzo: angoli di sformo e raggi di raccordo

Alla luce della quantità di pezzi da realizzare (2000 all'anno), abbiamo optato per una placca modello in **resina poliuretanica**, materiale che offre un buon compromesso tra leggerezza, facilità di lavorazione e resistenza sufficiente per produzioni di medio volume. Questa scelta consente di ridurre i costi iniziali rispetto a un modello in metallo, mantenendo comunque una qualità adeguata per l'intero ciclo produttivo.

Per facilitare l'estrazione del modello è però necessario includere angoli di sformo e raggi di raccordo nelle facce che risultano perpendicolari al piano di divisione. In foto abbiamo distinto queste superfici in azzurro e in viola per differenziare le diverse inclinazioni delle superfici.

Da queste modifiche sono esenti le superfici ottenute tramite l'anima interna.



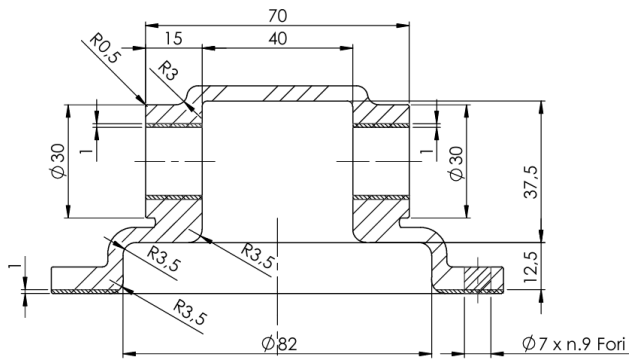
In particolare, per la resina poliuretanica si è scelto di adottare sformi conici con angolo di circa 1° , valore comunemente raccomandato per questo materiale in quanto garantisce una sformatura agevole senza alterare in modo significativo le geometrie funzionali. Questa soluzione risulta particolarmente adatta alla presenza di superfici circolari e cilindriche, semplificando la fase di estrazione del modello e riducendo il rischio di danneggiamenti.

I raccordi aggiunti, indicati in arancione, sono stati realizzati con raggio pari a 0,5 mm, così da eliminare gli spigoli vivi che potrebbero deteriorarsi durante il riempimento del metallo, causando inclusioni solide e compromettendo le proprietà meccaniche del getto.

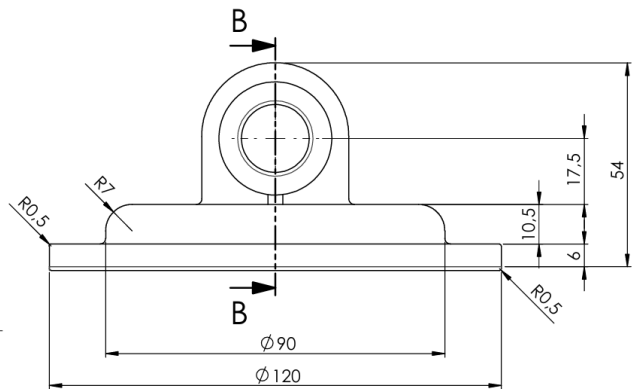
Gli spigoli non modificati in questa fase, invece, risultano già raccordati dal progettista, che probabilmente aveva già ipotizzato ad una lavorazione per fusione del pezzo. Tali raccordi riducono infatti il rischio di erosione e favoriscono un riempimento uniforme. Non si evidenziano quindi ulteriori interventi necessari.

Infine, è opportuno segnalare che l'inserimento degli sforni ha leggermente modificato il progetto originale. Poiché il procedimento di fusione non era stato specificato in fase di disegno, il progettista non aveva previsto tali angoli. Considerata la loro modesta entità e l'assenza di impatti sulla funzionalità del componente, si ritiene tuttavia che tali modifiche possano essere approvate dalla ditta committente senza ulteriori revisioni.

SEZIONE B-B



Raccordi non quotati R1,5
Angoli di sforno non quotati 1°



Ingrandimento del greggio

Nella progettazione del modello dobbiamo tenere anche conto del ritiro che il metallo subirà durante il processo di raffreddamento. In particolare, per contrastare questo ritiro, dobbiamo ingrandire il modello considerando il **coefficiente di ritiro lineare medio** (λ) del materiale che nel nostro caso è pari all'1%.

MATERIALI	RITIRO % ⁽²⁾		
	Getti piccoli ⁽¹⁾	Getti medi ⁽¹⁾	Getti grandi ⁽¹⁾
Ghise grigie	1	0,85	0,7
Ghise malleabili	1,4	1	0,75
Ghise legate	1,3	1,05	0,35
Acciaio	2	1,5	1,2
Alluminio e leghe	1,6	1,4	1,3
Bronzi	1,4	1,2	1,2
Ottoni	1,8	1,6	1,4
Leghe di magnesio	1,4	1,3	1,1

Per calcolare di preciso quanto dobbiamo scalare il pezzo, utilizziamo la seguente formula (che si basa sul ritiro di uno spigolo di misura unitaria):

$$1 : (1 - \lambda) = s : 1$$

$$s = \frac{1}{(1-\lambda)} = 1,01$$

Questo valore, tenendo conto che l'errore commesso utilizzando tale misura sarebbe del $\varepsilon = 1 - 1,01 \cdot (1 - \lambda) \approx 0,01\%$, è una buona approssimazione.

Progettazione di anima e portate d'anima

Nel nostro caso abbiamo deciso di realizzare un'unica anima che andrà a posizionarsi all'interno delle cavità del pezzo (quindi nel corpo centrale e tra i due cilindri cavi).

In particolare, abbiamo optato per un'anima **a perdere** che garantisce una finitura superficiale interna più che adeguata nel nostro caso.

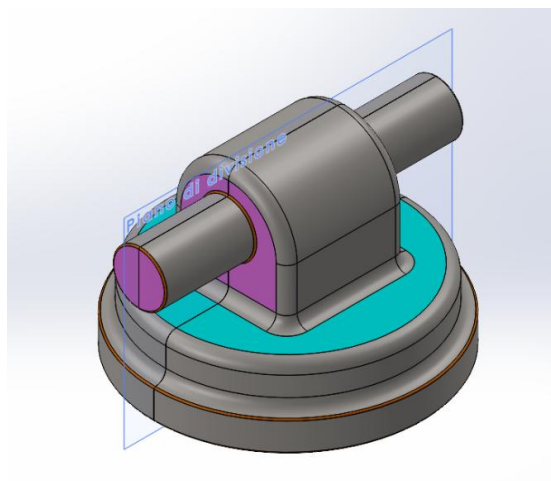
Considerata la temperatura di colata della ghisa G200 e la necessità di evitare la formazione di gas che possano compromettere la qualità del getto, abbiamo optato per la realizzazione dell'anima in **sabbia silicea** ad alta purezza con legante inorganico a base di silicato di sodio.

Inizialmente è stata valutata anche un'anima in metallo o ceramica refrattaria riutilizzabile, che a lungo termine forse sarebbero risultate più economiche. La realizzazione di un'anima di questi tipi, però, avrebbe comportato la costruzione di due anime "ad incastro" (un'anima cilindrica, passante per i due fori cavi che sarebbe stata inserita all'interno di un'ulteriore anima ottenuta dal negativo della parte centrale del pezzo). Per evitare quindi giunzioni tra le parti e ridurre il rischio di difetti superficiali dovuti a infiltrazioni di metallo abbiamo preferito scartare l'idea di un'anima riutilizzabile.

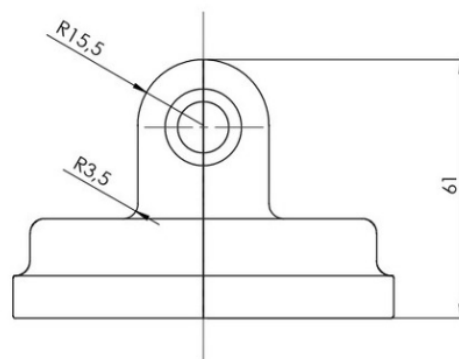
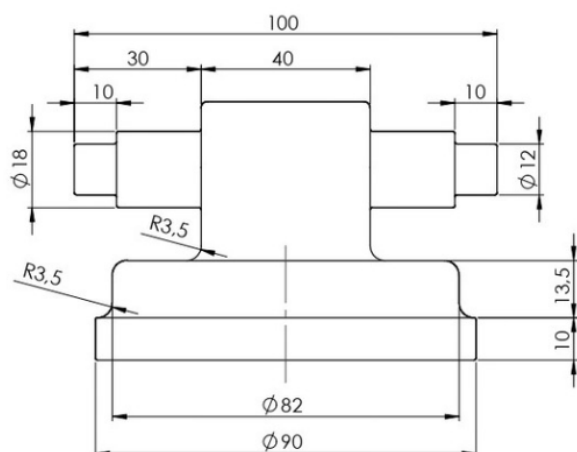
Per la progettazione dell'anima, avente gli assi coincidenti al piano di divisione, sono state previste portate d'anima cilindriche per garantire centraggio e stabilità durante la colata. Le portate sono state collocate agli estremi della zona cilindrica passante (in corrispondenza dei futuri fori filettati) e alla base del disco maggiore inferiore, dove l'anima è stata lievemente estesa oltre il foro interno per eliminare eventuali sottosquadri nel raccordo inferiore e favorire un riempimento corretto del metallo.

In totale quindi abbiamo considerato 3 portate d'anima, ciascuna da 10 mm.

Considerata l'altezza delle pareti verticali dell'anima (indicate in turchese e rosa) e la fragilità intrinseca del materiale (sabbia silicea con legante inorganico), è stato previsto un angolo di sforno pari a 1° , in modo da agevolare l'estrazione dell'anima dalla cassa senza danneggiamenti. Negli spigoli vivi (indicati in arancione) abbiamo poi previsto raccordi di 0,5 mm.

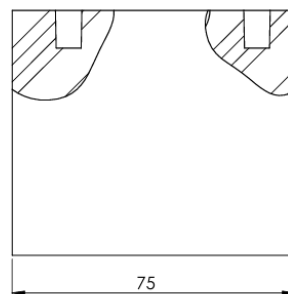
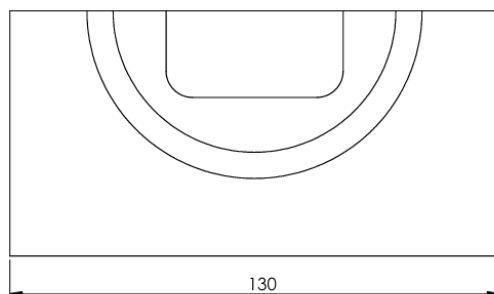
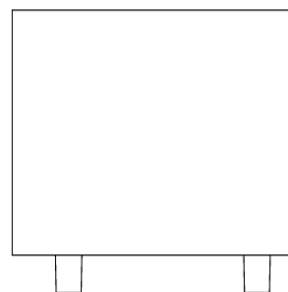
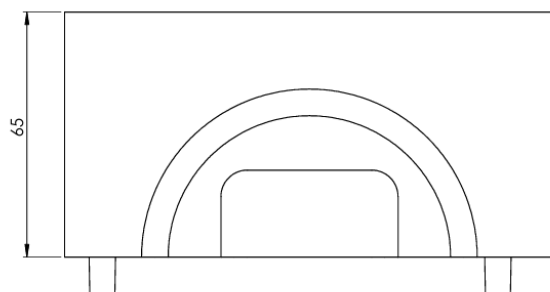


Viste quotate dell'anima:



Raccordi non quotati R0,5
Angoli di sformo non quotati 1°

Ingombri delle casse d'anima:



Studio della solidificazione del getto

Un aspetto fondamentale nella progettazione di un getto è lo studio della solidificazione del metallo all'interno dello stampo. Per valutarne il comportamento, si ricorre al concetto di modulo di raffreddamento, definito come il rapporto tra il volume di una porzione del getto e la sua superficie esposta allo scambio termico (cioè in contatto con la sabbia da fonderia). Questo parametro consente di stimare i tempi di raffreddamento delle varie zone del pezzo: valori più elevati indicano solidificazione più lenta, mentre moduli più bassi corrispondono a raffreddamento rapido.

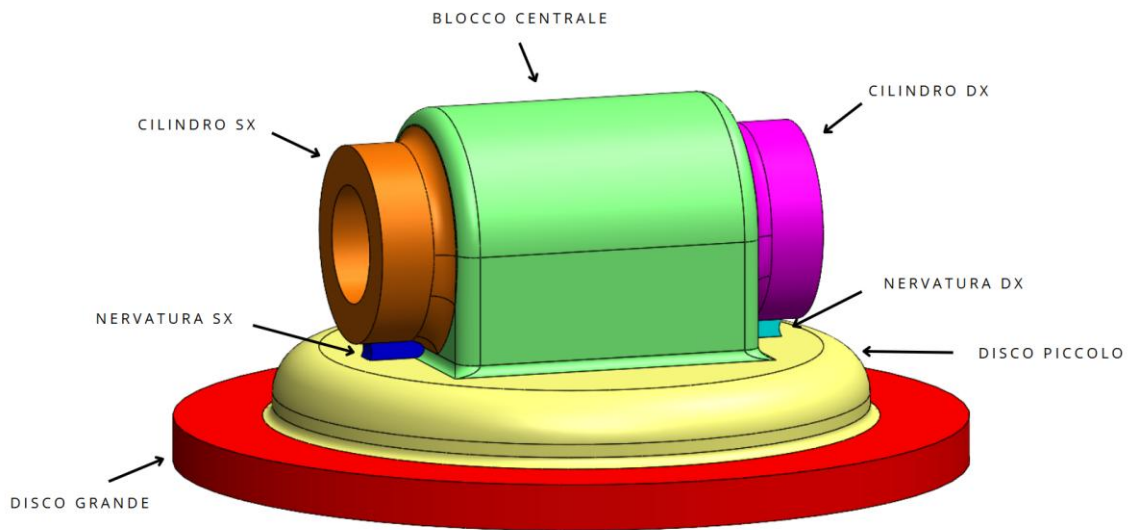
L'analisi dei moduli ci permetterà quindi di individuare in anticipo le aree più critiche, soggette a ritiri o cavità da contrazione, e di conseguenza progettare l'eventuale inserimento di materozze (riserve di metallo liquido destinate ad alimentare tali zone durante la solidificazione e che analizzeremo successivamente).

Per il calcolo dei moduli di raffreddamento abbiamo utilizzato principalmente tre metodi:

- 1) suddivisione del getto in solidi elementari;
- 2) metodo dei cerchi di Heuvers: utile per analizzare la direzione di solidificazione in sezioni del pezzo;
- 3) simulazione della solidificazione tramite l'utilizzo del software InspireCast, che permette di verificare l'efficacia delle soluzioni progettuali definite con i metodi precedenti.

1) Metodo della suddivisione del pezzo in più solidi elementari

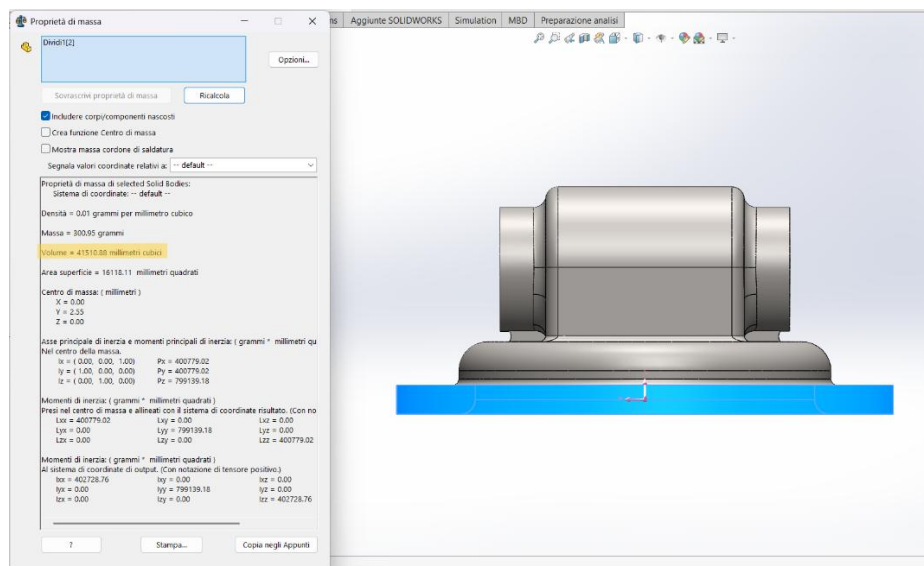
Con questo metodo abbiamo deciso di suddividere il getto in sette parti sotto elencate.



A causa della complessità del getto, però, caratterizzato da numerosi raccordi e angoli di sformo, la scomposizione manuale in solidi elementari risulta di difficile applicazione. Tuttavia, è stato possibile ottenere una stima precisa dei moduli di raffreddamento grazie all'utilizzo del software di modellazione 3D SolidWorks, che ci ha consentito il calcolo esatto del volume e della superficie esposta allo scambio termico per ciascuna porzione del pezzo.

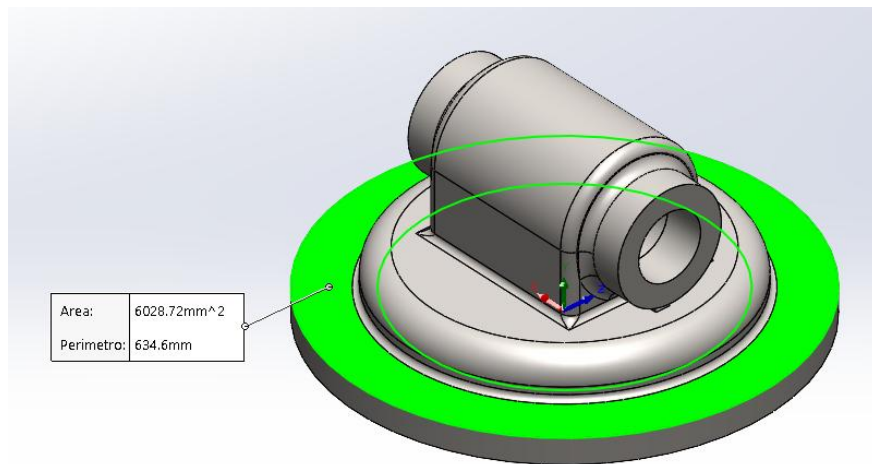
Di seguito riportiamo i vari passaggi fatti per calcolare il modulo di ciascuna parte.

Calcolo disco grande (M4)

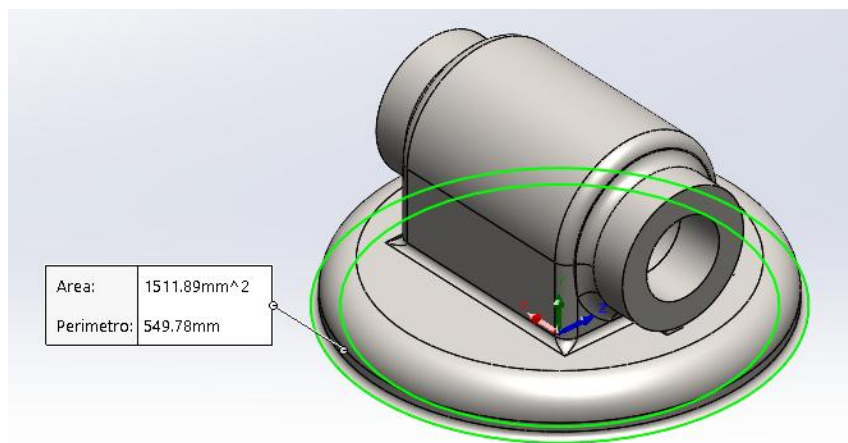


- Trovo il volume totale della parte $V_4 = 41510,88 \text{ mm}^3$

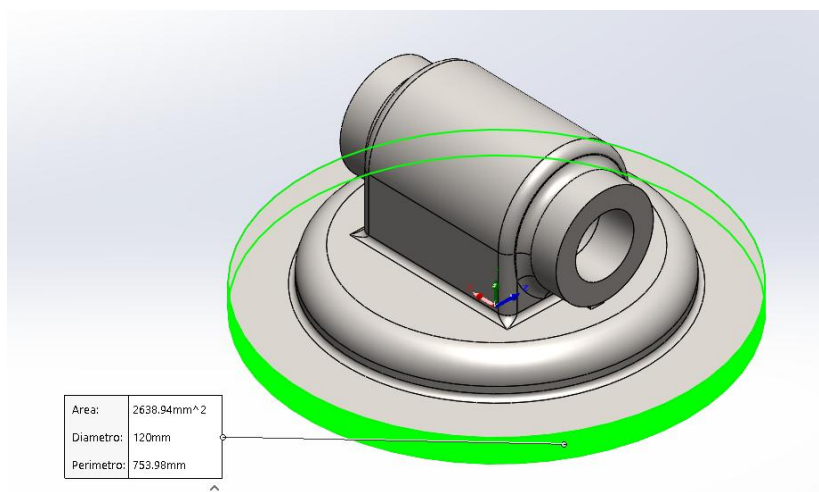
- Calcolo la superficie totale della parte:

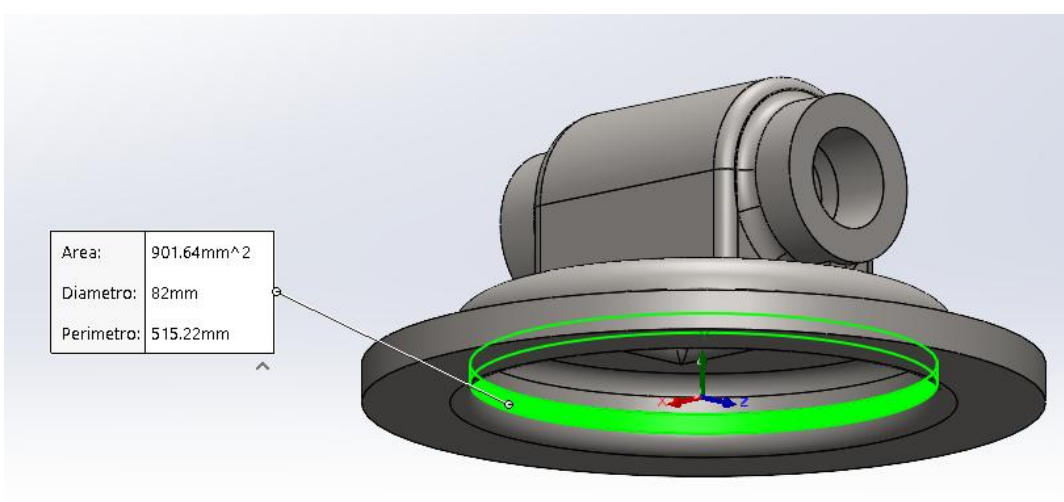
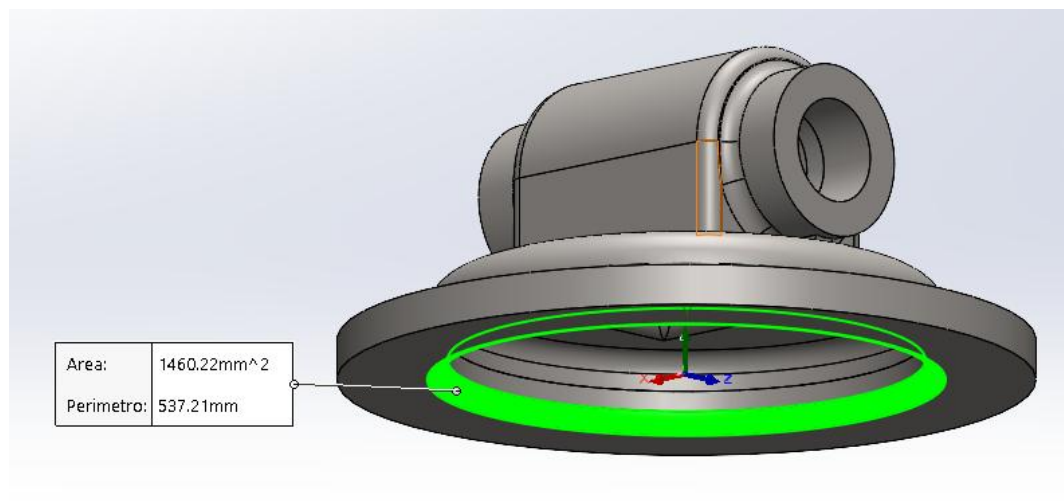
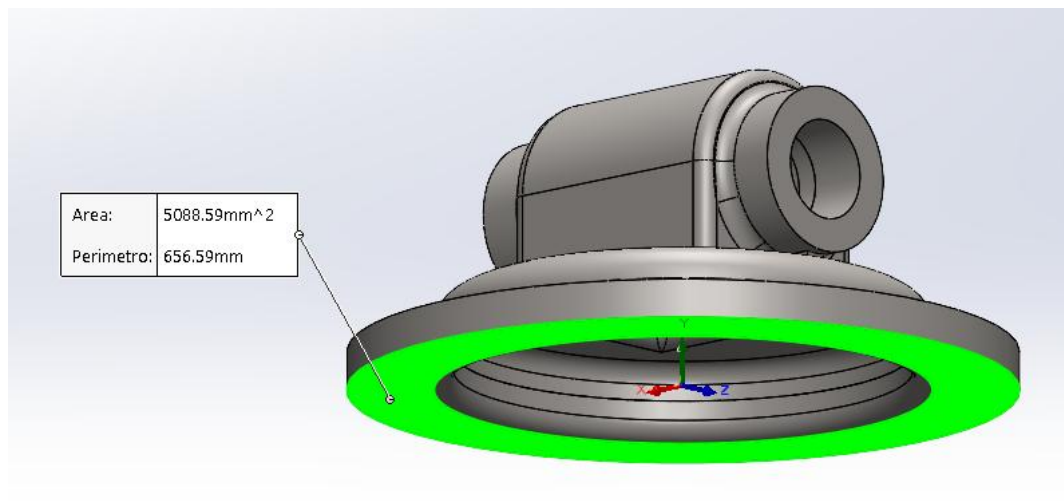


A cui andrà sottratta la faccia sottostante poiché non rappresenta una superficie di scambio termico:



A queste sommo:





Superficie totale = (6028,72 - 1511,89) + 2638,94 + 5088,59 + 1460,22 + 901,64 = 14606,22 mm²

Calcolo ora il modulo di raffreddamento per questa parte secondo la formula:

$$M = \frac{\text{volume getto}}{\text{superficie di cambio tra getto e forma}}$$

Quindi:

$$M4 = 41510,88 \text{ mm}^3 : 14606,22 \text{ mm}^2 = 2,84 \text{ mm}$$

Eseguiamo ora, con lo stesso procedimento, i calcoli per le altre parti analizzate e riportiamo i dati nella seguente tabella:

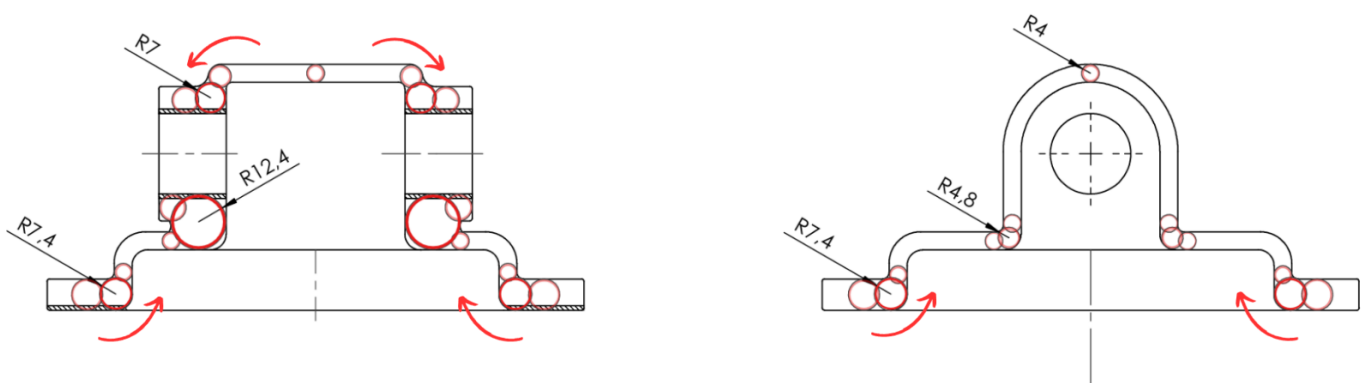
	VOLUME (MM ³)	SUP. DI SCAMBIO TERMICO (MM ²)	M (MM)
1. BLOCCO CENTRALE (M1)	22241,73	11175,24	1,99
2. CILINDRO DX (M2)	5136,88	2192,84	2,34
3. CILINDRO SX	5136,88	2192,84	2,34
4. DISCO PICCOLO (M3)	25058,82	11286,35	2,22
5. DISCO GRANDE (M4)	41510,88	14606,22	2,84
6. NERVATURA DX (M5)	81,59	52,83	1,54
7. NERVATURA SX	81,59	52,83	1,54

Possiamo quindi dedurre che, avendo **M4 > M2 > M3 > M1 > M5**, la parte che si raffredderà per ultima è quella del disco grande. Dunque, con il metodo della scomposizione in solidi più semplici, l'ordine di solidificazione delle geometrie risulta il seguente: 6 e 7, 1, 4, 2 e 3, 5.

2) Metodo dei cerchi di Heuvers

Lo studio dei moduli risulta però un metodo alquanto approssimativo e l'ordine di raffreddamento reale potrebbe essere diverso da quello ottenuto. Questo si verifica poiché, con il raffreddarsi dei pezzi a modulo minore, le superfici a contatto con i solidi adiacenti diventano “zone di scambio termico” e, oltre a ciò, se avessimo scomposto il componente in parti diverse avremmo conseguentemente ottenuto moduli diversi.

Per avere un'analisi più approfondita del fenomeno abbiamo integrato i risultati precedentemente ottenuti con il **metodo dei cerchi di Heuvers**.



Il confronto con i calcoli precedentemente svolti tramite i moduli di solidificazione ha inizialmente suggerito che la zona a raffreddare più lentamente fosse il disco maggiore alla base del pezzo (M4).

Tuttavia, l'applicazione del metodo dei cerchi di Heuvers ha messo in luce una discrepanza significativa con quanto emerso dall'analisi puramente numerica dei moduli: i cerchi di solidificazione, sviluppati graficamente a partire dalle superfici esterne, hanno evidenziato che la zona effettivamente a solidificare per ultima risulta essere in prossimità delle nervature, e non nel disco alla base.

Questa osservazione è stata rafforzata dalla direzione dei fronti di solidificazione, rappresentati in figura mediante frecce rosse, che convergono verso le nervature centrali del pezzo, evidenziandone il comportamento da hot-spot.

3) Prima simulazione con InspireCast

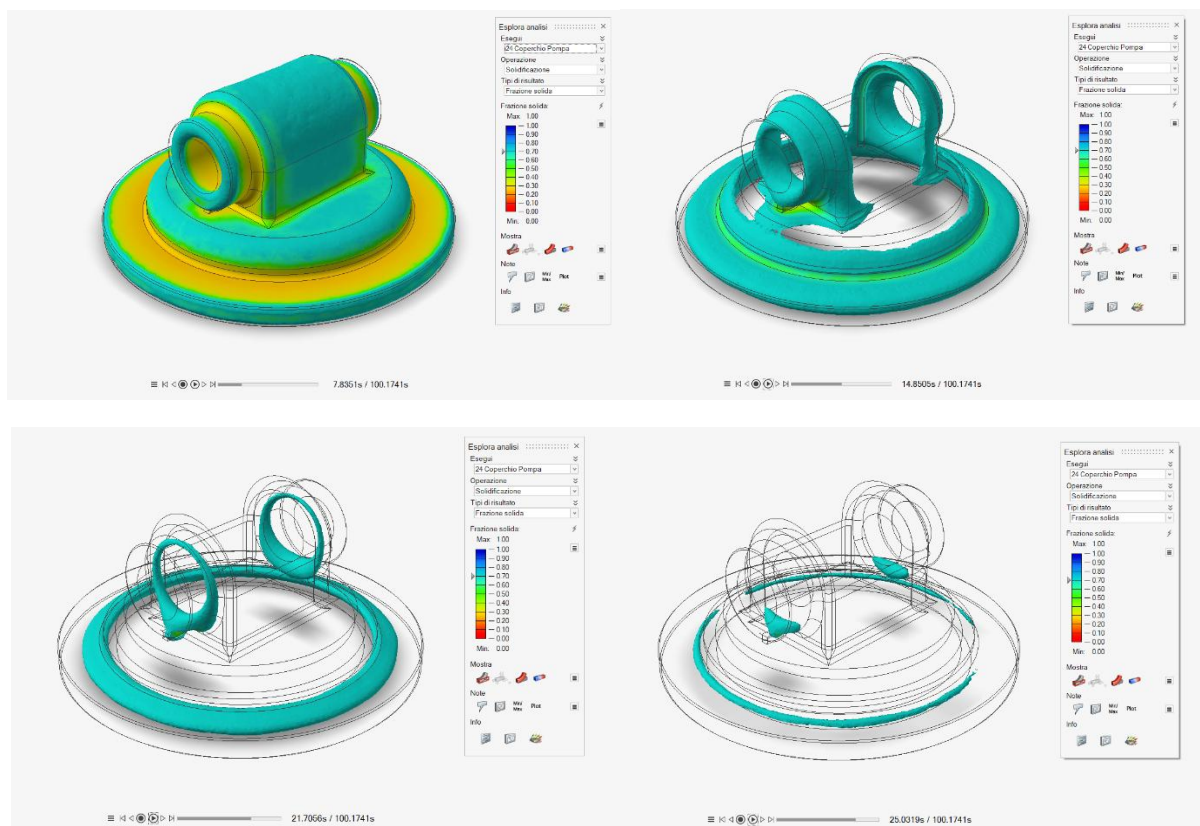
Per confermare quanto emerso con il metodo di Heuvers, è stata effettuata una simulazione della sola solidificazione tramite il software **InspireCast**.

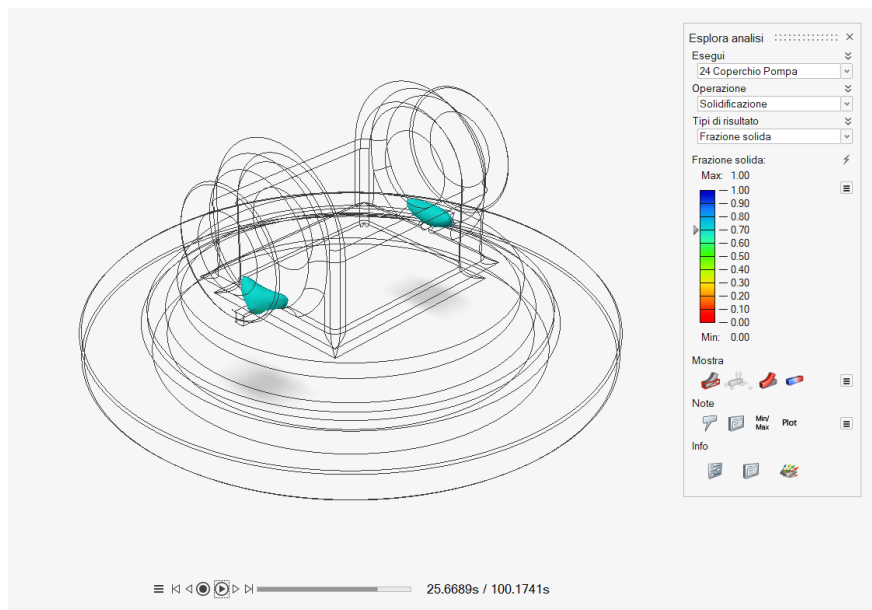
Per eseguire la simulazione sono stati inseriti i seguenti parametri:

- **Materiale getto:** ghisa GJL 200
- **Temperatura di colata:** 1578,15 K
- **Materiale dello stampo:** sabbia verde
- **Temperatura iniziale dello stampo:** 293,15 K
- **Spessore minimo impostato:** 8 mm

La simulazione è stata osservata in termini di frazione solida, per ricostruire l'avanzamento della solidificazione nel tempo.

In allegato sono riportati i fotogrammi salienti della simulazione, con evidenziate le aree di solidificazione ritardata.





I risultati ottenuti confermano quanto previsto dal metodo di Heuvers: la solidificazione finale avviene in corrispondenza della zona prossima alle nervature.

Materozze e raffreddatori

Prima di poter procedere all'analisi di dimensionamento e collocamento dell'eventuale materozza è necessario determinare il valore del modulo di raffreddamento della zona critica che dovrà essere alimentata dalla stessa.

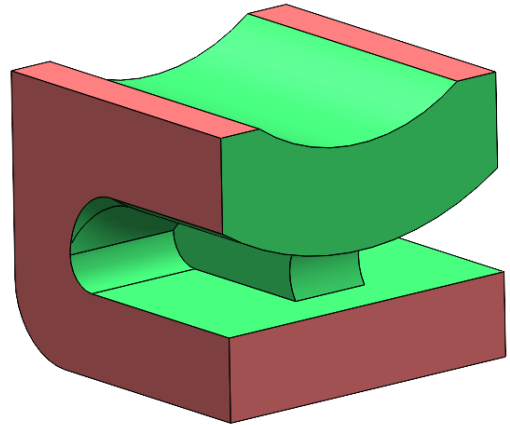
Con l'ausilio del software SolidWorks calcoliamo il volume della porzione in figura e successivamente determiniamo la somma delle superfici di scambio termico rappresentate in verde.

$$V_{\text{porzione}} = 2501,52 \text{ mm}^3$$

$$S_{\text{porzione}} = 636,51 \text{ mm}^2$$

Da cui otteniamo il modulo

$$M6 = \frac{V}{S} = \frac{2501,52}{636,51} = 3,93 \text{ mm}$$



È importante notare come il modulo appena ottenuto sia maggiore a tutti quelli ricavati in precedenza, coerentemente con gli studi emersi con il metodo dei cerchi di Heuvers.

Premessa

L'inserimento di una materozza nel getto nel nostro caso dipende principalmente da tre fattori chiave:

- Il secondo fattore è il **materiale** impiegato, la ghisa grigia GJL 200. Questo materiale presenta un'espansione dovuta alla grafitizzazione durante la solidificazione, che può compensare parzialmente il ritiro. Tuttavia, tale effetto non è sufficiente a garantire l'assenza di difetti nelle zone critiche.
- Infine, la **funzione del componente**, un coperchio pompa, richiede elevate prestazioni di tenuta e resistenza meccanica. Difetti da ritiro o porosità in questa parte sono pertanto inaccettabili, rafforzando la necessità di un controllo accurato della solidificazione mediante opportuno dimensionamento e posizionamento della materozza.

Analisi della situazione

Data la presenza di due punti caldi simmetrici nel getto abbiamo valutato la scelta di una delle due possibili configurazioni:

- Abbassare localmente il modulo termico delle zone più critiche grazie dall'applicazione di raffreddatori (chills) sulle nervature e posizionare una singola materozza nelle vicinanze della nuova zona con modulo più elevato.
- Dimensionare due materozze distinte, collocate in corrispondenza delle due zone critiche simmetriche, in modo da intervenire direttamente su entrambe le aree a rischio senza l'ausilio di raffreddatori.

La **prima soluzione** ci consente di concentrare il volume di materiale caldo in un'unica materozza, riducendo la complessità costruttiva e la quantità di materiale aggiuntivo necessario. L'integrazione dei raffreddatori sulle nervature permette inoltre di modulare efficacemente il raffreddamento nelle zone più critiche senza incrementare significativamente il peso o il costo.

La **seconda soluzione**, pur garantendo un controllo più diretto e localizzato su entrambe le zone critiche, comporterebbe un aumento del volume complessivo di materozze, con conseguente maggiore consumo di materiale e potenziali difficoltà di collocamento e rimozione in fase di lavorazione.

Dimensionamento della materozza

Tra le forme di materozza più utilizzate, la scelta ricade generalmente su quella che consente di occupare il minor volume possibile, impiegando quindi meno materiale, e che al contempo sia semplice da realizzare nello stampo.

Per queste ragioni, in entrambe le configurazioni analizzate è stata adottata la **materozza cilindrica a cielo aperto**, con geometrie differenti in base al caso specifico:

- Nel **primo caso**, in cui è prevista un'unica materozza affiancata da raffreddatori, si è scelto un rapporto altezza/diametro pari a **$H = 1,5D$** . Questa configurazione consente di ottenere un buon compromesso tra modulo termico (sufficiente per alimentare la zona critica) e contenimento del volume, evitando eccessivi ingombri nello stampo e migliorando la spinta di alimentazione grazie all'effetto "camino" dell'altezza aggiuntiva.
- Nel **secondo caso**, in cui sono previste due materozze laterali in prossimità delle nervature critiche, è stato adottato un rapporto **$H = D$** . Questa scelta permette di semplificare la formatura e di minimizzare il volume complessivo della materozza, a

parità di modulo, risultando vantaggiosa per una distribuzione più compatta e bilanciata lungo il componente.

Primo caso:

Per garantire che la materozza solidifichi per ultima, si inizia calcolando il modulo termico minimo che deve possedere, partendo da:

$$Mm \geq 1,2 \cdot Mmax = 1,2 \cdot 2,84 \text{ mm} \simeq 3,4 \text{ mm}$$

Questo valore rappresenta il modulo minimo accettabile; tuttavia, non è detto che sia il valore definitivo, poiché la materozza potrebbe necessitare di un modulo superiore per soddisfare pienamente i requisiti di volume e solidificazione.

Calcolando il diametro corrispondente:

$$D = \frac{M_m}{0,18} = \frac{3,4}{0,18} \simeq 18,9 \text{ mm}$$

che si approssima a 20 mm.

Da questo diametro si ricava un modulo aggiornato:

$$Mm \geq 20 \cdot 0,18 = 3,6 \text{ mm}$$

Procediamo con una stima del volume della materozza:

$$Vm = 1,18 \cdot D^3 = 9440 \text{ mm}^3$$

Un parametro fondamentale è il volume massimo alimentabile dalla materozza V_{max} . Se questo è maggiore del volume totale del getto, il dimensionamento può ritenersi teoricamente corretto.

Per calcolare V_{max} , si tiene conto del ritiro volumetrico della ghisa, che non coincide con il semplice ritiro geometrico teorico. Considerando un ritiro lineare $\lambda=1\%$, si ottiene un ritiro volumetrico teorico:

$$b(\text{geometrico}) = 100 \times [1 - (1 - \lambda)^3] \simeq 2,97\%$$

Tuttavia, tale valore rappresenta solo la variazione geometrica e non il ritiro effettivo che necessita di alimentazione.

Con la ghisa grigia G200, la formazione di grafite lamellare comporta un'espansione locale che compensa parzialmente il ritiro da solidificazione, riducendo il ritiro reale da compensare con la materozza.

Per questo motivo, preso $C_{eq} > 4,3$, dalle tabelle si assume un valore di ritiro effettivo $b = 1\%$. Ne segue:

$$V_{max} = V_m \cdot \left(\frac{14 - b}{b} \right) \simeq 9440 \cdot \left(\frac{14 - 1}{1} \right) = 122.720 \text{ mm}^3$$

Confrontando con il volume del getto $V_{getto} = 99.248,37 \text{ mm}^3$, si vede che il volume massimo alimentabile è sufficiente.

Utilizzando il diagramma di Caine si verifica la congruenza tra modulo e volume con:

$$X = \frac{M_m}{M_p} \simeq 1,26$$

$$Y = \frac{V_m}{V_p} = \frac{9440}{41510,88} = 0,23$$

Inoltre, affinché la materozza sia ben dimensionata deve verificarsi che:

$$X > \frac{a}{(Y - b)} + c$$

Dove:

- $a = 0,1$
- $b = 1\% = 0,01$
- $c = 1$

Svolgendo i conti risulta evidente che, nonostante dall'analisi preliminare basata sul confronto tra il volume massimo alimentabile dalla materozza V_{max} e il volume del getto V_{getto} sembrerebbe che il dimensionamento della materozza sia adeguato (in quanto $V_{max} > V_{getto}$), applicando il metodo di Caine, che considera non solo i volumi ma anche i moduli termici e la sequenza di solidificazione, si evidenzia che la disequazione fondamentale non è soddisfatta con i valori calcolati inizialmente.

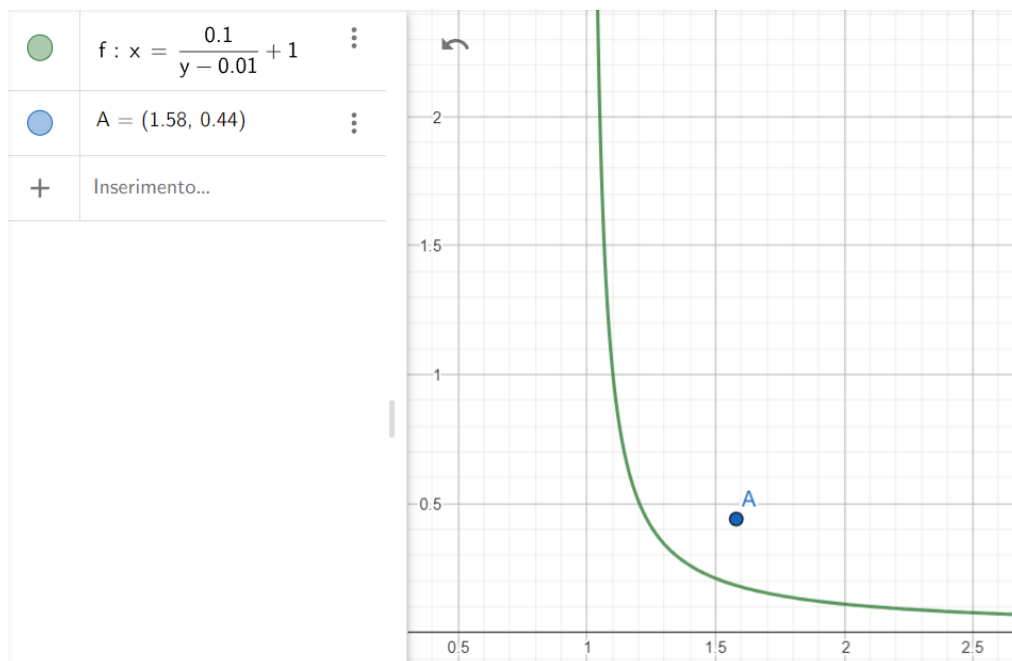
Questo indica che, pur avendo un volume teoricamente sufficiente, la materozza non possiede un modulo termico tale da garantire la solidificazione per ultima, elemento essenziale per assicurare una corretta alimentazione del getto durante il ritiro finale.

Per queste ragioni, e al fine di assicurare una sicurezza tecnica adeguata, si è deciso di adottare un valore di diametro della materozza pari a **25 mm**, leggermente superiore ai valori calcolati. Questo incremento consente di aumentare il modulo termico della materozza, migliorando la sua capacità di mantenersi liquida più a lungo e quindi di alimentare efficacemente il getto, minimizzando il rischio di difetti da ritiro.

La materozza in questione avrà quindi

- $D = 25 \text{ mm}$
- $M_m = 4,5 \text{ mm}$
- $V_m = 18.437,5 \text{ mm}^3$

Dai quali è possibile ricavare i valori di X e Y da inserire nel sottostante diagramma di Caine, dimostrandone il corretto dimensionamento della materozza:



Analisi dettagliata con il metodo di Caine – Visual Basic

Per una conferma ancora più accurata e per velocizzare la procedura del dimensionamento della materozza per il secondo caso, abbiamo determinato il diametro minimo necessario utilizzando il flow chart del metodo di Caine, riportato nel testo di Santochi, mediante un compilatore online in Visual Basic per automatizzare il processo.

Il diametro minimo della materozza per il primo caso è di 21,95 mm:

<pre>1 2 Imports System.Math 3 4 Module Program 5 Sub Main() 6 ' Parametri fissi 7 Dim a As Double = 0.1 8 Dim b As Double = 1/100 ' convertito da percentuale 9 Dim c As Double = 1 10 Dim k1 As Double = 1.18 11 Dim k2 As Double = 0.18 12 Dim k3 As Double = 179 13 Dim Vp As Double = 41510.88 14 Dim Mp As Double = 2.84 15 16 ' Calcoli iniziali 17 Dim Mm As Double = 0 18 Dim Vm As Double = 0 19 Dim X As Double = 0 20 Dim Y As Double = 0.01 ' Y = Vm / Vp 21 22 Console.WriteLine("DIMENSIONAMENTO DELLA MATEROZZA CON IL METODO DEL CAINE") 23 24 ' Ciclo di calcolo 25 Do 26 Y += 0.001 27 Vm = Vp * Y 28 Mm = (Vm / k3) ^ (1 / 3) 29 X = Mm / Mp 30 Loop While X <= a / (Y - b) + c 31 32 ' Risultati 33 Dim D As Double = Mm / k2 34 Console.WriteLine() 35 Console.WriteLine("D = {0:F2} mm", D) 36 Console.WriteLine("Vm = {0:F2} mm^3", Vm) 37 Console.WriteLine("Mm = {0:F2} mm", Mm) 38 Console.WriteLine() 39 Console.WriteLine("X = {0:F3}", X) 40 Console.WriteLine("Y = {0:F3}", Y) 41 42 43 End Sub 44 End Module 45</pre>	Output: DIMENSIONAMENTO DELLA MATEROZZA CON IL METODO DEL CAINE D = 21.95 mm Vm = 11041.89 mm³ Mm = 3.95 mm X = 1.391 Y = 0.266
--	--

Secondo caso:

Analizziamo ora brevemente i risultati ottenuti con il dimensionamento di due materozze in prossimità delle nervature senza l'ausilio di raffreddatori:

<pre>1 2 Imports System.Math 3 4 Module Program 5 Sub Main() 6 ' Parametri fissi 7 Dim a As Double = 0.1 8 Dim b As Double = 1/100 ' convertito da percentuale 9 Dim c As Double = 1 10 Dim k1 As Double = 0.78 11 Dim k2 As Double = 0.16 12 Dim k3 As Double = 169 13 Dim Vp As Double = 2501.52 14 Dim Mp As Double = 3.93 15 16 ' Calcoli iniziali 17 Dim Mm As Double = 0 18 Dim Vm As Double = 0 19 Dim X As Double = 0 20 Dim Y As Double = 0.01 ' Y = Vm / Vp 21 22 Console.WriteLine("DIMENSIONAMENTO DELLA MATEROZZA CON IL METODO DEL CAINE") 23 24 ' Ciclo di calcolo 25 Do 26 Y += 0.001 27 Vm = Vp * Y 28 Mm = (Vm / k3) ^ (1 / 3) 29 X = Mm / Mp 30 Loop While X <= a / (Y - b) + c 31 32 ' Risultati 33 Dim D As Double = Mm / k2 34 Console.WriteLine() 35 Console.WriteLine("D = {0:F2} mm", D) 36 Console.WriteLine("Vm = {0:F2} mm^3", Vm) 37 Console.WriteLine("Mm = {0:F2} mm", Mm) 38 Console.WriteLine() 39 Console.WriteLine("X = {0:F3}", X) 40 Console.WriteLine("Y = {0:F3}", Y) 41 42 43 End Sub 44 End Module 45</pre>	STDIN Input for the program (Optional) Output: DIMENSIONAMENTO DELLA MATEROZZA CON IL METODO DEL CAINE D = 25.13 mm Vm = 10979.17 mm³ Mm = 4.02 mm X = 1.023 Y = 4.389
---	---

Dai calcoli eseguiti risulta che, nel caso di due materozze, il diametro minimo di ciascuna dovrebbe essere di almeno 25,13 mm, per maggiore sicurezza, si adotta un valore arrotondato

di 30 mm per diametro e altezza. Tuttavia, questa configurazione comporterebbe un costo complessivo più elevato rispetto alla soluzione con una sola materozza e l'uso di raffreddatori.

Considerate le valutazioni tecniche ed economiche, si è quindi optato per la **prima strategia**, che prevede una singola materozza posizionata in corrispondenza della zona a modulo più elevato, supportata dall'impiego di raffreddatori nelle aree critiche (in prossimità delle nervature) che dirigeranno la solidificazione verso la materozza. Questa scelta rappresenta un compromesso efficace tra solidificazione controllata, semplicità realizzativa e contenimento dei costi.

Dimensionamento dei raffreddatori

Per controllare correttamente la solidificazione e prevenire cavità da ritiro nelle zone critiche emerse dalla prima simulazione in InspireCast, si è deciso di inserire raffreddatori metallici direttamente a contatto con la base del pezzo.

Scelta del materiale

Come materiale per i raffreddatori è stato inizialmente scelto il **rame** per tre motivi principali:

1. Conducibilità termica molto elevata, che consente un rapido smaltimento del calore nelle zone più calde.
2. Compatibilità metallurgica con la ghisa GJL200, che evita interazioni indesiderate durante la colata.
3. Facilità di lavorazione, utile per adattare la geometria del raffreddatore al profilo della zona da trattare.

Tuttavia, come vedremo, la scelta iniziale è stata successivamente modificata conseguentemente ai risultati ottenuti con le simulazioni.

Primo dimensionamento

Il dimensionamento iniziale dei raffreddatori è stato eseguito tramite la formula empirica:

$$V_{chill} = 1,66 \cdot V_{0c} \cdot \frac{M_{0c} - M_{req}}{M_{0c}} = 1,66 \cdot 2,501 \cdot \frac{0,039 - 0,025}{0,039} \simeq 1,5 \text{ cm}^3$$

Dove:

- V_{chill} è il volume del raffreddatore
- V_{0c} è il volume della zona da raffreddare (cm³)

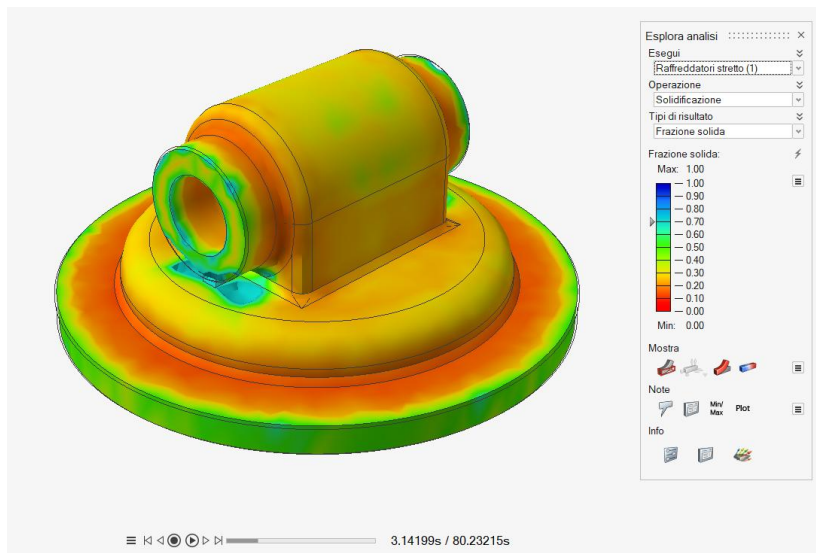
- M_{0c} è il modulo termico iniziale della zona (cm)
- M_{req} è il modulo desiderato in quella stessa zona (cm)

Risultati della prima simulazione

Inizialmente abbiamo impostato i seguenti parametri:

- **Materiale:** rame
- **Temperatura iniziale del raffreddatore:** 400°C (673,15 K)
- **Temperatura di colata:** 1578,15 K

Dalle immagini però è evidente che si verifica un raffreddamento eccessivamente rapido nelle zone a contatto con i raffreddatori: il metallo solidificava prematuramente, generando zone fredde (evidenziate in azzurro nella mappa di frazione solida).



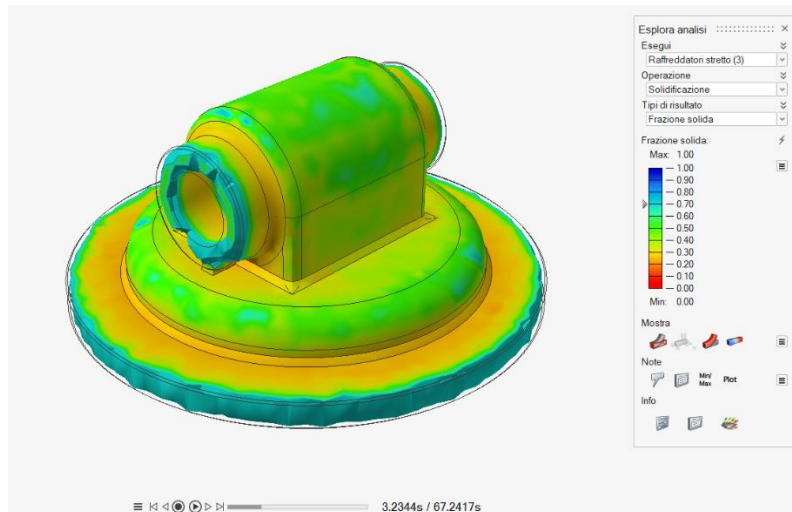
Per risolvere il problema, sono state apportate le seguenti modifiche al setup precedente:

- La **temperatura di colata** è stata abbassata a 1478,15 K, più vicina a quella reale in una fusione in sabbia per ghisa grigia.
- Il **materiale** dei raffreddatori è stato cambiato da rame ad **acciaio**, meno conduttivo e quindi meno aggressivo nella sottrazione di calore.
- La **temperatura** iniziale dei raffreddatori è stata aumentata a 600 °C (873,15 K).
- Il **volume** dei raffreddatori è stato ricalcolato con la stessa formula adattata a questa nuova temperatura e materiale.
- I raffreddatori sono stati **allontanati** di circa 0,5 mm dal pezzo, creando così un'intercapedine di sabbia tra metallo fuso e raffreddatore. Questo accorgimento ha permesso di attenuare il flusso termico diretto e stabilizzare la velocità di raffreddamento senza provocare solidificazioni premature.

Il nuovo volume complessivo richiesto è risultato pari a

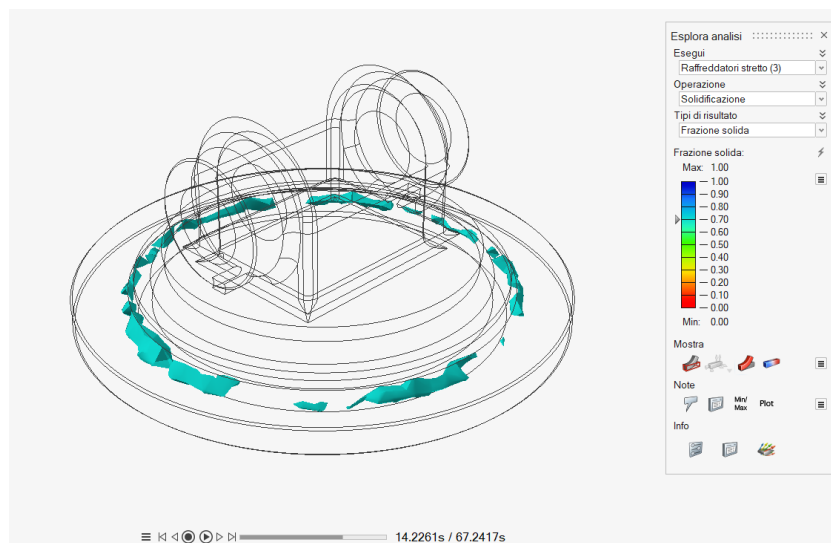
$$V_{chill} = 1,01 \cdot V_{0c} \cdot \frac{M_{0c} - M_{req}}{M_{0c}} = 1,01 \cdot 2,501 \cdot \frac{0,039 - 0,025}{0,039} \approx 1,01 \text{ cm}^3$$

Nella figura sottostante possiamo vedere la simulazione della solidificazione circa allo stesso istante della figura precedente con il nuovo dimensionamento dei raffreddatori:



Conclusione

Dopo queste ottimizzazioni, la simulazione ha finalmente restituito un comportamento corretto: l'ordine di solidificazione rispetta il percorso voluto (**M4 > M2 > M6 > M3 > M1 > M5**). Possiamo dunque ritenere efficace la configurazione finale e procedere con il dimensionamento del sistema di colata.



Sistema di colata

Dimensionamento collare d'attacco

Prima di procedere al dimensionamento dei canali di colata abbiamo dimensionato il collare d'attacco della materozza nel seguente modo:

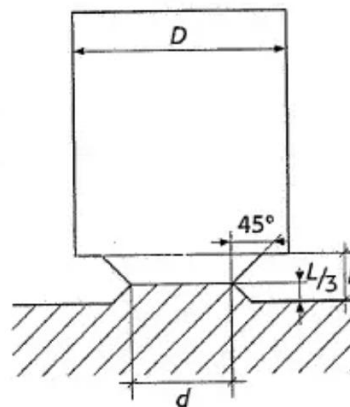
$$d = 0,66D = 16,5 \text{ mm}$$

$$L = 0,18D = 4,5 \text{ mm}$$

Dove D è il diametro della materozza, ovvero 25 mm.

b) Materozze a cielo aperto

Materiale	d	L
Acciaio	$0.40 D$	$0.14-0.18 D$
Ghisa	$0.66 D$	$0.14-0.18 D$
Leghe di rame	$0.66 D$	$0.25 D$
Leghe leggere	$0.75 D$	$0.18 D$



Dimensionamento sistema di colata

Per la realizzazione del getto è stato adottato un sistema di colata pressurizzato, in grado di garantire un riempimento rapido e controllato. Il dimensionamento dei canali è stato eseguito rispettando i rapporti standard tra le aree delle sezioni, secondo la proporzione **1 : 0,75 : 0,5**, corrispondente rispettivamente a canale di colata, canale di distribuzione e di attacco.

Procediamo poi con il calcolo del tempo di colata T, ovvero il tempo necessario per non fare solidificare parti del pezzo prima del termine della colata e per evitare erosioni a seguito di velocità troppo alte.

$$T = 3,2 \sqrt{G} = 2,97 \text{ s}$$

dove G è il peso del getto in kg calcolato come

$$G = \rho \cdot V = 7,2 \text{ g/cm}^3 \cdot 118,994 \text{ cm}^3 \simeq 856 \text{ gr} \simeq 0,86 \text{ Kg}$$

con:

- ρ densità della ghisa G200 ($= 7,2 \text{ g/cm}^3 = 0,0072 \text{ g/mm}^3$)
- V il volume totale del getto considerando il volume del pezzo, della materozza e del collare d'attacco ($V = V_p + V_m + V_c = 99248,37 + 18437,5 + 1307 = 118994 \text{ mm}^3$).

Possiamo ora ricavarci la sezione complessiva S degli attacchi di colata nel seguente modo:

$$S = \frac{K}{v \cdot \rho}$$

In cui:

- K è la **portata complessiva** in peso degli attacchi di colata

$$K = \frac{G}{T} = \frac{0,86 \text{ kg}}{2,97 \text{ s}} = 0,29 \text{ kg/s} = 290 \text{ g/s}$$

- v è la **velocità** approssimata della vena fluida all'uscita del canale di colata $= \sqrt{2gh}$ con $h = 91 \text{ mm} = 0,091 \text{ m}$.

Di conseguenza $v = 1,33 \text{ m/s} = 1330 \text{ mm/s}$

Otteniamo:

$$S = \frac{290 \text{ g/s}}{1330 \text{ mm/s} \cdot (0,0072) \text{ g/mm}^3} = 30,28 \text{ mm}^2$$

A partire da S appena ricavato, ovvero la superficie totale della sezione dei canali di attacco, troviamo ora le dimensioni delle sezioni dei restanti canali, seguendo le proporzioni del sistema **1 : 0,75 : 0,5**.

Canali di attacco

Per l'attacco di colata, abbiamo deciso di realizzare due attacchi a sezione triangolare isoscele. Dato che $S_{ca} = 30,28 \text{ mm}^2$, la sezione di un singolo canale avrà area pari a $15,14 \text{ mm}^2$ con base e l'altezza uguali a 5,5 mm.

Canale di colata

Secondo le proporzioni la sezione del canale di colata (S_{cc}) ha un'area di $30,28 \cdot 2 = 60,56 \text{ mm}^2$, volendo realizzare una sezione circolare è necessario che il diametro sia uguale a $d = 8,8 \text{ mm}$.

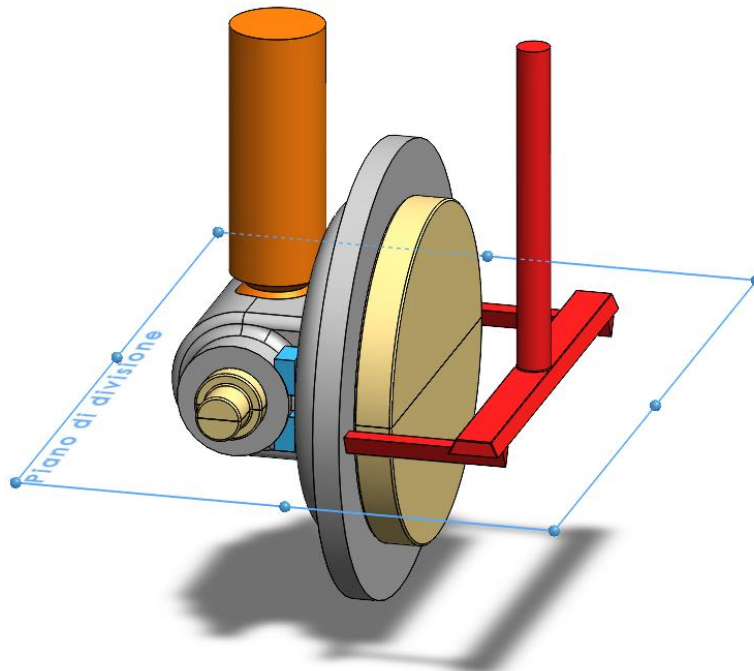
Canale di distribuzione

Sempre per le proporzioni:

$$S_{cd} = 0,75 S_{cc} = 45,42 \text{ mm}^2$$

Abbiamo deciso di realizzare un canale a sezione trapezoidale isoscele avente le seguenti misure:

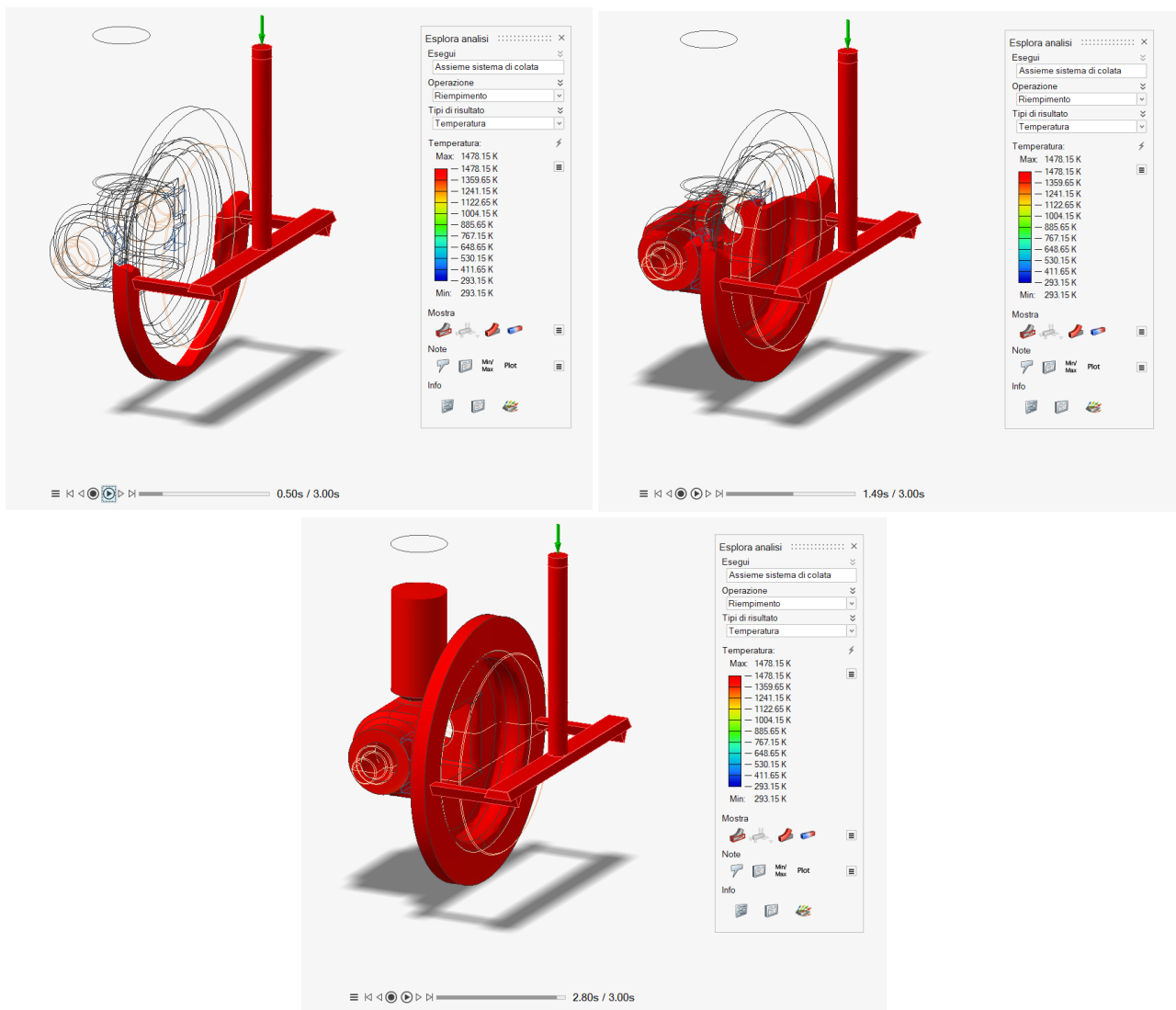
Base maggiore 13,2 mm, base minore = 9,5 mm e altezza pari a 4 mm.



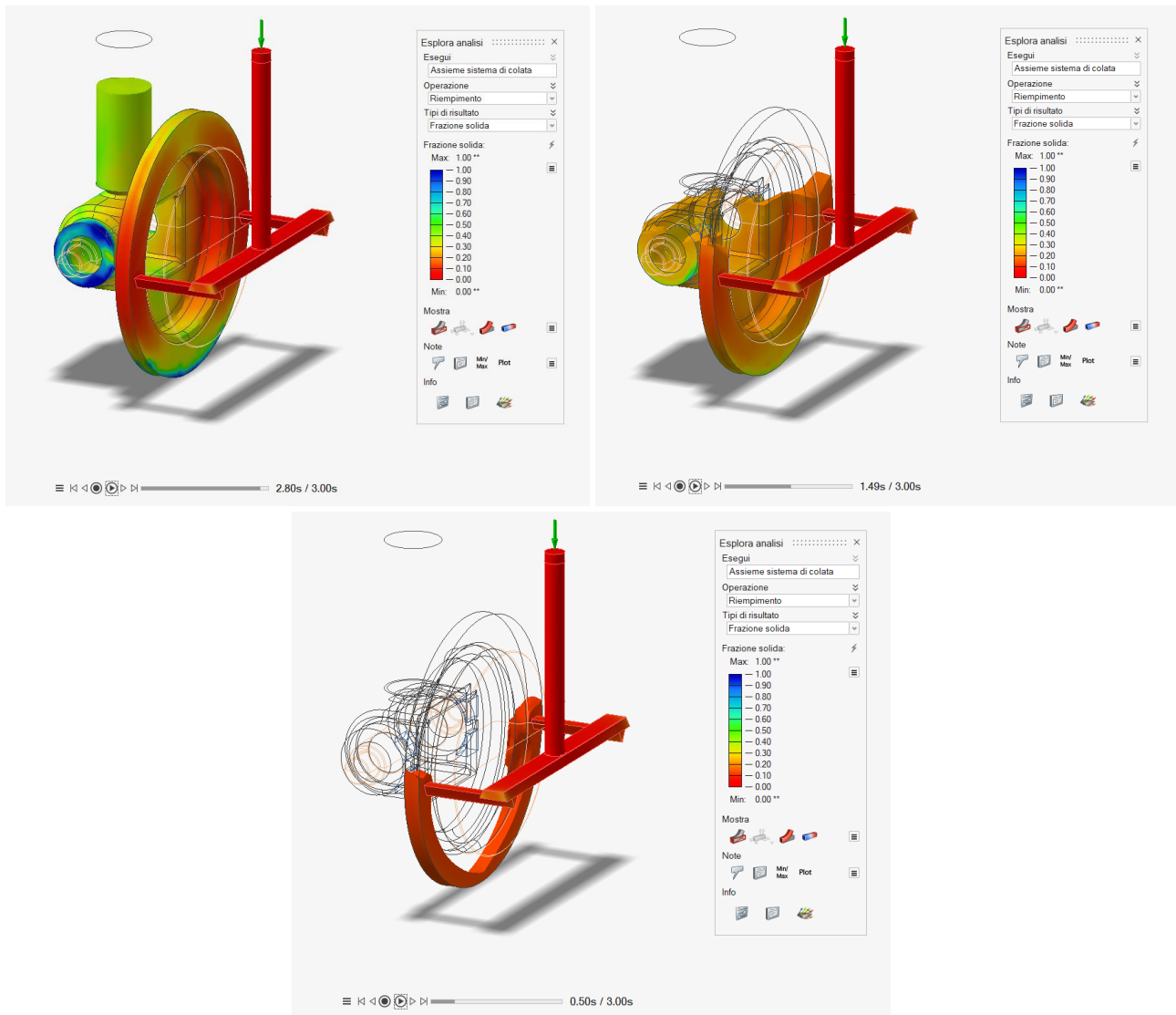
Simulazione della colata

Per l'analisi del processo di colata sono state eseguite simulazioni di riempimento, solidificazione e formazione delle porosità. Durante la progettazione del sistema di alimentazione, particolare attenzione è stata posta alla materozza, il cui dimensionamento in altezza risulta superiore al rapporto standard $H = 1,5D$ precedentemente calcolato. Tale scelta è stata dettata dall'esigenza di portare la materozza fino al pelo dello stampo, così da renderla a cielo aperto e consentire una corretta alimentazione del getto nella fase finale di solidificazione. La nuova altezza della materozza risulta pari a 67,5 mm.

Temperatura

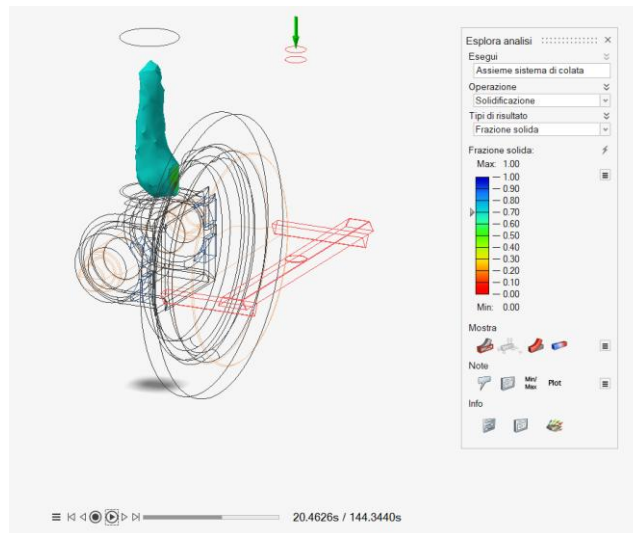
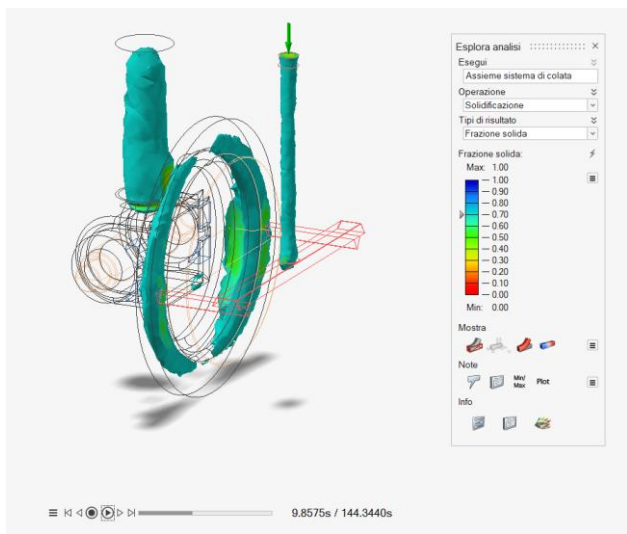
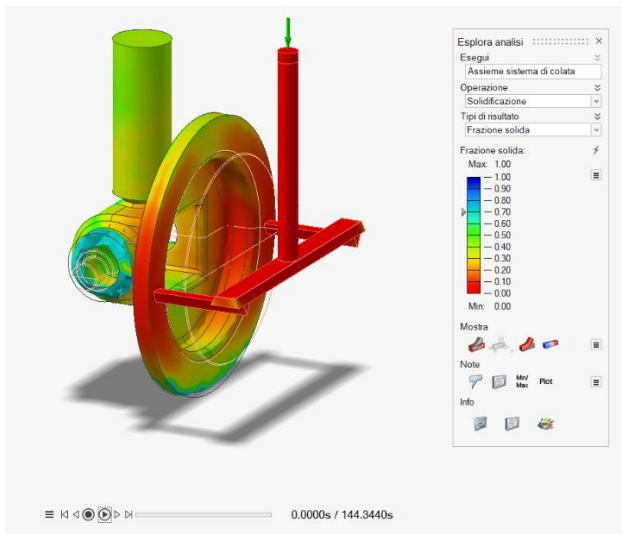


Riempimento frazione solida



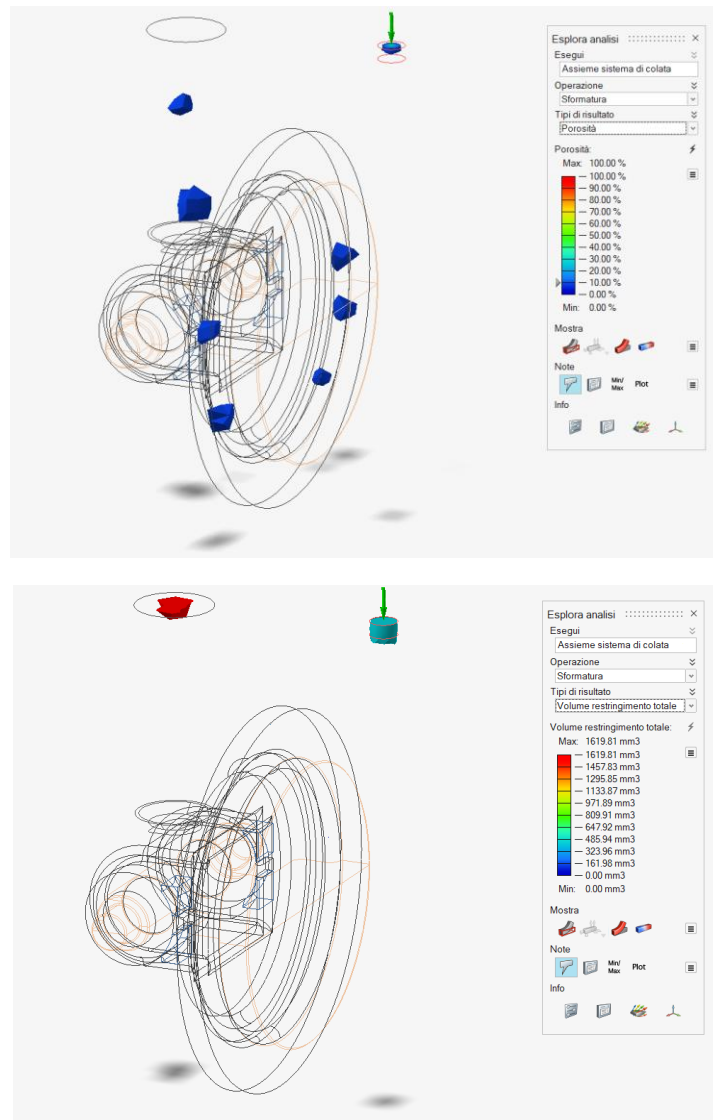
Analizzando il riempimento della frazione solida si nota che al termine della colata delle zone del pezzo risultano oramai quasi solidificate. Trattandosi però dei cilindri laterali e della parte inferiore del disco grande questo non risulta un problema in quanto la loro solidificazione avviene solo dopo che la zona è stata completamente riempita. Inoltre, la loro posizione non ostacola il riempimento delle restanti parti del pezzo.

Solidificazione frazione solida



Osservando la simulazione della frazione solida notiamo che la solidificazione avviene secondo la direzione attesa: l'ultima zona a solidificarsi è infatti la materozza.

Porosità e Volume di restringimento totale



Per quel che riguarda la porosità, si nota che quella maggiore si viene a formare all'interno della materozza. Tuttavia, sono presenti anche delle porosità secondarie nel disco maggiore (fenomeno in parte prevedibile tenendo conto dei moduli di raffreddamento), che però hanno una porosità massima leggermente inferiore al 10% ed interessano un volume limitato. Analizzando poi il volume di restringimento totale, utile per capire le zone soggette alla formazione di cavità di ritiro, si osserva che l'unica cavità significativa è quella della materozza e che le zone di porosità secondarie non costituiscono quindi delle cavità di ritiro.

Staffe

Per la realizzazione dello stampo è stato necessario dimensionare in modo accurato le staffe, tenendo conto degli ingombri complessivi del getto comprensivo di sistema di colata.

Il volume totale, risultante dalla somma del pezzo, dei canali e della materozza, è inscrivibile in un parallelepipedo con base pari a 97,5 mm × 121,8 mm e altezza 151,5 mm, di cui 91,5 mm si sviluppano al di sopra del piano di divisione.

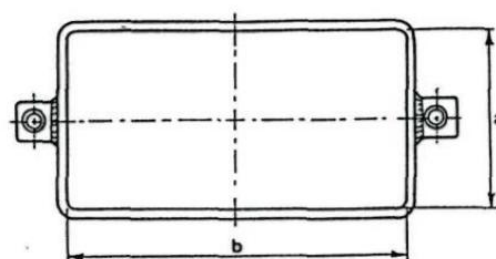
Considerando la necessità di garantire uno spessore minimo di sabbia di circa 30 mm tra la superficie del getto e le pareti interne dello stampo, sono state scelte due staffe rettangolari:

- **Staffa inferiore:** 250 × 315 × 100 mm
- **Staffa superiore:** 250 × 315 × 125 mm

Questa configurazione è stata leggermente sovradimensionata in modo cautelativo, così da consentirne il riutilizzo per future colate senza compromettere la qualità di quella in oggetto. Nel caso di questo processo, l'eventuale spazio non occupato dal getto non costituisce un problema, poiché lo stampo non necessita di essere riempito completamente.

Serie rettangolare con rapporto b/a = 1,26

a	b	H																
250	315	50	63	80	100	125	160	200										
280	355	50	63	80	100	125	160	200	250									
315	400	50	63	80	100	125	160	200	250	300								
355	450	--	--	80	100	125	160	200	250	300								
400	500	--	--	--	100	125	160	200	250	300	355							
450	560	--	--	--	--	100	125	160	200	250	300	355						
500	630	--	--	--	--	--	100	125	160	200	250	300	355	400				
560	710	--	--	--	--	--	100	125	160	200	250	300	355	400				
630	800	--	--	--	--	100	125	160	200	250	300	355	400					
710	900	--	--	--	--	--	125	160	200	250	300	355	400					500
800	1000	--	--	--	--	--	125	160	200	250	300	355	400	500				
900	1100	--	--	--	--	--	160	200	250	300	355	400	500					
1000	1300	--	--	--	--	--	--	200	250	300	355	400	500					
1100	1400	--	--	--	--	--	--	200	250	300	355	400	500					
1200	1500	--	--	--	--	--	--	--	250	300	355	400	500					
1300	1600	--	--	--	--	--	--	--	--	250	300	355	400	500				
1400	1700	--	--	--	--	--	--	--	--	--	300	355	400	500				
1500	1800	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	300	355	400	500			



Spinte metallostatiche

Le spinte metallostatiche costituiscono una delle principali sollecitazioni che agiscono sullo stampo durante la colata. In particolare, la staffa superiore subisce una forza verso l'alto dovuta alla pressione esercitata dalla colonna di metallo fuso. Se questa forza non viene contrastata adeguatamente, si rischiano difetti come fuoriuscite di metallo, formazione di bave e disallineamenti tra le due metà dello stampo.

Calcolo delle spinte per il getto

Per valutare il possibile inserimento di pesi o meno sulla staffa superiore, calcoliamo dunque le spinte metallostatiche suddividendo il getto in sette parti tenendo conto dei vari raccordi. In particolare, approssimiamo queste parti a **due superfici piane e cinque cilindriche**. Questa semplificazione ci ha portato a considerare spinte leggermente più elevate, adottando un approccio più prudente.

- Nel caso delle superfici piane adottiamo la seguente formula:

$$F_p = S \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

Dove:

- S = superficie considerata su cui agisce la forza;
- h = profondità del baricentro del metallo fuso rispetto al pelo libero;
- ρ = densità del metallo ($\rho = 7,2 \text{ g/cm}^3$)
- g = accelerazione di gravità ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

Riscrivo la formula tenendo conto del peso specifico del metallo che ottengo come $\delta = \rho \cdot g = 7200 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 70560 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s}^2)$.

$$F_p = S \cdot h \cdot \delta$$

Superficie nervatura

$$S = 2,097 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$h = 0,0895 \text{ m}$$

$$F_{p1} = 2,097 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot 0,0895 \text{ m} \cdot 70560 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s}^2) = 0,13 \text{ N}$$

Superficie corpo centrale 1

$$S = 8,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$h = 0,072 \text{ m}$$

$$F_{p2} = 8,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0,072 \text{ m} \cdot 70560 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s}^2) = 4,39 \text{ N}$$

- Per quel che riguarda le superfici cilindriche utilizziamo invece la seguente formula:

$$F_c = D \cdot \delta \cdot L \cdot \left(H - \frac{\pi D}{8} \right)$$

Dove:

- D = diametro della superficie cilindrica
- L = lunghezza del semicilindro
- H = altezza della staffa superiore ($H = 125 \text{ mm}$)

Superficie corpo centrale 2

$$D = 0,039 \text{ m}$$

$$L = 0,048 \text{ m}$$

$$F_{c1} = 0,039 \text{ m} \cdot 70560 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s}^2) \cdot 0,048 \text{ m} \cdot (0,125 \text{ m} - \pi \cdot 0,039 \text{ m}/16) = 15,5 \text{ N}$$

Superficie cilindro laterale

$$D = 0,03 \text{ m}$$

$$L = 0,011$$

$$F_{c2} = 0,03 \text{ m} \cdot 70560 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2) \cdot 0,011 \text{ m} \cdot (0,125 \text{ m} - \pi \cdot 0,03 \text{ m}/8) = 2,6 \text{ N}$$

Superficie disco piccolo

$$D = 0,09 \text{ m}$$

$$L = 0,105 \text{ m}$$

$$F_{c3} = 59,8 \text{ N}$$

Superficie disco grande

$$D = 0,12 \text{ m}$$

$$L = 0,007 \text{ m}$$

$$F_{c4} = 4,6 \text{ N}$$

Calcolo delle spinte per l'anima

Per la determinazione delle spinte di sollevamento sulla staffa è necessario tenere conto anche della spinta di Archimede generata dall'anima, che calcoliamo nel seguente modo:

$$F_a = V \cdot \delta - V_t \cdot \delta_a$$

Dove:

- V = volume dell'anima circondata da metallo liquido
- V_t = volume totale dell'anima con le portate d'anima
- δ_a = peso specifico dell'anima ($\delta_a = \rho_a \cdot g = 1600 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 9,8 \text{ m}/\text{s}^2 = 15680 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$)
- δ = peso specifico del metallo liquido ($\delta = \rho \cdot g = 7200 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 9,8 \text{ m}/\text{s}^2 = 70560 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$)

Nel nostro caso:

$$V = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_t = 3,80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Quindi

$$F_a = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 70560 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2) - 3,80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 15680 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2) = 16,2 \text{ N}$$

Di conseguenza la forza di spinta totale è:

$$F_{\text{tot}} = 2F_{p1} + F_{p2} + F_{c1} + 2F_{c2} + F_{c3} + F_{c4} + F_a = 105,95 \text{ N}$$

Calcolo della forza peso della staffa

Per calcolare la forza peso della staffa abbiamo calcolato il volume della sabbia come:

$$V_{\text{sabbia}} = V_{\text{staffa}} - V_{\text{getto}}/2 - V_{\text{materozza+collare}}$$

$$V_{\text{staffa}} = 9843750 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{getto}} = 99248,37 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{materozza+collare}} = 34441,94 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{sabbia}} = 9843750 \text{ mm}^3 - 49624,19 \text{ mm}^3 - 34441,94 \text{ mm}^3 = 9759683,9 \text{ mm}^3 = 9,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Dunque, la forza peso è:

$$F_{\text{peso}} = 9,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot (1500 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2) = 143,47 \text{ N}$$

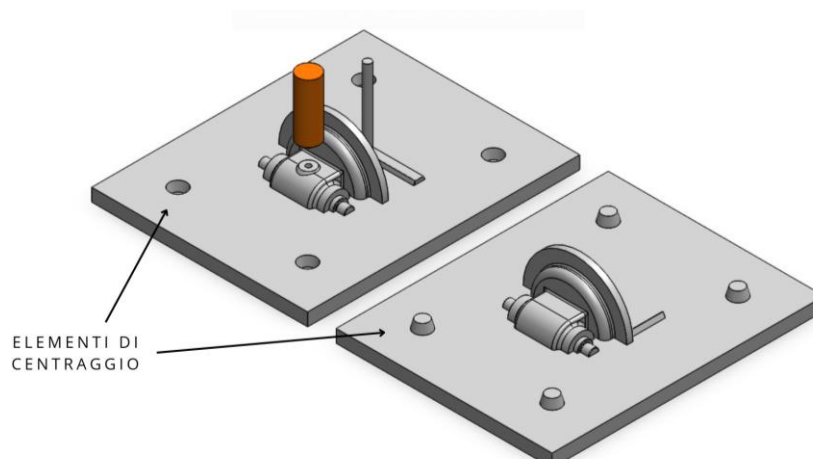
Osserviamo che $F_{\text{peso}} > F_{\text{tot}}$; di conseguenza la staffa superiore non necessita dell'aggiunta di pesi in quanto è in grado, con il suo peso, di contrastare le spinte.

Disegni delle placche modello

Le placche modello sono state realizzate in resina poliuretanica ad alta densità, come precedentemente visto, materiale che garantisce una buona resistenza all'abrasione della sabbia verde e una sufficiente stabilità dimensionale per la produzione annuale prevista.

La materozza è stata progettata con un incastro dedicato, che ne consente la rimozione dall'alto in maniera separata rispetto al resto del modello, semplificando così le operazioni di sformatura e manutenzione.

I disegni tecnici dettagliati delle placche modello, comprensivi della materozza e dei relativi sistemi di fissaggio, sono riportati nell'appendice finale della relazione.



Tempi di produzione

Per la nostra produzione annuale è necessario fondere circa 1720 kg di ghisa ($0,86 \text{ kg} \cdot 2000$ pezzi), il che corrisponde a circa 7 kg di ghisa al giorno per produrre 8 coperchi in 250 giorni lavorativi.

Per ottimizzare i tempi di lavorazione, avendo deciso di acquistare 4 paia di staffe, abbiamo organizzato, per due operatori, un turno lavorativo di 8 ore nel seguente modo:

- Iniziale fusione dei 7 kg di ghisa in un forno elettrico a induzione;
- Primo ciclo di lavorazione dove vengono realizzati i primi 4 coperchi;
- Raffreddamento del getto e secondo ciclo di lavorazione dove vengono prodotti i restanti 4 pezzi.

Nel dettaglio:

1. Accensione del forno, riscaldamento e fusione di 7kg di ghisa: **30 min**
2. Posizionamento del modello nella staffa inferiore: **1 min**
3. Riempimento della staffa con sabbia, posizionamento dei raffreddatori e compattazione: **10 min**
4. Ripetizione del processo per la staffa superiore: **10 min**
5. Estrazione del modello dalla sabbia: **1 min**
6. Realizzazione di anime: **25 min**
7. Posizionamento anima: **2 min**
8. Chiusura e assemblaggio dello stampo: **1 min**
9. Colata del metallo nello stampo: **3 s** (valore ottenuto con InspireCast compatibile con il tempo inizialmente calcolato – $T = 2,97 \text{ s}$)
10. Raffreddamento e solidificazione del getto: circa **60 min** (tiene conto del tempo di solidificazione $t = 42,78 \text{ s}$ verificato dalla simulazione col software)
11. Apertura dello stampo, sformatura del pezzo, rimozione sabbia residua: **10 min**
12. Rimozione di sabbia, anima, canali e materozze ed eventuali lavorazioni superficiali: **30 min**

Primo ciclo di lavorazione

Tenendo conto della produzione di 4 pezzi da parte di due operatori otteniamo un tempo totale di:

$$T_{\text{tot}1} = 2 \cdot (22 \text{ min}) + 2 \cdot (25 \text{ min}) + 2 \cdot (3 \text{ min}) + 2 \cdot (0,05 \text{ min}) + 60 \text{ min} + 2 \cdot (10 \text{ min}) + 2 \cdot (30 \text{ min}) = 240,1 \text{ min} = 4\text{h}$$

Nel calcolo non è stato considerato il tempo necessario per il riscaldamento e la fusione dei 7 kg di ghisa, in quanto tali operazioni non richiedono l'intervento attivo degli operatori. Durante tali minuti, infatti, si presume che i due operatori possano dedicarsi ad altre fasi, anticipando parte delle lavorazioni successive.

Secondo ciclo di lavorazione

In questo caso, per il conto dei tempi totali, escludiamo sia il tempo di riscaldamento e di fusione della ghisa (in quanto abbiamo presupposto che il forno rimanga acceso per almeno 5h successive all'accensione) che i 60 min del raffreddamento e della solidificazione del getto per le motivazioni precedenti.

$$T_{\text{tot}2} = T_{\text{tot}1} - 90 \text{ min} = 150,1 = 2\text{h } 30 \text{ min}$$

Conclusione

Il tempo complessivo per la realizzazione di 8 pezzi è quindi di $T = T_{\text{tot}2} + T_{\text{tot}1} = 6\text{h } 30\text{min}$.

Dunque, il tempo impiegato per ottenere un singolo pezzo (sempre tenendo conto della produzione di 8 elementi al giorno) è di

$$T_{\text{pezzo}} = 390,2 \text{ min} / 8 \approx 49 \text{ min}$$

Costi di produzione

Per ottenere una visione chiara e completa dell'investimento necessario alla produzione dei nostri getti in ghisa, è stata effettuata una stima complessiva dei costi, includendo tutte le principali voci che incidono sul processo. Questa analisi tiene conto non solo delle materie prime, ma anche delle attrezzature necessarie, del consumo energetico e del lavoro impiegato.

In particolare, i costi considerati sono:

- **Materiali:** comprendono la ghisa destinata al getto, la sabbia per stampo e anima.
- **Attrezzature:** includono staffe, cassa d'anima, stearto di calcio, raffreddatori e le placche modello necessarie per la realizzazione dello stampo.
- **Energia:** legata ai consumi dei forni di fusione, dei macchinari e delle operazioni ausiliarie.
- **Manodopera:** stimata in funzione del numero di operatori coinvolti e delle ore di lavoro necessarie per completare l'intero ciclo produttivo.

Materiali:

Getto – Per la produzione dei 2000 pezzi previsti annualmente, è stato stimato un fabbisogno di ghisa grigia G200 pari a 1720 kg (0,86 kg a pezzo). Considerando un prezzo medio di mercato di 2,00 €/kg, avremo:

Prezzo singolo pezzo = 1,72 €

Prezzo totale (2000 pezzi) = 3440 €

Stampo – Come materiale da fonderia è stata scelta una sabbia verde silicea con bentonite, caratterizzata da un peso specifico di circa 1.500 kg/m³ e da un costo unitario di circa 0,15 €/kg. Sulla base dei volumi complessivi delle staffe superiore e inferiore, è stato quindi possibile stimare il costo totale della sabbia necessaria per la realizzazione dello stampo.

- Volume staffa superiore: $V_{\text{staffa}} - V_{\text{getto}}/2 - V_{\text{materozza+collare}} = 9,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- Volume staffa inferiore: $V_{\text{staffa}} - V_{\text{getto}}/2 = 7,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- Volume tot: $17,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- Peso tot sabbia: $1500 \text{ kg/m}^3 \cdot 17,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 26,37 \text{ Kg}$

Prezzo singolo pezzo = 3,9 €

Prezzo totale (2000 pezzi) = 7800 €

Anima – Per la realizzazione delle anime è stata scelta una sabbia silicea ad alta purezza con legante inorganico a base di silicato di sodio, caratterizzata da una densità pari a circa 1600

kg/m³. Ogni anima ha un volume di $3,80 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, per un totale di 2000 anime, corrispondente a un volume complessivo di circa 0,76 m³. Considerando un prezzo medio di 0,25 €/kg e una massa totale di sabbia necessaria pari a 1216 kg, avremo:

Prezzo singolo pezzo = 0,15 €

Prezzo totale (2000 pezzi) = 304 €

Attrezzature

Attrezzature di base – Per quanto riguarda le attrezzature di base della fonderia come i forni di fusione, i crogioli, le pinze, le spatole, le carriere per la sabbia e gli altri strumenti manuali utilizzati dagli operatori, sono comuni a tutti i processi produttivi e vengono impiegate indipendentemente dal tipo di pezzo realizzato. Per questo motivo, pur essendo indispensabili per la produzione, non vengono considerate nel calcolo dei costi specifici della presente commessa, in quanto la loro spesa è già ammortizzata sul funzionamento generale della fonderia.

Staffe - Il costo di mercato per entrambe le staffe è di circa 80 € e considerando che noi dobbiamo effettuare l'acquisto di 8 coppie otterremo una spesa complessiva di 640 €.

Tuttavia, questo importo deve essere considerato alla luce della lunga durata delle staffe: ciascuna coppia può essere utilizzata per molti anni prima di necessitare sostituzione e può essere impiegata anche nella produzione di futuri pezzi meccanici.

Pertanto, il valore economico delle staffe risulta trascurabile rispetto al totale dei costi di produzione. A conferma di ciò, è possibile stimare il costo annuo delle staffe:

Costo per singolo pezzo = $640 \text{ €} / 2000 \approx 0,32 \text{ €}$.

Questo dimostra come l'incidenza delle staffe sul costo di produzione sia minima.

Casse d'anima - In base alle dimensioni della nostra cassa d'anima realizzata in acciaio, il costo stimato per ciascun pezzo è di circa 50 €. Poiché l'operazione di formatura dell'anima prevede l'azione simultanea di due operatori, è necessario acquistare due casse, comportando quindi una spesa complessiva di 100 €.

Tale investimento risulta relativamente contenuto (circa 0.05 €/anno per pezzo), considerando che le casse d'anima in acciaio possono essere riutilizzate per un lungo periodo, sufficiente a coprire l'intera produzione annua e oltre.

Placche modello - Il costo per la realizzazione di una singola placca (prendiamo di riferimento la placca superiore: quella inferiore ha infatti un volume solo leggermente inferiore), comprensivo di manodopera e del prezzo della resina poliuretanica, è di circa 60 €. Considerando che stiamo ipotizzando di far lavorare due operatori contemporaneamente,

allora dovremo acquistare due coppie di placche modello ottenendo un prezzo complessivo di 240 €.

Poiché una singola coppia di placche modello può essere utilizzata per tutta la produzione, questo costo viene ammortizzato e si può ricalcolare come:

Costo singolo pezzo = $240 \text{ €} / 2000 = 0,12 \text{ €}$

Raffreddatori - Per quanto riguarda i raffreddatori, abbiamo stimato un prezzo approssimativo considerando manodopera e materiale, di 0,15€–0,20€ per quattro pezzi. Poiché fondiamo 4 stampi contemporaneamente, in ogni ciclo saranno necessari 16 raffreddatori per garantire un corretto raffreddamento. Assumendo inoltre che questi 16 pezzi possano essere riutilizzati per l'intera produzione annua di 2000 pezzi senza necessità di sostituzione, il costo complessivo dei raffreddatori rimane contenuto (€0,80) e ammortizzato sull'intero ciclo produttivo.

Stearato di calcio – Per agevolare l'estrazione delle placche modello dallo stampo in sabbia verde, è previsto l'impiego di calcio stearato come agente distaccante. In base alla superficie da trattare per ogni stampo (complessiva tra placca superiore e inferiore) e considerando una produzione annua di 2.000 pezzi, il consumo stimato è di circa 10 kg. Il prezzo medio di mercato per applicazioni industriali si attesta tra 1,5 e 2,0 €/kg, per cui il costo complessivo annuale risulta dell'ordine di 15-20 €, un'incidenza trascurabile sul costo totale di produzione.

Energia

Per la produzione annuale di 2000 pezzi in ghisa grigia, fondendo circa 7 kg di metallo al giorno, abbiamo deciso di utilizzare un piccolo forno a induzione da 50 kW. Considerando il riscaldamento del metallo e il mantenimento della temperatura per circa cinque ore, il consumo totale annuo di energia è stimato intorno ai 2000 kWh, corrispondenti a circa 400 euro (0,2 €/pz) per una tariffa di 0,20 €/kWh.

Manodopera

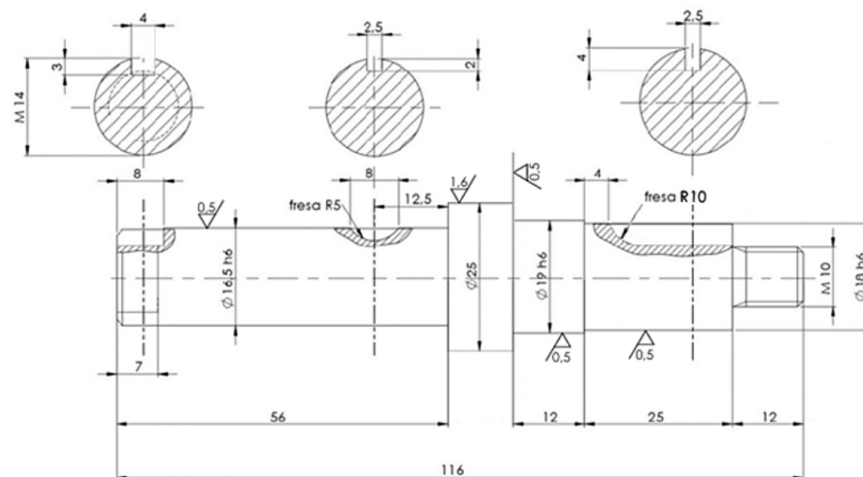
Considerando esclusivamente i tempi attivi stimati in precedenza, risulta che un operatore impiega circa 40 min (0,667 h) per lavorare un singolo pezzo. Con un costo orario di 20 €/h, la manodopera per pezzo si aggira quindi intorno a 13,3 €. Per una produzione annua di 2000 pezzi, il costo annuale complessivo della manodopera si stima pari a circa 26500 €.

Totale

Sommando i costi principali – ossia il materiale del getto, la sabbia per stampo e anime, l’energia e la manodopera – si ottiene un costo totale annuo di circa **38.444 €**, corrispondente a **19,2 €** per pezzo per la produzione di 2000 unità.

PROCESSO PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO

Albero



Smussi non quotati 1x45°

Tolleranza con cuscinetto a sfere (3) h6/H7

Tolleranza con cuscinetto a rulli (4) h6/H7

Tolleranza con distanziale (7, 12) e eccentrico (9) h6/G6

Tolleranza con distanziale (17) h6/H7

Rugosità non indicate $\sqrt{3.2}$

Scelta del materiale

Per la realizzazione dell'albero in questione è stato selezionato un trafilato in acciaio C45 (UNI EN 10083-2) con diametro nominale di 26 mm, fornito da Bettinelli Acciai, azienda riconosciuta per la qualità dei semilavorati destinati ad applicazioni meccaniche.

Questa scelta sostituisce il C60 previsto originariamente nel cartiglio tecnico, con l'obiettivo di ottimizzare i tempi di lavorazione e contenere i costi, mantenendo comunque proprietà meccaniche adeguate all'impiego specifico: un albero di trasmissione per pompa a membrana, funzionante in bagno d'olio.

Confronto tra C60 e C45

Caratteristiche	C60	C45
Contenuto C (%)	~0,60%	~0,45%
Durezza Brinell (ricotto)	200–240 HB	170–200 HB
Lavorabilità	Bassa	Media
Resistenza a trazione	700–950 MPa	600–800 MPa
Tempra superficiale	fino a 60 HRC	fino a 55 HRC
Trattabilità termica	Alta	Media
Costo del greggio	Più elevato	Più economico

Specifiche del materiale selezionato

Acciaio C45 – C45E

Sigle equivalenti: C45 – C45R (1.1201)

Sia il C45E che il C45R (differiscono per il tenore di S minimo) sono impiegati con successo allo stato bonificato per componenti meccanici che richiedono durezza elevata e buona tenacità. E' l'acciaio da bonifica più diffuso, usato per costruzione di mozzi, alberi. Dopo trattamento di bonifica raggiunge buone caratteristiche tecnologiche. Può essere temprato ad induzione per ottenere valori prossimi ai 60 HRC in superficie.



PDF SCHEDA TECNICA

ESECUZIONE	PROFILO	MISURE (MM)
Laminato	Tondo	25 - 380
Laminato	Quadro	50 - 170
Laminato	Piatto	30x20 - 250x50
Fucinato	Tondo	290 - 1000
Fucinato	Quadro	180 - 260
Trafilato	Tondo	3 - 120
Trafilato	Quadro	8 - 75
Trafilato	Piatto	20x12 - 120x40
Trafilato	Esagono	17 - 30
Rettificato h7	Tondo	2 - 120

CORRISPONDENZE

EN	UNI	GB	DIN	AFNOR	BS	GOST	AISI SAE		
C45E	C45	45	Ck45	XC48H1	080M46	45	1045		

CARATTERISTICHE MECCANICHE

stato		C45E 1.1191 C45R 1.1201 EN 10277-5: 2008 TRAFILATO A FREDDO +C								
sezione mm		Prova di trazione in longitudinale								
		R		Rp 0,2	A%	HB				
oltre	fino a	N/mm^2		N/mm^2 min	min	per informazione				
5	10	850-1050		595	8	253-319				
10	16	810-1010		565	8	243-300				
16	40	750-950		525	9	225-286				
40	63	650-850		455	10	200-253				
63	100	650-850		455	11	200-253				
stato		C45E C45R LAMINATI A CALDO caratteristiche meccaniche allo stato bonificato EN 10083-2: 2006								
diametro mm		spessore mm		Prova di trazione in longitudinale						
				R		Re*	A%		C%	Kv
oltre	fino a	oltre	fino a	N/mm^2	N/mm^2 min	min		min	J min	min
	16		16	700-850	490	14		35		213-253
16	100	16	100	650-800	430	16		40	25	200-240
100	250	100	250	630-780	370	17		45	25	192-232

* = Re carico unitario di snervamento superiore, qualora non si manifesti marcatamente, va considerato Rp 0,2

COMPOSIZIONE CHIMICA

C% max	Mn%	Si% max	Cr%	Ni% max	Mo% max	Cu%	Nb%	V%
0,42-0,50	0,50-0,80	-	0,40	0,40	0,10	-	-	-
+/- 0,02	+/- 0,04	-				-	-	-
Al%	P% max	S% max	N%	Pb% max				
-	0,030	0,035	-	-				
-	+ 0,005	+ 0,005	-	-				

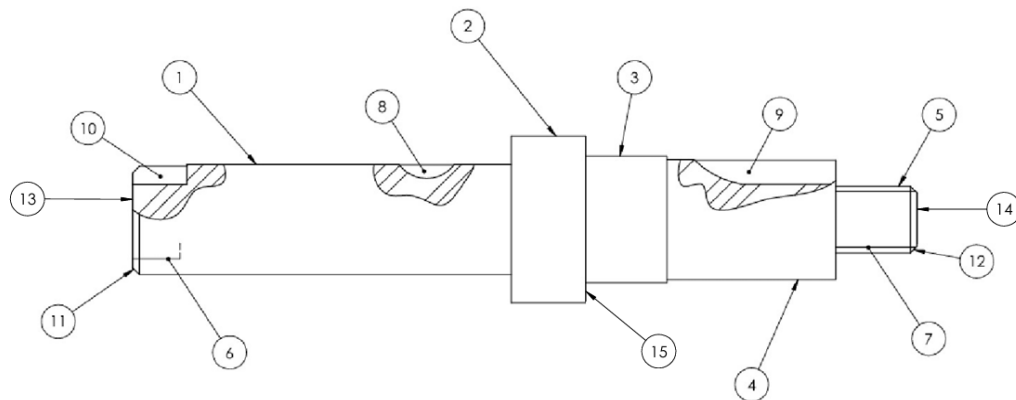
Cr+Mo+Ni max 0,63%

Per tipo C45R n° 1.1201 S% 0,020-0,040 scostamento di prodotto +/- 0,005

Per il tipo C45 n° 1.0503 S% e P% max 0,045 scostamento di prodotto + 0,005

Viene commercializzato anche con trattamento al calcio

Suddivisione delle superfici e scelta del processo



Prima di procedere con la suddivisione delle fasi di lavorazione, è stato necessario individuare le superfici di riferimento da cui partire. Analizzando la figura precedente, si possono distinguere le seguenti superfici e il tipo di processo mediante le quali verranno realizzate:

Suddivisione delle superfici

N. Superficie	Tipologia di superficie	Processo
1, 2, 3, 4, 5	Cilindriche esterne coassiali	Tornitura seguita da rettifica (se necessario)
6, 7	Filettata cilindrica esterna coassiale a 1, 2, 3, 4, 5	Tornitura (filettatura)
11, 12	Smusso esterno	Tornitura (smusso)
13, 14, 15	Piana ortogonale all'asse delle 1, 2, 3, 4, 5	Tornitura
8, 9, 10	Cave e alloggiamenti per linguette	Fresatura

Suddivisione delle fasi di lavorazione

Abbiamo proseguito poi con la scelta del ciclo di lavorazione:

Ciclo di lavorazione			
Fase	Sottofase	Operazione	Macchina
10		Taglio barra	Sega a nastro
20	A	Centraggio ◆ Sgrossatura sup.2 ◆ Sfacciatura sup.13 ◆ Sgrossatura sup.1 ◆ Rettifica sup.1 ◆ Filettatura sup.6 ◆ Smussatura sup.11	Tornio Parallelo
	B	◆ Sfacciatura sup.14 ◆ Sgrossatura sup.3 ◆ Sgrossatura sup.4 ◆ Sgrossatura sup.5 ◆ Finitura sup.3 ◆ Finitura sup.4 ◆ Filettatura sup.7 ◆ Smussatura sup.12 ◆ Finitura sup.15	
30	A	Realizzazione sup.10	Fresatrice Universale
	B	Realizzazione sup.8	
	C	Realizzazione sup.9	

Scelta dei macchinari

Taglio delle barre

Abbiamo ipotizzato l'acquisto di barre in acciaio C45 pretagliate della lunghezza di 936 mm. Ogni barra verrà troncata in otto spezzoni da 117 mm ciascuno, dai quali saranno ricavati i singoli alberi. Questo consente di ottenere circa 2.000 pezzi annui a partire da 250 barre.

Per eseguire queste sezioni abbiamo utilizzato la segatrice a nastro **Metallkraft MBS 105**, con potenza di 1010 W, l'ideale per il taglio preciso di barre in acciaio C45 fino a 26 mm di diametro. Questa macchina offre velocità regolabile e telaio robusto, garantendo efficienza e sicurezza nelle operazioni di taglio ripetute.



Dati tecnici della sega a nastro

Potenza motore	1,01 kW
Tensione del motore	230 V / 50 Hz
Velocità nastro	30 - 80 m/min
Dimensioni del nastro	1335 x 13 x 0,65 mm
Dimensioni macchina	630 x 300 x 410 mm
Prezzo di listino	674,29 €

Tornitura

Le lavorazioni principali di sgrossatura e finitura delle superfici cilindriche dell'albero sono state eseguite sul tornio parallelo **Fervi T940/230V**, scelto per la sua versatilità e precisione, adatta a una produzione medio-piccola come quella prevista.

Il tornio è stato equipaggiato con sistema DRO (Digital Read-Out) a 3 assi, che consente il controllo accurato degli spostamenti del carrello con una precisione di 0,01 mm, utile per rispettare le tolleranze dimensionali richieste (h6/H7). La macchina dispone inoltre di avanzamenti automatici longitudinale e trasversale, impianto di refrigerazione, illuminazione integrata e possibilità di inclinazione della testa di fresatura, rendendola un sistema completo per tornitura e piccole operazioni.



Dati tecnici del Tornio T940

Altezza punte	150 mm
Diametro max sul banco	300 mm
Diametro max sul carro	173 mm
Passaggio barra	38 mm
Distanza tra le punte	940 mm
Altezza utensile	16 mm
Velocità del mandrino (autocentrante 3+3)	64 - 1500 rpm
Numero di velocità del mandrino	9
Filettature metriche	0,5 - 3,5 mm
Potenza motore	1,5 kW
Alimentazione	230 V
Dimensioni	600 x 1600 x 1270 mm
Prezzo di listino	8459,99 €

Accessori inclusi:

[Mandrino autocentrante 3+3 Ø 160 mm](#)

Mandrino a 4 griffe indipendenti reversibili Ø 200 mm

Bussola di riduzione CM 5/3

Flangia menabrida Ø 240 mm

Flangia Ø 200 mm

Lunetta mobile

Lunetta fissa

[Contropunta fissa CM 3](#)

Contropunta fissa CM 5

Contropunta rotante CM 3

Freno a pedale

Comparatore di filettatura

Protezione vite madre

Protezione torretta

Protezione mandrino

Paraspruzzi posteriore

[Torretta a cambio rapido T0AE](#)

Lampada a LED

Carrello contropunta a bloccaggio rapido

Ingranaggi del carro a bagno d'olio

Nel manuale della macchina sono anche riportate le seguenti **velocità disponibili** a cui faremo riferimento successivamente per i parametri di taglio:

	1	2	3
A	64	640	380
B	210	1500	1300
C	130	940	790

Rettifica

La scelta della rettificatrice è ricaduta su una soluzione poco convenzionale, dettata da esigenze pratiche e produttive. Considerando che le operazioni di rettifica richieste sono limitate e localizzate su alcune superfici tornite, si è deciso di evitare lo spostamento del pezzo tra più macchinari, con l'obiettivo di ridurre possibili disallineamenti assiali e ottimizzare i tempi ciclo.



Per questo motivo, è stata selezionata l'unità di rettifica **RAPID Original HP2**, installabile direttamente sul tornio. Questo accessorio consente di eseguire rettifiche leggere senza necessità di trasferire il componente, mantenendo un unico riferimento geometrico durante l'intero processo.

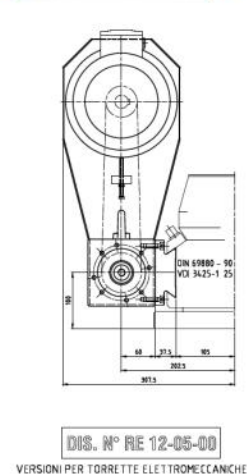
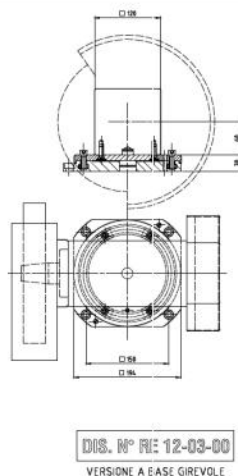
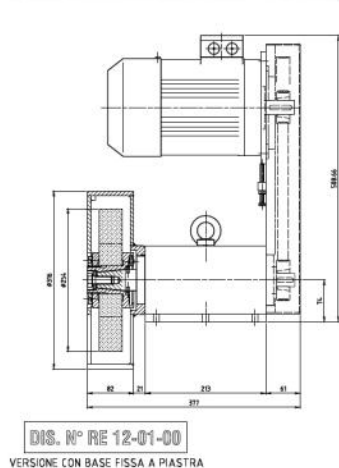
L'operazione di rettifica sarà applicata unicamente alle superfici che richiedono una finitura superficiale inferiore a 13 μm ($R_a \leq 0,013 \text{ mm}$), valore che non sarebbe raggiungibile con la sola tornitura, la quale garantisce al massimo finiture intorno a 0,08–0,1 mm. L'adozione di questa soluzione consente quindi di contenere tempi, costi e rischi di errore, garantendo al contempo la qualità richiesta su tratti particolarmente critici o soggetti a tolleranze strette.

Dati tecnici della rettificatrice

Potenza motore	1,5 kW
Alimentazione	400 V 50 Hz
Velocità di taglio	30 m/s
Flangia porta mola ($\varnothing$ interno)	50 mm
Flangia porta mola ($\varnothing$ esterno)	100 mm
Mola per esterni	254 x 40 x 50 mm
Ingombri della macchina	377 x 307,5 x 508,66 mm
Prezzo di listino	800 €

Attacchi disponibili:

- In sostituzione della torretta manuale
- Base girevole
- Per torretta elettromeccanica



Nel nostro caso abbiamo optato per fissarla direttamente sulla torretta a cambio rapido T0AE del nostro tornio, in quanto il peso della rettificatrice risulta essere di circa 25 Kg e, con il giusto serraggio, questo non dovrebbe essere un problema per il suo collocamento.

Fresatura

Le cave per linguette e le sedi di sicurezza verranno realizzate tramite la fresatrice a colonna **HBM BF 60 DRO**, dotata di attacco ISO 40.



Questa macchina, stabile e precisa, è particolarmente adatta alla lavorazione di componenti cilindrici come alberi. L'attacco ISO 40 consente l'uso di portautensili robusti e affidabili, necessari per il corretto avanzamento nelle cave strette.

Durante la fresatura, l'albero verrà bloccato mediante **morsa HBM Tipo 10** da 150 mm, scelta per la sua compatibilità con il piano della fresatrice e per l'apertura sufficiente a contenere il pezzo. La rigidità del sistema di serraggio, unita alla stabilità della macchina, garantisce una buona qualità superficiale e una lavorazione priva di vibrazioni.

Prezzo di listino: 649,99 €



Dati tecnici della fresatrice

Potenza motore orizzontale	0,85 – 1,5 kW
Alimentazione	400 V
Gamma di velocità (8 passi)	115 – 1.750 giri/minuto
Corsa del mandrino	125 mm
Attacco del mandrino	ISO 40
Distanza massima mandrino dalla tavola	375 mm
Distanza mandrino dalla colonna	210 - 550 mm
Capacità massima di fresatura in acciaio	40 mm
Capacità massima di foratura in acciaio	35 mm
Spostamento laterale massimo	175 mm
Spostamento longitudinale massimo	560 mm
Ingombri della macchina	1300 x 1400 x 2100 mm
Prezzo di listino	6249,98 €

Accessori inclusi:

Illuminazione della macchina

[Avanzamento automatico della tavola](#)

(azionamento a ingranaggi)

Avanzamento automatico tavola trasversale

Volantini in acciaio

[Impianto di raffreddamento completo](#)

Coperchio di protezione con interruttore

Sistema di lettura digitale LCD a 3 assi

Testa di fresatura inclinabile sinistra/destra 0-45 gradi

Regolazione fine

Piano di lavoro temprato girevole
sinistra/destra 0-45 gradi

Strumenti associati

Documentazione completa

Anche in questo caso nel manuale della macchina sono riportate le seguenti **velocità disponibili** a cui faremo riferimento successivamente per la scelta dei parametri di taglio:

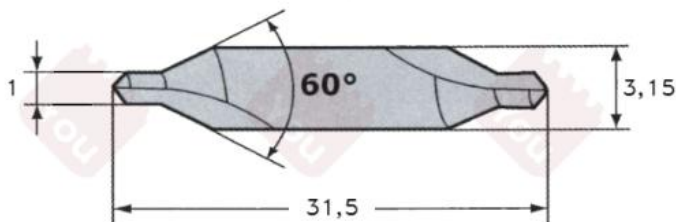
	L	H
BC	115	230
AC	290	580
BD	360	720
AD	875	1750

Scelta utensili e parametri di taglio

Per minimizzare i costi nella scelta degli utensili abbiamo optato per realizzare diverse lavorazioni con lo stesso tipo di inserto e utilizzarlo diversamente in base alla lavorazione richiesta.

Punta e contropunta

Per l'operazione di centraggio iniziale è stata adottata una **punta da centro HSS-E al 5 % di cobalto rivestita TiN, con angolo 60° (DIN 333 A)**, in grado di garantire elevata resistenza all'usura e precisione nel centraggio su acciaio C45. Prezzo di listino 14,94 €.



A supporto, è stata scelta una **contropunta rotante CM3 con angolo 60°**, compatibile con il tornio Fervi, per assicurare rigidità e stabilità durante la fase di sgrossatura. Accessorio già incluso.

NUOVA CONTROPUNTA ROTANTE CONO MORSE 3 CM3 TORNIO C046/3 FERVI

Marca FERVI Codice C046/3

UTILIZZABILE ANCHE SUI TORNIO DELLA VALEX, SOGI, EHNELL, FERVI

DATI TECNICI:

CONO MORSO: CM3

ANGOLO CUSPIDE: 60°

DIAMETRO CORPO: 53 mm

LUNGHEZZA: 175 mm

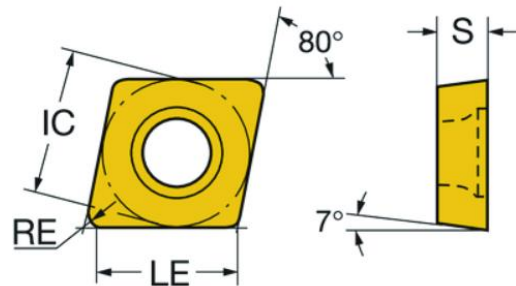
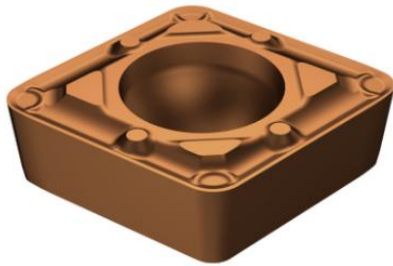
GARANZIA 24 MESI



Utensili per sgrossatura leggera, finitura e smussi

Per sgrossature leggere (0.25-0.5 mm), finiture superficiali e smussi (1x45°): utilizziamo un utensile più piccolo e preciso come il **CCMT 06 02 04-WF 1125**.

Specifiche tecniche principali:



Livello 1 di classificazione del materiale

M

Profondità di passata a_p

0.8 mm (0.3 - 2)

Avanzamento f_n

0.12 mm/giro (0.05 - 0.3)

Avanzamento massimo consigliato h_{ex}

0.12 mm/giro (0.05 - 0.3)

Velocità di taglio V_c

200 m/min (200 - 125)

Forma dell'inserto

Rhombic 80

Raggio di punta (RE)

0,3969 mm

Lunghezza effettiva del tagliente (LE)

6,048 mm

Diametro del cerchio inscritto (IC)

6,35 mm

Spessore dell'inserto (S)

2,3813 mm

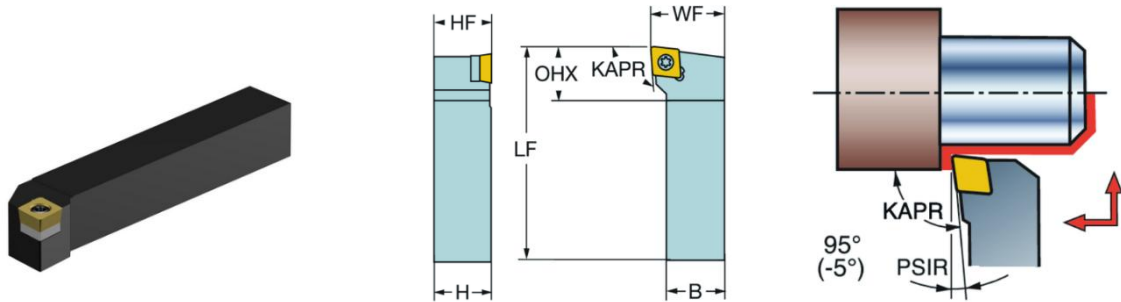
Angolo di spoglia inferiore principale (AN)

7°

Scelta del portautensile

Scegliamo come portautensile il **SCLCR 1616H09** della **Sandvik Coromant**.

Specifiche tecniche principali:



Angolo del tagliente dell'utensile (KAPR)	95 °
Angolo di attacco dell'utensile (PSIR)	-5 °
Sporgenza massima (OHX)	16,8 mm
Altezza dello stelo(H)	16 mm
Altezza funzionale (HF)	16 mm
Larghezza dello stelo(B)	16 mm
Lunghezza funzionale (LF)	100 mm
Larghezza funzionale (WF)	20 mm
Angolo di spoglia superiore ortogonale (GAMO)	0 °
Angolo di inclinazione (LAMS)	0 °

◆ Parametri di taglio per sgrossature leggere, finiture e smussi

L'analisi della prima lavorazione verrà analizzata nel dettaglio mentre le successive mostreranno solamente i risultati ottenuti con il medesimo metodo.

Sottofase A - Sgrossatura sup.2

► Trovo la velocità di taglio massima ($V_{t_{max}}$) realizzabile al nostro tornio.

Considero quindi:

- N.ro giri mandrino max: $n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$
- Diametro di partenza sbarra: $D_i = 26 \text{ mm}$

Calcolo:

$$V_{t_{max}} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n_{max}}{1000} = \frac{\pi \cdot 26 \cdot 1500}{1000} = 122,52 \text{ m/min}$$

Prendo ora in considerazione i valori da noi scelti per questa lavorazione.

- Lunghezza sbarra: $l = 117 \text{ mm}$
- Diametro iniziale: $D_i = 26 \text{ mm}$
- Diametro finale: $D_f = 25 \text{ mm}$
- Sovrametallo da asportare: $h = \frac{D_i - D_f}{2} = 0,5 \text{ mm}$
- Rugosità: $R = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mm}$
- Raggio di punta: $RE = 0,3969 \text{ mm}$
- Avanzamento: $a = \sqrt{R \cdot 8 \cdot RE} = 0,07 \text{ mm/giro}$
- Profondità di passata: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- Numero di passate: $n_p = \frac{h}{a_p} = 1$
- Velocità di taglio teorica scelta: $V_{t_{teorica}} = 80 \text{ m/min}$

Controllo il numero di giri teorico che otterrei con questi dati:

$$n_{teorica} = 1000 \cdot V_t \pi \cdot D_i = 979 \text{ giri/min}$$

Questo valore rispetta i limiti dati dal tornio utilizzato ($64 < n < 1500 \text{ giri/min}$).

Scelgo ora il valore del numero di giri che più si avvicina a quelli possibili della macchina:

940 giri/min

Ricalcolo ora la velocità di taglio che andrò ad utilizzare:

$$V_t = \pi \cdot 26 \cdot 940 \cdot 1000 = \mathbf{76,78 \text{ m/min}}$$

► Calcolo ora la sezione di truciolo:

$$S = a \cdot a_p = 0,07 \cdot 0,5 = 0,035 \text{ mm}^2$$

► Ricavo ora la pressione di taglio P_t sapendo che:

- Resistenza a trazione: $R_m = 750 \text{ N/mm}^2$
- Angolo di taglio dell'utensile: $\beta = 95^\circ$
- Costante di Kronenberg (K_s): $1/n = 0,197$ (per acciaio)
- Pressione di taglio specifica (C45): $P_s = 2,4 \cdot R_m^{0,454} \cdot \beta^{0,666} = 1006,13 \text{ N/mm}^2$

Trovo:

$$P_t = P_s \cdot S^{-(1/n)} = 1006,13 \cdot 0,035^{-0,197} = 1947,48 \text{ N/mm}^2$$

► Calcolo ora la forza di taglio:

$$F_t = P_t \cdot S = 1947,48 \cdot 0,035 = 68,16 \text{ N}$$

► Trovo la potenza di taglio:

$$W_t = \frac{F_t \cdot V_t}{60 \cdot 1000} = 68,16 \cdot 76,7860000 = 0,087 \text{ Kw}$$

Sfacciatura sup.13

$D_i = 25 \text{ mm}$	$D_f = 0 \text{ mm}$	$h = 12,5 \text{ mm}$
$l = 0,5 \text{ mm}$	$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$RE = 0,3969 \text{ mm}$
$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$	$n = 790 \text{ giri/min}$	$K_s = 0,197$
$a = 0,1 \text{ mm/giro}$	$a_p = 1,25 \text{ mm}$	$n_p = 10$
$Vt_{max} = 117,81 \text{ m/min}$	$Vt = 62,05 \text{ m/min}$	$S = 0,125 \text{ mm}^2$
$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$	$\beta = 95^\circ$	$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$
$P_t = 1515,52 \text{ N/mm}^2$	$F_t = 189,44 \text{ N}$	$W_t = 0,196 \text{ Kw}$

Smussatura sup.11

$D_i = 16,5 \text{ mm}$	$D_f = 14,5 \text{ mm}$	$h = 1 \text{ mm}$
$l = 1 \text{ mm}$	$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$RE = 0,3969 \text{ mm}$
$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$	$n = 1300 \text{ giri/min}$	$K_s = 0,197$
$a = 0,33 \text{ mm/giro}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$n_p = 1$
$Vt_{max} = 77,75 \text{ m/min}$	$Vt = 67,39 \text{ m/min}$	$S = 0,33 \text{ mm}^2$
$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$	$\beta = 95^\circ$	$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$
$P_t = 1251,72 \text{ N/mm}^2$	$F_t = 413,10 \text{ N}$	$W_t = 0,46 \text{ Kw}$

Sottofase B -

Sfacciatura sup.14

$D_i = 10 \text{ mm}$	$D_f = 0 \text{ mm}$	$h = 5 \text{ mm}$
$l = 0,5 \text{ mm}$	$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$RE = 0,3969 \text{ mm}$
$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$	$n = 940 \text{ giri/min}$	$K_s = 0,197$
$a = 0,1 \text{ mm/giro}$	$a_p = 1,25 \text{ mm}$	$n_p = 4$

$$V_{t_{max}} = 47,12 \text{ m/min}$$

$$R_m = 810 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 1569,40 \text{ N/mm}^2$$

$$V_t = 29,53 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 196,17 \text{ N}$$

$$S = 0,125 \text{ mm}^2$$

$$P_s = 1041,9 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,097 \text{ Kw}$$

Sgrossatura sup.4

$$D_i = 19,6 \text{ mm}$$

$$l = 25 \text{ mm}$$

$$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$$

$$a = 0,04 \text{ mm/giro}$$

$$V_{t_{max}} = 92,36 \text{ m/min}$$

$$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 1896,92 \text{ N/mm}^2$$

$$D_f = 18,6 \text{ mm}$$

$$R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$n = 1300 \text{ giri/min}$$

$$a_p = 1 \text{ mm}$$

$$V_t = 80,05 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 75,88 \text{ N}$$

$$h = 1 \text{ mm}$$

$$RE = 0,3969 \text{ mm}$$

$$K_s = 0,197$$

$$n_p = 1$$

$$S = 0,04 \text{ mm}^2$$

$$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,101 \text{ Kw}$$

Finitura sup.3

$$D_i = 19,6 \text{ mm}$$

$$l = 12 \text{ mm}$$

$$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$$

$$a = 0,04 \text{ mm/giro}$$

$$V_{t_{max}} = 91,42 \text{ m/min}$$

$$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 2404,67 \text{ N/mm}^2$$

$$D_f = 19 \text{ mm}$$

$$R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$n = 1300 \text{ giri/min}$$

$$a_p = 0,3 \text{ mm}$$

$$V_t = 80,05 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 28,86 \text{ N}$$

$$h = 0,3 \text{ mm}$$

$$RE = 0,3969 \text{ mm}$$

$$K_s = 0,197$$

$$n_p = 1$$

$$S = 0,012 \text{ mm}^2$$

$$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,039 \text{ Kw}$$

Finitura sup.4

$$D_i = 18,6 \text{ mm}$$

$$l = 25 \text{ mm}$$

$$D_f = 18 \text{ mm}$$

$$R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$h = 0,3 \text{ mm}$$

$$RE = 0,3969 \text{ mm}$$

$$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$$

$$a = 0,04 \text{ mm/giro}$$

$$V_{t_{max}} = 87,65 \text{ m/min}$$

$$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 2404,67 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 1300 \text{ giri/min}$$

$$a_p = 0,3 \text{ mm}$$

$$V_t = 75,93 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 28,86 \text{ N}$$

$$K_s = 0,197$$

$$n_p = 1$$

$$S = 0,012 \text{ mm}^2$$

$$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,037 \text{ Kw}$$

Smussatura sup.12

$$D_i = 10 \text{ mm}$$

$$l = 1 \text{ mm}$$

$$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$$

$$a = 0,1 \text{ mm/giro}$$

$$V_{t_{max}} = 47,12 \text{ m/min}$$

$$R_m = 810 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 1639,93 \text{ N/mm}^2$$

$$D_f = 8 \text{ mm}$$

$$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$n = 940 \text{ giri/min}$$

$$a_p = 1 \text{ mm}$$

$$V_t = 29,53 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 164,00 \text{ N}$$

$$h = 1 \text{ mm}$$

$$RE = 0,3969 \text{ mm}$$

$$K_s = 0,197$$

$$n_p = 1$$

$$S = 0,1 \text{ mm}^2$$

$$P_s = 1041,9 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,081 \text{ Kw}$$

Finitura sup.15

$$D_i = 25 \text{ mm}$$

$$l = 0,2 \text{ mm}$$

$$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$$

$$a = 0,04 \text{ mm/giro}$$

$$V_{t_{max}} = 117,80 \text{ m/min}$$

$$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 2097,74 \text{ N/mm}^2$$

$$D_f = 19 \text{ mm}$$

$$R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$n = 940 \text{ giri/min}$$

$$a_p = 0,6 \text{ mm}$$

$$V_t = 73,83 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 50,34 \text{ N}$$

$$h = 3 \text{ mm}$$

$$RE = 0,3969 \text{ mm}$$

$$K_s = 0,197$$

$$n_p = 5$$

$$S = 0,024 \text{ mm}^2$$

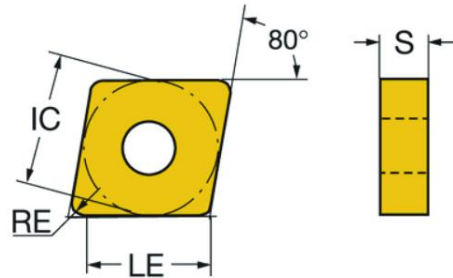
$$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,062 \text{ Kw}$$

Utensili per sgrossatura pesante

Per sgrossature maggiori (3-4,5 mm) abbiamo utilizzato un utensile più robusto e con raggio più grande per evitare vibrazioni e rotture. Nel nostro caso abbiamo scelto il **CNMG 120408-MM Sandvik Coromant**.

Specifiche tecniche principali:



Livello 1 di classificazione del materiale

M

Profondità di passata a_p

3 mm (0.5 - 5.7)

Avanzamento f

0.25 mm/giro (0.1 - 0.45)

Avanzamento massimo consigliato h_{ex}

0.25 mm/giro (0.1 - 0.45)

Velocità di taglio V_c

180 m/min (235 - 135)

Forma dell'inserto

Rhombic 80

Raggio di punta (RE)

0,7938 mm

Lunghezza effettiva del tagliente (LE)

12,0959 mm

Diametro del cerchio inscritto (IC)

12,7 mm

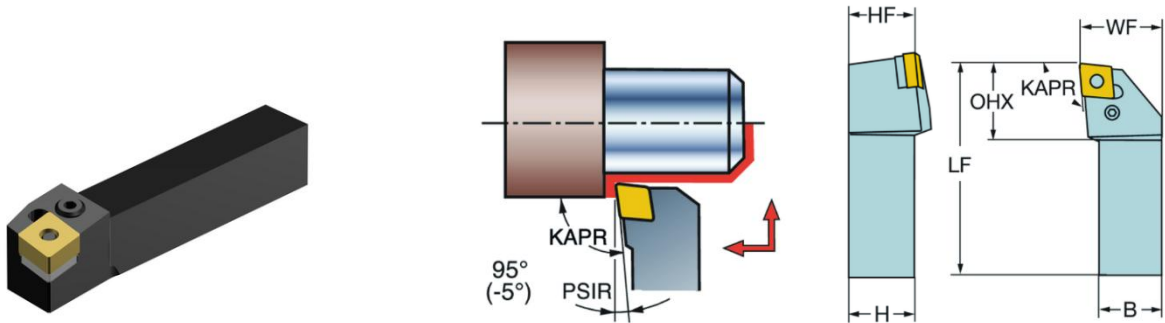
Spessore dell'inserto (S)

4,7625 mm

Scelta del portautensile

Abbiamo scelto come portautensile il **PCLNR 1616H12-M**.

Specifiche tecniche principali:



Angolo del tagliente dell'utensile (KAPR)	95 °
Angolo di attacco dell'utensile (PSIR)	-5 °
Sporgenza massima (OHX)	27,2 mm
Altezza dello stelo(H)	16 mm
Altezza funzionale (HF)	16 mm
Larghezza dello stelo(B)	16 mm
Lunghezza funzionale (LF)	100 mm
Larghezza funzionale (WF)	20 mm
Angolo di spoglia superiore ortogonale (GAMO)	-6 °
Angolo di inclinazione (LAMS)	-6 °

◆ Parametri di taglio per sgrossature pesanti

In seguito, vengono riportati i parametri di taglio calcolati come precedentemente visto per la sgrossatura leggera.

Sgrossatura sup.1

$D_i = 25 \text{ mm}$	$D_f = 16,6 \text{ mm}$	$h = 4,2 \text{ mm}$
$l = 56 \text{ mm}$	$R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$RE = 0,7938 \text{ mm}$
$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$	$n = 1300 \text{ giri/min}$	$K_s = 0,197$
$a = 0,056 \text{ mm/giro}$	$a_p = 4,2 \text{ mm}$	$n_p = 1$
$V_{t_{max}} = 117,81 \text{ m/min}$	$V_t = 102,10 \text{ m/min}$	$S = 0,235 \text{ mm}^2$
$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$	$\beta = 95^\circ$	$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$
$P_t = 1338 \text{ N/mm}^2$	$F_t = 314,43 \text{ N}$	$W_t = 0,53 \text{ Kw}$

Sgrossatura sup.3

$D_i = 25 \text{ mm}$	$D_f = 16,9 \text{ mm}$	$h = 4,05 \text{ mm}$
$l = 11,8 \text{ mm}$	$R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$RE = 0,7938 \text{ mm}$
$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$	$n = 1300 \text{ giri/min}$	$K_s = 0,197$
$a = 0,056 \text{ mm/giro}$	$a_p = 4,05 \text{ mm}$	$n_p = 1$
$V_{t_{max}} = 117,81 \text{ m/min}$	$V_t = 102,10 \text{ m/min}$	$S = 0,227 \text{ mm}^2$
$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$	$\beta = 95^\circ$	$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$
$P_t = 1347,46 \text{ N/mm}^2$	$F_t = 305,87 \text{ N}$	$W_t = 0,52 \text{ Kw}$

Sgrossatura sup.5

$$D_i = 18,6 \text{ mm}$$

$$l = 12 \text{ mm}$$

$$n_{max} = 1500 \text{ giri/min}$$

$$a = 0,143 \text{ mm/giro}$$

$$V_{t_{max}} = 58,43 \text{ m/min}$$

$$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$$

$$P_t = 1107,25 \text{ N/mm}^2$$

$$D_f = 10 \text{ mm}$$

$$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$n = 790 \text{ giri/min}$$

$$a_p = 4,3 \text{ mm}$$

$$V_t = 46,16 \text{ m/min}$$

$$\beta = 95^\circ$$

$$F_t = 680,96 \text{ N}$$

$$h = 4,3 \text{ mm}$$

$$RE = 0,7938 \text{ mm}$$

$$K_s = 0,197$$

$$n_p = 1$$

$$S = 0,615 \text{ mm}^2$$

$$P_s = 1006,13 \text{ N/mm}^2$$

$$W_t = 0,52 \text{ Kw}$$

Utensili per rettifica



Sull'unità di rettifica RAPID Original HP2 verrà montata la mola abrasiva **Norton 32A46IVS**, che verrà utilizzata per rettificare 0,1 mm di materiale dalla superficie cilindrica 1, garantendo al contempo la tolleranza dimensionale h6.

Specifiche tecniche principali:

Diametro (mm) ↑↓	Foro (mm) ↑↓	Spessore (mm) ↑↓	Granulometria ↑↓	Max Velocità Operativa (m/s) ↑↓	Specifica ↑↓	Abrasivo ↑↓	Forma ↑↓	Part # ↑↓
250	76	32	46	35	32A46IVS	Ossido di alluminio	05 Mola con incavo cilindrico su un lato	69936639419
200	76	20	46	35	32A46IVS	Ossido di alluminio	01 Mola cilindrica	69936639554

◆ Parametri di taglio per rettifiche

I parametri di taglio per la rettifica vengono calcolati diversamente rispetto a quelli precedentemente visti per il tornio.

Sottofase A - Rettifica sup.1

Dati di partenza

► Il rapporto di rettifica (G):

$$G = \frac{V_p}{V_m}$$

Dove

- V_p = volume del materiale del pezzo asportato
- V_m = volume del materiale perso dalla mola

Questo valore non è stato realmente calcolato, da letteratura abbiamo assunto per una mola abrasiva convenzionale (ossido di alluminio) come la **32A46IVS**, in rettifica in tondo esterna, un valore tipico di G tra 10 e 50, per questo motivo abbiamo preso un valore intermedio di $G=30$.

► La velocità di taglio (V_t):

$$V_t = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60000}$$

Dove

- D = diametro della mola in mm = 200 mm
- n = velocità angolare della mola giri/min

Conoscendo già il valore $V_t = 30$ m/s possiamo ricavarci n come

$$n = \frac{V_t \cdot 60000}{\pi \cdot D}$$

Da cui otteniamo $n = 2865$ giri/min

► Per ricavarci i parametri di Velocità di rotazione del pezzo (n_p), Avanzamento (f) e Profondità di passata (p) facciamo riferimento alla seguente tabella per rettifica in tondo esterna:

Operazione	Velocità rotazione pezzo	Avanzamento longitudinale	Avanzamento trasversale	Profondità di passata (mm)
Rettifica in tondo esterna	$1/60$ velocità periferica della mola	$\frac{2}{10} + \frac{2}{3}$ spessore mola / giro pezzo	/	0.02+0.06 sgross. 0.002+0.01 finit.
Rettifica in tondo interna	$1/100$ velocità periferica della mola	(idem)	/	0.01
Rettifica in piano tangenziale	/	8+20 m/min	$\frac{2}{10} + \frac{2}{3}$ spessore mola / corsa	0.05+0.2 sgross. 0.01+0.05 finit.
Rettifica in piano frontale	/	8+20 m/min	/	(idem)

$$n_p = 1/60 \cdot n = 1/60 \cdot 2865 = 47,75 \text{ giri/min}$$

$$f = \left(\frac{2}{10} + \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{s_m}{n_p} = 0,36 \text{ mm/giro}$$

Dove s_m = spessore della mola = 20 mm

Per quanto riguarda la profondità di passata, nel nostro caso, dovremo asportare uno spessore di circa 0,05 mm di materiale, per questo prevediamo di fare circa quattro passate di finitura 0,01 e due da 0,005 per ottenere la tolleranza richiesta dal progetto.

► Per calcolare la potenza assorbita (W):

$$W = 0,155 \cdot k \cdot \sqrt{V \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{v}{30}}$$

Con

V = volume del materiale rimosso in $\text{cm}^3/\text{min} = 0,3 \text{ cm}^3/\text{min}$

s = spessore della mola a contatto con il pezzo = 20 mm

v = velocità di taglio in m/s = 30 m/s

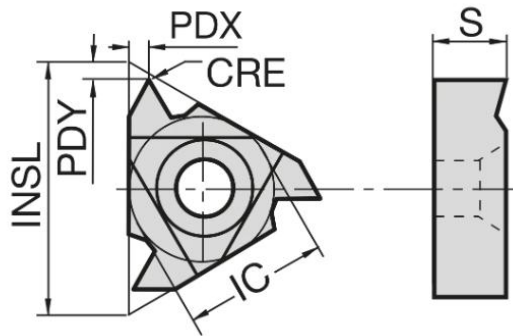
k = costante = 7,5 per rettifiche in tondo per esterni (dal Santochi)

Svolgendo i calcoli otteniamo che $W = 0,17 \text{ kW}$

Utensili per filettatura esterna

Per le filettature esterne (M10 ed M14): abbiamo scelto un utensile di tipo 11ER A60 BCU20T in carburo rivestito.

Specifiche tecniche principali:



Livello 1 di classificazione del materiale

Profondità di passata a_p

Velocità di taglio V_c

Avanzamento massimo consigliato f_{max}

Avanzamento f_n

Forma dell'inserto

Raggio di punta (RE)

Lunghezza effettiva del tagliente (INSL)

Diametro del cerchio inscritto (IC)

Spessore dell'inserto (S)

Angolo di profilo (PNA)

Prezzo di listino (10pz)

P

0.1 - 0.2 mm

50 - 70 m/min

0.05 – 0.2 mm/giro

passo del filetto

ERA

0.05 mm

11 mm

6.35 mm

3 mm

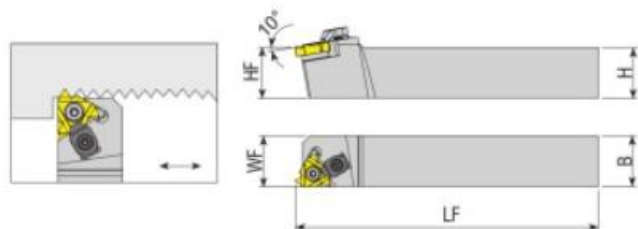
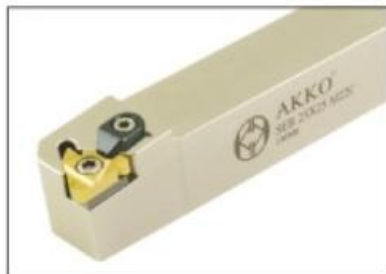
60°

17,30 €

Scelta del portautensile

Scegliamo come portautensile il **SER 1616 H11** di **AKKO**.

Specifiche tecniche principali:



Angolo del tagliente dell'utensile	60°
Angolo di attacco dell'utensile (PSIR)	60°
Sporgenza massima (OHX)	48 mm
Altezza dello stelo (H)	16 mm
Altezza funzionale (HF)	16 mm
Larghezza dello stelo(B)	16 mm
Lunghezza funzionale (LF)	100 mm
Larghezza funzionale(WF)	16 mm
Angolo di spoglia superiore ortogonale (GAMO)	0° - 5°
Angolo di inclinazione (LAMS)	0° - 6°
Prezzo di listino	29,32 €

◆ Parametri di taglio per filettature

Una delle caratteristiche principali del calcolo dei parametri di taglio per le filettature è che l'avanzamento viene preso sempre uguale al passo.

Inoltre, faremo affidamento alla seguente tabella per orientarci sul numero ottimale di passate da eseguire:

NUMERO DI PASSATE INDICATIVE PER FILETTATURE METRICHE ESTERNE E INTERNE															
PASSO mm.	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	1,75	2,0	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
Numero passate	16	16	14	14	14	12	12	10	8	8	6	6	5	4	4

Nel caso della filettatura M14 dobbiamo coprire una profondità totale di 1,08 mm in 8 passate che avranno profondità di valore decrescente fino ad arrivare al valore desiderato, per evitare l'usura dell'utensile e eventuali vibrazioni abbiamo deciso di suddividere le passate in questo modo:

- Passata 1: 0,2 mm
- Passata 2: 0,2 mm
- Passata 3: 0,18 mm
- Passata 4: 0,1 mm
- Passata 5: 0,1 mm
- Passata 6: 0,1 mm
- Passata 7: 0,1 mm
- Passata 8: 0,1 mm

La stessa cosa avverrà per la filettatura M10, nella quale utilizzeremo 5 passate fino a raggiungere una profondità totale di 0,61 mm in questo modo:

- Passata 1: 0,2 mm
- Passata 2: 0,11 mm
- Passata 3: 0,1 mm
- Passata 4: 0,1 mm
- Passata 5: 0,1 mm

Nei seguenti casi prenderemo in analisi la passata maggiore rispettivamente per la filettatura M14 e per quella M10.

Filettatura sup.6

M14

Passo = 2 mm

$D_i = 14 \text{ mm}$

$D_f = 13,6 \text{ mm}$

$h = 0,2 \text{ mm}$

$l = 7 \text{ mm}$

$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$

$RE = 0,05 \text{ mm}$

$n_{min} = 64 \text{ giri/min}$

$n = 64 \text{ giri/min}$

$K_s = 0,197$

$a = 2 \text{ mm/giro}$

$a_p = 0,2 \text{ mm}$

$n_p = 1$

$V_{t_{min}} = 2,81 \text{ m/min}$

$V_t = 2,81 \text{ m/min}$

$S = 0,4 \text{ mm}^2$

$R_m = 810 \text{ N/mm}^2$

$\beta = 60^\circ$

$P_s = 767,21 \text{ N/mm}^2$

$P_t = 918,98 \text{ N/mm}^2$

$F_t = 367,59 \text{ N}$

$W_t = 0,017 \text{ Kw}$

Filettatura sup.7

M10

Passo = 1 mm

$D_i = 10 \text{ mm}$

$D_f = 9,6 \text{ mm}$

$h = 0,2 \text{ mm}$

$l = 12 \text{ mm}$

$R = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$

$RE = 0,05 \text{ mm}$

$n_{min} = 64 \text{ giri/min}$

$n = 64 \text{ giri/min}$

$K_s = 0,197$

$a = 1 \text{ mm/giro}$

$a_p = 0,2 \text{ mm}$

$n_p = 1$

$V_{t_{min}} = 2,01 \text{ m/min}$

$V_t = 2,01 \text{ m/min}$

$S = 0,2 \text{ mm}^2$

$R_m = 810 \text{ N/mm}^2$

$\beta = 60^\circ$

$P_s = 767,21 \text{ N/mm}^2$

$P_t = 1053,44 \text{ N/mm}^2$

$F_t = 210,69 \text{ N}$

$W_t = 0,007 \text{ Kw}$

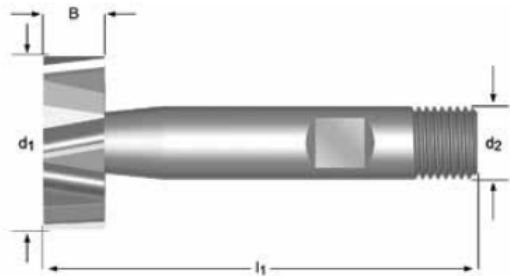
Notiamo anche come in entrambi i casi la realizzazione della profondità di passata più elevata di ciascun processo è stata “coperta” dalla potenza del nostro tornio, per questo possiamo dedurre che lo saranno anche le altre.

Utensili per fresatura

Superficie 8

Per realizzare l'alloggiamento della linguetta Woodruff abbiamo optato per una **fresa a disco Dormer** specifica per chiavette **Woodruff Master 703**.

Specifiche tecniche principali:

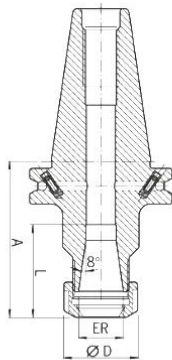
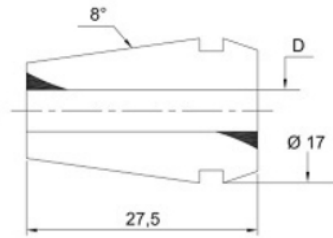


Diametro di taglio (d1)	10,5 mm
Spessore di taglio (B)	2,5 mm
Lunghezza totale utensile (l1)	50 mm
Diametro utensile lato macchina (d2)	6 mm
Angolo di tagliente	5° - 10°
Raggio di punta	5 mm
Numero di taglienti	8
Prezzo di listino	51,96 €

Scelta del portautensile

Per questa fresa e per quella utilizzata per la realizzazione della superficie 10 abbiamo deciso di utilizzare la **pinza ER16 DIN 6499/B LTF** con Ø6 mm con alta precisione dimensionale per collegare le frese alla fresatrice insieme al relativo **mandrino**.

Il prezzo di listino ammonta a 3,79 € per la pinza e 55,72 € per il mandrino, per un totale di **59,51 €**.

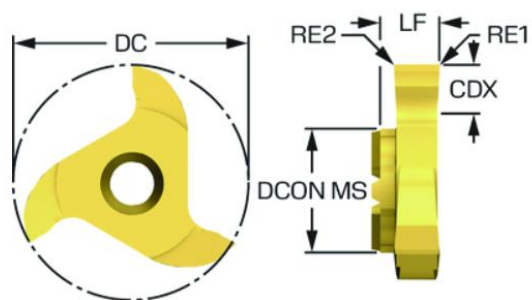


Descrizione	Norma: Haimer	Valore: metric/ inch
Taille		ER16
Ambito di serraggio		0,5-10,0
Dimensione A	A	70 mm
Versione in lunghezza A		corto
Interfaccia		SK40

Superficie 9

Per realizzare l'alloggiamento della linguetta identificata come superficie 9 abbiamo optato per la testina **327R12-22 25002-GM 1025** insieme all'adattatore a stelo cilindrico **327-16A24SC-12** della **Sandvik Coromant**.

Specifiche tecniche principali:



Diametro di taglio (DC)

21,7 mm

Larghezza di taglio (CW)

2,5 mm

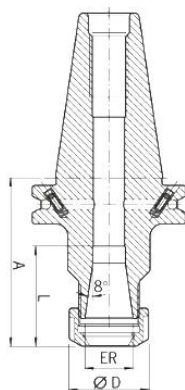
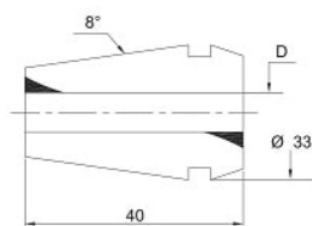
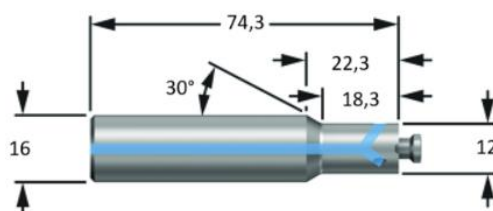
Profondità di taglio massima (CDX)

4,5 mm

Diametro utensile lato macchina (DCONMS)	12 mm
Angolo di tagliente	1,5°
Raggio di punta	0,2 mm
Numero di taglienti	3
Prezzo di listino	59,80 €

Scelta del portautensile

Per questa testina è stato necessario valutare l'acquisto di uno **stelo** compatibile del diametro di 12 mm (191 €) e una **pinza ER32** (6,31 €) con il relativo **mandrino** (67,98 €) per poterne assicurare il corretto montaggio sulla macchina. La spesa complessiva è di **265,29 €**.

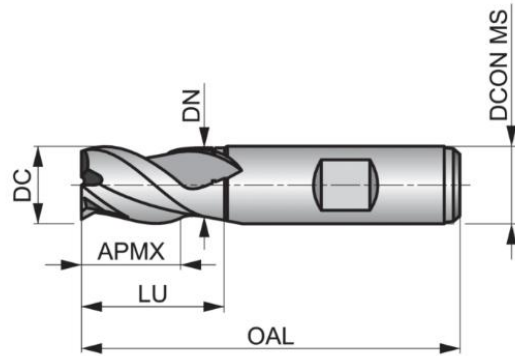


Descrizione	Norma: Haimer	Valore: metric/ inch
Taille		ER32
Ambito di serraggio		1.5-20,0
Dimensione A	A	70 mm
Versione in lunghezza A		corto
Lunghezza	L	64 mm
Interfaccia		SK40

Superficie 10

Per realizzare la cava nella quale andrà ad alloggiare il dentino della ghiera di sicurezza (sup.10) abbiamo optato per una fresa a candela **Dormer C3674.0**.

Specifiche tecniche principali:



Diametro di taglio (DC)	4 mm
Profondità di taglio massima (APMX)	7 mm
Diametro del collo (DN)	4 mm
Lunghezza del collo (LU)	7,8 mm
Lunghezza totale utensile (OAL)	51 mm
Diametro di attacco (DCON MS)	6 mm
Angolo di tagliente	15°
Numero di taglienti periferici	3
Prezzo di listino	38,50 €

Scelta del portautensile

Come visto sopra, per questa fresa utilizzeremo la stessa pinza e lo stesso mandrino visti per la superficie 8.

◆ Parametri di taglio per fresature

Per la fresatura teniamo conto anche dei seguenti parametri di taglio:

- Diametro della fresa: **D**
- Numero di denti della fresa: **z**
- Avanzamento per tavolo: **v_f**
- Avanzamento per dente: $f_z = \frac{v_f}{n \cdot z}$
- Avanzamento per giro: **a** = z · f_z
- Velocità di avanzamento: **V_a** = n · z · f_z
- Profondità di passata: **p**
- Sezione del truciolo: **S** = p · f_z
- Componente tangenziale: **T** = P_t · z · S
- Potenza: **W** = (T · V_t) / 60000

Fresatura sup.8

D = 10,5 mm	z = 8	K_s = 0,197
v_f = 345,6 mm/min	f_z = 0,06 mm/dente	a = 0,48 mm/giro
p = 2 mm	n_p = 1	
V_{tmax} = 57,73 m/min	n_{max} = 1750 giri/min	n = 720 giri/min
V_t = 23,75 m/min	V_a = 345,6 mm/min	S = 0,12 mm ²
R_m = 750 N/mm ²	β = 90°	P_s = 970,54 N/mm ²
P_t = 1473,72 N/mm ²	T = 1414,77 N	W = 0,56 Kw

Fresatura sup.9

$D = 21,7 \text{ mm}$	$z = 3$	$K_s = 0,197$
$v_f = 105 \text{ mm/min}$	$f_z = 0,04 \text{ mm/dente}$	$a = 0,12 \text{ mm/giro}$
$p = 4 \text{ mm}$	$n_p = 1$	
$V_{t_{\max}} = 119,3 \text{ m/min}$	$n_{\max} = 1750 \text{ giri/min}$	$n = 875 \text{ giri/min}$
$V_t = 59,65 \text{ m/min}$	$V_a = 105 \text{ mm/min}$	$S = 0,16 \text{ mm}^2$
$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$	$\beta = 90^\circ$	$P_s = 970,54 \text{ N/mm}^2$
$P_t = 1473,72 \text{ N/mm}^2$	$T = 707,38 \text{ N}$	$W = 0,70 \text{ Kw}$

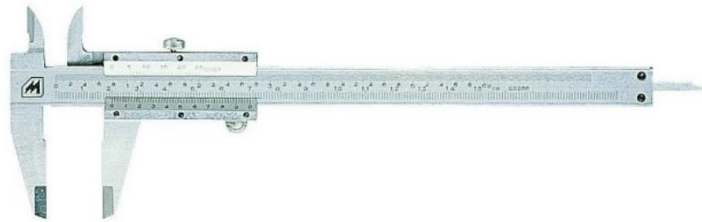
Fresatura sup.10

$D = 4 \text{ mm}$	$z = 3$	$K_s = 0,197$
$v_f = 105 \text{ mm/min}$	$f_z = 0,04 \text{ mm/dente}$	$a = 0,12 \text{ mm/giro}$
$p = 3 \text{ mm}$	$n_p = 1$	
$V_{t_{\max}} = 21,99 \text{ m/min}$	$n_{\max} = 1750 \text{ giri/min}$	$n = 875 \text{ giri/min}$
$V_t = 11 \text{ m/min}$	$V_a = 105 \text{ mm/min}$	$S = 0,12 \text{ mm}^2$
$R_m = 750 \text{ N/mm}^2$	$\beta = 90^\circ$	$P_s = 970,54 \text{ N/mm}^2$
$P_t = 1473,72 \text{ N/mm}^2$	$T = 530,54 \text{ N}$	$W = 0,097 \text{ Kw}$

Strumenti per il controllo dimensionale

Calibro ventesimale

Per la maggior parte delle misurazioni utilizzeremo il calibro ventesimale (in grado quindi di leggere fino a $1/20$ di mm - cioè 0.05 mm). Con questo strumento andremo a misurare lunghezze, spessori e diametri.



Micrometro - *per esterni*

Per il controllo di superfici con tolleranze (nel nostro caso h6) decidiamo di utilizzare un micrometro per esterni da 0,001 mm con un campo di misura da 0-25 mm in modo da poter misurare tutti e tre i diametri con tolleranza ($\varnothing 16,5$ h6, $\varnothing 18$ h6, $\varnothing 19$ h6).



Micrometro - *per interni*

Per la misurazione di profondità e larghezza delle tre cave, non facilmente misurabili con il calibro, abbiamo optato per un micrometro per interni a becchi sottili (campo di misura 2-6 mm) per una maggiore precisione.



Rugosimetro

Strumento che utilizzeremo per il controllo della rugosità superficiale dei pezzi lavorati. Permette la misurazione dei parametri Ra (rugosità media aritmetica) e Rz (valore medio altezza massima del profilo) nel range compreso tra 0,5 μm e 3,2 μm , garantendo il rispetto delle specifiche di finitura previste per le superfici funzionali dell'albero.



Tamponi filettati (Passa/Non passa)

Si tratta di strumenti di controllo specifici per la verifica delle filettature. Verranno utilizzati per controllare la conformità delle viti M14 (sup.6) e M10 (sup.7), assicurando la corretta esecuzione della filettatura secondo norma ISO e tolleranza h6.



Tempi di produzione

Fase 10 - Taglio Barra

Per la produzione annuale è previsto il taglio di 250 barre in acciaio C45 del diametro di 26 mm e della lunghezza di 936 mm, da suddividere ciascuna in 8 spezzoni da 117 mm mediante sega a nastro Metallkraft MBS 105. Ogni barra richiede 7 tagli, per un totale di 1750 tagli annui.

Assumendo una velocità di avanzamento media di **40 mm/min**, in linea con le condizioni operative consigliate per questo materiale e diametro, il tempo di taglio effettivo per ciascun taglio è di circa **39 secondi**.

Considerando anche i tempi passivi di movimentazione e serraggio stimati in 15 secondi per taglio, il tempo complessivo risulta pari a circa **6,3 minuti** per barra. Su 250 barre, il tempo totale annuo di segatura è quindi di circa **26 ore** di lavoro effettivo.

Fase 20 - Tornitura

Per calcolare i **tempi attivi** (t_a) in tornitura abbiamo utilizzato l'equazione:

$$t_a = \frac{L + e}{a \cdot n}$$

Dove:

t_a = tempi attivi

L = lunghezza lavorata (per la sfacciatura questa lunghezza equivale alla metà del diametro del pezzo all'inizio della lavorazione, ovvero h)

e = distanza supplementare che l'utensile percorre oltre alla lunghezza effettiva da lavorare (extra corsa), noi considereremo un valore standard di 2 mm.

a = avanzamento

n = numero di giri

Per quanto riguarda tempi i **tempi passivi** abbiamo fatto riferimento alle seguenti tabelle:

Tempi standard per lavorazioni al tornio parallelo [min]	
Azione	Tempo
Allontanare contropunta	0,20
Avviare/fermare la macchina	0,05
Controllare una dimensione con calibro o micrometro	0,20
Disimpegnare l'utensile	0,10
Eseguire centratura	0,10
Eseguire gola interna/esterna	0,40
Eseguire smusso	0,10
Innestare/disinnestare l'avanzamento automatico	0,05
Montare e regolare il morsetto autocentrante sul mandrino	5
Montare il pezzo tra le punte con brida	1,20
Montare il pezzo tra mandrino e contropunta	1,20
Montare la torretta girevole	0,50
Montare nel mandrino la punta menabrida	1
Montare o smontare il mandrino nella contropunta	0,40
Montare o smontare la contropunta	0,30
Montare o smontare punta per centri (o elicoidale) nel mandrino	0,35
Montare o smontare utensile su torretta girevole	0,70
Posizionare e bloccare il pezzo nel morsetto autocentrante	0,90
Posizionare l'utensile	0,20
Regolare l'utensile	0,50
Ruotare la torretta portautensili	0,20
Selezionare l'avanzamento automatico	0,18
Selezionare n. di giri	0,18
Smontare il pezzo dall'autocentrante	0,40

Attrezzature	Azione	Tempo standard (min)
Piattaforma autocentrante	Montare	0,6
	Smontare	0,6
	Regolare apertura	0,1

Utensili-Attrezzi	Azione	Tempo standard (min)
Portautensili	Montare e smontare su torretta a serraggio rapido	0,1
Utensile	Montare e smontare su torretta o portautensili	0,5
Portapunta a forare	Montare e smontare su controtesta	0,4
Portautensile	Regolare altezza su torretta a serraggio rapido	0,2
Utensile	Regolare altezza su torretta	0,5
Carrello portautensili	Orientare normalmente	0,5
	Orientare con precisione	2,7

Fase 20, sottofase A:

Sgrossatura sup.2

Tempi attivi

L = 117 mm
e = 2 mm
a = 0,07 mm/giro
n = 940 giri/min
 $n_p = 1$

Tempo singola passata = 1,81 min

Totale tempi attivi = **1,81 min**

Tempi passivi

- Montare la punta nel mandrino: 0,5
- Montare la contropunta nella controtesta: 0,3
- Montare il pezzo tra mandrino e contropunta: 1,20
- Montare il portautensile su torretta: 0,1
- Montare l'utensile sulla torretta portautensile: 0,5
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **3,56 min**

Sfacciatura sup.13

Tempi attivi

L = h = 12,5 mm
e = 2 mm
a = 0,1 mm/giro
n = 790 giri/min
 $n_p = 10$

Tempo singola passata = 0,18 min

Totale tempi attivi = **1,8 min**

Tempi passivi

- Smontare il pezzo tra mandrino e contropunta: 1,20
- Smontare la punta dal mandrino: 0,5
- Smontare la contropunta dalla controtesta: 0,3
- Montare e regolare il morsetto autocentrante sul mandrino: 5
- Posizionare e bloccare il pezzo nel morsetto autocentrante: 0,9

- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **8,86 min**

Sgrossatura sup.1

Tempi attivi

L = 56 mm
e = 2 mm
a = 0,056 mm/giro
n = 1300 giri/min
 $n_p = 1$

Tempo singola passata = 0,8 min

Totale tempi attivi = **0,8 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile con utensile precedente: 0,1
- Montare portautensile nuovo: 0,1
- Montare utensile nuovo: 0,5
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,66 min**

Rettifica sup.1

Tempi attivi

L = 56 mm
e = 2 mm
a = 0,36 mm/giro
n = 47,75 giri/min
 $n_p = 1$

Tempo singola passata = 3,37 min

Totale tempi attivi = **3,37 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile con utensile precedente: 0,1
- Montare rettificatrice da tornio: 10

- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **11,26 min**

Filettatura sup.6

Tempi attivi

L = 7 mm
e = 2 mm
a = 2 mm/giro
n = 64 giri/min
p = 8

Tempo singola passata = 0,07 min

Totale tempi attivi = **0,56 min**

Tempi passivi

- Smontare rettificatrice precedente: 10
- Montare portautensile nuovo: 0,1
- Montare utensile nuovo: 0,5
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **11,76 min**

Smussatura sup.11

Tempi attivi

L = 1 mm
e = 2 mm
a = 0,33 mm/giro
n = 1300 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,007 min

Totale tempi attivi = **0,007 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1
- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1

- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,16 min**

Fase 20, sottofase B:

Sfacciatatura sup.14

Tempi attivi

L = h = 5 mm
e = 2 mm
a = 0,1 mm/giro
n = 940 giri/min
n_p = 4

Tempo singola passata = 0,07 min

Totale tempi attivi = **0,28 min**

Tempi passivi

- Smontare pezzo dall'autocentrante: 0,4
- Posizionare e bloccare il pezzo nel morsetto autocentrante dopo averlo ruotato: 0,9
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **2,26 min**

Sgrossatura sup.3

Tempi attivi

L = 11,8 mm
e = 2 mm
a = 0,056 mm/giro
n = 1300 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,19 min

Totale tempi attivi = **0,19 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1

- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,16 min**

Sgrossatura sup.4

Tempi attivi

L = 25 mm
e = 2 mm
a = 0,04 mm/giro
n = 1300 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,52 min

Totale tempi attivi = **0,52 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1
- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,16 min**

Sgrossatura sup.5

Tempi attivi

L = 12 mm
e = 2 mm
a = 0,143 mm/giro
n = 790 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,12 min

Totale tempi attivi = **0,12 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1

- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,16 min**

Finitura sup.3

Tempi attivi

L = 12 mm
e = 2 mm
a = 0,143 mm/giro
n = 790 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,12 min

Totale tempi attivi = **0,12 min**

Tempi passivi

- Smontare utensile precedente: 0,5
- Smontare portautensile precedente: 0,1
- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,66 min**

Finitura sup.3

Tempi attivi

L = 12 mm
e = 2 mm
a = 0,04 mm/giro
n = 1300 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,27 min

Totale tempi attivi = **0,27 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1

- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **1,36 min**

Finitura sup.4

Tempi attivi

L = 25 mm
e = 2 mm
a = 0,04 mm/giro
n = 1300 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,52 min

Totale tempi attivi = **0,52 min**

Tempi passivi

- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllare dimensioni con calibro: 0,2

Totale tempi passivi = **1,16 min**

Filettatura sup.7

Tempi attivi

L = 12 mm
e = 2 mm
a = 1 mm/giro
n = 64 giri/min
n_p = 5

Tempo singola passata = 0,22 min

Totale tempi attivi = **1,1 min**

Tempi passivi

- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1
- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5

- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **1,36 min**

Smussatura sup.12

Tempi attivi

L = 1 mm
e = 2 mm
a = 0,1 mm/giro
n = 940 giri/min
n_p = 1

Tempo singola passata = 0,032 min

Totale tempi attivi = **0,032 min**

Tempi passivi

- Smontare utensile precedente: 0,5
- Smontare portautensile precedente: 0,1
- Montare portautensile nuovo con utensile: 0,1
- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

Totale tempi passivi = **1,66 min**

Finitura sup.15

Tempi attivi

L = h = 3 mm
e = 2 mm
a = 0,04 mm/giro
n = 940 giri/min
n_p = 5

Tempo singola passata = 0,13 min

Totale tempi attivi = **0,65 min**

Tempi passivi

- Regolare altezza torretta: 0,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Selezionare l'avanzamento per giro: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05

- Smontare utensile: 0,5
- Smontare portautensile precedente con utensile: 0,1
- Controllare dimensioni con calibro: 0,2

Totale tempi passivi = **1,76 min**

Facendo una somma quindi dei tempi attivi e dei tempi passivi per la sola tornitura otteniamo quindi che:

$TA_{tot} = 12,15 \text{ min}$

$TP_{tot} = 52,96 \text{ min}$

Tempo totale realizzazione di un singolo pezzo al tornio = **65,11 min**

Fase 30 - Fresatura

Per calcolare i **tempi attivi** (t_a) in fresatura abbiamo utilizzato l'equazione

$$t_a = \frac{L + e}{V_a}$$

Dove:

t_a = tempi attivi

L = lunghezza lavorata (per la sfacciatura questa lunghezza equivale alla metà del diametro del pezzo all'inizio della lavorazione e quindi h)

e = distanza supplementare che l'utensile percorre oltre alla lunghezza effettiva da lavorare (extra corsa), noi considereremo un valore standard di 2 mm

V_a = Velocità di avanzamento

Per quanto riguarda i tempi di preparazione passivi, invece, abbiamo utilizzato la seguente tabella:

Tempi standard per lavorazioni alla fresatrice [min]	
Azione	Tempo
Allineare morsa	1,5
Avviare/fermare la macchina	0,05
Controllare dimensione con calibro o con micrometro	0,2
Innestare/disinnestare l'avanzamento automatico	0,05
Montare albero portafresa su mandrino della fresatrice orizzontale	6
Montare fresa a codolo e punte a forare su mandrino	2
Montare fresa su albero portafresa (asse orizzontale)	5
Montare fresa su portafresa con attacco a cono (asse verticale)	3
Montare il pezzo nella morsa	1
Montare portafresa con attacco a cono su mandrino della fresatrice	2
Montare utensile su portautensile	1,2
Montare/smontare contropunta del divisore	2
Montare/smontare divisore	4
Montare/smontare il pezzo con contropunta	1,2
Montare/smontare il pezzo sull'autocentrante del divisore	0,9
Montare/smontare il pezzo sulla tavola con staffe	3
Montare/smontare morsa	3
Montare/smontare punta con menabrida sul divisore	4
Posizionare il pezzo rispetto all'utensile:	
- senza sfioramento (o disimpegnare utensile)	0,2
- con uno sfioramento	1
- con due sfioramenti	1,5
- con tre sfioramenti	2
Posizionare una staffa con un tirante	2
Ruotare la testa verticale della fresatrice	2
Ruotare tavola portapezzo	5
Selezionare l'avanzamento automatico	0,18
Selezionare numero di giri	0,18
Smontare il pezzo dalla morsa	0,4

Fase 30, sottofase A:

Alloggiamento sup.10

Tempi attivi

$L = 8 \text{ mm}$
 $e = 2 \text{ mm}$
 $V_a = 105 \text{ mm/min}$
 $n_p = 1$

Tempo singola passata = 0,095 min

Totale tempi attivi = **0,095 min**

Tempi passivi

- Allineare morsa: 1,5
- Montare il pezzo nella morsa: 1
- Montare porta fresa sul mandrino della fresatrice: 2
- Montare utensile sul portautensile: 1,2
- Posizionare il pezzo rispetto all'utensile (2 sfioramenti): 1,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **7,68 min**

Fase 30, sottofase B:

Alloggiamento Woodruff sup.8

Tempi attivi

$L = p = 2 \text{ mm}$
 $e = 2 \text{ mm}$
 $V_a = 345,6 \text{ mm/min}$
 $n_p = 1$

Tempo singola passata = 0,011 min

Totale tempi attivi = **0,011 min**

Tempi passivi

- Ruotare il pezzo dalla morsa: 1
- Allineamento morsa: 1,5
- Montare utensile su portautensile: 1,2
- Posizionare il pezzo rispetto all'utensile (due sfioramenti): 1,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **5,68 min**

Fase 30, sottofase C:

Alloggiamento linguetta sup.9

Tempi attivi

$L = 21 \text{ mm}$
 $e = 2 \text{ mm}$
 $V_a = 105 \text{ mm/min}$
 $n_p = 1$

Tempo singola passata = 0,2 min

Totale tempi attivi = **0,2 min**

Tempi passivi

- Allineamento morsa: 1,5
- Montare porta fresa con attacco a cono su mandrino della fresatrice: 2
- Montare fresa su porta fresa con attacco a cono: 3
- Montare utensile su portautensile: 1,2
- Posizionare il pezzo rispetto all'utensile (due sfioramenti): 1,5
- Selezionare il numero di giri: 0,18
- Avviare la macchina: 0,05
- Arrestare la macchina: 0,05
- Controllo dimensionale: 0,2

Totale tempi passivi = **9,68 min**

Facendo una somma quindi dei tempi attivi e dei tempi passivi per la sola fresatura otteniamo:

$TA_{\text{tot}} = 0,3 \text{ min}$

$TP_{\text{tot}} = 23,04 \text{ min}$

Tempo totale realizzazione di un pezzo in fresatrice = **23,34 min**

Considerazioni finali sui tempi:

Possiamo riassumere i conti fatti fino ad ora nella seguente tabella in minuti:

	FASE 10	FASE 20	FASE 30	TOTALE
TEMPI ATTIVI [MIN]	4,55	12,15	0,3	16,88
TEMPI PASSIVI [MIN]	1,75	52,96	23,04	76,59
TOTALE PER 2000 PEZZI	1575	130220	46680	178475

Dall'analisi dei tempi di lavorazione emerge che la produzione di 2000 pezzi non sarebbe realizzabile in tempi utili se affidata a un solo operatore: anche lavorando 8 ore al giorno per un anno intero, la capacità produttiva risulterebbe insufficiente.

Per ottimizzare il processo, è stata quindi prevista una distribuzione del lavoro su due operatori, organizzando le attività su 280 giorni lavorativi:

- un operatore impegnato 8 ore al tornio,
- l'altro dedicato a 3 ore tra fresatrice e sega a nastro.

Con questa configurazione, i tempi risultano compatibili con l'obiettivo produttivo annuo, consentendo il completamento della lavorazione dei 2000 pezzi entro il periodo stabilito.

Costi di produzione

Costo del materiale

Il materiale utilizzato è acciaio C45 in barre di lunghezza 936 mm e diametro 26 mm. Il fornitore propone un prezzo pari a 17,09 €/m, che corrisponde a circa **15,99 € per barra**. Considerando l'acquisto di 250 barre, il costo complessivo del materiale ammonta a circa **3998 € all'anno**.

Costo dei macchinari

L'investimento in macchinari necessari per la produzione comprende:

- Tornio Fervi T940/230V al costo di 8459,99 €
- Rettificatrice da tornio RAPID Original HP2 al costo di circa 800,00 €
- Fresatrice HBM BF 60 DRO al costo di 6249,98 €
- Morsa HBM Tipo 10 al costo di 649,99 €

Il costo complessivo dei macchinari e delle attrezzature principali ammonta quindi a circa **16 159,96 €**.

Costo degli utensili

Per quanto riguarda i costi degli utensili e delle attrezzature ausiliarie, è opportuno distinguere tra strumenti "fissi", che rappresentano un acquisto una tantum e vengono ammortizzati nel tempo, e strumenti "consumabili", che invece vanno sostituiti periodicamente in base all'usura.

Poiché le macchine utilizzate sono manuali e vengono generalmente impostate a velocità pari a circa metà o due terzi di quelle teoriche, la durata degli utensili tende ad aumentare; per questo motivo si è adottato un coefficiente di correzione prudenziale che porta a stimare un prolungamento della vita utensile di circa il 50%.

- **Utensili fissi (una tantum):**

SCLCR 1616H09 (portautensile): 104,00 €

PCLNR 1616H12-M (portautensile): 95,80 €

SER 1616 H11 (portautensile): 29,32 €

Mandrino + pinza (ER16): 59,51€

327R12-22 25002-GM con adattatore: 59,80 €

Mandrino + pinza (ER32): 265,29 €

Totale utensili fissi: 613,72 €

- **Utensili consumabili (da sostituire più volte all'anno):**

Inseriti CCMT 06 02 04-WF 1125 (circa 7 pezzi/anno): 81,90 €

Inseriti CNMG 120408-MM (circa 4 pezzi/anno): 55,80 €

Mola Norton 32A46IVS (circa 3 pezzi/anno): 132,30 €

Inseriti 11ER A60 BCU20T (circa 3 pezzi/anno): 51,90 €

Fresa a disco Woodruff Master 703 (circa 2 pezzi/anno): 103,92 €

Punte Dormer C3674.0 (circa 3 pezzi/anno): 115,50 €

Totale utensili consumabili (per coprire la produzione di 2000 pezzi): 541,32 €

Complessivamente, il costo annuo stimato per utensili e supporti è pari a **1.155,04 €**, con un'incidenza media di circa **0,58 €** per pezzo prodotto.

Costo della manodopera

La manodopera necessaria per la produzione degli alberi in acciaio C45 è stata stimata considerando una retribuzione base di **15 €/h**.

Il processo produttivo richiede complessivamente 2.975 h di lavoro annue, da suddividere tra 2 operatori.

- Totale ore di lavoro: 2.975 h/anno
- Costo orario unitario: 15 €/h
- Costo complessivo manodopera: **44.625 €**

Ne consegue che il costo medio della manodopera per singolo pezzo si attesta intorno ai **22 €** per unità prodotta.

Costo dell'energia

Per stimare i costi dell'energia elettrica associati alla produzione annua di 2000 pezzi, abbiamo considerato i principali macchinari utilizzati e il loro consumo medio durante le lavorazioni. La

valutazione si basa sui dati di potenza dei motori, sui tempi di utilizzo per singolo pezzo e su una stima realistica di funzionamento, tenendo conto che le macchine manuali lavorano a velocità inferiori rispetto al massimo supportato dai parametri nominali. I dati principali sono i seguenti:

- **Sega a nastro:** potenza massima 1,01 kW; stimando un consumo medio effettivo durante il taglio pari a circa 0,345 kWh per pezzo.
- **Tornio:** sommando i consumi dei diversi componenti durante le fasi di lavorazione, si ottiene un consumo totale stimato di 0,021 kWh per pezzo.
- **Fresatrice:** considerando i vari assorbimenti dei motori principali, il consumo stimato per pezzo è di circa 0,003 kWh.

Il consumo energetico totale per la realizzazione di un singolo pezzo ammonta quindi a **0,368 kWh** che, moltiplicando per la produzione annua di 2000 pezzi, ci fornisce un consumo totale annuo di circa **737 kW**.

Considerando un costo medio dell'energia elettrica pari a 0,2 €/kWh (tariffa indicativa per l'anno 2024-2025), il costo annuo stimato dell'energia elettrica per la produzione di 2000 pezzi risulta circa **147,36 €**.

Questa stima consente di inserire il costo energetico nel calcolo complessivo dei costi di produzione, evidenziando come, nonostante il numero elevato di pezzi prodotti, l'incidenza dell'energia sul costo totale risulti relativamente contenuta rispetto a materiali, macchinari e manodopera.

Spesa totale

Considerando i costi annuali effettivi necessari per la produzione di 2000 pezzi, possiamo ottenere il totale dalla somma dei seguenti fattori:

Materiale: 3.998 €

Utensili consumabili: 541,32 €

Manodopera: 43.980 €

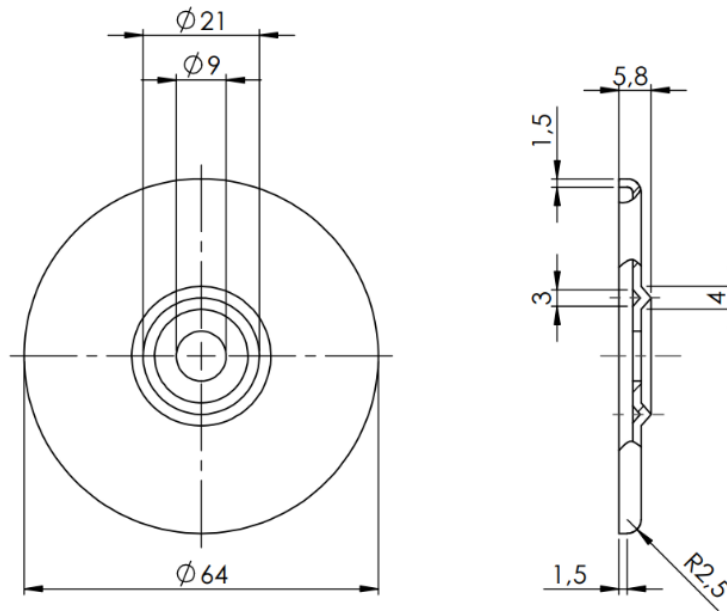
Energia elettrica: 147,36 €

Totale costi annuali stimati: circa 48.666,68 €

Dividendo il totale per il numero di pezzi prodotti, otteniamo che il costo medio per singolo albero è di circa **24,33 €** per pezzo.

PROCESSO DI DEFORMAZIONE PLASTICA

Disco contenitore membrana

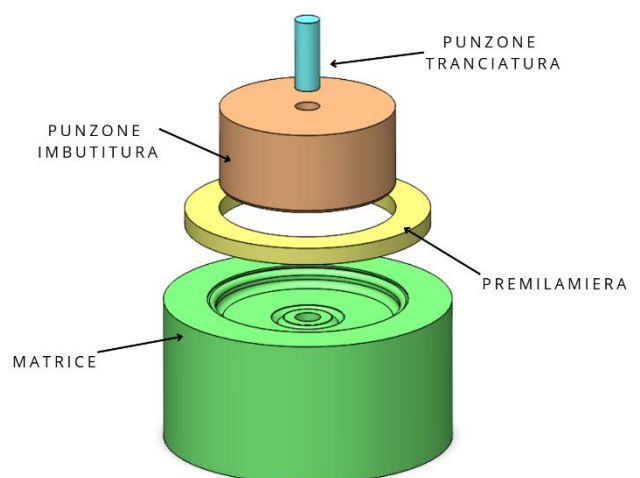


Per la realizzazione del disco contenitore membrana (componente n. 18) abbiamo scelto di adottare un processo di deformazione plastica, in quanto particolarmente adatto alla geometria del pezzo, che presenta simmetria assiale e quindi facilmente ottenibile tramite operazioni di imbutitura e tranciatura.

La lavorazione è stata suddivisa in due fasi distinte:

- la prima prevede la formatura della corona centrale mediante uno stampo dedicato;
- la seconda comprende l'imbutitura dei bordi laterali e la successiva tranciatura finale, eseguite entrambe con un secondo ed unico stampo.

Questa suddivisione consente un miglior controllo della deformazione del materiale e una maggiore precisione geometrica del pezzo finito.



Materiale della lamiera di partenza

Nonostante da cartiglio il disco porta membrana sia in C35, abbiamo constatato che questo materiale sia difficilmente lavorabile per imbutitura. Abbiamo quindi optato per un materiale che permetta un'imbutitura più facile, con meno rischio di rotture o formazione di cricche. In particolare, abbiamo scelto il S315MC di cui vi è maggiore disponibilità sul mercato sotto forma di lamiera (rispetto al C35) e che presenta una buona resistenza meccanica e anche una discreta resistenza a fatica.

Si suppone che la scelta della lamiera, compiuta a monte del processo, sia tale da permettere di trascurare le ondulazioni causate dall'anisotropia planare della lamiera (si cerca un materiale che abbia r alto e Δr basso) e pertanto non si prevedono operazioni di rifilatura.

Proprietà meccaniche S315MC:

S315MC	Snervamento min. [MPa]	Resistenza di trazione [Mpa]	Allungamento % min. percentuale (per $s < 3$ mm)
	315	390-510	20

Per poter partire con il processo di imbutitura abbiamo bisogno del lamierino di partenza: questa lavorazione viene affidata ad un reparto dell'azienda che non è di nostra pertinenza, ma che fornirci un preformato di lamiera con geometria e dimensioni adeguate, ricavato da lamiera di spessore 1,5 mm mediante un processo di taglio idoneo, quale tranciatura con stampo o taglio laser, a seconda della disponibilità e delle esigenze produttive.

Calcolo della dimensione del lamierino di partenza

Per il calcolo del lamierino di partenza abbiamo assunto che l'assottigliamento della lamiera durante l'imbutitura sia trascurabile, mantenendo quindi uno spessore costante pari a 1,5 mm. Considerando che il pezzo è assialsimmetrico, il suo sviluppo piano sarà un disco: è stato dunque sufficiente calcolarne il diametro equivalente.

A questo scopo, si è approssimata la superficie del disco di partenza alla somma delle superfici esterne del pezzo finito (3881,97 mm²), ottenute dal software CAD, trascurando sia l'incremento di superficie dovuto alla deformazione, sia le variazioni legate alla curvatura locale del pezzo.

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{3881,97 \text{ mm}^2}{\pi}} = 70,30 \text{ mm}$$

Da questo calcolo si evince che il diametro della lamiera di partenza sarà pari a 70,30 mm mentre il suo spessore sarà di 1,5 mm.

Imbutitura

Parametri di imbutitura

Premilamiera

Nel nostro caso abbiamo ritenuto opportuno prevedere l'inserimento di un premilamiera, nonostante la differenza tra il diametro del disco iniziale (70,3 mm) e quello del pezzo finito (64 mm) possa apparire contenuta. Infatti, senza un'adeguata gestione di questo flusso, in particolare, nella zona del bordo esterno (che rappresenta una delle aree più critiche per il mantenimento della forma) si rischia la formazione di grinze e pieghe, a causa dell'eccesso di materiale che tende ad accumularsi e deformarsi irregolarmente. L'adozione del premilamiera, in entrambi gli stampi, ci consente quindi un controllo efficace del materiale tra matrice e punzone.

La nostra scelta viene confermata in quanto l'uso del premilamiera viene fortemente consigliato quando:

$$D - d_p > 5s$$

Dove

- D è il diametro della lamiera iniziale
- D_p è il diametro del punzone
- s è lo spessore dell'imbutito

Nel nostro caso avremo che

$$9,7 \text{ mm} > 7,5 \text{ mm}$$

Con

- $D = 70,3 \text{ mm}$
- $D_p = 60,6 \text{ mm}$
- $s = 1,5 \text{ mm}$

Va specificato che il calcolo del diametro del punzone terrà conto delle considerazioni fatte successivamente in merito al gioco tra matrice e punzone.

Valutiamo ora se è possibile realizzare l'imbutitura in una sola operazione, sia nel caso del primo stampo, che per il secondo.

Per verificarlo, però, dobbiamo calcolare il rapporto tra diametro della lamiera e del imbutito sia nella prima lavorazione che nella seconda.

Per il primo stampo, $D = 70,3 \text{ mm}$, e d_1 (diametro dell'imbutito) lo abbiamo calcolato tramite l'utilizzo di SolidWorks e la seguente formula:

$$d_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{3802,85 \text{ mm}^2}{\pi}} = 69,58 \text{ mm}$$

Dunque, $\frac{d_1}{D} = 0,99$.

Per il secondo stampo, invece, $D_1 = 69,58 \text{ mm}$, mentre $d = 64 \text{ mm}$, ovvero il diametro finale del nostro componente.

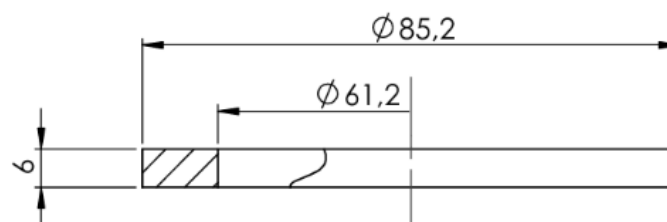
Perciò $\frac{d}{D_1} = 0,92$.

In entrambi i casi, considerando che lo spessore della lamiera (s) è di $1,5 \text{ mm}$ ($s < 2 \text{ mm}$) e che il nostro m (coefficiente che dipende dal massimo rapporto di imbutitura) è inferiore rispetto a m_1 ($m_1 = 0,58$) consigliato per la prima operazione nel caso di acciai ($m = 0,4 < 0,58$) allora, per realizzare il nostro disco sarà necessario un solo passaggio di imbutitura per stampo.

Materiale	I ^a operazione m_1	Operazioni successive m_n
Acciaio		
$s < 2 \text{ mm}$	0,58	0,85
$s \geq 2 \text{ mm}$	0,58	0,85
Ottone		
$s < 2 \text{ mm}$	0,50	0,75
$s \geq 2 \text{ mm}$	0,55	0,75
Leghe di alluminio		
$s < 2 \text{ mm}$	0,55	0,80
$s \geq 2 \text{ mm}$	0,55	0,85
Acciaio inox	0,65	0,80

d/D	m
0,55	1
0,6	0,86
0,65	0,72
0,70	0,60
0,75	0,50
0,80	0,40

Disegno quotato del prelamiera per stampo 2:



Pressione del premilamiera

Entrambi i premilamiera dovranno bloccare la lamiera senza deformarla, per questo abbiamo calcolato le loro pressioni, che dovranno trovarsi all'interno di un range di 1,0 – 2,5 N/mm².

- Per la prima imbutitura, la pressione minima del premilamiera è:

$$p_{min} = R_m \frac{(\beta-1)^2 + 0,005 \cdot \frac{d_1}{s}}{400}$$

Dove

- R_m è il carico di rottura a trazione del materiale, che nel nostro caso vale 450 N/mm² (considerando un valore medio);
- β è il rapporto di imbutitura pari a 0,99;
- d_1 è il diametro dell'imbutito, ovvero 69,58 mm
- s è lo spessore della lamiera, nel nostro caso 1,5 mm

Ovvero:

$$p_{min} = 0,26 \text{ MPa}$$

- Per la seconda imbutitura, la pressione minima del premilamiera è:

$$p_{min} = R_m \frac{(\beta-1)^2 + 0,005 \cdot \frac{d}{s}}{400}$$

Dove

- R_m è il carico di rottura a trazione del materiale, che nel nostro caso vale 450 N/mm² (considerando un valore medio);
- β è il rapporto di imbutitura pari a 0,92;
- d è il diametro dell'imbutito, ovvero 64 mm
- s è lo spessore della lamiera, nel nostro caso 1,5 mm

Ovvero:

$$p_{min} = 0,25 \text{ MPa}$$

In entrambi i casi ci troviamo ben al di sotto del valore consigliato, per questo motivo abbiamo pensato di impostare una pressione per ciascuna premilamiera di circa 2,5 Mpa (come consigliato dai valori standard in caso di acciai).

Gioco tra matrice e punzone

Nel primo stampo non ha senso parlare di gioco tra matrice e punzone in quanto la lamiera non si andrà a frapponere verticalmente tra gli stessi.

Nel secondo stampo invece, per facilitare il flusso del materiale tra punzone e matrice durante la deformazione (evitando grippaggi o attriti eccessivi che potrebbero bloccare la lamiera o danneggiare lo stampo), abbiamo calcolato il gioco tra matrice e punzone nel seguente modo:

$$g = s + K \cdot \sqrt{10s} = 1,77 \text{ mm}$$

Con $s = 1,5 \text{ mm}$ e $K = 0,07$ (costante nel caso di acciai).

Forza di imbutitura

Calcoliamo ora la forza di imbutitura necessaria per il primo stampo e quella per il secondo:

$$P_1 = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot m \cdot R_m = \pi \cdot 69,58 \text{ mm} \cdot 1,5 \text{ mm} \cdot 0,4 \cdot 450 \text{ MPa} = 59,02 \text{ kN}$$

$$P_2 = \pi \cdot d \cdot s \cdot m \cdot R_m = \pi \cdot 64 \text{ mm} \cdot 1,5 \text{ mm} \cdot 0,4 \cdot 450 \text{ MPa} = 54,29 \text{ kN}$$

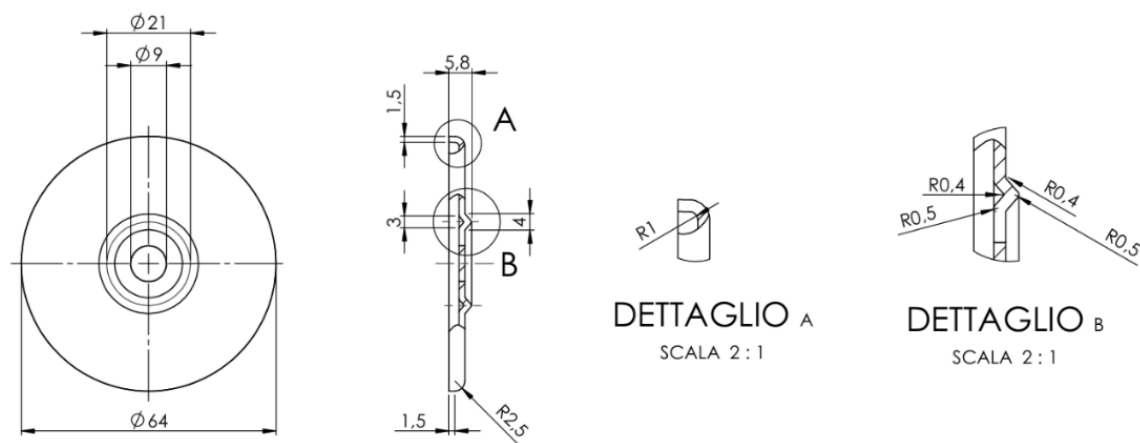
Dove

- d è il diametro dell'imbutito
- s è lo spessore della lamiera
- m è il coefficiente di imbutitura
- R_m è il carico di rottura a trazione del materiale

Modifica del modello: raggi di raccordo e sforni

Il disegno iniziale del nostro componente presentava diversi spigoli vivi in prossimità della corona circolare centrale, per questo motivo abbiamo scelto di inserire raccordi di 0,4 mm negli angoli "all'interno delle pieghe" e 0,5 mm negli angoli "all'esterno delle pieghe" e sforni (1° sulla matrice e 2° sul punzone) per facilitare il processo di imbutitura e migliorare la qualità del pezzo finito.

Gli sforni sono necessari a evitare l'incastro del pezzo tra punzone e matrice: quello maggiore, sul punzone, agevola il distacco dove il rischio di adesione è più alto (in quanto la lamiera tende ad "abbracciarlo"), mentre quello sulla matrice assicura comunque una buona estrazione. Questa combinazione riduce anche l'usura degli utensili e rende il processo più stabile e ripetibile.



Raggio di arrotondamento del punzone

Nella presente analisi ci concentriamo principalmente sulla fase finale di imbutitura (stampo 2), che definisce la geometria perimetrale del pezzo, mentre la prima fase è considerata parte integrante del ciclo complessivo.

Stampo 2

Nel caso del punzone del secondo stampo avremo, secondo la formula generale, che:

$$5s < r_p < 0,3d$$

Otterremmo quindi un raggio di raccordo consigliato di $r_p > 7,5$ mm. Questo valore però nel nostro caso è troppo alto in quanto la geometria del pezzo richiede raggi di raccordo molto più ridotti, in particolare, per la piega in corrispondenza del bordo laterale e della corona centrale. Per rispettare tali vincoli dimensionali, abbiamo scelto di adottare un raggio di raccordo del punzone pari a 1 mm, pur consapevoli che tale valore risulta inferiore ai limiti generalmente consigliati per l'imbutitura.

La scelta è stata ritenuta accettabile in virtù di alcune condizioni favorevoli:

- la ridotta profondità dell'imbutitura (2,5 mm);
- la buona formabilità dell'acciaio S315MC;
- la presenza di lubrificazione;
- l'assenza di tratti rettilinei significativi dopo il raccordo, che consente una deformazione più progressiva;
- l'adozione di una velocità di discesa del punzone moderata, in particolare nella fase iniziale della corsa, per favorire un flusso controllato del materiale ed evitare concentrazioni di sforzo nei punti critici.

- Nel caso della matrice del secondo stampo, abbiamo calcolato il raggio di arrotondamento in modo da permettere alla lamiera di piegarsi senza tagliarla e di limitare gli sforzi e l'attrito.

Il calcolo è stato fatto secondo la seguente formula:

$$r_m = K \cdot \sqrt{(D_1 - d) \cdot s} = 2,31 \text{ mm}$$

con K che vale circa 0,8-0,9.

Essendo questo un valore medio abbiamo deciso di approssimare il raccordo a 2 mm. Inoltre, andando questo ad interferire con la parte verticale del “bordo”, abbiamo preferito aumentare di 2mm la profondità dell'interno della matrice in modo da ottenere un risultato più preciso.

Lubrificazione

Data la geometria complessa del componente e un'altezza di imbutitura ridotta, è fondamentale la presenza di una lubrificazione efficace per garantire il corretto scorrimento della lamiera tra punzone e matrice.

Si è scelto di utilizzare una miscela lubrificante a base di grafite e olio, adatta alla lavorazione di acciai, in quanto capace di ridurre l'attrito e migliorare la qualità superficiale del pezzo. La grafite, in particolare, è indicata per condizioni gravose come quelle presenti in questa lavorazione, grazie alla sua elevata resistenza termica e alle ottime proprietà lubrificanti.

Espulsore

Per facilitare l'estrazione del pezzo imbutito dalla matrice al termine della lavorazione, è stato previsto un sistema di espulsione integrato nella stessa. In particolare, si è scelto di adottare un espulsore passante composto da due spintori non centrali, posizionati simmetricamente rispetto all'asse centrale della circonferenza dell'imbutito.

Tale soluzione si rende necessaria per diversi motivi:

- La geometria del pezzo, caratterizzata da pareti verticali e spessore ridotto (5,8 mm complessivi), rende difficoltosa un'espulsione spontanea per effetto del solo ritorno elastico.
- La lubrificazione abbondante utilizzata durante la fase di imbutitura, se da un lato riduce gli attriti e favorisce la formatura, dall'altro può aumentare l'adesione del pezzo alla matrice, rendendo l'estrazione meno agevole.
- La presenza di un foro centrale, ottenuto mediante tranciatura al termine del processo, impedisce l'inserimento di un espulsore in posizione centrale. Per questo motivo, l'espulsione viene affidata a due spintori laterali che agiscono in modo puntiforme, distribuendo la forza in modo efficace senza deformare il pezzo.

Tranciatura

Come detto precedentemente, per realizzare il foro centrale, una volta eseguita la seconda imbutitura, il punzone da tranciatura scenderà per tagliare il pezzo.

Dimensionamento matrice e punzone

Il diametro della matrice sarà lo stesso del diametro del foro e quindi $d = 9 \text{ mm}$ (come indicato da disegno). Tra questa e il punzone per tranciatura dovremo poi prevedere un piccolo gioco che verrà calcolato tramite la seguente formula in caso di $s < 3 \text{ mm}$:

$$g = 0,007 \cdot s \cdot \sigma_t^{0,5} = 0,2 \text{ mm}$$

con

- resistenza specifica a taglio $\sigma_t \simeq 4/5 R_m \simeq 360 \text{ Mpa}$;
- spessore $s = 1,5 \text{ mm}$

Il diametro del punzone dovrà quindi essere ridotto di $2g$ ($0,4 \text{ mm}$).

Forza di tranciatura

Calcoliamo ora la forza necessaria per effettuare la tranciatura:

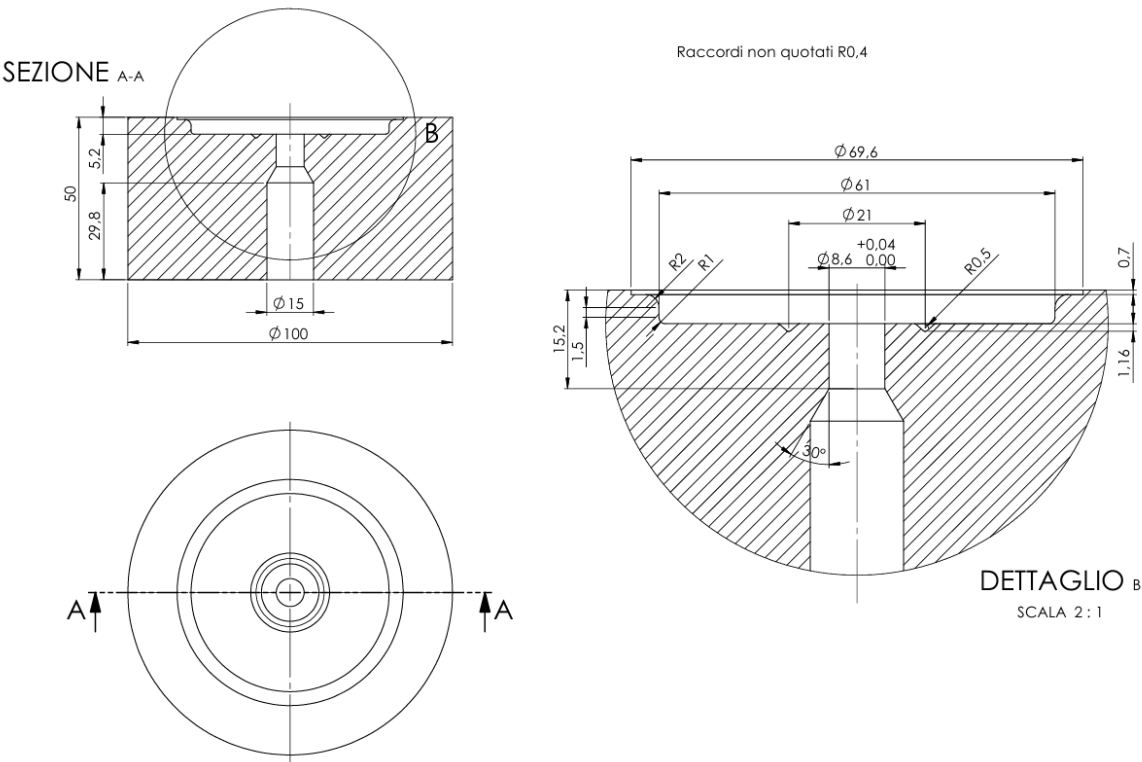
$$P_{\max} = l \cdot s \cdot \sigma_t = 15,27 \text{ kN}$$

Con

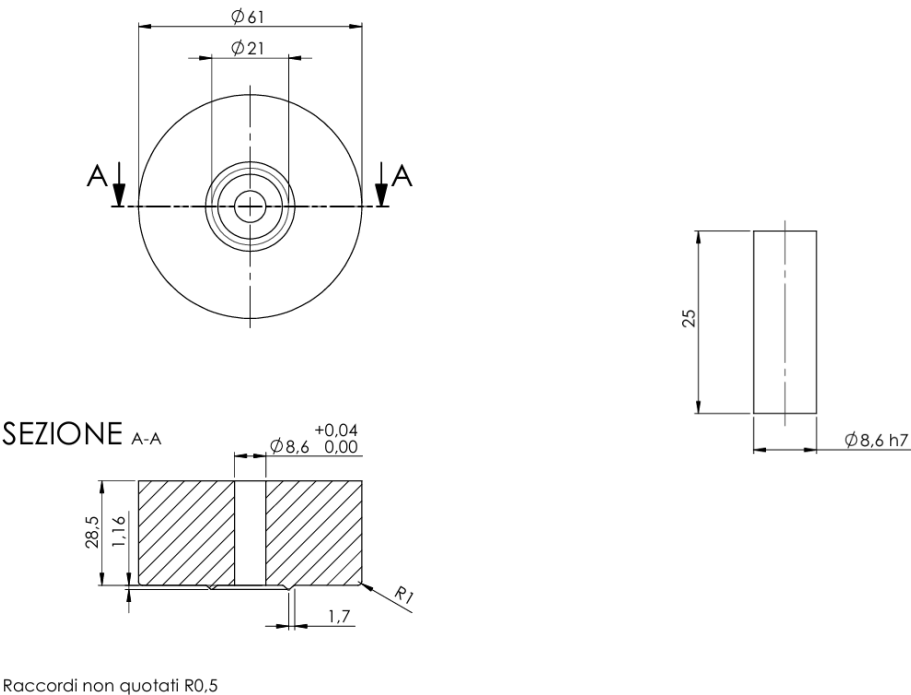
- $l = \pi \cdot 9$ (diametro del foro) = $28,27 \text{ mm}$: perimetro del profilo tranciato

Per tener conto dei fenomeni di attrito e di usura, maggioriamo questo valore del 20% ottenendo quindi una forza $P_{\max} = 18,32 \text{ kN}$

Vista in pianta della matrice:



Vista in pianta del punzone da imbutitura (sinistra) e del punzone da tranciatura (destra):



Scelta del macchinario

Per la realizzazione di imbutitura e tranciatura abbiamo scelto la pressa AIDA NC1-Series, una pressa meccanica monocolonna a singolo effetto, progettata per lavorazioni di stampaggio a freddo.

Tra le sue caratteristiche principali si trovano:

- **Capacità nominale di stampaggio:** 35 tonnellate (350kN)
- **Corsa del pistone:** 70mm
- **Velocità di lavoro:** 90 – 150 colpi/min
- **Altezza dello stampo:** 200 mm
- **Area del banco:** 730x310 mm
- **Altezza operativa:** 800 mm
- **Costo:** €15000



Questa macchina è ideale per lotti produttivi medio-piccoli, con tempi di cambio stampo contenuti, rendendola adatta a produzioni flessibili come quella richiesta nel nostro processo.

Tempi di produzione

Per velocizzare i tempi di produzione giornalieri abbiamo pensato di sostituire la matrice e il punzone ogni 10 pezzi, così da minimizzare i tempi di cambio stampo e produrre dunque 10 pezzi al giorno:

Fase	Tempo per pezzo	Totale 10 pezzi/giorno
Preparazione macchina (setup iniziale)	-	15 min (stimato)
Posizionamento pezzo	3 sec	30 sec
Accensione e spegnimento macchina	-	3 min (stimato)
Imbutitura 1 (stampo 1)	5 sec	50 sec
Cambio stampo 1 → stampo 2	-	15 min
Imbutitura 2 + tranciatura	8 sec	80 sec
Totale tempo macchina attiva	-	2 min 40 sec
Totale tempo operatore	-	33 min

Tempo totale (10 pezzi) = 33 min + 2 min 40 s + 80 s + 50 s + 30 s = 38 min 20 s

Tempo totale (2000 pezzi) = 127 h 47 min

Tempo totale (1 pezzo) = 3 min 50 s

Costi di produzione

Per la realizzazione di punzoni, matrice e premilamiera utilizzati sia nel caso di tranciatura che di imbutitura abbiamo scelto acciai alto legati al cromo temprabili per lavorazioni a freddo grazie alla loro alta durezza, resistenza all'usura e elevata resistenza a fatica.

Trattandosi di stampi realizzati su misura ipotizziamo un costo totale di circa 8000 € per gli utensili che andrà ad ammortizzarsi nel corso degli anni.

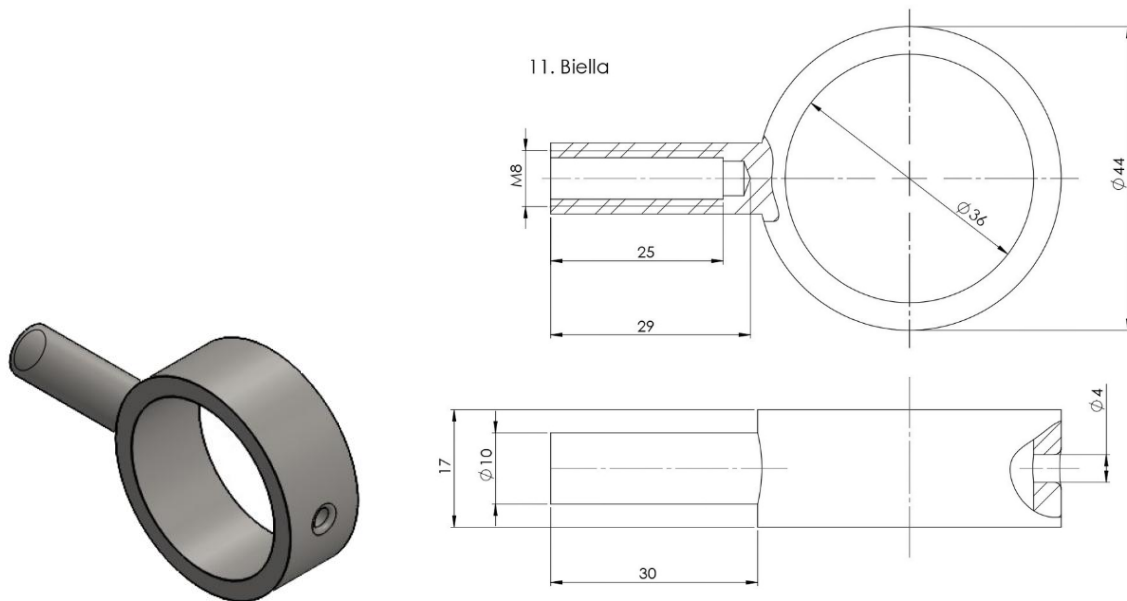
- Costo macchina: 15000 €
- Costo materiale circa: 170 €
- Costo manodopera: 15 €/h

Costo totale (2000 pezzi) = 15000 + 170 + 8000 + 1920 = 2590 €

Costo singolo pezzo = 12,55 €

PROCESSO DI SALDATURA

Biella



Per la realizzazione della biella del nostro complessivo è stato scelto di impiegare un processo di saldatura. Il componente è realizzato in acciaio AISI 1020 e la lavorazione prevede l'unione, tramite giunto saldato, di due cilindri disposti perpendicolarmente tra loro.

Scelta del tipo di saldatura

Considerando che la biella è sottoposta a carichi ciclici, il giunto deve garantire un'elevata resistenza meccanica nel tempo, anche sotto sollecitazioni a fatica. Per questo motivo sono state escluse la saldobrasatura e la brasatura, optando invece per una saldatura autogena.

Dato il posizionamento del componente bisogna tenere in considerazione che esso può entrare in contatto con olio; per evitare la formazione di porosità e cricche, è necessario realizzare un cordone pulito, chiuso e continuo. Infine, la presenza di una filettatura interna cieca vicina alla zona da saldare ha richiesto ulteriori accorgimenti:

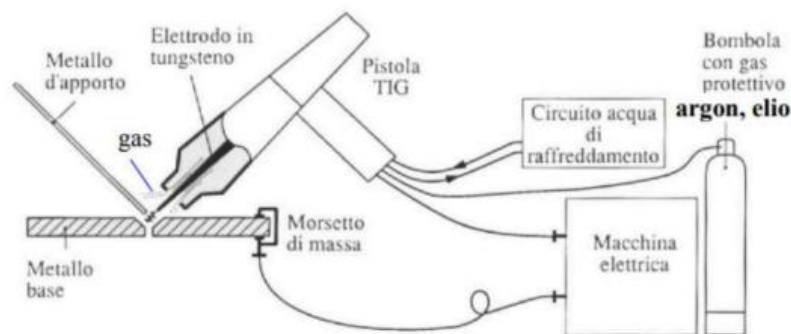
- È stata scelta una saldatura TIG pulsata a bassa energia, che consente un controllo preciso dell'apporto termico e riduce l'estensione della zona termicamente alterata (ZTA).
- È stato progettato un inserto pieno in lega di rame (ad esempio CuCrZr), materiale ad alta conducibilità termica che dissipa il calore, protegge il profilo del filetto e presenta un coefficiente di dilatazione termica inferiore a quello dell'acciaio alle temperature in gioco.



L'inserto, sagomato come maschio filettato M8 e di lunghezza pari al foro, viene inserito insieme a una pasta antigrippaggio per facilitarne la rimozione dopo la saldatura.

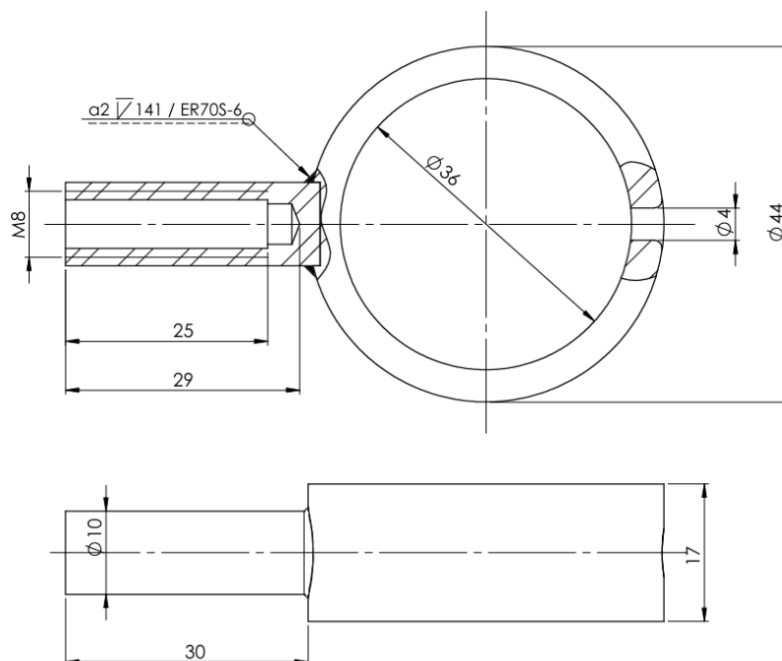
Un singolo inserto di questo tipo può essere riutilizzato per la saldatura di circa 100–300 bielle. La produzione annuale di 2000 pezzi richiederà quindi circa 10–15 inserti, realizzati preventivamente al tornio.

In sintesi, per la realizzazione della biella è stata scelta una saldatura autogena per fusione ad arco elettrico (TIG) a bassa energia pulsata, con materiale d'apporto ER70S-6, compatibile con l'acciaio AISI 1020, e con l'utilizzo di un inserto in rame e pasta antigrippaggio per proteggere la filettatura interna cieca durante la lavorazione.



Disegno tecnico aggiornato

Per maggiore chiarezza e completezza, nelle viste sottostanti è riportata la sezione della biella con il cordone di saldatura, rispetto al disegno iniziale che mostrava il pezzo senza giunzione.



Scelta della saldatrice

Per la saldatura TIG delle bielle in acciaio AISI 1020 è stata scelta la saldatrice **IPOTOOLS TIG 200P AC/DC**, che offre tutte le funzionalità necessarie per assicurare precisione e controllo termico.

La funzione TIG pulsata della macchina consente di regolare parametri come corrente di picco, corrente base, frequenza e duty cycle, ottimizzando l'apporto termico. Questo permette di realizzare cordoni sottili (circa 2 mm) evitando deformazioni del pezzo o danni alla filettatura M8 presente nel pezzo.

Inoltre, la possibilità di memorizzare i parametri di saldatura rende la macchina ideale per produzioni ripetitive, come i lotti da 2000 pezzi all'anno, garantendo costanza e qualità del giunto saldato.

Prezzo di listino 499,99 €.



Dati tecnici della saldatrice

> Tipo: Saldatrice inverter TIG ACDCTIG-200P	> Tempo di postflusso del gas: 0-25 s
> Processo: TIG AC/DC, MMA	> Frequenza AC: 20-250 Hz
> Pannello touch: funzione pulsazioni, preflusso gas, postflusso gas, frequenza AC, ecc.	> Effetto pulente: 10-90%
> Impostazioni: continuo digitale	> Discesa: 0-10 sec
> Alimentazione: 1x AC230V 50/60Hz	> Accensione HF: Sì
> Tensione a circuito aperto: 80V	> Ventilatore
> Campo di regolazione TIG DC: 5-200 A TIG AC: 20-200 A MMA: 20-160 A	> Diametro elettrodo raccomandato: MMA 1,0-4,0mm / TIG 1,0-3,2mm
> Campo di regolazione AC TIG: 200A/35% / 160A/60% / 130A/100%	> Classe di isolamento: F
> Campo di regolazione MMA: 160A/35% / 130A/60% / 100A/100%	> Grado di protezione della custodia: IP21S
> Connettore: 2 poli (senza opzione pedale)	> Dimensioni (LxPxA): 430x185x320mm
> Frequenza impulsi: 1Hz o 50Hz	> Peso: 19 kg
> Tempo di preflusso del gas: 0-10 s	> Peso netto: 13,5kg

Materiale d'apporto e ulteriori utensili

Per la saldatura TIG delle bielle in AISI 1020 sono stati scelti i seguenti materiali e accessori.

- **Elettrodo in tungsteno WL20 (Lantanio 2%) da 1,6 mm:**

Questo elettrodo garantisce un arco preciso e concentrato, ideale per saldature in corrente continua (DC) su acciai dolci come l'AISI 1020, soprattutto su spessori sottili (circa 2 mm). È stabile anche a basse correnti ed è particolarmente versatile per il nostro impiego.

CRITERI DI SCELTA						
Tipo	Metallo		Stabilità dell'arco	Innesco	Durata	Resistenza termica
	Leghe leggere	Acciaio Acciaio Inox				
WP Tungsteno puro	*		**	*	*	*
WC 20 Cerio 2%	*	*	**	*	**	**
WL 10 Lantanio 1%	*	*	**	**	**	**
WL 15 Lantanio 1,5%	*	*	**	**	**	***
WL 20 Lantanio 2%	*	*	***	***	***	***
WS 20 Terre rare 0,8%	*	*	***	***	***	***
WZr 20 Zirconio 0,8%	*		***	**	**	***

*** Eccellente - **Buono - * Medio

- **Gas di protezione: Argon 99,9%**

Per proteggere il bagno di fusione si utilizza Argon ad alta purezza ($\geq 99,9\%$), un gas inerte che crea una “bolla” protettiva attorno all'arco. L'argon puro permette un arco stabile, evitando ossidazioni e porosità nel giunto. Il flusso di gas è stato regolato a circa 8 L/min per garantire una schermatura continua e uniforme durante tutta la saldatura.

- **Materiale d'apporto: barra ER70S-6 da 1,6 mm**

È stata scelta una barra di materiale d'apporto ER70S-6 con diametro 1,6 mm, che offre un buon equilibrio tra facilità di inserimento e controllo del bagno di fusione. Nel nostro caso, il cordone di saldatura è un cordone d'angolo a sezione triangolare piatta con gamba “a” di 2 mm.



Acciaio al carbonio ER 70s-6 tig, 50 unità

Riferimento 70 Marca WELDRACINGPARTS

Confezione da 50 bacchette ER 70s-6 TIG in acciaio al carbonio da 1000 mm, perfette per saldare ST52, tubi Ducal, roll bar e componenti motorsport. Ottima fluidità, penetrazione profonda e risultati puliti anche senza preparazione accurata. La scelta pro per progetti ad alte prestazioni.

Diametro della barra di saldatura

1 mm

1.6mm

2 mm

16,84 tasse incl. (Escluse le aree non-UE)

Quantità

1

^

v

 **Aggiungi al carrello**

Parametri di saldatura

Per la saldatura degli acciai al carbonio si preferisce l'utilizzo della corrente continua a polarità diretta (DC). In questa configurazione, gli elettroni fluiscono dall'elettrodo al pezzo, concentrando l'energia sul metallo base, il che garantisce una penetrazione profonda, un arco stabile e una migliore protezione dell'elettrodo.

In modalità DC pulsata, la corrente oscilla tra un valore di picco, compreso tra 50 e 70 A (sufficiente per fondere il metallo), e un valore di base, intorno a 20–30 A, che mantiene il bagno di fusione senza aumentare ulteriormente la penetrazione. La frequenza della pulsazione è bassa, circa 1 Hz, mentre il duty cycle (la percentuale di tempo in cui la corrente rimane al valore di picco in ogni ciclo) viene mantenuto tra il 30% e il 50%.

Questa modulazione riduce l'apporto termico, preservando le zone circostanti più sensibili alle alterazioni termiche.

Per ottenere un cordone omogeneo, privo di sovrapposizioni o accumuli eccessivi di materiale, si adotta una velocità di saldatura moderata, bilanciando così qualità e produttività.

Preparazione del metallo

Per garantire una saldatura ottimale dei due cilindri, è necessario preparare accuratamente le superfici di giunzione.

In particolare, essendo l'AISI 1020 un materiale soggetto a ossidazione, è fondamentale che le superfici da saldare siano perfettamente pulite e prive di ruggine, oli, grassi e ossidi.

A tal fine, si consiglia una sgrassatura preliminare con solventi a base alcolica o acetone, seguita da una spazzolatura con spazzole in acciaio inox specifiche per saldatura.

Questa preparazione riduce il rischio di inclusioni, porosità e cricche nella zona fusa, migliorando la qualità del cordone di saldatura e garantendo un'adesione ottimale del materiale d'apporto.

Tempi di produzione

La saldatura di ciascuna biella riguarda un cordone lungo circa 31,4 mm, corrispondente alla circonferenza del cilindro da 10 mm di diametro. Il tempo stimato per eseguire la saldatura su un singolo pezzo è di circa 20 secondi.

A questo si aggiungono le operazioni di preparazione della macchina e del pezzo, che richiedono circa 2 minuti per ciclo.

Considerando una produzione annuale di 2000 bielle, i tempi complessivi si distribuiscono come segue:

- Saldatura: $2000 \times 20 \text{ s} = 11 \text{ h e } 7 \text{ min}$
- Preparazione macchina/pezzo: $2000 \times 2 \text{ min} = 66 \text{ h e } 40 \text{ min}$

In totale, si stimano circa 77 h e 47 min di lavoro operativo per completare l'intera produzione.

Costi di produzione

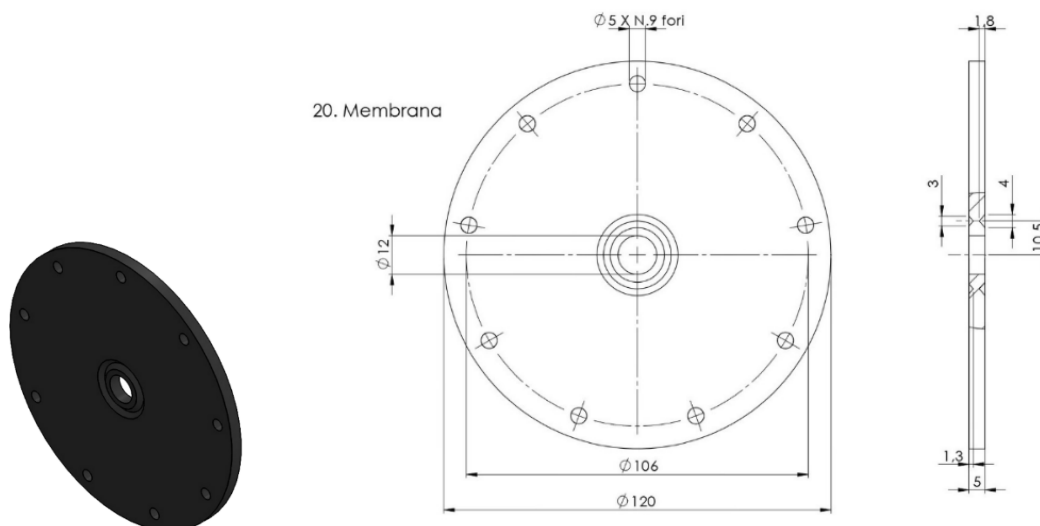
Per quanto riguarda i costi, i principali fattori sono:

- **Saldatrice:** 499,99 € (costo di acquisto);
- **Materiale d'apporto (filo ER70S-6):** circa 62,8 m necessari per 2000 pezzi, con un costo totale di 21,20 € (circa 0,01€ per biella);
- **Gas Argon 99,9%:** 350 € per una bombola da 50 L, sufficiente per coprire la produzione annua;
- **Elettrodi in tungsteno (WL20):** 10,50 € per 7 pezzi;
- **Inserti in lega di rame:** circa 15 € per 15 pezzi (1€ a pezzo)
- **Manodopera:** calcolata a 20 € all'ora per 77,78 h, pari a 1555,60 €

Sommando tutte le voci, il costo totale di produzione annuale è di circa 2452,29 €, con un costo unitario di circa 1,23 € per biella.

PROCESSO DI STAMPA 3D

Membrana



Scelta del processo di stampa

Per realizzare la membrana abbiamo scelto la tecnica di stampa 3D Fusion Deposition Modeling (FDM), che consiste nell'estrusione di un filamento termoplastico fuso, depositato strato dopo strato per creare l'oggetto tridimensionale.

Scelta del materiale

Per la membrana abbiamo utilizzato il TPU, un materiale elastico con buona resistenza meccanica, all'acqua e a oli leggeri. Il TPU scelto ha una durezza Shore di 85-88 A che facilita la stampa mantenendo al contempo una sufficiente elasticità ed è inoltre ideale per le sollecitazioni cicliche a cui è sottoposta la membrana.



Extruder

TPU semi-soft Nero, 1,75 mm (750 grammi)

Filamento TPU flessibile, colore nero

★★★★★ [38 valutazioni](#)

€ 40,99

(€ 54,65 / kg, IVA 22% inclusa - spese di spedizione escluse)

Colore:



Diametro: 1,75 mm

3. PROPERTIES

TEST	METHOD	UNIT	VALUE
Tensile modulus (E-Modulus)	ISO 527-2/5A/500	MPa	42
Ultimate elongation	ISO 527-2/5A/500	%	550
Stress at break	ISO 527-2/5A/500	MPa	9 (50%)
	ISO 527-2/5A/500	MPa	11 (100%)
	ISO 527-2/5A/500	MPa	22 (300%)
VICAT A (VST)	ISO 306	°C	98*
Melting temperature	ISO 3146-C	°C	180-230
Density	ISO 2781	g/cm ³	1.18
Abrasion resistance	ISO 4649-A	mm ³	25
Shore hardness	ISO 868	Shore	85A - 88A
Tear strength	ISO 34-1B	kN/m	135
Glass transition temperature		°C	-34
Compressive strength	DIN 53452	MPa	42
Permeability AIR	DIN 53380	25°/60°C	550/-
Permeability N2	DIN 53380	25°/60°C	380/2200
Permeability O2	DIN 53380	25°/60°C	950/5100
Permeability CO2	DIN 53380	25°/60°C	7300/19900
Permeability N2O	DIN 53380	25°/60°C	13800/-
Poisson-ratio	acc. to Hencky		0.46

*Temperature resistance tested at a minimum wall thickness of 4 mm.

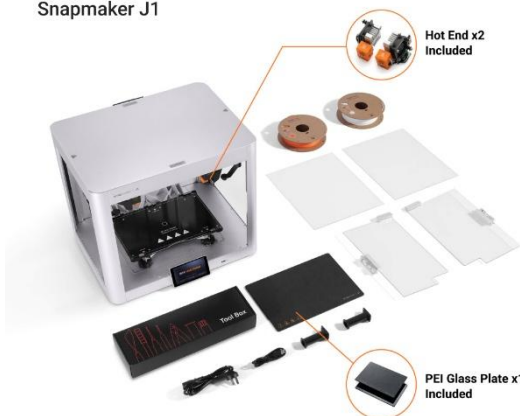
PRINT SETTINGS

Nozzle	220-250°C
Heatbed	50-90°C
Adhesive	not required
Speed	20-100mm/s
Cooling	0-30%
Enclosed Space	no
Hardened Nozzle	no
Max. Volumetric Speed	2,8 mm ³ /s

Recommended settings for printers with a 0.4mm Nozzle.
Max. 50% layerheight. Optimal print settings may vary
between different printers and also depend on environmental
factors.

Scelta della stampante

Snapmaker J1



Per la realizzazione del componente abbiamo utilizzato la stampante Snapmaker **J1s High Speed IDEX 3D Printer**, con volume di stampa di 300 × 200 × 200 mm, adatta alla produzione di componenti funzionali in materiali tecnici come il TPU. La macchina è compatibile con ugelli da 0,4 mm e consente una regolazione precisa di temperatura, velocità e parametri avanzati, caratteristica che la rende ideale per la stampa di parti flessibili come membrane e guarnizioni.

Prezzo di listino: 1.028,30 €

Scelta dei parametri di stampa

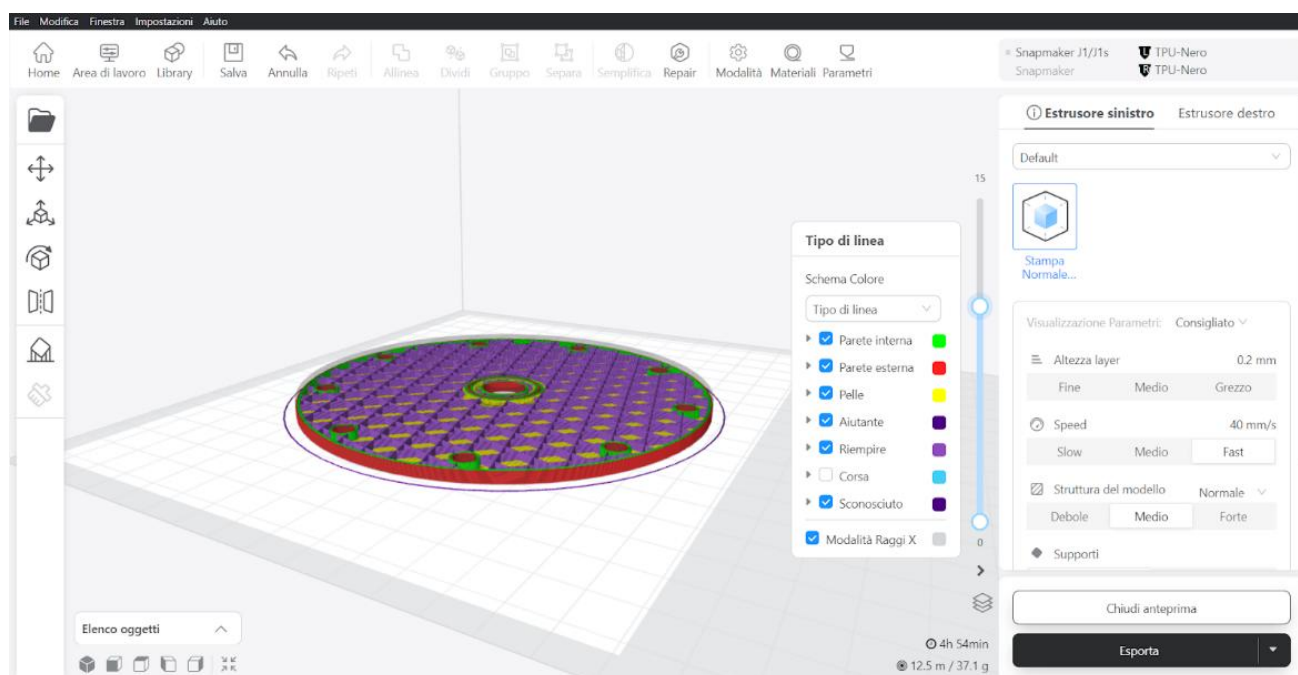
Abbiamo scelto di effettuare la stampa in modalità “copy”, così da produrre due pezzi simultaneamente utilizzando due ugelli da 0,4 mm.

La temperatura di estrusione è stata impostata a 225 °C, con piano di stampa riscaldato a 50 °C per garantire una buona adesione del materiale.

Il controllo della retrazione è stato disattivato per prevenire la formazione di filamenti indesiderati (stringing), fenomeno tipico del TPU.

La velocità di stampa, pari a 40 mm/s, è stata scelta per ottenere un buon compromesso tra precisione dimensionale e tempi di produzione.

La simulazione e la preparazione del modello di stampa sono state eseguite con il software *Snapmaker Luban 4.15.0*, fornito dal produttore della stampante.



Tempi di produzione

La produzione di una singola membrana richiede, secondo la stima del software *Snapmaker*, 4 h e 54 min. Stampando due pezzi in contemporanea, il tempo per lotto si dimezza, portando la produzione complessiva di 2000 pezzi a 4900 h.

Per ridurre i tempi di produzione, abbiamo previsto l'impiego di quattro stampanti Snapmaker J1, gestite da un unico operatore.

In queste condizioni, la produzione di 2000 pezzi richiede 1225 h di stampa complessive.

Per ogni ciclo di stampa, ai tempi di lavorazione vengono aggiunte le seguenti operazioni manuali:

- Allestimento macchina/accensione/spegnimento: 5 min × 4 stampanti = **20 min**
- Avvio sfalsato delle stampe, per un maggiore controllo: 5 min × 3 avvii = **15 min**
- Rimozione pezzo e pulizia piano: 1 min × 4 stampanti = **4 min**

Il tempo totale *attivo* dell'operatore per un ciclo è quindi: 20 + 15 + 4 = **39 minuti**.

Considerando 250 cicli per produrre 2000 pezzi, il tempo di lavoro attivo complessivo dell'operatore è:

$39 \text{ min} \times 250 \text{ cicli} = 9750 \text{ min} = \mathbf{162,5 \text{ h}}$ (circa 20,3 giorni lavorativi considerando turni da 8 h al giorno).

Costi di produzione

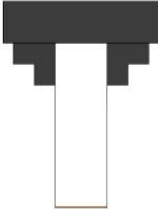
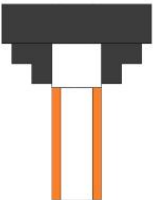
L'investimento iniziale per le quattro stampanti Snapmaker J1 è pari a **4113,20 €**.

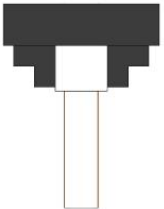
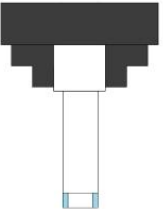
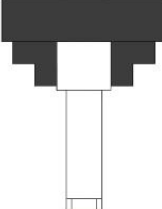
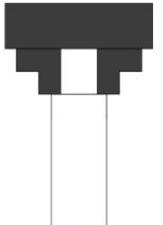
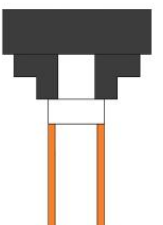
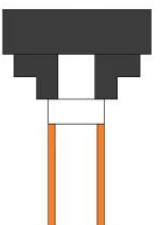
Il materiale impiegato è il TPU con un costo di 54,65 €/kg. Dato che ogni membrana richiede 37,1 g, corrispondenti a circa **2,02 €** di materiale, per 2000 pezzi, il costo complessivo del materiale è quindi **4040 €**.

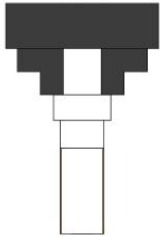
La manodopera è calcolata esclusivamente sul tempo di lavoro attivo dell'operatore, pari a 162,5 h complessive con una tariffa oraria di 15 €, questo genera un costo di **2437,50 €**.

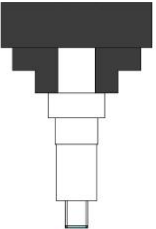
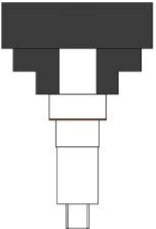
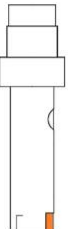
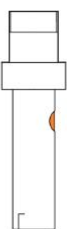
Il costo totale per la produzione di 2000 pezzi risulta pari a 10590,70 €, che corrisponde a un costo unitario di circa **5,30 €** per membrana.

FOGLI DI FASE E DI CICLO

Università di Pisa Ingegneria per il Design Industriale			Ciclo di lavorazione elemento: Albero							
Materie prime		Materiale: C45 Dimensioni: Barra cilindrica trafilata di $\phi = 26 \text{ mm}$					Parametri di taglio			Note
Fase	Sotto fase	Schizzo di lavorazione	Operazione		Utensile	Controllo	N° giri mandrino	N° passate	Avanzamento	
			n°	Descrizione			Velocità di taglio [m/min]	Profondità di passata [mm]	Potenza di taglio [Kw]	
10					Sega a nastro				$W_t = ?$	
20	A		1	-Centraggio del pezzo tra punta e contropunta. -Sgrossatura sup. 2	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		$n = 940$	$\eta_p = 1$	$a = 0,07$	
						$V_t = 76,78$	$a_p = 0,5$	$W_t = 0,087$		
						$n = 790$	$\eta_p = 10$	$a = 0,1$		
			2	-Montaggio del pezzo nel mandrino autocentrante facendolo sporgere il pezzo di 58,5 mm. -Stacciatura sup. 13	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		$V_t = 62,05$	$a_p = 1,25$	$W_t = 0,196$	
			3	-Cambio utensile -Sgrossatura sup. 1	CNMG 120408-MM PCLNR 1616H12-M (portautensile)		$n = 1300$	$\eta_p = 1$	$a = 0,056$	
							$V_t = 102,1$	$a_p = 3,95$	$W_t = 0,51$	

		4	-Montaggio Rettificatrice -Rettifica sup. 1	Norton 32A46IVS RAPID Original HP2		n = 2865	$\eta_p = 1$	a = 0,36	Parametri calcolati per la passata maggiore. In totale vanno fatte 8 passate (con a_p da 0,2; 0,2; 0,18; 0,1; 0,1; 0,1; 0,1; 0,1)
		5	-Cambio utensile -Filettatura sup. 6	11ER A60 BCU20T SER 1616 H11 (portautensile)		n = 64	$\eta_p = 1$	a = 2	
						$V_t = 2,81$	$a_p = 0,2$	$W_t = 0,017$	
		6	-Cambio utensile -Smussatura sup. 11	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 1300	$\eta_p = 1$	a = 0,33	
						$V_t = 67,39$	$a_p = 1$	$W_t = 0,46$	
B		1	-Giro il pezzo -Inserisco il pezzo nel mandrino facendolo sporgere di 60,5 mm. -Stacciatura sup. 14	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 940	$\eta_p = 4$	a = 0,1	
						$V_t = 29,53$	$a_p = 1,25$	$W_t = 0,097$	
						$n = 1300$	$\eta_p = 1$	a = 0,056	
		2	-Cambio utensile -Sgrossatura sup. 3	CNMG 120408-MM PCLNR 1616H12-M (portautensile)		$V_t = 102,1$	$a_p = 4,05$	$W_t = 0,52$	

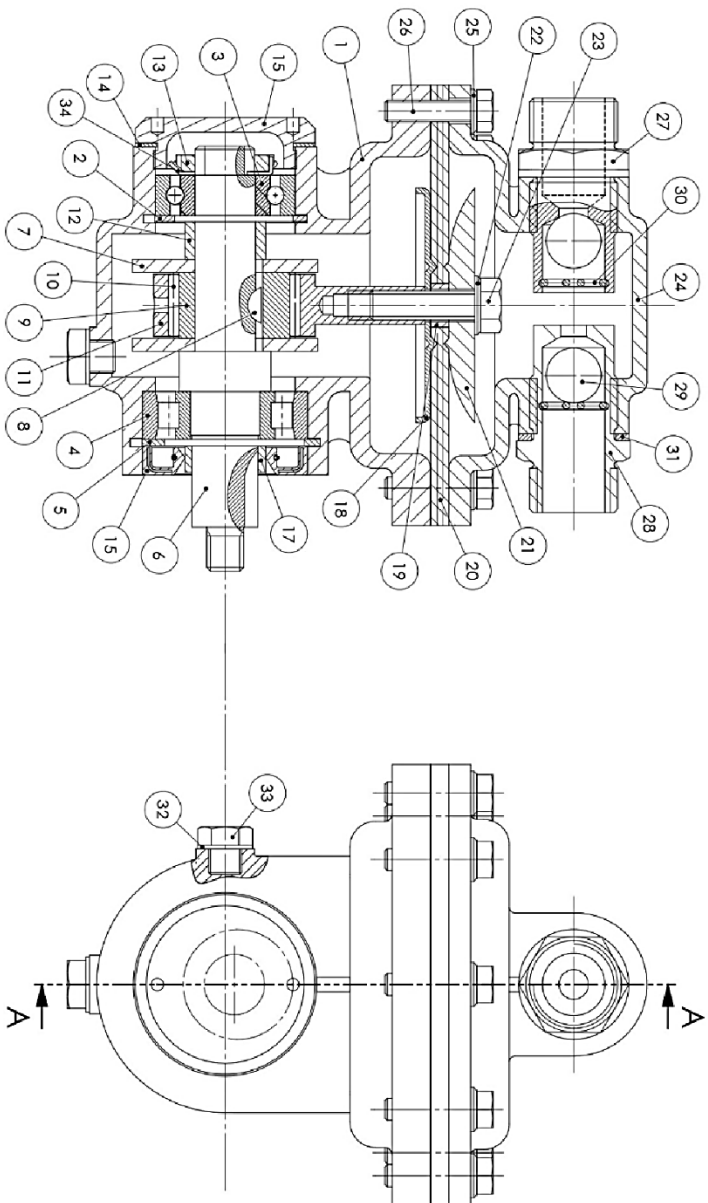
	3	-Cambio utensile -Sgrossatura sup. 4	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 1300 Vt = 80,05	$\eta_p = 1$ $a_p = 1$	a = 0,04 $W_t = 0,101$	Parametri calcolati per la passata maggiore. In totale vanno fatte 5 passate (con a_p da 0,2; 0,11; 0,1; 0,1; 0,1)
	4	-Cambio utensile -Sgrossatura sup. 5	CNMG 120408-MM PCLNR 1616H12-M (portautensile)		n = 790 Vt = 46,16	$\eta_p = 1$ $a_p = 4,3$	a = 0,143 $W_t = 0,52$	
	5	-Cambio utensile -Finitura sup. 3	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 1300 Vt = 80,05	$\eta_p = 1$ $a_p = 0,3$	a = 0,04 $W_t = 0,039$	
	6	Finitura sup. 4	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 1300 Vt = 75,93	$\eta_p = 1$ $a_p = 0,3$	a = 0,04 $W_t = 0,037$	
	7	-Cambio utensile -Filettatura sup. 7	11ER A60 BCU20T SER 1616 H11 (portautensile)		n = 64 Vt = 2,01	$\eta_p = 1$ $a_p = 0,2$	a = 1 $W_t = 7,06$	

			8	-Cambio utensile -Smussatura sup. 12	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 940	$\eta_p = 1$	a = 0,1	
			9	Finitura sup. 15	CCMT 06 02 04-WF 1125 SCLCR 1616H09 (portautensile)		n = 940 Vt = 29,53	$\eta_p = 5$ $a_p = 0,6$	a = 0,04 Wt = 0,062	
30	A		1	-Posizionamento del pezzo nella morsa -Fresatura alloggiamento dentino ghiera (sup. 10)	Dormer C3674.0 Pinza ER16		n = 875 Vt = 11	$\eta_p = 1$ p = 3	$f_z = 0,04$ Wt = 0,097	fz: Avanzamento per dente [mm/dente] p: profondità di passata [mm]
	B		1	-Rotazione del pezzo di 90° - Cambio utensile -Fresatura alloggiamento per chiave Woodruff (sup. 8)	Dormer Woodruff Master 703 Pinza ER16		n = 720 Vt = 23,75	$\eta_p = 1$ p = 2	$f_z = 0,06$ Wt = 0,56	
	C		1	-Cambio pinza e utensile -Fresatura alloggiamento per linguetta (sup. 9)	327R12-22 25002-GM 1025 Pinza ER32		n = 875 Vt = 59,65	$\eta_p = 1$ p = 4	$f_z = 0,04$ Wt = 0,70	

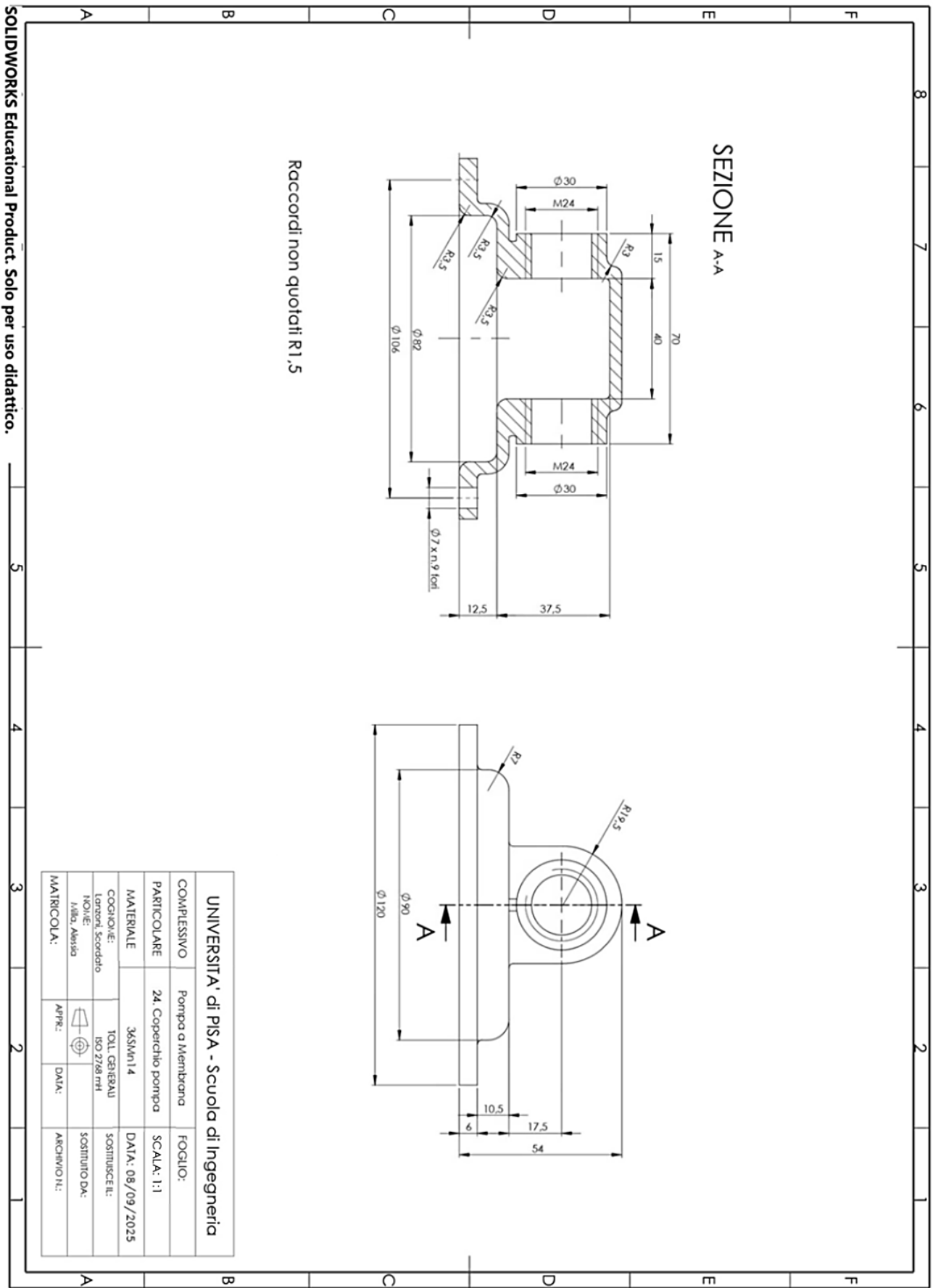
			chiavetta Woodruff sup. 8				
		C	Fresatura alloggiamento per linguetta sup. 9		Morsa HBM Tipo 10	1	

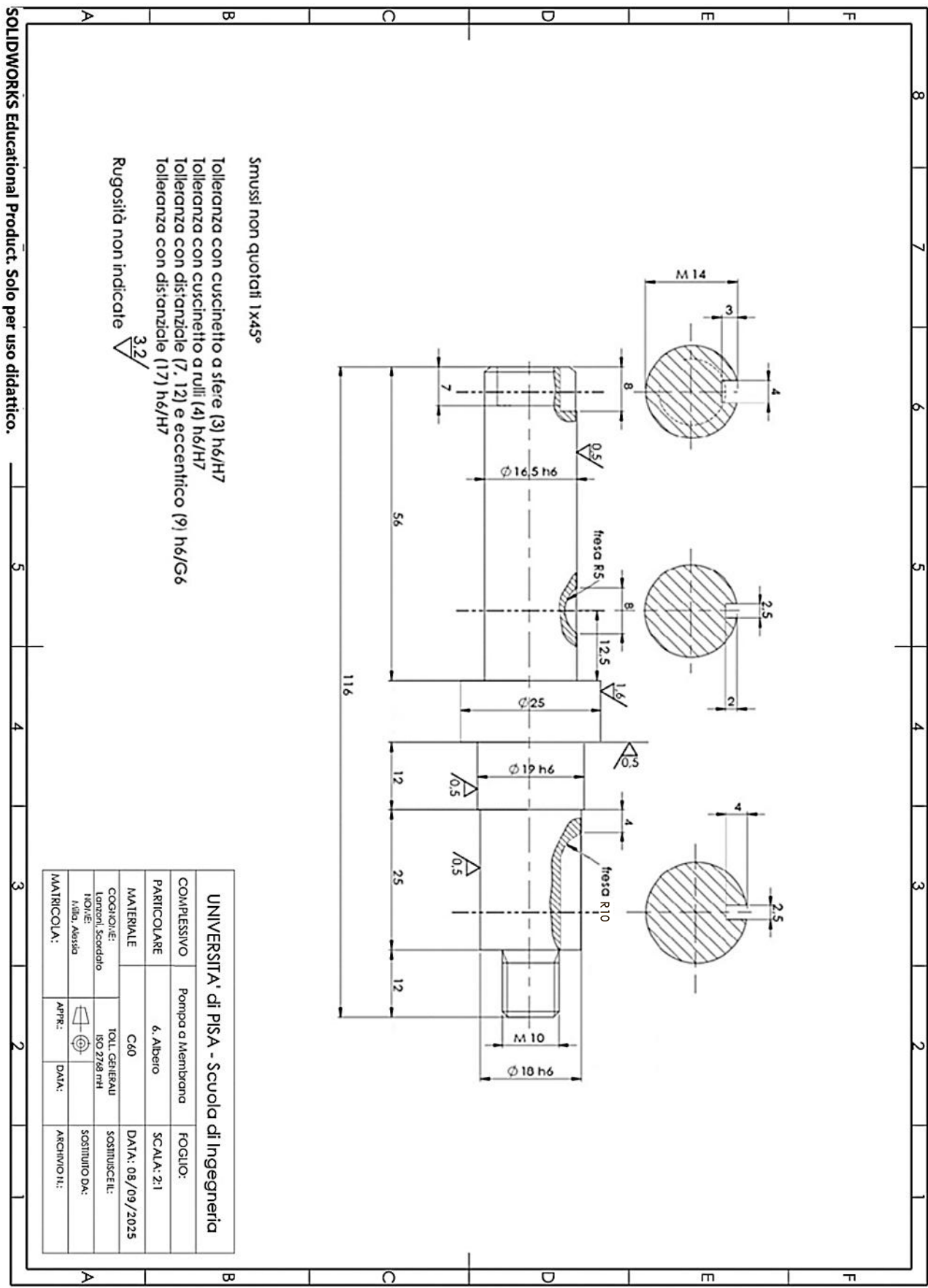
DISEGNI TECNICI

SEZIONE A-A

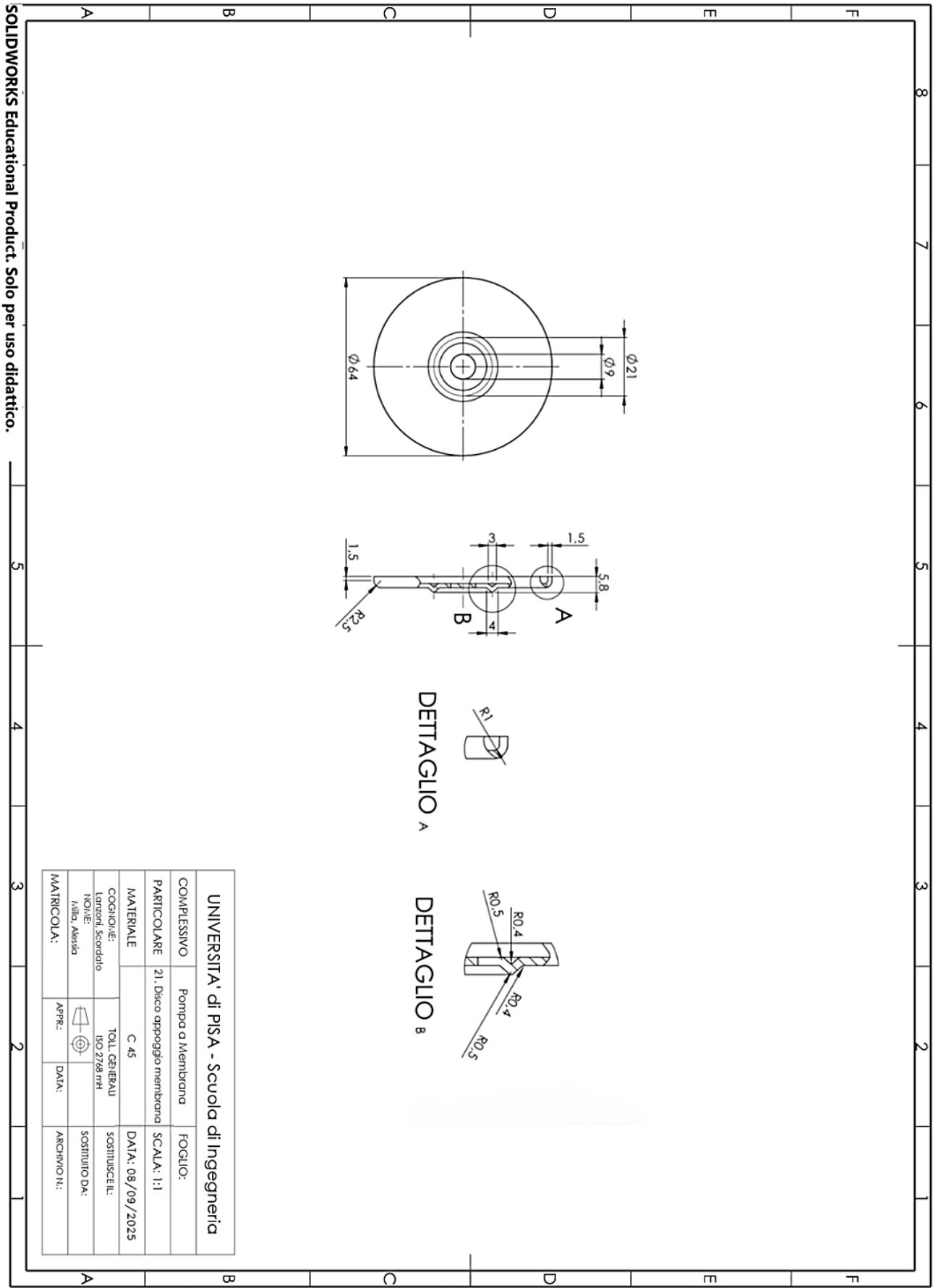


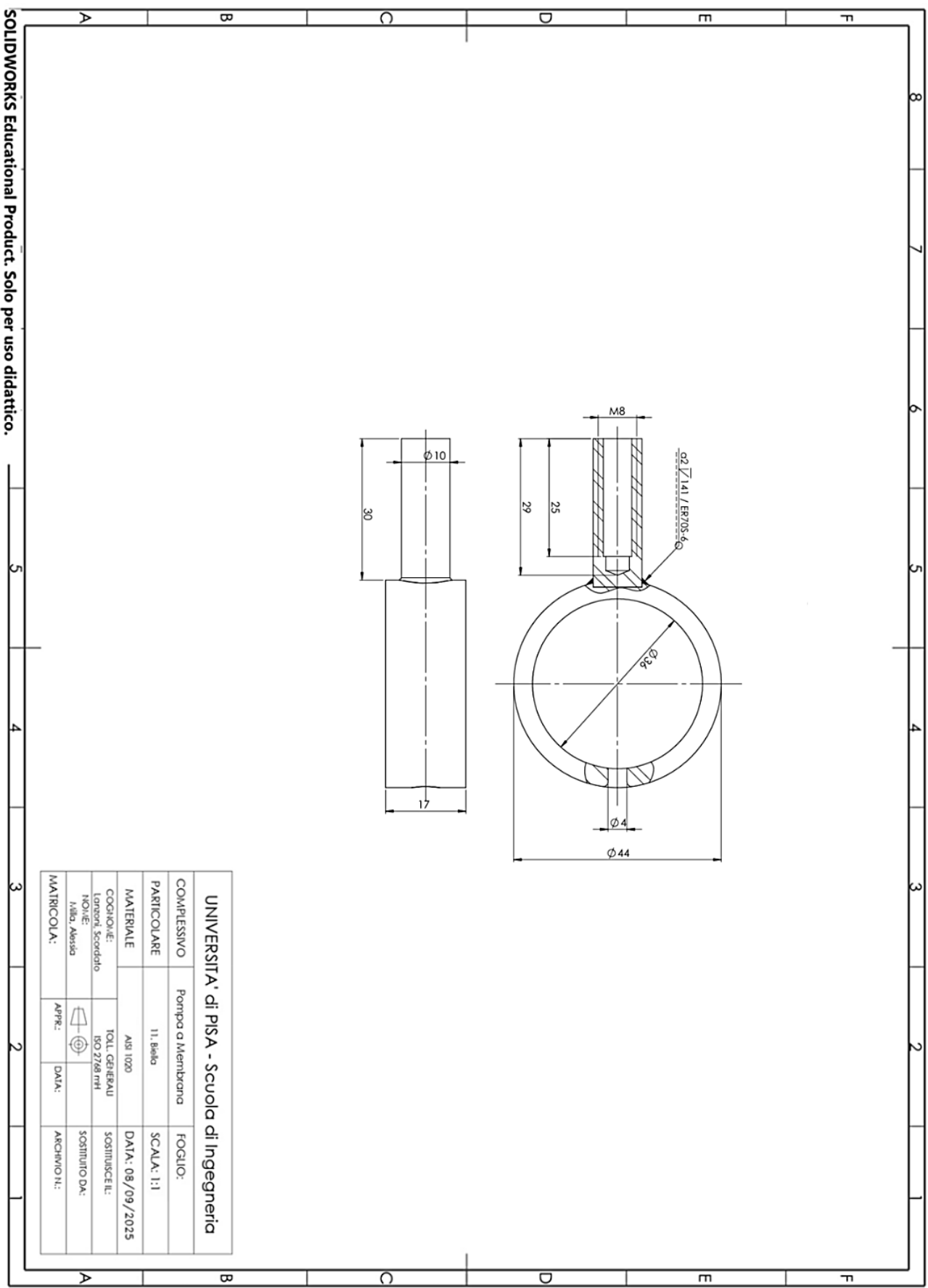
34	Rosetto di sicurezza	2	36SMn14
33	Toppo olio	2	Rame
32	Guarnizione	2	Rame
31	Guarnizione	2	Rame
30	Anello elastico	2	Neoprene
29	Valvola a sfera	2	Neoprene
28	Sede valvola mandata	1	36SMn14
27	Sede valvola aspirazione	1	36SMn14
26	Vite M6x25 ISO 4018	9	
25	Rosetta ISO 7090-6	1	G200
24	Coperchio pompa	1	
23	Vite M8x30 ISO 4018	1	
22	Rosetta ISO 7090-8	1	
21	Disco appoggio membrana	1	C45
20	Membrana	1	Neoprene
19	Distanziale	1	C35
18	Disco contenitore membrana	1	C35
17	Distanziale	1	HBK
16	Anello di tenuta	1	G200
15	Coperchio	1	Cartone pressato
14	Guarnizione	1	
13	Chiusura	1	34CrNiMo6
12	Distanziale	1	ANSI 1020
11	Bielle	1	ANSI 1010
10	Rullino 3x17	1	ANSI 1020
9	Eccentrico	1	
8	Linguetta 2.5x3,7 ISO 6609	1	
7	Distanziale	2	36SMn14
6	Anello 42 DIN 472	1	C60
5	Anello 42 DIN 472	1	
4	Cuscinetto a sfera 20 RI 02 UNI 4219-63	1	16NiCr4
3	Cuscinetto a sfera 17 BC 02 UNI 4209-68	1	16NiCr4
2	Anello 40 DIN 472	1	G200
1	Corpo	1	
POS. DENOMINAZIONE N° PEZZI MATERIALE			
UNIVERSITA' di PISA - Scuola di Ingegneria			
COMPLESSIVO		Foglio 1 di 1	
PARTICOLARE		SCALA:	
GRUPPO		DATA: 08/09/2025	
Cognome		TOLL. GENERALI	
Lavorato, Secondo		SOSTITUIRE IL	
NOME		SOSTITUIRE DA	
Vite, Anello			

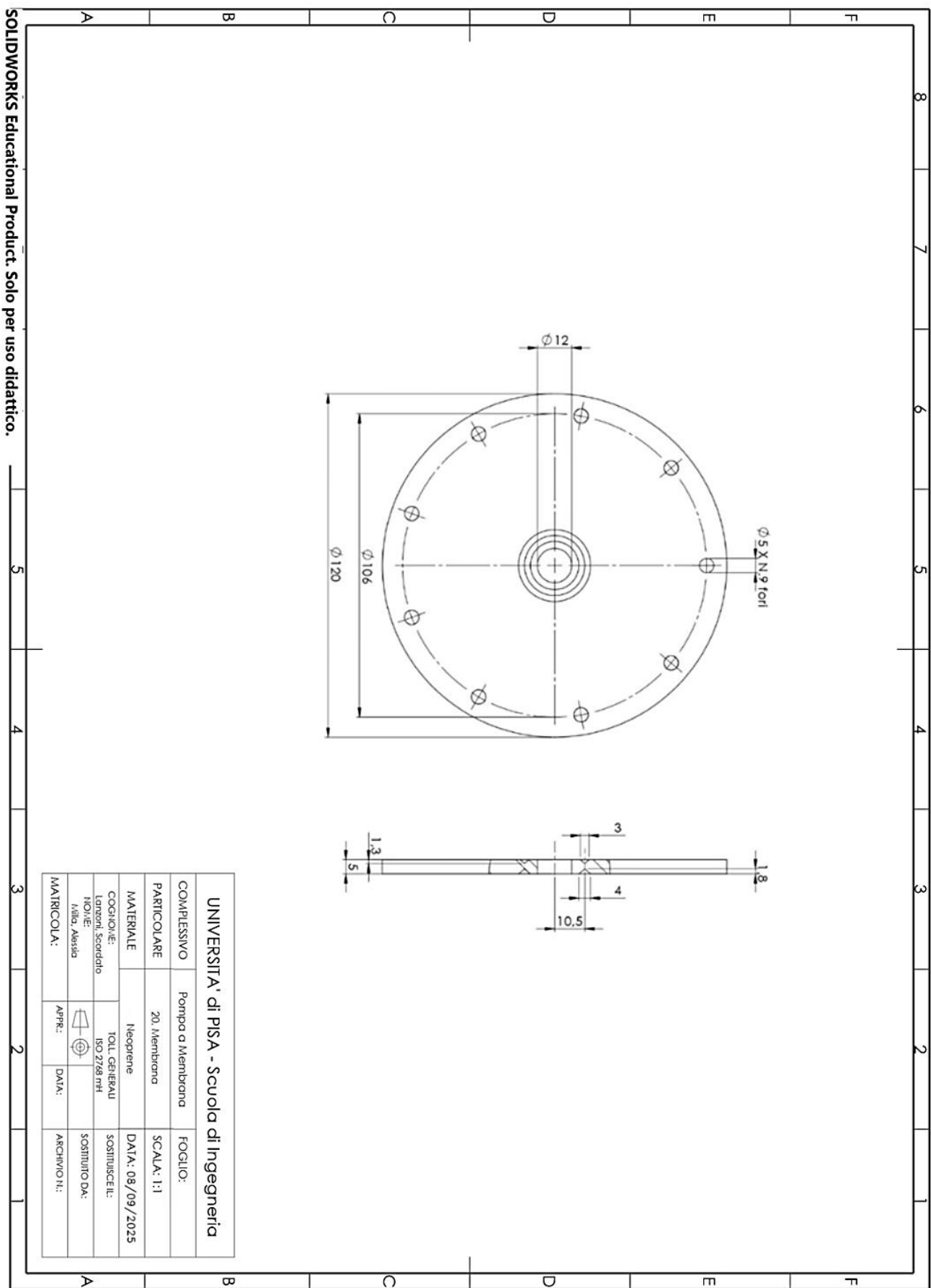




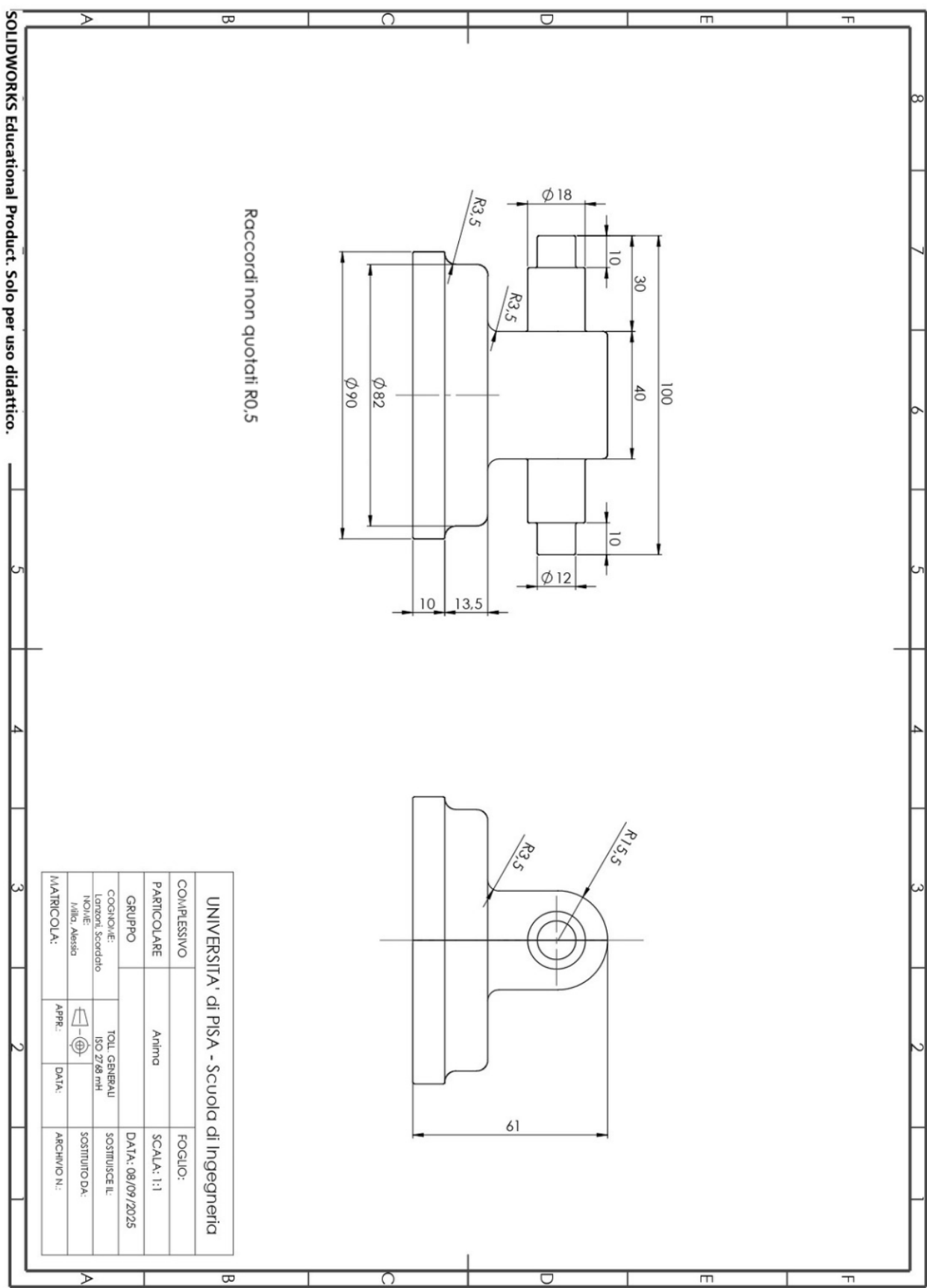
UNIVERSITA' di PISA - Scuola di Ingegneria			
COMPLESSIVO	Pompa a Membrana	FOGLIO:	
PARTICOLARE	6. Albero	SCALA: 2:1	
MATERIALE	C60	DATA: 08/09/2025	
COGNOME:	TOLL. GEBEAU	SOSTITUISCE:	
NOVE:	Luntoni, Scordato	SOSTITUITO DA:	
Alba, Abissa		ARCHIVIO:	
MATRICOLO:	APPR:	DATA:	

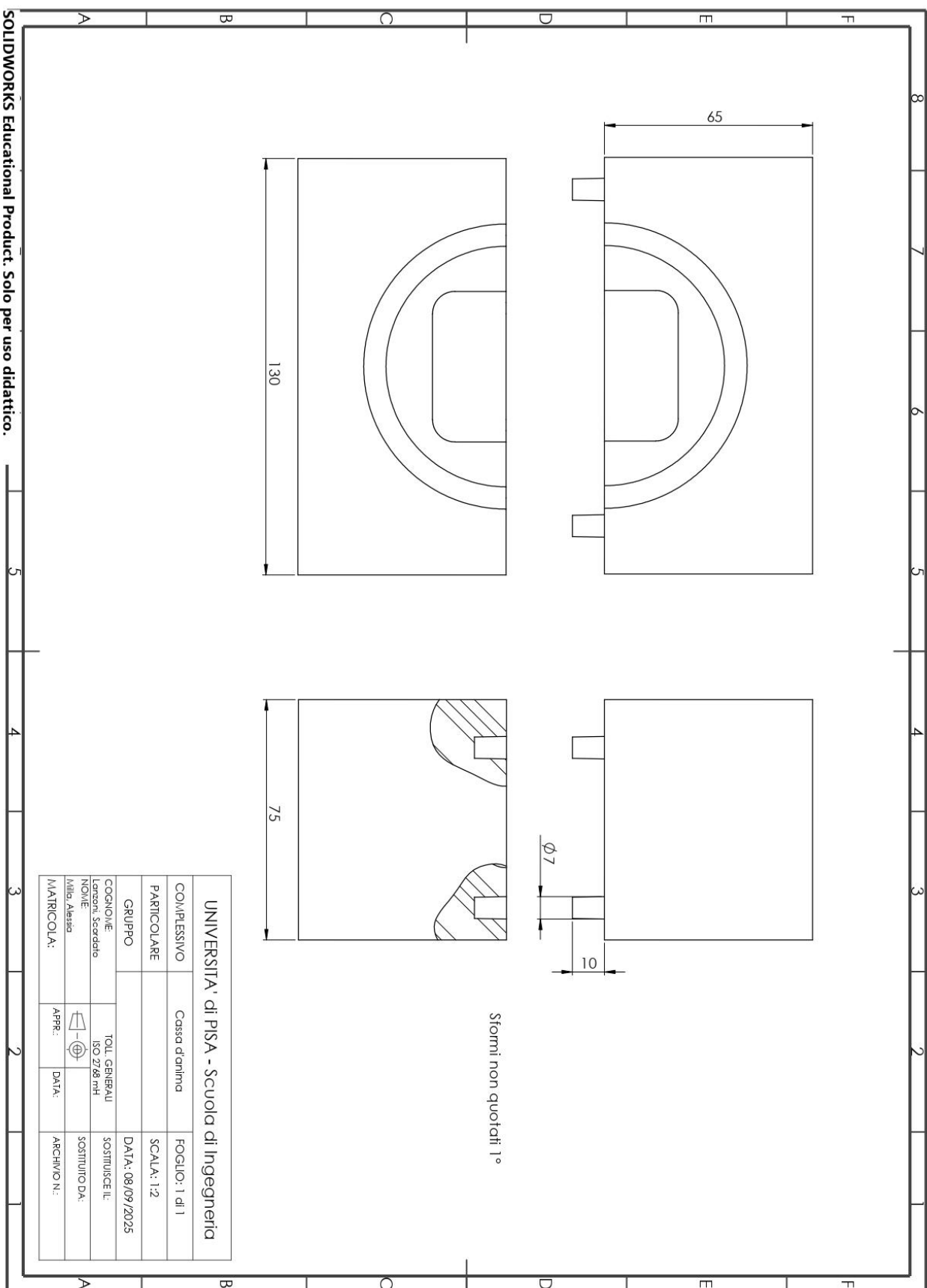




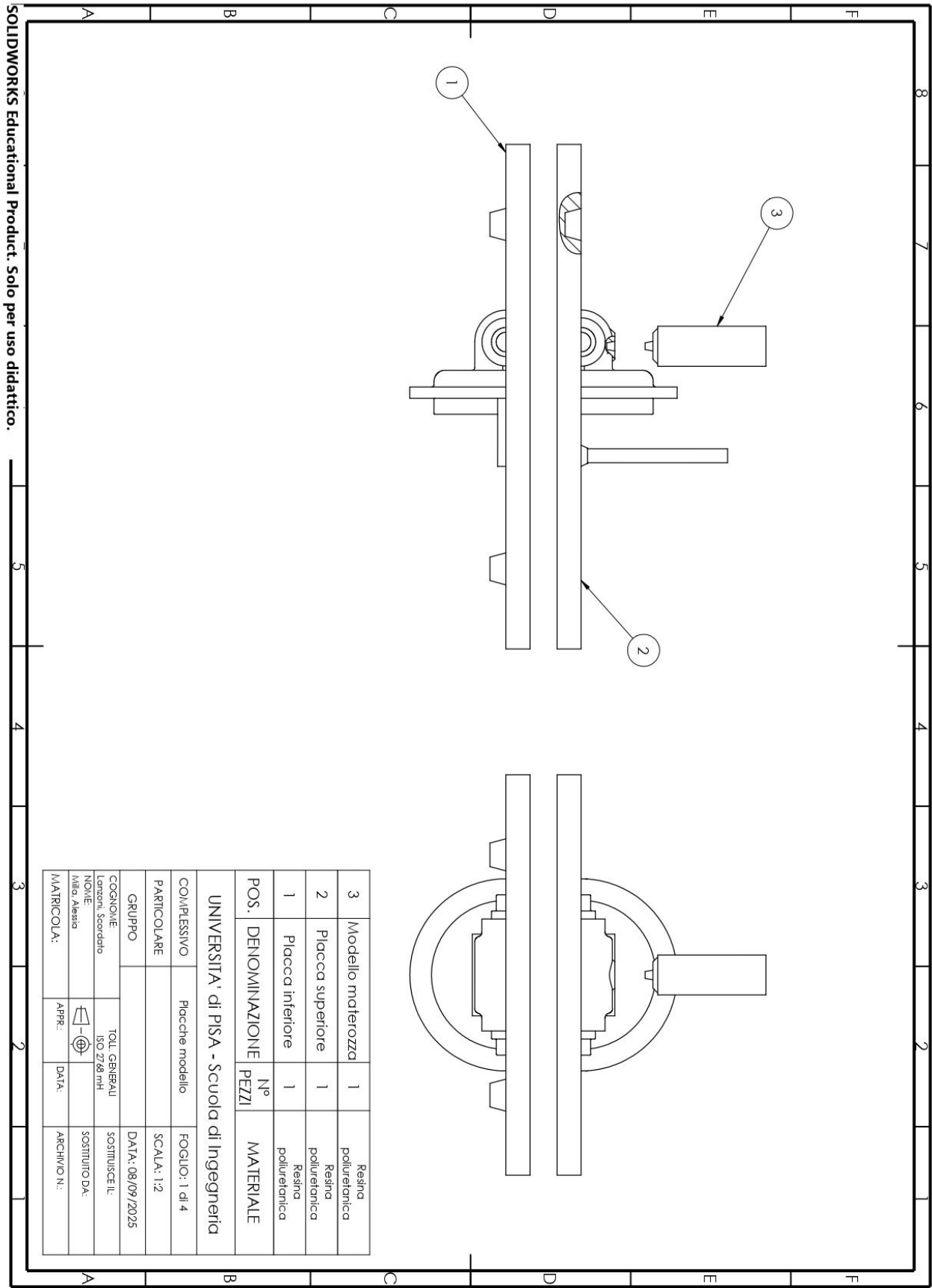


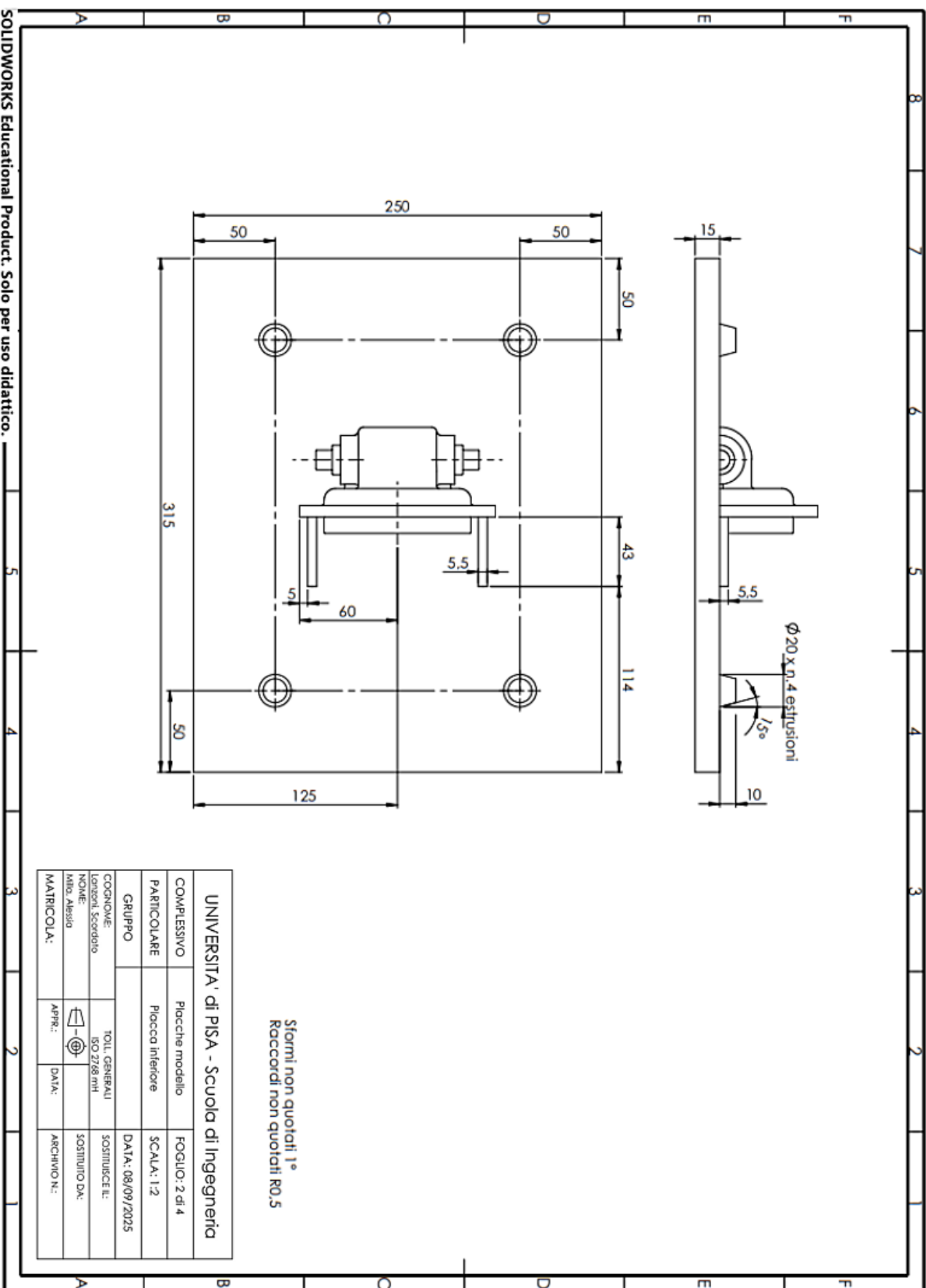
PROCESSO DI FUSIONE – Anima e cassa d’anima

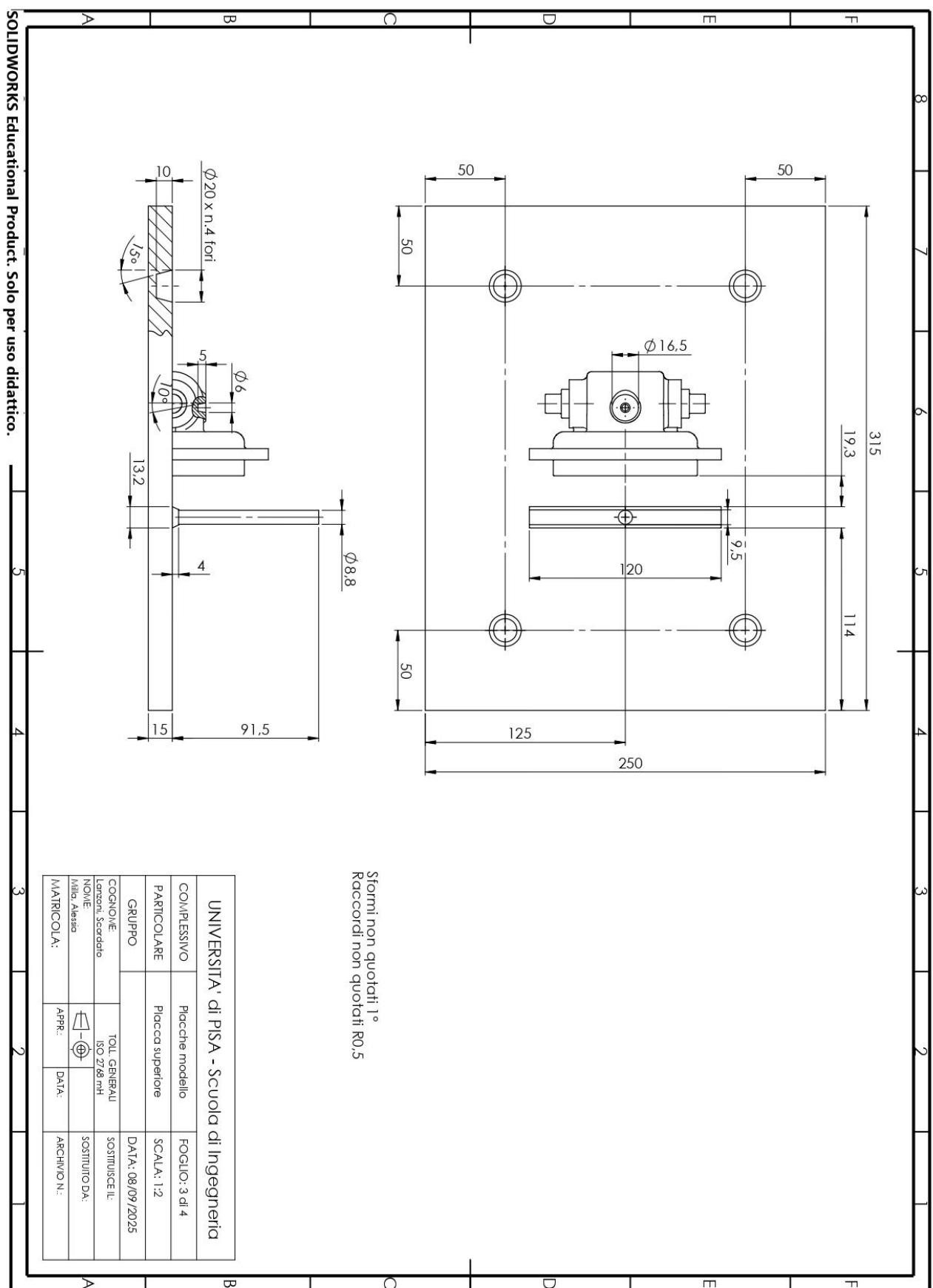


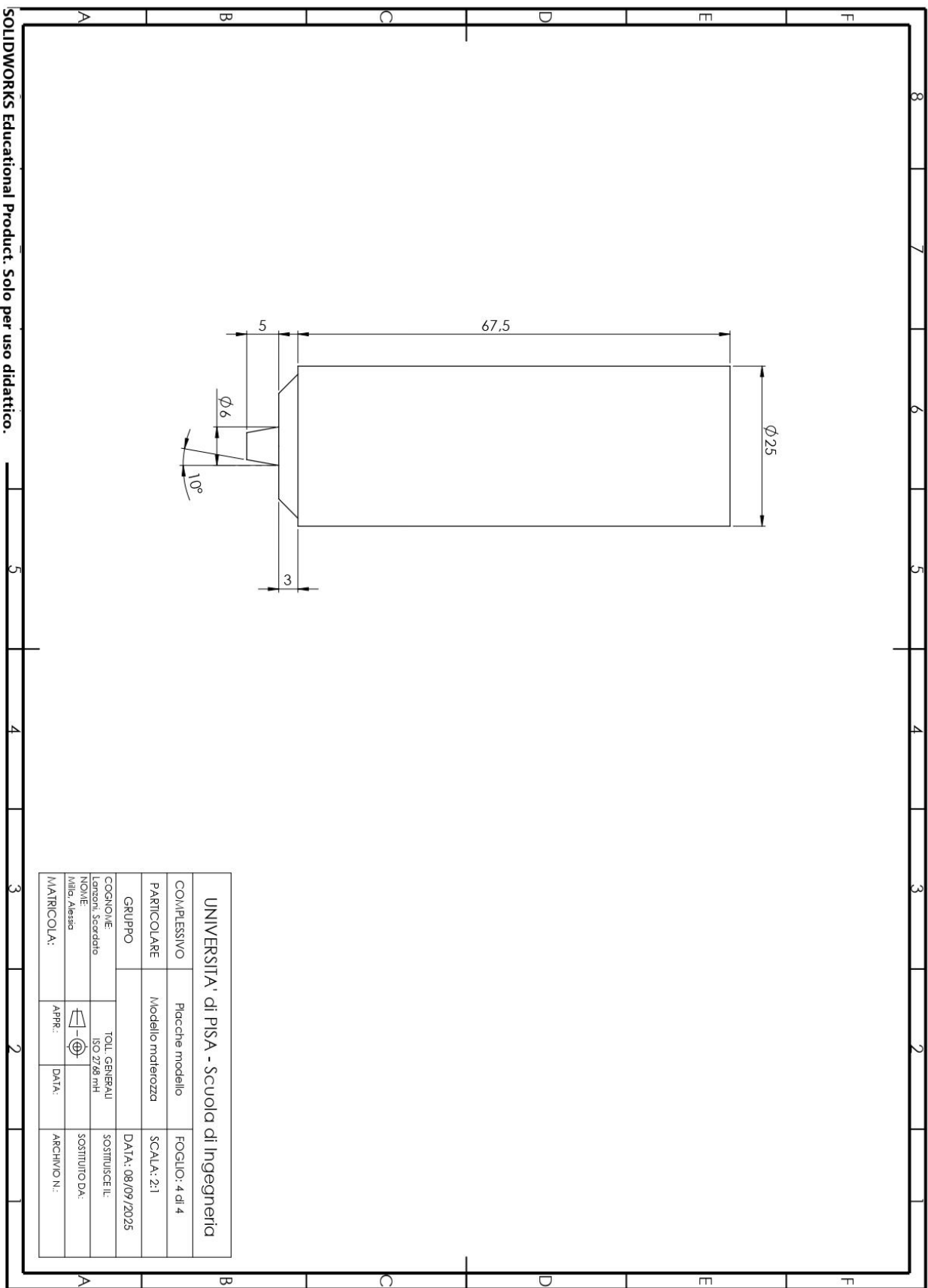


PROCESSO DI FUSIONE – Placche modello



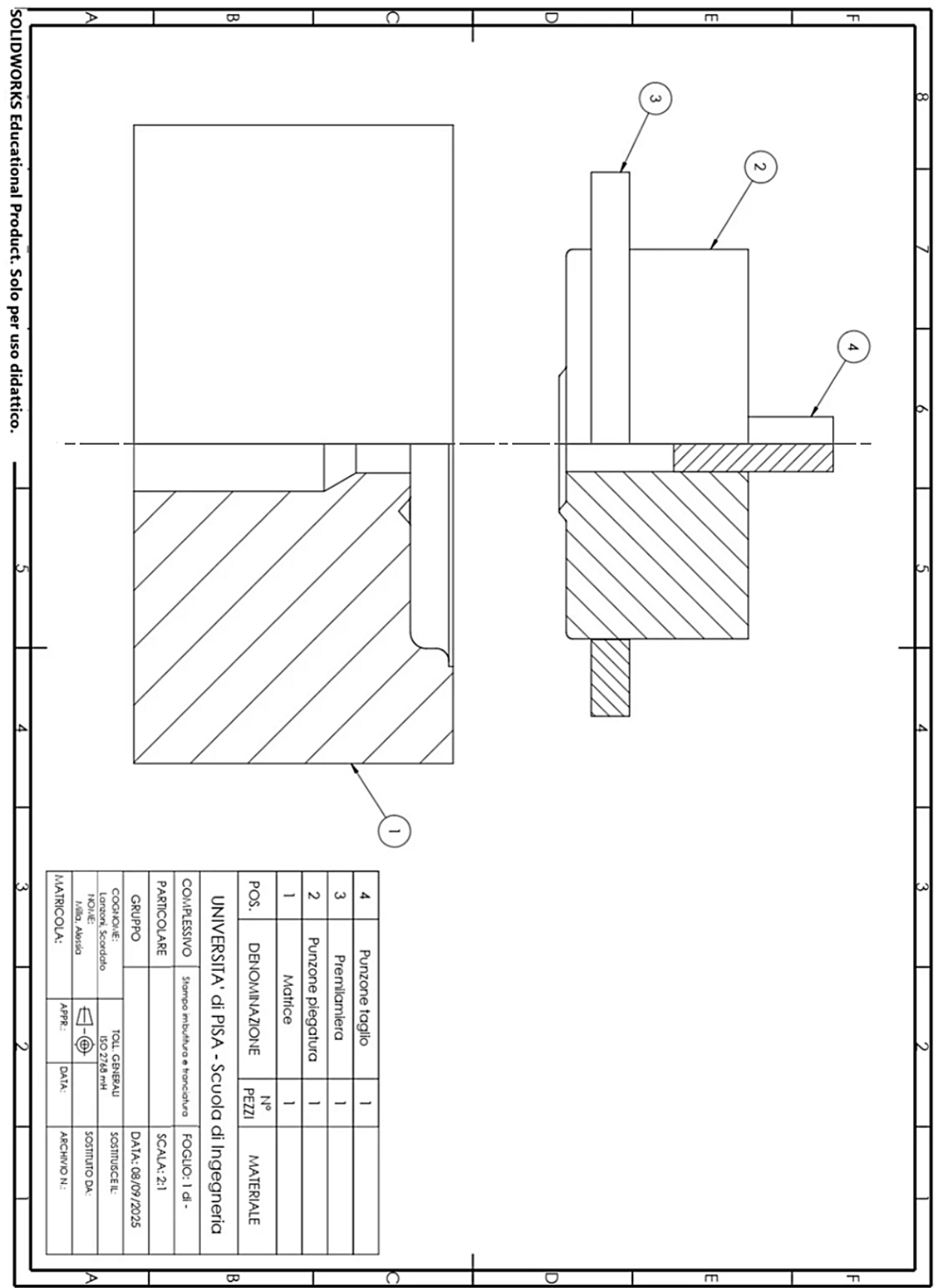


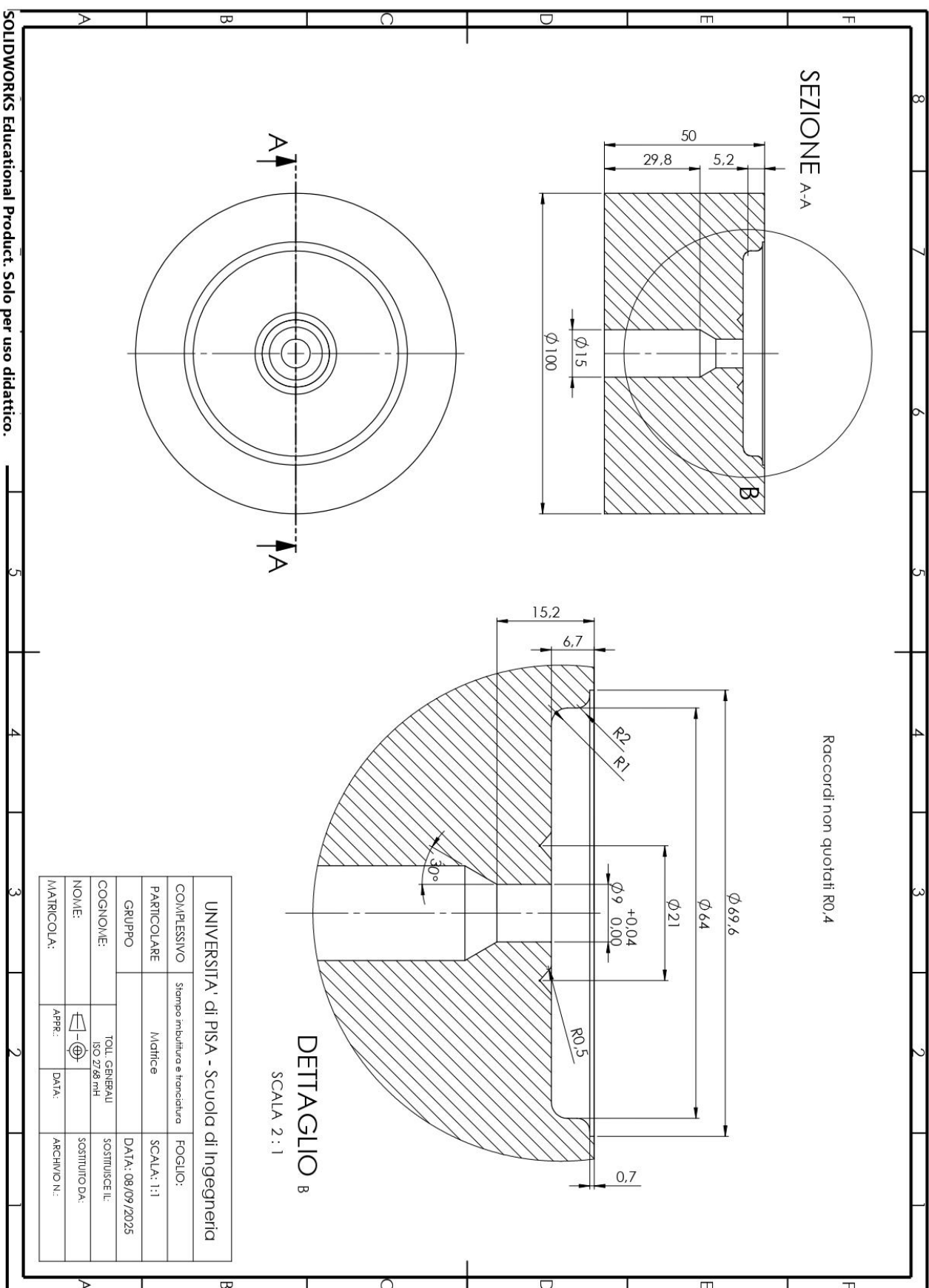


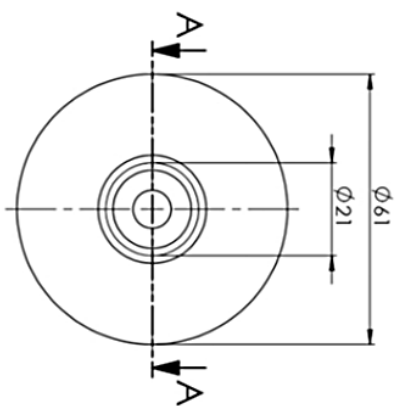


UNIVERSITA' di PISA - Scuola di Ingegneria			
COMPLESSIVO	Placche modello	FOGLIO: 4 di 4	
PARTICOLARE	Modello materozza	SCALA: 2:1	
GRUPPO		DATA: 08/09/2025	
COGNOME:		TOL. GENERALI	
NOVITÀ:		ISO 2768 mH	
Milia, Alessia		SOSTITUITO DA:	
MATRICOLO:	APPR:	DATA:	ARCHIVO N.:

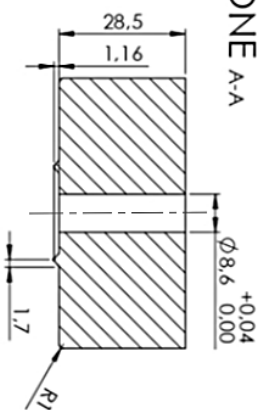
PROCESSO DI DEFORMAZIONE PLASTICA





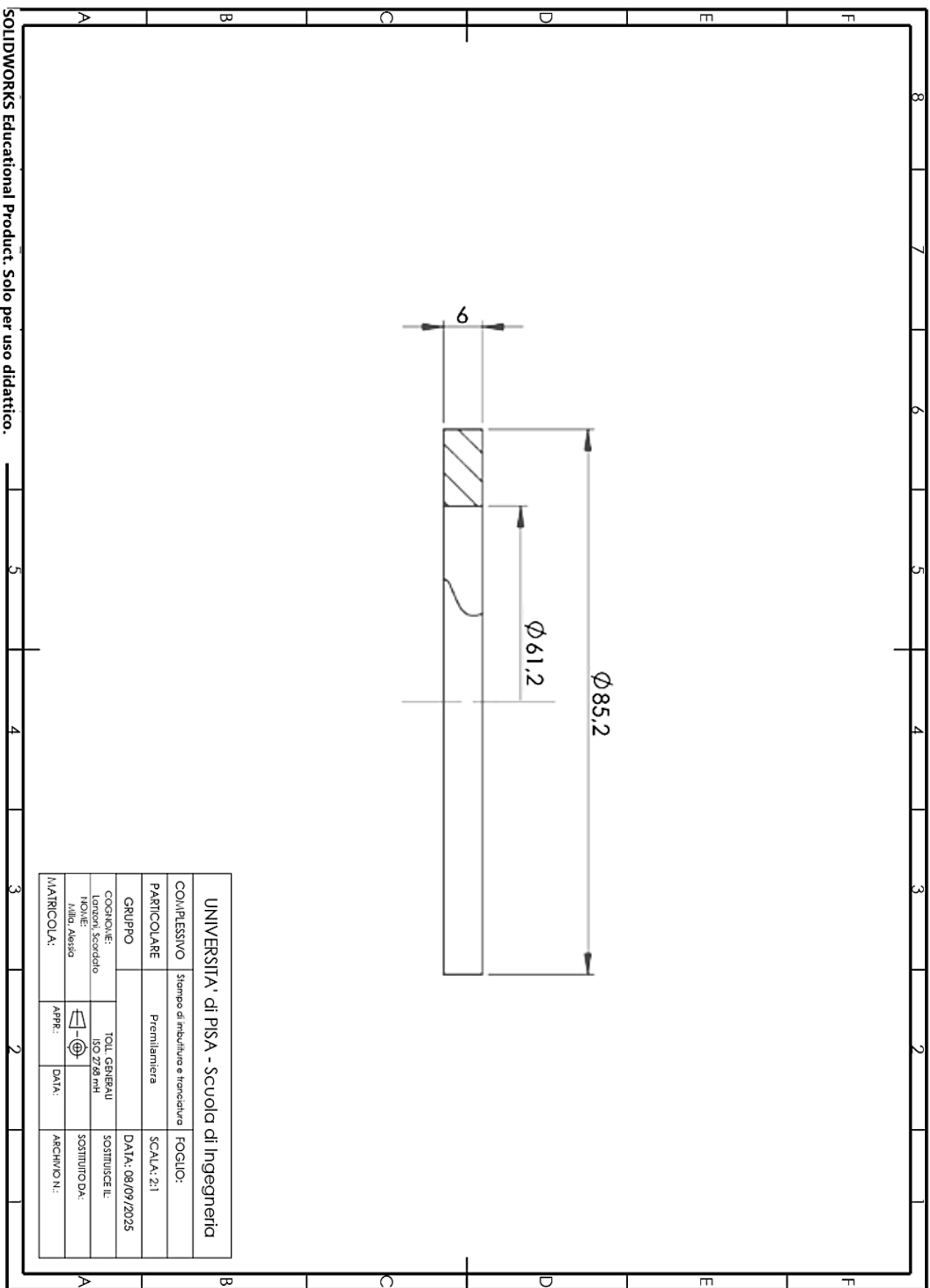


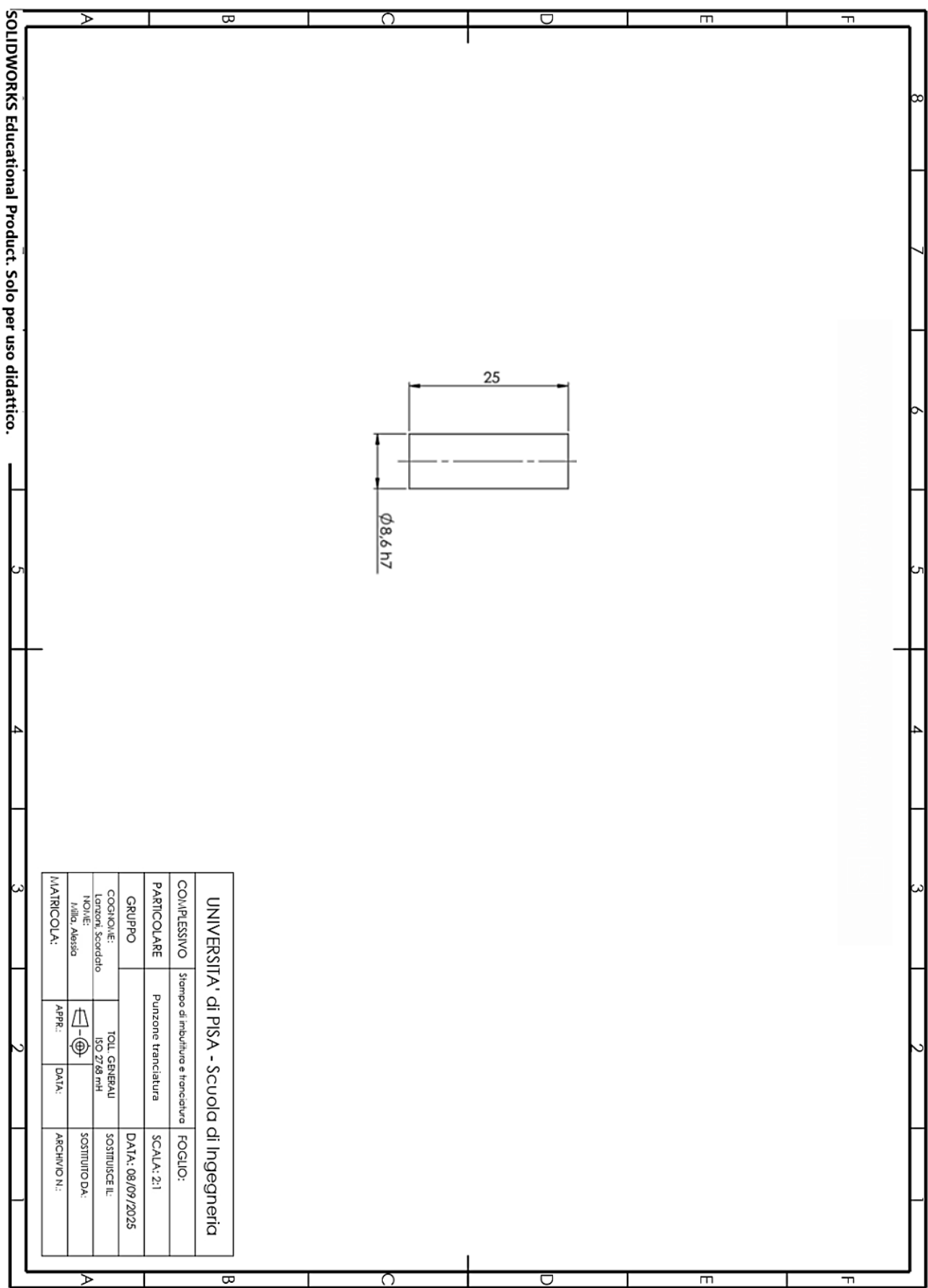
SEZIONE A-A



Raccordi non quotati R0,5

UNIVERSITA' di PISA - Scuola di Ingegneria			
COMPLESSIVO	Stompo di imbutitura e fornicatura	FOGLIO:	
PARTICOLARE	Punzone imbutitura	SCALA: 1:1	
GRUPPO		DATA: 08/09/2025	
COGNOME:	TOLL. GENERALI	SOSTITUISCE IL:	
NOME:	London, Scordato	SOSTITUITO DA:	
	1.000, Alessio		
MATRICOLA:	APPR: 	DATA:	ARCHIVIO N.:





SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione - M.Santochi, F.Giusti, casa editrice ambrosiana
Tecnologia meccanica - S.Kalpakjian, R.Schmidt, casa editrice Pearson

FUSIONE

<https://docenti.ing.unipi.it/~a004268/Esercitazione%20%20su%20progetto%20di%20fusione.pdf>
<https://my.liuc.it/MatSup/2004/Y70750/Corso%20di%20Tecnologia%20Meccanica%20-%20Mod.2.2%20Fonderia.pdf>
https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma_di_Caine#:~:text=Il%20diagramma%20di%20Caine%20%C3%A8,accettabili%20per%20dimensionare%20una%20materozza.
<https://old.foundrygate.com/upload/artigos/CHILLS%282%29.pdf>

ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO

<https://www.bettinelliacciai.com/prodotti/c45e/>
<https://www.fervi.com/ita/macchine-utensili-e-accessori/torni/torni-paralleli/tornio-parallelo-pr-3846.htm#moreinfo>
<https://www.gfbgroup.it/rapid-original-ita>
<https://www.hbm-machines.com/it/p/hbm-bf-60-fresatrice-professionale-con-sistema-digitale-lcd-a-3-assi>
<https://www.sandvik.coromant.com/it-it/tools>
<https://hmpsrl.it/seleziona-il-prodotto-acciaio-al-carbonio/>

DEFORMAZIONE PLASTICA

<https://my.liuc.it/MatSup/2007/Y60726/Al%20-%20204.3%20Imbutitura.pdf>
<https://www.aida-europe.com/it/presse/nc1-series/>
<https://it.wikipedia.org/wiki/Imbutitura>
<https://it.wikipedia.org/wiki/Tranciatura>

SALDATURA

<https://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura>
<https://weldracingparts.com/it/bacchetta-per-saldatura-a-tig/70-acciaio-al-carbonio-er-70s-6-tig-50-unita-8407474325431.html>
https://ipotools.it/prodotto/saldatrice-tig-ac-dc-ipotools-acdctig-200p/?_gl=1*15ppqnj*_up*MQ.*_gs*MQ.*_ga*MTc2MDIzNTY1OS4xNzU3MDg5ODE2*_ga_Y7ET8Y77VM*cze3NTcwODk4MTYkbzEkZzEkDE3NTcwODk4MjlkajU0JGwwJGgw&gclid=CjwKCAjwOrFBhBaEiwAw4bYDSglk4xOFdlubXJTDXucBISNdi5CjGp_QWpESBMOyplfaLWu0ngmMRoC0XcQAvD_BwE&gbruid=0AAAAAoX7xVjWVQLMqex2A6_sWUtSE3R_F

STAMPA 3D

<https://www.snapmaker.com/en-US/snapmaker-luban>
<https://support.crea3d.com/docs/bambulab/x1e/serie-x1-guida-alla-stampa-del-tpu-85a-90a/>
<https://www.3djake.it/extrudr/tpu-hard-nero>