

MECCANISMO D'INDURIMENTO

(forma transitoria)

	FORMATURA	MATERIALE DA FORMATURA	GETTO MAX	MATERIAL E GETTO	VELOCITA' PRODUTTIVA	PRECISIONE DIMENSIONALE - FINITURA SUPERFICIALE	AUTO	MODELLO O ANIME
MECCANICO	Terra Sintetica	- Silice granulare (refrattario) - Bentonite (4-10%) - Additivi (1-2%)	> 100 g < 1 t	Ferrosi e NON	20 pezzi/ora per macchina			Modello
	in Fossa	- Silice granulare (refrattario) - Bentonite (4-10%) - Additivi (1-2%)	100 t	Ferrosi e NON	A causa della manodopera, lento e costoso		NO	Modello
CHIMICO	al CO ₂	- Legante: silicato di sodio/vetro solubile (3-7%) - Indurente: CO ₂ - A formare un gel	< 100 t	Ferrosi e NON	Alta		SI	Entrambi
	Sabbia - Cemento	- Legante: cemento (7-12%) e acqua (3-10%)	> 1 Kg < 30 t	Ferrosi		Scarsa		Modello
	Cold box	- Resina fenolica - Catalizzatori tossici	Ashland < 100Kg SO ₂ < 40 t		Alta	Alta		Entrambi
TERMICO	Shell-molding	- Sabbia prerivestita: fase refrattaria (SiO ₂) + coesiva - Sabbia che riveste il grano di silicio	< 30 Kg	Ferrosi		Buona	SI	Entrambi
	Microfusione (cera persa)	- Legante: cera - Indurente: gel silice	Getti piccoli < 40 cm	Ferrosi e NON		Buona		Modello

MECCANISMO D'INDURIMENTO

(forma permanente)

	FORZA APPLICATA	GETTO MAX	MATERIALE GETTO	VELOCITA' PRODUTTIVA	PRECISIONE DIMENSIONALE - FINITURA SUPERFICIALE	AUTO	PRESENZA ANIME
COLATA IN CONCHIGLIA A GRAVITA'	di Gravità	Spessore min 4mm Ø min Fori 2mm	Alluminio Magnesio	Circa 150 pezzi/ora	1.8-5 µm	SI	SI
COLATA SOTTO PRESSIONE	Pressione	Ø min Fori 1mm < 10 Kg	Leghe di acciaio Ghise (no Alluminio)	1000 pezzi/ora	Notevole 0.8-1.5 µm	SI	SI
			Alluminio Rame Magnesio Basso Fondenti	150 pezzi/ora			
SPIN CASTING	Centrifuga	Grandi Dimensioni	Basso Fondenti			SI	NO

DEFORMAZIONE PLASTICA

(attrito)

LAMINAZIONE

- **FUNZIONAMENTO:** due rulli controrotanti schiacciano il massello deformando il suo spessore per l'intera durata del processo (differente dalla fucinatura), il materiale entra ad una certa velocità " v_1 " ed esce ad una velocità maggiore " v_u " (come nella fucinatura) a causa dello schiacciamento " h_i " > " h_u ". La pressione massima si trova nel Punto Neutro "PN", dove materiale e rullo hanno la stessa velocità e l'ATTRITO è STATICO, la P_{max} (quindi il PN) tende verso la zona di uscita al diminuire del coefficiente di attrito e dello spessore dei rulli.

- **FORZA TOTALE:** $F_{tot} = L \cdot b \cdot p_m$ (Lunghezza arco di contatto: $L = \sqrt{R\Delta h}$ | Spessore medio: $b = \frac{h_u + h_i}{2}$ | Pressione media di contatto: $p_m = 2k \frac{h_m}{\mu L} \left(e^{\frac{\mu L}{h_m}} - 1 \right)$) che porta a:
→ Coppia di Laminazione - $T = F \cdot \frac{L}{2}$
→ Potenza di Laminazione - $Q = T \cdot w$

- **CONDIZIONI D'IMBOCCO:**

- 1) " F_{T_o} " > " F_{N_o} " → per superare lo "scalino" del materiale il rullo deve generare una componente orizzontale della forza di trazione maggiore della componente orizzontale della normale alla superficie del cilindro.
- 2) " ρ " > " α " → l'angolo di attrito formatosi fra F_T e F_N deve essere maggiore dell'angolo di attacco.

- **CONDIZIONE DI TRASCINAMENTO:** $\tan(\rho) = \mu > \tan(\alpha)$ → deriva dal 2) " ρ " > " α " (pag. 75 appunti sister).

- **MASSIMA RIDUZIONE DI SPESSORE:** $\Delta h < \mu^2 \cdot R$ (raggio: R)

- **PRODOTTI OTTENIBILI:** Blumi (Lato > 130mm) | Billette (40mm < Lato < 130mm) | Bramme (Spessore = $\frac{1}{4}$ Larghezza e Lato minore ≥ 100 mm) | Profilati ($L = 6m$) | Barre ($L = 6m$) | Lamiere | Vergella ($\varnothing = 10$ mm).

DEFORMAZIONE PLASTICA

(a Caldo / a Freddo)

ESTRUSIONE

A CALDO

- **FUNZIONAMENTO:** un massello a sezione circolare viene introdotto in un contenitore e costretto ad uscire da una matrice (avente forma desiderata) da una pressa orizzontale che lo sottopone a forze di compressione. E' un processo altamente distortivo: i grani si allungano fino ad essere fibre (prodotto anisotropo). Per le sezioni forate si usano alette aventi spessore di una lama, collegate alla matrice.

La $F_{estrusione} (= F_{che\ provoca\ def.\ plastica} + F_{per\ vincere\ attrito})$ è inversamente proporzionale alla temperatura e questa deve superare la soglia di ricristallizzazione $T_{estrusione} > T_f/2$ (circa 400 °C per Al). Nella pressa la corsa del pistone non arriva fino in fondo, ma ad una lunghezza intermedia, poiché i grani che dovrebbero percorrere parti \perp non riuscendo si incrudiscono sui margini (materiale rimosso col contropunzione), inoltre $\phi_{pistone} < \phi_{cilindro\ contenitore}$ poichè:

- Elimina il problema dell'ossidazione, permettendo all'ossido di aderire alle pareti come una "pelle".
- Il materiale deve essere lubrificato con lubrificanti solidi che non devono essere estrusi (es. vetro fuso).
- Evita un forzamento eccessivo nella zona di contatto fra materiale e cilindro, dove il primo è più incrudito.

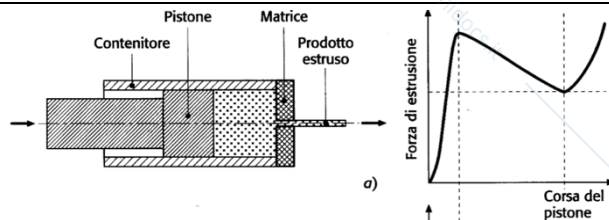
- **PRESSIONE DI ESTRUSIONE (mat. PLASTICO):** Lavoro esterno $\rightarrow p \cdot A_0 \cdot L_0 = A_0 \cdot L_0 \cdot Y \cdot \epsilon_1 \rightarrow$ Energia conferita al materiale con l'estrusione. Semplifico e ottengo $p = Y \cdot \epsilon_1 = Y \cdot \ln(R)$ (poiché $\epsilon_1 = \ln(A_0/A_f)$ e $R = A_0/A_f = spessore\ iniziale/spessore\ estruso$).

- **PRESSIONE DI ESTRUSIONE (mat. INCRUDITO):**

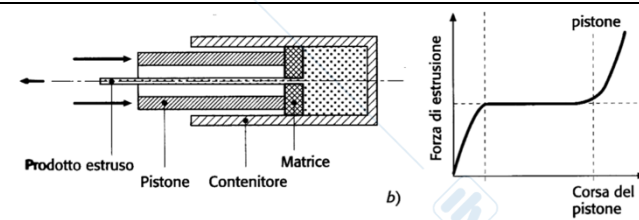
$$\rightarrow p = Y_m \cdot \epsilon_1 = \sigma_f \cdot [k_1 + k_2 \ln(R)]$$

($Y_m = k \cdot \epsilon_1^n / (n + 1) =$ Snervamento medio | $\sigma_f =$ flow stress medio del materiale | $k_{1,2} =$ costanti sperimentali | $R =$ rapporto di riduzione $= A_0/A_f$).

- ESTRUSIONE DIRETTA -



- ESTRUSIONE INVERSA -



A FREDDO

- **FUNZIONAMENTO:** il materiale è riscaldato dal solo attrito (destinato a leghe leggere e ottoni, che hanno bassa T_R), quindi risulta una finitura sup. migliore. I processi possibili sono due: "a rimonta" e "per urto" (per i contenitori).

DEFORMAZIONE PLASTICA

(a Freddo)

TRAFILATURA

- **FUNZIONAMENTO:** risultato pressoché identico all'estrusione se non per l'applicazione della forza che, in questo caso, è di trazione (viene tirato e contemporaneamente arrotolato, non spinto), ma il materiale viene fatto ugualmente passare attraverso un foro calibrato di una filiera, il tutto a freddo. Passaggi preliminari: DECAPPAGGIO (eliminazione chimica degli strati ossidati), APPUNTITURA (per far passare massello dalla matrice) e LUBRIFICAZIONE (con olio).

- **FORZA DI TRAFILATURA:** stato di tensione del materiale all'uscita dalla filiera → stato di tensione a trazione compressiva

$$\sigma = \left[\sigma_f \left(1 - \frac{A_o}{A_f} \right)^{(\mu \cdot \cotan(\alpha))} \right] \cdot \left(1 + \frac{\tan(\alpha)}{\mu} \right) \rightarrow \sigma = \sigma_f \left[\ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \right]$$

Presenta, poi, 3 varianti:

- Senza attrito: $\sigma' = Y \cdot \ln(A_o/A_f)$ (non è funzione di α)
- Con attrito: $\sigma'' = \sigma' \cdot \mu/\alpha$ (funzione decrescente/inversamente prop. di α)
- Distorsione interna del materiale: $\sigma''' = Y \cdot 2\alpha/3$ (funzione crescente/direttamente prop. di α)

- **TENSIONE COMPLESSIVA:** $\sigma_{tot} = \sigma + \sigma''' = Y \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \cdot \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2\alpha}{3} \right]$ (o anche somma delle 3 varianti)

- **LIMITE DI RIDUZIONE MAX:** $\rightarrow \frac{A_o - A_f}{A_o} = 1 - \frac{1}{e} \cong 63\%$

La tensione "σ" è proporzionale al rapporto di riduzione "R" per questo esiste un limite massimo di riduzione che corrisponde al raggiungimento del flow stress (nella zona esterna alla filiera), dato che il materiale deve rimanere in regime elastico $\sigma \leq \sigma_f \rightarrow$ se supero tale tensione di flusso il filo si rompe (α maggiore richiede una forza maggiore).

DEFORMAZIONE PLASTICA

(a Caldo)

STAMPAGGIO

- **FUNZIONAMENTO:** consiste nell'obbligare un massello ad occupare una cavità fra due stampi compressi (a caldo $\rightarrow T_f/2 < T < T_f$), il materiale in eccesso fuoriesce dai CANALI DI BAVA (garantiscono la completa aderenza del metallo allo stampo non appena riempiti per il 60%, inizialmente, invece, sono "tappati" da metallo solidificato). Il pezzo non viene mai realizzato in un unico passaggio ma sempre in più SBOZZATI (forme transitorie). Non si usano anime per zone forate, ma punzoni e contropunzoni (collegati alle presse) che lasciano un DIAFRAMMA da rimuovere successivamente per tranciatura. Fasi del processo: 1) Sovrametalli \rightarrow 2) Piano di bava \rightarrow 3) Angoli di sforno \rightarrow 4) Raggi di raccordo \rightarrow 5) Canali di bava \rightarrow 6) Prefori \rightarrow 7) Coefficiente di complessità

- **PRO E CONTRO:** questo procedimento conferisce elevata resistenza meccanica ai pezzi che, diversamente dei greggi di fusione aventi grani orientati casualmente, hanno una struttura composta da fibre orientate a ricopiare la forma dello stampo. Se però la pressione e quindi l'aderenza elimina difetti esterni, l'attrito del materiale con le pareti crea ZONE MORTE, che dovranno subire lavorazioni a macchine utensili (cerco di condensarle nel sovramentallo).

- **FORZA DI STAMPAGGIO:** $\rightarrow P = K \cdot \sigma_f \cdot A_{tot}$

K =coefficiente di complessità della forma

A_{tot} =area della sezione sul piano di bava, compreso il canale

- **CALCOLO NUMERO SBOZZATI:** applico CRITERIO DI TETERIN secondo cui $\rightarrow \alpha = X_f / X_C$, dove se $\alpha > 1,5/2$ serve un altro sbizzato

$$\left(X_f = \frac{\text{Perimetro}_{\text{forma stampo}}}{\text{Area}_{\text{forma stampo}}} = P^2 / A \quad \mid \quad \left(X_C = \frac{\text{Perimetro}_{\text{rettangolo circoscritto}}}{\text{Area}_{\text{rettangolo circoscritto}}} = P_C^2 / A_C \right) \right)$$

- \emptyset **CANALE DI BAVA:** $l = 0,0175\sqrt{A}$, dove A= area dell'impronta dello stampo sul piano di bava.

PRESSE	MAGLI
Macchine oliodinamiche (pistonidraulici), con uno stampo fisso e uno mobile sulla slitta. La loro velocità di deformazione limitata permette la restaurazione dinamica	Formati da mazza (mobile) e incudine (fissa), deformano grazie all'energia cinetica della mazza (forza impulsiva, caduta libera) con basse tolleranze
I magli sono valutati in base all'energia disponibile, le presse in base a forze e velocità	
N.B: le ghise NON si stampano né in pressa né in maglio	

DEFORMAZIONE PLASTICA

(LAVORAZIONI DI LAMIERE)

TRANCIATURA

- **FUNZIONAMENTO:** in questo processo (che avviene prima di piegature e imbutiture) un punzone (collegato alla slitta della pressa) ritaglia, abbassandosi e penetrando la matrice, una figura geometrica piana (presenta sia sul punzone che sulla matrice) da un foglio o un nastro di lamiera (libera), dopodiché, grazie all'angolo di sforno, il pezzo, cade liberamente verso il basso. Alta produzione in serie e basso costo, anche centri di lavorazione a controllo numerico. Fasi processo: 1) Compressione → 2) Formazione linea di frattura → 3) Distacco del trancio → questo genera una bava superiormente, sotto zona rugosa poi liscia (dovute a frattura e strisciamento) e in fondo un arrotondamento.

- **FORZA DI TRANCIATURA:** $P = l \cdot s \cdot \sigma_t$, con α (l=perimetro tranciato + 10-20% aggiunto per l'attrito | s=spessore lamiera)
La forza cresce fino alla formazione della superficie di frattura, quindi decresce e poi si stabilizza fino a che il pezzo cade

- **GIOCO PUNZONE-MATRICE:** $g = 0,002s \cdot \sqrt{\sigma_t}$ → (σ_t = resistenza max al taglio $\cong \frac{4}{5} R_M$, con R_M = resistenza a trazione)

Se il gioco è troppo piccolo ho: troppo attrito (per rimediare si aumenta del 10-20% il perimetro tranciato nel calcolo della forza necessaria), > costo stampo, fratture secondarie, > $F_{tranciatura}$; se è troppo grande: il pezzo si flette (quando non dovrebbero crearsi sforzi diversi da quelli di taglio), si creano eccessive bave e arrotondamento. In generale: > gioco \Leftrightarrow > spessore e > resistenza a trazione.

- **VELOCITA' DI MOVIMENTO PEZZO:** $v = \frac{D+S}{1/F}$ (D=diametro approssimativo del trancio | s=spessore | F=frequenza di taglio punzone)

le zone tranciate sono ad una distanza reciproca fra loro e dal bordo pari allo spessore della lamiera, quindi, la velocità di movimento del pezzo viene regolata, lo scarto è detto sfrido.

- **TRANCIATURA FINE:** richiede un doppia pressione (sopra e sotto) e un assenza di difetti, quindi no vibrazioni, bassa velocità, gioco ridotto e il premi-lamiera ha una bordo di ritenuta (=cuneo di coniazione) che impedisce lo scorrimento del materiale e l'arrotondamento degli spigoli.

DEFORMAZIONE PLASTICA (LAVORAZIONI DI LAMIERE)

PIEGATURA

- **FUNZIONAMENTO:** considero la lamiera (di lunghezza "l") come una trave appoggiata alle estremità (distanti fra loro di "l") sulla matrice, poi si applica una carico centrale "P" che deforma la lamiera (maggiore è il raggio di curvatura, minore è la forza necessaria).

- **FORMULE:**

→ TENSIONE MASSIMA (sullo spessore): $\sigma = \frac{P \cdot l}{4W}$ → dove $W = \text{Flessione della trave} = \frac{b \cdot s^2}{6}$

→ LUNGHEZZE FIBRA: $l_{neutra} = (R_i + \frac{s}{2}) \cdot \alpha$ e $l_{esterna} = (R_i + s) \cdot \alpha$

→ RAGGIO MINIMO DI PIEGATURA: $R_{min} = \frac{50s}{A} - \frac{s}{2}$ → dove $A = \text{Allungamento max materiale} = \frac{(L_{finale} - L_{iniziale})}{L_{iniziale}} \cdot 100$

→ LUNGHEZZA INIZIALE LAMIERA: $L = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180} (R_i + e \cdot \frac{s}{2})$

(P=carico | b=larghezza trave | s=spessore | R_i =raggio interno | α =angolo di curvatura | l_1 e l_2 = lunghezza prima e dopo la piega | e=fattore correttivo da tabella)

- **PROCEDIMENTI DI PIEGATURA:** a) Stampo - b) Profilatura di nastri - c) Matrice elastica - d) Calandratura (crea tubi senza saldature) - e) Pressa piegatrice

- **RITORNO ELASTICO:** fenomeno per cui un materiale deformatosi elasticamente ritorna alla sua forma originale una volta rimosso il carico che ha causato la deformazione, motivo per cui viene maggiorato l'angolo di piegatura, il cui valore dipende da: materiale, direzione fibre e raggio punzone.

DEFORMAZIONE PLASTICA (LAVORAZIONI DI LAMIERE)

IMBUTITURA

- **FUNZIONAMENTO:** trasforma una lamiera piana in una forma concava, mantenendo lo spessore (**quasi**) inalterato. Il premilamiera non blocca il materiale, bensì lo fa scorrere lentamente ed evita la formazione di pieghe mantenendo premuta la lamiera contro la matrice controllando deformazione e scorrimento, il tutto su pressa (**no magli**).

- **RELAZIONE DISCO PRIMITIVO-PARTE IMBUTITA:** $\pi D^2/4 = \pi d^2/4 + (\pi \cdot d \cdot h)$ (D=∅ disco primitivo | d=∅ parte imbutita | h=altezza imbutita)

- **RAPPORTO DI RIDUZIONE:** $d/D > 0,5$ se non supera questo valore si verificherà una rottura a trazione (sulle pareti verticali), motivo per cui se $< 0,5$ calcolo numero di sbazzati.

- **FORZA D'IMBUTITURA:** $P = \pi \cdot d \cdot s \cdot m \cdot R_m$ (s=spessore | m=coefficiente che dipende da d/D | R_m =resistenza a trazione)

- **DISCO PRIMITIVO:** $\pi D^2/4 = \sum S_i$ ($\sum S_i$ =sommatoria aree che compongono la superficie che formano l'imbutito)

- **TENSIONI LAMIERA:** variano in base alle tempistiche di deformazione:

→ PRIMA DELLA DEFORMAZIONE è sottoposta a sollecitazione TRIASSIALE: una tensione di trazione radiale (dovuta al punzone), una tensione di compressione (dovuta al premilamiera) e tensione di compressione circonferenziale (dovuta alla riduzione di ∅). L'elemento si contrae in senso circonferenziale e si allunga in senso radiale.

→ DURANTE LA DEFORMAZIONE è sottoposta a sollecitazione BIASSIALE: una trazione verticale (dovuta al punzone) e tensioni di trazione circonferenziale (dovute al punzone che impedisce contrazioni di ∅). L'elemento si allunga verticalmente con riduzione di spessore.