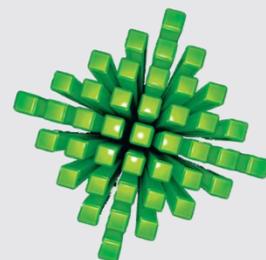
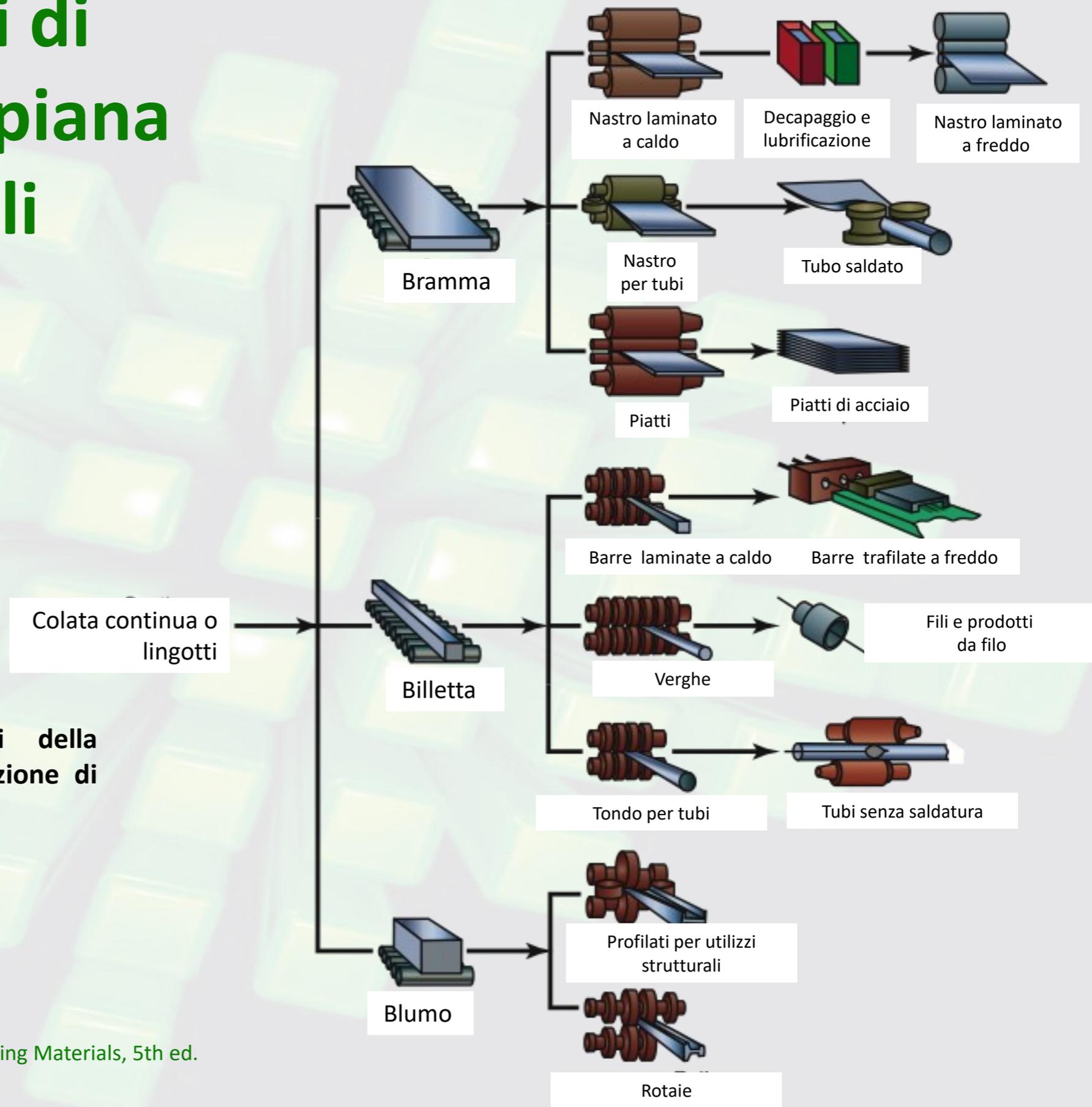


# Laminazione

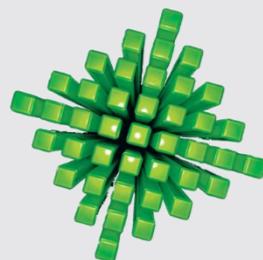


Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.  
Kalpakjian • Schmid  
© 2008, Pearson Education  
ISBN No. 0-13-227271-7

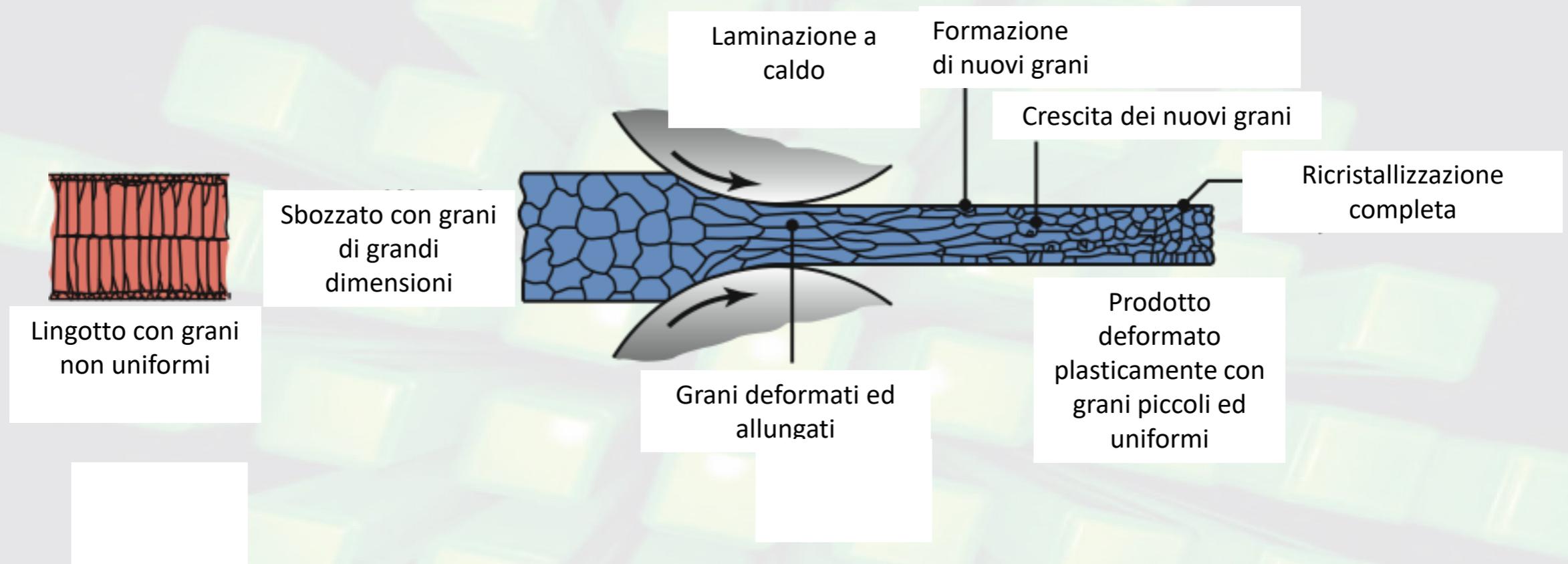
# Operazioni di laminazione piana e di profili



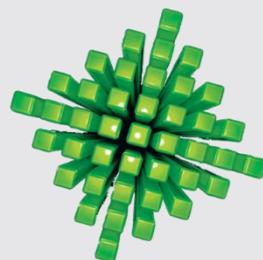
Schema delle varie operazioni della laminazione piana e della laminazione di profili.



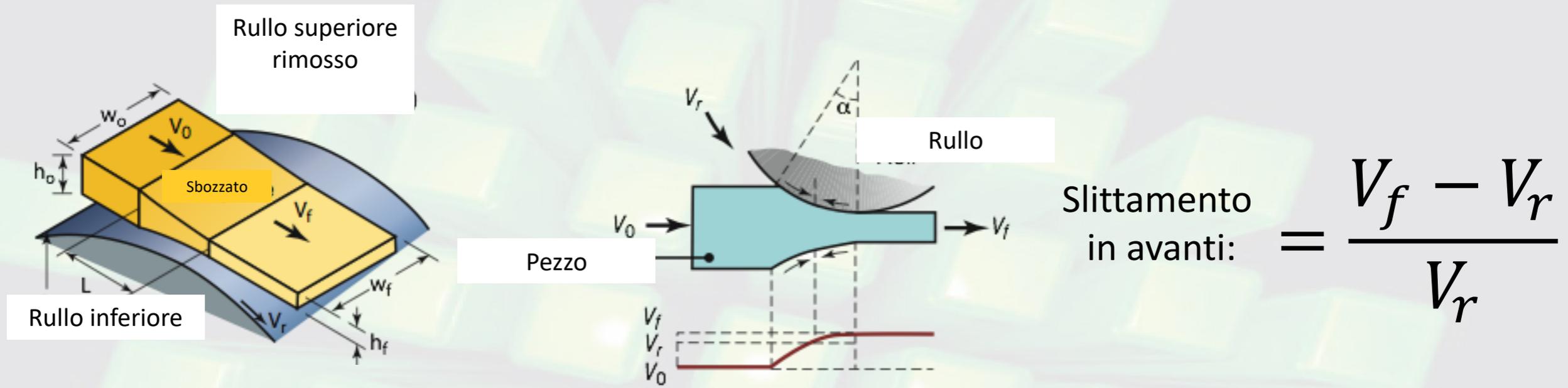
# Struttura cristallina nella Laminazione a Caldo



Cambiamento della struttura cristallina nella laminazione a caldo. Questa è una tecnica per ridurre la grana e affinare la microstruttura nei metalli ottenendo un miglioramento della resistenza meccanica e della duttilità.



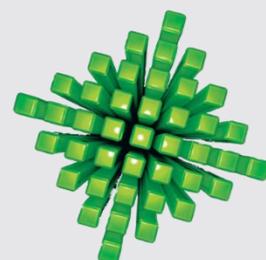
# Meccanica del processo di Laminazione Piana



Schema del processo di laminazione piana.

Le frecce rappresentano le forze di attrito agenti sul pezzo da parte del rullo

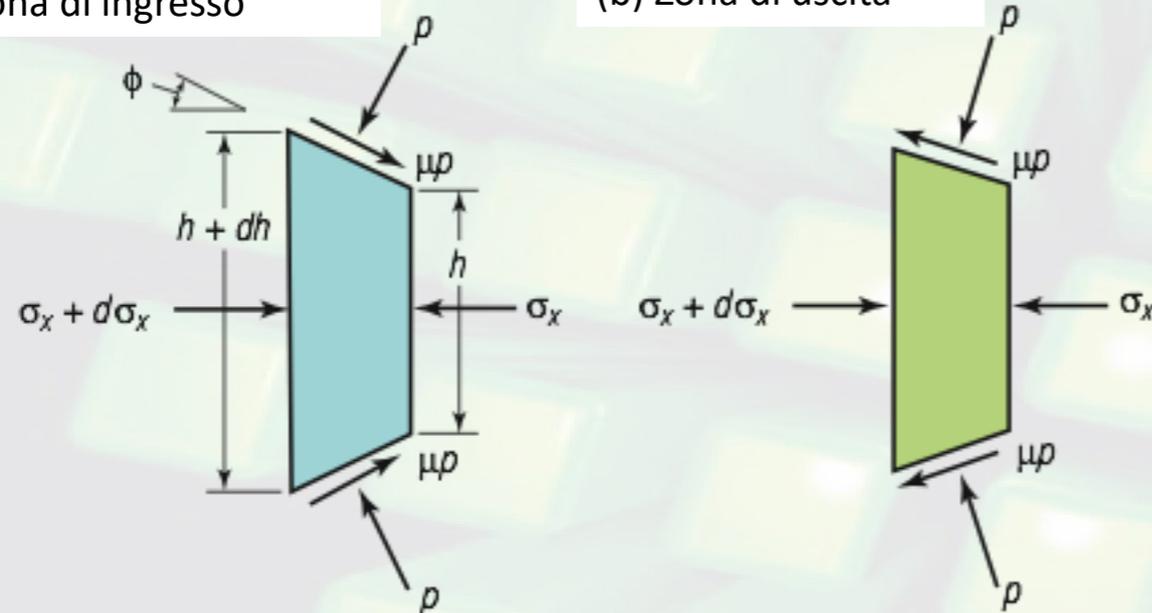
- Nel tratto a **sinistra** le forze di attrito tirano la lamiera dentro il laminatoio,
- mentre nel tratto a **destra** si oppongono all'ingresso della lamiera.



# Metodo dello Slab per la Laminazione

(a) Zona di ingresso

(b) Zona di uscita



Tensioni agenti su un elemento soggetto a laminazione:

(a) Zona di ingresso

(b) Zona di uscita

- Pressione nella zona di ingresso:

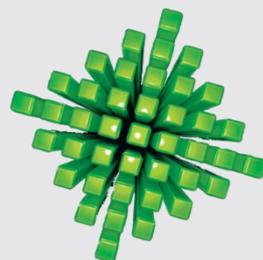
$$p = Y_f' \frac{h}{h_0} e^{\mu(H_0 - H)}$$

- Pressione nella zona di uscita:

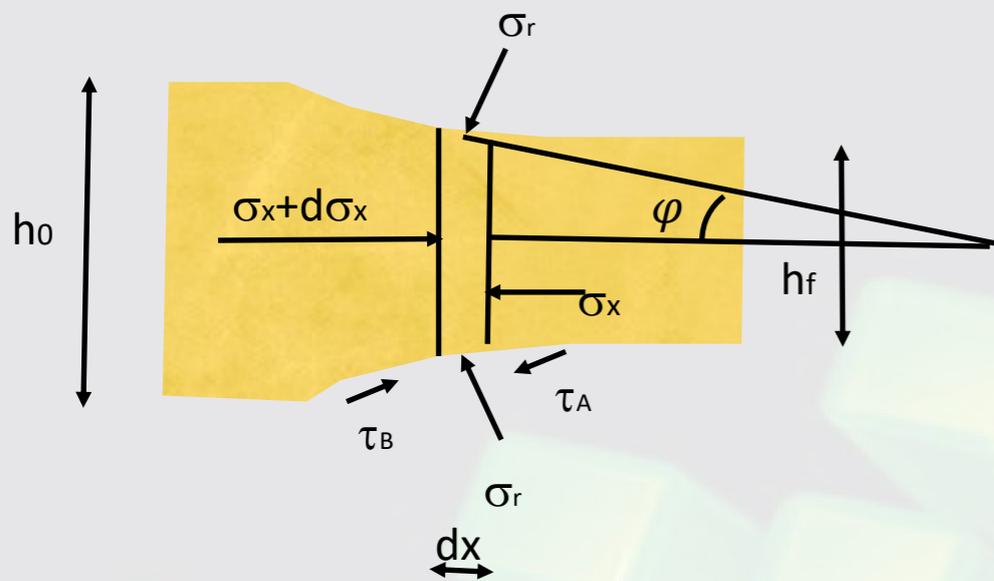
$$p = Y_f' \frac{h}{h_f} e^{\mu H}$$

dove

$$H = 2 \sqrt{\frac{R}{h_f}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{R}{h_f}} \phi \right)$$



# Metodo dello Slab per la Laminazione



## Equilibrio forze in x

$$\sigma_x h b - (\sigma_x + d\sigma_x) (h + dh) b + 2\sigma_r R d\varphi b \sin \varphi = \begin{matrix} 2\tau_{\text{attrito}} R d\varphi b \cos \varphi & \text{nella zona A} \\ -2\tau_{\text{attrito}} R d\varphi b \cos \varphi & \text{nella zona B} \end{matrix}$$

Dividendo tutto per b ottengo

$$\sigma_x h - \sigma_x h - \sigma_x dh - d\sigma_x h - d\sigma_x dh = 2\sigma_r R d\varphi (-\sin \varphi \mp \mu \cos \varphi)$$

$$d(\sigma_x h) = 2\sigma_r R d\varphi (\sin \varphi \mp \mu \cos \varphi)$$

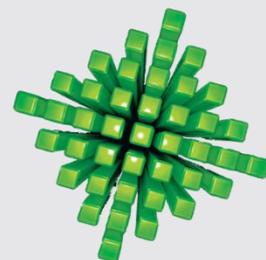
Poiché le **tensioni principali** sono

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \\ \sigma_3 &= \sigma_r \end{aligned}$$

von Mises

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

$$\left( \sigma_x - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_r) \right)^2 + \left( \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_r) - \sigma_r \right)^2 + (\sigma_r - \sigma_x)^2 = 2Y^2$$



# Metodo dello Slab per la Laminazione

$$\left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_r)\right]^2 + \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_r)\right]^2 + (\sigma_r - \sigma_x)^2 = (\sigma_r - \sigma_x)^2 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + 1\right)$$

$$\frac{6}{4}(\sigma_r - \sigma_x)^2 = 2Y^2 \quad \longrightarrow \quad |\sigma_r - \sigma_x| = \frac{2}{\sqrt{3}}Y = Y'$$

$$\sigma_x = \sigma_r - Y'$$

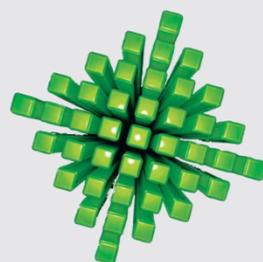
$$d((\sigma_r - Y')h) = 2\sigma_r R d\varphi (\sin \varphi \mp \mu \cos \varphi) = 2\sigma_r R d\varphi (\varphi \mp \mu)$$

$$d\left[hY' \left(\frac{\sigma_r}{Y'} - 1\right)\right] = hY' d\frac{\sigma_r}{Y'} + \left(\frac{\sigma_r}{Y'} - 1\right)d(hY')$$

Man mano che h diminuisce tanto più il materiale incrudisce cioè Y ed Y' aumentano  
Quindi h Y' rimane quasi costante  $\longrightarrow d(hY') = 0$

$$\bullet d\left[hY' \left(\frac{\sigma_r}{Y'} - 1\right)\right] = hY' d\frac{\sigma_r}{Y'} = 2\sigma_r R d\varphi (\varphi \mp \mu)$$

$$\frac{d\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right)}{\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right)} = \frac{2R}{h} (\varphi \mp \mu) d\varphi$$



# Metodo dello Slab per la Laminazione

ma  $h = h_f + 2R(1 - \cos \varphi)$

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2} + \dots$$

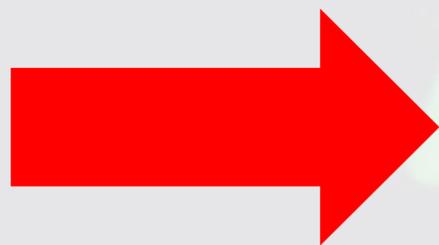


$$h = h_f + R \varphi^2$$

$$\frac{d\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right)}{\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right)} = \frac{2R}{h_f + R \varphi^2} (\varphi \mp \mu) d\varphi = \frac{2R\varphi d\varphi}{h_f + R \varphi^2} \mp \frac{2R\mu d\varphi}{h_f + R \varphi^2}$$

Introduco le nuove variabili

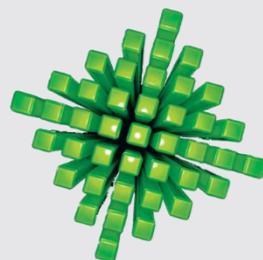
- $w = \varphi \sqrt{\frac{R}{h_f}} \quad dw = \sqrt{\frac{R}{h_f}} d\varphi$
- $z = h_f + R \varphi^2 = h \quad dz = 2R\varphi d\varphi$



$$\frac{d\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right)}{\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right)} = \frac{dz}{z} \mp 2\mu \sqrt{\frac{R}{h_f}} \frac{dw}{1 + w^2}$$



$$\ln\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right) = \ln(z) \mp 2\mu \sqrt{\frac{R}{h_f}} \arctan\left(\varphi \sqrt{\frac{R}{h_f}}\right) + \ln(C)$$



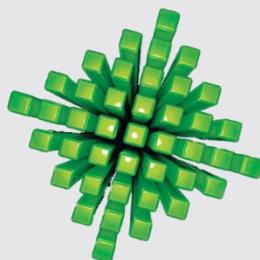
# Metodo dello Slab per la Laminazione

$$\ln\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right) = \ln(Cz) \mp \ln\left(\exp\left(2\mu\sqrt{\frac{R}{h_f}}\arctan\left(\varphi\sqrt{\frac{R}{h_f}}\right)\right)\right)$$

chiamo  $K(\varphi) = 2\sqrt{\frac{R}{h_f}}\arctan\left(\varphi\sqrt{\frac{R}{h_f}}\right)$

$$\ln\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right) = \ln(Cz) \mp \ln(\exp(\mu K)) = \ln(Cz \exp(\mp\mu K))$$

$$\left(\frac{\sigma_r}{Y'}\right) = C(h_f + R\varphi^2)\exp\left(\mp 2\mu\sqrt{\frac{R}{h_f}}\arctan\left(\varphi\sqrt{\frac{R}{h_f}}\right)\right)$$



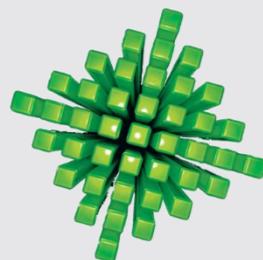
# Metodo dello Slab per la Laminazione

**Ingresso – Zona A**  $\sigma_x = 0$   $h = h_0$   $\varphi = \alpha$   $K_{ing} = 2 \left( \frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \arctan \left( \sqrt{\frac{R}{h_f}} \alpha \right)$   
 $\sigma_r = Y'$

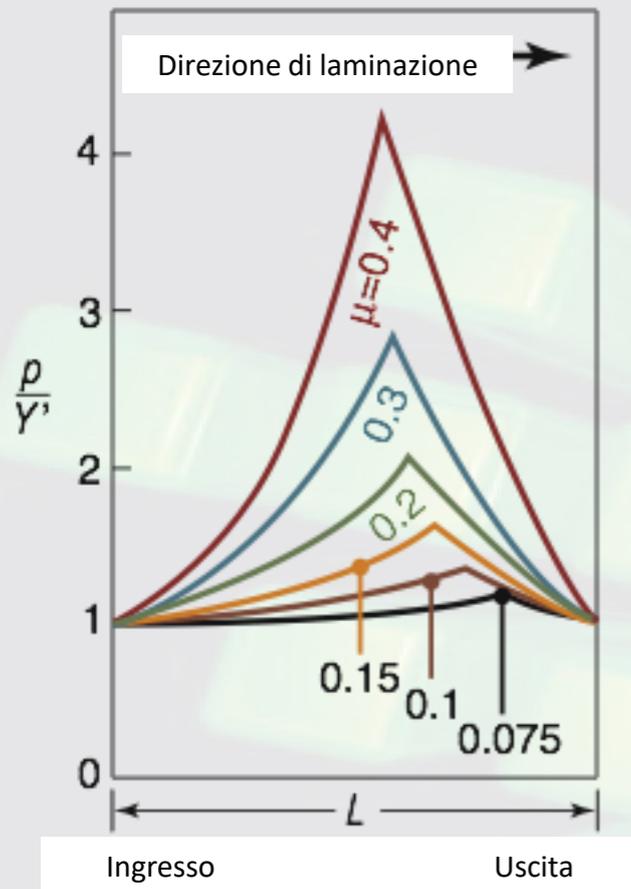
$\rightarrow \frac{\sigma_r}{Y'} = \frac{h}{h_0} \exp[\mu(K_{ing} - K)]$

**Uscita – Zona B**  $\sigma_x = 0$   $h = h_f$   $\varphi = 0$   $K_{usc} = 0$   
 $\sigma_r = Y'$

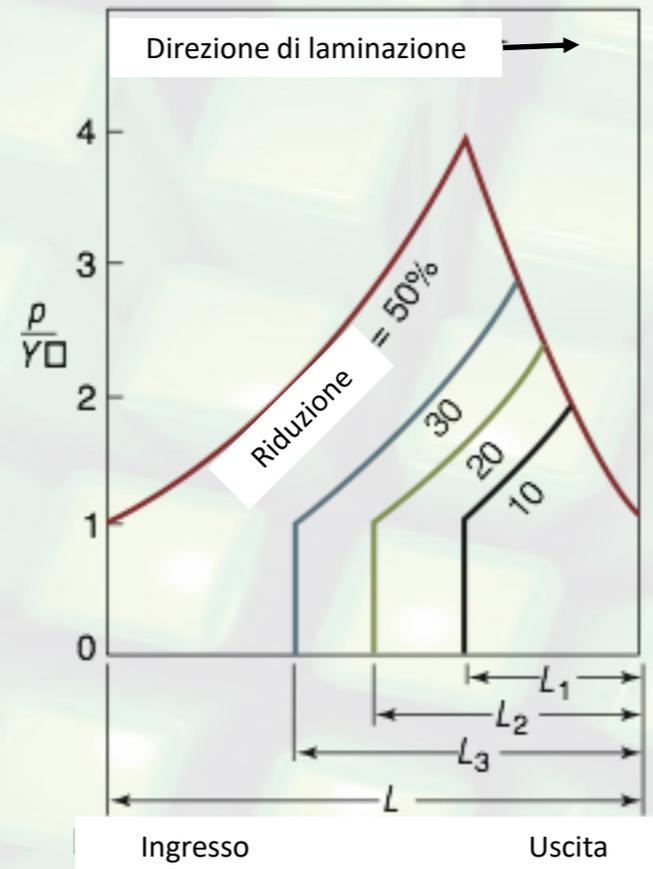
$\rightarrow \frac{\sigma_r}{Y'} = \frac{h}{h_f} \exp[\mu(K)]$



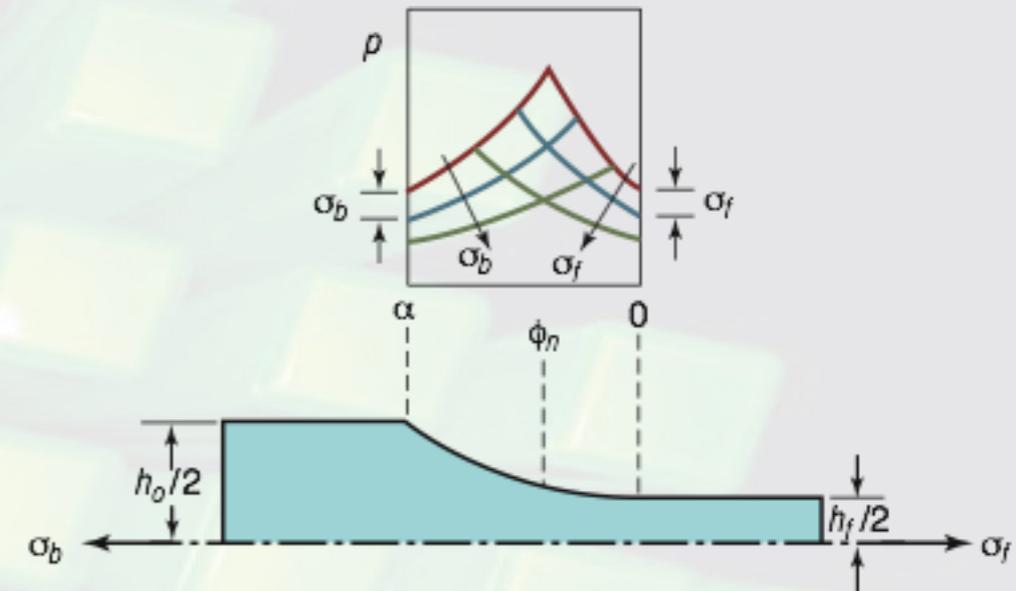
# Distribuzione della Pressione nella Laminazione



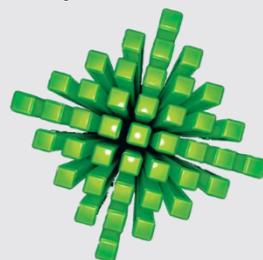
Distribuzione della pressione in funzione del **coefficiente di attrito**  
 Al crescere dell'attrito il punto neutro si sposta verso l'ingresso.  
 In assenza di attrito il punto neutro si sposta all'uscita e i cilindri slittano.



Distribuzione della pressione in funzione della **riduzione dello spessore**  
 L'area sotto la curva cresce all'aumentare del valore di riduzione correlata alla forza di laminazione che quindi cresce

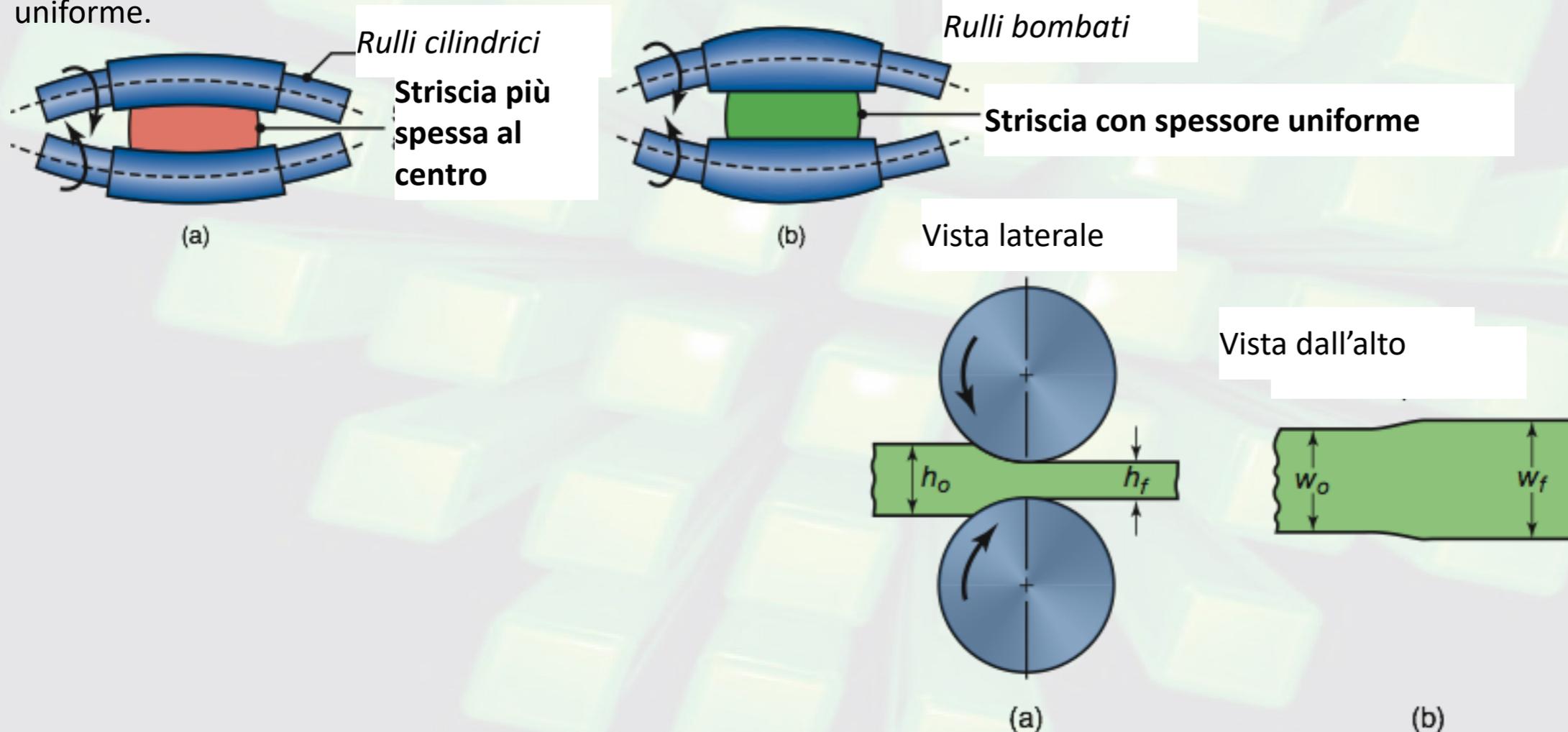


Distribuzione della pressione in funzione della **tensione che tira indietro ( $\sigma_b$ ) e di quella che tira in avanti ( $\sigma_f$ )**  
 Il punto neutro si sposta all'aumento di tali tensioni come pure l'area sotto le curve correlata alla forza di laminazione che diminuisce

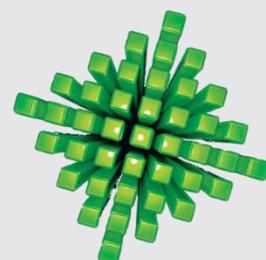


# Flessione dei Cilindri Laminatori & Allargamento del Pezzo Laminato

- (a) Flessione dei rulli cilindrici causata dalla forza di laminazione che genera un laminato con spessore maggiore al centro rispetto ai bordi.
- (b) Flessione dei rulli rettificati con bombatura di compensazione che riesce a generare un laminato con spessore uniforme.

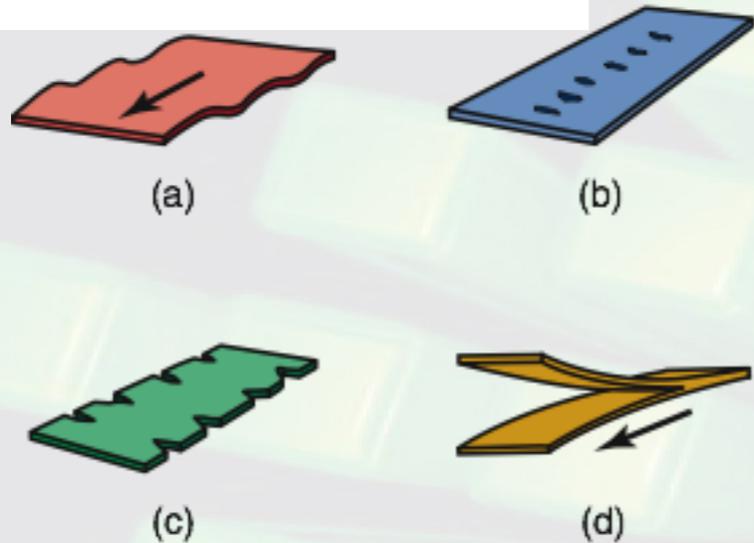


**Allargamento** della larghezza della striscia (*spreading*) durante la laminazione piana.



# Difetti nella laminazione

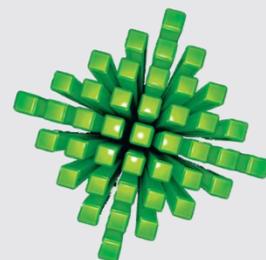
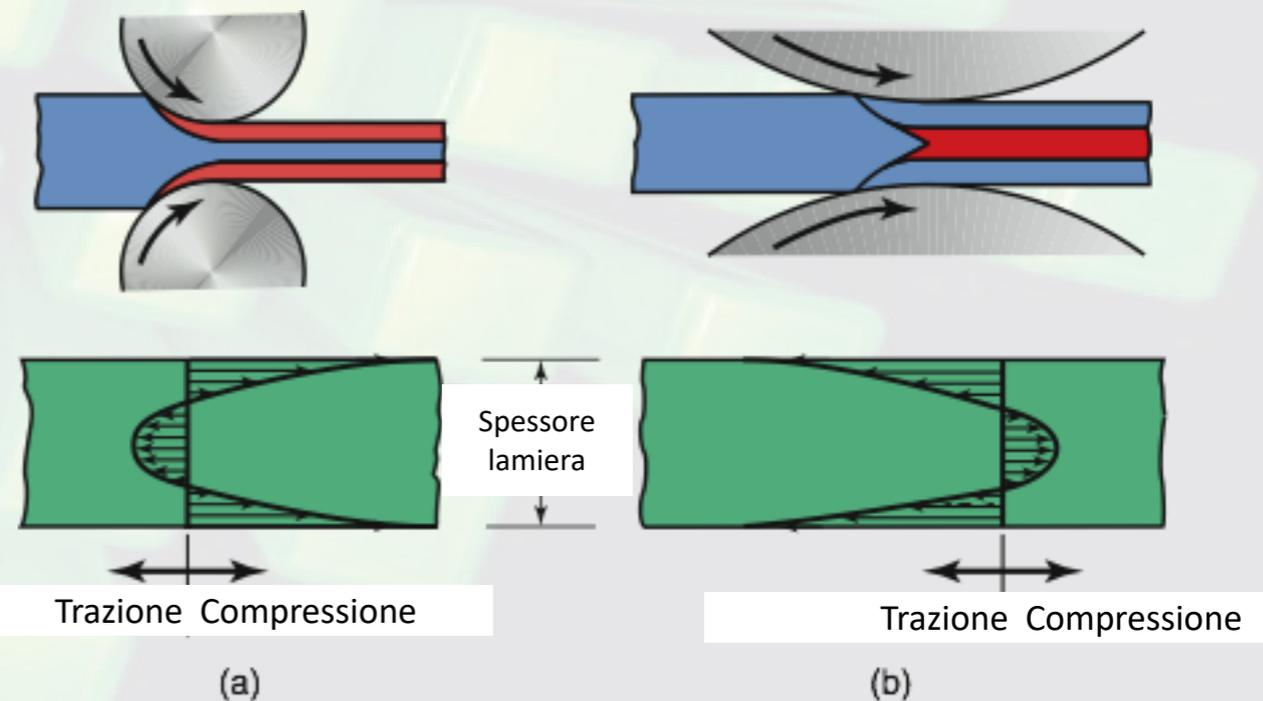
Direzione di laminazione



- (a) **Ondulazioni ai bordi**, la lamiera si allunga di più ai bordi che al centro a causa della flessione dei cilindri, che trattenuta dal materiale che non si allunga della zona centrale va in instabilità (al carico di punta);
- (b) **Cricche al centro** della striscia, eccessiva bombatura che provoca una riduzione dello spessore nella zona centrale con formazione di cricche;
- (c) **Cricche ai bordi**, la lamiera si dovrebbe allungare di più ai bordi a causa della flessione dei rulli, ma per i materiali più fragili non si allunga arrivando prima a rottura;
- (d) **Difetto a bocca di cocodrillo (*Alligatoring*)**, si presenta quando l'attrito è elevato e la lastra presenta elevata presenza di difetti al centro della sezione laminata.

Effetto del raggio del rullo sulle tensioni residue:

- (a) **Piccoli rulli e/o piccola riduzione nello spessore, compressione solo della periferia**
- (b) **Grandi rulli e/o grande riduzione nello spessore, compressione solo del cuore**



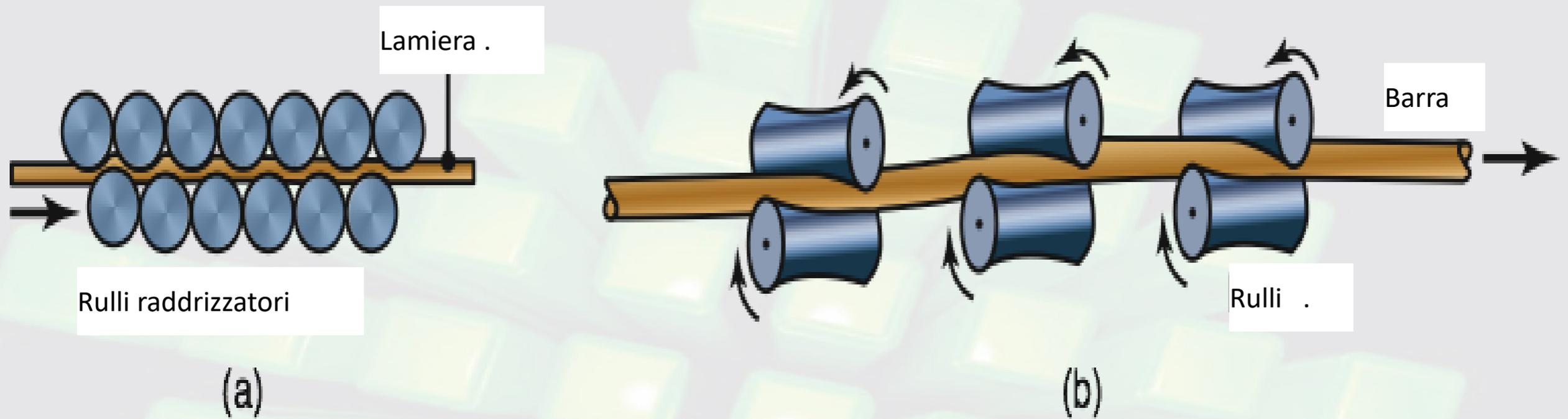
Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.

Kalpakjian • Schmid

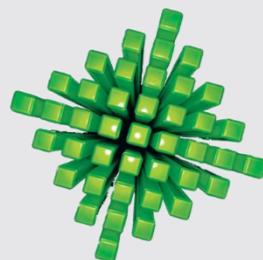
© 2008, Pearson Education

ISBN No. 0-13-227271-7

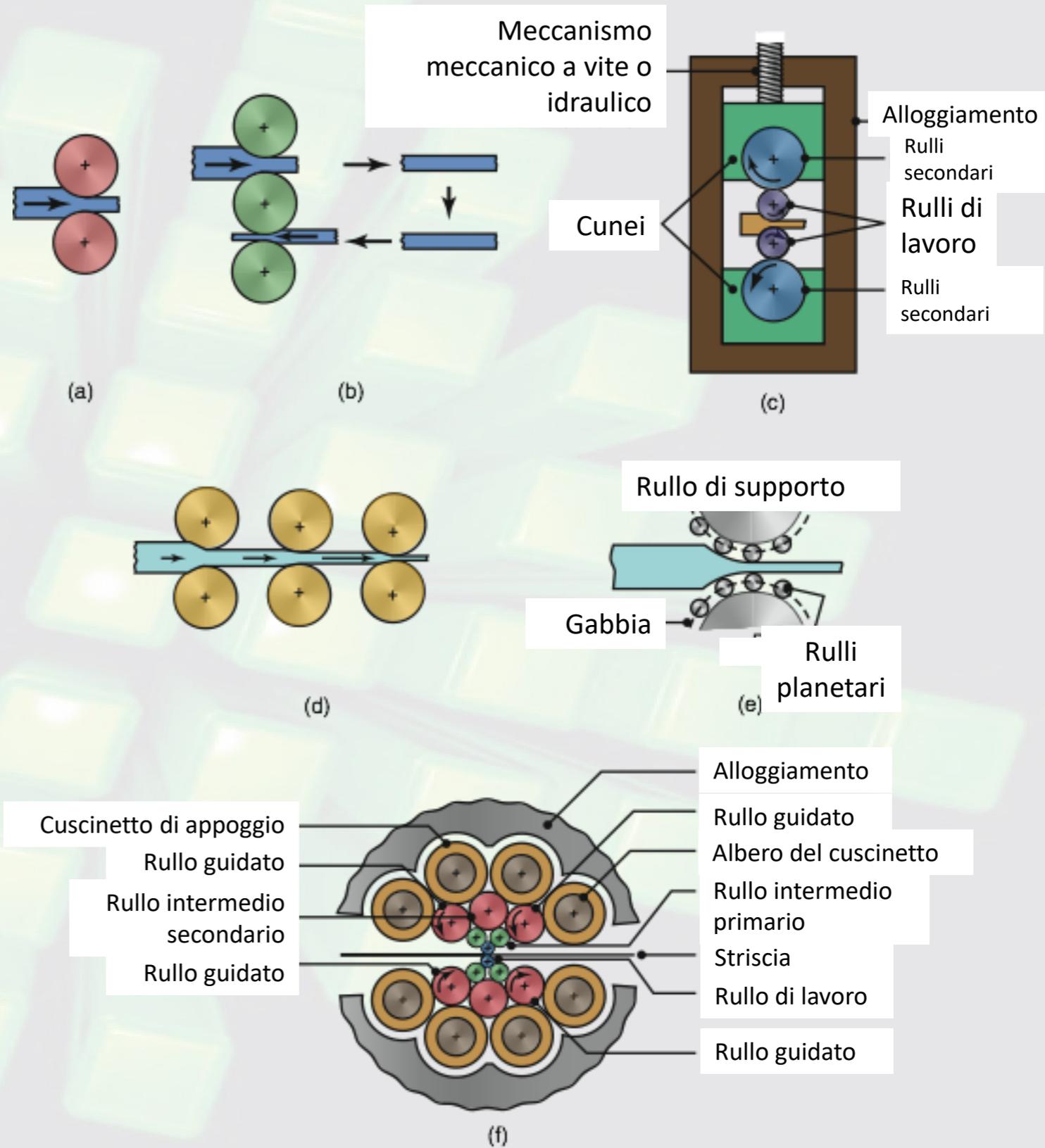
# Laminazione di Raddrizzatura (Roller Leveling)



Raddrizzatura di  
(a) lamiere piane e  
(b) barre tonde.



# Configurazioni delle varie tipologie di laminatoi



- (a) Laminatoio a duo;
- (b) Laminatoio a trio;
- (c) Laminatoio a quarto;
- (d) Laminatoio tandem, con tre gabbie (=treni);
- (e) Laminatoio planetario,
- (f) Laminatoio cluster (*Sendzimir*).

