



Applicazioni Industriali

Metallurgia delle polveri

Marco Raimondi

e-mail: mramondi@liuc.it

Metallurgia delle polveri

- Tecnologia per la fabbricazione di oggetti vari mediante sinterizzazione, cioè compressione e riscaldamento ad alta temperatura di materiali metallici in polvere. E' una tecnologia antica di millenni. I primi gioielli di oro sinterizzato risalgono al 1200 a.C.
- Viene preferita ad altri procedimenti di fabbricazione, come la fusione o la lavorazione meccanica, per ragioni economiche (come nel caso di piccoli componenti meccanici prodotti in serie) oppure quando un manufatto con determinate caratteristiche può essere ottenuto soltanto con questo procedimento (come nel caso di bronzine porose e filtri)
- Permette la produzione di pezzi in sostanza senza sperpero di materiali, inoltre rende possibile la lavorazione di metalli altrimenti estremamente difficili da lavorare, ad esempio il tungsteno per l'altissima temperatura di fusione.

Caratteristiche

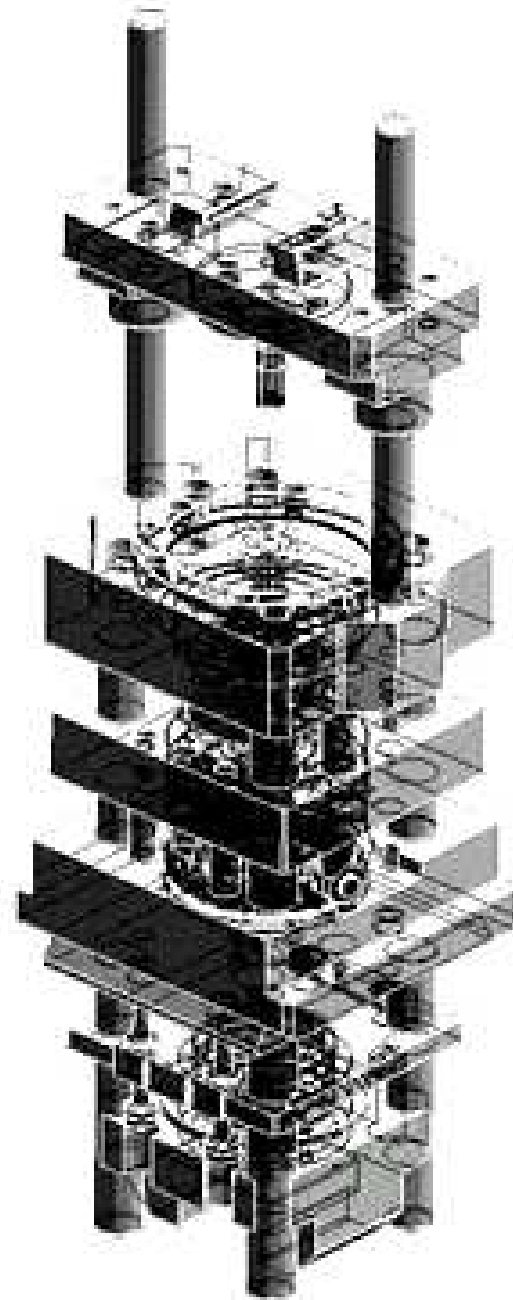
- E' un processo che, rispetto alla metallurgia tradizionale, permette di ottenere una microstruttura più fine ed omogenea e quindi migliori proprietà meccaniche.
- La caratteristica più importante e che si vuole maggiormente sfruttare è comunque che si possono ottenere nuove leghe che non si sarebbero mai potute ottenere con la metallurgia tradizionale. Alcuni esempi possono essere l'ottenimento di leghe fuori equilibrio, ed esempio contenenti terre rare, che segregherebbero durante la fusione.
- Detta anche ceramica delle polveri, prende il nome di metalloceramica (o cermet) quando alla polvere metallica è mescolata polvere non metallica (ad esempio in una miscela di carburo di titanio e nichel). Cermet è anche il nome che prendono i materiali così ottenuti, che rientrano nella categoria dei materiali ceramici, caratterizzati in genere da grande durezza e resistenza alle alte temperature.

Applicabilità

- Si usa comunemente nella produzione di ruote dentate, leve e altri componenti di autoveicoli, elettrodomestici, attrezzi elettrici, ma anche componenti di turbine per motori a getto, monete e medaglie e trova larga applicazione nel settore automobilistico, il quale costituisce circa il 70% delle applicazioni (ingranaggi, pulegge, leve varie)
- Altri settori in cui si trova applicazione sono appunto gli elettrodomestici (ingranaggi), industria bianca (piastre valvola, bielle e cilindri per compressori frigoriferi), macchine per ufficio, filamenti di tungsteno per lampade
- Le dimensioni, la densità e le proprietà meccaniche possono essere modificate mediante procedimenti ulteriori, comprendenti, se necessario, una seconda pressatura a caldo.

Particelle

- Il diametro delle particelle di polvere può variare da un micrometro a qualche decimo di millimetro. Nella maggior parte dei casi le polveri si ottengono dalla frammentazione di una massa fusa di metallo o di lega metallica, ad esempio facendo collidere il flusso di metallo fuso con un sottile getto di acqua o di gas
- Altre polveri si ottengono frantumando pezzi metallici solidi, altre ancora si ottengono per via chimica, ad esempio riducendo a metallo ossidi in polvere, o facendo precipitare particelle metalliche da una soluzione acquosa.



Vantaggi

- l'eliminazione o minimizzazione delle lavorazioni all'utensile
- l'elevato grado di precisione dei particolari e delle finiture
- le caratteristiche specifiche di struttura in funzione degli usi cui sono destinati
- la possibilità di scegliere la densità sulla base delle esigenze di applicazione
- l'impiego di materiali innovativi in grado di soddisfare le prestazioni più sofisticate
- l'assenza di sfridi di lavorazione
- l'elevato grado di utilizzo delle materie prime
- l'attitudine alla produzione di materiali di tipo composito
- la facilità di esecuzione di forme complesse impossibili da realizzare con altri processi di lavorazione dei metalli
- la libertà di scelta data da svariati materiali e processi utilizzabili (es. trattamenti termici e superficiali);
- una buona finitura superficiale;
- una buona riproducibilità da pezzo a pezzo, adatta per medie e grandi serie;
- la porosità che può essere impiegata per filtrazione e boccole autolubrificanti.
- l'omogeneità; chimica dovuta all'assenza di segregazioni macroscopiche quali quelle generalmente associate ai processi di solidificazione dal fuso;

Vantaggi di tipo economico

- gli investimenti iniziali relativamente modesti
- la flessibilità degli impianti
- l'elevata velocità di produzione
- i consumi energetici specifici ridotti
- il basso consumo di materiale ed energia

Svantaggi e Limiti

- l'impossibilità di produrre pezzi di grande dimensione e peso a causa degli elevati costi
- la scarsa divulgazione delle conoscenze di queste tecniche: un pezzo di geometria molto complessa può essere sì prodotto con questo tipo di processo (ma la sua progettazione deve tenere conto di molti accorgimenti per non complicare il processo)
- i particolari hanno inferiori proprietà meccaniche (specialmente resilienza) in confronto a particolari realizzati per fusione o forgiatura
- la precisione dimensionale è inferiore a quella ottenibile per lavorazione meccanica
- la presenza di una porosità residua deve essere tenuta in considerazione nel caso di operazioni successive

Prodotti sinterizzati

I prodotti fabbricati col processo di sinterizzazione si possono classificare in diverse categorie:

- Metalli refrattari, ad alta temperatura di fusione, come tungsteno, molibdeno, tantalio, platino ed altri, per i quali, fino a pochi anni fa, non si disponeva di tecniche per raggiungere le temperature occorrenti per portarli a fusione
- Leghe di componenti difficilmente miscibili allo stato fuso, per la forte differenza di temperatura di fusione

Prodotti sinterizzati

- Metalli e leghe di alta purezza, di composizione rigorosamente controllata e di elevata omogeneità
- Nella preparazione di un prodotto sinterizzato, si può partire da materie prime di grande purezza, è quindi relativamente facile evitare la contaminazione di impurità cedute dai materiali e dall'atmosfera, che vengono a contatto con i prodotti finiti. Inoltre non si verificano i fenomeni di segregazione o liquazione caratteristici della solidificazione delle leghe o dei metalli di purezza tecnica.

Prodotti sinterizzati

- Metalli porosi, in cui la caratteristica tipica dei pezzi sinterizzati di presentare una certa porosità, viene volontariamente accentuata in modo da avere un prodotto caratterizzato da un elevatissimo numero di canalicoli microscopici comunicanti, questi manufatti metallici possono venire impiegati per la produzione di filtri e per la produzione di cuscinetti autolubrificanti.

Questi cuscinetti sono impregnati di olio lubrificante attraverso un trattamento sotto vuoto per liberare i pori dall'aria e dopo un'immersione in un bagno d'olio. Quando l'albero in esso montato comincia a ruotare, si produce calore per attrito, l'aumento della temperatura provoca la dilatazione e la fuoriuscita del lubrificante dai pori che forma un velo che rende impossibile il contatto metallico tra gli elementi volventi e le piste di rotolamento nel cuscinetto. Quando l'albero si arresta, col raffreddamento l'olio diminuisce di volume e viene riassorbito per capillarità nei pori. Questi cuscinetti sono impiegati in tutti i casi in cui deve essere assicurata l'efficienza per lunghi periodi senza bisogno di interventi di manutenzione. Tale è il caso degli elettrodomestici, delle macchine da ufficio, di alcuni tipi di attrezzi portatili.

Prodotti sinterizzati

- Materiali compositi formati per sinterizzazione di miscele di polveri metalliche e non metalliche, indicate con il nome di cermet.
- Prodotti di questo genere sono i compositi per freni e innesti a frizione ottenuti da miscele di sostanze metalliche e polveri abrasive.

Prodotti sinterizzati

- Da tale applicazione nascono ad esempio le placchette di metallo duro utilizzate nelle operazioni di asportazione di truciolo (in tungsteno)
- Metalli duri, costituiti da miscela sinterizzata di carburi di elevatissima durezza di tungsteno, titanio, tantalio, niobio, con un metallo legante, che di regola è il cobalto
- La durezza è tanto più elevata quanto più bassa è la percentuale di cobalto impiegato nella preparazione delle miscele. Inversamente ad alte percentuali di carburi corrisponde una maggiore fragilità.

Tecnologie

- Diverse tecnologie utilizzabili: tutte hanno in comune le materie prime (polveri metalliche piu o meni fini) ma utilizzano procedure diverse per trasformare tali polveri in componenti massivi
- In generale tutte comprendono uno stadio di messa in forma al termine del quale si ottengono dei compatti, o verdi, costituiti dalle polveri metalliche, ed uno stadio di densificazione (eventualmente suddiviso in varie operazioni)
- A volte sono incluse lavorazioni meccaniche o sui verdi o sui prodotti finali o intermedi
- Alcune tecnologie differiscono per le procedure di messa in forma, altre per le procedure di densificazione finale. La densificazione pu` infatti essere ottenuta per deformazioni meccaniche a caldo delle polveri, o anche solo mediante trattamenti termici adeguati a produrre l'effetto di sinterizzazione

Tecnologie

- Spesso si indica con il termine di metallurgia delle polveri solo uno dei processi di cui sopra, quello che produce i componenti per pressatura uniassiale di polveri in stampi rigidi
- La polvere viene pressata, solitamente a freddo, in uno stampo o in altro contenitore di forma adatta per ottenere un blocco poroso, ma compatto e non friabile; questo viene quindi riscaldato, in un'atmosfera di gas inerte, fino a una temperatura sufficientemente elevata, in particolare tra 0.7 e 0.9 volte la temperatura di fusione.
- Viene quindi rimossa la porosità tra le particelle che tendono ad ingrandirsi e saldarsi con la formazione di robusti collegamenti (colli) tra di esse
- Di fatto esso è il processo di metallurgia delle polveri più diffuso ed economicamente rilevante: ciononostante esiste una varietà di altri processi

MIM - Metal Injection Moulding

- Già dal 1937 era in uso un processo con il quale si potevano realizzare componenti ceramici di forma complessa industrialmente ed in modo riproducibile. Il componente in questione era la parte isolante delle candele per motori a scoppio, il processo lo stampaggio ad iniezione di polveri
- Da allora, lo stampaggio ad iniezione è diventata una tecnologia tradizionale per la cosiddetta 'ceramica tecnica'. Tali ceramiche infatti si possono ottenere solo per sinterizzazione di polveri, e la difficoltà di lavorazione meccanica rende necessario l'ottenimento della geometria il più finita possibile già all'atto della formatura dei compatti di polveri.
- La controparte metallica, lo stampaggio ad iniezione di polveri metalliche (Metal Injection Moulding, MIM) ha invece una storia molto più recente
- Al ritardo ha contribuito la scarsa disponibilità di polveri extrafini metalliche, fatta eccezione per quelle ottenute per via chimica, come il ferro ed il nichel carbonile: inoltre, l'esistenza di tecnologie 'dal pieno' a costo relativamente basso nel caso dei metalli crea condizioni di competizione sensibilmente diverse rispetto al caso della ceramica

MIM

- Si inizia mescolando polveri metalliche ultrafini del materiale desiderato con opportuni materiali plastici (polimeri, cere, additivi)
- Tali materiali possono essere molto diversi a seconda della variante di processo utilizzata. Nel caso più comune, quello di un legante cosiddetto termoplastico, a cui faremo riferimento anche nel seguito, la miscelazione viene effettuata dapprima a secco e successivamente a caldo (temperatura di fusione del materiale plastico) per ottenere la dispersione ottimale delle polveri nella pasta
- La percentuale in volume di polveri metalliche nella miscela è tale da ottenere una miscela che ha le caratteristiche di bassa viscosità a caldo adatte allo stampaggio ad iniezione
- La miscela viene quindi raffreddata e ridotta in granuli, ed è pronta allo stampaggio ad iniezione.

MIM

- Nella pressa ad iniezione essa viene nuovamente fusa e spinta ad alta velocità all'interno delle cavità di uno stampo in acciaio, con la forma desiderata, in modo da riempirle senza vuoti
- Lo stampo è raffreddato cosicché il materiale solidifica in pochi secondi
- All'apertura dello stampo i pezzi vengono prelevati manualmente od automaticamente e depositati su vassoi refrattari in una disposizione precisa.
- Quando un certo numero di vassoi è stato riempito ed impilato, si passa alla fase di rimozione dei materiali plastici (deceraggio)
- In questa fase occorre estrarre o degradare i materiali plastici presenti nei pezzi senza deturpare gli stessi
- Ciò può essere fatto solitamente con un trattamento termico ben bilanciato in forno a temperature relativamente basse, eventualmente seguito da una cosiddetta presinterizzazione
- In alcuni casi parte del legante viene eliminata attraverso l'uso di solventi prima del trattamento termico.

MIM

- Successivamente i pezzi, che non sono costituiti solamente dalla polvere iniziale compattata, devono essere sinterizzati, ovvero sottoposti ad un ciclo termico ad alta temperatura in atmosfera controllata
- Durante la sinterizzazione le polveri coalescono (per motivi termodinamici) e la porosità presente nel pezzo viene quasi totalmente eliminata
- Si riescono infatti ad ottenere densità finali pari a più del 95% della densità teorica del materiale. Naturalmente ciò è accompagnato da un ritiro dimensionale, che è generalmente compreso tra il 15 ed il 20% lineare ed è uniforme, cosicché viene conservata la geometria realizzata durante lo stampaggio.

Grazie all'alta densità finale sui componenti sinterizzati possono poi essere effettuati tutti i tipi di trattamento (cementazioni, nitrurazioni, ossidazioni, trattamenti termici) nonché di lavorazioni meccaniche, ivi comprese lavorazioni estetiche come lucidature o finiture particolari.

Metalli utilizzati nel MIM

- Moltissimi sono i materiali che sono stati prodotti con successo utilizzando il processo MIM
- In effetti, le limitazioni in questo senso sono generalmente dovute alla scarsa reperibilità di polveri ultrafini in materiali non di grande consumo
- Inizialmente infatti non erano disponibili polveri ultrafini di lega e le composizioni venivano ottenute miscelando polveri elementari. Sono state quindi prodotte leghe Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Si, le composizioni inossidabili più comuni (304, 316, 17-4 PH), le leghe a base Cu e a base Co
- In seguito sono stati studiati anche acciai speciali (per utensili, per bonifica, per cementazione), leghe a base Ni, eccetera. Le composizioni industrialmente più utilizzate sono le leghe Fe-Ni, il 17-4 PH e gli acciai inossidabili in genere.
- Le proprietà meccaniche dei componenti prodotti via MIM sono molto più vicine alle proprietà dei corrispondenti materiali convenzionali di quanto lo siano quelle dei sinterizzati comuni. Infatti la microstruttura presenta generalmente bassissima porosità, di piccole dimensioni e forma arrotondata, cosicché ci si possono aspettare valori intorno all'85-90% di quelli di riferimento. Si noti che la microstruttura è isotropa e chimicamente esente dalla segregazione tendenzialmente presente nei fusi.

Vantaggi del MIM

- **Il MIM si inserisce nel campo della piccola componentistica e compete con le altre tecnologie a livello di costi realizzativi e può rivelarsi vantaggioso soprattutto per grandi numerosità e piccole dimensioni. Più interessante per grandi complessità**
- **Nei materiali solidificati a seguito di fusione, a causa della limitata velocità di raffreddamento ottenibile negli impianti industriali, la solidificazione avviene partendo dalle fasi con più alte temperature di fusione. Ciò provoca la aggregazione di fasi a temperatura di fusione più bassa, che sono le ultime a solidificare. A causa del gradiente di temperatura che si stabilisce nelle masse in via di solidificazione, che normalmente sono raffreddate dall'esterno, si genera una disomogeneità chimica tra la superficie della massa e l'interno.**
- **Quando si sinterizzano delle polveri viene invece garantita una maggiore uniformità della composizione chimica del materiale in tutto il componente dato che ogni singolo granulo (nel caso di polveri prelegate) di polvere ha la composizione della lega, o (nel caso di miscele di polveri) tale omogeneità viene ottenuta attraverso il processo di miscelazione che avviene a temperature basse.**
- **Inoltre, dato che i metalli ottenuti dal fuso vengono in genere sottoposti a trattamenti meccanici di formatura, quali laminazione, estrusione, trafilatura, la microstruttura di tali materiali ne è fortemente influenzata. Si pensi, ad esempio, alla differenza di proprietà meccaniche tra il lungo ed il trasverso di un laminato, dovuta al fatto che i grani sono stati deformati plasticamente lungo una direzione e quindi è stata introdotta una cosiddetta anisotropia.**

Vantaggi del MIM

- **Un materiale metallico sinterizzato è invece isotropo, ovvero non vi sono direzioni preferenziali causate dal processo. Le sole differenze potrebbero esservi, tra la superficie ed il cuore del componente (a causa, ad esempio, dell'effetto dell'atmosfera di sinterizzazione,)**
- **A differenza del processo convenzionale di metallurgia delle polveri, l'uso nel MIM di polveri extrafini permette inoltre di raggiungere densità assolutamente non ottenibili normalmente nel sinterizzato tradizionale**
- **Tipicamente un prodotto MIM ha il 97% della densità teorica mentre un sinterizzato convenzionale ha meno del 90% della densità massima**
- **MIM offre soprattutto un vantaggio: la possibilità di realizzare geometrie anche molto complesse eliminando o riducendo al minimo le operazioni di lavorazione meccanica**
- **Tra le possibilità dovute alla formatura ad iniezione vi sono la realizzazione di fori ciechi o passanti su superfici anche tra loro ortogonali, di filetti interni ed esterni, di superfici curve non analitiche, di scritte in altorilievo o in bassorilievo**
- **La complessità della forma da realizzare si riflette ovviamente nel costo dello stampo.**

Leghe di alluminio

La produzione delle leghe di alluminio con la metallurgia delle polveri avviene attraverso due vie:

1. Solidificazione rapida (RS): si fa una rapida solidificazione che permette di prolungare la solubilità degli elementi alliganti, in modo da rifinire la struttura delle fasi intermetalliche, importanti per le proprietà meccaniche.
2. Alligazione metallica (MA): è un processo a secco, ad alta energia che sfrutta una spinta meccanica per ottenere uno smescolamento a livello atomico delle particelle che non avverrebbe con l'utilizzo di una fase liquida, perché termodinamicamente sfavorevole.

Leghe di alluminio

- Il processo di alligazione per una lega di alluminio presenta vari stadi:
 - Solidificazione della lega
 - Macinazione (e miscelazione se si usano più polveri)
 - Pressatura isostatica
 - Incapsulazione
 - Degassing in vuoto
 - Pressatura a caldo
 - Rimozione del materiale superfluo
 - Eventuale estrusione o forgiatura
- Gli elementi che vengono utilizzati per questo tipo di processo sono soprattutto il magnesio (Mg), il berillio (per ridurre la densità, ma usato soprattutto per voli aerospaziali, vista la sua tossicità), Li, Al₂O₃ e SiC.
- Le leghe di alluminio sono di fatto maggiormente usate in campo aeronautico-aerospaziale

Leghe di alluminio

- Vantaggi:
 - Microstruttura più fine ed omogenea
 - Ottenimento di leghe impossibili da ottenere con tecniche tradizionali
 - Miglior controllo della segregazione e della precipitazione a bordo grano
 - Maggior resistenza a fatica rispetto alla metallurgia tradizionale
 - Maggior leggerezza (motivo principale del suo utilizzo in aeronautica)

Leghe di alluminio

- Svantaggi:
 - Durante il processo di atomizzazione e macinazione c'è umidità nell'ambiente e questo tende a formare ossidi e/o idrossidi di alluminio che infragiliscono la lega.
 - Presenza di idrogeno all'interno delle polveri che infragilisce la lega rendendola poco resistente a rottura.

Progettare particolari per la metallurgia delle polveri con la tecnologia tradizionale

- **La progettazione per la metallurgia delle Polveri richiede una forte cooperazione tra il produttore dei particolari e il progettista, specialmente nelle fasi iniziali della stesura del progetto.**
- **Spesso piccole modifiche al disegno di un pezzo possono renderlo fattibile con costi molto bassi.**

Dimensione dei pezzi

- **La dimensione dei pezzi che è possibile ottenere dipende principalmente dalla superficie del particolare trasversale alla direzione di pressatura: maggiore è la superficie maggiore è la forza che occorre per compattare il pezzo e quindi più grande è la pressa necessaria.**
- **Conservativamente, in fase di progettazione, si assume che per compattare un pezzo alle densità comunemente richieste, occorrono circa 5,5 ton/cm².**

Forma dei pezzi

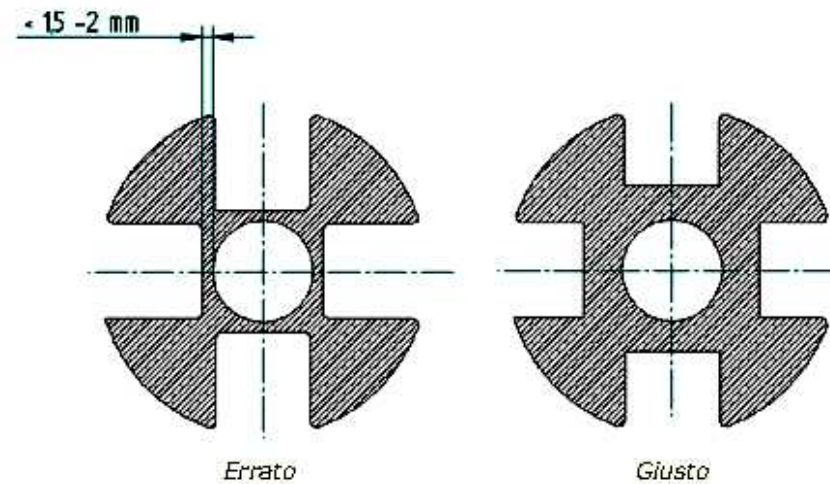


Fig. 1

- **Nella direzione di pressatura i vincoli sono dati ovviamente dalle corse delle presse, e anche dalla necessità di mantenere una densità costante nel pezzo**
- **Infatti, è inevitabile, a causa degli attriti fra la polvere le pareti dello stampo, che la forza di compattazione (e quindi la densità ottenuta) non si mantenga costante lungo tutta l'altezza del pezzo, ma cali più o meno pronunciatamente nelle zone più lontane dalle facce dei punzoni: maggiore è l'altezza del pezzo, maggiori saranno le distanze di certe zone dalle facce dei punzoni, e quindi maggiori saranno le differenze di densità.**

Forma dei pezzi

- La Metallurgia delle Polveri si presta alla produzione di particolari di qualsiasi forma
- Gli unici vincoli sono legati alla resistenza degli stampi: pareti troppo sottili e spigoli vivi rendono le attrezzature troppo fragili.

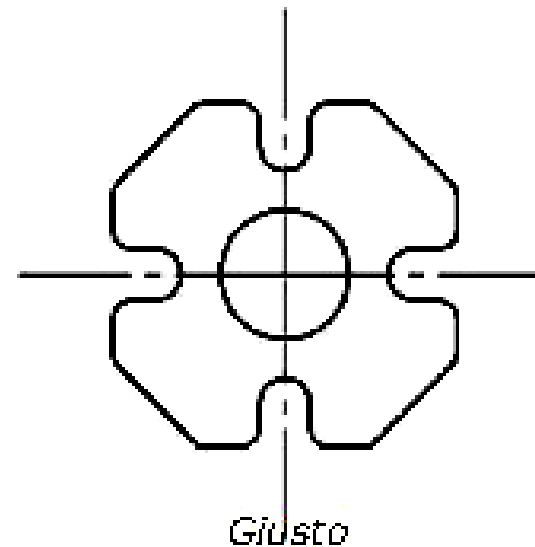
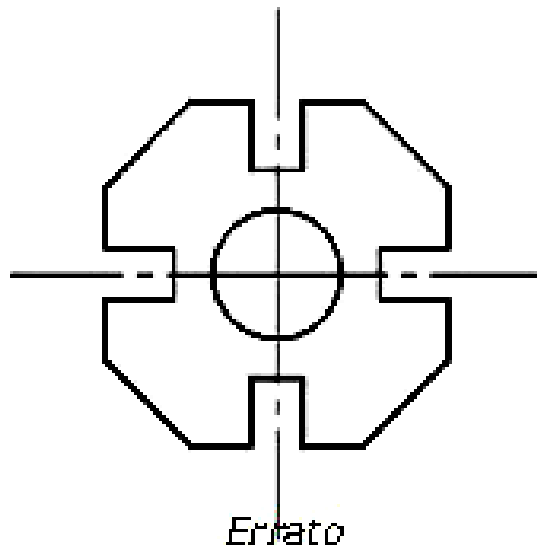


Fig. 2

Pezzi con più livelli

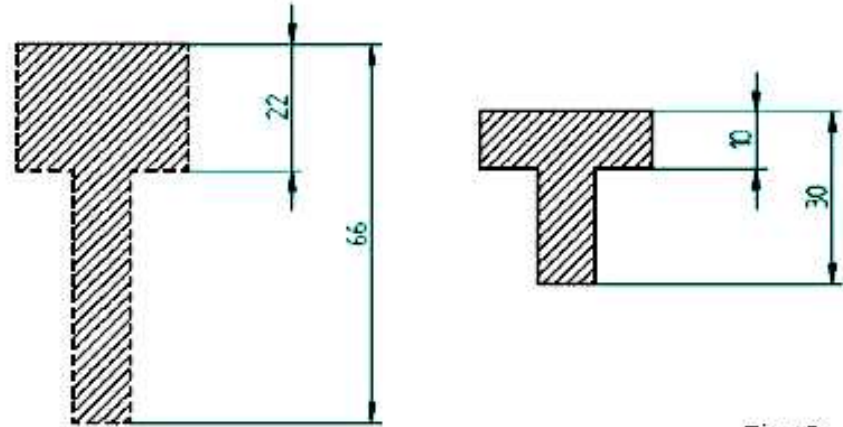


Fig. 3

- Nei pezzi con più livelli è molto più difficile ottenere densità omogenee, per questo si utilizzano presse e attrezzature molto più complesse.
- La figura 3 schematizza un tipico pezzo a più livelli prima e dopo compattazione
- La densità nelle varie zone è data dal rapporto di compressione h_{fin} / h_{iniz} , in questo caso pari a 2,2
 - E' facile immaginare che non è possibile garantire lo stesso rapporto di compressione nelle zone a diverso spessore, se i punzoni sottostanti non dispongono di movimenti indipendenti tra di loro.
 - In generale, se due zone del pezzo hanno differenza di spessore maggiori del 15%, è necessario scomporre il punzone inferiore in due punzoni dotati di movimenti indipendenti
 - Il numero di scomposizioni effettuabili (e quindi il numero di spessori diversi realizzabili) è dato ovviamente dalla versatilità (numero di movimenti indipendenti) della pressa.

Sottosquadri

- In questo caso, valgono le stesse regole della fonderia e dello stampaggio a caldo.
- Il pezzo una volta pressato dentro la matrice deve potere essere estratto, quindi i sottosquadri che impediscono l'estrazione di un pezzo sono impossibili da ottenere
- Se non sono eliminabili, devono necessariamente essere ottenuti mediante lavorazione all'utensile dopo sinterizzazione

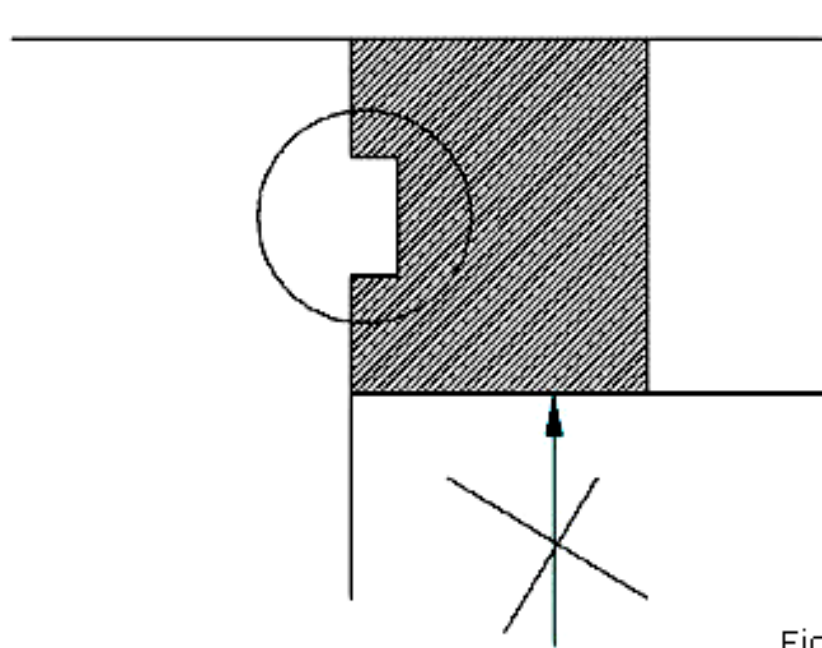


Fig. 4

Sottosquadri

- In alcuni casi è possibile modificare il disegno del pezzo per evitare la lavorazione meccanica.

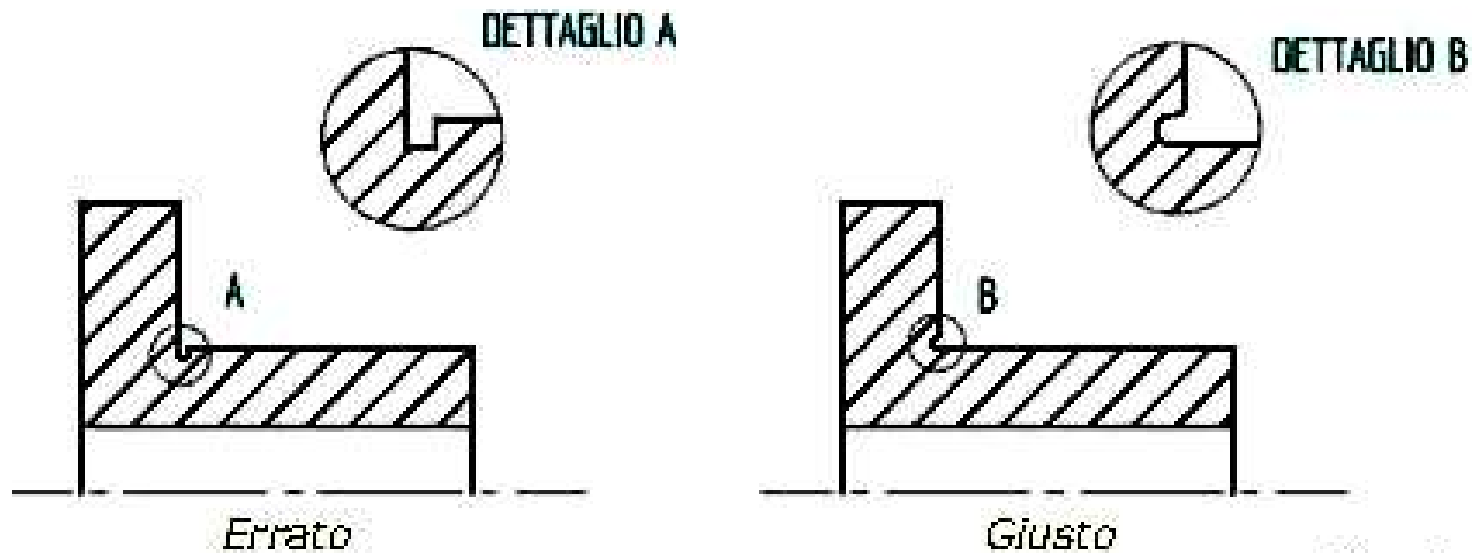
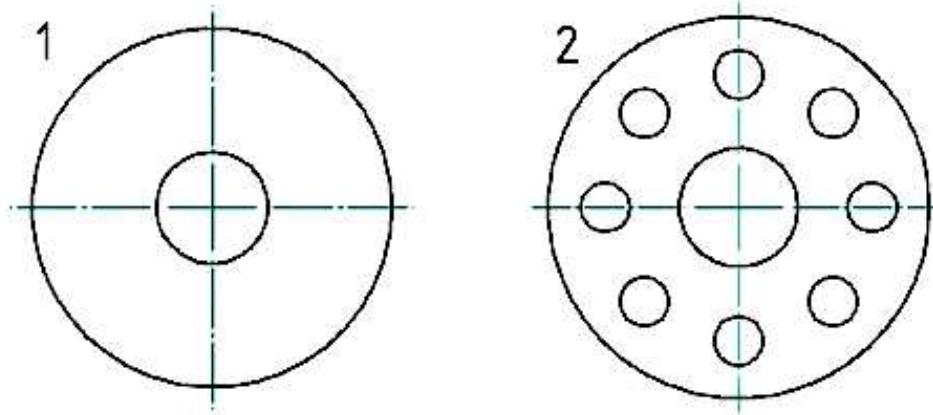


Fig. 5

Fori di alleggerimento



Nella PM, realizzare il pezzo 1 o il pezzo 2 ha costi molto simili specie se la serie è grande. In entrambi i casi la LM non è necessaria

Fig. 6

- **Nella direzione di compattazione è possibile ottenere fori di qualunque forma praticamente senza costi aggiuntivi di produzione, questo fa sì, ad esempio, che sia possibile aggiungere fori di alleggerimento in un pezzo senza aggravio dei costi di produzione (fig. 6).**

Fori di alleggerimento



Fig. 7

- I fori trasversali alla direzione di compattazione della fig.7 sono ottenibili solo di lavorazione meccanica in quanto costituiscono un evidente sottosquadro

Pareti sottili

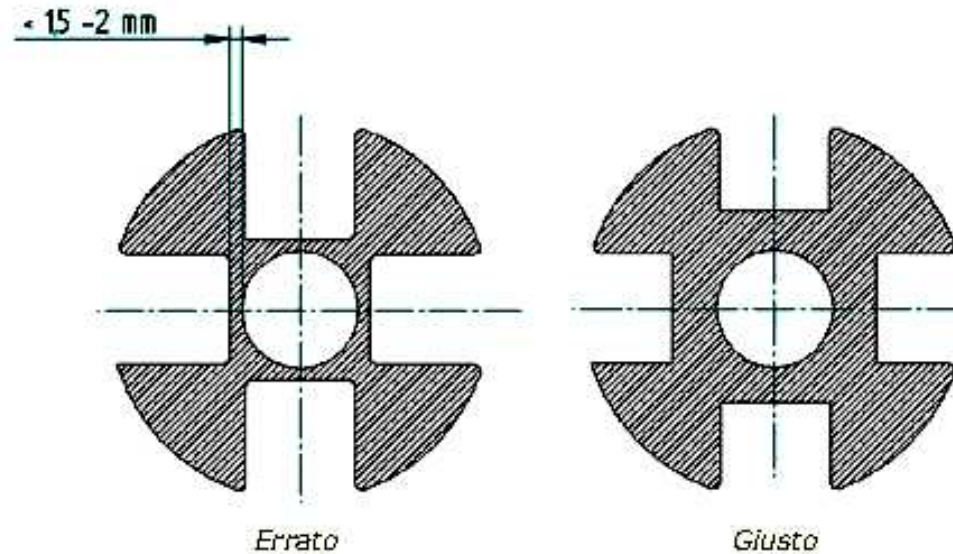


Fig. 1

- **E' necessario evitare pareti troppo sottili, sia per problemi di resistenza dello stampo, sia perché possono insorgere problemi nella fase di riempimento della matrice: si rischia che la polvere fatichi trafilare in ambiti troppo stretti**
- **Se la polvere non riempie in modo omogeneo la matrice, è impossibile ottenere densità uniforme. Normalmente è meglio evitare pareti di spessore inferiore a 1,5mm**
- **Sempre per evitare questo tipo di problemi in fase di riempimento, è opportuno che l'altezza di un pezzo non sia più di dieci volte superiore allo spessore della parete più sottile.**

Planarità dei pezzi e smussi dei fori

- **La planarità di un pezzo dipende soprattutto dal suo spessore: durante la fase di sinterizzazione si hanno delle distorsioni che si accentuano quando lo spessore del pezzo è piccolo**
- **Generalmente, se non si prevedono rettifiche dei piani, è necessario accettare una tolleranza di planarità di circa 0,1.**
- **Gli smussi tradizionali sono da evitare perché necessitano di attrezzature estremamente fragili.**

Smussi dei fori

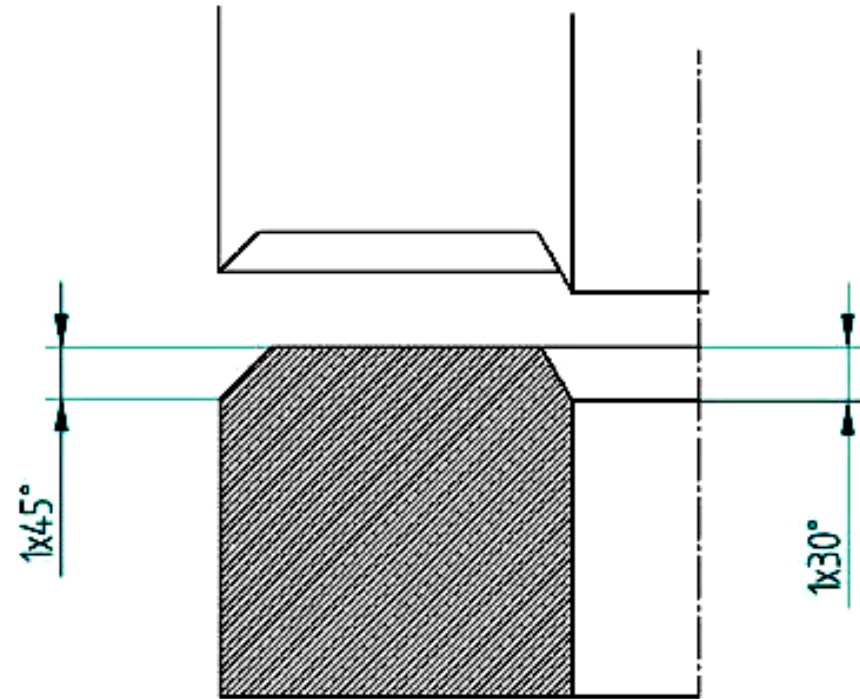


Fig. 8

- **La figura 8 mostra schematicamente la forma del punzone necessaria ad ottenere smussi tradizionali: è facile vedere come questo abbia una forma che lo rende decisamente fragile.**

- La figura 9 mostra la soluzione comunemente adottata: l'introduzione di un piccolo piano rende il punzone estremamente più resistente
- Un'altra soluzione possibile, per gli smussi dei fori, (fig.10) consiste nel prevedere un breve tratto cilindrico prima dello smusso: l'albero (o anima) che va a realizzare il foro non risulta eccessivamente fragile.

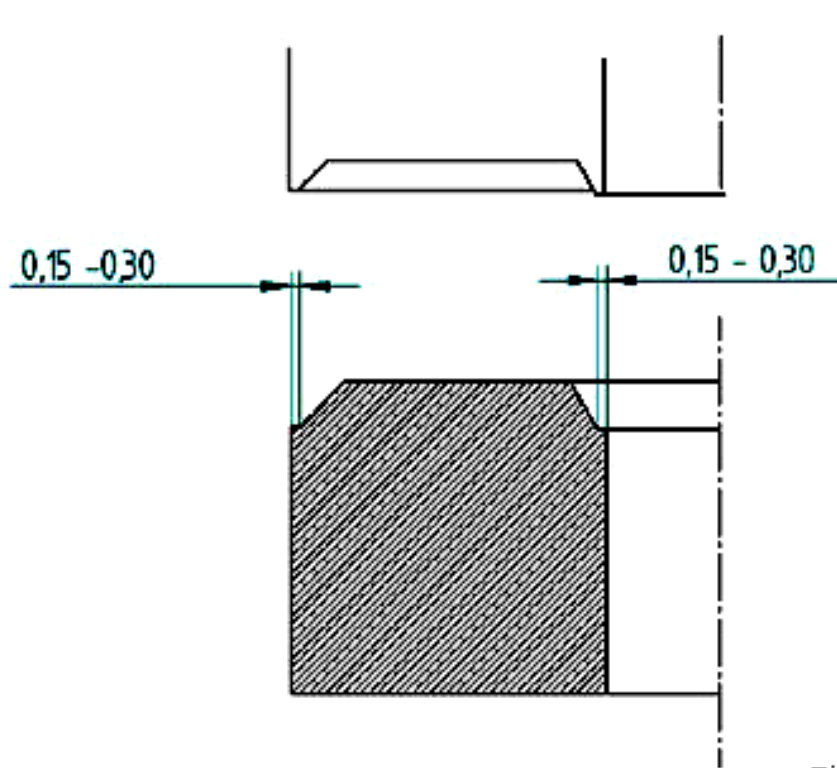


Fig. 9

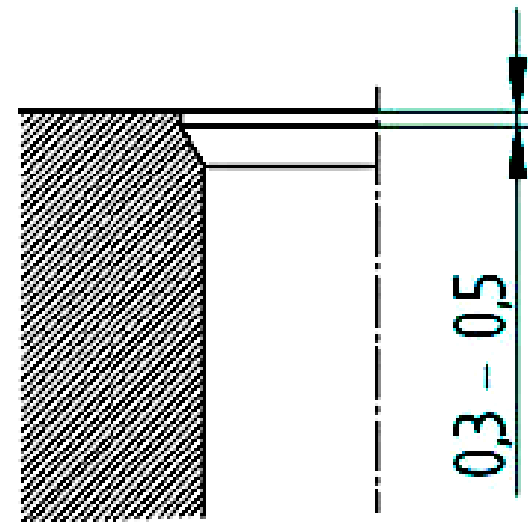


Fig. 10

Esempio di progetto ottimizzato

- Sono molto comuni collegamenti tra albero in acciaio - mozzo sinterizzato mediante chiavetta
- Nel particolare sinterizzato non c'è alcun costo per l'esecuzione della sede per la chiavetta. Un esempio di ottimizzazione del progetto è l'integrazione della chiavetta direttamente nel mozzo.

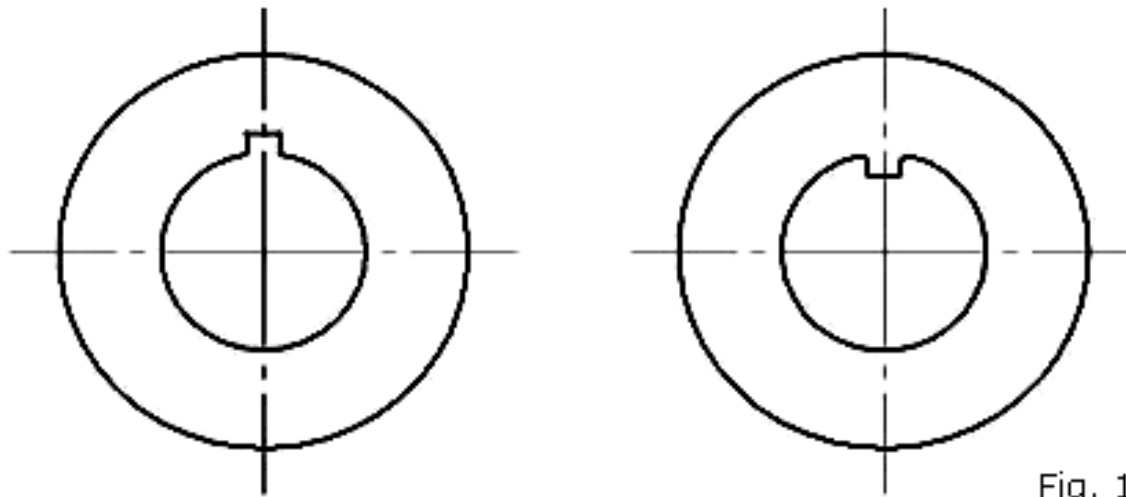


Fig. 11