

1222 · 2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Innovazione
del Prodotto

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme
meccanico

Relatore:

Ing. Filippo Zanini

Correlatori:

Dott. Nicolò Bonato

Dott. Elia Sbettega

Laureando:

Filippo Comin

Samuele Castegnaro

Marco Tonin

Pietro Vallarsa

Anno Accademico 2022 - 2023

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

INDICE

Obiettivi.....	5
1. Distinta e descrizione dei componenti.....	7
2. Tolleranze dimensionali	9
2.1 Analisi tolleranza dimensionale biella	9
2.2 Analisi tolleranza dimensionale pistone	10
3. Tolleranze geometriche	13
3.1 Tolleranza di parallelismo assi dei fori piede testa e biella	13
3.2 Tolleranza di perpendicolarità tra asse del foro di testa di biella e fusto di biella	13
3.3 Tolleranza di parallelismo tra fusto di biella e spessore di testa di biella ..	14
3.4 Tolleranza di concentricità tra i fori dello spinotto sul pistone	14
3.5 Tolleranza di cilindricità sul pistone	14
3.6 Tolleranza di perpendicolarità tra asse de pistone e asse dello spinotto	14
4. Tolleranze generali	15
5. Rugosità.....	17
5.1 Rugosità della biella	17
5.2 Rugosità del pistone.....	18
6. Messe in tavola	21
7. Scelta delle materie prime/grezzi	23
7.1 Biella.....	23
7.1.1 Ghisa con grafite sferoidale (GJS).....	24
7.2 Pistone	25
8. Rassegna processi	29
8.1 Colata in conchiglia.....	29
8.1.1 Materiale conchiglia.....	29
8.1.2 Utilizzo vernici.....	30
8.1.3 Durata conchiglia	31
8.2 Colata in guscio.....	32
8.2.1 Materiale da formatura	33
8.3 Colata in terra.....	33

8.4 Pressocolata	34
8.4.1 Schema impianto	36
8.4.2 Materiali stampi.....	38
8.5 Stampaggio	39
8.6 Sinterizzazione laser selettiva (SLS)	40
9. Scelta del processo con giustificazioni	43
9.1 Giustificazione della colata in conchiglia per la produzione della biella.....	43
9.2 Giustificazione del processo di pressocolata per il pistone	45
10. Ciclo di produzione	47
10.1 Ciclo di produzione della biella	47
10.2 Ciclo di produzione del pistone.....	52
11. Analisi tempi e costi di produzione	57
11.1 Analisi biella	57
11.1.1 Calcolo del tempo di colata dalla letteratura	57
11.1.2 Calcolo dei tempi e costi attraverso SolidWorks Costing.....	57
11.2 Analisi pistone.....	61
11.2.1 Calcolo dei costi della pressocolata dalla letteratura	61
11.2.2 Calcolo dei tempi e costi attraverso SolidWorks Costing.....	63
12. Considerazioni finali.....	67
13. Bibliografia	69

OBIETTIVI

La necessità di promuovere una produzione industriale sempre più sostenibile dal punto di vista ambientale, minimizzando allo stesso tempo tempi e costi, richiede di porre un'attenzione particolare alla progettazione ed ottimizzazione del ciclo di produzione.

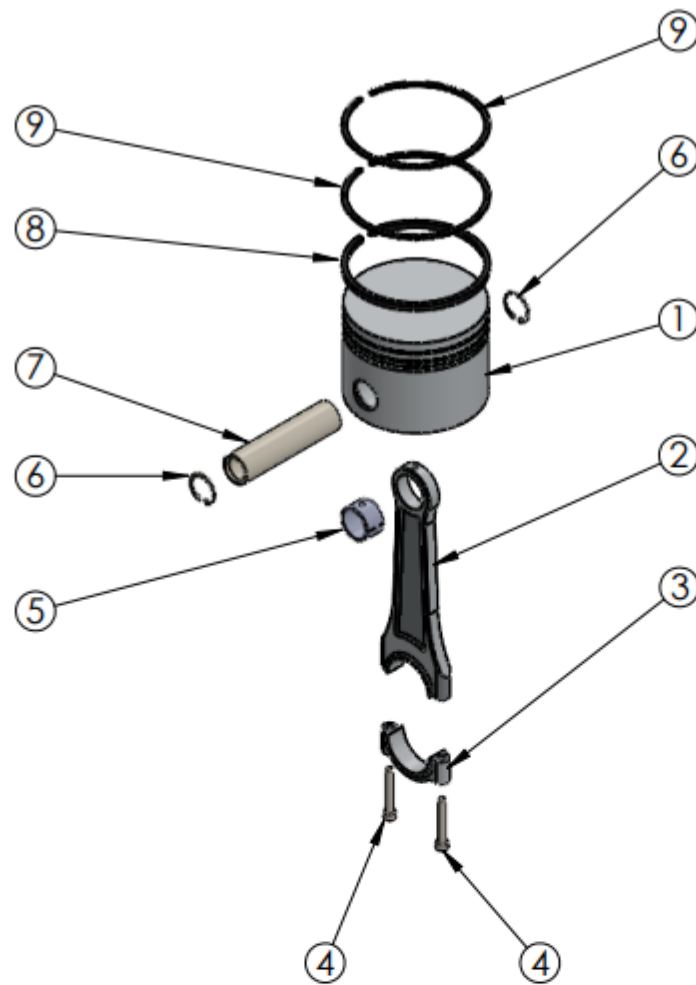
In questo progetto di tesi l'obiettivo consiste nella progettazione del ciclo di produzione di un sistema biella-pistone per la parte termica di un sistema di propulsione ibrido. Considerando il motore in questione composto da quattro cilindri, si stima per quest'ultimo un volume di produzione di 100mila unità all'anno, quindi un totale di 400mila pistoni e altrettante bielle. Di questo assieme si indicheranno le specifiche geometriche, dimensionali e di rugosità superficiale. Sulla base di tali specifiche, si definirà il ciclo di produzione, selezionando le tecnologie più adatte, l'attrezzatura, i materiali grezzi di partenza ed i parametri di processo. Infine, verrà fatta una stima dei tempi e dei costi unitari di produzione per l'intero assieme.

1. DISTINTA E DESCRIZIONE DEI COMPONENTI

- Pistone: è uno dei componenti fondamentali del motore a combustione interna. È dotato di moto rettilineo alternativo e costituisce la parte mobile della camera di combustione ed è quindi progettato per ottimizzare le forze sprigionate durante un ciclo termodinamico.
- Biella: è un elemento meccanico costituito da un'asta rigida che reca alle estremità due cerniere cilindriche ad assi paralleli e che funge da collegamento tra altri due membri cinematici di un meccanismo. Serve a trasformare il moto rotatorio dell'albero motore nel moto traslatorio del pistone.
- Bronzine: anche dette cuscinetti a strisciamento o cuscinetti radenti, sono strumenti cilindrici interposti fra due organi meccanici con accoppiamento rotoidale. Il loro scopo è quello di ridurre l'attrito e l'usura delle superfici che altrimenti verrebbero in contatto diretto fra loro.
- Spinotto: perno di forma cilindrica impiegato come giunto fra biella e pistone che consente il moto rotatorio tra questi due componenti.
- Anelli seeger: anche detti anelli elastici, sono componenti meccanici montati su scanalature apposite che possono essere ricavate sia su superfici cilindriche esterne che all'interno di fori e realizzano il bloccaggio assiale di organi altrimenti liberi di poter traslare. In questo caso impediscono il movimento traslatorio dello spinotto.
- Viti della biella: viti di congiunzione fra il cappello e il fusto di biella.
- Fasce elastiche: anche dette segmenti di tenuta, sono anelli metallici aperti e appiattiti che si posizionano attorno alla superficie laterale del pistone per farlo combaciare alla perfezione con la superficie interna del cilindro e consentendo una migliore tenuta alla pressione durante la realizzazione del ciclo termodinamico che avviene nella camera di combustione.

Oltre a esercitare una funzione di contenimento tra camera di manovella e camera di combustione, le fasce elastiche regolano il film di olio. Gli anelli provvedono infatti alla distribuzione uniforme dell'olio sulla parete del cilindro. L'olio in eccesso viene asportato prevalentemente dall'anello raschiaolio (anello inferiore) ma anche dagli anelli raschianti/di tenuta combinati.

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico



Numero	Prodotto	Quantità
1	Pistone	1
2	Corpo di biella	1
3	Cappello di biella	1
4	Vite M5	2
5	Bronzina	1
6	Seeger I 22 UNI 7437	2
7	Spinotto	1
8	Fascia elastica raschia olio	1
9	Fascia elastica da compressione	2

Figura 1 - Disegno di esplosione e bollatura dell'assieme.

2. TOLLERANZE DIMENSIONALI

La progettazione di un componente meccanico, prevede che a questo sia attribuita una dimensione che è inevitabilmente un valore ideale. Si può infatti immaginare che i procedimenti di lavorazione non consentano di raggiungere con precisione il valore assegnato. Si parla dunque di una dimensione nominale alla quale viene fatta coincidere la linea dello zero.

Per la fabbricazione di un componente meccanico, soprattutto nelle grosse produzioni, non è rilevante la precisione assoluta; è invece necessario che la dimensione effettiva del pezzo sia compresa fra un valore massimo ed un valore minimo. Questo scarto viene definito tolleranza.

Le lavorazioni con tolleranza sono indispensabili per garantire l'intercambiabilità dei pezzi nel sistema di lavorazione in serie, proprio come nel caso di una biella dove è importante e necessaria nel caso di sostituzione.

Per garantire gli accoppiamenti tra le bronzine e la testa e il piede di biella è necessario che la zona di tolleranza dei fori stia totalmente al di sotto della zona di tolleranza degli alberi. Si parla perciò di accoppiamenti con interferenza o stabili. Per i seguenti paragrafi si fa riferimento alle Figura 4 e Figura 5.

2.1 Analisi tolleranza dimensionale biella

Nel piede di biella è stata scelta una tolleranza di grado $IT = 7$ in quanto è un foro e dunque è più difficile effettuare tolleranze spinte e precise in esso, inoltre è una superficie in cui verrà calettata per interferenza una boccola con la funzione di bronzina.

Per il piede di biella sono state scelte le seguenti tolleranze:

Grado di tolleranza $IT = 7$

Scostamenti della tolleranza $H7 = 0; +0.021$

L'intervallo di tolleranza risulta quindi essere 0.021 mm

Le dimensioni limite del foro sono:

$D_{max} = D + E_s = 25 + 0.021 = 25.021$ mm

$D_{min} = D + E_i = 25 + 0 = 25$ mm

con E_s scostamento superiore e D diametro nominale ed E_i scostamento inferiore.

Per la testa di biella è stato impiegato lo stesso grado di tolleranza del piede di biella poiché l'accoppiamento è analogo al caso precedente.

Sono state scelte le seguenti tolleranze:

Grado di tolleranza $IT = 7$

Scostamenti della tolleranza $H7 = 0; +0.025$

L'intervallo di tolleranza risulta quindi essere 0.025 mm

Le dimensioni limite del foro sono:

$D_{\max} = D + E_s = 38 + 0.025 = 38.025 \text{ mm}$

$D_{\min} = D + E_i = 38 + 0 = 38 \text{ mm}$

con E_s scostamento superiore e D diametro nominale ed E_i scostamento inferiore. La tolleranza sull'interasse tra i due fori è correlata al grado di precisione della fresa utilizzata per modellare lo stampo. Essendo la misura dell'interasse pari a 155 mm , uno scarto di 0.05 mm è compatibile con i macchinari moderni e adeguato ad un corretto funzionamento del sistema biella-pistone.

Infine, sullo spessore della testa di biella va imposta una tolleranza dimensionale poiché andrà accoppiata con gioco all'albero. Una tolleranza accettabile a seguito di una lavorazione di fresatura è di 0.05 mm .

2.2 Analisi tolleranza dimensionale pistone

Per quanto riguarda il pistone, le tolleranze dimensionali vengono assegnate alle parti che devono garantire il perfetto funzionamento del meccanismo.

Sull'alesaggio, che misura 96.40 mm , viene imposta una tolleranza simmetrica di 0.02 mm poiché è una tolleranza raggiungibile con una lavorazione di tornitura standard.

Altre tolleranze fondamentali, poste pari a 0.1 mm , vanno poste sia sulle scanalature delle fasce elastiche (sia sul diametro che sullo spessore) che sulle scanalature che accolgono i seeger per impedire il movimento assiale dello spinotto.

Infine, va posta una tolleranza sul diametro del foro dove alloggerà lo spinotto:

Grado di tolleranza $IT = 7$

Scostamenti della tolleranza $H7 = 0; +0.021$

L'intervallo di tolleranza risulta quindi essere 0.021 mm

Le dimensioni limite del foro sono:

$D_{\max} = D + E_s = 22 + 0.021 = 22.021 \text{ mm}$

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

$$D_{\min} = D + E_i = 22 + 0 = 22 \text{ mm}$$

con E_s scostamento superiore e D diametro nominale ed E_i scostamento inferiore.

3. TOLLERANZE GEOMETRICHE

Le zone di tolleranza geometrica definiscono le porzioni di spazio (2D o 3D) di forma perfetta entro cui le superfici reali devono stare per essere accettate. L'elemento geometrico reale posto in tolleranza può assumere qualsiasi forma ed orientamento all'interno della propria area di tolleranza. Individuata l'opportuna zona di tolleranza, l'unico modo in cui si può controllare l'andamento effettivo (di forma, orientamento e posizione) dell'elemento geometrico reale è restringere la tolleranza. Con la norma UNI ISO 8015 del 1989, in mancanza di indicazioni specifiche, le tolleranze geometriche si applicano senza tenere conto delle dimensioni dell'elemento, e le sue prescrizioni (dimensionali e geometriche) devono essere trattate come esigenze tra loro indipendenti.

3.1 Tolleranza di parallelismo assi dei fori piede testa e biella

Tra piede e testa di biella va imposta la tolleranza geometrica di parallelismo fra l'asse dei due fori. Con riferimento all'asse del foro di testa, si impone che l'asse del foro del piede sia compreso in una zona di tolleranza identificata da un cilindro di diametro $\varnothing 0.03$ mm.

In questo modo si garantisce un certo grado di parallelismo fra i due fori, che in questo caso è di buona precisione. Questa tolleranza geometrica è fondamentale per il corretto funzionamento e per estendere la vita del componente stesso e dei componenti ad esso accoppiati.

3.2 Tolleranza di perpendicolarità tra asse del foro di testa di biella e fusto di biella

Per un corretto funzionamento del meccanismo biella-pistone, va imposta una tolleranza di perpendicolarità tra l'asse del foro della testa di biella e il fusto di biella. Questa tolleranza garantisce soli sforzi assiali nella biella, evitando la comparsa di dannosi momenti sui diversi componenti. L'asse del foro, a cui è unito il riquadro della tolleranza, deve essere compreso tra due piani paralleli distanti 0.04 mm e perpendicolari alla superficie del fusto.

3.3 Tolleranza di parallelismo tra fusto di biella e spessore di testa di biella

Per il corretto accoppiamento tra biella, albero motore e bronzina, si deve imporre una tolleranza di parallelismo tra fusto di biella e spessore di testa di biella. Le superfici soggette a tolleranza devono essere comprese tra due piani paralleli distanti 0.05 mm e paralleli al piano di riferimento, ovvero quello su cui giace il fusto di biella.

3.4 Tolleranza di concentricità tra i fori dello spinotto sul pistone

Per consentire l'inserimento dello spinotto e il suo corretto funzionamento, dev'essere garantita la concentricità tra i due fori. L'asse del cilindro, la cui linea di misura è unita al riquadro della tolleranza, dev'essere compreso in zona cilindrica avente diametro $\varnothing 0.08$ mm coassiale all'asse di riferimento A-B.

3.5 Tolleranza di cilindricità sul pistone

Il requisito di cilindricità specifica quanto precisamente circolare e diritto è un cilindro target. Nel caso in esame il valore rappresenta l'eventuale distorsione del pistone.

La superficie laterale del pistone dev'essere compresa tra due cilindri coassiali distanti tra loro 0.05 mm.

3.6 Tolleranza di perpendicolarità tra asse del pistone e asse dello spinotto

Per garantire l'assialità degli sforzi durante il ciclo, viene applicata una tolleranza di perpendicolarità tra l'asse del pistone e l'asse dello spinotto. L'asse del foro, a cui è unito il riquadro della tolleranza, deve essere compreso tra due piani paralleli distanti 0.04 mm e perpendicolari all'asse del pistone.

4. TOLLERANZE GENERALI

Per le quote che non presentano tolleranze dimensionali e geometriche vengono impiegate tolleranze generali per le dimensioni lineari e per gli scostamenti limite ammessi per le dimensioni angolari, previsti dalla norma UNI ISO 22768/1, riportati nella Tabella 1 e 2.

Descrizione della Normativa En-22768 ISO-2768

Tipo di lavorazione	Riferimento Normative ISO
Pezzi ricavati con asportazione di materiale (tornitura – fresatura – filettatura – bocciatura – ecc.)	UNI EN-ISO 22768-mK
Lamiere piegate e tranciate	UNI EN-ISO 22768-vL

Classe di tolleranza		Scostamenti limite per dimensioni fondamentali							
Designazione	Denominazione	Da 0,5 Fino a 3	Oltre 3 Fino a 6	Oltre 6 Fino a 30	Oltre 30 Fino a 120	Oltre 120 Fino a 400	Oltre 400 Fino a 1000	Oltre 1000 Fino a 2000	Oltre 2000 Fino a 4000
f	fine	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5	-
m	media	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
c	grossolana	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
v	molto grossolana	-	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 4	± 6	± 8
Classe di tolleranza		Scostamenti limite per dimensioni angolari							
Designazione	Denominazione	Fino a 10	Oltre 10 fino a 50	Oltre 50 fino a 120	Oltre 120 fino a 400	Oltre 400			
f	fine	± 1°	± 0° 30'	± 0° 20'	± 0° 10'	± 0° 5'			
m	media								
c	grossolana	± 1° 30'	± 1°	± 0° 30'	± 0° 15'	± 0° 10'			
v	molto grossolana	± 3°	± 2°	± 1°	± 0° 30'	± 0° 20'			

Tabella 1 - Tolleranze dimensionali generali

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

Classe	Tolleranze generali di rettilinearità e planarità (campi di dimensioni in mm)					
	Fino a 10	Oltre 10 fino a 30	Oltre 30 fino a 100	Oltre 100 fino a 300	Oltre 300 fino a 1000	Oltre 1000 fino a 3000
H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6

Classe	Tolleranze generali di perpendicolarità (per campi di lunghezze del lato minore)			
	Fino a 100	Oltre 100 fino a 300	Oltre 300 fino a 1000	Oltre 1000 fino a 3000
H	0,2	0,3	0,4	0,5
K	0,4	0,6	0,8	1,0
L	0,6	1,0	1,5	2

Tabella 2 - Tolleranze geometriche generali di rettilinearità, planarità e perpendicolarità

Nel caso in esame, sia per la biella che per il pistone, si fa riferimento alla normativa En-22768 ISO-2768, che per pezzi ricavati con asportazione di materiale viene imposta una tolleranza generale di media precisione siglata UNI EN-ISO 22768-mK.

5. RUGOSITA'

La rugosità è la proprietà che ha una superficie di un corpo costituita da micro-imperfezioni geometriche intrinseche o risultanti da lavorazioni meccaniche; tali imperfezioni si presentano generalmente in forma di solchi o scalfitture, di forma, profondità e direzione variabili.

La rugosità di una superficie può essere misurata mediante strumenti denominati rugosimetri. Il procedimento di misura della rugosità consiste nella registrazione del profilo della superficie ottenuto lungo una determinata linea di misura; tale profilo viene poi analizzato definendo un parametro numerico che costituisce la misura della rugosità. Parte fondamentale del processo di calcolo dei vari parametri di rugosità è l'operazione di filtraggio che consente di ottenere una misura della sola qualità della superficie, depurata dagli effetti che gli errori di geometria del pezzo hanno sul profilo misurato. La misura della rugosità R_a , espressa in micron, è il valore medio aritmetico degli scostamenti (presi in valore assoluto) del profilo reale della superficie rispetto alla linea media. Tale misura è riferita ad una lunghezza di base del profilo analizzato per evitare l'influenza di altri tipi di irregolarità.

5.1 Rugosità della biella

Sul piede e sulla testa di biella è posta una rugosità per asportazione di truciolo pari a $0.8 \mu\text{m}$. Tale valore è giustificato dal fatto che queste superfici non necessitano di una finitura più spinta poiché entreranno in contatto con interferenza con le bronzine. Questa rugosità può essere ottenuta attraverso differenti lavorazioni:

- una fresatura spinta in termini di precisione e quindi di finitura superficiale;
- una rettifica di media precisione;
- una foratura con successiva barenatura;
- un'alesatura di media precisione.

In termini di riduzione di tempi e di costi, la lavorazione più conveniente risulta essere la foratura seguita da una barenatura.

Questo valore di rugosità pari a $0.8 \mu\text{m}$ è perfettamente compatibile con le tolleranze prescritte non causando uscite dal campo di tolleranza che è $0 \text{ mm}; +0.021 \text{ mm}$ per il

piede di biella e di 0 mm; +0.025 mm per la testa di biella rispettivamente alla quota di Ø25 mm e Ø38 mm perché la rugosità essendo 0.0008 mm va a modificare la quarta cifra dopo la virgola.

Per quanto riguarda le superfici laterali della biella, non si ha la necessità di avere una finitura spinta; pertanto, si mantiene una rugosità di 1.6 µm data da un'operazione di fresatura. Tale valore ricade perfettamente all'interno dell'intervallo delle rugosità tipiche della fresatura.

Infine, tutte le altre superfici della biella, non essendo lavorate, mantengono la rugosità data dal processo di colata in conchiglia che tipicamente vale 6.3 µm. Questo valore per quanto grossolano non compromette il perfetto funzionamento della biella.

5.2 Rugosità.del.pistone

Per ottenere i fori dove alloggia lo spinotto si impiegano due lavorazioni: una foratura ed una barenatura. Quest'ultima garantisce un valore di rugosità di 1.6 µm, perfettamente coerente per l'accoppiamento con lo spinotto. Lo stesso valore di rugosità viene adottato anche per la superficie laterale del pistone; in questo caso tale finitura, sebbene possa

Rugosità		Applicazioni
µm	µin	
0,025 ÷ 0,05	1 ÷ 2	Piani di appoggio di micrometri, specchi e blocchi di riscontro, facce di calibri d'officina, piani di appoggio e comparatori.
0,1 ÷ 0,2	4 ÷ 8	Facce di calibri a corsoio, perni di articolazione, utensili di precisione, cuscinetti super finiti, accoppiamenti stagni ad alta pressione a tenuta di liquido, superfici levigate di tenuta senza guarnizione, superfici lappate senza segni di lavorazione visibile, sopporti di alberi a gomiti e alberi a camme, perni di biella, cilindri pompe idrauliche, cuscinetti precisi, guide di macchine utensili.
0,4	16	Alberi scanalati, cuscinetti per alberi motori, stantuffi, gambo valvola, perni di albero a gomito, cuscinetti di metallo bianco, pattini di scorrimento e relative guide.
0,8	32	Superfici rettificate, finite bene d'utensile a placchetta, con tracce di lavorazione appena visibili, tamburi per freni, fori brocciati, bronzine, cuscinetti, denti ingranaggi.
1,6	63	Facce ingranaggi e loro fori, alberi, teste cilindro, facce di pistoni, superfici di tenuta di flange con guarnizioni metalliche.
3,2	125	Superfici finite d'utensile normale, con tracce di lavorazione visibili, superfici di accoppiamento di parti fisse smontabili, perni e cuscinetti per trasmissioni a mano.
6,3	250	Superfici di tenuta di flange con guarnizioni comuni.
12,5	500	Superfici sgrassate.

Figura 2 - Tipiche applicazioni per valori standard di rugosità

essere ottenuta direttamente dal processo di pressocolata, viene però ricavata da un necessario passaggio al tornio poiché la medesima superficie presenterà delle bave di colata dovute agli stampi del pistone. Non è richiesta una rugosità inferiore perché non vi è contatto tra la superficie laterale del pistone e il mantello del cilindro. Un discorso analogo viene fatto per la lavorazione del cielo del pistone, con la medesima rugosità pari ad $1.6\ \mu\text{m}$, poiché questa faccia presenta i residui del canale di colata. Successivamente il cielo sarà soggetto ad un trattamento di anodizzazione, quindi, non può presentare una superficie eccessivamente liscia. Per tutte le superfici rimanenti, ovvero quelle nella parte interna del pistone, si mantiene la rugosità data dal processo di pressofusione, tipicamente $3.2\ \mu\text{m}$. Ciò è dato dal fatto, come nel caso della biella, che tali superfici non devono rispettare particolari esigenze funzionali.

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

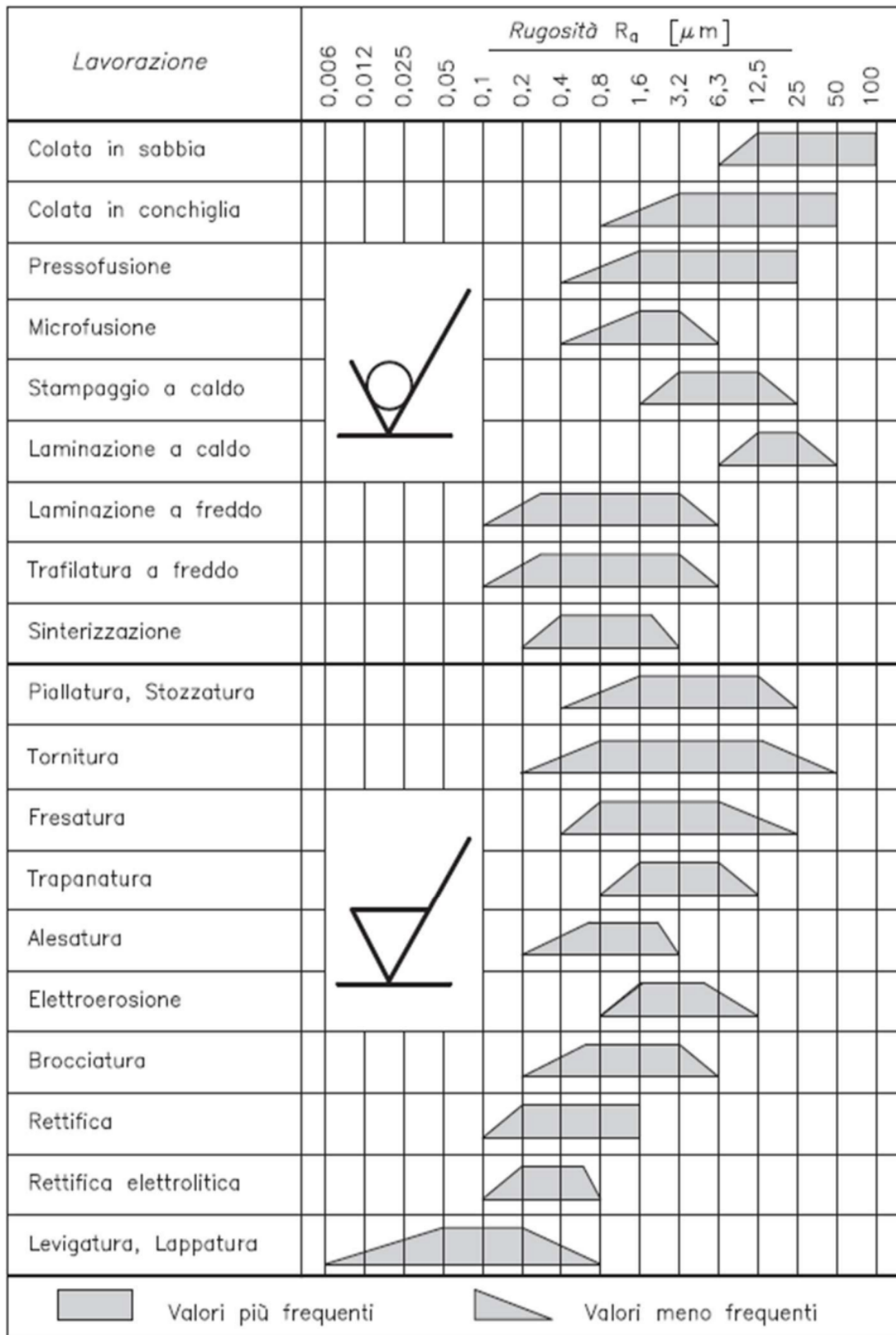


Figura 3 - Rugosità raggiungibili con lavorazioni convenzionali

7. SCELTA DELLE MATERIE PRIME/GREZZI

Biella: Ghisa sferoidale GJS 500-7 C

Pistone: Lega di alluminio 4032

7.1 Biella

Le bielle destinate ai motori stradali sia diesel che benzina sono realizzate in ghisa grigia sferoidale e sono ottenute per fusione. Queste oltre ad essere facilmente lavorabili hanno buone caratteristiche meccaniche adatte a soddisfare i primi accenni di sportività dei motori montati sulle piccole vetture stradali. Impiegate per regimi di rotazione non superiori ai 7.000-7.400 giri/min sono assolutamente inadatte a motori sportivi.

Al contrario, nei motori da competizione, le bielle sono realizzate con acciai alto legati. Ad esempio vengono impiegate le seguenti leghe: 39NiCrMo3, 16NiCrMo2, 30NiCrMo12 caratterizzate da un'eccezionale temprabilità e da resistenza a fatica anche con elevate temperature di esercizio. I loro elementi di alligazione vengono introdotti per:

- Nichel (Ni): migliora la resistenza alla corrosione, all'ossidazione a caldo, facilita il trattamento termico di tempra, aumenta la resilienza, aumenta l'allungamento percentuale a rottura e la duttilità, aumenta il carico di rottura a trazione, aumenta la durezza. Peggiora invece la lavorabilità alle macchine utensili e la conducibilità termica.
- Cromo (Cr): Aumenta la resistenza alla corrosione ed all'ossidazione a caldo, facilita il trattamento termico di tempra, aumenta la durezza, aumenta la resilienza, aumenta il carico di rottura, aumenta la resistenza all'usura. Peggiora conducibilità termica e lavorabilità alle macchine utensili.
- Molibdeno (Mo): Aumenta la lavorabilità alle macchine utensili, aumenta il carico di rottura a trazione, aumenta la durezza, aumenta la resistenza all'usura, aumenta la resistenza alla corrosione ed all'ossidazione a caldo.

Le bielle possono essere realizzate anche in alluminio. In particolare, possono essere ottenute per fusione o per stampaggio. La lega scelta per lo stampaggio della biella in alluminio contiene rame e silicio (Cu-Si). La lega destinata alla fusione invece è a base di silicio e manganese (Si-Mg). Tuttavia, tali bielle fanno fatica ad uscire dallo stadio sperimentale per via del loro comportamento "anisotropo" delle fibre, infatti resistono

bene a trazione e male a compressione ed il problema nasce proprio in quest'ultimo caso dato nella fase di combustione le bielle lavorano prevalentemente a compressione.

L'uso del titanio per le bielle nei motori ad alte prestazioni è molto appetibile perché la riduzione delle masse in moto alterno è di prioritaria importanza nella ricerca di regimi e potenze elevati. Dato che a parità di caratteristiche meccaniche una biella in lega di titanio pesa il 45% in meno di una in acciaio, i vantaggi sono più che evidenti. Fra questi, minori carichi che l'albero motore ed i relativi cuscinetti debbono sopportare, con effetti positivi in affidabilità e durata. Lo stesso albero motore, necessitando di contrappesi meno massicci, diventa più leggero. Le leghe di titanio più utilizzate nelle bielle dei motori da competizione sono: Ti-6Al-4V e Ti-6Al-14V.

Date le caratteristiche del motore che viene trattato in questa tesi si è deciso di impiegare la ghisa con grafite sferoidale come materiale per le bielle.

7.1.1 Ghisa con grafite sferoidale (GJS)

La ghisa GJS ha inclusioni di grafite sferoidali (globulari) che si ottengono con l'aggiunta di piccole quantità di Mg o Ce. Questo permette di realizzare un considerevole incremento di resistenza e duttilità rispetto alla ghisa con grafite lamellare (GJL); anche la resistenza alla corrosione e quella all'usura sono maggiori. Inoltre, la composizione non ha più influenza sulla resistenza. Essa viene tenuta vicina a quella dell'eutettico allo scopo di migliorare le proprietà di fonderia come la fluidità e la tendenza al ritiro.

La ghisa GJS, per le sue proprietà, si colloca tra la ghisa GJL e l'acciaio. In molti casi può sostituire l'acciaio per getti, è saldabile con elettrodi al Ni-Fe, può essere bonificata e temprata in superficie (tempra alla fiamma e ad induzione). Possiede un elevato modulo elastico ma uno smorzamento interno ridotto rispetto alla ghisa GJL. Il limite di fatica a flessione alternata simmetrica di componenti in GJS intagliati supera in parte quella dell'acciaio, perciò si utilizza per esempio per gli alberi a gomito. La matrice può variare da 100% ferritica a 100% perlitica, a seconda del livello di duttilità e resistenza che si vuole ottenere. Tuttavia, il tipo più comune perché meno vincolante per la produzione è quello

a struttura prevalentemente ferritica (tipo 500-7; 20-30% di perlite). Questo rappresenta un buon compromesso tra resistenza, duttilità e lavorabilità. Infatti, dal tipo EN-GJS-500 in poi, la lavorazione con l'asportazione di trucioli diviene sempre più difficile.

Mediante trattamento termico è possibile migliorare notevolmente la truciolabilità e ottenere un limite di fatica e una resistenza agli urti elevati, di conseguenza è adatta per componenti complessi.

Di seguito in Tabella 3 i principali valori resistenziali delle ghise sferoidali:

Simbolo (finora secondo DIN 1693)	Numero materiale	Resistenza a trazione minima $R_{m,N}$ [N/mm ²]	Carico di snervamento convenzionale minimo (0,2%) $R_{p0,2,N}$ [N/mm ²]	Limite di fatica per flessione alternata simmetrica $\sigma_{w,b,N}$ [N/mm ²]	Durezza Brinell HB	Allungamento a rottura A_5 [%]	Modulo di elasticità [N/mm ²]	Applicazioni
EN-GJS-400-15 (GGG-40)	EN-JS-1030	400	250	200	140...190	15	169000	Ruote dentate a vite, ingranaggi, alberi a gomito ed a camme, alloggiamenti pompe e scatole cambio
EN-GJS-500-7 (GGG-50)	EN-JS-1050	500	320	224	170...240	7	169000	
EN-GJS-600-3 (GGG-60)	EN-JS-1060	600	370	248	210...270	3	174000	
EN-GJS-700-2 (GGG-70)	EN-JS-1070	700	420	280	230...320	2	176000	
EN-GJS-800-2 (GGG-80)	EN-JS-1080	800	480	182	-	2	176000	

Tabella 3 - Ghisa con grafite sferoidale secondo DIN EN 1563

7.2 Pistone

Nei pistoni per motori stradali è predominante l'utilizzo delle leghe di Alluminio infatti è fondamentale che i pistoni siano realizzati con materiali aventi buone caratteristiche meccaniche, un'elevata resistenza alle alte temperature, bassi valori di dilatazione termica ed un peso ovviamente contenuto. In base all'aggiunta di alliganti la lega di alluminio assume diverse proprietà.

- Silicio (Si): è il più diffuso legante dell'alluminio migliorando ampiamente le caratteristiche di resistenza e durezza, senza ridurne la duttilità. La sua presenza diminuisce di poco la resistenza alla corrosione. Le leghe comunemente utilizzate in fonderia hanno contenuti che variano dal 2 al 15%.
- Magnesio (Mg): aumenta la resistenza meccanica e la durezza e migliora la lavorabilità alle macchine utensili e la duttilità.

- Zinco (Zn): è stato uno dei primi leganti dell'alluminio. Viene utilizzato per aumentarne la resistenza e la durezza, ma determina una scarsa resistenza alla corrosione a fronte di una buona lavorabilità. Si è cercato di eliminare tali difetti mantenendone i vantaggi mediante l'aggiunta di altri elementi in leghe complesse (leghe Al-Zn-Mg-Cu).
- Rame (Cu): aumenta in proporzione alla quantità la resistenza meccanica e la durezza. Migliora la lavorabilità alle macchine utensili. Diminuisce la resistenza alla corrosione, seppur in piccole quantità. In quantità superiori al 12% la lega presenta una spiccata fragilità.
- Manganese (Mn): è principalmente impiegato come correttivo nei confronti del ferro, elemento indesiderato, svolgendo la funzione di tampone. La sua presenza aumenta sensibilmente la tenacità, la duttilità e la resistenza meccanica e quella alla corrosione.
- Titanio (Ti): aggiunto solitamente nella lega di alluminio come affinante del grano metallico, riducendolo, rendendo il metallo più compatto. Il quantitativo è solitamente inferiore al 0,25%.
- Ferro (Fe): benché indesiderato, è sempre presente nelle leghe di Al come impurità. La presenza del ferro in quota dell'1% ha effetti positivi sulla resistenza meccanica. È l'elemento più dannoso nelle leghe di alluminio in quanto i suoi cristalli provocano una disomogeneità nella sua struttura aumentando la fragilità del metallo e diminuendo notevolmente la resistenza alla corrosione.

Due esempi che sposano bene quanto detto finora in termini di applicabilità sono le seguenti leghe di alluminio: 4032 e 2618. I pistoni realizzati con lega 4032, sono ad alto contenuto di silicio, quindi destinati ad un impiego misto (turistico/sportivo). La presenza del silicio è fondamentale per migliorare la colabilità della lega e ridurre la fragilità da ritiro. Quelli realizzati con la lega 2618 sono destinati invece all'impiego prettamente sportivo. I vantaggi dell'impiego dell'alluminio rispetto a ghisa e acciaio si traducono in una maggiore facilità di dispersione del calore con conseguente possibilità di incrementare i rapporti di compressione ed ottenere quindi prestazioni più elevate a parità di cilindrata. Infine, la maggior leggerezza permette di ridurre le inerzie e poter quindi aumentare il regime di rotazione del motore. Di seguito si riportano le principali caratteristiche e differenze tra le leghe citate.

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

La lega EN AW-4032 è una delle leghe ad alta resistenza e temprabili per invecchiamento. Di conseguenza, è necessario un trattamento termico come la solubilizzazione e successivo invecchiamento. Solo allora la lega può sviluppare il suo pieno potenziale. La 4032 è la lega con la più alta resistenza ottenibile del gruppo 4000 ed è spesso usata come lega per pistoni. A causa della duttilità molto bassa dovuta all'alto contenuto di silicio, questa lega è difficile da pressare.

PESO della composizione chimica (%)									
Silicio	Ferro	Rame	Magnesio	Nichel	Cromo	Zinco	Titanio	Altri	Alluminio
11.0÷13.5	1	0.05÷1.3	0.8÷1.3	0.5÷1.3	0.1	0.25	-	0.15	Equilibrato

Proprietà fisiche

Densità	2,68 g/cm ³
Intervallo di solidificazione	530 - 570 °C
Conducibilità elettrica	20 - 23 MS/m
Conducibilità termica	138 - 155 Q/(mK)
Modulo di elasticità	79.000 MPa
Calore specifico	864 J/(kgK)
Modulo di taglio	26.000 MPa

Trattamento termico

Temperatura di ricottura	6h a 510 °C
Affinamento artificiale	10h a 171 °C

La lega EN AW-2618A ha caratteristiche simili alla lega EN AW-4032 infatti è una delle leghe ad alta resistenza e temprabili per invecchiamento. Questa lega è stata sviluppata per la tecnologia aerospaziale; ha un'elevata resistenza, è facile da lavorare e ha una resistenza media alla corrosione. A causa della loro resistenza alle alte temperature viene spesso utilizzato in aree in cui è richiesta un'elevata resistenza a temperature fino a 300 °C.

PESO della composizione chimica (%)								
Silicio	Ferro	Rame	Manganese	Magnesio	Zinco	Titanio	Nichel	Altri
0.15÷0.25	0.9÷1.4	1.8÷2.7	0.25	1.2÷1.8	0.15	0.2	0.8÷1.4	0.05

Proprietà fisiche

Densità	2,8 g/cm ³
Intervallo di solidificazione	560 °C - 670 °C
Conducibilità elettrica	22,2 MS/m
Conducibilità termica	142 W/(mK)
Modulo di elasticità	72.000 MPa
Modulo di taglio	27.000 MPa

Per il materiale costituente i pistoni si è deciso di adottare la lega 4032 data l'applicabilità ad un uso non soltanto sportivo.

Oltre alle leghe di alluminio, nel campo dei motori da competizione, è frequente l'utilizzo di leghe di magnesio. Sono più leggere delle leghe di alluminio avendo una minore densità: 1.8 kg/dm³ anziché 2.7 kg/dm³. Tuttavia, il maggior coefficiente di dilatazione termica ed una minore resistenza complessiva, obbliga a fare uso di Zirconio (aumentando quindi i costi) come elemento di alligazione.

8. RASSEGNA PROCESSI

8.1 Colata in conchiglia

La colata in conchiglia per gravità è la tecnologia fusoria che prevede la colata del metallo fuso in uno stampo generalmente di acciaio ad elevata conducibilità da cui ne deriva un raffreddamento rapido che garantisce una grana cristallina fine (quindi ottime prestazioni). Il riempimento e la solidificazione del materiale avvengono sotto la legge di gravità e questo rende possibile, all'occorrenza, l'utilizzo di tasselli e anime in sabbia.

Estrattori meccanici, quali pistoncini posizionati in varie parti della conchiglia, possono essere necessari per estrarre componenti dalla geometria complessa. Gli estrattori di solito lasciano piccole impronte rotonde sul componente e sul sistema di alimentazione, come nello stampaggio a iniezione.

Le principali leghe metalliche utilizzate nel processo fusorio di colata in conchiglia a gravità sono leghe di alluminio, leghe di magnesio, leghe di rame e leghe di zinco. È possibile utilizzare leghe ferrose, con qualche complicazione di natura tecnica dovute alle alte temperature di fusione. In particolare, si colano in conchiglia alcune tipologie di ghisa.

8.1.1 Materiale conchiglia

Per quanto riguarda la conchiglia, la ghisa grigia può essere economicamente utilizzata nel caso di getti di piccole dimensioni per qualsivoglia volume del lotto di produzione. Anche nel caso di getti di medie e grandi dimensioni e piccoli lotti di produzione è consigliata la ghisa. All'aumentare della numerosità dei getti da produrre e della loro dimensione risulta conveniente prevedere l'utilizzo di una conchiglia costruita completamente in acciaio al carbonio o addirittura in acciaio per lavorazioni a caldo.

La soluzione intermedia prevede una conchiglia in ghisa grigia e inserti d'acciaio per le lavorazioni a caldo. Tra gli acciai sono indicati gli acciai al carbonio C20 e C10. Si osserva tuttavia che a questi materiali è in genere preferito l'acciaio C40. Tra gli acciai per lavorazioni a caldo trovano ampio utilizzo i tipi AISI H11 e AISI H14, codificati secondo la normativa SAE.

L'utilizzo della ghisa consente di produrre la conchiglia in una geometria vicina alla forma finale e quindi di limitare le lavorazioni di sgrossatura e finitura alle macchine utensili. La medesima attrezzatura realizzata in acciaio ha un costo molto maggiore a causa principalmente dell'incidenza delle lavorazioni meccaniche. D'altra parte, la ghisa grigia non permette eventuali riparazioni o modifiche per saldatura, che invece sono possibili per l'attrezzatura d'acciaio.

	Numero di getti previsti			
	Legha processata	1'000	10'000	100'000
Getti di piccole dimensioni (max 25 mm)	Alluminio, magnesio	Ghisa grigia, acciaio C20	Ghisa grigia, acciaio C20	Ghisa grigia con inserti in acciaio AISI H14, acciaio C20
	Rame	Ghisa grigia	Ghisa grigia	Ghisa grigia legata
	Zinco	Ghisa grigia, acciaio C20	Ghisa grigia, acciaio C20	Ghisa grigia, acciaio C20
	Ghisa	Ghisa grigia	Ghisa grigia	-
Getti di medie e grandi dimensioni (>900 mm)	Alluminio, magnesio	Ghisa grigia	Ghisa grigia	Ghisa grigia
	Rame	Ghisa grigia legata	Ghisa grigia legata	Ghisa grigia legata
	Zinco	Ghisa grigia, acciaio AISI H11	Ghisa grigia, acciaio AISI H11	Ghisa grigia, acciaio AISI H11
	Ghisa	Ghisa grigia	Ghisa grigia	-

Tabella 4 - Materiali per conchiglie in funzione della lega e del numero di getti previsti

8.1.2 Utilizzo vernici

Nella fonderia in conchiglia a gravità, gli stampi vengono rivestiti con sottili strati di materiali di natura refrattaria. Si utilizzano a questo scopo vernici a base acquosa in grado di aderire alle superficie della cavità durante l'applicazione mediante verniciatura a caldo, o brascatura.

Il rivestimento refrattario della cavità gioca un ruolo fondamentale in tutte le fasi del processo produttivo: riempimento, solidificazione ed estrazione del getto. Durante il riempimento deve limitare la perdita di calore del materiale fuso grazie alla natura refrattaria e quindi consentire il riempimento della cavità senza che abbia inizio la solidificazione. In fase di solidificazione deve consentire un controllo della velocità di raffreddamento e favorire la solidificazione direzionale. Infine, durante la fase di

estrazione, deve facilitare l'espulsione del getto dalla conchiglia grazie a un'azione di lubrificazione allo stato solido.

I principali e molteplici effetti che si ottengono tramite la verniciatura delle conchiglie sono:

- ottimizzazione delle condizioni di scorrimento del metallo liquido all'interno della cavità e miglioramento dell'evacuazione dell'aria nello stampo durante il riempimento;
- controllo delle modalità di trasferimento del calore e quindi delle modalità di solidificazione;
- ottimizzazione e controllo della finitura superficiale dei getti;
- ottimizzazione del distacco del getto dalla cavità durante l'estrazione;
- ottimizzazione della durata della conchiglia.

8.1.3 Durata conchiglia

Nel caso delle leghe d'alluminio e magnesio si considera in genere una durata pari alla produzione di 100'000 getti. Con le conchiglie in ghisa tale durata è possibile solamente quando la finitura superficiale e l'estetica del getto non sono un vincolo, ovvero quando le lavorazioni meccaniche siano estese a gran parte della superficie del pezzo. In tutti gli altri casi sono preferibili gli acciai.

La durata complessiva di uno stampo per leghe leggere e ultraleggere può essere molto maggiore di 100'000 getti. La medesima attrezzatura può arrivare a produrre in alcune circostanze oltre 1'000'000 di getti, se si prevedono ripetute revisioni e riparazioni e una condotta ottimale del processo.

La colata delle leghe del rame e soprattutto della ghisa, a causa delle elevate temperature di colata, determina invece una durata ridotta degli stampi.

Gli shock termici sono particolarmente dannosi se si vuole ottenere una lunga durata delle attrezzature. A questo scopo, è bene prevedere un preriscaldamento dell'attrezzatura all'avvio della produzione. Il preriscaldamento può essere realizzato tramite resistenze elettriche oppure mediante bruciatori a gas. Il raggiungimento della temperatura adatta all'avvio della produzione è comunemente verificato con termocoppie a contatto.

Infine, non bisogna trascurare le operazioni di pulizia dell'attrezzatura e di stoccaggio in magazzino. È buona norma assicurare un ambiente di stoccaggio privo di agenti corrosivi

e umidità. Nella pulizia dello stampo con sabbiatura tradizionale utilizzare preferibilmente sfere di vetro.

I vantaggi di questo processo sono dati dalla possibilità di avere un raffreddamento controllato, una miglior finitura superficiale e sulle tolleranze, dettagli fini e pareti sottili, una velocità di produzione maggiore data anche dal grado di automazione e un buon range sulle dimensioni.

Per quanto riguarda gli svantaggi che caratterizzano il processo di colata in conchiglia sono legati ai costi, delle conchiglie e dell'intero impianto in generale.

8.2 Colata in guscio

La colata in guscio (shell-mold casting) è un processo che consente di produrre dei componenti con buone tolleranze dimensionali, buona accuratezza superficiale e a basso costo con un minimo rischio di soffiature. Si tratta di una tecnica che ha trovato largo impiego per la produzione di getti in acciaio, ghisa, bronzo, ottone, alluminio e per leghe di magnesio.

Per la realizzazione delle forme a guscio, si riscalda inizialmente a circa 250 °C una placca modello metallica completa di dispositivi di colata.

La placca modello calda viene cosparsa di una sostanza separante, costituita da emulsioni ai siliconi, e successivamente viene capovolta su un contenitore riempito di sabbia agglomerata; il complesso placca-modello-contenitore viene ribaltato di 180° in modo che la sabbia prerivestita contenuta in quest'ultimo cada e investa il modello.

Dopo pochi secondi, la miscela di sabbia e resina, per effetto del calore, indurisce formando un guscio (da cui il nome shell) il cui spessore varia dai 4 ai 10 mm a seconda delle dimensioni e del peso dei getti da ottenere; successivamente si capovolge di nuovo il tutto facendo cadere il materiale in eccesso. Al variare della durata del trattamento cambia lo spessore e quindi la solidità del guscio.

Si introduce la placca modello col suo guscio in un forno di cottura a una temperatura intorno ai 400 °C per qualche minuto, affinché il guscio acquisti durezza e resistenza elevate. Non rispettando i valori di temperatura o di tempo adeguati, si possono avere insuccessi per cotture insufficienti o per bruciature di gusci.

Terminata la cottura, si estrae il mezzo guscio prodotto e si procede alla preparazione dell'altro mezzo guscio; si assemblano le due parti ottenute, inserendo le eventuali anime, realizzando così un guscio completo munito di dispositivo di colata.

I gusci accoppiati si dispongono in posizione orizzontale o verticale e si esegue la colata. Ad avvenuto raffreddamento dei getti, demolendo i gusci, si ricavano pezzi con superfici molto lisce e uniformi.

8.2.1 Materiale da formatura

Fondamentale nel procedimento di formatura è il materiale, costituito da una miscela di sabbia fine (sabbia silicea, di quarzo o zirconio) esente da impurità e dal 4-6% di resina sintetica come legante a base di fenolo-(cresolo)-formaldeide. Alla resina si aggiungono altre sostanze con la funzione di indurenti, quali l'esametilentetramina, in misura dal 10% al 12% del legante (ridotta fino al 6% in casi particolari), e con la funzione di separante e antifrizione per il distacco dal modello, come lo stearato di calcio, in misura del 5% della resina. La miscela viene preparata in un mescolatore dove viene lavorata intensamente per ottenere una perfetta distribuzione della resina in tutta la massa e il rivestimento di ciascun granulo.

Durante il processo, quando il materiale è a contatto con la placca modello metallica riscaldata, per effetto del calore si ha la fusione della resina sintetica che lega i singoli grani di sabbia. Riscaldando ancora la resina nella fase di cottura, essa solidifica a causa dell'indurente mescolato. La resina indurita lega i singoli granelli di sabbia in un guscio resistente, che assemblato all'altra sua metà costituisce la forma.

La dimensione dei grani influenza notevolmente la rugosità dei getti e la quantità di legante che bisogna aggiungere alla miscela per rivestirla.

La colata in forme a guscio ha dato ottimi risultati specialmente nell'industria automobilistica, dove le grandi serie richieste hanno consentito l'automazione della fabbricazione delle forme e della colata.

8.3 Colata in terra

Consiste nell'effettuare la colata del metallo fuso all'interno di uno stampo composto da una terra speciale, (terra da fonderia), che verrà rotta alla fine del processo per poterne estrarre il pezzo. Il processo di colata in terra da fonderia consiste nel:

1. posizionare un modello avente la stessa forma del componente da realizzare nella terra per crearne un'impronta;
2. aggiungere il sistema di alimentazione;
3. riempire la cavità risultante con il metallo fuso;
4. lasciare raffreddare il metallo fino a completa solidificazione;
5. rompere la forma in terra;
6. estrarre il componente e finirlo.

La terra è il prodotto dello sminuzzamento di rocce lungo un considerevole arco temporale. È poco costosa ed è idonea come materiale per la forma, in quanto resiste bene alle alte temperature. La maggior parte delle operazioni di colata in terra utilizzano terre silicee (SiO_2). Esistono due tipologie di terra: la terra naturale e la terra sintetica. Poiché la sua composizione può essere meglio controllata, la terra sintetica viene preferita dalla maggior parte delle fonderie. Numerosi fattori sono importanti nella scelta della terra per le forme. Una terra con grani fini e arrotondati può essere meglio impaccata e rende la superficie della forma più liscia. Una buona permeabilità di forme e anime permette ai gas e al vapore che si sviluppano durante la colata di fuoriuscire facilmente. La forma dovrebbe avere buona capacità di deformarsi (poiché il fuso si ritira durante il raffreddamento) per evitare difetti nel fuso. Una terra a granulometria fine migliora la resistenza meccanica della forma, ma ne peggiora la permeabilità. L'argilla è usata generalmente come elemento di coesione per legare le particelle di terra, rendendola più resistente meccanicamente. Quasi tutte le leghe commerciali possono essere colate in terra. La finitura superficiale ottenibile è largamente influenzata dai materiali utilizzati per realizzare la forma. Benché l'accuratezza dimensionale non sia così buona come in altri processi di fonderia, si possono realizzare forme molto complesse, quali blocchi motore in ghisa grigia o componenti molto grandi quali propulsori per transatlantici. La colata in terra può essere economica per lotti produttivi relativamente piccoli come per grandi lotti; i costi delle attrezzature sono generalmente contenuti.

8.4 Pressocolata

La tecnologia fusoria della pressocolata prevede il riempimento della cavità, realizzata in stampi metallici, mediante l'ausilio di un sistema d'iniezione del metallo liquido, il quale consente di imporre e controllare la velocità del liquido durante il riempimento e di

esercitare e controllare una pressione sul materiale in via di solidificazione, che contrasta e compensa la contrazione dovuta al ritiro di solidificazione.

Con questo metodo possono essere colate leghe di alluminio, magnesio e rame ma anche altri metalli, anche ferrosi. Le temperature del metallo fuso raggiungono i 600 gradi circa per le leghe di alluminio e magnesio, ma possono raggiungere temperature ben più elevate per leghe ferrose o a base di rame. Il metallo liquido riempie la cavità in tempi molto ridotti. Per getti di piccole e medie dimensioni il ciclo completo di riempimento può durare frazioni di secondo. Ciò consente la produzione di componenti meccanici di piccolo spessore. La fase d'iniezione è critica a causa della necessità di evitare eccessive turbolenze nel liquido nel contenitore durante la fase di riempimento e di consentire la contemporanea fuoriuscita dei gas dalla cavità attraverso gli appositi sfoghi d'aria predisposti nello stampo. La problematica dell'inglobamento di gas e i mezzi per evitarla costituiscono un aspetto rilevante di questa tecnologia produttiva.

Le principali leghe metalliche utilizzate nella produzione nella pressocolata sono:

- leghe di alluminio;
- leghe di magnesio;
- leghe di rame;
- leghe di zinco.

8.4.1 Schema impianto

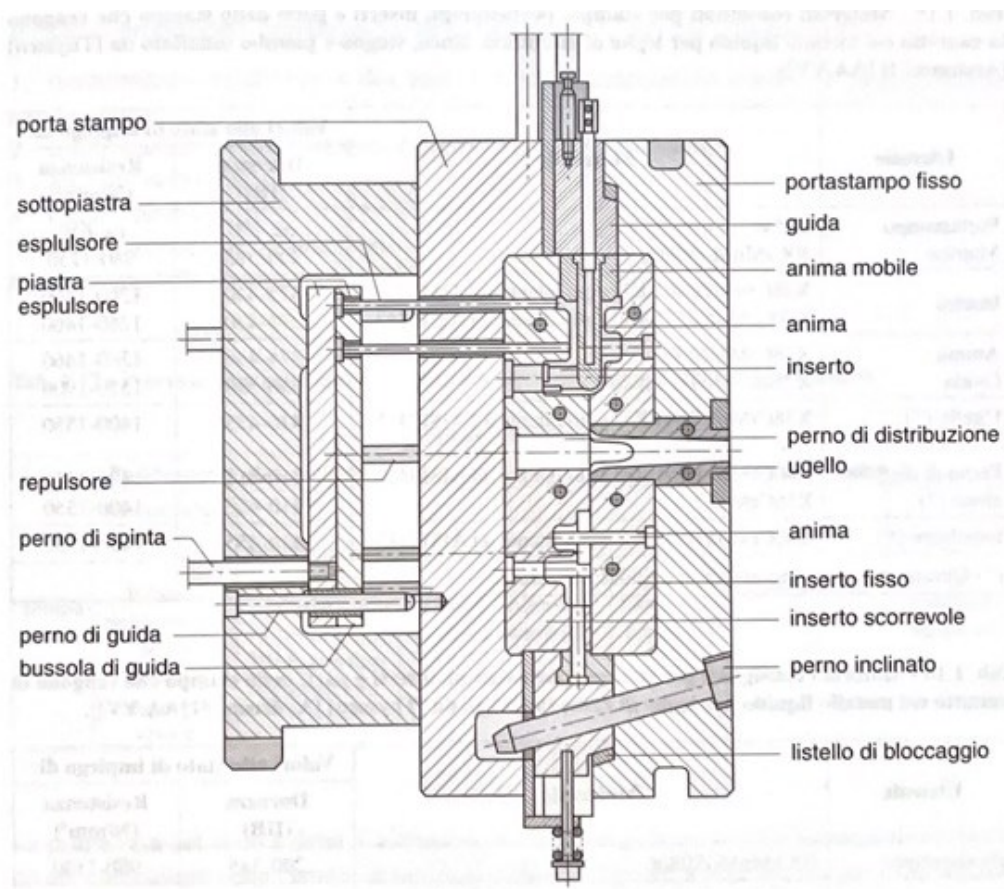


Figura 6 - Schema di stampo da pressocolata

Nella Figura 6 è schematizzato un generico stampo per pressocolata dove sono in evidenza i diversi componenti. Si osservano il portastampo mobile, attraverso il quale agiscono gli espulsori montati sulla piastra espulsori, e il portastampo fisso, che porta l'ugello di entrata del metallo nella cavità dello stampo. Le due parti della matrice sono direttamente assemblate con i portastampi e gli eventuali carrelli di movimentazione di maschi, anime o tasselli metallici.

La pressocolata viene realizzata in impianti altamente automatizzati, che consentono la regolazione e il controllo dei molteplici parametri di processo che influenzano la qualità dei getti.

Nella pressocolata tradizionale si distinguono impianti a camera fredda e impianti a camera calda, i quali si differenziano poiché il sistema di iniezione e il contenitore del pistone sono separati oppure integrati, rispettivamente, nel forno di attesa. I materiali a elevata temperatura di fusione, quali le leghe di rame e di alluminio, sono formati tramite

impianti a camera fredda in quanto le elevate temperature comporterebbero un rapido deterioramento del contenitore e del sistema di iniezione per l'aggressione del metallo liquido nel quale sono immersi. In questo caso il metallo liquido viene prelevato dal forno di attesa e versato nel contenitore che costituisce la camera di pressione. Il contenitore viene in contatto con la lega alla temperatura di fusione per il tempo limitato del riempimento. In tal modo si riduce il tempo a disposizione del metallo liquido per aggredire il materiale del contenitore e si ottiene una durata soddisfacente del componente.

Nella Figura 7 è schematicamente illustrato un impianto di pressocolata a camera fredda.

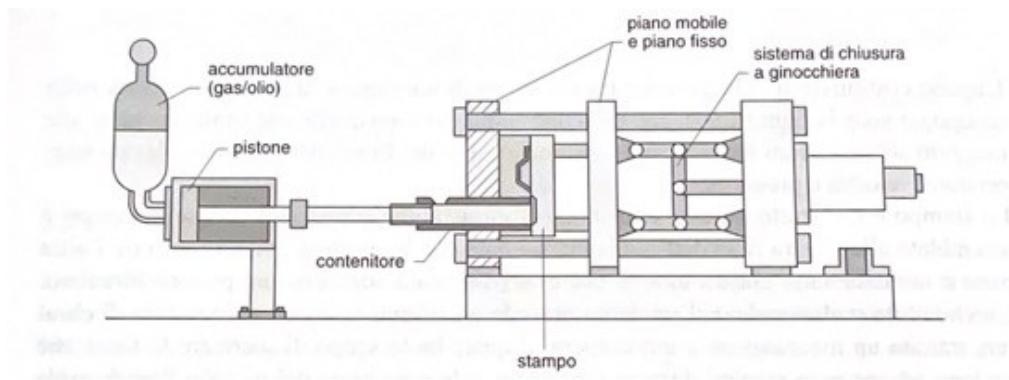


Figura 7 - Schema di un impianto di pressocolata a camera fredda

All'avvio della produzione è buona norma, in particolare durante la lavorazione di leghe a elevata temperatura di fusione, effettuare un preriscaldamento dell'attrezzatura tramite bruciatori a gas, raggi infrarossi oppure in forno. In questo modo si limita lo shock termico degli stampi.

I materiali degli stampi sono sottoposti a sollecitazioni cicliche di natura meccanica e termica e ad aggressioni chimico-fisiche di diverso tipo e natura.

Gli sbalzi di temperatura sulla superficie della cavità possono essere valutati in centinaia di gradi centigradi e determinano rapide contrazioni e dilatazioni che si traducono in stati tensionali ciclici d'elevata intensità (affaticamento termico). Tale fenomeno non è contrastabile e l'unica protezione offerta al materiale dello stampo è costituita dallo strato di ossido presente sulla superficie della matrice e dal sottile strato di lubrificante aderente a quest'ultimo, che riducono lo shock termico.

Le leghe che possiedono temperature di fusione inferiori, quali leghe di zinco, stagno, piombo e magnesio, sono comunemente formate in impianti a camera calda.

8.4.2 Materiali stampi

Le conchiglie per pressocolata possono essere a cavità singola, a cavità multiple o cavità combinate (diverse cavità differenti). Un problema riscontrabile è la formazione di cricche superficiali dovute ai cicli ripetuti riscaldamento e raffreddamento; per questo una scelta opportuna dei materiali delle conchiglie risulta fondamentale per la durata delle stesse fino a mezzo milione di cicli prima che l'usura diventi significativa.

Gli acciai destinati a realizzare le varie parti dello stampo che vengono direttamente in contatto col metallo liquido sono generalmente materiali per le lavorazioni a caldo. Essi devono essere dotati di molteplici proprietà, tra cui elevata stabilità agli sbalzi di temperatura, buona tenacità a caldo, ottima resistenza all'usura a caldo e minima tendenza all'incollamento, elevata resistenza alla pressione, resistenza alla corrosione metallica intercrystallina e ottima conducibilità termica.

Utensile	Materiale	Valori allo stato di impiego di:	
		Durezza (HB)	Resistenza (N/mm ²)
Portastampo	C45W	ca. 190	ca. 650
Matrice	40CrMnMoS0806	290-335	980-1130
Inserito	X38CrMoV0501 KU equivalente ad AISI H11	375-430	1260-1460
	X40CrMoV0501 KU equivalente ad AISI H13	375-430	1260-1460
Anima	X38CrMoV0503	375-430	1260-1460
	X2NiCoMoTi120808	450-550	1550-1900
Ugello (*)	X38CrMoV0501 KU equivalente ad AISI H11	410-455	1400-1550
Perno di distribuzione (*)	X40CrMoV0501 KU equivalente ad AISI H13	410-455	1400-1550
	X36CrMo17	410-455	1400-1550
Espulsore (*)	X40CrMoV0501 KU equivalente ad AISI H13	410-455	1400-1550

(*) Queste parti possono essere in aggiunta nitrurate.

Tabella 5 - Materiali consigliati per stampo per leghe di alluminio

I materiali degli stampi sono sottoposti a sollecitazioni cicliche di natura meccanica e termica e ad aggressioni chimico-fisiche di diverso tipo e natura.

I fattori che influenzano principalmente la durata di uno stampo per pressocolata sono, trascurando eventuali mancanze nella condotta del processo: i tempi del ciclo di produzione, i trattamenti termici e i trattamenti di indurimento e rivestimento superficiale.

La vita utile degli stampi per pressofusione può essere incrementata se si esegue un trattamento di ricottura, per una temperatura di poco inferiore alla temperatura di rinvenimento, dopo la produzione di un certo numero di getti.

8.5 Stampaggio

La forgiatura a stampo chiuso, anche detto stampaggio, è un processo che coinvolge due o più stampi che contengono un profilo pretagliato del componente desiderato. L'acciaio viene prima riscaldato ad una temperatura compresa tra gli 800°C e 900°C e successivamente viene posto sul fondo dello stampo.

Di seguito, in Tabella 6 vengono riportate le temperature di forgiatura di diversi metalli:

Metallo	°C	°F
Leghe di alluminio	400-450	750-850
Leghe di rame	625-950	1150-1750
Leghe di nichel	870-1230	1600-2250
Acciai	925-1260	1700-2300
Leghe di titanio	750-795	1400-1800
Leghe di materiali refrattari	975-1650	1800-3000

Tabella 6 - Intervalli di temperature nella forgiatura di differenti tipologie di metalli

Gli stampi si muovono quindi l'uno verso l'altro fino a quando la materia prima non assume la forma e le dimensioni richieste.

Tipicamente in questo processo una parte di materiale fluisce radialmente al di fuori degli stampi, generando la formazione di bava. A causa dell'elevato rapporto tra lunghezza e spessore, la bava è sottoposta a una pressione molto elevata. Questo comporta un'elevata resistenza all'avanzamento del materiale nella direzione radiale dovuto alle forze di attrito presenti nel canale di bava. Pertanto, l'altezza del canale di bava rappresenta un parametro particolarmente importante per l'attrito in questa zona dello stampo.

La qualità, le tolleranze dimensionali e la finitura superficiale ottenibili in operazioni di forgiatura dipendono dai parametri di processo e da come questi parametri vengono controllati durante la forgiatura. In particolare, la finitura superficiale ottenibile in forgiatura a stampo chiuso dipende dalla preparazione dello sbozzato, dalla finitura ed usura degli stampi e dall'efficacia dei lubrificanti utilizzati. Le tolleranze dimensionali sono generalmente comprese tra $\pm 0,5\%$ e $\pm 1\%$ delle dimensioni del forgiato. I fattori che contribuiscono alle imprecisioni dimensionali sono gli angoli di sforno, gli angoli di

raccordo, l'usura degli stampi, la chiusura degli stampi e le imperfezioni nel loro accoppiamento.

La maggior parte dei metalli e delle leghe può essere forgiata attraverso il processo a stampo chiuso. I pezzi fucinati di acciaio inossidabile, titanio, alluminio e altre leghe realizzati con questo processo possono produrre una varietà illimitata di forme 3D in un'ampia gamma di pesi e dimensioni. Di conseguenza, questo è uno dei migliori processi per forme complesse che richiedono disegni elaborati. Il vantaggio dello stampaggio in stampo chiuso è quello di ottenere un pezzo forgiato con il profilo più vicino al prodotto finale. Questo processo può ridurre i costi di lavorazione e far ottenere un ottimo prodotto dal punto di vista della qualità. I costi dello stampo sono generalmente suddivisi e giustificati dai grandi volumi di pezzi richiesti dal progetto.

8.6 Sinterizzazione laser selettiva (SLS)

La sinterizzazione laser selettiva (SLS) fa parte delle Additive Manufacturing, cioè quelle lavorazioni che rendono possibile la produzione, in poche ore senza l'ausilio di utensili, di oggetti di geometria complessa direttamente dal modello geometrico realizzato da un CAD tridimensionale.

Questo processo è adatto alla prototipazione e a bassi volumi di produzione dato che sono processi molto lenti.

Un file .stl rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli, questo formato presenta dei vantaggi quali la semplicità, in quanto risulta molto facile da generare e da processare, mentre a suo sfavore presenta una geometria approssimata e la sua struttura dati, che pur risultando semplice, può presentare la ripetizione dello stesso vertice più volte.

Il macchinario quindi suddivide il file .stl nei vari layer (dai 20 ai 60 micron) e, se necessario, aggiunge i supporti per le parti che si possono rivelare fragili in fase di stampaggio.

Il letto di polvere e la piattaforma vengono riscaldati a una temperatura compresa tra il 70% e il 90% della temperatura di fusione in modo da permettere il legame tra le singole particelle di metallo. Si procede quindi a depositare il primo strato di polvere sul piatto di stampa e attraverso un laser a CO₂ si fondono le particelle nella forma desiderata. L'intera sezione si sposta quindi verso il basso e la superficie viene rivestita dal

successivo layer di polveri metalliche per poi ripetere il processo di fusione. Il processo viene ripetuto fino al completamento del pezzo. Una volta completato il processo i pezzi ottenuti devono raffreddarsi (fino a 12 ore) per poi proseguire con la fase di pulitura e, se necessario, con ulteriori lavorazioni. Metalli e leghe come acciaio inossidabile, cromo cobalto, alluminio, titanio e inconel sono i materiali utilizzati più spesso. La resistenza dei pezzi ottenuti è paragonabile a quella ottenuta con tecniche di fusione o di lavorazione a macchina. La SLS è una delle poche tecnologie di manifattura additiva utilizzata nella produzione.

I settori aerospaziale, automobilistico e medico traggono un gran vantaggio da questa tecnologia. Offre una complessità geometrica impossibile da ottenere utilizzando metodi di manifattura convenzionali e riduce il peso finale e il numero di componenti da assemblare utilizzando tecniche come l'ottimizzazione topologica. Questo garantisce tempi di produzione più brevi e parti personalizzate estremamente resistenti.

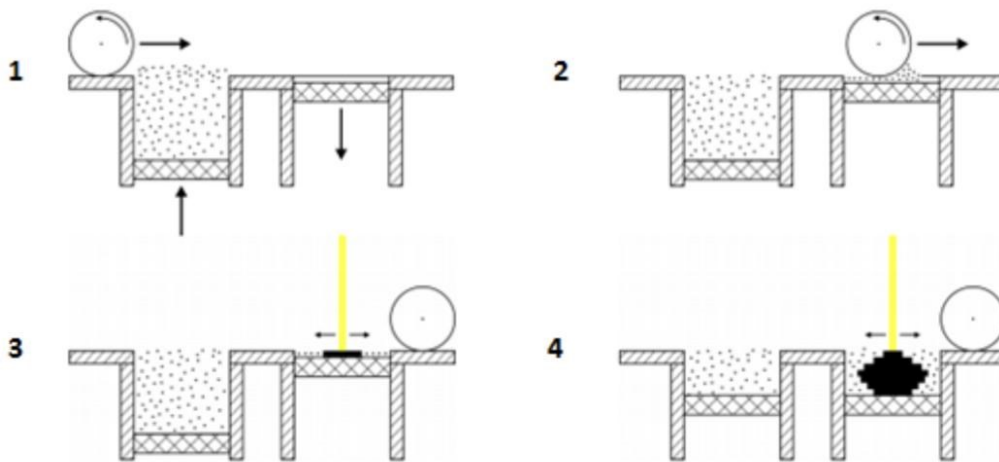


Figura 8 - Processo schematico della sinterizzazione laser selettiva

9. SCELTA DEL PROCESSO CON GIUSTIFICAZIONI

9.1 Giustificazione della colata in conchiglia per la produzione della biella

Tra i vari processi adatti per la produzione di un lotto medio-grande di componenti, è stato subito scartato il processo di sinterizzazione laser selettiva (SLS). Questo processo per quanto consenta di ottenere ottime finiture non è adatto a grandi volumi dato che è un processo molto lento. Infatti, i tempi di produzione di un componente attraverso questa tecnologia comprendono il riscaldamento della piattaforma e delle polveri, la deposizione dei vari layer e il raffreddamento del pezzo finale. Inoltre, le stampanti 3D che lavorano il metallo possono produrre delle porosità dovute alla non completa fusione delle particelle di polvere che causa una resistenza meccanica inferiore se paragonata a parti realizzate per fusione. Inoltre, le polveri metalliche sono molto care.

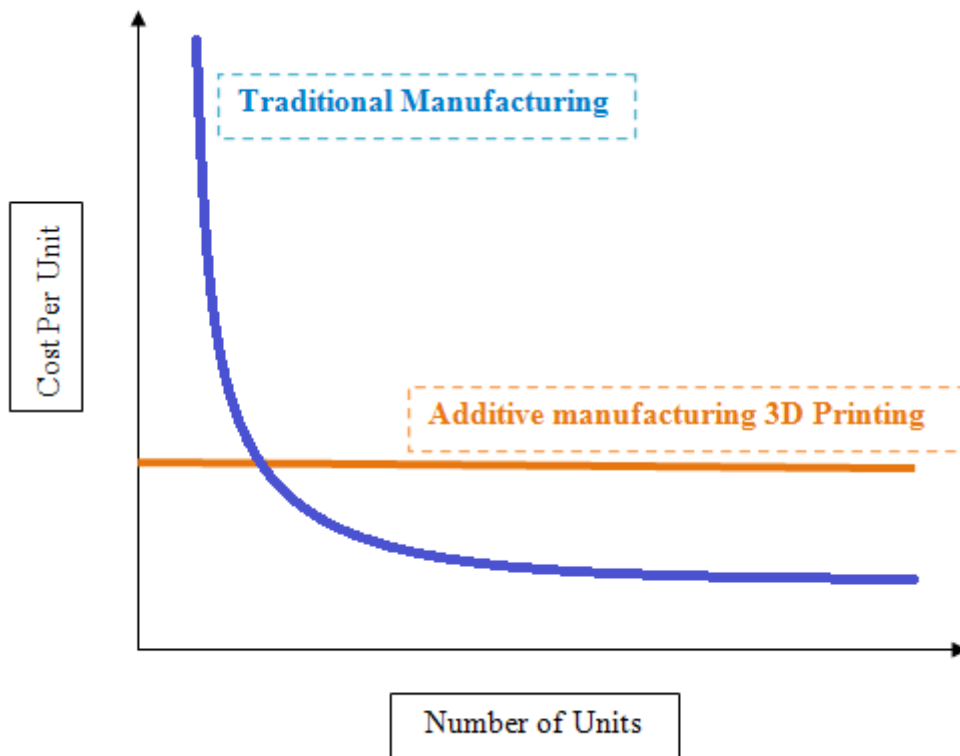


Figura 9 - Confronto costi per numero di parti tra lavorazioni tradizionali e additive manufacturing

Trattando il processo di colata in conchiglia, questo è usato per produrre medie e medio-grandi serie di pezzi, poiché garantisce una buona finitura superficiale, una discreta accuratezza dimensionale e ottime caratteristiche meccaniche. È molto simile a quello che avviene in terra, i parametri che li distinguono sono principalmente: il coefficiente di scambio termico, la rigidità della forma e la permeabilità. Il coefficiente di scambio termico è molto diverso nei due casi, anche se, in realtà, il contatto diretto tra stampo e pezzo viene rapidamente sostituito da una intercapedine di aria che determina una drastica riduzione della velocità di raffreddamento; ciò avviene con le medesime modalità in conchiglia e nelle forme in terra, perciò, questo fattore non comporta sostanziali differenze tra i due processi di solidificazione. Per quanto riguarda la rigidità della forma, invece, la conchiglia ha una rigidità maggiore rispetto alle forme transitorie in terra e questo comporta la necessità di processare materiali affetti da una scarsa tendenza alla fragilità da ritiro. In quanto alla permeabilità, le forme in terra sono permeabili e consentono di evacuare l'aria presente nelle cavità e i gas che si formano durante il riempimento e la solidificazione del liquido, mentre la forma metallica è impermeabile e richiede opportuni sfoghi, o tirate d'aria, predisposti per l'evacuazione dei gas. I vantaggi del processo di colata in conchiglia, rispetto a quello in forma in sabbia, sono molteplici, tra cui:

- maggiore produttività grazie ad un tempo ciclo inferiore;
- dimensioni del grano cristallino inferiore dovuta alla maggiore velocità di raffreddamento da cui un incremento delle caratteristiche meccaniche sia resistenziali che di duttilità;
- ristrette tolleranze dimensionali e buona finitura superficiale del getto grazie alla maggiore precisione dimensionale e finitura superficiale della cavità;
- sovrametalli inferiori grazie all'elevata precisione dimensionale del getto, infatti è possibile adottare sovrametalli dell'ordine dei decimi di millimetro. In ragione di ciò, si ottiene una riduzione dell'entità delle lavorazioni meccaniche e quindi risparmi in termini di peso del materiale colato e del materiale asportato alle macchine utensili;
- durata pari alla produzione di 100'000 getti circa, in realtà la durata dipende da molti fattori (materiale dello stampo, peso e geometria del getto, progetto del sistema di riempimento, fattori riguardanti il processo, ecc...). Con le conchiglie

in ghisa tale durata è possibile solo quando la finitura superficiale e l'estetica del getto non siano un vincolo, in tutti gli altri casi sono preferibili gli acciai.

- possibilità di automatizzare il processo.

Per contro, gli elevati costi dell'attrezzatura consentono economie solo nel caso di lotti produttivi consistenti. Tutti i metalli adatti per le forme di terra possono essere colati anche in forme a guscio. Nel caso di colata in guscio, per le leghe con grande intervallo di solidificazione si ha il pericolo della penetrazione se la pressione metallostatica è elevata. Per le leghe con bassi punti di fusione, come le leghe d'alluminio e di magnesio, esiste invece il rischio di forte ritiro e quindi di formazione di cricche nei getti. Inoltre, a causa della limitata temperatura a cui avviene la colata, il legante può anche non bruciare e la forma, oppure l'anima, conserva l'originaria resistenza. Per grandi lotti di produzione questo processo è conveniente economicamente poiché si presta bene ad essere automatizzato. Inoltre, come nel caso della colata in conchiglia, l'elevato dettaglio del prodotto finito riduce il numero di lavorazioni successive diminuendo la possibilità di innescare cricche e contenendo i costi. Il principale svantaggio è legato alla sostenibilità del processo, infatti, le resine che costituiscono il guscio sono in genere materiali termoindurenti, solitamente fenolformaldeide, ovvero non possono essere ulteriormente fusi dopo lo stampaggio, perché possiedono una struttura reticolare. Il guscio, perciò, risulta monouso e quindi comporta un grande spreco di materiale non riciclabile. Infine, è stato scartato il processo di forgiatura per la realizzazione della biella poiché questo processo non è adatto alla modellazione delle ghise; infatti, il loro elevato grado di fragilità indurrebbe la formazione di cricche all'interno del pezzo.

9.2 Giustificazione del processo di pressocolata per il pistone

Tipicamente i pistoni per motori stradali vengono prodotti per pressocolata in camera fredda, per colata in conchiglia oppure per forgiatura. Nei motori sportivi i pistoni vengono prodotti attraverso il processo di forgiatura, dove il prodotto finito che si ricava ha un'elevata resistenza e affidabilità, il che permette di aumentare il rapporto di combustione del motore ed aumentarne le prestazioni. Le fibre dell'alluminio diventano direzionali ed il materiale è compresso garantendo l'assenza di porosità. Inoltre, i pistoni forgiati hanno una microstruttura più fine rispetto ai pistoni fusi con la stessa

composizione di lega. Di contro è un processo più complicato rispetto alla pressocolata. Ciò comporta tempi e costi maggiori.

Invece per quanto riguarda il processo di colata in conchiglia; questo è sicuramente un processo più economico ed è adatto ai motori destinati all'uso non sportivo. Come si può notare dalla Figura 10 i costi della colata in conchiglia sono molto simili ai costi della pressocolata nel caso di un numero elevato di componenti prodotti. Il rischio di questo tipo di procedimento è che si possano creare difetti quali porosità e la disuniformità che riducono la resistenza del pistone stesso.

Per la produzione del pistone, solitamente si utilizza un processo pressocolata in camera fredda. In questo processo, il metallo fuso viene introdotto nel cilindro di iniezione, e successivamente forzato in cavità con pressioni da 20 a 70 MPa. Inoltre, l'intero processo di pressocolata e le relative operazioni di finitura sono ampiamente automatizzate, consentendo un'elevata produttività su pezzi caratterizzati da buona resistenza meccanica, forme geometriche complesse, buona finitura superficiale e accuratezza dimensionale.

Grazie alle elevate pressioni con cui la lega di alluminio viene iniettata nello stampo durante la pressocolata, le disuniformità e porosità, riscontrabili ad esempio nel processo di colata in conchiglia, si riducono. I costi d'acquisto ed esercizio degli impianti, insieme ai costi di realizzazione degli stampi, sono maggiori rispetto ai processi di colata in conchiglia, ma possono essere compensati per lotti produttivi consistenti. Perciò la scelta è ricaduta su questo processo produttivo.

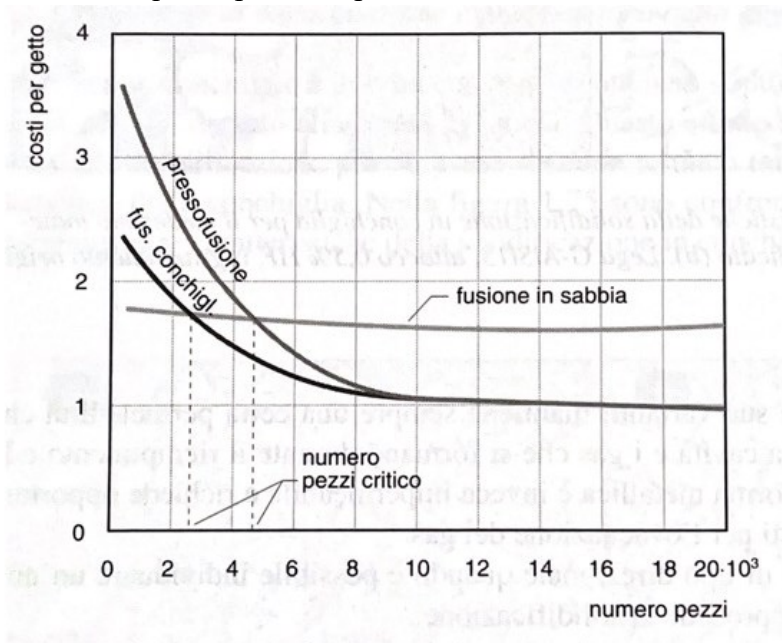


Figura 10 - Confronto tra i costi di una carcassa in fusione di lega di alluminio per diversi processi fusori


10. CICLO DI PRODUZIONE

I dati e le immagini relative agli utensili utilizzati per le varie lavorazioni sono stati acquisiti dai cataloghi delle aziende Sandvik Coromant e Seco Tools.


10.1 Ciclo di produzione della biella

1. preparazione metallurgica del metallo liquido;
2. preparazione e preriscaldamento degli stampi;
3. riempimento della cavità, colata con stampo che comprende foro maggiore di diametro Ø36 mm e foro minore di diametro Ø23 mm per evitare sprechi di materiale;
4. solidificazione;
5. apertura dello stampo;
6. estrazione del getto;
7. ripristino;
8. eventuale ramolaggio;
9. chiusura dello stampo;
10. eliminazione del sistema di riempimento e alimentazione;
11. rimozione della bava di colata;
12. foratura per 18 mm dal cappello di biella con punta da Ø5,5mm;

numero lavorazioni	durata tagliente	2479
	tempo di lavorazione	1,116 s
	velocità di taglio	106 m/min
	avanzamento per giro	0,17 mm
<p>codice utensile 861.1-0550-066A1-GM GC34</p> <p>macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW</p>		




13. foratura con punta da Ø4,2 mm con profondità lavorata di 19 mm (per M5 passo grosso con profondità di 37 mm da inizio del pezzo);


numero lavorazioni durata tagliente	2320	
tempo di lavorazione	1,182 s	
velocità di taglio	113 m/min	
avanzamento per giro	0,12 mm	
codice utensile 860.1-0420-021A1-GM X1BM		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		

14. taglio per dividere le due parti;

15. finitura, della superficie tagliata, tramite fresa sia della biella che del cappello di biella con profondità caratteristica minima 0.1 mm;


numero lavorazioni durata tagliente	4810	
tempo di lavorazione	2,214 s	
velocità di taglio	266 m/min	
avanzamento per dente	0,189 mm	
codice utensile R300-32EH25-10H		
macchinario consigliato: centro di lavoro universale mandrino utensile da 28 KW		

16. filettatura M5 passo grosso con profondità 17 mm;


numero lavorazioni durata tagliente	71800	
tempo di lavorazione	2,358 s	
velocità di taglio	35,9 m/min	
avanzamento per giro	0,8 mm	
codice utensile T100-KM104DA-M5 A110		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		

17. unione delle due parti con vite M5;


18. foratura a diametro Ø36 mm testa;

numero lavorazioni durata tagliente	6900	
tempo di lavorazione	0,526 s	
velocità di taglio	151 m/min	
avanzamento per giro	0,23 mm	
cod. inserto centrale 880-07 04 06H-C-GR 1044 cod. inserto periferico 880-07 04 W12H-P-GR 4334 codice utensile 880-D3600L40-02		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		


19. barenatura sulla testa di biella fino a diametro Ø38 mm;

numero lavorazioni durata tagliente	890	
tempo di lavorazione	3,395 s	
velocità di taglio	220 m/min	
avanzamento per giro	0,149 mm	
codice inserto TCMT 11 03 08-KF 3210 codice utensile BR20-45TC11F-C3		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		

20. foratura a diametro Ø23 mm piede;

numero lavorazioni durata tagliente	20700	
tempo di lavorazione	0,395 s	
velocità di taglio	151 m/min	
avanzamento per giro	0,18 mm	
cod. inserto centrale 880-04 03 05H-C-LM 1044 cod. inserto periferico 880-04 03 W07H-P-GR 4334 codice utensile 880-D2300L25-02		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		


21. alesatura sul piede di biella fino a diametro Ø25 mm;

numero lavorazioni durata tagliente	1140	
tempo di lavorazione	3,102	
velocità di taglio	210 m/min	
avanzamento per giro	0,08 mm	
codice adattatore 392.EREH-25 20 019 codice inserto TCMT 06 T1 04-KF 3210 codice utensile 825-29TC06-EH20		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		

22. fresatura sulla superficie laterale del foro della testa di biella;

numero lavorazioni durata tagliente	1200	
tempo di lavorazione	2,388 s	
velocità di taglio	243 m/min	
avanzamento per dente	0,3 mm	
codice inserto R390-17 04 08M-KH 3330 codice utensile R390-044C4T-17M		
macchinario consigliato: centro di lavoro universale mandrino utensile da 28 KW		

23. foratura da 3 mm su piede di biella per consentire lubrificazione;

numero lavorazioni durata tagliente	10300	
tempo di lavorazione	0,282 s	
velocità di taglio	113 m/min	
avanzamento per giro	0,1 mm	
codice utensile 860.1-0300-009A1-GM X1BM		
macchinario consigliato: macchina universale ad alte prestazioni con mandrino principale da 200 KW		

24. trattamento termico di Quenching and Partitioning.

Il trattamento termico Austempering è una soluzione ben nota per migliorare le proprietà meccaniche dei fusi in ghisa duttili, quindi indicato come "ADI" (Austempered Ductile Iron). Le migliori proprietà meccaniche delle ADI rispetto al ferro duttile convenzionale sono attribuite alla sua microstruttura risultante, che contiene principalmente bainite senza carburo con austenite trattenuta stabilizzata. Più recentemente, le ghise duttile sono state sottoposte a un altro trattamento termico, noto come "Quenching and Partitioning" (Q&P). In questo caso, la ghisa duttile viene austenitizzata, temprata ad una temperatura compresa tra le temperature M_f (Martensite finish) e M_s (Martensite start) e successivamente riscaldata a una temperatura superiore a M_s con un mantenimento di circa 2 ore per dividere il carbonio dalla martensite trasferito alla restante austenite. La microstruttura risultante comprende principalmente martensite a basso tenore di carbonio, austenite (stabilizzata dalla partizione del carbonio) e bainite senza carburo. Di seguito nella Figura 11 è rappresentato il processo di Q&P.

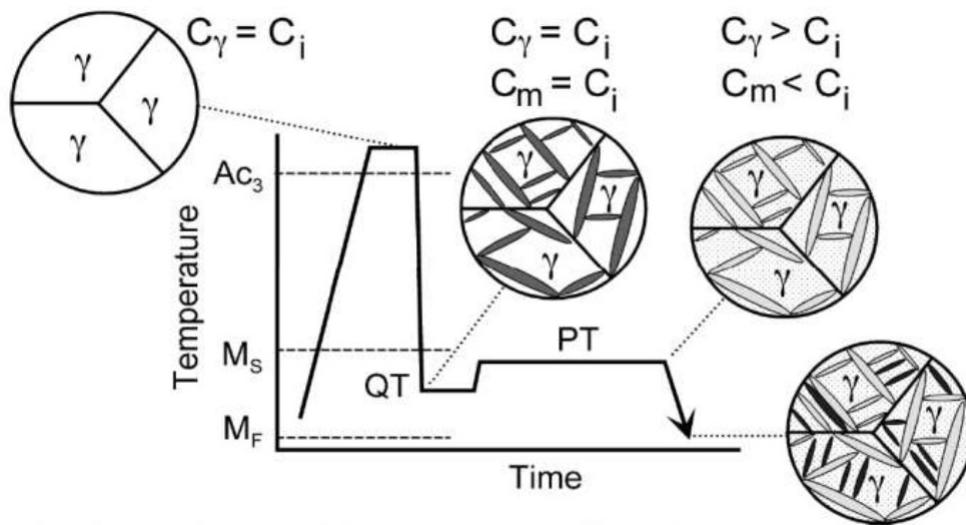


Figura 11 - Diagramma schematico del processo Q&P, producendo una struttura ferritico/martensitica/austenitica a partire da una struttura austenitica omogenea. C_i , C_γ e C_m rappresentano le concentrazioni di carbonio della lega iniziale, dell'austenite e della martensite, rispettivamente. QT e PT sono le temperature di quenching e di partitioning.

Tale microstruttura ha portato a proprietà uguali o migliori della ADI. Inoltre, le proprietà meccaniche (rappresentate in Figura 12) sono state valutate in modo comparativo.

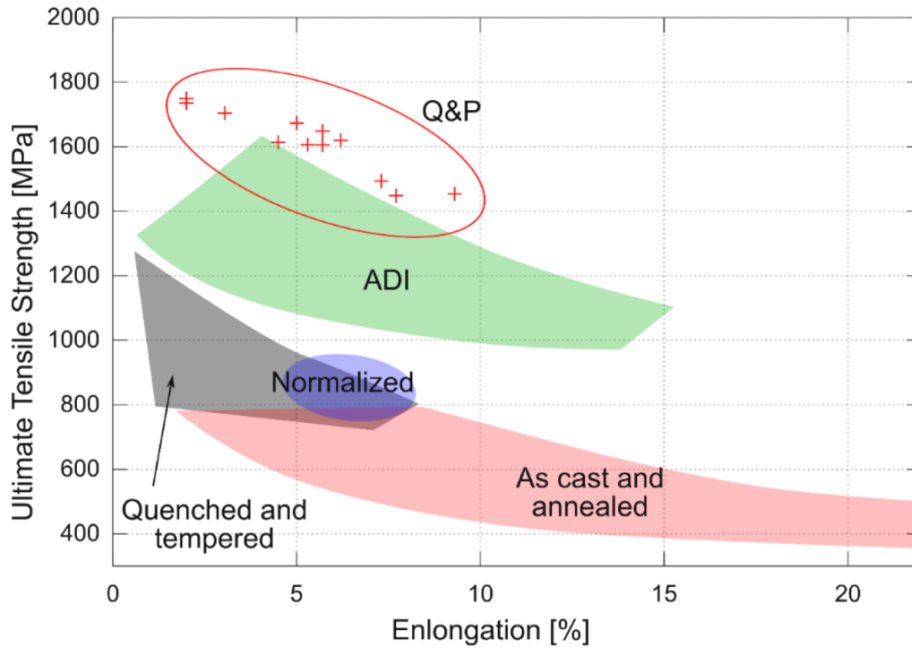
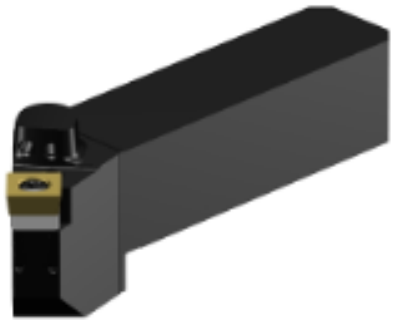


Figura 12 - Proprietà meccaniche in relazione a diversi trattamenti per la ghisa

10.2 Ciclo di produzione del pistone

1. pressocolata;
2. rimozione della bava di colata tramite nastro abrasivo;
3. sgrossatura e finitura al tornio del cielo del pistone fino a rugosità 1.6 μm ;


numero lavorazioni	durata tagliente	1160
	tempo di lavorazione	3,738 s
	velocità di taglio	1220 m/min
	avanzamento per giro	0,206 mm
codice inserto SCGX 09 T3 08-AL H10 codice utensile QS-SSDCR 2020 09C		
macchinario consigliato: tornio medio da 25KW velocità del mandrino fino a 4000 rpm		



4. sgrossatura e finitura al tornio della superficie laterale del pistone fino a rugosità 1.6 μm ;

numero lavorazioni durata tagliente	392	
tempo di lavorazione	10.86 s	
velocità di taglio	1210 m/min	
avanzamento per giro	0,104 mm	
codice inserto DCGX 11 T3 02-AL H10 codice utensile QS-SDJCR 2020 11C		
macchinario consigliato: tornio medio da 25KW velocità del mandrino fino a 4000 rpm		

5. troncatura tramite utensile troncatore delle sedi per le fasce elastiche di 2.7 mm di profondità e di 2 mm di spessore per le fasce di tenuta, di 4 mm di spessore per la fascia raschiaolio (calcoli sotto fatti per scanalature da 2 mm);

numero lavorazioni durata tagliente	28400	
tempo di lavorazione	0.261 s	
velocità di taglio	1510 m/min	
avanzamento per giro	0,08 mm	
codice inserto N123E2-0185-0001-GF H13A codice utensile N123E20-25A2		
macchinario consigliato: tornio medio da 25KW velocità del mandrino fino a 4000 rpm		

6. foratura con punta da $\varnothing 20$ mm dei fori per lo spinotto;

numero lavorazioni durata tagliente	6410	
tempo di lavorazione	0.497 s	
velocità di taglio	286 m/min	
avanzamento per giro	1,2 mm	
codice utensile 860.1-2000-060A1-NM H10F		
macchinario consigliato: tornio medio da 25KW velocità del mandrino fino a 4000 rpm		

7. barenatura con punta da 22 mm dei fori per lo spinotto;

numero lavorazioni durata tagliente	6410	
tempo di lavorazione	0.497 s	
velocità di taglio	210 m/min	
avanzamento per giro	0,14 mm	
codice inserto CCGT060204 03G3 codice utensile A765R2		
macchinario consigliato: tornio medio da 25KW velocità del mandrino fino a 4000 rpm		

8. troncatura interna delle due sedi per i seeger ferma-spinotto, di larghezza 1.1 mm e profondità di 0.5 mm, a partire da 3 mm dal bordo;

numero lavorazioni durata tagliente	168000	
tempo di lavorazione	0.4 s	
velocità di taglio	1510 m/min	
avanzamento per giro	0,14 mm	
codice inserto 240150 5/1 Inserto per gole KOMET® UniTurn®,		
macchinario consigliato: tornio medio da 25KW velocità del mandrino fino a 4000 rpm		

9. trattamento termico di anodizzazione dura

Viene effettuata un'anodizzazione nel cielo del pistone in modo tale da aggiungere un riporto ceramico di allumina Al_2O_3 . Questo trattamento viene soprannominato "scudo termico" in quanto aumenta l'adiabaticità della camera di combustione. Vi è tuttavia lo sgradevole rischio che i differenti coefficienti di dilatazione termica, dell'alluminio rispetto all'allumina, portino ad un distacco del riporto con le ovvie conseguenze per la salute del motore.

In generale un trattamento di anodizzazione consiste nell'inserire e collegare come anodo un manufatto di alluminio in una cella elettrolitica e successivamente lo si riveste di un ossido anodico. Con questa finitura manufatti di alluminio possono essere utilizzati in applicazioni per le quali sarebbero altrimenti inadatti. Il film di ossido, prodotto dal processo di anodizzazione, cresce dal metallo base come parte integrale del metallo stesso e, se il processo è correttamente eseguito,

riveste l'alluminio con uno strato duro, resistente a corrosione e ad usura abrasiva, con eccellenti proprietà protettive.

In questo caso il processo più indicato per il trattamento termico del pistone è quello di anodizzazione dura.

Per anodizzazione dura si intende un tipo particolare di ossidazione anodica. Questo processo, che richiede un elettrolita a più alta concentrazione di acido, temperatura più bassa e voltaggio e densità di corrente maggiori, è anche noto come "anodizzazione dura ingegneristica". La denominazione deriva dalle particolari caratteristiche di elevata durezza, alta densità ed eccellente resistenza a corrosione dello strato di ossido anodico. La densità dell'ossido è il risultato del raffreddamento dell'elettrolita, che opera a temperatura poco superiore a 0 °C. A queste temperature la velocità di dissoluzione dell'ossido anodico, dovuta all'attacco acido dell'elettrolita, è fortemente ridotta rispetto alle condizioni ordinarie di anodizzazione. A causa della bassa temperatura, la tensione richiesta per sostenere la densità di corrente di anodizzazione favorisce la formazione di uno strato di ossido più compatto e con pori più piccoli, con caratteristiche di durezza e resistenza a usura molto migliorate.

Le condizioni operative usuali per ottenere strati di ossido anodico duro sono:

- concentrazione di acido: 180-225 g/l;
- contenuto di alluminio: 5-15 g/l;
- temperatura: - 2-0 °C.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati additivi organici speciali, per consentire di operare a temperatura più elevata (10-20 °C). Questi additivi hanno la funzione di inibire la reazione di dissoluzione dell'ossido, favorendo l'ottenimento di un risultato equivalente a quello dell'elettrolita raffreddato.

11. ANALISI TEMPI E COSTI DI PRODUZIONE

Attraverso dei modelli presi dalla letteratura sono stati ricavati alcuni parametri inerenti i processi di fonderia. Successivamente, utilizzando SolidWorks Costing, sono stati stimati tempi e costi dell'intero processo di produzione.

11.1 Analisi biella

11.1.1 Calcolo del tempo di colata dalla letteratura

Per il calcolo dei tempi di colata della biella è stata presa una formula stabilita dalla pratica presso varie fonderie e da sperimentatori.

La formula utilizzata è la seguente:

$$t = K_1 * \sqrt{W_c}$$

K_1 = costante empirica che dipende dalla sezione del materiale

W_c = massa di colata

Il valore di K_1 in questo caso è di 2.670 dato che si ha uno spessore medio della biella da 10 mm a 25 mm, mentre la massa colata è di 0.391 Kg presa dal modello solido su SolidWorks.

Il tempo di colata viene quindi calcolato:

$$t = 1.67 \text{ s}$$

11.1.2 Calcolo dei tempi e costi attraverso SolidWorks Costing

Attraverso il programma SolidWorks Costing è stata effettuata un'analisi più accurata dei tempi e dei costi del processo di colata della biella. Per procedere con l'analisi si sono fatte una serie di ipotesi:

- il costo del materiale è considerato pari a 0,22 €/Kg;
- il costo della produzione è di 30 €/h;
- i lotti di produzione sono composti da 100 pezzi ciascuno.

In particolare, il valore dei costi nella voce "Fabbricazione" comprende i costi di set-up ed estrazione dei semilavorati. Queste operazioni vengono incluse in "Impostazioni" nella sezione dei tempi.

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

Nella Tabella 7 e 8 vengono riportati i risultati di questa analisi.

Materiale:	GJS 500-7 C	
Metodo di fabbricazione:	Colata in conchiglia	
Peso:	391 g	
Tempo ciclo:	15 s	
Numero totale di parti:	400000	
Numero di cavità nello stampo:	8	
Costo stimato per parte:	2,50 €	
Suddivisione costi		
--Input--	--Prezzo--	--Percentuale costo--
Materiale:	0,085 €	3%
Fabbricazione:	2,370 €	95%
Stampo:	0,047 €	2%
Tempo stimato per parte		
--Input--	--Valore--	
Impostazioni	00:05:00	(hh:mm:ss)
Operazioni	00:00:01	(hh:mm:ss)
Totale	00:05:01	(hh:mm:ss)

Tabella 7 - Risultati analisi SolidWorks Costing per la colata in conchiglia

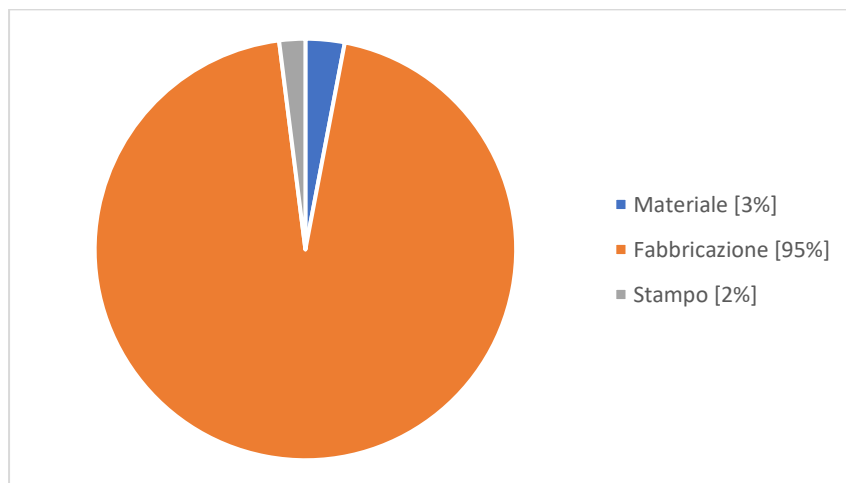


Figura 13 - Suddivisione costi colata in conchiglia della biella

Da come si può notare, il tempo di iniezione calcolato dapprima attraverso delle formule empiriche, corrisponde a quello ricavato dal software sotto la voce "Operazioni". Inoltre dai risultati emersi si può notare come la maggior parte del costo sia legato alle fasi precedenti e successive alla colata del materiale.

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

Nella Tabella 8 vengono invece analizzati i tempi e costi inerenti alle lavorazioni meccaniche successive alla colata in conchiglia. Per la stima di questi parametri è stato realizzato il modello solido del semilavorato come estratto dal processo di fonderia. Nella Figura 15 si possono osservare (in verde chiaro) le zone soggette a lavorazione per asportazione di truciolo.

Materiale:	Ghisa sferoidale GJS 500-7 C	
Metodo di fabbricazione:	Lavorazione a macchina	
Peso:	391 g	
Costo della produzione:	30 €/h	
Numero totale di parti:	400000	
Dimensione lotto:	100	
Costo stimato per parte:	10.68 €	
Suddivisione costi		
--Input--	--Prezzo--	--Percentuale costo--
Semilavorato:	2.5 €	23,4%
Impostazioni:	8.03 €	75,2%
Operazioni	0.15 €	1,4%
Operazioni di asportazione di truciolo		
	--Volume rimosso (mm ³)--	--Costo (€ / Parte)--
Lavorazione piede di biella	1910,51	0,028
Lavorazione testa di biella	4948,43	0,028
Foro 1 vite	690,88	0,038
Foro 2 vite	690,88	0,038
Foro piede di biella	35,98	0,019
Tempo stimato per parte		
--Input--	--Valore--	
Impostazioni	00:16:48	(hh:mm:ss)
Operazioni	00:00:19	(hh:mm:ss)
Totale	00:17:07	(hh:mm:ss)

Tabella 8 – Risultati analisi SolidWorks Costing per le lavorazioni successive alla colata in conchiglia

Il costo stimato per parte è comprensivo di tutte le lavorazioni industriali del semilavorato ottenuto, ovvero dalla colata in conchiglia, dalle operazioni con le macchine utensili, dai costi di set-up della parte e dai tempi dei vari cambi utensili. Tuttavia il risultato ottenuto è una stima parziale del costo finale in quanto non considera le operazioni di trattamento termico e i vari costi logistici (stoccaggio, trasporto, ecc..).

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

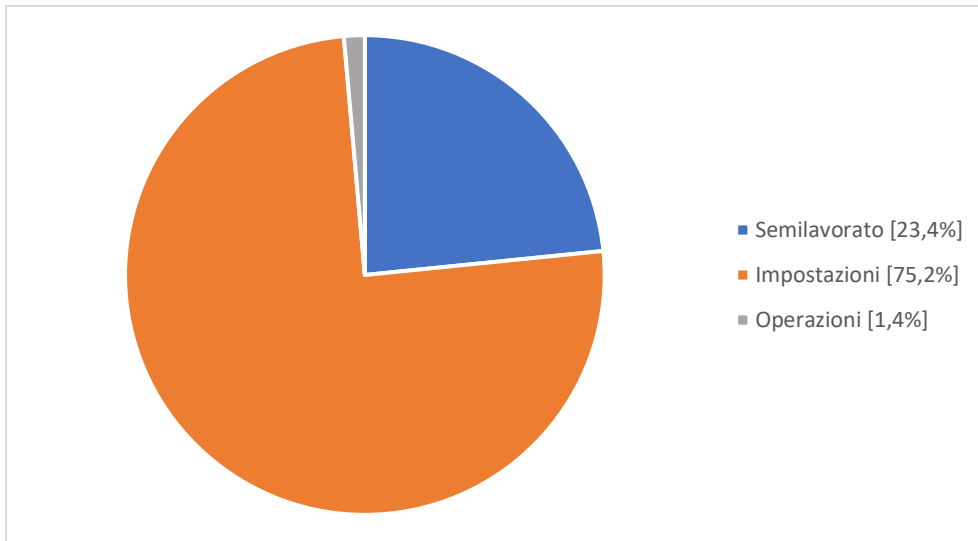


Figura 14 - Suddivisione costi per la produzione della biella

Costing

Scegliere il corpo dello stock:

- Configurazione: [Seleziona]
- Parte di riferi...: C:\Users\filip\Downloads\Biella_colata...

Aggiorna corpo stock

Informazioni sul costo:

- Dati di Costing salvati: 2.65 USD
- Volume: 61928.27 mm³
- Costo persona...: 0.00 USD

Anteprima stock

Quantità

Numero totale di parti: 400000

Dimensione lotto: 100

Costo della produzione

30.00 USD/ore

Costo stimato per Parte

11.35 USD/Parte

Confronto

Corrente: **11.35 USD**

Precedente: 10.45 USD

9%

Divisione

Materiale:	[2.65 USD]	23%
Fabbricazione:	[8.70 USD]	77%

Figura 15 - Interfaccia SolidWorks Costing

11.2 Analisi pistone

11.2.1 Calcolo dei tempi e dei costi della pressocolata dalla letteratura

Le macchine per pressofusione sono principalmente catalogate sulla base della forza di bloccaggio della macchina. Per evitare che le metà dello stampo si separino, la forza di serraggio, F , esercitata dalla macchina sullo stampo deve essere maggiore della forza esercitata dal metallo fuso, f , che si oppone alla chiusura degli stampi:

$$F > f$$

La forza f può essere calcolata con la relazione:

$$f = \frac{p_m A_{pt}}{100} \quad [kN]$$

dove

p_m = pressione presente nelle cavità

A_{pt} = area totale proiettata all'interno dello stampo

Per il calcolo di A_{pt} si fa riferimento al valore medio che può essere rappresentato approssimativamente come:

$$A_{pt} = 1.75 A_{pc} \quad [mm^2]$$

dove A_{pc} = area proiettata nelle cavità.

Nel nostro caso, avendo una cavità cilindrica di diametro $\varnothing 97$ mm e 8 cavità per stampo, l'area A_{pc} sarà:

$$A_{pc} = 8 * \left(\frac{\pi}{4}\right) * 97^2 = 5.91 * 10^4 \text{ mm}^2$$

quindi l'area totale proiettata nello stampo sarà:

$$A_{pt} = 1.75 * 5.91 * 10^4 = 10.34 * 10^4 \text{ mm}^2$$

La pressione presente nelle cavità, p_m , è stata ricavata dalla Tabella 9:

Alloys	Cavity Pressure (MN/m ²)
Zinc	21
Aluminum	48
ZA	35
Copper	40
Magnesium	48

Tabella 9 - Valori tipici di pressione presente nelle cavità degli stampi per la pressocolata

dove nel nostro caso, ovvero per una lega di alluminio, è di:

$$p_m = 48 \text{ MN/m}^2$$

Quindi, la forza di serraggio dello stampo dovrà essere:

$$F \geq \frac{(48 * 10.34 * 10^4)}{100} \geq 4.96 * 10^3 \text{ kN}$$

Per il calcolo del costo di colata di un singolo pistone si deve, come prima cosa, trovare il volume di stampaggio totale richiesto per il ciclo di colata.

Il valore di questo volume, V_s , si calcola dalla formula:

$$V_s = V_c \left(1 + \frac{2}{h}\right) * n_{cavità}$$

dove

V_c = volume della cavità

h = spessore medio della parete del pistone

I valori di V_c e h sono stati ricavati dal programma di modellazione solida Solidworks:

$$V_c = 355 \text{ mm}^3$$

$$h = 5 \text{ mm}$$

quindi:

$$V_s = 355 \left(1 + \frac{2}{5}\right) * 8 = 3976 \text{ mm}^3$$

Il costo di colata per un singolo pistone viene calcolato come:

$$C_p = (V_c + 0.2(V_s - V_c)) * \rho C_m$$

dove

ρ = densità del materiale

C_m = costo materiale per chilogrammo

Dal sito ufficiale della Confindustria si è ricavato che il 1/12/2022 il costo unitario dell'alluminio è:

$$C_m = 2.326 \frac{\text{€}}{\text{Kg}}$$

mentre la densità del materiale è di:

$$\rho = 2.74 * 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}$$

Il costo C_p sarà quindi:

$$C_p = 2.44 \text{ €}$$

11.2.2 Calcolo dei tempi e costi attraverso SolidWorks Costing

La stessa analisi effettuata per la biella è stata svolta anche per il pistone. Anche in questo caso si è considerato:

- il costo del materiale pari a 2,41 €/Kg;
- il costo della produzione di 30 €/h;
- i lotti di produzione composti da 100 pezzi ciascuno.

Materiale:	Lega di alluminio 4032	
Metodo di fabbricazione:	pressocolata	
Peso:	0,45 kg	
Tempo ciclo:	15 s	
Costo/peso del materiale:	2,41 €/kg	
Costo della produzione:	30 €/h	
Costo stimato per parte:	3,58 €	
Numero totale di parti:	400000	
Numero di cavità:	8	
Suddivisione costi		
--Input--	--Prezzo--	--Percentuale costo--
Materiale:	1.08 €	30.2%
Fabbricazione	2.38 €	66.5%
Stampo	0,12 €	3,3%
Tempo stiamato per parte		
--Input--	--Valore--	--Percentuale costo--
Impostazioni	00:05:00	(hh:mm:ss)
Operazione di iniezione	00:00:01	(hh:mm:ss)
Totale	0:05:01	(hh:mm:ss)

Tabella 10 - Risultati analisi SolidWorks Costing pressocolata

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

Anche in questo caso i tempi e costi preponderanti sono attribuiti alle operazioni precedenti e successivi alla pressocolata stessa. Si può notare dalla Figura 16 che, diversamente dal caso precedente, l'utilizzo di una lega di alluminio incide maggiormente sul costo del materiale che occupa circa un terzo del costo del semilavorato.

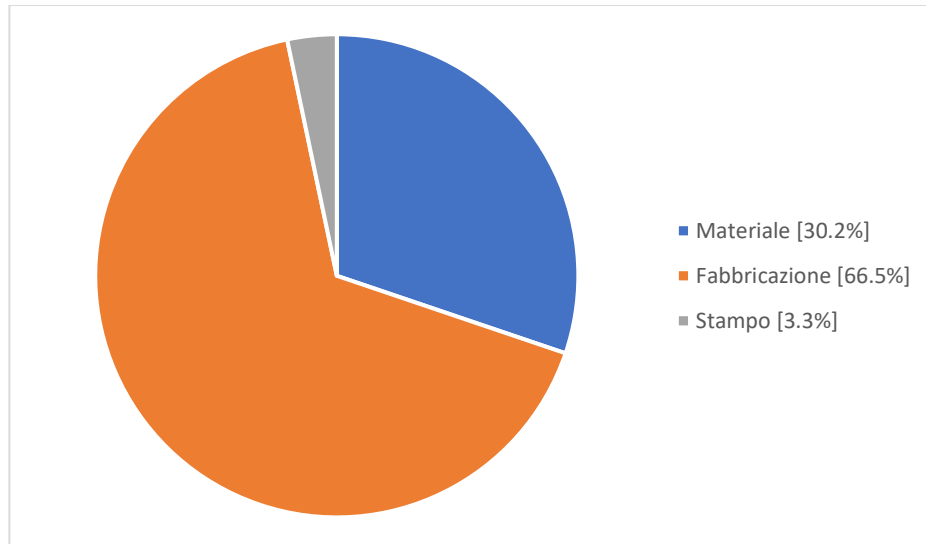


Figura 16 – Suddivisione costi pressocolata pistone

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

Nella Tabella 11 vengono invece analizzati i tempi e costi inerenti alle operazioni successive alla pressocolata il cui prezzo è incluso sotto la voce “Semilavorato”.

Materiale:	Lega di alluminio 4032	
Metodo di fabbricazione:	Lavorazione a macchina	
Peso:	0,45 Kg	
Materiale stock:	Cilindro	
Dimensione cilindro:	97.00 x 73.10 mm	
Costo/peso del materiale:	2,41 €/Kg	
Costo della produzione:	30 €/h	
Numero totale di parti:	400000	
Dimensione lotto:	100	
Costo stimato per parte:	15,90 €	
Suddivisione costi		
--Input--	--Prezzo--	--Percentuale costo--
Semilavorato:	3,58 €	22,5%
Operazioni:	1,56 €	9,8%
Impostazioni:	10,76 €	67,7%
Operazioni		
	--Volume rimosso (mm ³)--	--Costo (€ / Parte)--
Scanalatura OD 1	3179,17	0,25
Scanalatura OD 2	1589,58	0,12
Scanalatura OD 3	1589,58	0,12
Tornitura superficie laterale	6653,09	0,03
Sfaccettatura	738,98	0,05
Foro 1	14201,4	0,03
Foro 2	14201,4	0,03
Scanalatura seger x2	77,75	0,04
Anodizzazione	-	0,89
Tempo stimato per parte		
--Input--	--Valore--	
Impostazioni	00:22:23	(hh:mm:ss)
Operazioni	00:01:16	(hh:mm:ss)
Totale	00:23:40	(hh:mm:ss)

Tabella 11 - Risultati analisi SolidWorks Costing per le lavorazioni successive alla pressocolata

Anche in questo caso, come indicato nella Figura 17, i tempi e costi preponderanti sono attribuiti alla voce “Impostazioni” la quale comprende le operazioni di set-up del pezzo sul macchinario. Diversamente dalla biella è stato possibile stimare l’importo che il trattamento termico di anodizzazione comporta.

Progettazione del ciclo di produzione di un assieme meccanico

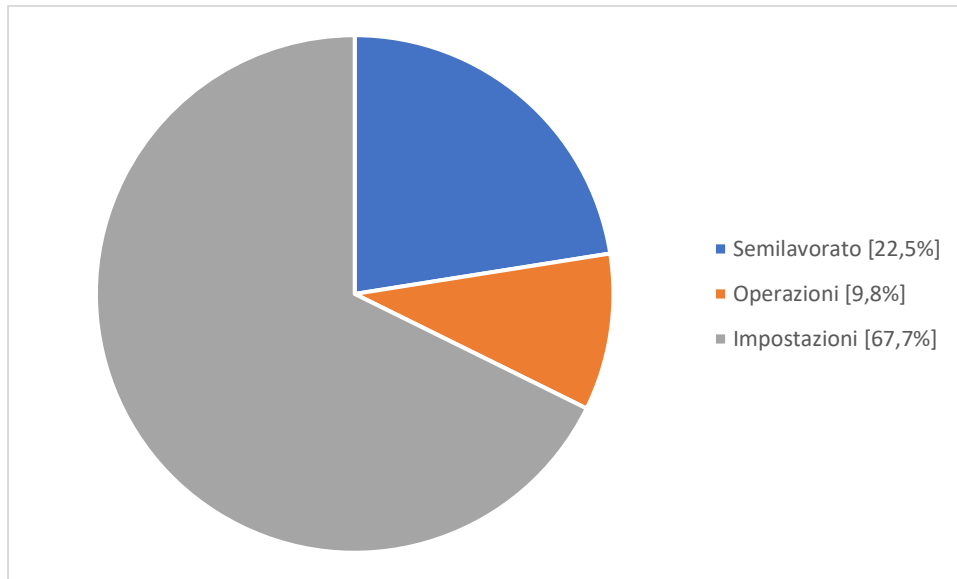


Figura 17 - Suddivisione costi per la produzione del pistone

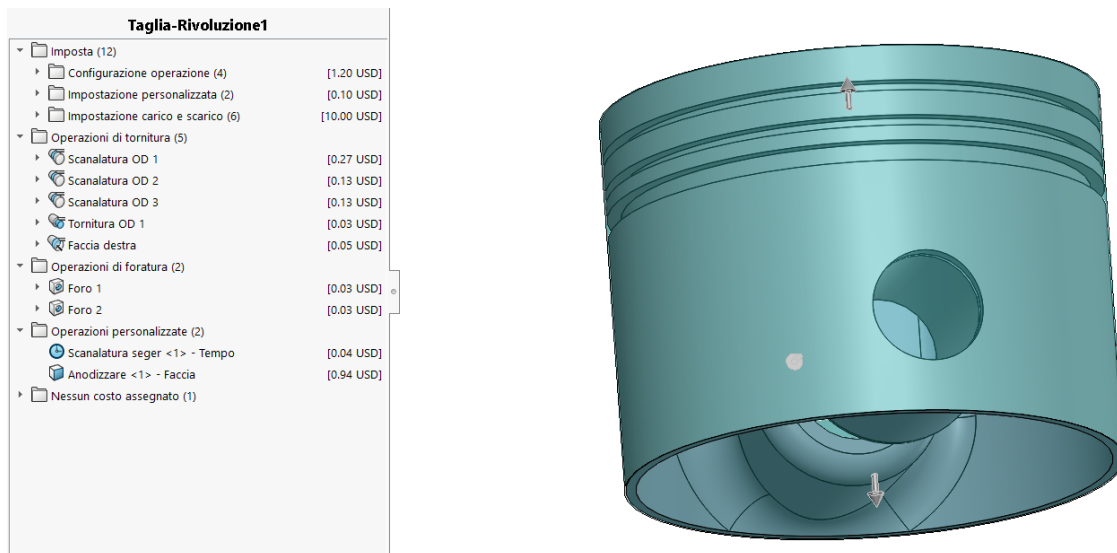


Figura 18 - Interfaccia SolidWorks Costing

12. CONSIDERAZIONI FINALI

I risultati ottenuti tramite SolidWorks Costing sono compatibili con quanto è stato possibile calcolare attraverso la letteratura.

Inoltre i tempi di lavorazione ricavati attraverso lo stesso software sono molto simili a quelli trovati tramite il calcolatore della Sandvik, attraverso il quale sono stati selezionati gli utensili più adatti. Infine i costi risultanti da questa ricerca sono in linea con quanto già presente sul mercato. Date queste corrispondenze, è stata considerata valida l'analisi svolta sia per la biella che per il pistone.

13. BIBLIOGRAFIA

Niemann G., Winter H., Bernd-Robert Höhn, *Manuale degli organi meccanici*, , Tecniche Nuove, 2006

Iuliano L., *Manuale della fonderia*, Tecniche Nuove, 2007

Boothroyd G., Dewhurst P., Knigh A. K., *Manufacturing engineering and material processing. Third Edition*, CRC Press, 2010

Kalpakjian S., Schmid R. S., *Tecnologia meccanica. Sesta edizione*, Pearson, 2021

RALPH DTE Automotive & Motorsport <https://www.ralph-dte.net>

Sandvik Coromat <https://www.sandvik.coromant.com>

Seco Tools <https://www.secotools.com>

[https://www.calculatoratoz.com/it/shell-moulitd-ductile-iron-\(vertical-pouring\)-calculator/Calc-10752#FormulaPanel](https://www.calculatoratoz.com/it/shell-moulitd-ductile-iron-(vertical-pouring)-calculator/Calc-10752#FormulaPanel)