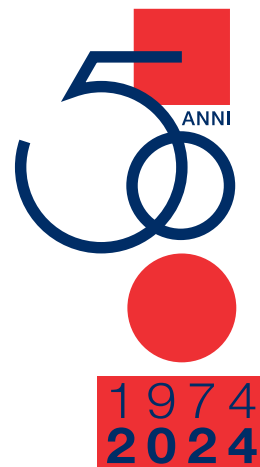




 **COMMERCIALE FOND** s.p.a.  
ALLUMINIO - GHISA - BRONZO - RAME - OTTONE  
IN BARRE, LASTRE E FUSIONI A MODELLO  
MATERIE PLASTICHE IN BARRE E LASTRE



**INVESTMENT CASTING**  
Processo di produzione  
e caratteristiche tecniche

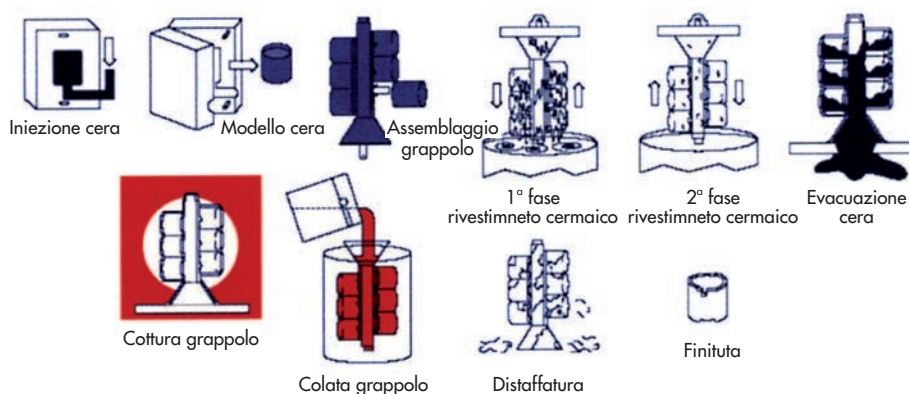
Edizione 03 Ottobre 2023

## INTRODUZIONE

Utilizzato in passato (fin dal 3000 a.C.) per la produzione di statue in bronzo e gioielli, fu largamente ignorato dall'industria moderna fino all'inizio del XX secolo. La vera spinta alla sua evoluzione, avvenne con l'inizio della seconda guerra mondiale, grazie allo sviluppo delle tecnologie militari a propulsione. Gli anni Cinquanta, videro un forte ampliamento dell'industria dell'Investment Casting, sia per applicazioni militari e aeronautiche, che per la realizzazione di turbine a gas per veicoli terrestri, marini ed impianti petrolchimici. Grazie all'utilizzo nel processo di produzione dei gusci ceramici, delle autoclave a vapore, dell'automazione e della robotica, il campo di applicazione del processo si è ora esteso a svariati tipologie di leghe ed a numerosi componenti, in grado di lavorare in condizioni molto severe, sia in termini di sforzi applicati che di temperature e di ambiente corrosivo.

## IL PROCESSO

Il processo di Investment Casting, noto anche come "Fusione a Cera Persa" o "Microfusione", prevede la realizzazione di un modello a perdere necessario per la costruzione del guscio, anch'esso a perdere. Il modello, solitamente di cera, viene immerso diverse volte in bagni di ceramica liquida, sino a formare un guscio attorno ad esso. Una volta realizzato quest'ultimo, il modello viene sciolto e la cavità restante viene riempita tramite colata di metallo fuso. A solidificazione avvenuta, il guscio deve essere distrutto per permettere l'estrazione del getto. Per aumentare la produttività i pezzi vengono sistemati in grappoli.



## IL MODELLO IN CERA

Le cere utilizzate per la realizzazione dei modelli per investment casting (cere di paraffina, microcristalline, polietileniche, ozocerite, cera d'api, ecc.) solitamente vengono modificate aggiungendo materiali come resine, antiossidanti, plastiche, ecc. al fine di migliorarne le proprietà. A differenza di altri composti omogenei, infatti, le cere non si fondono direttamente con l'aumentare della temperatura, ma passano attraverso stadi intermedi: da solido a plastico, semi-plastico, semi-liquido fino a liquido, con una conseguente riduzione delle loro proprietà.

Le cere "pure" sono caratterizzate da scarsa resistenza meccanica, scarsa rigidità ed elevata variabilità dimensionale, dovuta al ritiro di solidificazione, in quanto l'espansione termica non è uniforme nelle varie fasi, ma cambia durante il riscaldamento.

Tali proprietà, possono essere migliorate attraverso l'aggiunta (in dosi ristrette poiché aumentano la viscosità della cera) di plastiche come polietilene (economico e compatibile con molte cere), cellulosa etilica (costosa e incompatibile con diverse cere), nylon, polistirene, etilene vinil acetato, ecc.

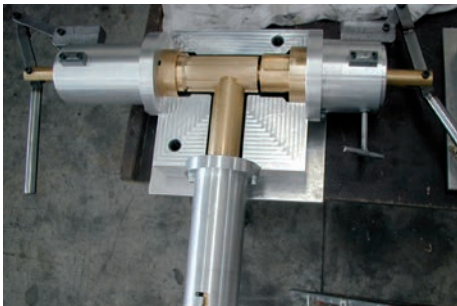
Per contenere la contrazione volumetrica del modello durante la solidificazione, non sono però sufficienti le piccole quantità di plastiche ammissibili; risultati migliori



Macchine per iniezione cera.



Macchine per iniezione cera.



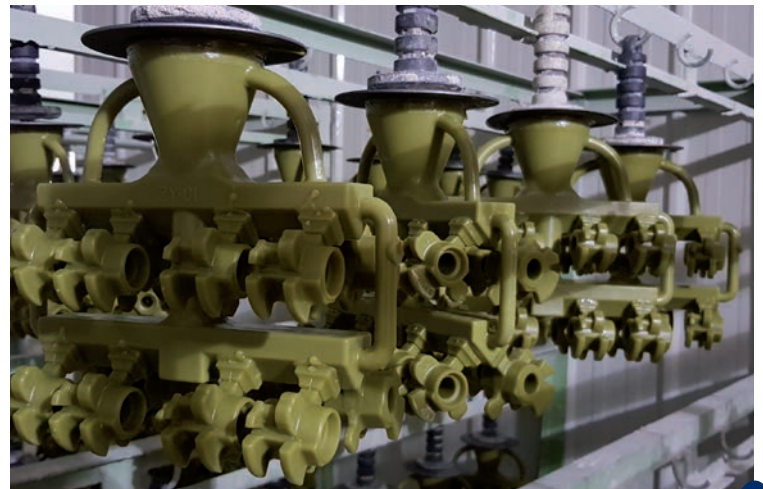
Stampo in alluminio con inserti.



Stampo in acciaio con inserti.



Assemblaggio del grappolo in cera.



Grappoli in cera assemblati.

si ottengono con l'uso di resine di basso peso molecolare, il cui effetto è proporzionale alla quantità utilizzata. Le resine disponibili in commercio sono quelle derivate dalla colofonia (esterificate, polimerizzate, idrogenate e deidrogenate). In alternativa, la contrazione volumetrica può essere ridotta mescolando alle cere prodotti solidi in polvere detti filler, che sono insolubili nelle cere, presentano un punto di fusione più alto e quando la miscela è liquida, producono una sospensione facilmente iniettabile. Dal momento che non sono allo stato liquido, non contribuiscono al ritiro di solidificazione del modello, che risulta quindi ridotto in proporzione alla quantità di cariche utilizzate.

Le miscele di cera vengono iniettate a temperatura e pressione relativamente basse, all'interno di appositi stampi scomponibili, che conferiscono loro la forma desiderata. Possono essere iniettate allo stato liquido, semi-liquido, pastoso o solido (estrusione). Il range di temperatura varia dai 43°C ai 77°C, mentre le pressioni sono dell'ordine di 275 KPa - 10.3 MPa. Le cere liquide sono iniettate alle temperature più elevate ed alle pressioni più basse, al contrario di quelle solide. Generalmente componenti di grosse dimensioni vengono prodotti singolarmente, mentre quelli di dimensioni medio piccole, vengono realizzati anche in più figure nello stesso stampo, in modo da ottimizzarne la produttività.

Alcuni modelli vengono iniettati in uno stampo che conferisce loro già la forma finale, compresi i sistemi di colata; tuttavia per realizzare fusioni con geometrie molto complesse, a volte le cere sono prodotte in segmenti più semplici e combinate successivamente per ottenere il modello del pezzo finale. Il sistema di colata ovvero: colate, canali di colata e colatoio, nella maggior parte dei casi viene prodotto separatamente. L'assemblaggio è fatto per lo più manualmente, mediante saldatura delle varie parti. La cera, all'interfaccia fra i due componenti da saldare, viene rapidamente sciolta con piastre riscaldate, piccole fiammelle e coltelli caldi; i componenti sono poi accoppiati esercitando una certa pressione, fino a quando la cera è solidificata di nuovo. Una colla a caldo può essere utilizzata come alternativa, o in combinazione alla saldatura. Il design del grappolo è una delle variabili fondamentali del processo, che influisce in modo significativo sulla qualità del prodotto finito. Pertanto, quando si progetta un grappolo, è necessario tenere in considerazione molti fattori, fra i quali: la facilità di assemblaggio e formatura, il numero di pezzi prodotti in un'unica colata, la possibilità di evacuare completamente la cera del guscio, la corretta alimentazione dei pezzi, il rapporto fra metallo colato e getti finiti, la rimozione semplice del guscio dopo colata, la possibilità di separare i componenti del grappolo, il limite massimo di capacità degli impianti e altri fattori.

Uno degli aspetti più critici nella progettazione dei grappoli è il corretto dimensionamento dei canali e degli attacchi di colata, che devono essere tali da garantire un regolare riempimento e una solidificazione progressiva verso la materozza. Talvolta vengono utilizzate delle materozze separate per ciascun getto, nella maggior parte dei casi però, il sistema di colata funge anche da materozza per tutto il grappolo, soprattutto quando questo è costituito da un numero elevato di componenti.

## IL GUSCIO CERAMICO

Il guscio è ottenuto applicando una serie di rivestimenti ceramici sul modello di cera. Il grappolo viene inizialmente immerso in un bagno contenente l'impasto ceramico (detto slurry), quindi estratto e sgocciolato per eliminare gli eccessi di liquido, così da ottenere un velo di copertura uniforme. Lo strato umido, viene immediatamente ricoperto mediante aspersione di sabbia refrattaria per evitare che lo strato sottostante possa colare, per favorire l'adesione fra i diversi strati e per aumentare rapidamente lo spessore del guscio. Ogni rivestimento deve essere lasciato essiccare, mediante asciugatura in ambiente controllato (sia temperatura che umidità), prima dell'applicazione di quello successivo. Le operazioni di immersione, aspersione ed essiccazione sono ripetute più volte, fino all'ottenimento di uno spessore tale, da garantire l'idonea resistenza meccanica durante le fasi di evacuazione della cera e di colata del metallo, ma anche una sufficiente permeabilità, per consentire un corretto riempimento dell'impronta.

I refrattari comunemente utilizzati per la realizzazione dei gusci sono a base di silice (silicato di zirconio e vari silicati di allumina). Gli agenti leganti più comunemente impiegati sono silici colloidali ed etil-silicati. E' possibile aggiungere anche agenti nucleanti, quali i composti refrattari di cobalto, gli alluminati, i silicati, i titanati e gli ossidi. Gli impasti vengono preparati aggiungendo polveri refrattarie al legante liquido e attraverso una continua agitazione del bagno, si impedisce la formazione di agglomerati facilitando la dispersione della polvere. Durante la fase di preparazione e di utilizzo, gli impasti vengono continuamente monitorati, controllandone temperatura, densità, PH, ecc. Generalmente gli impasti utilizzati per i primi strati di rivestimento contengono polveri refrattarie più fini e hanno viscosità più elevate. Il numero di rivestimenti può variare da un minimo di 5 fino a 15 a seconda delle dimensioni del modello, mediamente si applicano da 6 a 9 strati.



*Immersione nel bagno ceramico.*



*Aspersione sabbia refrattaria.*



*Essiccazione gusci in ambiente a temperatura ed umidità controllate.*



## LE ANIME



Modello in cera con anima.

Le anime si distinguono in auto-formanti e preformate. Le cosiddette auto-formanti necessitano la presenza di cavità d'alloggio già nel modello in cera e pertanto, all'atto dell'iniezione della cera nello stampo, si devono prevedere opportune spine o rilievi per la realizzazione di tali cavità. Qualora la geometria del modello sia complicata, o siano presenti sottosquadri, è possibile inserire apposite anime in cera solubile all'interno dello stampo, così che la cera iniettata le possa inglobare; successivamente il modello viene immerso in soluzioni che, attaccando in modo selettivo solo l'anima, lasciano inalterato il resto del modello. Il materiale più comunemente utilizzato per queste anime è polietilene glicolico con aggiunta di filler, quali bicarbonato di sodio o carbonato di calcio; i filler si dissolvono nell'acido sviluppando gas che determinano una vigorosa agitazione, con ulteriore accelerazione del processo di dissoluzione.

Qualora la geometria del componente renda impossibile, o comunque difficile, l'utilizzo di anime auto-formanti, si preferiscono quelle pre-formate. Questa seconda tipologia richiede una preventiva realizzazione delle anime, che dovranno essere posizionate all'interno dello stampo con un leggero gioco, poiché presentano una dilatazione termica diversa rispetto a quella del modello.

## RIMOZIONE DEL MODELLO IN CERA



Evacuazione cera in autoclave.

La rimozione del modello dal guscio, presenta spesso delle difficoltà legate al fatto che l'espansione termica della cera è decisamente superiore a quella del guscio refrattario. Infatti, quando il guscio viene riscaldato per fare liquefare la cera, la diversa espansione genera forti pressioni che possono criccare o addirittura rompere il guscio stesso.

Tale problema può essere aggirato riscaldando lo stampo molto rapidamente; in questo modo la superficie del modello in cera a contatto col guscio, liquefa prima del resto del grappolo, uscendo dal guscio e lasciando spazio alla restante parte del modello, che riesce così ad espandersi senza problemi. Tuttavia, anche con questo accorgimento, i gusci sono fortemente sollecitati. I metodi comunemente impiegati, che sfruttano il concetto della fusione della superficie del modello, sono il sistema con autoclave ed il sistema ad alta temperatura.

Con il sistema ad autoclave, il guscio viene inserito in un recipiente a tenuta, in ambiente saturo di vapore; il modello viene così rimosso dallo stampo in meno di 15 minuti, consentendo anche un facile recupero delle cere.

Con il secondo metodo invece, il guscio viene inserito in un forno molto caldo (tra 870 °C. e 1'095 °C) dotato di fondo aperto, così che la cera liquefatta possa essere prontamente rimossa. Parte della cera inizia però a bruciare non appena cade dal guscio e sebbene si estingua rapidamente, si possono comunque creare condizioni tali da deteriorare il guscio. Anche la cera liquefatta con questa seconda metodologia, può essere facilmente recuperata.



Guscio ceramico svuotato.



Gusci ceramici pronti per preriscaldamento e colata.

## COLATA E OPERAZIONI SUCCESSIVE DI FINITURA

Una volta rimosso il modello in cera, il guscio viene cotto per eliminare umidità e residui di cera, sinterizzare la ceramica e per pre-riscaldare lo stampo alla temperatura adatta per la colata. Spesso tutti questi obiettivi vengono conseguiti in un'unica operazione, altre volte il pre-riscaldamento è eseguito in un secondo tempo. Quest'ultimo metodo consente di raffreddare il guscio, controllarne l'integrità e se necessario, ripararlo prima della colata. La cottura è effettuata a una temperatura che dipende dalla temperatura di sinterizzazione dei componenti del guscio; le temperature di preriscaldamento variano invece a seconda della geometria, dell'impronta e del tipo di lega da colare; per le leghe di alluminio sono indicativamente 150 °C - 650 °C, per le leghe di rame di 400 °C - 650 °C e per le superleghe e gli acciai 850 °C - 1'150 °C. Gli stampi utilizzati per la produzione di getti di cui è richiesta una solidificazione direzionale, vengono preriscaldati sopra la temperatura di fusione della lega da colare. Terminato il pre-riscaldamento, il guscio è pronto per la colata della lega metallica. Solitamente la colata avviene senza l'utilizzo di tecniche particolari (come ad esempio il vuoto), per le comuni leghe di alluminio, magnesio, rame, oro, argento, platino, acciai, leghe di cobalto o di nickel che non contengono elementi reattivi. La colata sottovuoto viene di conseguenza impiegata per produrre getti con leghe particolarmente reattive ai gas contenuti nell'aria, oppure ogni qual volta le esigenze del processo lo rendano necessario.

Le operazioni di finitura, che spesso costituiscono una porzione consistente (40-55%) dei costi di produzione, consistono in rimozione del guscio (distaffatura), taglio dal tronco/canale di colata, rimozione di eventuali anime, sabbiatura e trattamenti termici.

Durante il raffreddamento il materiale del guscio può scheggiarsi, tuttavia buona parte di esso resta sul getto e pertanto, deve essere rimosso o con appositi sistemi vibranti o a mano. Talvolta parte dei primi strati di rivestimento restano aderenti al getto e vengono eliminati solo attraverso sabbiatura. In alternativa alla distaffatura meccanica è possibile utilizzare anche getti d'acqua ad alta pressione. Una volta che il grappolo è stato pulito, si procede al distacco dei vari getti dal tronco/canale di colata ed all'eliminazione delle anime mediante lavaggio ad alta pressione, sabbiatura oppure, se la geometria non lo consente, per dissoluzione in bagni caustici. I residui di colata sul componente, a seguito del distacco del grappolo, devono essere eliminati attraverso molatura, con nastri o mole abrasive oppure mediante lavorazione meccanica. Successivamente i pezzi possono essere trattati termicamente, sabbiati e controllati. Seguono quindi eventuali lavorazioni meccaniche (es.: foratura, fresatura, filettatura, alesatura, tornitura, ecc.), finitura superficiale (verniciatura, satinatura, lucidatura, elettro-lucidatura, rivestimenti anticorrosivi, anodizzazione, decapaggio, placcatura, passivazione, impregnazione, ecc.) ed infine l'assemblaggio.



Preriscaldamento dei gusci.



Colata e solidificazione del metallo.



Grappolo fuso.



Preparazione per trattamento termico.

## VANTAGGI DEL PROCESSO

I benefici principali dell'investment casting, sono l'accuratezza dimensionale, l'elevata libertà di design, l'integrità del getto, la buona finitura, l'elevata cadenza produttiva, la versatilità di materiali e di dimensioni dei componenti prodotti (getti di peso a partire da qualche grammo fino a decine di chilogrammi) ed il relativamente basso costo (se paragonato alla pressofusione) di realizzazione delle attrezzature necessarie. Il progresso tecnologico, permette oggi di produrre fusioni a cera persa prototipali, impiegando modelli provenienti da processi di sinterizzazione o aggregazione di polveri di polistirene (anche da stampa in 3D). I gusci non richiedono linee di divisione dello stampo, né angoli di sforno e di conseguenza i getti sono caratterizzati da elevata qualità, non solo da un punto di vista estetico, ma anche dall'assenza di difetti dovuti al non perfetto accoppiamento dei semi-stampi (bave). Il processo consente la realizzazione di componenti con forma grezza molto vicine al particolare pronto per l'utilizzo (near net shape) e caratterizzati da geometrie complesse, sia esternamente che internamente, che difficilmente si potrebbero ottenere con tecniche alternative. Infatti, si realizzano in un'unica colata pezzi che un tempo dovevano essere assemblati, con una rilevante riduzione dei costi di lavorazione e notevole risparmio in materiale di scarto.

L'integrità del getto è un'altra importante caratteristica di questo processo che lo rende assai competitivo nei confronti della forgiatura per quanto concerne le proprietà dei componenti.

A ciò si aggiunge l'elevata accuratezza dimensionale (sul retro le tabelle di riferimento per il disegno tecnico), difficilmente ottenibile con altri processi di fusione ed è per questa ragione che le fonderie a cera persa, vengono anche comunemente chiamate fonderie di precisione.



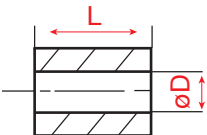
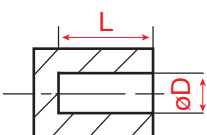
*Fusione a cera persa in Acciaio, Alluminio e Bronzo.*

# TABELLE DI RIFERIMENTO PER IL DISEGNO TECNICO

## 1. Tolleranze Lineari (mm)

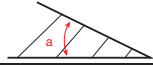
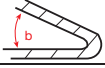
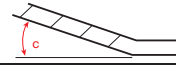

Dimensione	Tolleranza
0-10	±0.12
10-15	±0.20
15-20	±0.25
20-30	±0.30
30-50	±0.40
50-75	±0.50
75-100	±0.65
100-125	±0.80
125-150	±1.00
150-175	±1.20
175-200	±1.50
200-250	±1.80
>250	±0.8%

## 2. Limiti dimensionali per fori e fessure grezzi

Tipologia	Diametro del foro (mm)	L/D
	Ø2 – Ø3	L/D ≤ 1
	Ø4 – Ø7	L/D ≤ 2.5
	≥ Ø8	L/D ≤ 3.5
	Ø2 – Ø3	L/D ≤ 2
	Ø4 – Ø7	L/D ≤ 5
	≥ Ø8	L/D ≤ 10

Fori e fessure più profondi e di geometria complessa, possono essere ricavati mediante anime in cera o in ceramica.

## 3. Tolleranze angolari

Tipo di angolo			
Tolleranza	± 1°	± 2°	± 2°
Evitare bruschi cambi di sezione, usare ove possibile raggi di raccordo interni non inferiori a R 0.3mm.			
			

## 4. Tolleranze per planarità, rettilineità e rotondità (mm)

Dimensione	Tolleranza
0-25	0.2
25-50	0.4
50-100	0.6
100-150	0.8

## 5. Limiti di peso e dimensione

Tipologia	Fusione grezza
Dimensione massima (mm)	1000 x 620 x 380
Peso (kg)	0.001 – 200

## 6. Rugosità superficiale Ra (µm)

Fusioni grezze	6.3	<b>Possiamo inoltre eseguire trattamenti di finitura superficiale quali:</b> zincatura, cromatura, nichelatura, brunitura, fosfatazione e verniciatura per gli acciai al carbonio e basso legati; burattatura, lucidatura a specchio, elettro-lucidatura, passivazione per gli acciai inossidabili, incluso sabbatura al corindone, al quarzo e con microsferi di vetro.
Fusioni lavorate	0.8 – 3.2	

Per ulteriori informazioni o approfondimenti tecnici, potete contattare il nostro reparto Investment Casting.  
 Ufficio Tecnico Investment Casting - e-mail: uff.tecnico@commercialefond.it  
 Dott. Andrea Suffredini - Referente Commerciale - e-mail: s.andrea@commercialefond.it

**Sede:**  
 Via Baccelliera, 6 - I-41126 Modena  
 Tel. +39 059 468808 - Fax +39 059 468806  
 e-mail: info@commercialefond.it  
 Web: www.commercialefond.it

**Filiale di Milano:**  
 Via Padre D.M. Turoldo 31/35  
 I-20063 Cernusco sul Naviglio (MI)  
 Tel. +39 02 9230930 - Fax +39 02 25060800  
 e-mail: filialemilano@commercialefond.it

**Filiale di Torino:**  
 Via Liguria, 24 - Z.I. Autoporto Pescarito  
 I-10099 San Mauro (TO)  
 Tel. +39 011 2741382 - Fax +39 011 2742041  
 e-mail: filialetorino@commercialefond.it

**Filiale di Padova:**  
 Via G. Mameli, 50  
 I-35020 Albignasego (PD)  
 Tel. +39 049 710073 - Fax +39 049 711678  
 e-mail: commerciale.padova@commercialefond.it