

***Esempio di ciclo di fusione in forma
transitoria in terra con staffe***

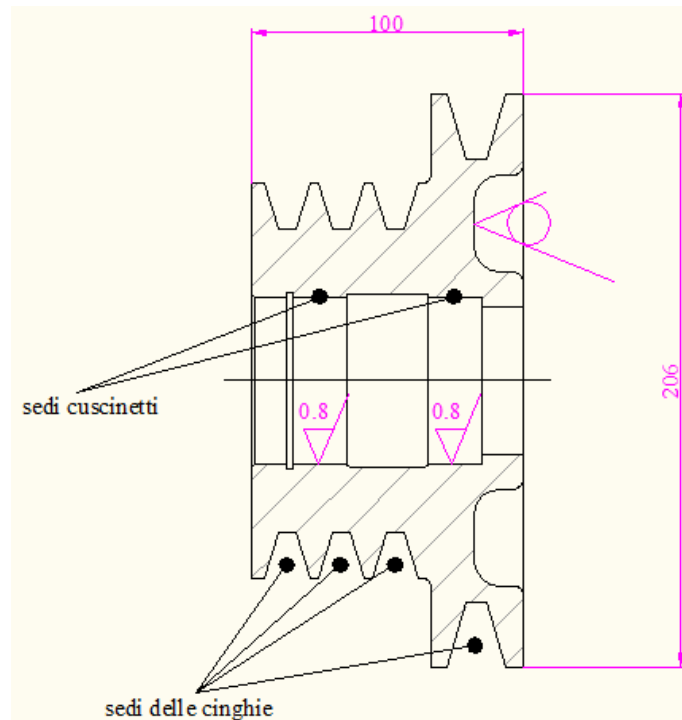
Informazioni d'insieme dal disegno di definizione

Il pezzo è assialsimmetrico: molti problemi possono essere risolti considerando ciò che avviene in una sezione del componente eseguita con un semipiano passante per l'asse di rivoluzione

Ingombri max: 206x100

Materiale: C40

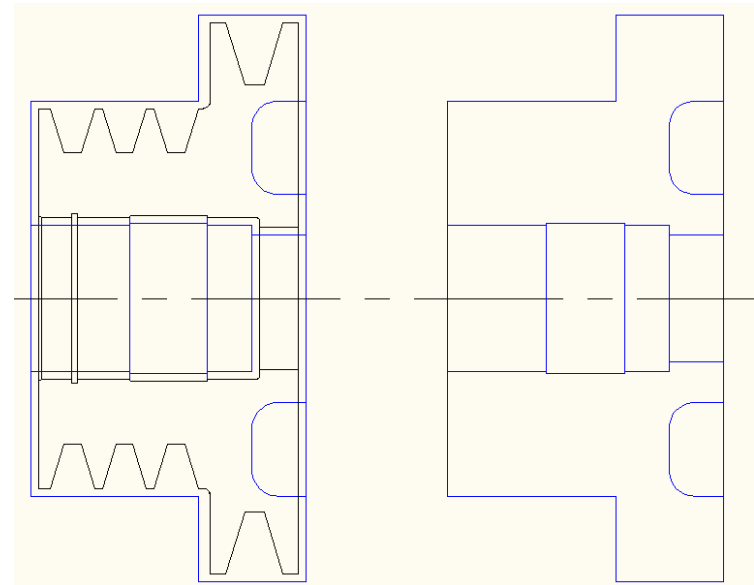
Superfici che possono essere lasciate grezze, superfici da lavorare successivamente, superfici funzionalmente importanti (critiche), finiture superficiali richieste ...



Produzione di pochi esemplari

Idea del possibile greggio di fusione

L'alleggerimento toroidale rimane grezzo
Le altre superfici dovranno essere successivamente lavorate alle MU, per cui saranno dotate di idoneo sovrametallo
Il foro centrale e lo scarico toroidale saranno realizzati per fusione

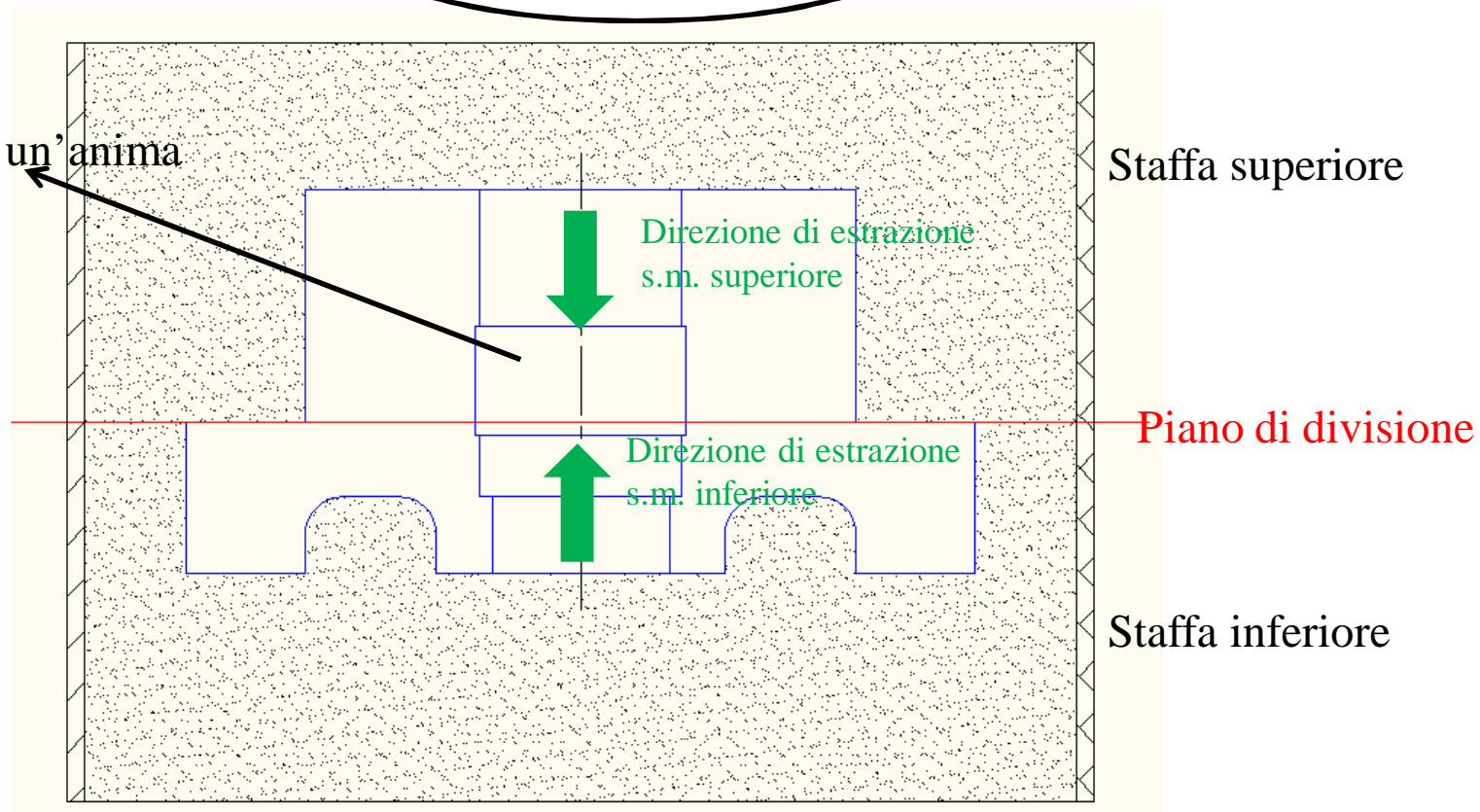


Scelta del piano di divisione

Direzione di estrazione dei semimodelli: verso il **piano di divisione**

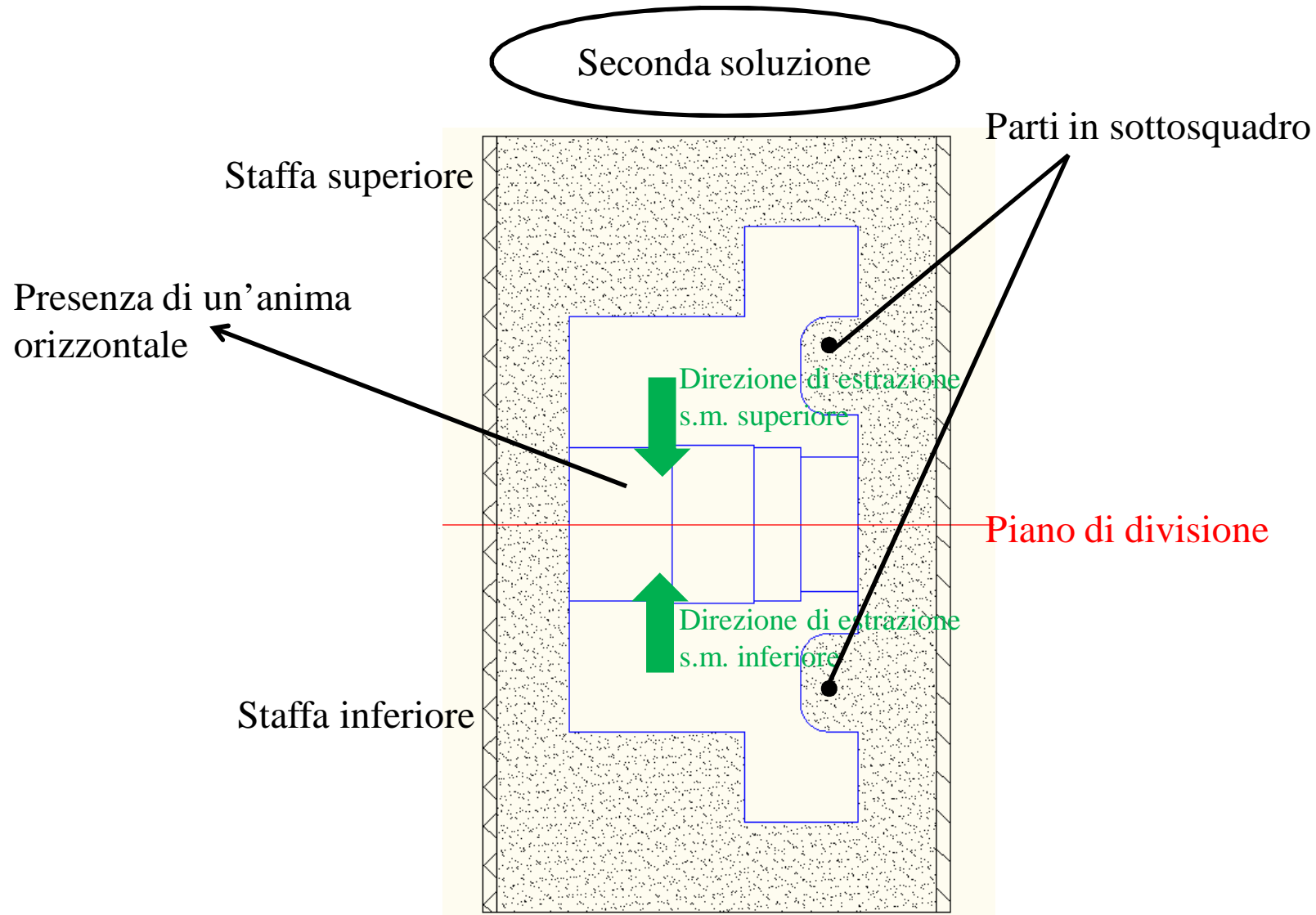
Prima soluzione

Presenza di un'anima
verticale



Scelta del piano di divisione

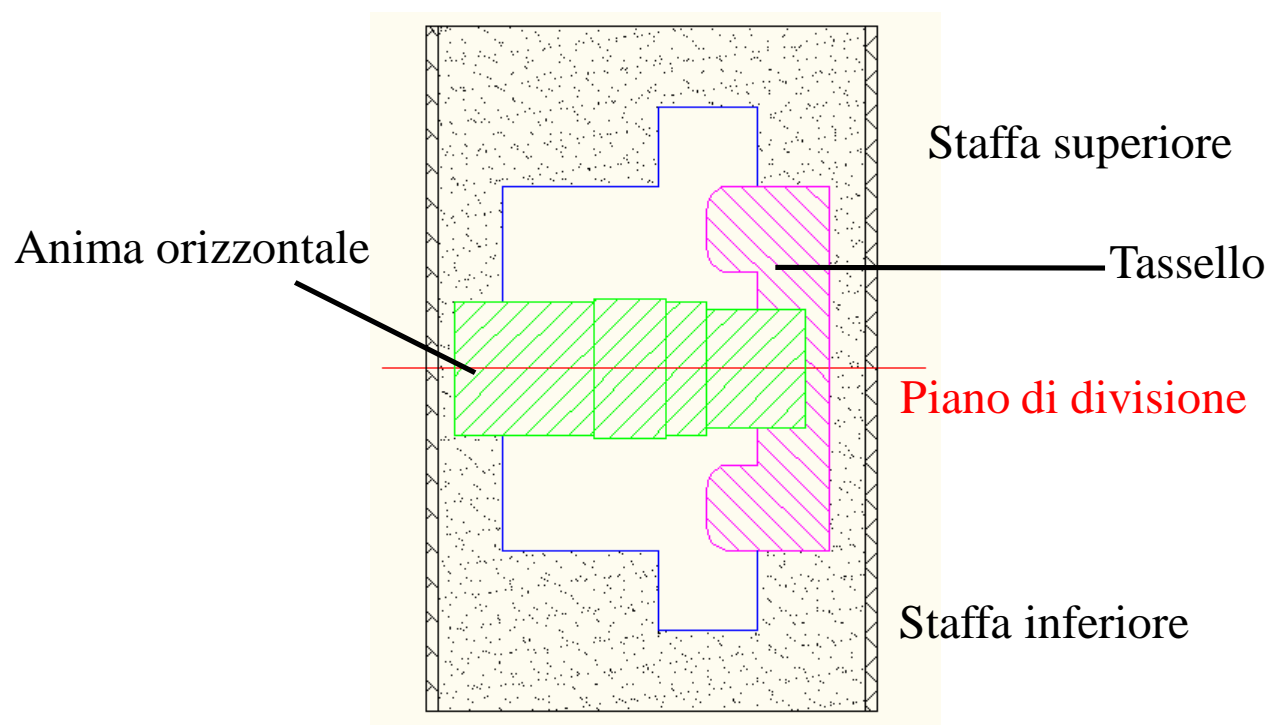
Direzione di estrazione dei semimodelli: verso il **piano di divisione**



Scelta del piano di divisione

Seconda soluzione

Idea per la risoluzione del sottosquadro: utilizzando un anima a sbalzo toroidale (tassello)



Sovrametalli

Fattori che influenzano l'entità del sovrametallo sulle superfici che dovranno subire successive lavorazioni alle M.U.:

- dimensioni globali del pezzo e della superficie in esame
- materiale della lega
- tipo di formatura
- finitura superficiale richiesta
- importanza funzionale della superficie in esame

Ulteriori sovrametalli possono essere introdotti allo scopo di semplificare la realizzazione del modello e delle anime e per favorire la solidificazione direzionale

Sovrametalli

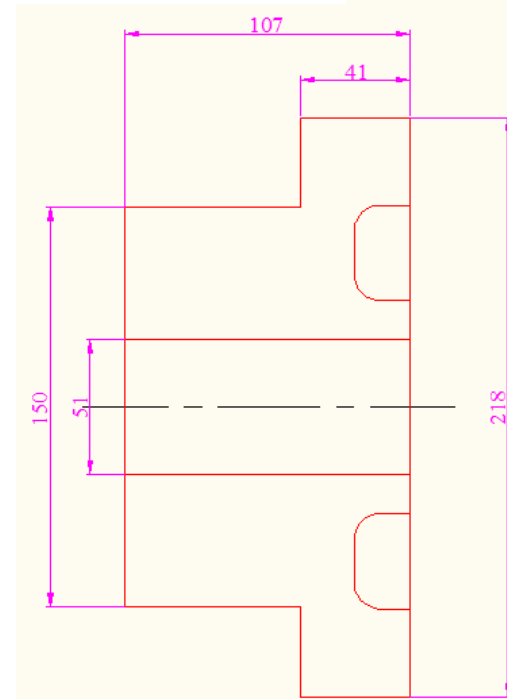
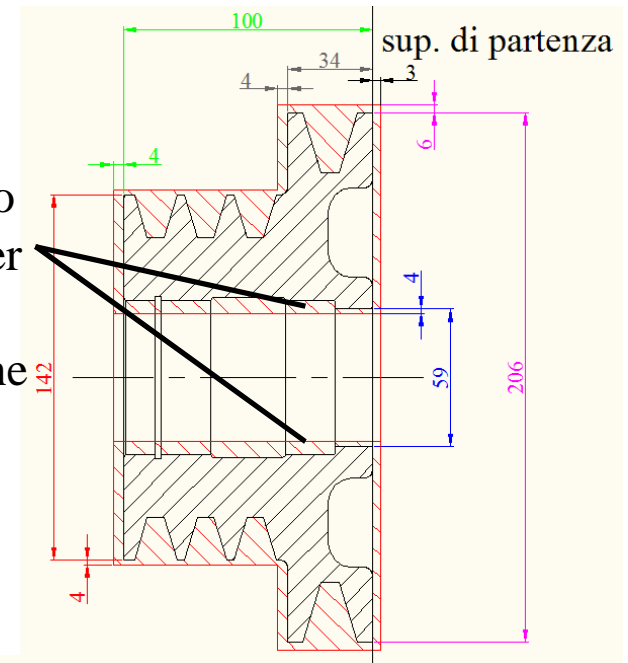
Max dimensione del pezzo 206mm

Tab. sovrametalli per dim. non critiche di getti in acciaio per fusione in terra

Quote nominali di riferimento (mm)	MASSIMA DIMENSIONE DEL PEZZO (mm)		
	≤250	250 + 1000	≥1000
≤ 40	4	4	5
40 ÷ 65	4	4	5
65 ÷ 100	4	4	5
100 ÷ 160	4	5	5
160 ÷ 250	6	6	7
250 ÷ 400	-	6,5	7
400 ÷ 630	-	7	8
630 ÷ 1000	-	8	9

Il sovrametallo delle superficie di partenza si considera uguale a 3 mm per pezzi con dimensione massima ≤ 160 mm e uguale a 4 mm per pezzi con dimensione max >160 mm.

Sovrametallo introdotto per semplificare la costruzione dell'anima



Ritiro

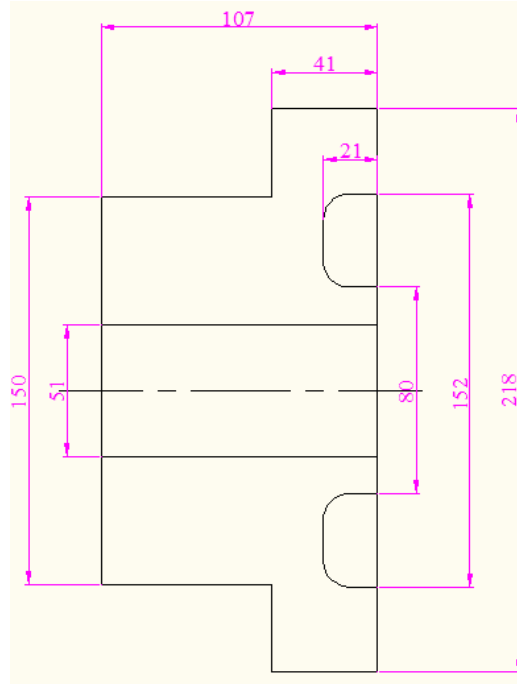
Tab. coefficiente di ritiro lineare medio per vari materiali

MATERIALI	RITIRO %		
	Getti piccoli	Getti medi	Getti grandi
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

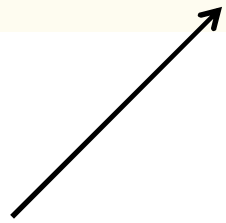
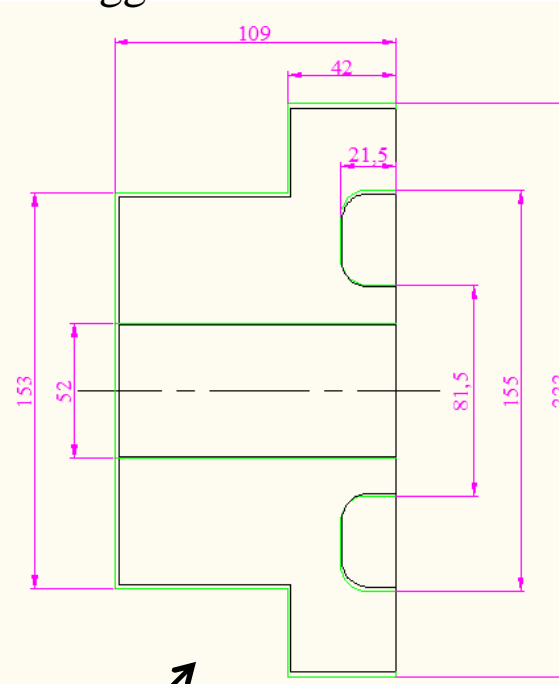
Partendo dal disegno dei sovrametalli ogni dimensione deve essere maggiorata del 2% per essere uguale a quella desiderata a raffreddamento completato

Ritiro

A ritiro avvenuto



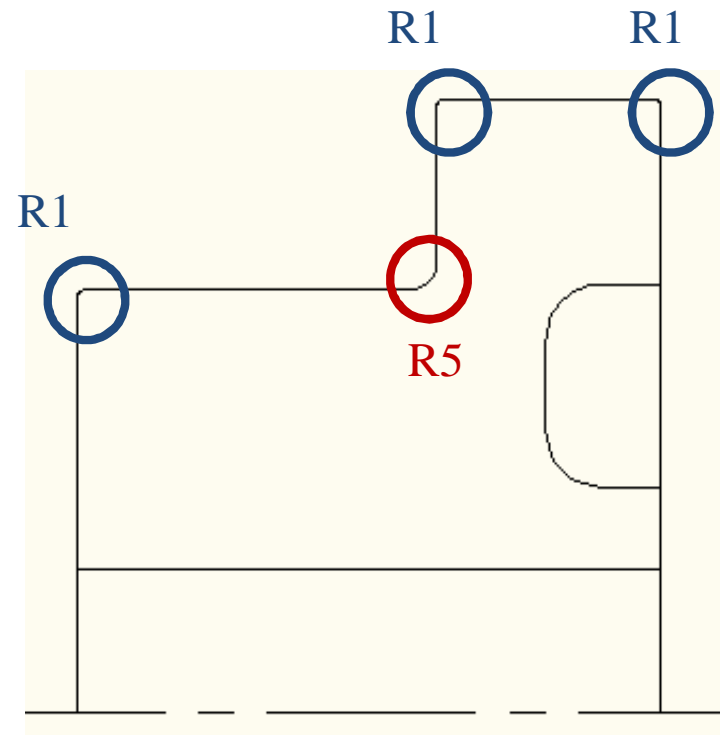
Maggiorazione delle dimensioni



Il modello deve far riferimento a queste dimensioni

Raggi di raccordo

Gli spigoli vivi devono essere addolciti con idonei raggi di raccordo



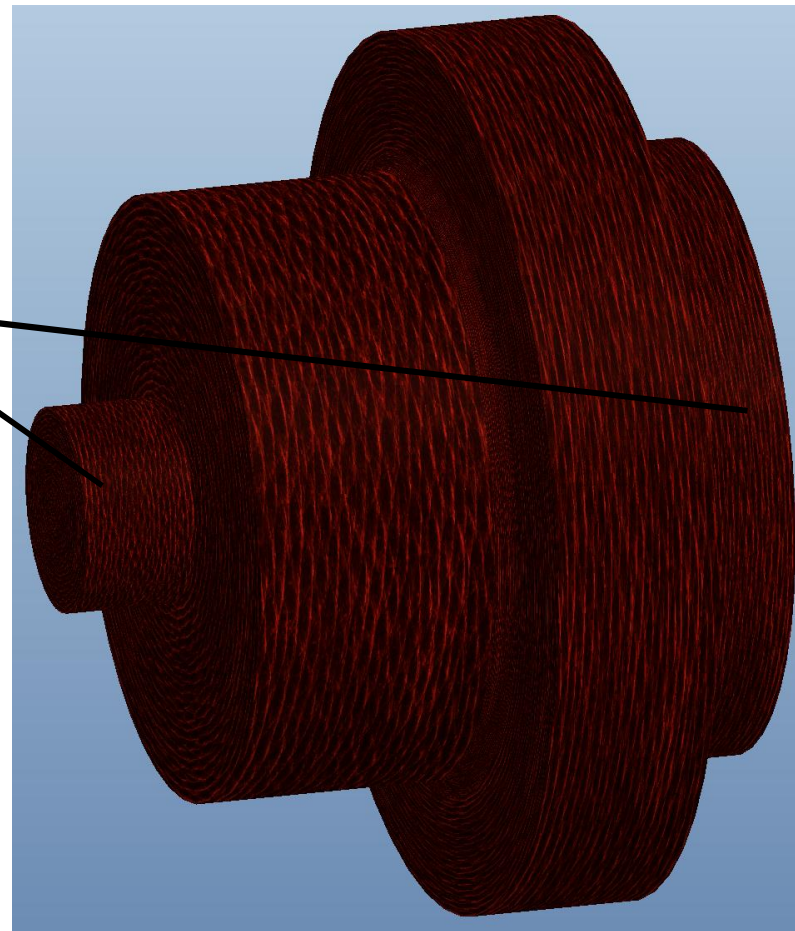
Angoli di sforno

Le pareti del modello perpendicolari al piano di divisione (comprese le portate d'anima) devono essere provviste di opportuni angoli di sforno (2° per modelli in legno)

Valori indicativi dell'angolo di sforno	
Modelli in legno	$1^\circ-2^\circ$
Modelli metallici	$30'$
Portate d'anima verticali	$10^\circ-12^\circ$
Nervature sottili	$1'-2'$

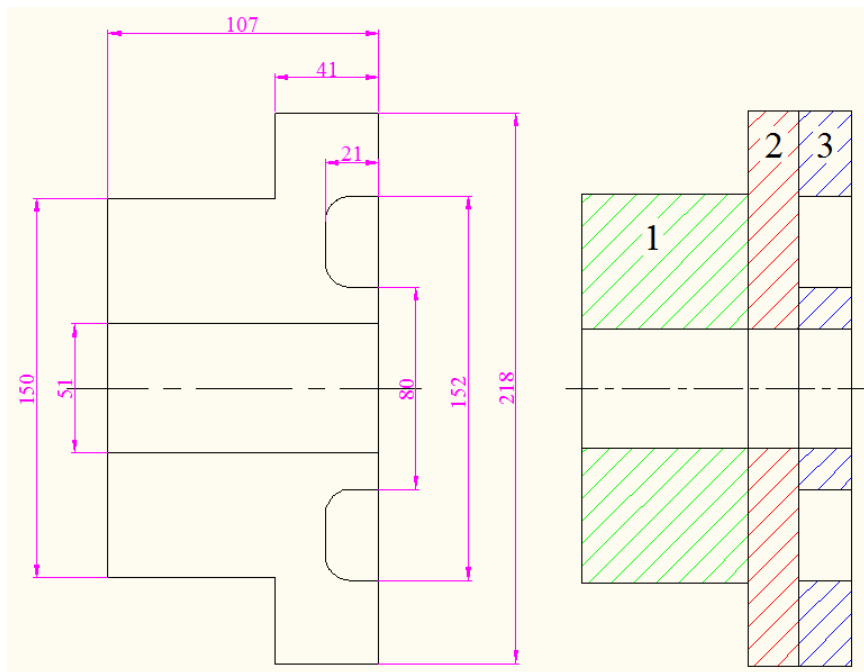
Il modello ottenuto fino ad ora è

Portate d'anima



Analisi della solidificazione

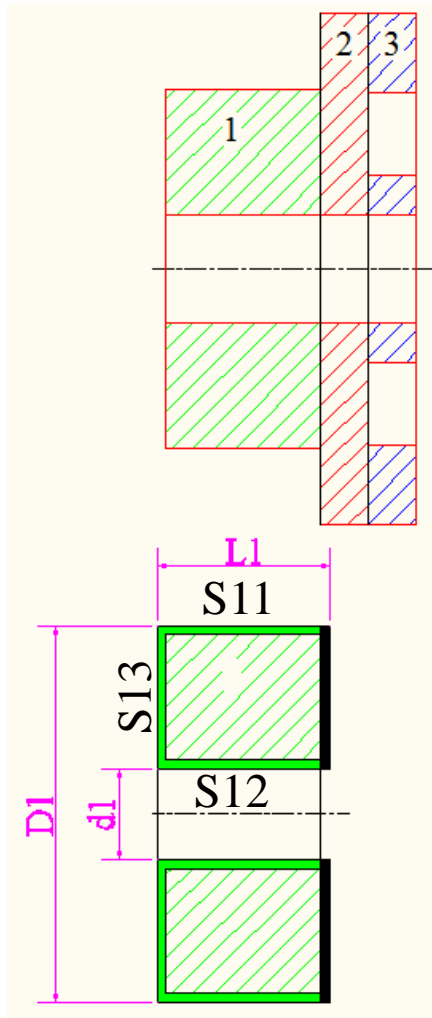
Si parte dal disegno dei sovrametalli ulteriormente semplificato e si suddivide il componente in parti al fine di identificare una direzione preferenziale di solidificazione



Modulo di raffreddamento

$$\frac{\text{Volume della parte}}{\text{Superficie di scambio termico}}$$

Modulo di raffreddamento parte 1



$$D1=150\text{mm}$$

$$d1=51\text{mm}$$

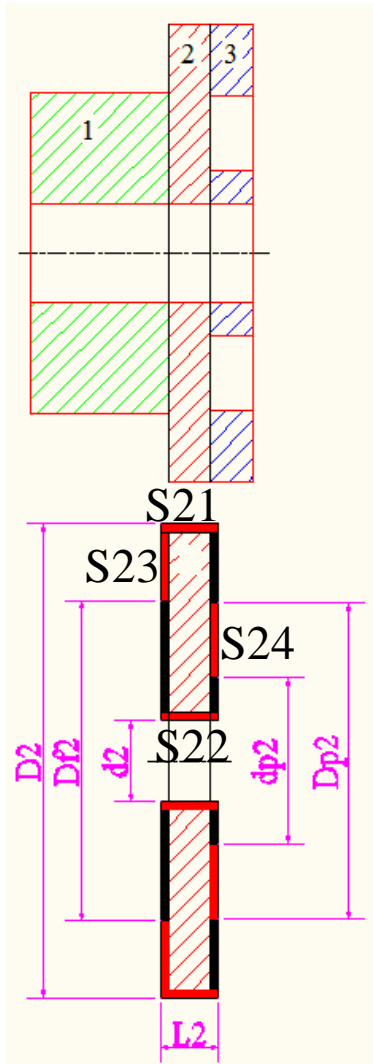
$$L1=66\text{mm}$$

$$V1 = (D1^2 - d1^2) L1 \pi/4 = 1030967\text{mm}^3$$

$$S1 = \underbrace{\pi (D1 + d1) L1}_{S11+S12} + \underbrace{(D1^2 - d1^2) \pi/4}_{S13} = 57276\text{mm}^2$$

$$M1 = 18\text{mm}$$

Modulo di raffreddamento parte 2



$D2=218\text{mm}$
 $Df2=150\text{mm}$
 $d2=51\text{mm}$
 $Dp2=152\text{mm}$
 $dp2=80\text{mm}$
 $L2=20\text{mm}$

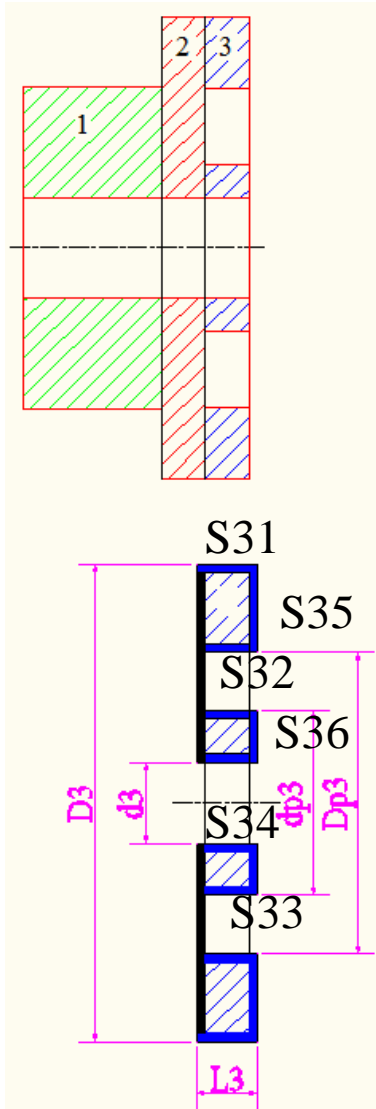
$$V2 = (D2^2 - d2^2) L2 \pi/4 = 705291\text{mm}^3$$

$$S2 = \underbrace{\pi (D2 + d2) L2}_{S21+S22} + \underbrace{(D2^2 - Df2^2) \pi/4}_{S23} + \underbrace{(Dp2^2 - dp2^2) \pi/4}_{S24}$$

$$S2 = 49650\text{mm}^2$$

$$M2 = 14.2 \rightarrow M2 = 14\text{mm}$$

Modulo di raffreddamento parte 3



$$D_3 = 218 \text{ mm}$$

$$d_3 = 51 \text{ mm}$$

$$Dp_3 = 152 \text{ mm}$$

$$dp_3 = 80 \text{ mm}$$

$$L_3 = 21 \text{ mm}$$

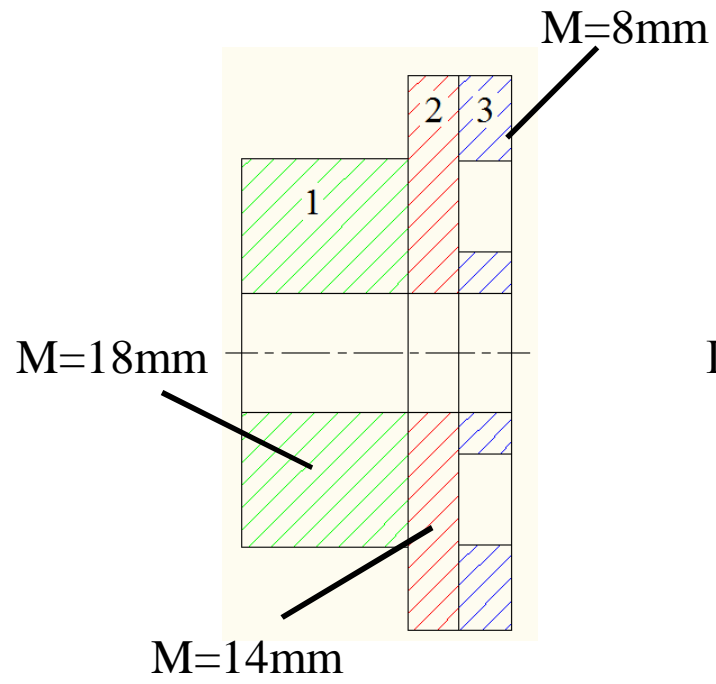
$$V_3 = (D_3^2 - Dp_3^2) L_3 \pi/4 + (dp_3^2 - d_3^2) L_3 \pi/4 = 465190 \text{ mm}^3$$

$$S_3 = \underbrace{\pi (D_3 + Dp_3 + dp_3 + d_3) L_3}_{S_{31}+S_{32}+S_{33}+S_{34}} + \underbrace{(D_3^2 - Dp_3^2) \pi/4}_{S_{35}}$$

$$\underbrace{(dp_3^2 - d_3^2) \pi/4}_{S_{36}} = 55188 \text{ mm}^2$$

$$M_3 = 8.43 \rightarrow M_3 = 8 \text{ mm}$$

Riepilogo



Direzione di solidificazione: $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$

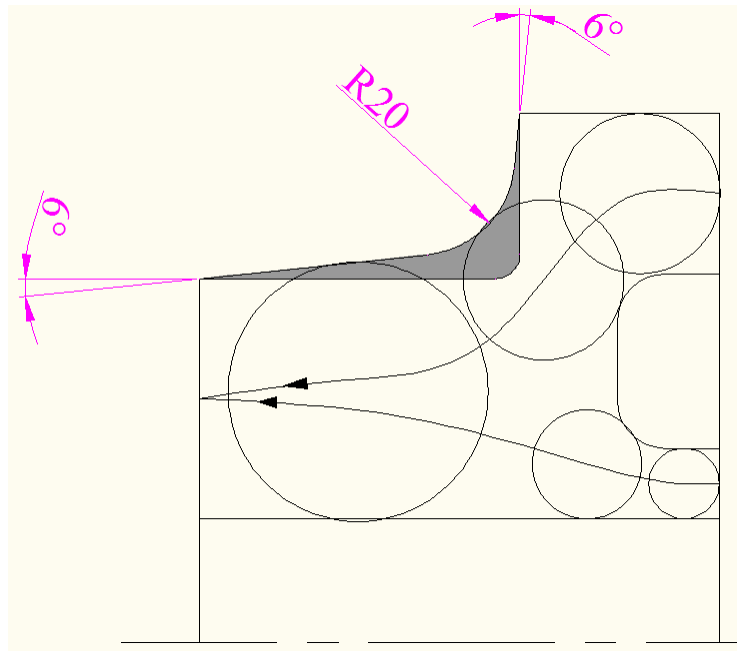
Solidificazione direzionale e cerchi di Heuvers

La solidificazione sembra procedere dalla parte 3 verso la 1:
ogni parte protegge e alimenta quella adiacente in direzione contraria alla
direzione di solidificazione.

$$M1/M2 = 1.28 > 1.1$$

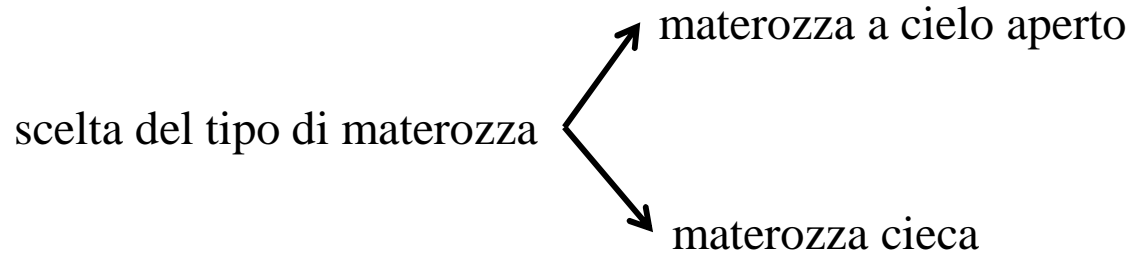
$$M2/M3 = 1.75 > 1.1$$

Per assicurarci che la solidificazione sia direzionale tenendo conto delle varie features
utilizziamo il metodo qualitativo dei cerchi di Heuvers

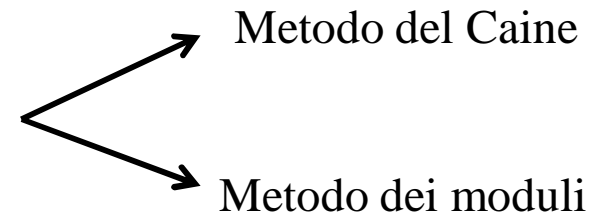


L'analisi condotta con i cerchi di H.
mette in evidenza che l'introduzione di un
ulteriore sovrametallo (in grigio) facilita
la solidificazione direzionale

Scelta della materozza



Dimensionamento



Verifiche

Metodo del Caine → Verifica sul raggio di influenza

Metodo dei moduli → Verifica sul raggio di influenza e sul max volume alimentabile

Dimensionamento della materozza e del collare con il metodo dei moduli

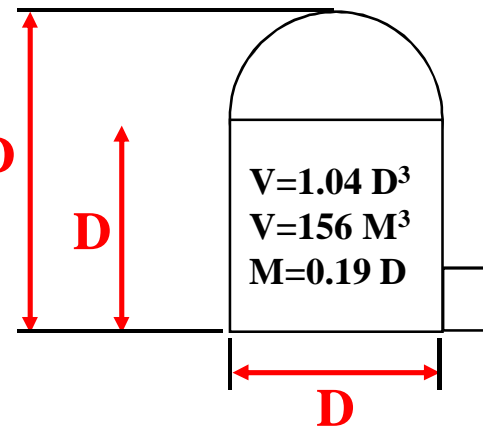
Il modulo della materozza è 1.2 volte il modulo della parte da proteggere

$$M_m = 1.2 M_1 = 22\text{mm}$$

Una materozza cieca emisferica $H=1.5D$
 $M_m = 22\text{mm}$, ha:

- volume $V_m = 1661088\text{mm}^3$
- diametro $D_m = 116\text{mm}$
- altezza $H_m = 174\text{mm}$

Materozza cieca emisferica:
 relazioni $V(M)$ e $D(M)$
 e relazioni geometriche

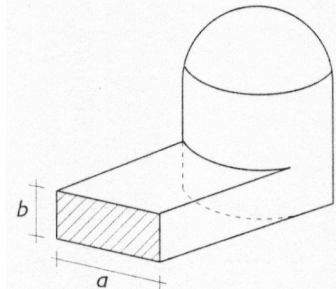


$$V=156 M^3$$

$$V=1.04 D^3$$

$$M=0.19 D$$

$$H=1.5D$$

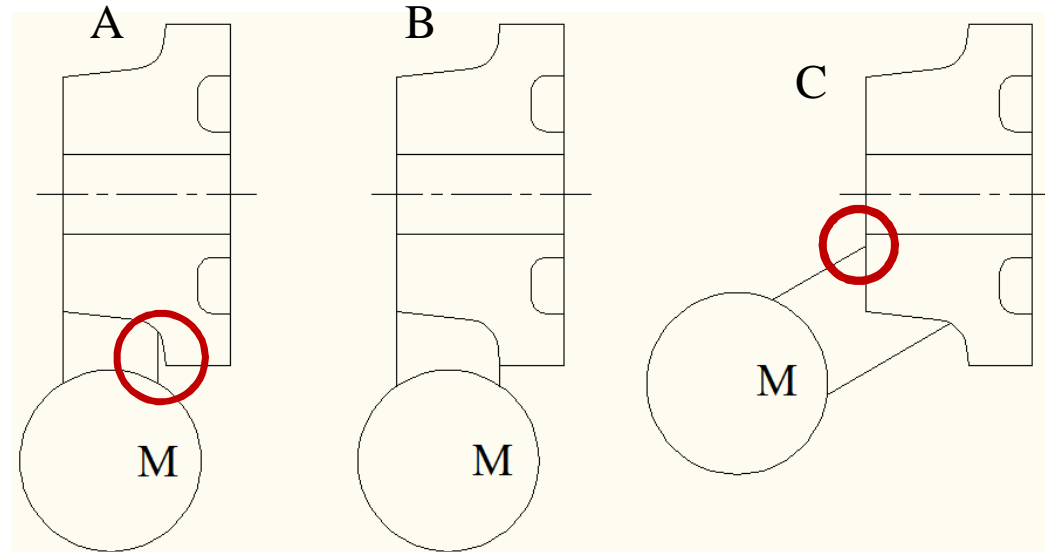


$$M_{\text{collare}} = \frac{a \cdot b}{2(a+b)}$$

$$M_m : M_c : M_1 = 1.2 : 1.1 : 1 \rightarrow M_c = 20\text{mm}$$

$$\text{Fissando } a=66\text{mm} \rightarrow b=102\text{mm}$$

Posizionamento della materozza



Soluzione A: larghezza del collare ridotto, modello semplice, smaterozzata agevole
problemi di formatura nella zona cerchiata di rosso

Soluzione B: larghezza del collare fino al diametro più grande, modello semplice,
smaterozzata difficoltosa.

Soluzione C: collare di attacco che interessa anche la parte frontale, modello più complesso,
smaterozzata agevole

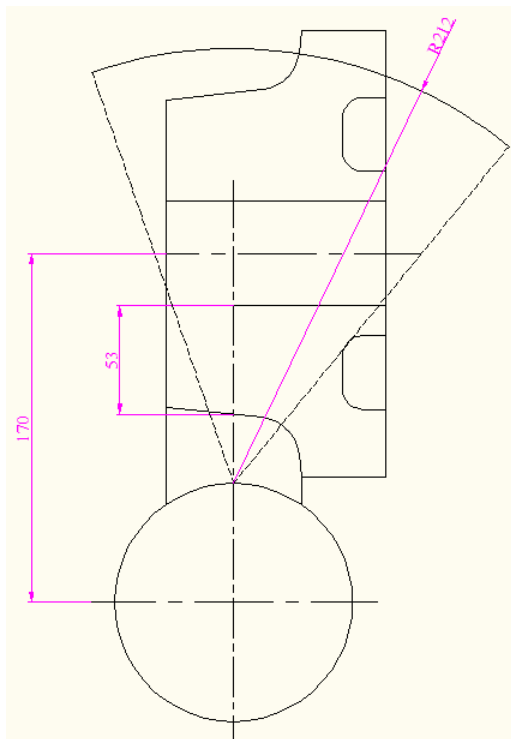
Verifica del raggio di influenza della materozza

Raggio di influenza: distanza entro la quale la materozza può svolgere la sua funzione di alimentare i ritiri nella parte da proteggere impedendo così la formazione di zone isolate da dendriti solidificati (funzione del materiale costituente la lega e dello spessore medio della parte da proteggere).

$$R_{inf} = k \cdot S$$

$k \rightarrow 3.5-5$ per acciaio, 5 per ghisa,
5-8 per bronzo, 5-7 per leghe leggere

$S \rightarrow$ spessore medio della parte da proteggere



Prendendo un valore $k=4$, essendo lo spessore medio 53mm il raggio di influenza assicura che la parte 1 sia alimentabile dalla materozza

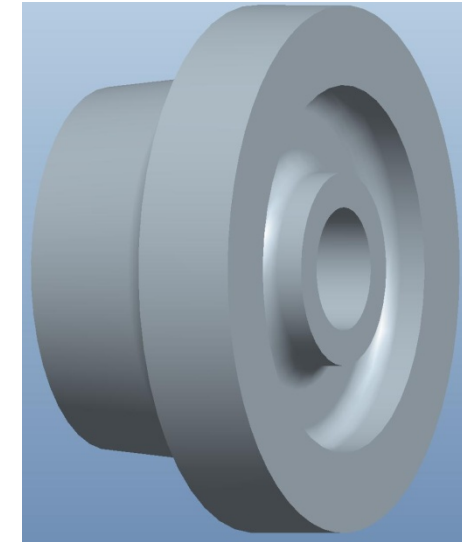
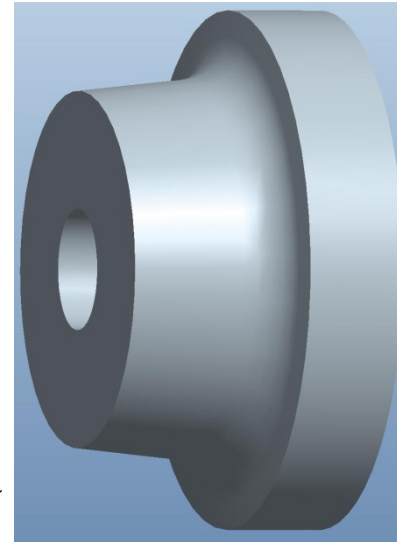
Verifica del massimo volume alimentabile dalla materozza

Trascurando angoli di sformo e raggi di raccordo piccoli e conteggiando anche il collare di attacco:

$$V_p = 2657881 \text{ mm}^3$$

$$V_{pmax} = V_m (20 - b) / b$$

b = coefficiente di ritiro volumetrico della lega



Valori di b	
MATERIALE	$b\%$
Acciai non legati	7
Acciai legati	10
Ghisa bianca	6
Ghisa grigia	
$C_{eq} = 3,5\%$	2-3
$C_{eq} = 4,1\%$	1-2
$C_{eq} > 4,1\%$	1-0.4
Bronzo	4.5
Ottone	6.7
Rame-alluminio	4
Alluminio-silicio	3.5

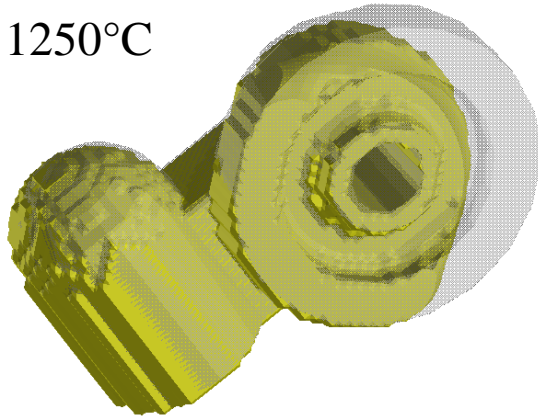
$C_{eq} = C + \frac{1}{3} (Si + P)$
 $c = 1$ nella generalità dei casi
 $c = 0,7 + 0,8$ per materozze coibentate

Nel caso in esame la capacità di alimentazione della materozza è $V_{pmax} = 3084878 \text{ mm}^3$

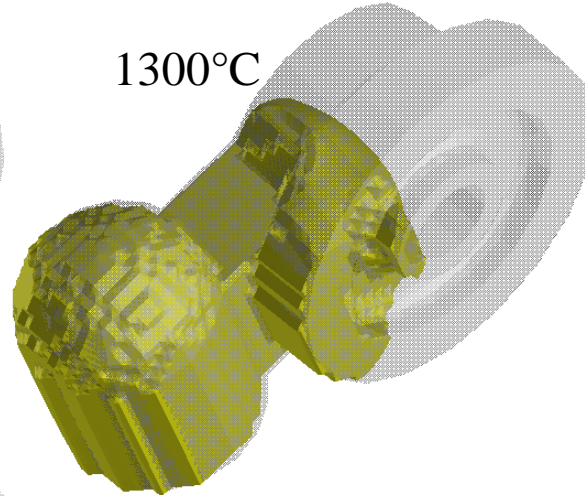
$V_{pmax} > V_p \rightarrow$ La materozza, con il suo volume di liquido, riuscirà ad alimentare la cavità che si formerà a causa del ritiro del getto

Risultati della simulazione con SolidCast

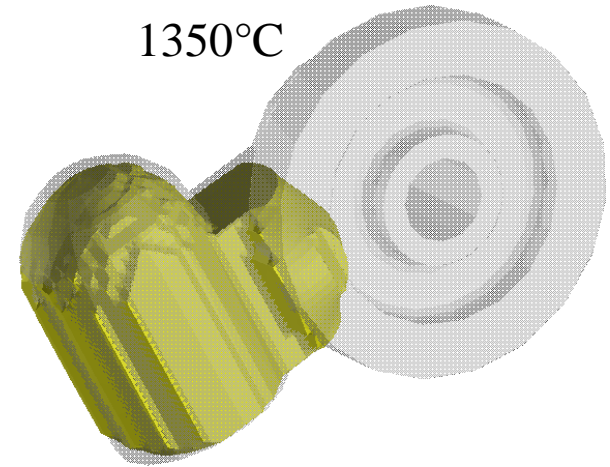
1250°C



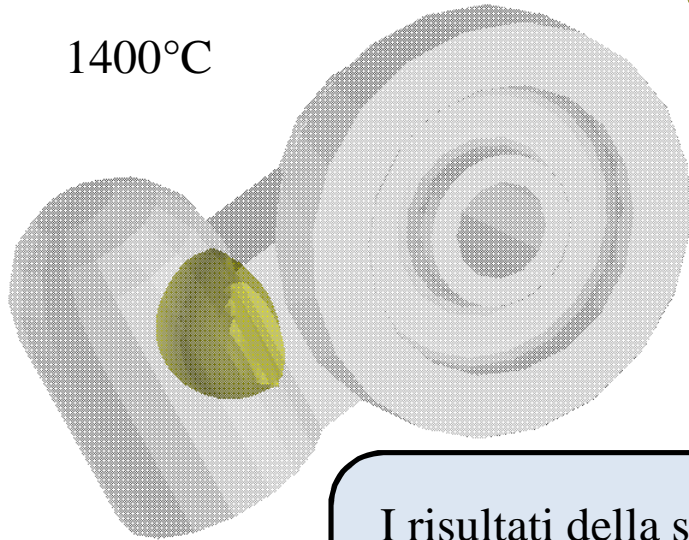
1300°C



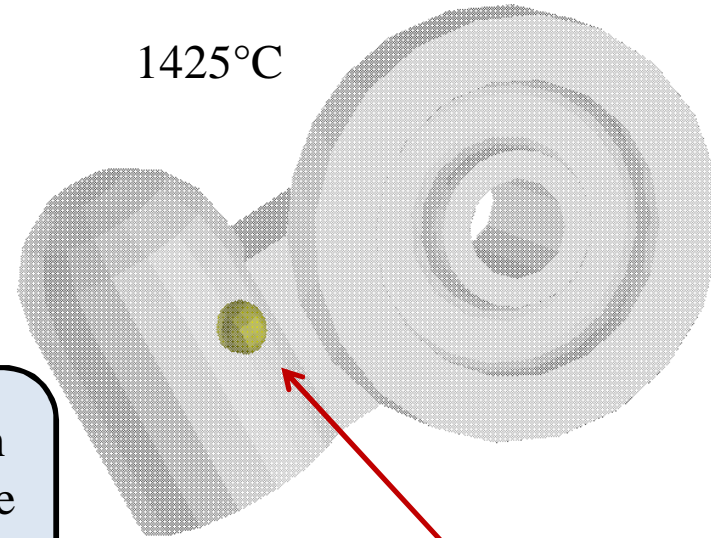
1350°C



1400°C



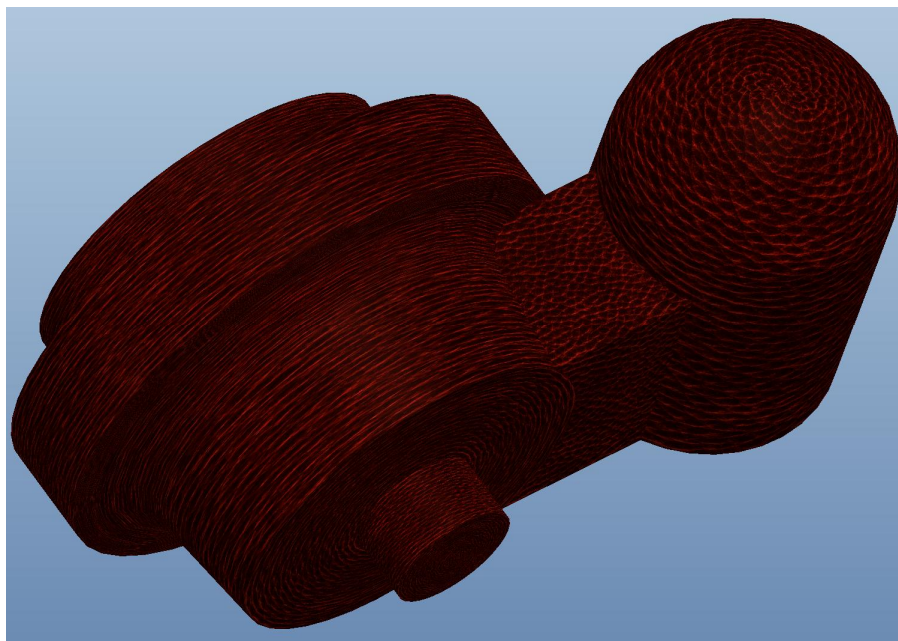
1425°C



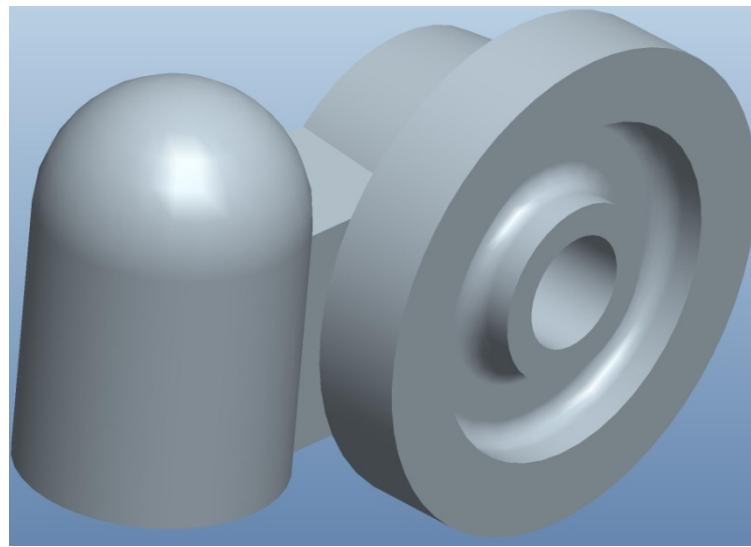
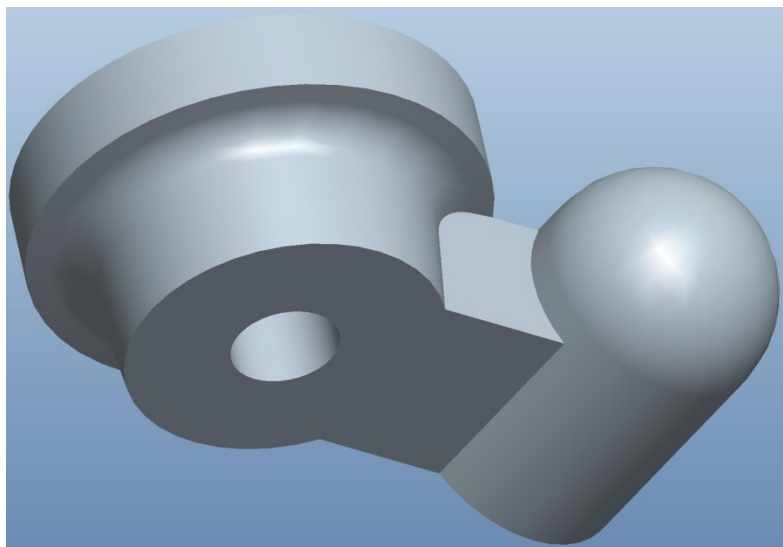
I risultati della simulazione con SolidCast hanno confermato che la materozza riuscirà a proteggere il pezzo

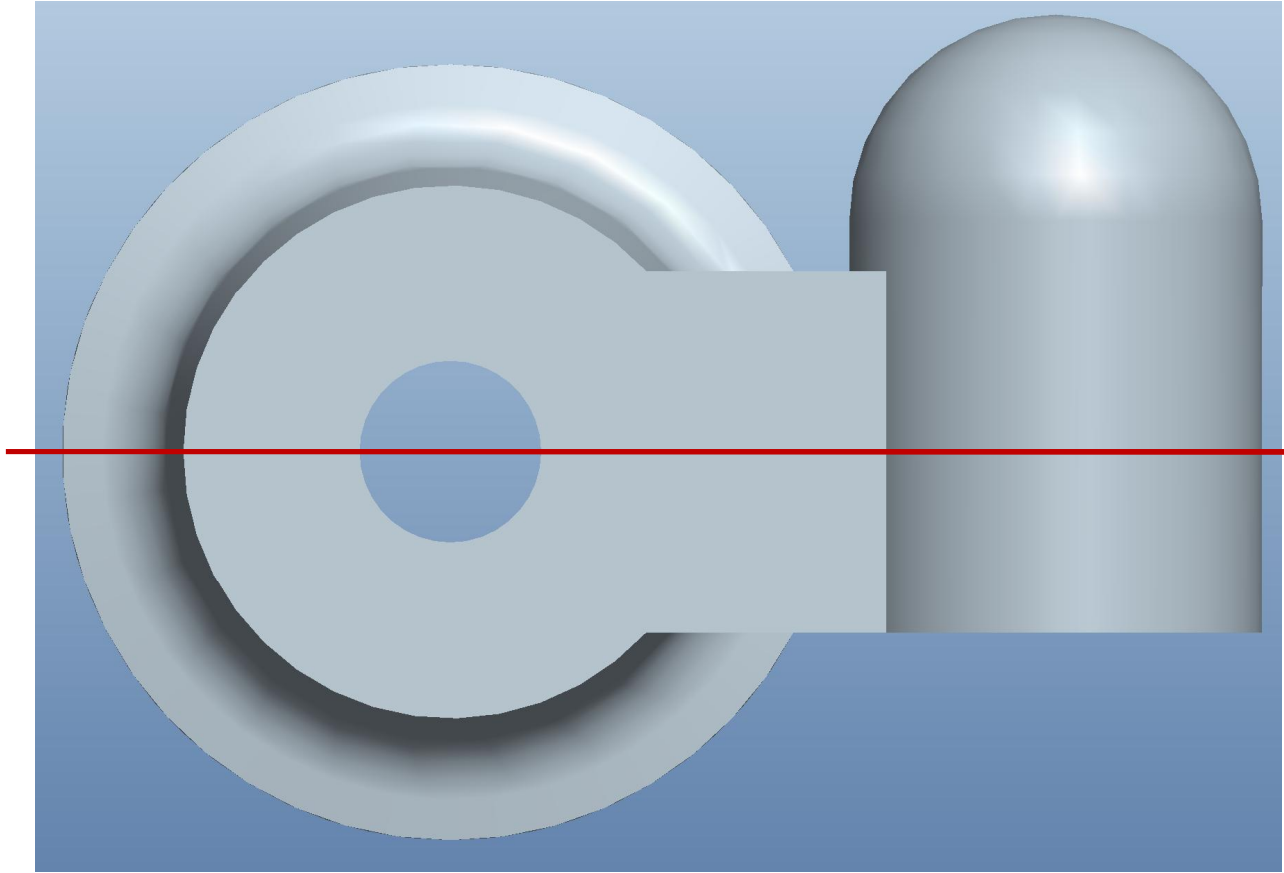
Punto più caldo interno alla materozza

Il modello fino a qui



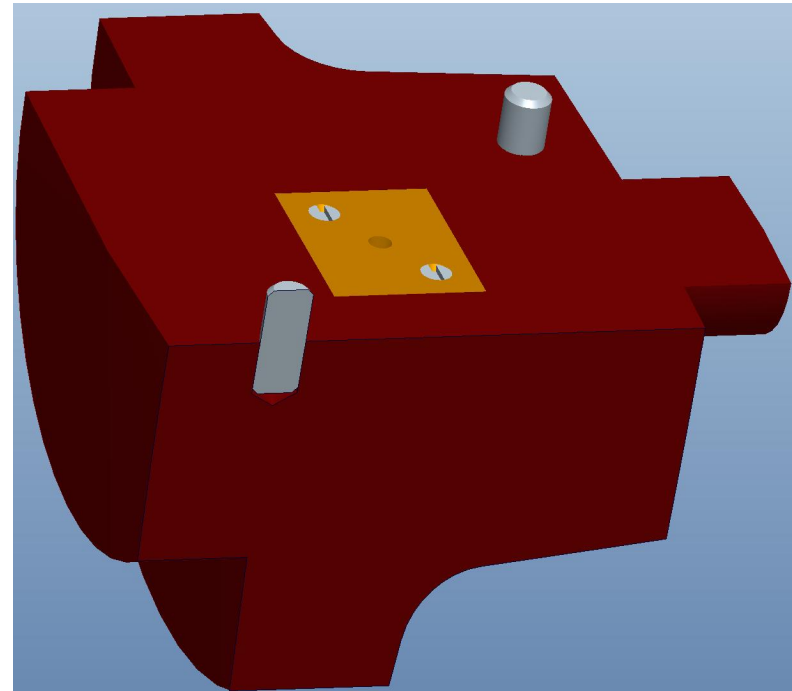
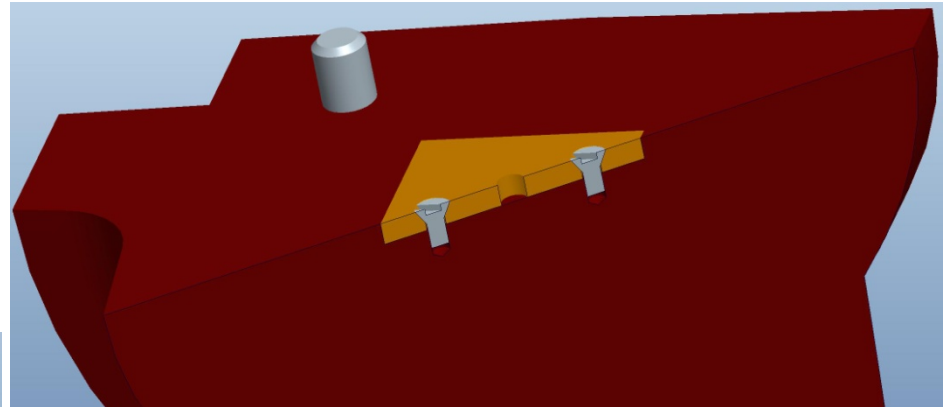
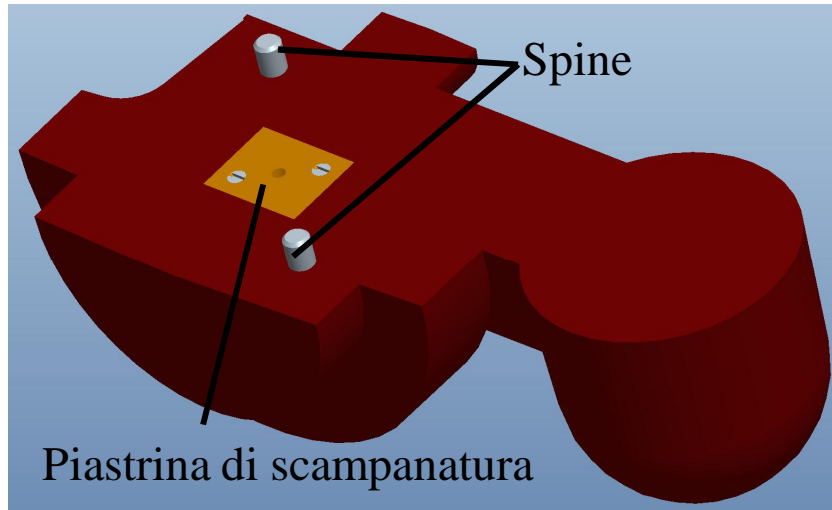
Il greggio fino a qui



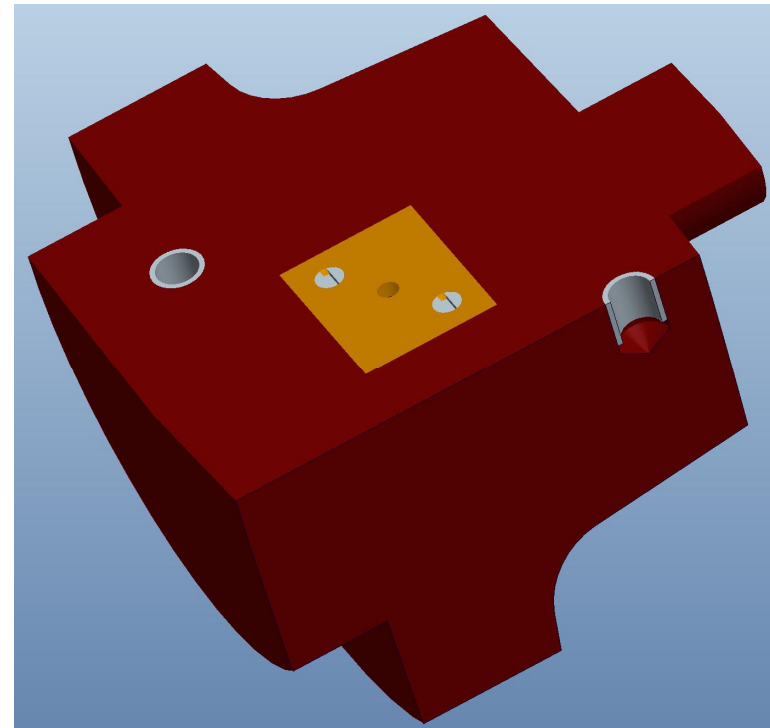
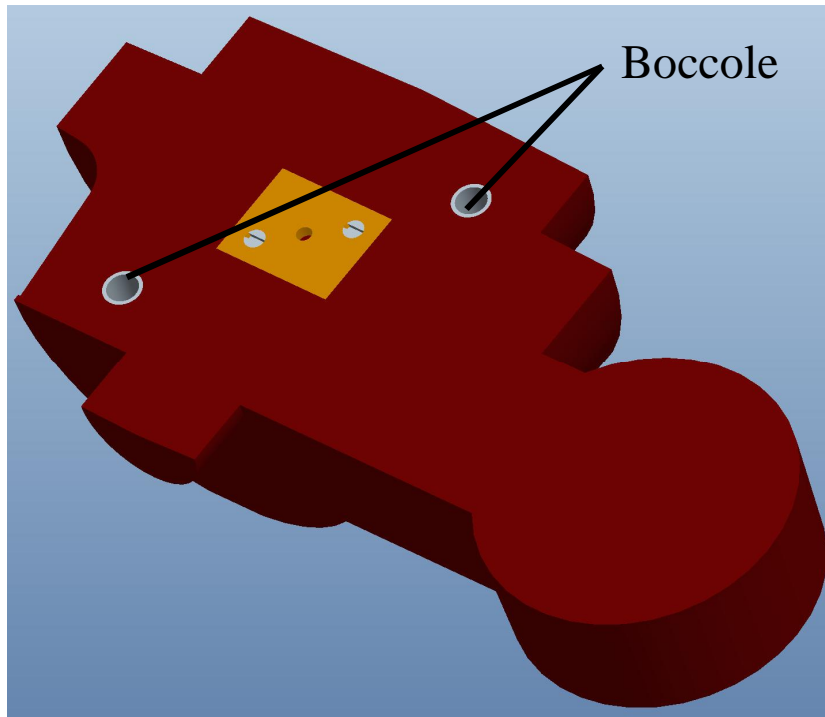


piano di
divisione

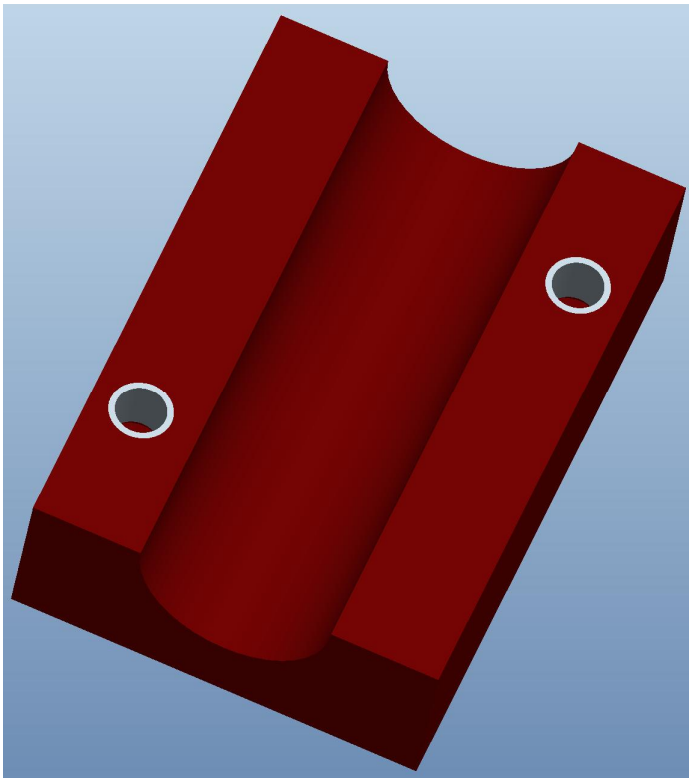
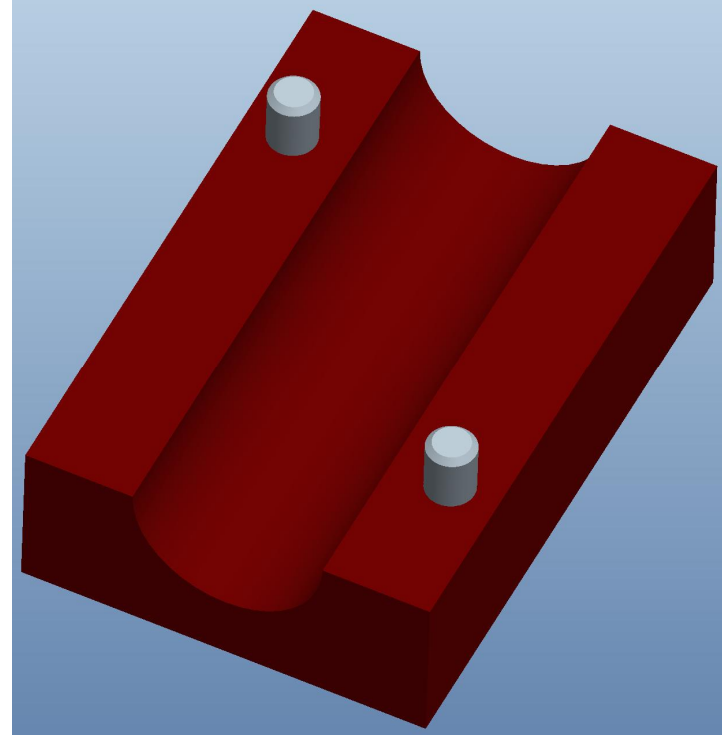
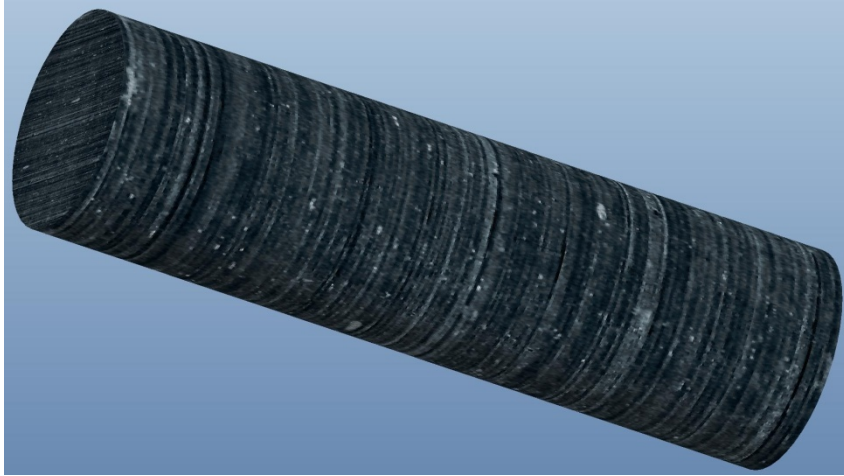
Semimodello superiore



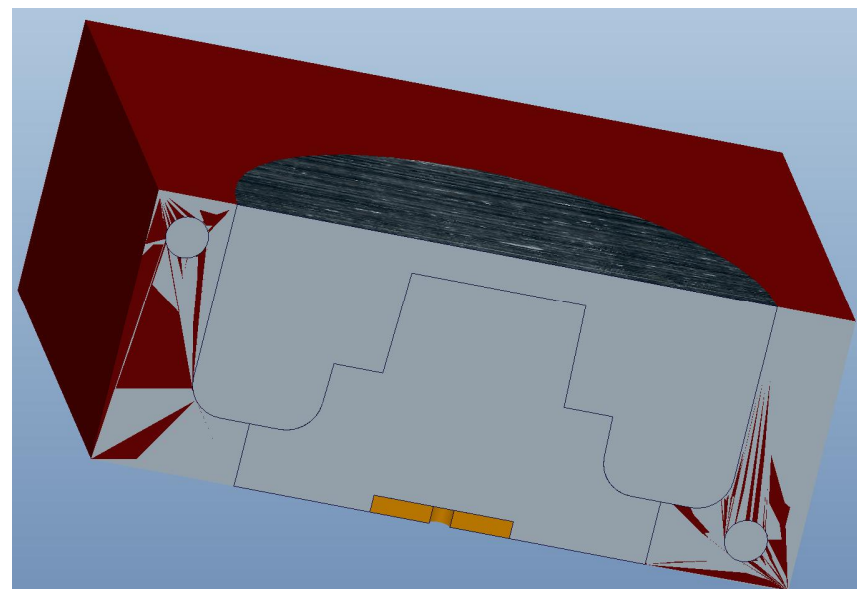
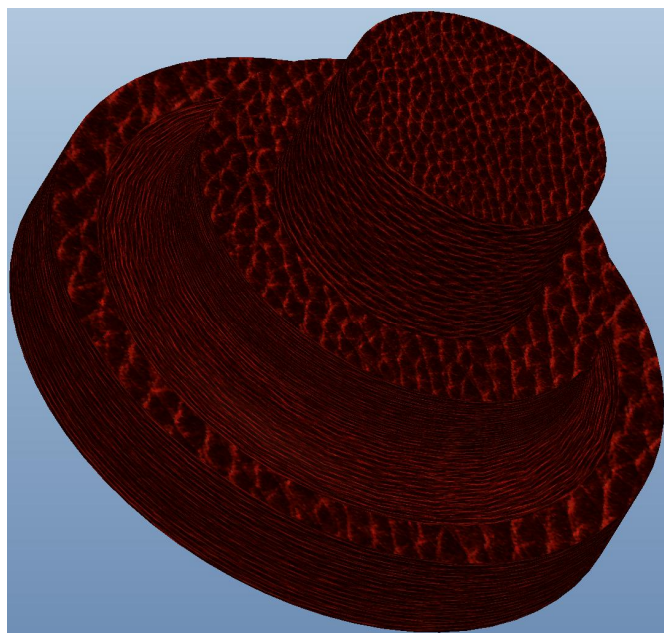
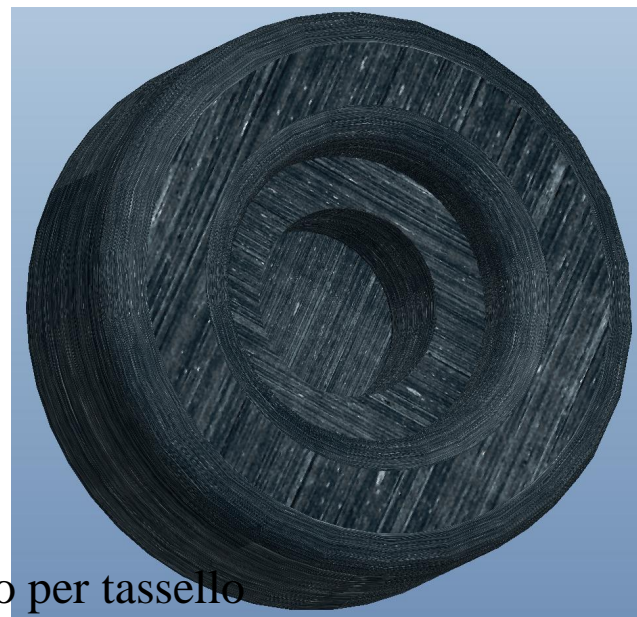
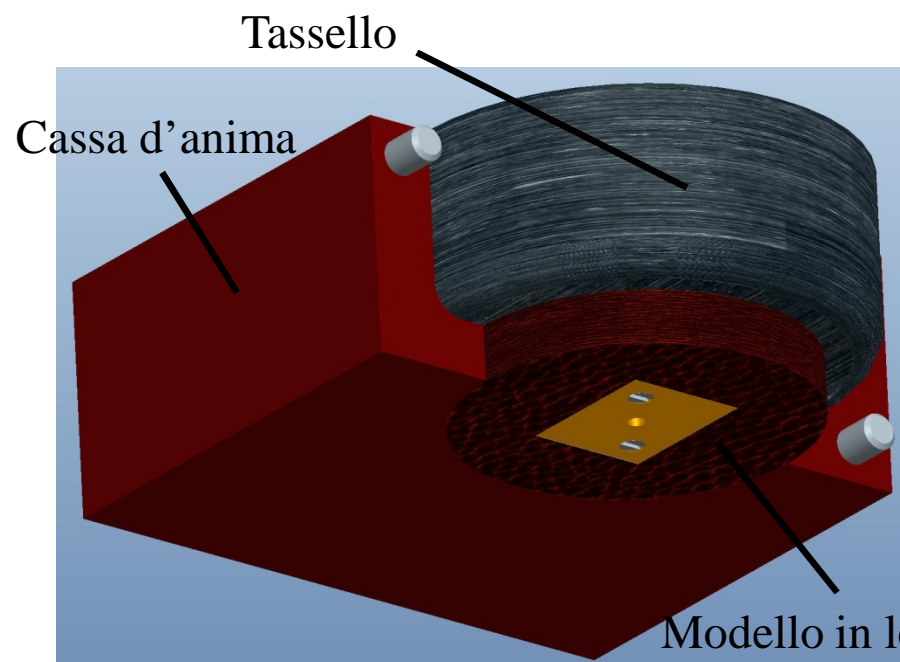
Semimodello inferiore



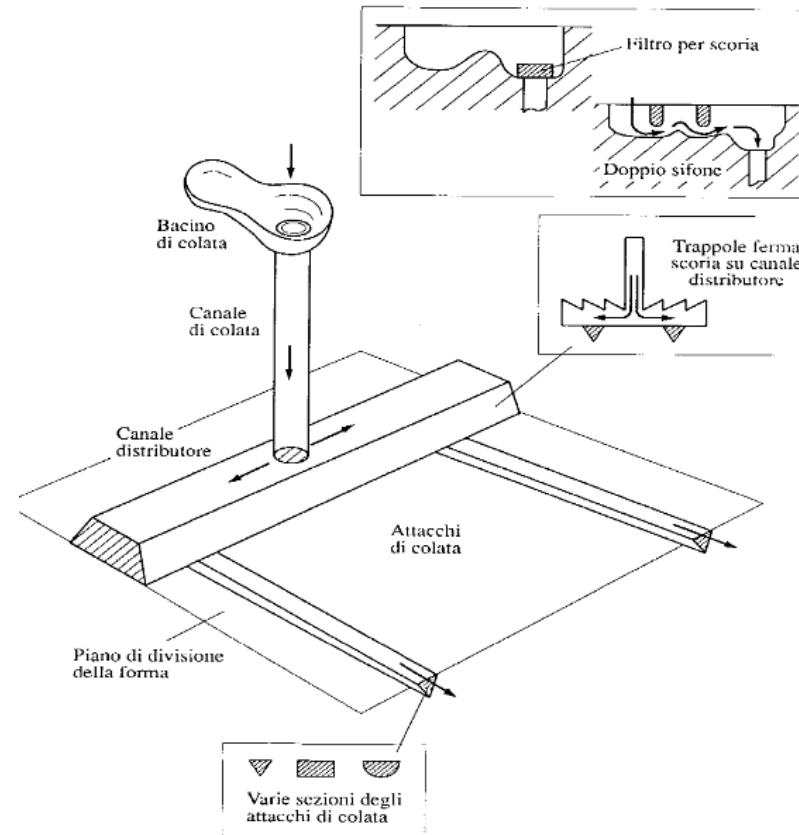
Anima e cassa d'anima



Tassello e cassa d'anima



Scelta del sistema di colata



Scelta delle staffe:

Considerando gli ingombri del modello attuale e tenendo conto in via approssimativa del sistema di colata non ancora introdotto si scelgono le dimensioni delle staffe. In particolare la loro altezza influirà sul dimensionamento del sistema di colata

Per il caso in esame → staffa 400x250x150

Dimensionamento del sistema di colata

Sistema pressurizzato $\rightarrow S_{c.colata} : S_{c.distributore} : S_{a.colata} = 1 : 0.75 : 0.5$

Si ricerca un valore accettabile per la somma delle aree delle sezioni degli attacchi di colata ($S_{a.colata}$) da cui poi si risale alle altre sezioni.

La valutazione della $S_{a.colata}$ si fa in base al *tempo di colata* T_{col}

$T_{col} \rightarrow$ tempo di compromesso in cui si stabilisce debba essere riempita la forma

$T_{col} = 3.2 \sqrt{G}$ dove G è la massa totale del getto comprese materozze e collari [kg]

$$G = \gamma \cdot V_g / 10^{-6} \text{ con } \gamma \text{ [kg/dm}^3\text{]}$$

Per il caso in esame è: $V_g = 4291825 \text{ mm}^3$

$$\gamma = 7.86 \text{ kg/dm}^3$$

$$G = 33.7 \text{ kg}$$

$$T_{col} = 18.6 \text{ sec}$$

Il riempimento della forma deve avvenire approssimativamente in 18.6sec

Dimensionamento degli attacchi di colata

Attraverso gli attacchi di colata deve transitare una massa di 33.7kg in 18.6sec

$$\begin{array}{l} \text{Portata massica } K \begin{cases} \nearrow = G/T_{\text{col}} \\ \searrow = S_{\text{a.colata}} \cdot \gamma \cdot v \end{cases} \end{array} \longrightarrow \text{dove } v \text{ è la velocità della vena fluida all'interno degli attacchi di colata}$$

v è stimabile con il teorema di Torricelli ipotizzando che la vena fluida cada da un'altezza pari a quella della staffa superiore:

$$v = \sqrt{2 g h_{\text{staffa}}} \quad K = G/T_{\text{col}} = \underbrace{S_{\text{a.colata}}}_{\text{incognita}} \cdot \gamma \cdot v \longrightarrow S_{\text{a.colata}} = \frac{G}{T_{\text{col}} \cdot \gamma \cdot v}$$

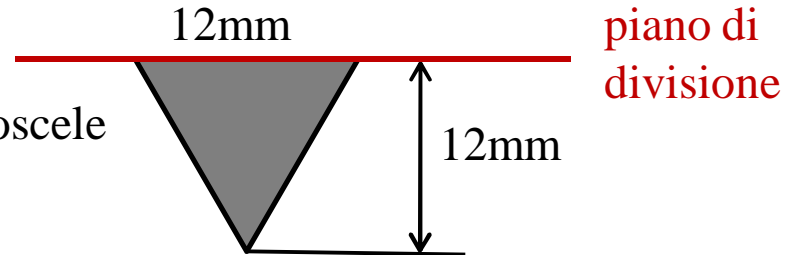
Nel caso proposto: $v = 1710 \text{ mm/sec}$

$$S_{\text{a.colata}} = \frac{33.7 \cdot 10^6}{18.6 \cdot 7.86 \cdot 1710} = 134.8 \text{ mm}^2$$

Dimensionamento degli attacchi di colata

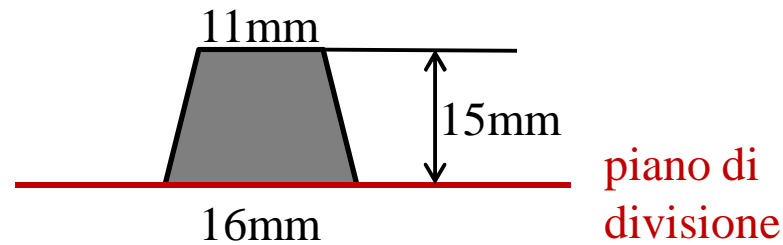
Avendo in questo caso 2 attacchi di colata, la sezione di ciascuno è $S_{a.colata}/2 = 67.4\text{mm}^2$

Attacchi di colata con sezione a triangolo isoscele



Dimensionamento del canale distributore

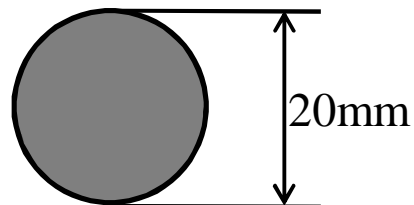
$S_{c.distributore} = 202.2\text{mm}^2$ Sezione a trapezio isoscele



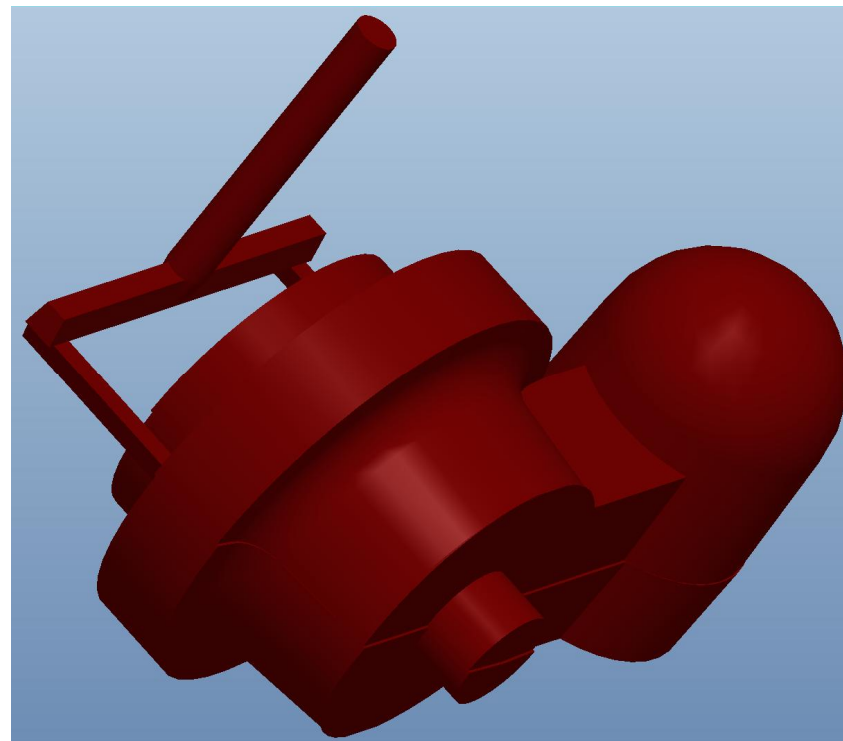
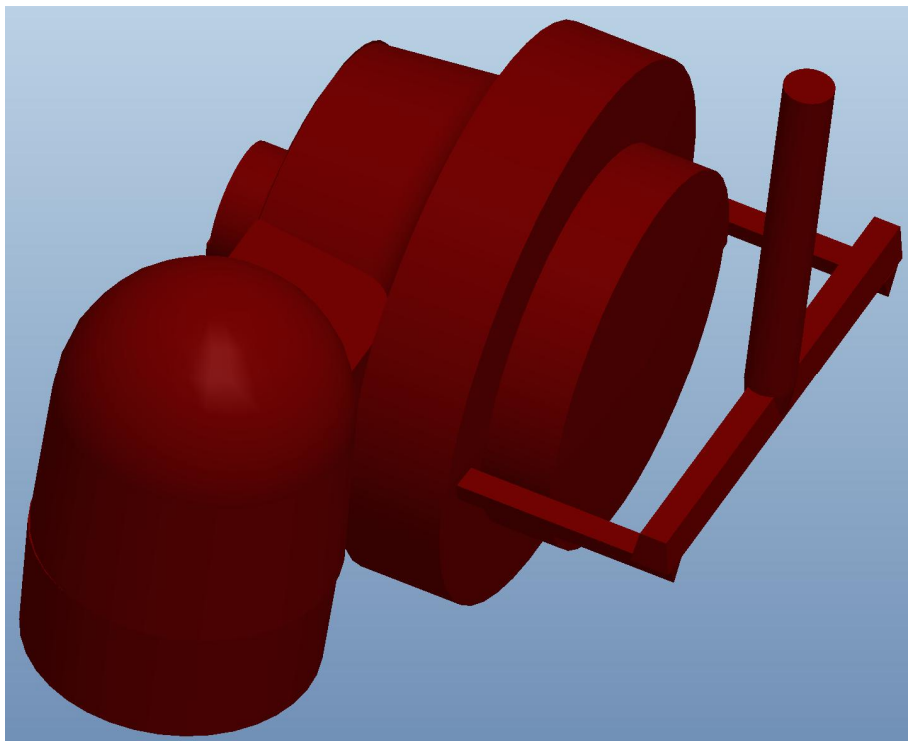
Dimensionamento del canale di colata

$S_{c.colata} = 303.3\text{mm}^2$

Sezione circolare



Il modello con le parti dimensionate

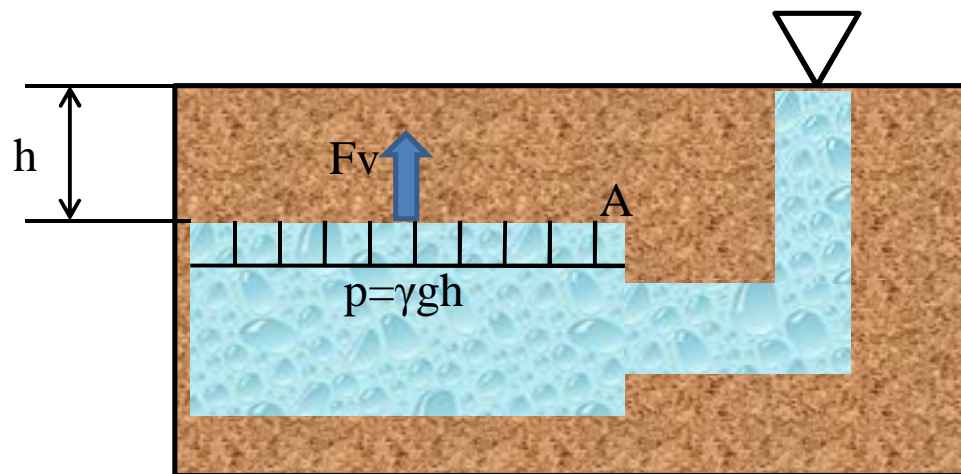


Spinta metallostatica che insiste su superfici semplici di interesse per la fonderia

Su tutte le superfici della forma la spinta metallostatica esercita una pressione funzione della quota rispetto al pelo libero.

Di particolare importanza è la componente verticale sulla staffa superiore che tende così, se non efficacemente contrastata, a sollevarsi dando luogo a difetti nel getto.

Spinta metallostatica su superfici piane

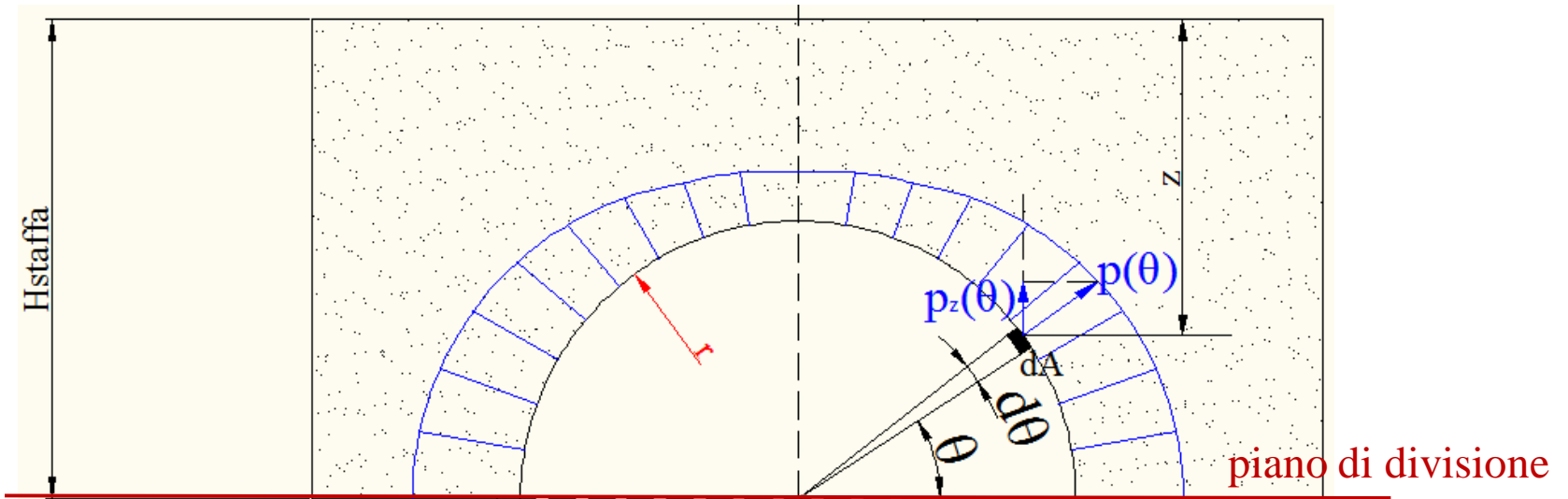


Detta A la superficie piana in figura la spinta metallostatica F_v risulta:

$$F_v = \gamma gh \cdot A$$

Spinta metallostatica su superficie cilindrica

Cavità cilindrica di lunghezza L e raggio r su piano di divisione



$$p(\theta) = \gamma g z(\theta)$$

$$z(\theta) = H_{staffa} - r \sin(\theta) \quad \rightarrow \quad p(\theta) = \gamma g (H_{staffa} - r \sin(\theta))$$

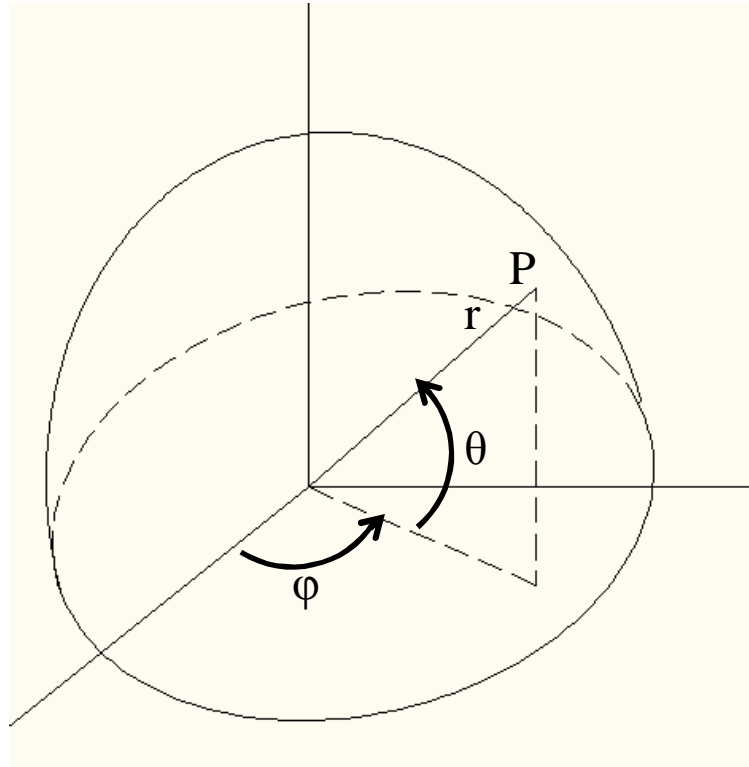
$$F_v = \int_0^\pi \underbrace{\gamma g (H_{staffa} - r \sin(\theta))}_{p_z(\theta)} \underbrace{\sin(\theta) r L d\theta}_{dA}$$

$$F_v = L r \gamma g (2H_{staffa} - r \pi/2)$$

coordinate cilindriche

Spinta metallostatica su superficie emisferica

Cavità emisferica di raggio r con centro a distanza H dal pelo libero



$$p_z(\theta) = \gamma g (H - r \sin(\theta)) \sin(\theta)$$

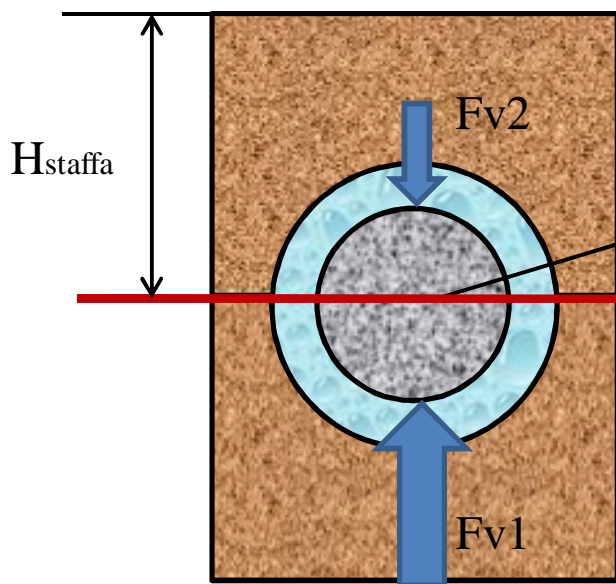
$$dA = (r d\theta) \cdot r \cos(\theta) d\phi$$

↓
coordinate sferiche

$$F_v = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \gamma g (H - r \sin(\theta)) \sin(\theta) r^2 \cos(\theta) d\theta d\phi$$

$$F_v = \pi \gamma g r^2 (H - 2r/3)$$

Spinta metallostatica sulle anime (*principio di Archimede*)



$$F_{v1} > F_{v2}$$

Anima di raggio r e lunghezza in contatto col metallo fuso L

piano di divisione

$$F_v = F_{v1} - F_{v2}$$

$$F_{v1} = \int_0^\pi \gamma g (H_{staffa} + r \sin(\theta)) \sin(\theta) r L d\theta$$

$$F_{v2} = \int_0^\pi \gamma g (H_{staffa} - r \sin(\theta)) \sin(\theta) r L d\theta$$

$$F_v = \underbrace{\gamma g}_{\text{peso specifico del metallo}} \cdot \underbrace{\pi r^2 L}_{\text{volume dell'anima immerso nel metallo liquido}}$$

peso specifico del metallo

volume dell'anima immerso nel metallo liquido

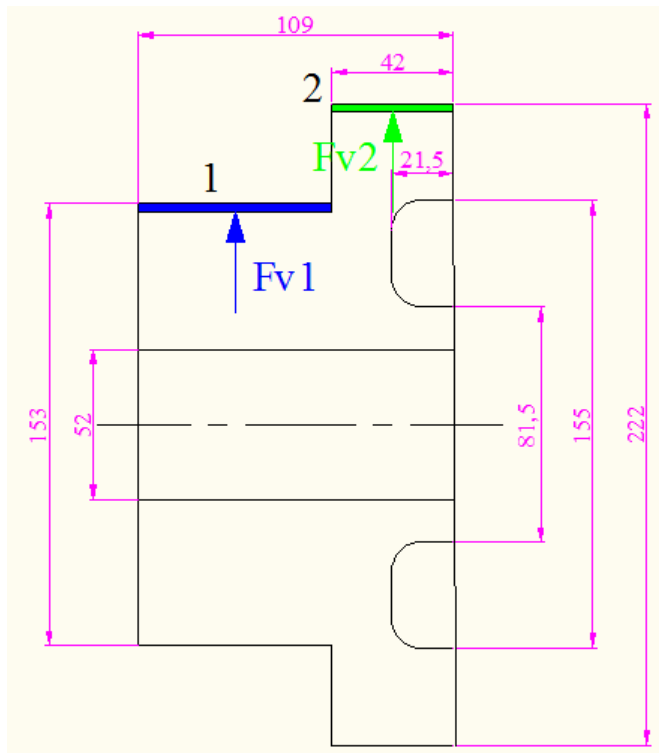


$$F_v = \gamma g \cdot V_{imm} \rightarrow \text{spinta di Archimede}$$

La forza F_v viene scaricata sulla staffa superiore attraverso le portate d'anima

Spinta metallostatica applicata al caso in esame

Si suddivide il getto in forme semplici



Parti cilindriche 1 e 2 $\longrightarrow F_v = L r \gamma g (2H_{\text{staffa}} - r \pi/2)$

Parte 1:

$$L = 67 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r = 76.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_{v1} = 71 \text{ N}$$

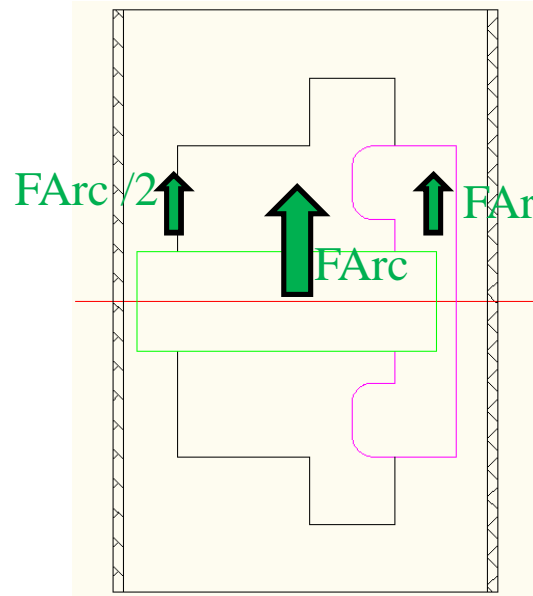
Parte 2:

$$L = 42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r = 111 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_{v2} = 45 \text{ N}$$

Spinta di Archimede sulle anime



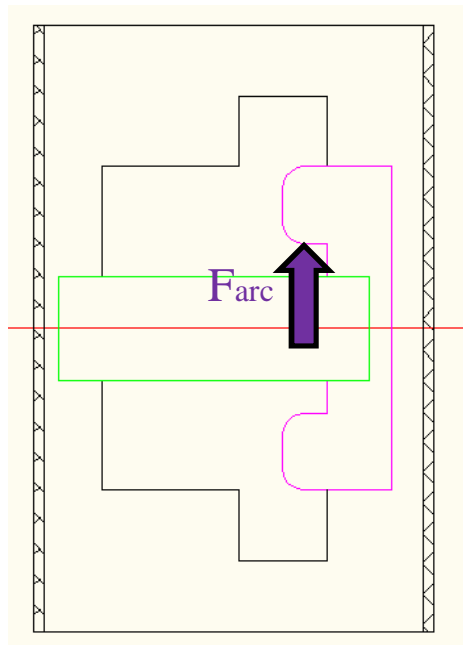
Anima orizzontale $\longrightarrow F_v = \gamma g \cdot V_{imm}$

Anima orizzontale:

$$L = 109 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$F_{arc} = 18 \text{N}$$

$$r = 26 \cdot 10^{-3} \text{m}$$



Tassello $\longrightarrow F_v = \gamma g \cdot V_{imm}$

V_{imm} approssimato ad un anello circolare di spessore 21.5mm, diametro esterno 155mm e interno 81.5mm

$$F_{arc} = 22.6 \text{N}$$

Spinta metallostatica sulla cavità emisferica della materozza

Cavità emisferica

$$r = 58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$H = 85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_v = \pi \gamma g r^2 (H - 2r/3) \longrightarrow F_v = 37.7 \text{ N}$$

La spinta metallostatica si calcola anche su attacchi di colata e canale distributore

