

# Lavorazione lamiera III

Imbutitura (deep drawing)

Deformabilità delle lamiere

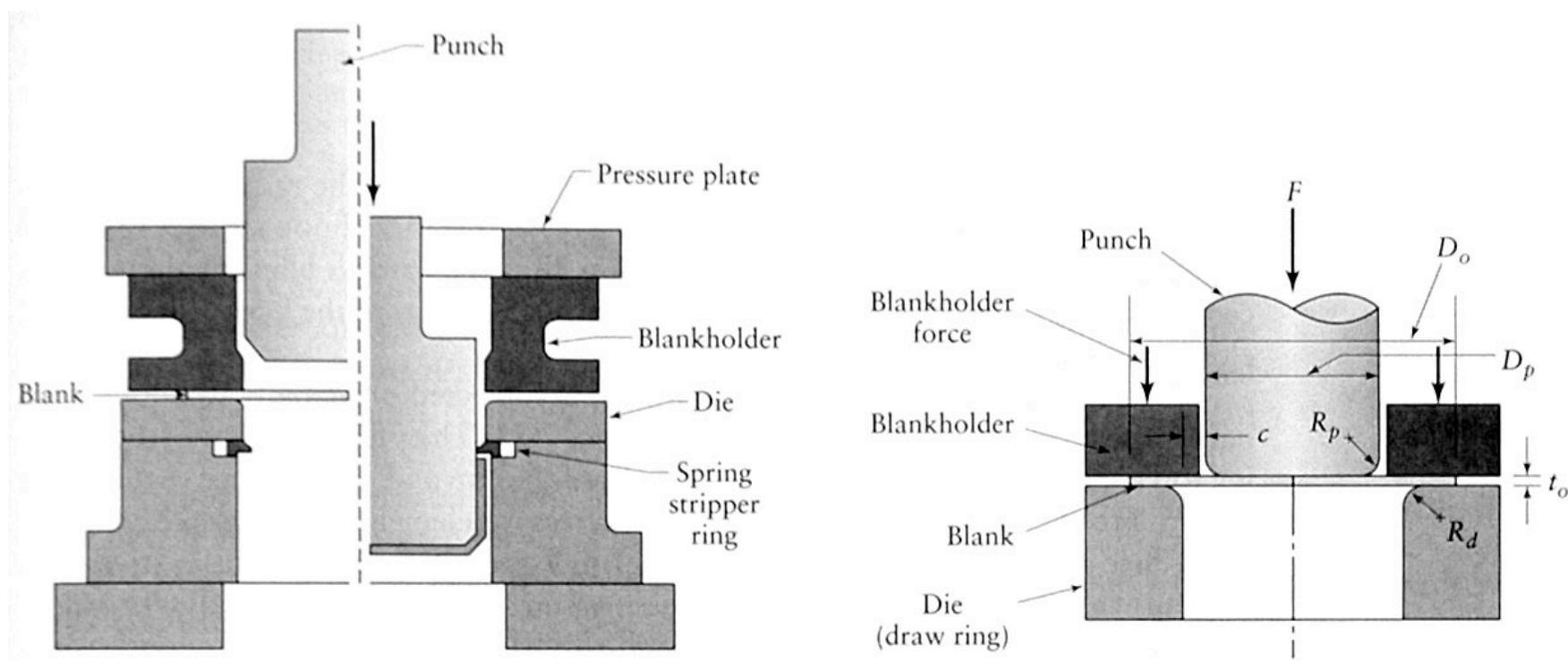
Macchinari per la formatura delle lamiere

Progettazione

Considerazioni economiche

# Imbutitura (Deep Drawing)

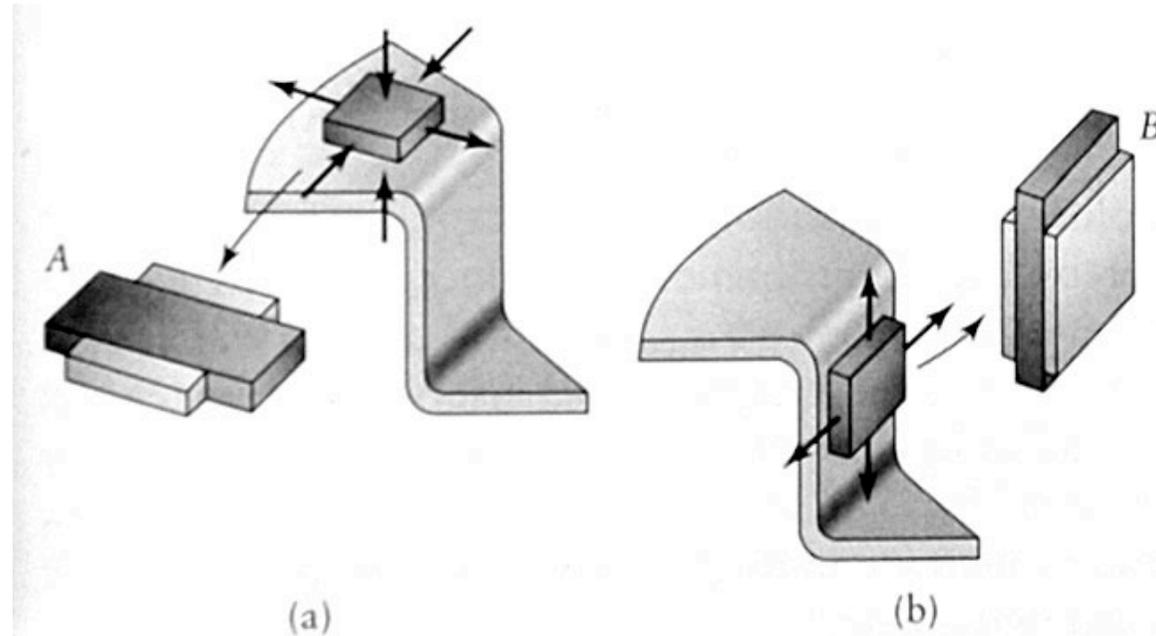
- Nata nel 1700 non involve solo la formatura tramite punzone in uno stampo profondo, ma anche operazioni di formatura meno profonde e accentuate.
- Viene utilizzata per formare lattine, lavandini, pentole, containers e pannelli d'automobile come molti altri oggetti.



# Variabili nell'imbutitura

- Le variabili significative che ci interessano nell'imbutitura sono:
  - proprietà della lamiera
  - rapporto tra il diametro del pezzo di lamiera da formare e del punzone
  - spessore della lamiera
  - il gioco tra punzone e stampo (o stampo e controstampo, punch and die)
  - il raggio di curvatura degli spigoli di stampo e controstampo
  - la forza sui blocchi di trattenimento
  - attrito e lubrificazione di punch, die e interfaccia pezzo
  - velocità del punzone

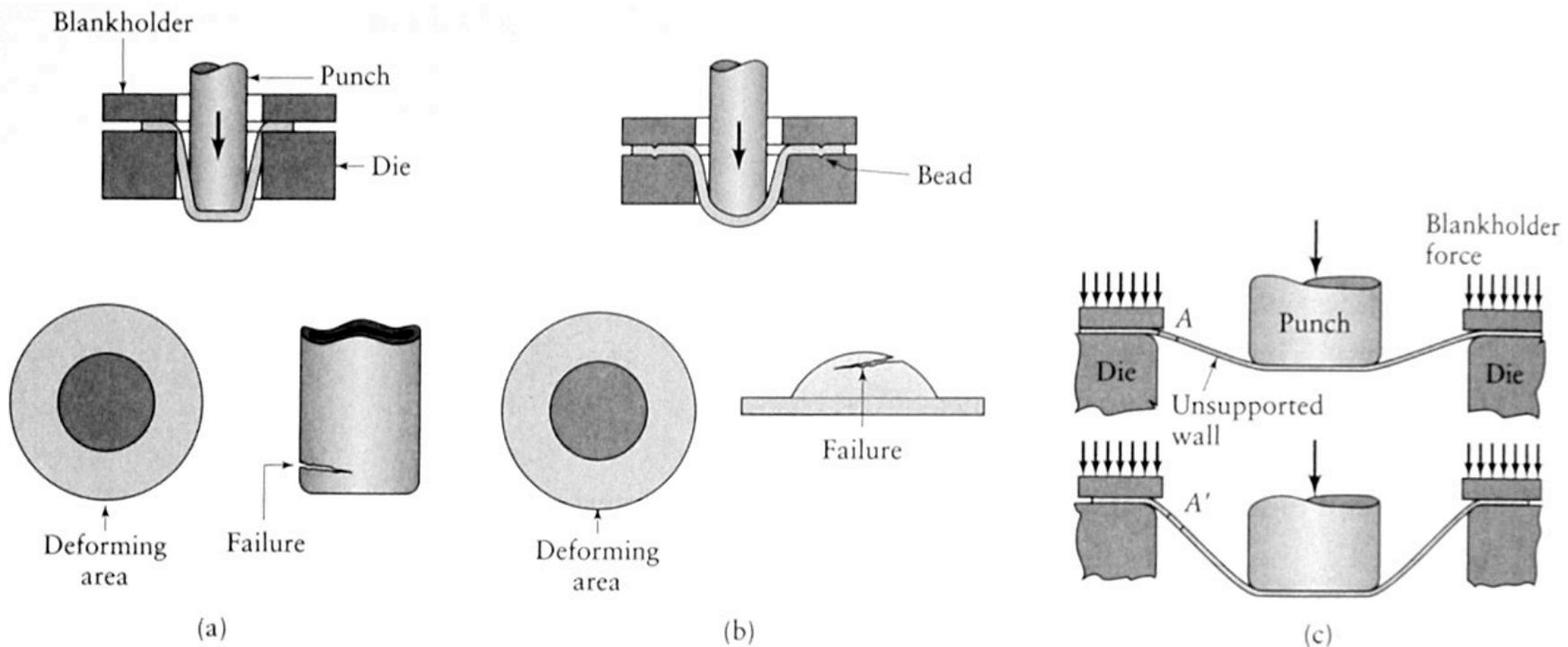
## Sforzi nel processo



- a. Sistema di trattenimento (blankholder): la pressione deve essere sufficiente per evitare corrugazioni dovute alla compressione tangenziale che si origina dagli sforzi radiali.
- b. Il punzone mette in trazione verso il basso e impedisce la contrazione tangenziale della lamiera originando degli sforzi di trazione.

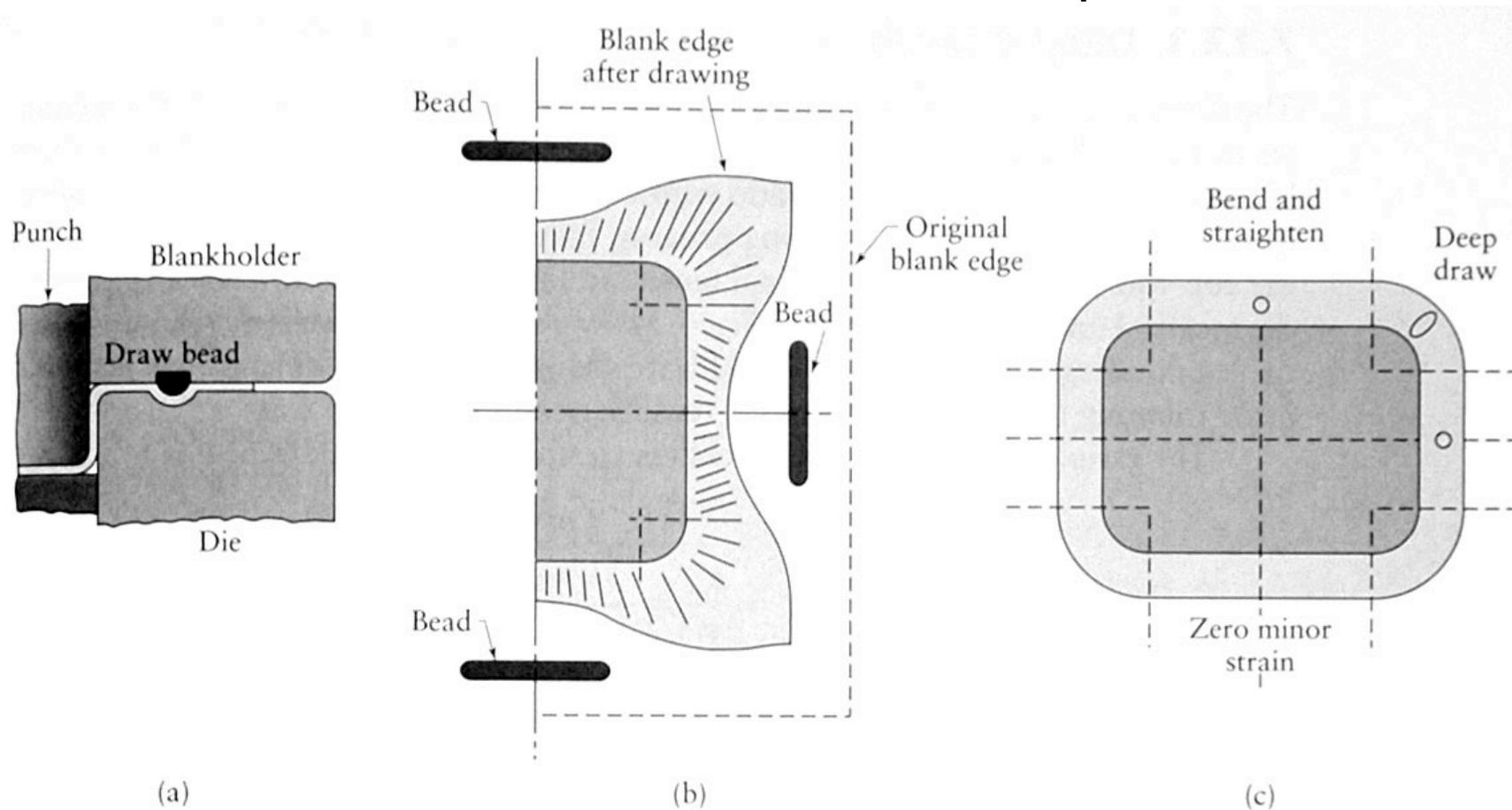
# Pure drawing e pure stretching

- In (a) abbiamo pure drawing: la lamiera non è trattenuta dal fermo e il metallo viene trascinato dal punzone.
- In (b) e (c) la lamiera è bloccata e progressivamente andiamo verso un pure stretching, dove la lamiera viene stirata e si deforma nello stampo.



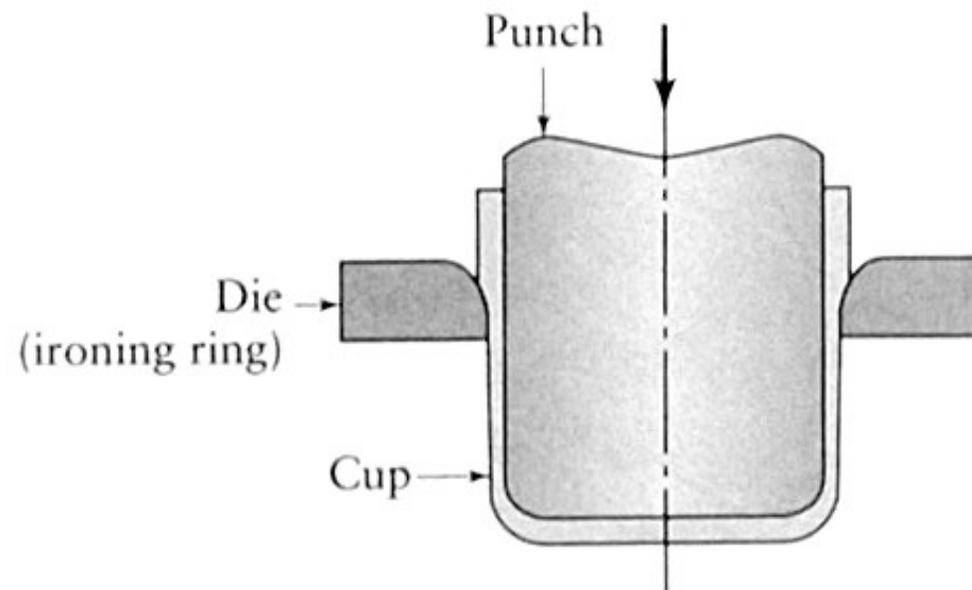
# Draw bead

- Ci permettono di controllare il movimento e flusso del materiale, riducendolo in alcune zone rispetto ad altre.



# Ironing process

- Se il gioco tra punzone e stampo è inferiore allo spessore della lamiera si ha “ironing”.
- Come intuibile dalla figura, con un processo di ironing si riescono ad ottenere delle tazze più profonde rispetto ad un processo con gioco maggiore.



# Deformazioni ottenibili per imbutitura

- Il rapporto limite di deformabilità per imbutitura (LDR = limiting drawing ratio) è definito come il massimo rapporto tra il diametro del pezzo iniziale e il diametro del punzone che possa essere formato senza rottura:

- $$LDR = \frac{D_0}{D_p}$$

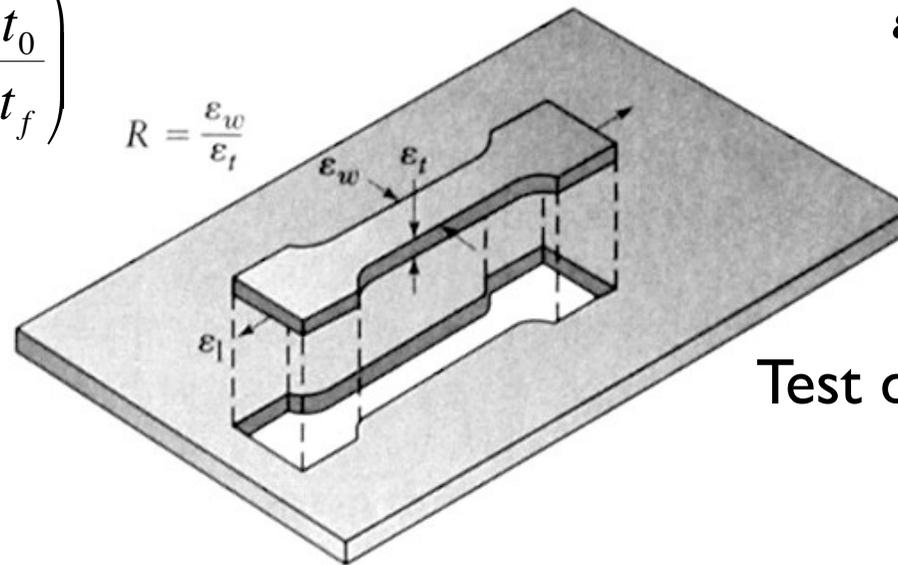
- tale rapporto è correlato al rapporto tra le deformazioni di larghezza (o diametro nel caso dell'imbutitura) rispetto alla diminuzione di spessore:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right)}$$
$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{w_f l_f}{w_0 l_0}\right)}$$

# Rapporto di anisotropia normale o rapporto di deformazione

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right)}$$

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{w_f l_f}{w_0 l_0}\right)}$$



Test di trazione

- Bisogna ricordare che i laminati sottili sono in genere anisotropi nel piano.

# Rapporto di deformazione con anisotropia

- Nel caso di laminato con anisotropia nel piano si utilizza un valor medio di R:

- $$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}$$

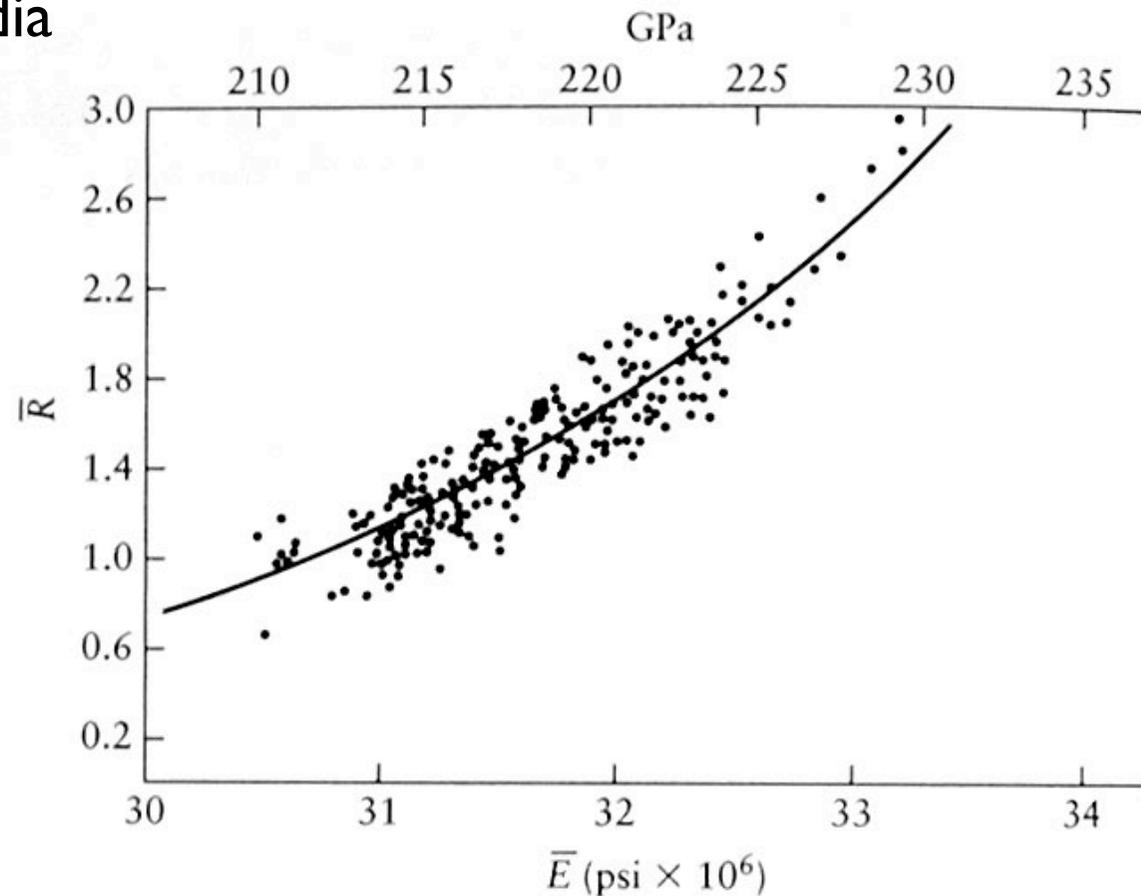
- oppure la deviazione dal valore isotropo come:

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2}$$

Materiale	$\bar{R}$
Lega zinco	0.4-0.6
Acciaio laminato a caldo	0.8-1
acciaio laminato a freddo	1-1.4
acciaio laminato a freddo spento con Al	1.4-1.8
Lega Al	0.6-0.8
Rame e ottoni	0.6-0.9
Leghe Ti	3-5
Acciaio inox	0.9-1.2
Acciaio basso legato	0.9-1.2

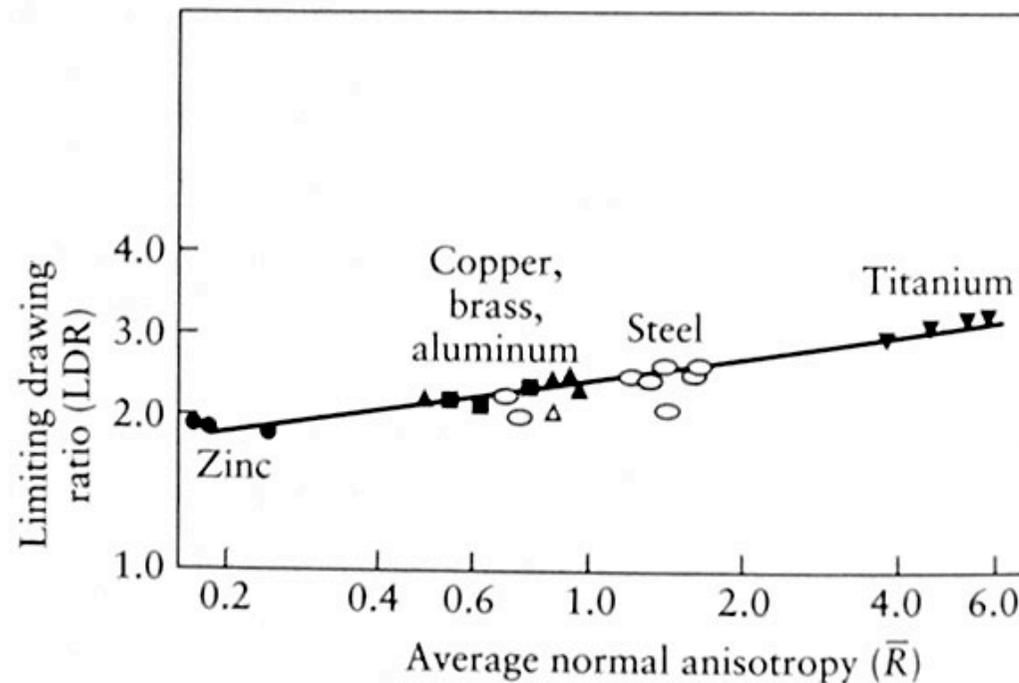
## Relazione tra $\bar{R}$ e $\bar{E}$ medio

- Abbiamo una relazione diretta in quanto l'anisotropia influenza il valore del modulo nelle varie direzioni e quindi la sua media



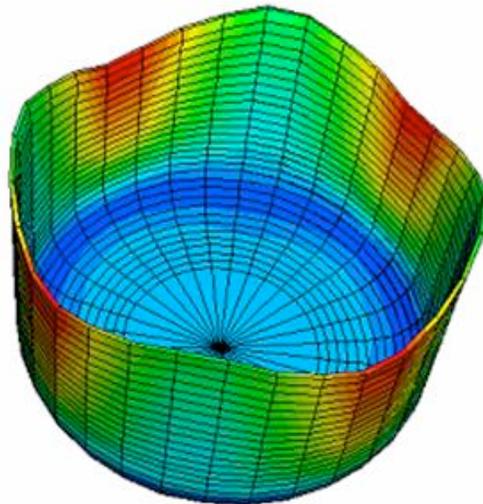
## Relazione tra $\bar{R}$ e LDR

- Come si vede dal grafico sperimentalmente si osserva una certa dipendenza lineare tra i due valori e non è stata trovata altra proprietà che si correla altrettanto con LDR.



# Earing (problema delle orecchie)

- E' sempre legato all'anisotropia dei laminati: grosso scarto di materiale per rimozione delle orecchie



Lattine in alluminio



Tessitura ottimizzata



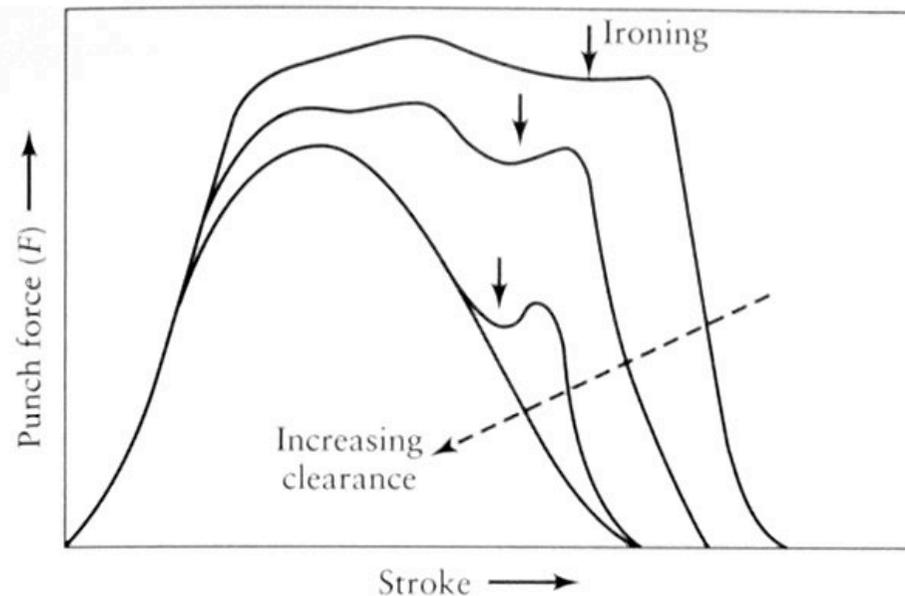
Laminato standard

# Forza sul punzone

- La forza massima richiesta sul punzone dipende da diversi fattori compreso l'attrito, il lavoro per deformazione ridondante e si può approssimare come:

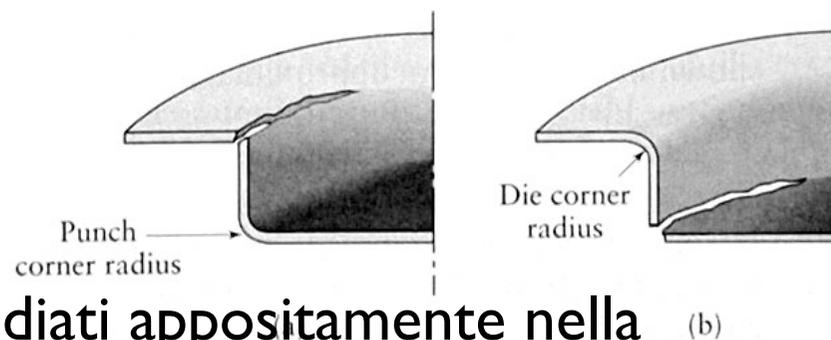
$$F_{\max} = \pi D_p t_0 (UTS) \left( \frac{D_0}{D_p} - 0.7 \right)$$

La forza raggiunge un massimo dopo un certo percorso del pistone. Diminuendo il gioco cresce con l'ironing.



# Operazioni nell'imbutitura

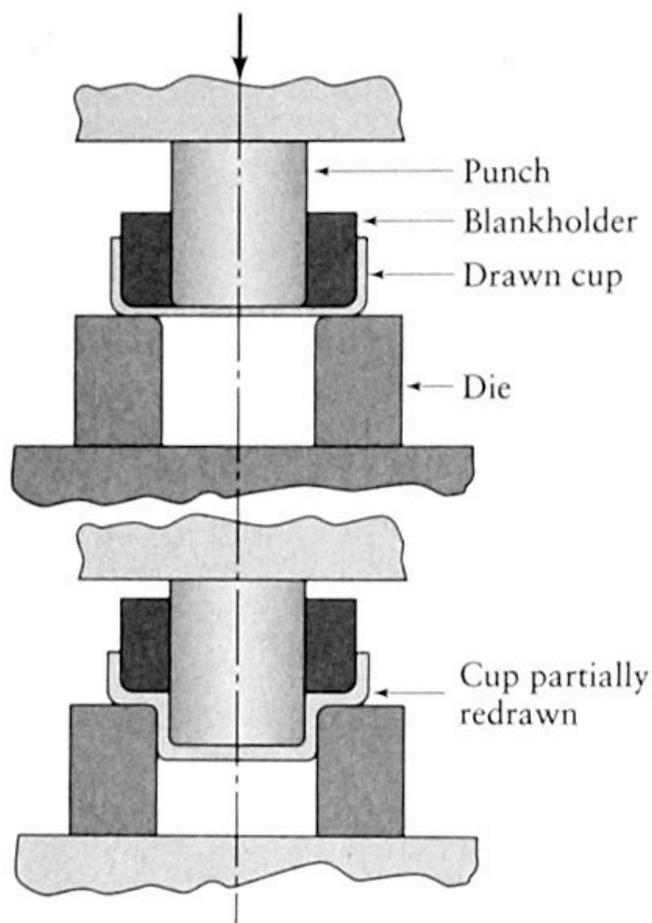
- Giochi e raggi: il gioco è in genere tra il 7-14% maggiore dello spessore originale della lamina. Il raggio di curvatura sul punzone e nello stampo non deve essere troppo basso per evitare rotture, ma neanche troppo grande per evitare corrugazioni.



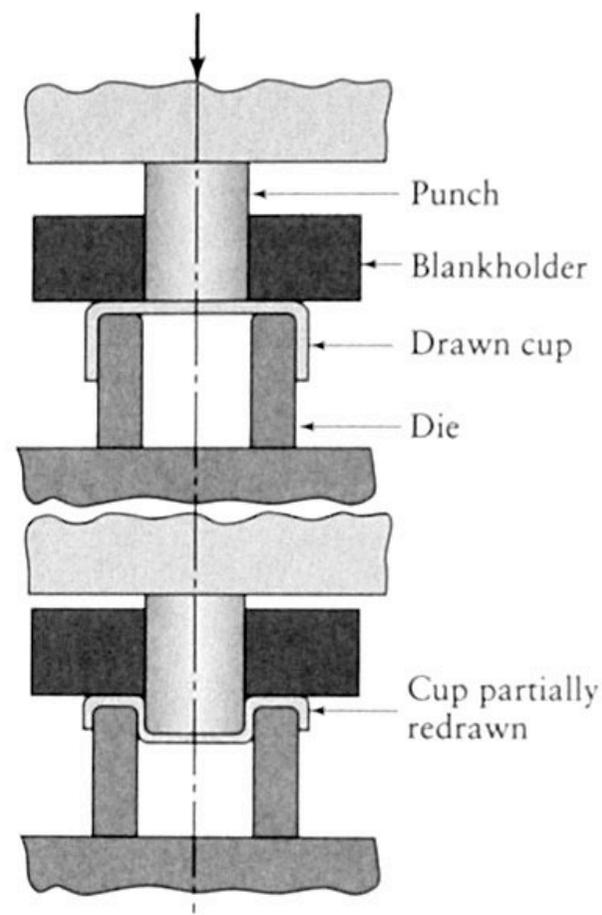
- I draw beads vanno studiati appositamente nella progettazione per ottimizzare la deformazione nell'imbutitura.
- Pressione sui blocchi di trattenimento: si usa generalmente un 0.7-1% della somma dello sforzo di snervamento e rottura del laminato

# Operazioni nell'imbutitura

- Redrawing: sfrutta il rammollimento per deformazione opposta (effetto Bauschinger):



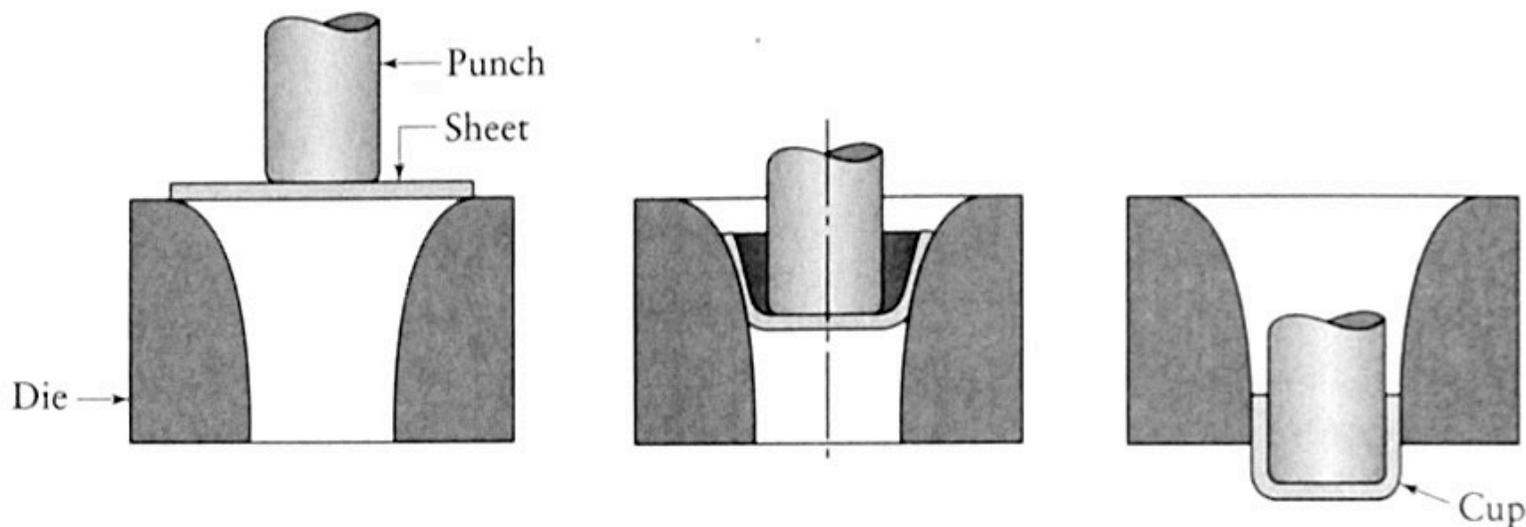
(a) Conventional redrawing



(b) Reverse redrawing

# Imbutitura senza blankholder

- Si può effettuare l'imbutitura senza blocchi di trattenimento come in figura se lo spessore della lamiera è sufficiente ad impedire corrugazioni nella parte esterna.
- In genere si può effettuare se:  $D_0 - D_p < 5t_0$

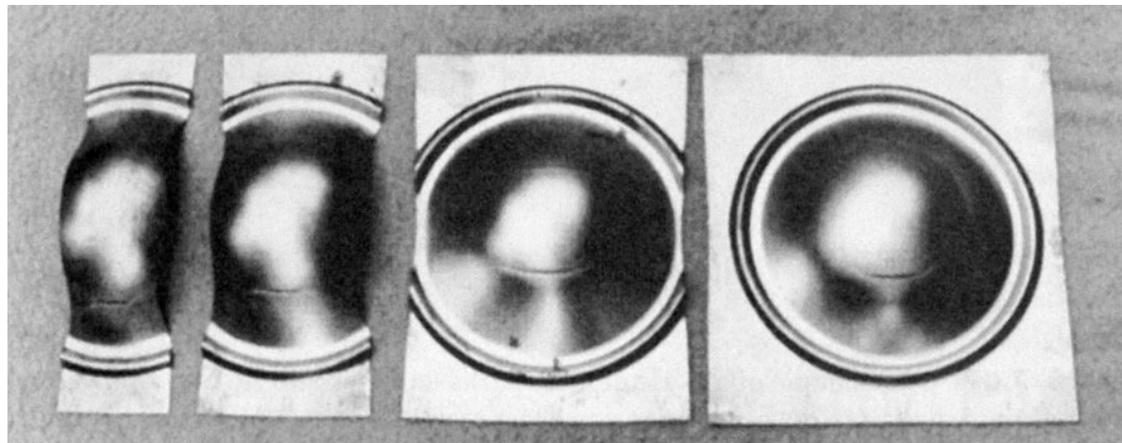


# Utensili, lubrificazione

- **Materiali:** per gli utensili e stampi si utilizzano acciai per utensili e ghise da colata. Per alcune lavorazioni particolari si possono utilizzare carburi (shear spinning...) o polimeri/gomme (rubber forming....)
- Come macchinari si usano presse idrauliche e presse meccaniche a doppia azioni per l'imbutitura. Si controllano blocchi di trattenimento e punzone indipendentemente. Si utilizzano velocità di movimento costanti. Basse velocità con acciai alto resistenti.
- La lubrificazione nell'imbutitura è molto importante per mantenere basse le forze e ridurre attrito e difetti. Si riduce al minimo la lubrificazione del punzone poiché l'attrito con la lamiera è importante. Si utilizzano oli, saponi ed emulsioni. Per casi difficili, cere e rivestimenti solidi.

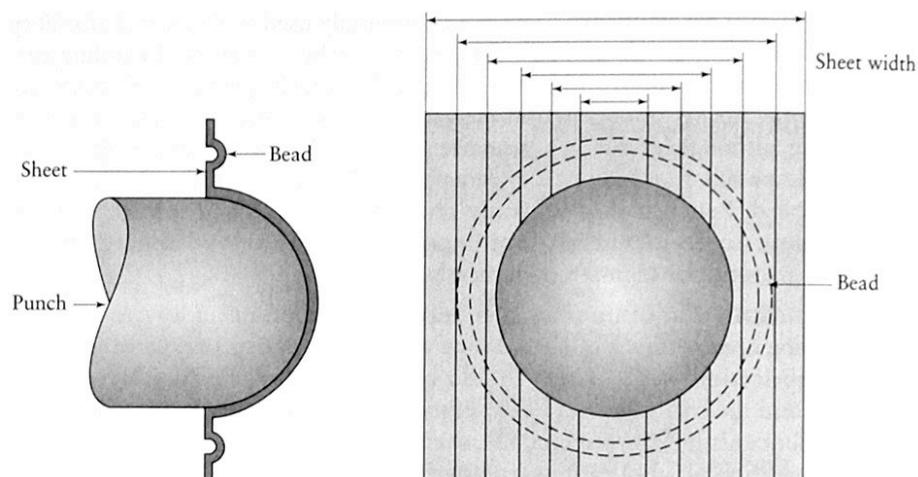
# Deformabilità delle lamiere

- Si utilizzano diversi test:
  - test di trazione per determinare allungamenti totali, indici di incrudimento ( $n$ ) e fattori d'anisotropia ( $R$ ).
  - Cupping test: sono stati i primi test per determinare la formabilità in condizioni di sforzo biassiale. Due varianti: una per lo stretching (Erichsen e Olsen test: una biglia di acciaio da 20 mm viene premuta contro una lastra circolare tenuta con 1000 Kg finché abbiamo un crack), l'altra per il drawing.
  - Bulge test: si deforma una lamiera circolare bloccata fino a rottura con pressione idraulica (niente punzone)



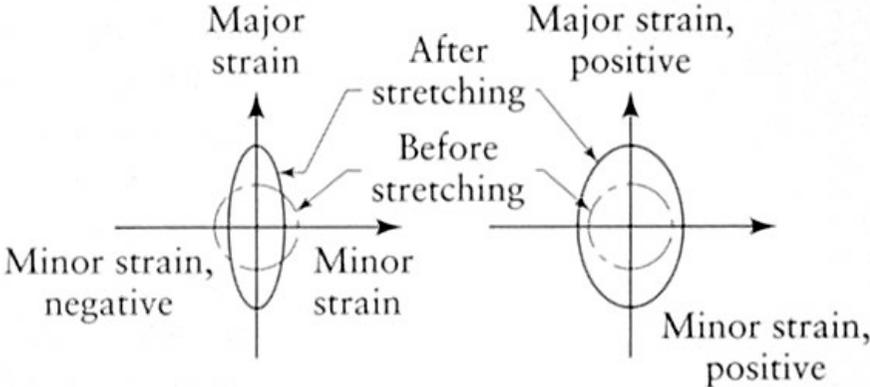
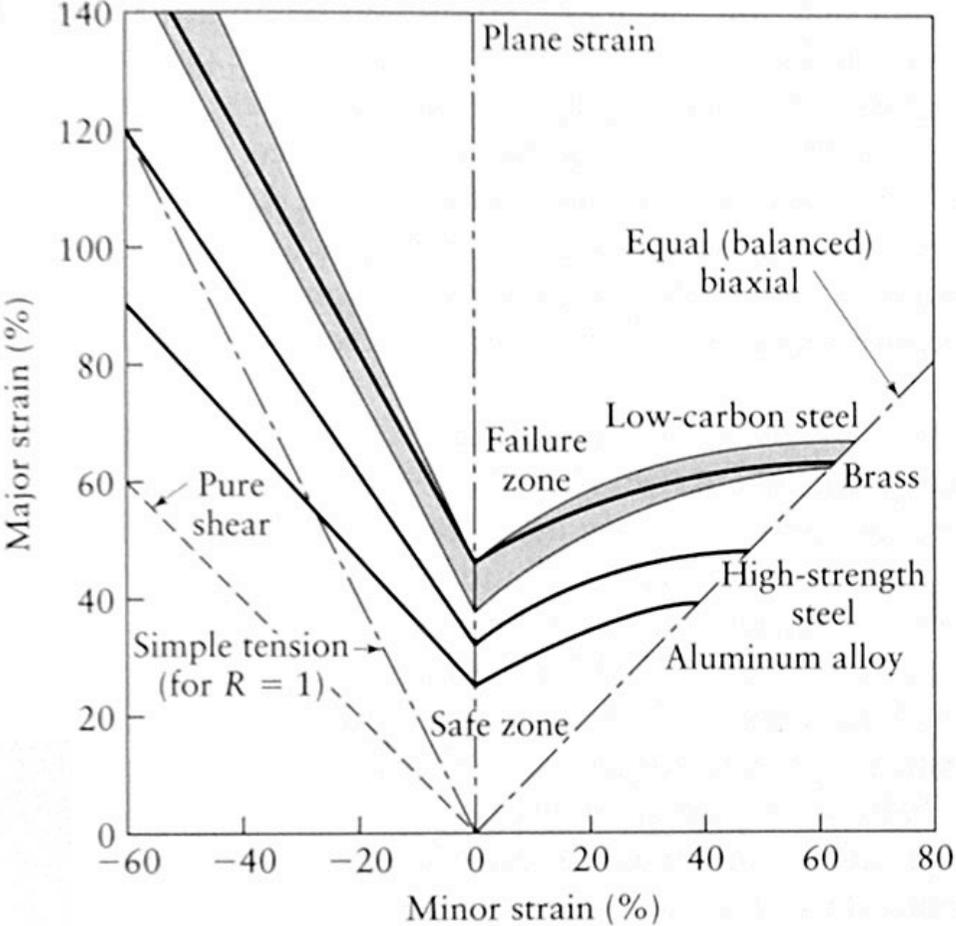
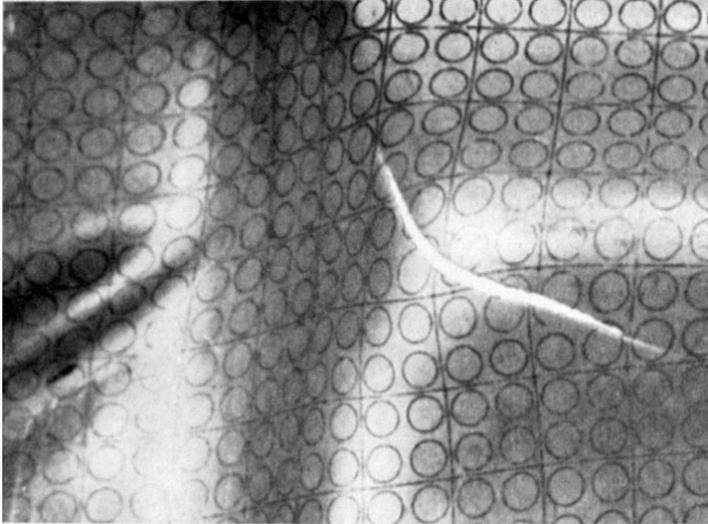
# Diagramma del limite di formatura: FLD

- Si costruisce con il test in figura preparando diversi campioni con differente larghezza:



- usando dei pattern a griglia di cerchi e quadrati pre stampati sulla lamiera si osserva la deformazione, le regioni dove avvengono e dalla forma finale dei cerchi si costruisce una mappa con le zone di rottura e zone di sicurezza

# Diagramma del limite di formatura: FLD

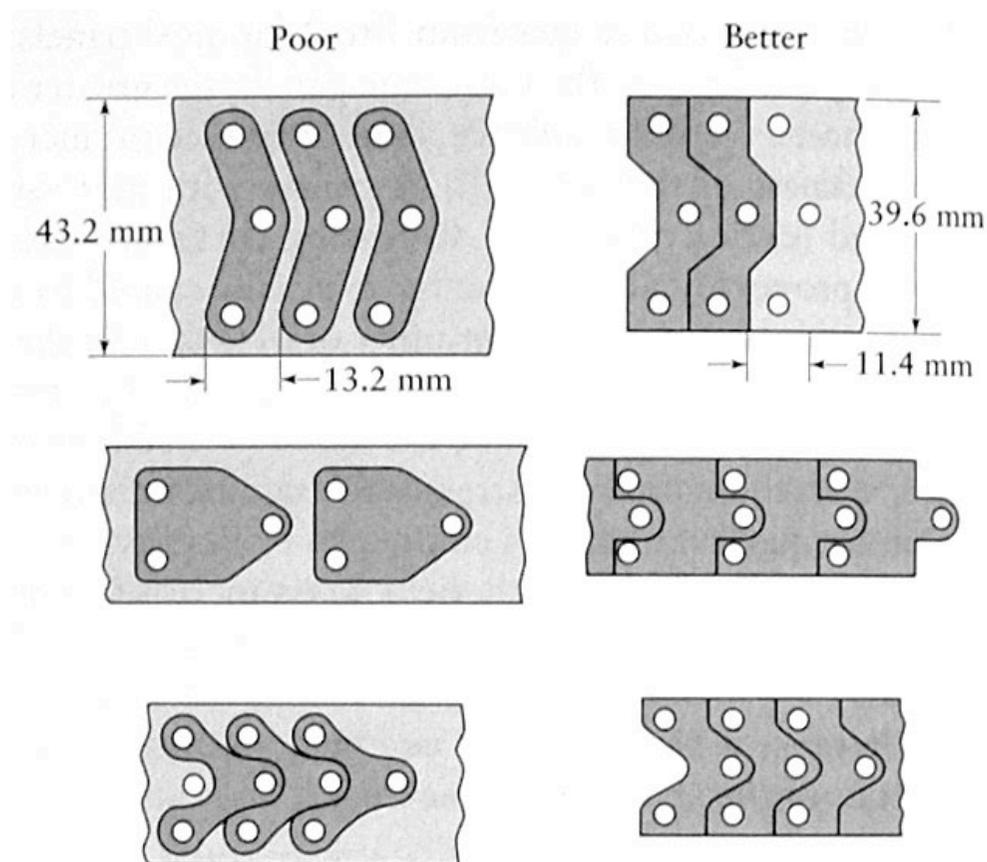


# Macchinari per la formatura delle lamiere

- Si utilizzano principalmente presse meccaniche, idrauliche o pneumatiche.
- I fattori principali da considerare nella selezione della pressa sono:
  - tipo di operazione
  - dimensioni e forma del pezzo
  - lunghezza percorso del punzone
  - numero di pezzi al minuto
  - velocità della pressa
  - altezza utile della pressa (movimento+altezza stampo/pezzo)
  - numero di azioni (singola, doppia o tripla)
  - capacità della pressa (in tonnellate)
  - tipo di controllo
  - sicurezze

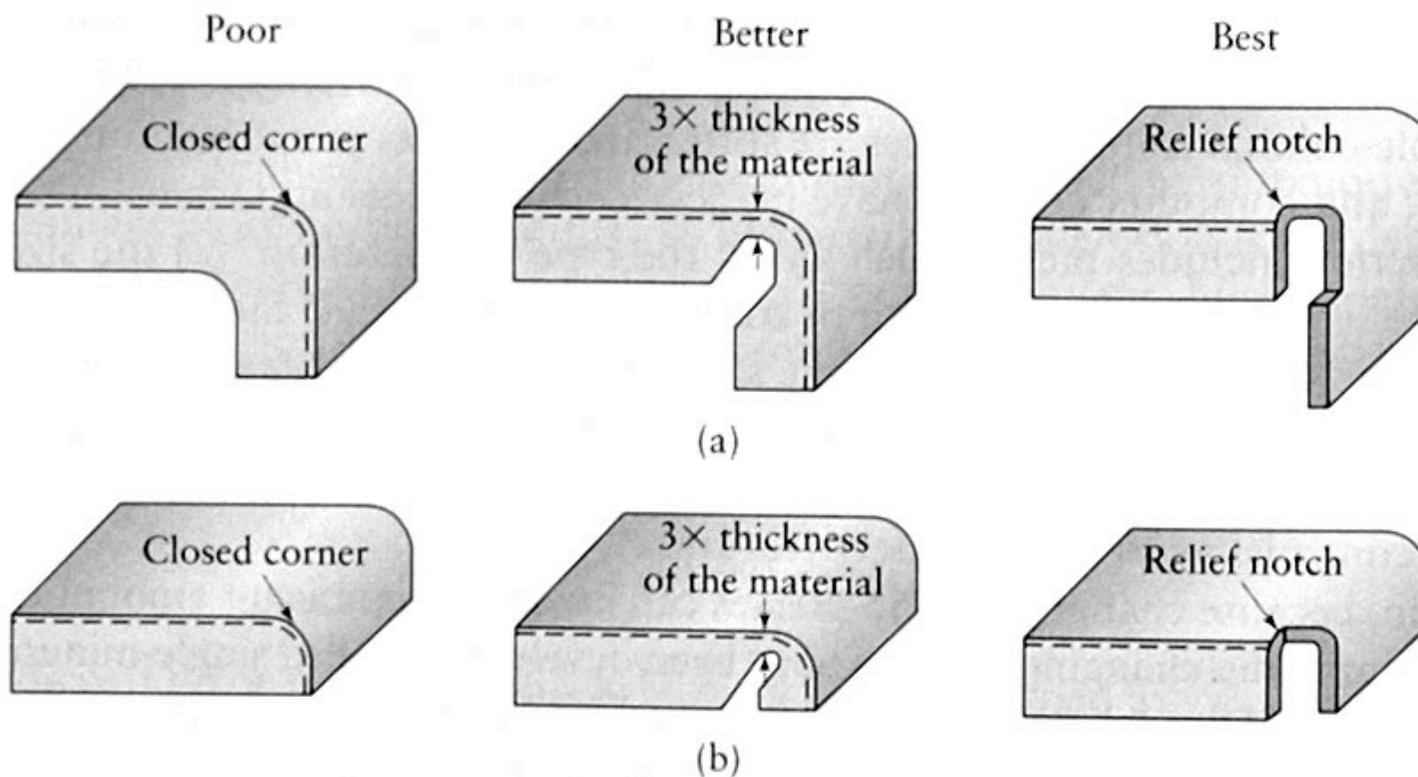
# Considerazioni sulla progettazione

- Il pezzo da stampare deve essere ottimizzato nella forma per ridurre gli scarti da taglio.



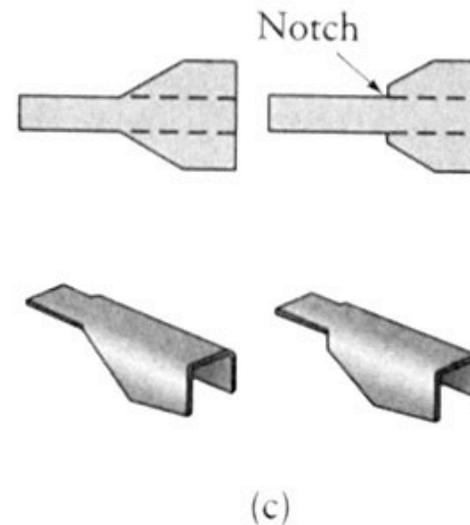
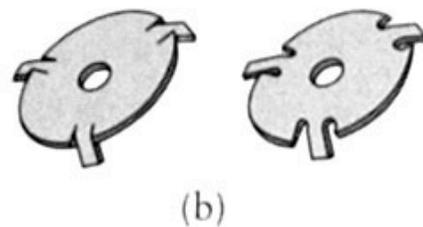
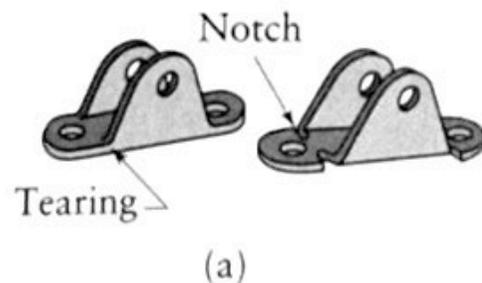
# Considerazioni sulla progettazione

- Piegatura e angoli: bisogna prestare attenzione a progettare il pezzo in modo da minimizzare le possibili corrugazioni e instabilità per compressione durante le operazioni di piegatura:



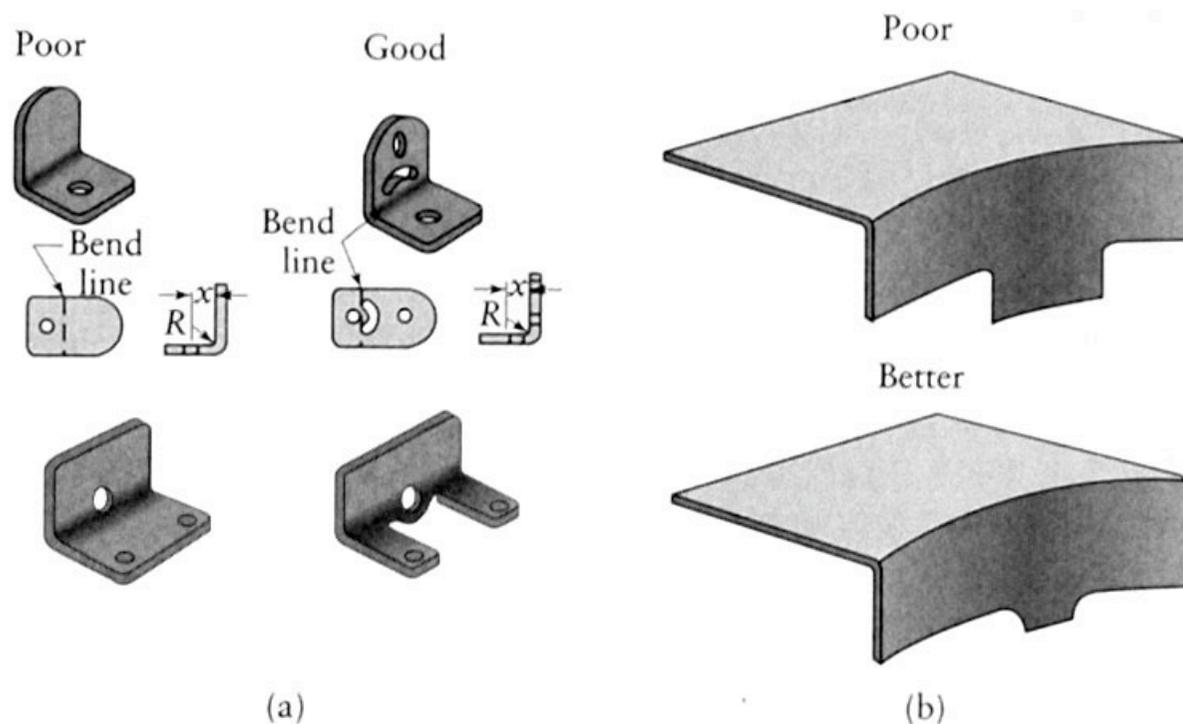
# Considerazioni sulla progettazione

- Sempre nella piegatura bisogna prestare attenzione alle zone con angoli non retti e zone adiacenti piegate/non piegate:



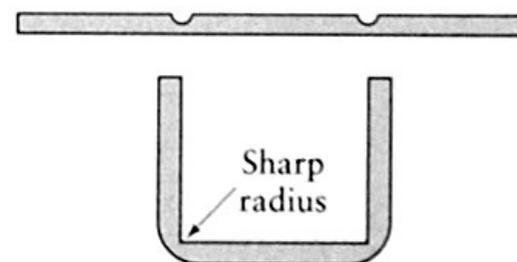
# Considerazioni sulla progettazione

- Bisogna ridurre le concentrazioni di sforzi o con rimozione di materiale per permettere piegature senza sforzi residui risultanti o aumentando i raggi di curvatura di buchi o figure vicine:

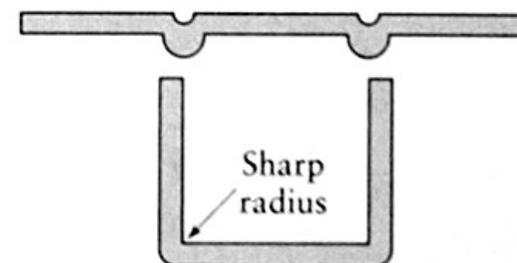


# Considerazioni sulla progettazione

- Si possono utilizzare intagli o corrugazioni per facilitare la formazione di spigoli accentuati
- Utilizzare angoli di rilascio nell'imbutitura e non pareti perfettamente verticali
- Infine quando bisogna utilizzare operazioni progressive conviene tenere il numero di operazioni il più basso possibile per ridurre i costi dei vari stampi e utensili



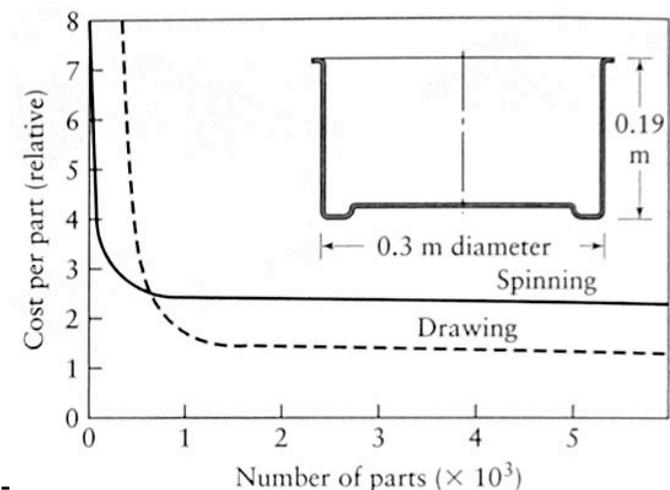
(a)



(b)

# Considerazioni economiche

- La formatura della lamiera è un processo molto versatile e ci permette di fabbricare lo stesso pezzo in molti modi differenti.
- La lavorazione della lamiera produce uno scarto molto più basso rispetto ad altri tipi di lavorazioni. Tipicamente nell'ordine del 10%-25% del materiale originale. Da confrontare con lavorazioni all'utensile (per rimozione) che arrivano fino al 60% e forgiature a caldo nell'ordine del 25%.
- I figura il confronto tra imbutitura e spinning dove l'euiaggiamento di base costa meno nello spinning, ma quest'ultimo richiede tempi maggiori

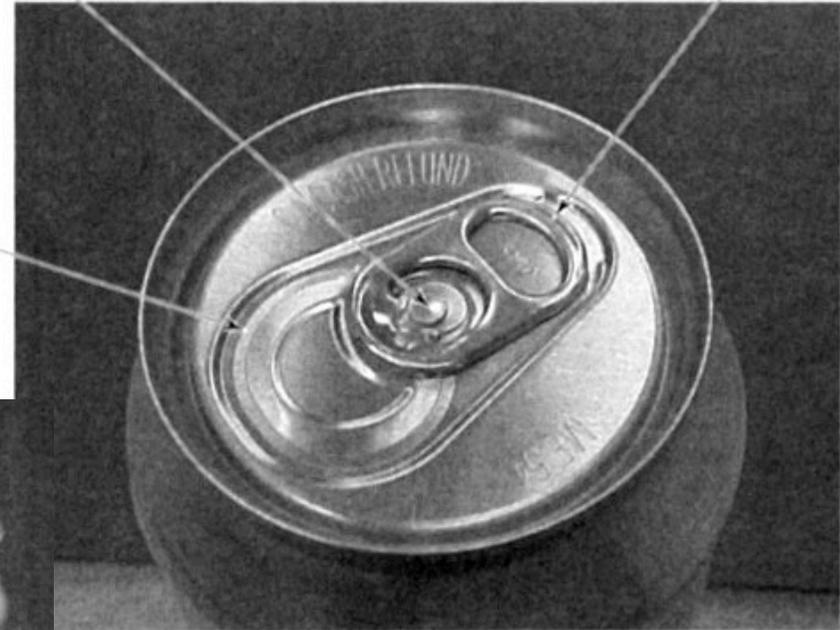


# Esempio: la produzione della lattina

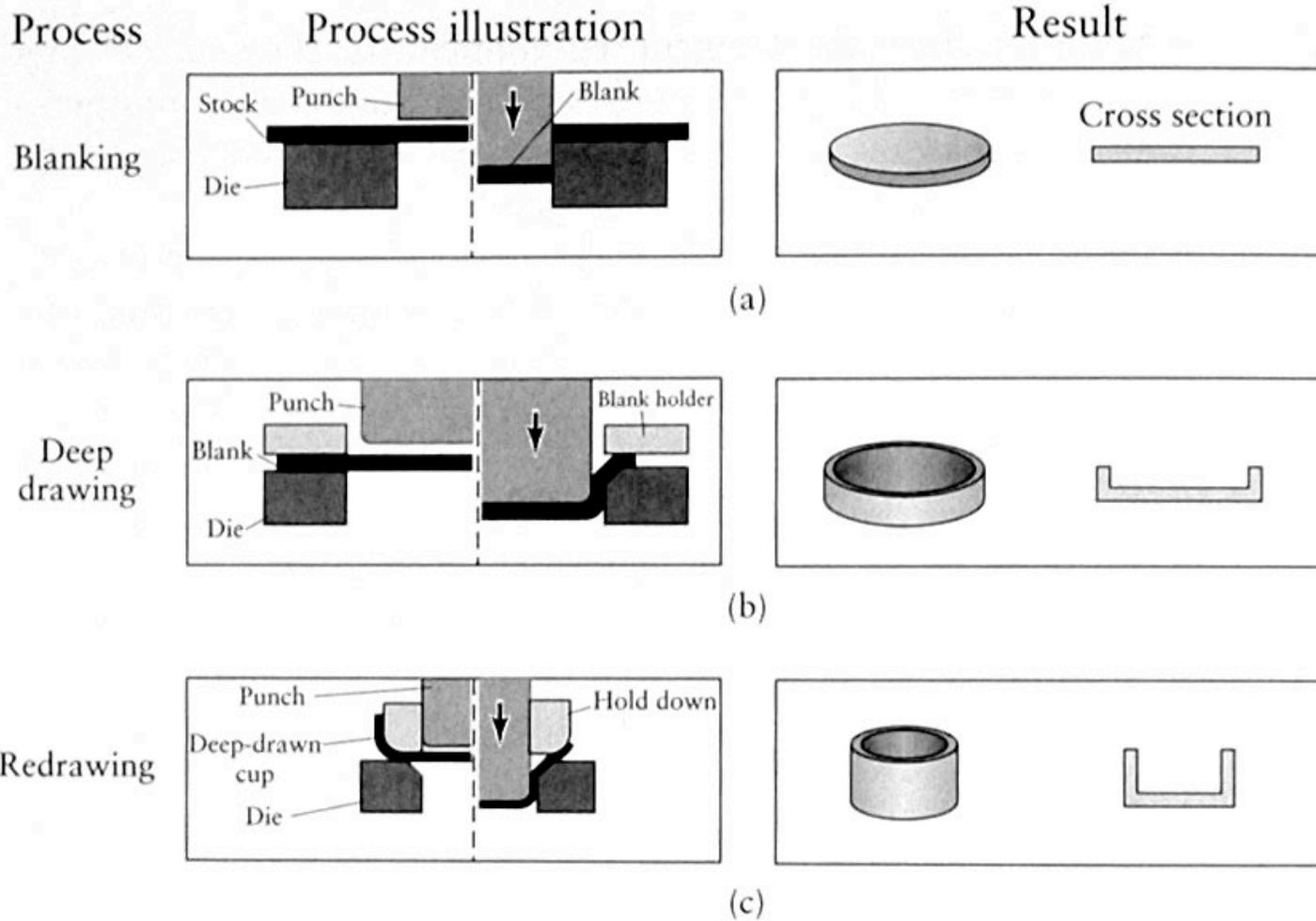
Integral rivet

Pop-top cantilever

Scored region



# Esempio: la produzione della lattina



# Esempio: la produzione della lattina

