1. *FONDERIA*

FONDERIA

La fonderia consiste nell'immettere un metallo fuso in una cavità. Dopo il raffreddamento del metallo si ottiene un pezzo che ricopia al positivo la forma della cavità. I principali materiali usati nella fonderia sono acciaio, ghisa, bronzo, ottone, leghe di alluminio e leghe di titanio. Un metallo da fonderia deve avere una temperatura di fusione relativamente bassa, non superiore a 1500-1600 °C, e deve possedere una buona fluidità allo stato fuso in modo da riempire correttamente la forma. Un primo problema nella fonderia riguarda le deformazioni di origine termica. Tutti i metalli infatti subiscono una brusca variazione di volume durante la transizione liquido-solido e questa può essere causa di difetti nei getti (getto è il pezzo ottenuto per fonderia). Raggiunto lo stato solido, il volume del getto continua a diminuire durante il raffreddamento fino a temperatura ambiente, e questo può causare ulteriori difetti. La variazione di volume può essere compensata alimentando il getto con del metallo fuso. Ciò viene realizzato predisponendo un opportuno volume di materiale, detto "***materozza***", dimensionato in modo da raffreddare per ultimo e quindi poter alimentare il getto con metallo fuso. Quindi la funzione della materozza è quella di spostare il baricentro termico della fusione, zona nella quale si completa la solidificazione, dal getto alla materozza stessa. Viene poi eliminata insieme al canale di colata. Il raffreddamento non può avvenire in modo uniforme e i gradienti di temperatura sono la causa di tensioni residue nei getti la cui entità può essere tale da produrre criccature nel getto (autotensioni).

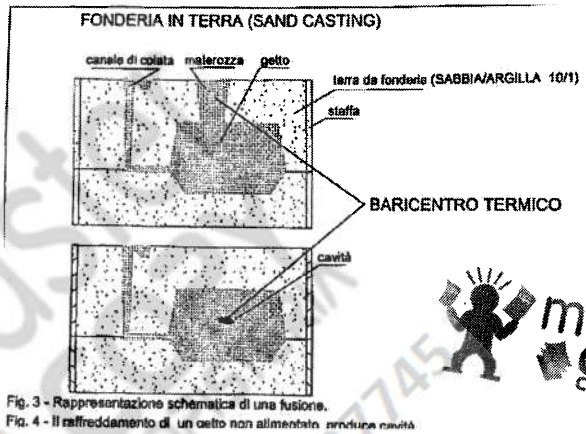
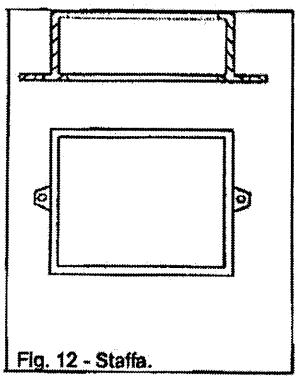


Fig. 3 - Rappresentazione schematica di una fusione.
Fig. 4 - Il raffreddamento di un getto non alimentato produce cavità

master COPY COPISTERIA

Il modo più antico di creazione della forma nella quale immettere il metallo fuso è quella di creare la forma nella terra (**fusione in terra**). Per poter realizzare la forma serve però un "modello", un pezzo che è simile al pezzo che si vuole costruire. Simile perché considerando che il metallo subisce un ritiro non trascurabile durante il raffreddamento, il modello deve essere più grande. Oltretutto un pezzo fuso non è quasi mai finito, viene sempre lavorato alle macchine utensili per ottenere precise quote e tolleranze. Questo si traduce con un sovrametallo (previsto nel disegno del modello) per consentire tali lavorazioni. Infine, deve essere dotato di angoli di spoglia per essere estratto senza danneggiare la cavità formata. Per l'allestimento della forma si usano staffe, contenitori senza fondo dotate di fori per essere correttamente riferite. Deve essere previsto un canale di colata per riempire la forma, che inizia con un bacino per rallentare la caduta del metallo fuso (per evitare di danneggiare la forma). Un filtro posto alla fine trattiene la scoria che ha peso specifico minore del metallo. Si è già detto che lo scopo della materozza era quello di spostare il


Fig. 12 - Staffa.

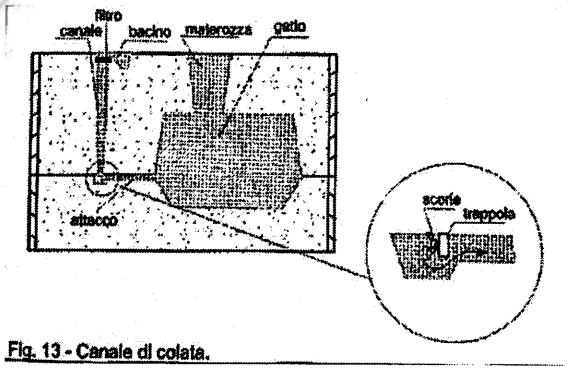


Fig. 13 - Canale di colata.

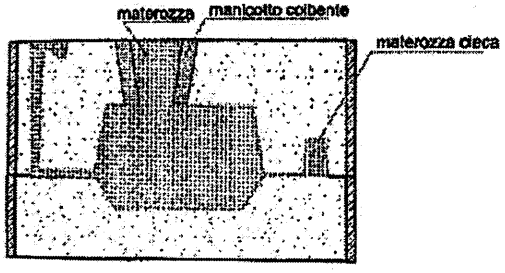


Fig. 14 - Coibentazione della materozza e materozza cieca.

baricentro termico dal getto alla materozza stessa in modo da inglobare i difetti in essa. Deve raffreddare per ultima, deve quindi essere sufficientemente grande o essere coiberata o cieca (per diminuire la dispersione termica). Questo si può ottenere anche con elementi metallici, detti anelli di raffreddamento, che favoriscono un raffreddamento di tipo direzionale. Per verificare la direzionalità di un getto, possono essere d'aiuto i "cerchi di Heuvers": i cerchi inscritti nel disegno del getto devono avere diametro crescente verso la materozza.

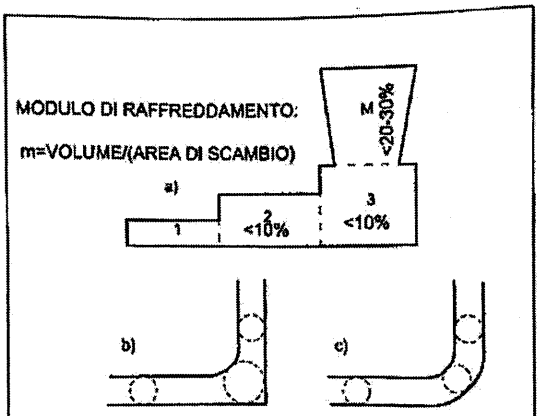
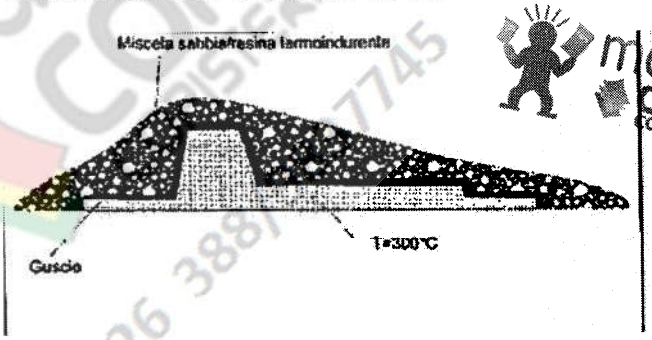


Fig. 16 - a) divisione di un getto in parti elementari per la verifica del modulo di raffreddamento. b), c) cerchi di Heuvers.

La terra da fonderia è formata da sabbia di quarzo (ca. 90%) impastata con argilla (ca. 10%) con piccole quantità d'acqua per aumentare la coesione e la plasticità. Forme di grande dimensione vengono poi essiccate in forno (**formatura a secco**), mentre forme di piccola dimensione possono essere usate direttamente (**formatura a verde**).

Nella **formatura in sabbia-cemento** si usa un materiale costituito dal 90% di sabbia di quarzo e dal 10% di cemento, impastato con una piccola quantità di acqua. In questo modo si ottiene una forma molto compatta e resistente alla spinta del metallo.

La **formatura a guscio** prevede un modello necessariamente realizzato in metallo, che viene riscaldato a 300 °C. Su di esso viene applicato un prodotto distaccante e depositato una miscela di sabbia di quarzo e polvere di resina termoindurente. Il calore fonde la resina che si lega con la sabbia, formando la prima metà del guscio. Si forma separatamente la seconda metà, si accoppiano i due semi-gusci e si effettua la colata. Il guscio è utilizzabile per una sola fusione.



Nella **formatura con modello in polistirene espanso** il modello è, appunto, un modello (a perdere) in polistirene espanso che crea la forma nella terra che successivamente sarà riempita dal metallo fuso (che ha il compito di bruciare il modello).

La **formatura in conchiglia** invece prevede la costruzione della conchiglia, una forma in acciaio resistente ad alta temperatura, nella quale viene introdotto il metallo fuso. Ovviamente la conchiglia ha una vita limitata a causa del compito gravoso a cui è sottoposta, ma che comunque può arrivare a 5000 fusioni in acciaio, e a 100.000 per fusioni in lega di alluminio. Con questa fusione si ottengono getti di elevata qualità e tolleranze strette. Le piccole produzioni aeronautiche non giustificano però l'elevato costo associato alla costruzione della conchiglia. La qualità è anche dovuta alla elevata pressione alla quale si può immettere il metallo fuso, cosa non possibile nella fusione in terra. Esistono comunque tecniche di formatura in sabbia che sfruttano una leggera pressione del metallo fuso, generata con forze esterne o forza centrifuga (low pressure sand casting). Altre tecniche di miglioramento del getto prevedono l'utilizzo di leghe di elevata purezza (premium casting).

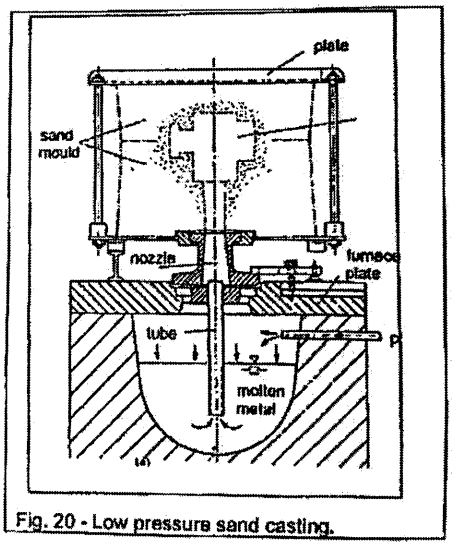
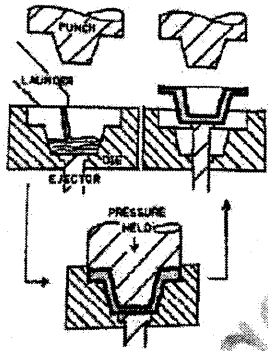


Fig. 20 - Low pressure sand casting.

1. *FONDERIA*

La **fusione in cera persa** è una delle tecniche (come quella in conchiglia) con la quale è possibile realizzare pezzi estremamente complessi. Si inizia costruendo un modello in cera del pezzo che si deve stampare, iniettando la cera fusa in uno stampo plastico, contando anche i canali di colata. Se il modello è piccolo può essere conveniente unire diversi elementi a formare dei grappoli (clusters), non necessariamente uguali. Si passa poi alla costruzione dello stampo ceramico: si immerge il grappolo in un impasto liquido ceramico (caolino), ricoprendolo poi con sabbia fine di quarzo; si lascia asciugare e si ripete fino a quando si ottiene una consistenza adeguata. Lo stampo viene liberato dalla cera riscaldandolo ad alta temperatura, e dopo che è completamente pulito si effettua la colata. Dopo il raffreddamento lo stampo viene rotto.



La "**squeeze casting**" è una tecnica di fonderia molto simile allo stampaggio. Il metallo fuso viene inserito in uno stampo e pressato con un controstampo. Così si ottengono getti molto compatti.

Quanto detto si applica perfettamente alle leghe di alluminio, ma per il titanio e le sue leghe ci sono diversi problemi dovuti all'elevata reattività di quest'ultimo allo stato fuso. La fusione e la colata del titanio devono quindi avvenire sottovuoto. Il metallo viene fuso con arco elettrico o electron beam (trattati più approfonditamente nel capitolo "saldature"), tecniche che non riescono a sovrariscaldare il metallo, per cui il getto solidifica in poco tempo. Quindi lo stampo deve essere riempito rapidamente con l'ausilio di una forza centrifuga. Il titanio reagisce anche con i normali materiali da fonderia, quindi è necessario ricorrere a materiali particolari, e si preferisce comunque asportare lo strato superficiale con fresatura chimica. Dopo questa operazione il getto può essere compattato ad alta temperatura (HIP, hot isostatic pressing, o più comunemente ippatura). Questa operazione riesce ad eliminare tutte le cavità interne.

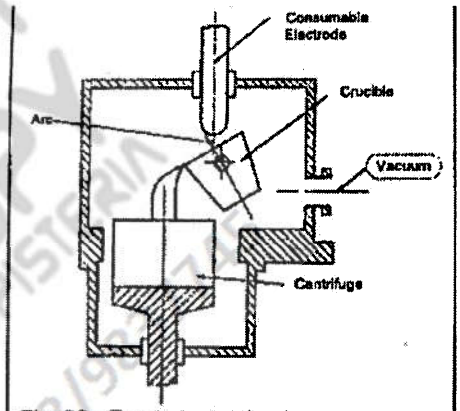


Fig. 26 - Fonderia del titanio.

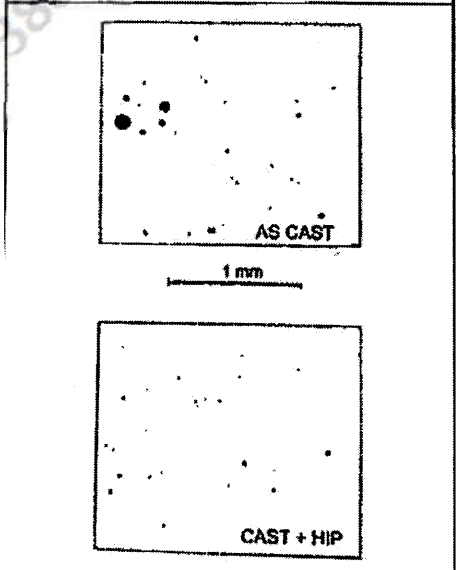


Fig. 27 - Porosità in una fusione di titanio prima (alto) e dopo il processo HIP (basso).

Applicazioni nel campo aeronautico

In generale non esistono regole generali per stabilire quando la fonderia è convenientemente applicabile. Per componenti semplici la fonderia comporta un aumento dei costi e dei pesi rispetto alle altre tecnologie. Per componenti di media complessità e dimensioni si possono avere dei vantaggi, mentre per dei componenti di complessità medio/alta si può ottenere una riduzione dei costi. La fusione in terra è preferibile per pezzi di dimensioni medio/grandi, mentre quella in cera persa per pezzi di dimensioni medio/piccoli di elevata complessità.

master COPY COPISTERIA

1. *FONDERIA*

La fig. 38 mostra i risultati di uno studio effettuato per la sostituzione con una struttura fusa delle porte del vano bagagli dell'A320. La struttura, ottenuta con il procedimento in cera persa, ha dimensioni 1200*1000*120 mm e pesa 19.4 Kg; lo spessore varia da 1.9 a 15 mm. Tutte le porte del nuovo velivolo A380 saranno costruite in questo modo.

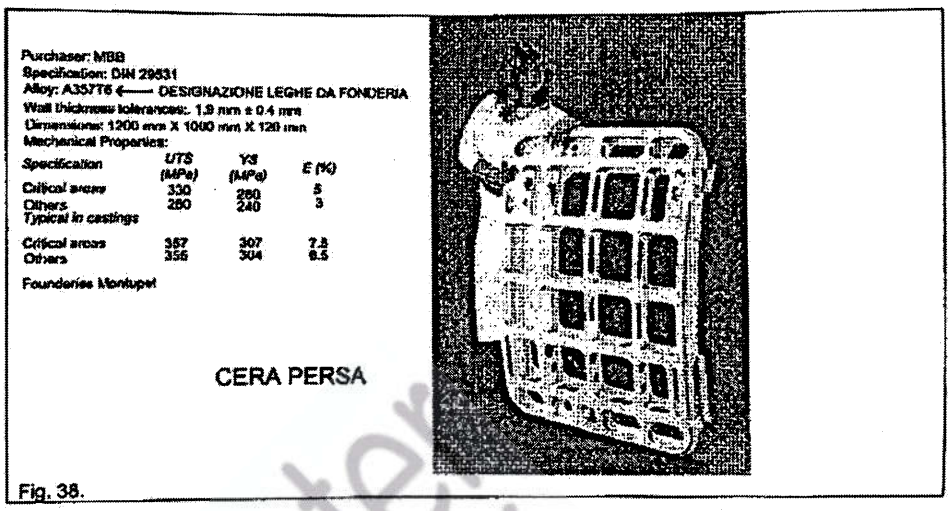


Fig. 38.

La fig. 39 mostra il NIB del TORNADO; la funzione di questo componente è quella di sopportare i carichi aerodinamici e i carichi introdotti dal flap.

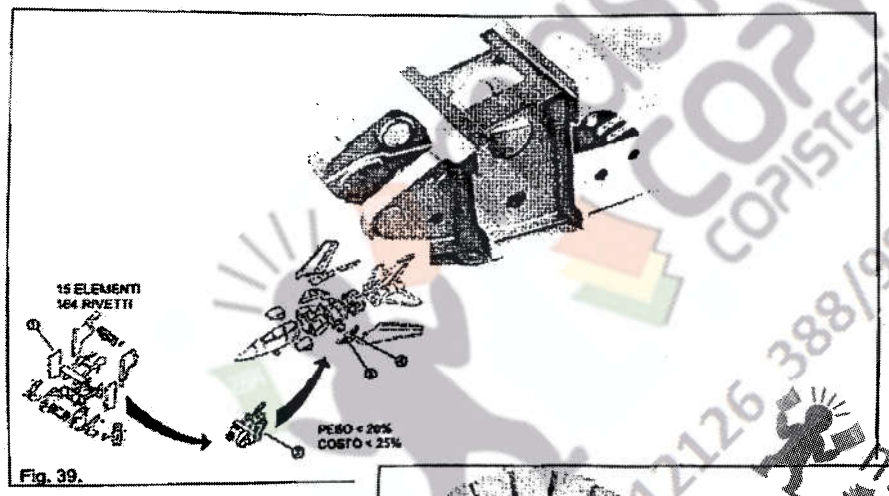


Fig. 39.

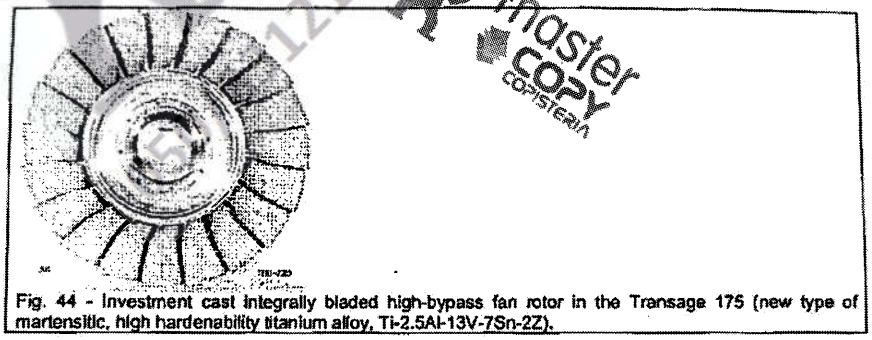


Fig. 44 - Investment cast integrally bladed high-bypass fan rotor in the Transage 175 (new type of martensitic, high hardenability titanium alloy, Ti-2.5Al-13V-7Sn-2Z).

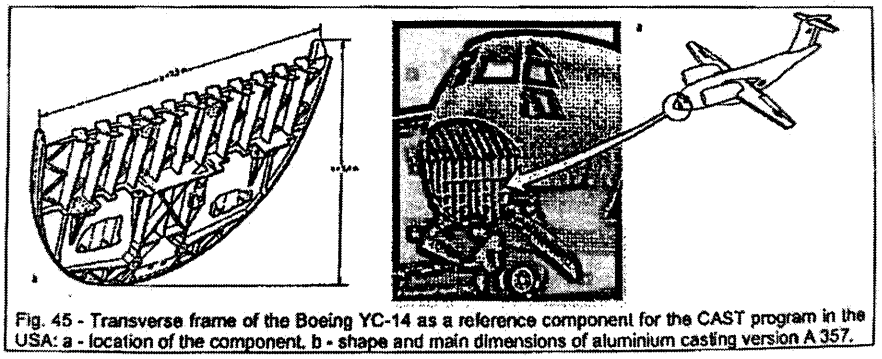


Fig. 45 - Transverse frame of the Boeing YC-14 as a reference component for the CAST program in the USA: a - location of the component, b - shape and main dimensions of aluminium casting version A 357.

LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA

Le lavorazioni per deformazione plastica sfruttano la capacità dei metalli di sopportare deformazioni permanenti con un aumento delle proprietà meccaniche. Alcuni procedimenti vengono effettuati ad alta temperatura, poiché in tutti i metalli si osserva, all'aumentare della temperatura, una diminuzione della tensione di snervamento (minore forza necessaria a produrre la deformazione) e un aumento dell'allungamento a rottura (maggiore deformazione prima della rottura).

LAMINAZIONE

La laminazione è un processo con il quale è possibile ridurre lo spessore di un materiale obbligandolo a passare attraverso 2 cilindri lisci, ad alta temperatura. Durante la laminazione deve verificarsi la condizione di trascinamento, senza la quale il processo non è possibile. Con riferimento alla figura, detta P la forza che i rulli scambiano con il laminato al momento dell'imbocco, la componente Psenα si oppone all'ingresso del massello. Però per la forza di attrito si ha una forza T=fP (f è la forza d'attrito) la cui componente Tcosα tende a far entrare il massello nel laminatoio. Quindi per avere trascinamento, "Tcosα>Psenα" cioè "f>tgα". C'è cioè un massimo di riduzione di spessore ottenibile da una coppia di rulli. Per diminuzioni maggiori si opera attraverso treni di "laminazione", dove ci sono diverse coppie di rulli, e attraverso ognuna si ottiene una riduzione dello spessore di circa il 20%. I cilindri possono essere lisci per la produzione di lamiere o sagomati per la produzione di profilati. Le temperature di laminazione sono di 1200 °C per gli acciai e 450 °C per le leghe di alluminio.

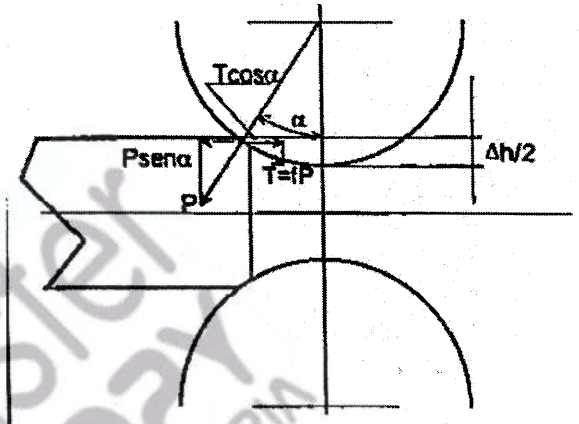


Fig. 2 - Condizione di imbocco di un massello in un laminatoio.

ESTRUSIONE

L'estrusione è un processo nel quale il materiale viene spinto e obbligato a passare attraverso un foro che conferisce la forma al pezzo finale. La lavorazione è tipicamente effettuata ad alta temperatura. Esiste anche uno schema di "estrusione inversa", dove la billetta non si muove rispetto al contenitore (è la filiera che gli viene spinta contro), quindi la forza necessaria è minore.

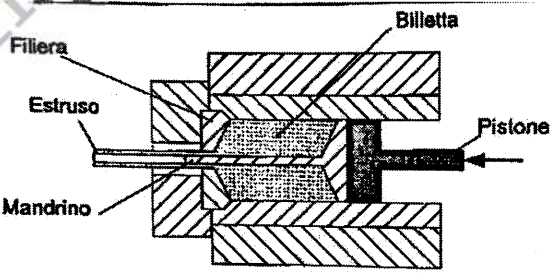


Fig. 7 - Schema di un impianto di estrusione diretta.

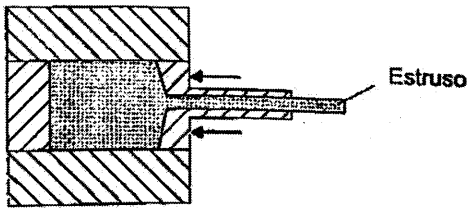


Fig. 8 - Schema di un impianto di estrusione inversa.

Ovviamente la filiera è l'elemento più importante nel processo. È sottoposta a sollecitazioni e temperature elevate per cui è sempre costruita in acciaio ad alta resistenza. La lavorazione viene effettuata per elettroerosione (trattata più avanti). Osservando una filiera in maggior dettaglio, questa presenta sempre un tratto conico d'imbocco seguito da un tratto cilindrico (calibratore) che ha la funzione di conferire la forma finale all'estruso (non dev'essere troppo corto per problemi di usura e nemmeno troppo lungo per limitare la forza necessaria per realizzare l'estrusione). Nel caso di elementi non simmetrici richiede particolari accorgimenti perché il materiale tende ad uscire