appunti
www.centroappunti.it
Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: 1816A - ANNO: 2015

# A P P U N T I

STUDENTE: Antoniotti Mattia

MATERIA: Tecnologia meccanica, Teoria + esercizi - prof. Antonelli

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 340

DARIO ANTONELLI

Tecnologia meccanica

Scopo → comprensione dei processi produttivi che portano ai manufatti di uso comune

- Rapporto qualità ottenuta / costo di processo produttivo
- Dimensionamento di massima

Corso → in moduli — A: Materiali
- B: Formatura
- C: Deformazione
- D: Taglio e controllo numerico
- E: Altri processi

Modulo diviso in Lezioni

- Processo
  - → Materiali → Vincoli
  - → Risorse impiegate → Vincoli
  - Vincoli → Ambientali, Economici, Tecnologici

Libro "Tecnologia meccanica" Kalpakjian

Corso segue flusso di materiale in azienda

Materia prima → mat. metallici e mat. plastiche

↓

Caratterizzazione → misure meccaniche, prove non distruttive, prove distruttive

↓

Processi primari → Semilavorati
(fusione e deformazione)

↓

Processi secondari → si ottiene prodotto finito
- Taglio e saldatura

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 340

# Tecnologia di produzione

Prodotto — Ha tanti componenti differenti

↳ mono o multi materiale

↓

Richiedono più processi differenti } Alla fine prodotto finito costa 50 €

→ Processi con costi ridotti

→ Specializzazione

↓

Pezzo prodotto con economie di scala grandi

## Processo produttivo industriale

Materiale portato in stabilimento

- macchine
- utensili
- manodopera
- potenza elettrica
- mat. di supporto

} Risorse necessarie

trasformato in

→ Prodotto finito

→ Scarti e Inquinanti — gassosi, liquidi, solidi } Vincoli ambientali

Dal punto di vista economico

↓

Con processo produttivo aggiungo VALORE a materiale

ma valore aggiunto non corrisponde a costo di processo

↓

Ritorno di vendita maggiore

- In Italia si aggiunge valore alto e prezzo di vendita rimane basso

Ad esempio notebook in Europa

↓

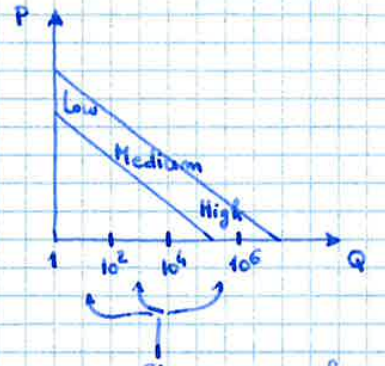
Non li vendono più

Smartphone invece sì → prezzo di vendita è molto più alto di valore aggiunto

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 340

Grafico VARIETÀ di prodotto (P) — QUANTITÀ (Q)




Si usano macchine diverse

Elevata quantità → Sistema (Continuo) → Unica grossa macchina
→ Si crea macchina in base AL PRODOTTO
↓
produzione orientata al prodotto

Bassa quantità
└ Sistema a linea → tante macchine generali in linea
└ molto più flessibile

Moderna ORIENTATA AL PROCESSO

- Produz. per celle di lavorazione — percorso di pezzo può variare
(Quasi Elevata quantità)
↓ per prodotti più variabili

- Produz. Job-shop → produz. in base a macchine che si hanno
(officina meccanica)
- Ogni prodotto è diverso dall'altro
- Più lento e costoso

Reparti con macchine che fanno lo stesso lavoro

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 340

Fattori competitivi
- Qualità
- Innovazione
- Servizio al cliente
- Costo

• Aziende medie non riescono a sopravvivere
↓
Azienda con qualità deve anche avere costi non troppo alti
↳ HP aveva costi alti → ora non più (anni 80)

Nuova Filosofia giapponese (Toyota production system) → ora detto "world class manufactory" o "lean production"
↳ Prodotti arrivavano migliori e a prezzi inferiori

Seguendo studiosi Americani famosi in università

• Coinvolgimento di tutti gli addetti negli obiettivi dell'impresa → Ogni azienda ha il suo VISION (slogan)
↳ È per gli operai
• Miglioramento continuo e graduale → all'infinito
↳ non mi accontento mai
• No mutamenti traumatici
• Ricerca di semplicità
↳ decomposizione di problemi complessi in sottoproblemi
↳ soluzioni parziali

Kaizen — miglioramento continuo
Produzione "Just in time" — senza code
Total quality system

SCHEMA GIAPPONESE

Porta

• Qualità "gratuita" → Non deve scartare prodotti (con controlli qualità) → Conviene
Lavoro bene

• Il lavoro è un costo fisso
• Automazione migliora la qualità
• Contratti con un solo fornitore
• Pulizia

• I lavoratori sono gli esperti
• Errori sono esperienza e devono essere analizzati
• Le scorte mascherano i problemi di produzione
• Il lotto deve tendere ad uno
↳ metodi per ridurre i tempi di setup
• Se lavoro non aggiunge valore
↳ Spreco

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 340

CIM (Computer Integrated Manufacturing)

Fabbrica completamente automatica — grazie a computer → Integra tutti gli aspetti connessi alla produzione

↳ Obiettivo finale di processo di automazione della fabbrica

Elementi base

- CAD — Sistemi di progettazione
- CAPP — Ciclo di fabbricaz. assistito
- FMS — Sistemi di lavoraz. flessibili
- CAIP — Sistemi automatici di misura
- ERP — Gestisce
  ↳ Tutti i processi aziendali / amministrativi di business
  ↳ produzione, magazzino, ordini, acquisti

vantaggi

- Adattabilità a variazioni nella domanda
- migliore qualità del prodotto
- Ottimizzaz. di materiale e manodopera → riduzione costo di produzione
- Gestione prodotti a breve life cycle

IL CONCURRENT ENGINEERING (Giapponese)

Ingegneria simultanea — processo produttivo ottimizzato per quel prodotto

↓

parallelamente quando si pensa a progetto prodotto

si inizia a pensare processo produttivo e a ciclo di vita del prodotto

Miglioramento prodotto (qualità percepita dal cliente) — Riduzione del TIME TO MARKET

↳ da idea a messa in commercio

↓

Importante perché si perde il treno → Alcune Aziende anticipano altre

Cosa richiede:

- Organizzazione efficiente del lavoro in TEAM
- Uso di procedure operative (mile stone) pietre miliari
- Uso di strumenti e tecniche connetti e integrabili
- Architetture di sistema appropriate
- Team dev'essere diretto da un project manager multidisciplinare

↓

Figure difficili da trovare → total quality management

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 340

Diagramma di Gant (CE)

Concept

Design

Production planning

Inizio fase successiva
prima di fine di precedente
↓
se quella prima ritarda
quella dopo può comunque iniziare
↳ Si riducono i tempi

MATERIALI

Che caratteristiche ci interessano per produrli?

Perché lavorazioni a caldo?

Perché materiali stampati (fucinati) sono più resistenti?

Gestione di attrito / lubrificante?

Energia richiesta in lavorazione?

In produzione moderna — grandissima varietà di materiali utilizzati

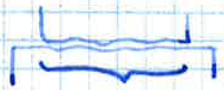
Materiali ingegneristici
- Metalli
  - Ferrosi — ACCIAIO
  - Non ferrosi
- Mat. plastiche
  - Termoplastiche
  - Termoindurenti
  - Elastomeri
- Ceramici e altri
- Compositi

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 340

# ATTRITO (TRIBOLOGIA)

2 corpi solidi hanno superfici ondulate
↓
Contatto solo in alcuni punti
↳ Superficie reale di contatto (Sr)



Sup. nominale di contatto (Sm)

→ Forza normale scambiata deforma plasticamente le punte su cui si appoggiano

Finché sup. di contatto è suff. per sostenere le 2 superfici

$$Sr \cong \frac{1}{100} Sm$$

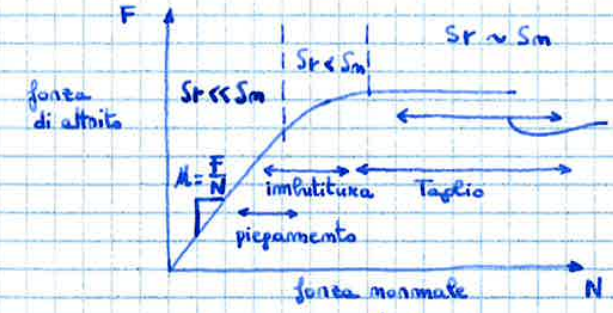
Tensione rimane comunque elevata

produce (MICROGIUNZIONI) MICROSALDATURE

( Forze di Van der Waals )

Quando superfici si spostano si rompono microsaldature opponendo resistenza
↓
Attrito

In processi produttivi
Forze scambiate sono elevate
↓
Sr continua a crescere fino alla Sm in alcuni casi




Forgiatura, estrusione, laminazione

Aumenta area di contatto
F ∝ area di contatto

Pente lineare

Se Aumenta N → Aumenta F
↓
( Aumenta area di contatto )

Quando Area di contatto diventa quella nominale → F rimane costante
↳ Perché superficie di contatto non può più aumentare

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 340

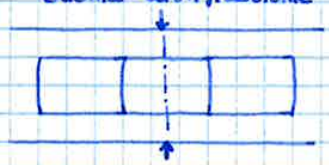
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 340

Coeff. di attrito ($\mu$)

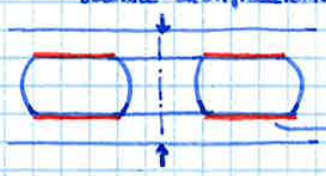
• A caldo $\mu$ è maggiore che a freddo

| | freddo | |
|---|---|---|
| In laminazione volutamente alto (no lubrificante) | 0,05 - 0.1 | 0,2 - 0,7 |
| Forgiatura senza lubrificante | $\mu$ alto | |
| Asportazione di truciolo | 0,5 - 2 | |

Buona lubrificazione



Scarsa lubrificazione



Questa parte rimane ferma contro lo stampo

ANISOTROPIA

- Comportamento non è indipendente da direzione (Dopo deformazione)
  - I grani non sono più simmetrici e casuali → Allungati in una sola direzione
  - → Orientamenti preferenziali
  - • Resistenza meccanica diversa in alcune direzioni
    - → può essere incrudito e in altre più debole
    - → Cambiano anche PROPRIETÀ FISICHE (magnet., elettr.)
- di tipo cristallografico
- per orientazione delle fibre

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 340

## GENERAZIONE DI CALORE

Lavoro di Deformazione → plastica è irreversibile
→ elastica è reversibile

L di def. plastica diventa
→ 10 % si trasforma in energia di legame → per il fatto che è REALE (dovuto a spostam. e moltipl di dislocazioni) che vanno in BDG
→ 90 % energia termica

(interna al corpo → la trattiene per un certo tempo stesso)
→ Aumenta T del corpo → Se è Adiabatica poi aumenta troppo

Se c'è scambio di calore
→ Trasferisce energia interna sotto forma di calore
→ Va agli utensili e macchina utensile
→ diventano meno resistenti
→ Si temperano a T non molto alte

Ci dev'essere altrimenti T può raggiungere quella di crescita di grano → BRUCIATURE
Inutilizzabile
(Con alcune parti fuse)

## ALCUNI PROCESSI

- Adiabatico d'impatto
  → Perché talmente veloce (1/10 s) che scambia pochissimo calore → Si può considerare adiabatico
  → Aumento di T può causare aumento di grano

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 340

## Vickers

- Piramide di diamante → più dura
  → misura di impronta è più precisa
  → Geometria rimane uguale a diverse profondità
  → Variazioni sono minime con diverse profondità → valore non cambia con il carico
  → Pesi possono essere variabili
  → Impronta più piccola
    → Meno invasiva

$$HV = \frac{P}{S}$$

136° → direzioni di piani di scorrimento favorevoli

- Può essere usato anche per prove di microdurezza → impronta piccola
  → Risultati diversi
  → Possono finire su grani di ferrite o cementite o altri
  → di solito media dei valori

**Rockwell** → In 2 tempi → Carico → Pre-carico
→ Penetratore a cono o a sfera
→ Indicazione di durezza è solo funz. di penetrazione della punta nel materiale

**Knoop** → MICRODUREZZA
→ Penetratore: piramide di diamante (a forma allungata)
→ Per materiali fragili e provini piccoli/sottili

Confronto tra scale

| HV e HB | | Mohs (usata dai geologi) |
|---|---|---|
| | 3000 | |
| Carburo di tantalio | 10 | Diamante |
| | 2000 | |
| | 9 | Corindone |
| Vetri policristallini | 1000 | 8 Topazio |
| | 500 | 7 Quarzo |
| Titanio | 300 | 6 Feldspato |
| ⋮ | | ⋮ |
| | 20 | 1 Talco |
| Leghe di piombo | 10 | |
| Piombo | | |

→ Usate per simulare a freddo stampaggio a caldo di acciaio

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 340

Per processo tecnologico

$R_S$, $R_m$, $\varepsilon_{rottura}$ → VALORI INUTILI

(Punti imp. di prova di trazione)

**Tensioni**

- nominali : $\sigma_n = \frac{F}{S_0}$ → Sezione iniziale → Diversità trascurabili
- Reali : $\sigma = \frac{F}{S}$ → sezione reale durante allungamento

**Deformazione**

- nominale $e = \frac{\Delta l}{l_0}$ → lungh. iniziale
- infinitesima $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$ → a lungh. che provino ha in quel momento

↓

$\boxed{\text{naturale}}$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l} d\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

(per piccole dimens.) $\frac{l}{l_0} \approx 1$

sviluppo in serie al 1° ordine $\frac{\Delta l}{l_0}$

Dà stessi risultati in trazione e compressione

(Con def. nominale
- In traz — fino oltre 100 %
- In compress. — massimo 100 %
)

Non è additiva

Def. naturale → ADDITIVA

$l_0 \to l_1 + l_1 \to l_2$

$$\varepsilon = \ln\frac{l_1}{l_0} + \ln\frac{l_2}{l_1} = \ln\frac{l_2}{l_0}$$ → Con 2 passaggi o con solo 1 passaggio è lo stesso

$\downarrow =$

$l_0 \to l_2$ $\quad \varepsilon = \ln\frac{l_2}{l_0}$

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{l_1^2 - 2l_0l_1 + l_2l_0}{l_0 l_1}$$

$\downarrow \neq$

$l_0 \to l_2$ $\quad e = \frac{l_2 - l_0}{l_0}$

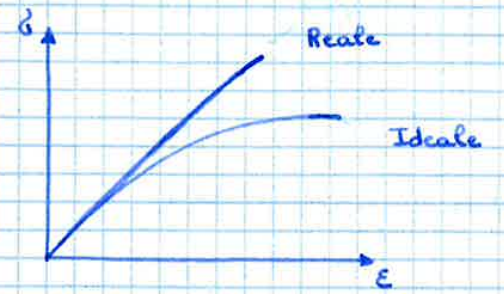
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 340

## Def. reale da def. nominale

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1+e)$$

$$e = \frac{l}{l_0} - 1 \longrightarrow \frac{l}{l_0} = 1+e$$




**In trazione**

$\varepsilon \approx e$ per piccole def.

$\varepsilon < e$ per grandi deformazioni

$e = 100\% = 1$

↳ $\varepsilon \cong 0{,}7$

**In compressione**

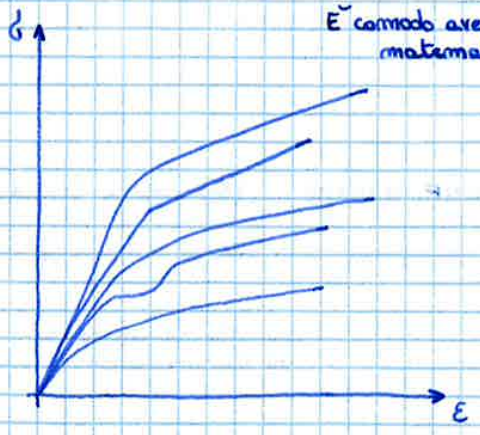
$e = -100\% = -1$

↳ $\varepsilon \cong -\infty$

$e = -0{,}5$

↳ $\varepsilon \cong -0{,}7$

Grafico tensione-deformazione




È comodo avere legge matematica che sintetizzi grafico

↳ legge di Hollomon (o power law)

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

per piccole deformazioni è molto diversa da curva di trazione

per grandi deformazioni sono indistinguibili (oltre il 5%)

K = coefficiente di forza

n = coeff. di incrudimento

↳ aumento di resist. ad aumentare di deformazione

Campo elastico
$n = 1$
↳ Lineare

Ad alta T
$n = 0$ per ricristallizz.
↳ $\sigma = K$

Campo plastico
$n < 1$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 340

Prova di trazione

→ Va fatta ad una certa velocità

→ Anche T influisce → Spesso non si hanno curve precise

→ Curva si abbassa ad aumentare di T → diminuisce il modulo elastico e le tensioni di snervamento e di rottura

→ da 1100 - 1200 °C → Curve sono delle rette costanti

→ Ad alte T aumenta duttilità e tenacità

- Si riduce resistenza
- Diminuisce incrudimento → a volte anche minore di 0
  → Aumenta allungamento

Ad alte T

→ tensione di rottura e di snervamento coincidono

→ I materiali diventano simili

(I leganti funzionano solo a T "basse")

→ Come se fossero tutti austenitici

## Effetto di Velocità di deformazione

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dl}{l} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l} = \frac{v}{l}$$

$v$ → velocità con cui si sposta braccio di macchina

di solito $\dot{\varepsilon} = \frac{1}{100} s^{-1}$ → difficile creare sistemi idraulici che funzionino velocemente

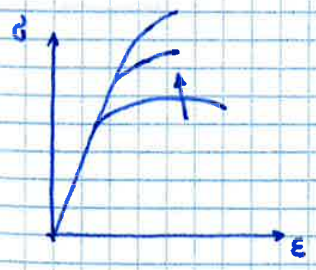
→ Non esistono macchine con queste velocità

→ prova di trazione non va bene in ambito tecnologico

Stampaggio → $1000\ s^{-1}$

Trafilatura → $10000\ s^{-1}$

Formatura a esplosivo → $1000000\ s^{-1}$




Legge (effetto di v di deformazione su resistenza dei materiali)

$$\sigma = C \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

$C$ → Fattore di resistenza

Anche per mat. rigido-plastico ideale

$\sigma = Y$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 340

## CONDIZIONE DI INSTABILITÀ

Aumento di resistenza (incrudimento) → Se prevale → F cresce (resistente)

vs

Diminuz. di sezione (strizione) → Se prevale → F diminuisce (resistente) → Incrudimento non compensa più la diminuzione di sezione

→ In zona di strizione si concentrano tutte le ulteriori deformazioni

$$F = \sigma \cdot S$$

Condizione di instabilità $\boxed{F_{max}}$ quando $\frac{dF}{d\varepsilon} = 0$

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} S + \frac{dS}{d\varepsilon} \cdot \sigma = 0$$

$$S \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} + \sigma \frac{dS}{S\, d\varepsilon} \right) = 0$$

Conservaz. del volume $l \cdot S = cost.$

$$\ln(l \cdot S) = \ln(cost.)$$

DERIVATA

$$\frac{dl}{l} + \frac{dS}{S} = 0 \longrightarrow \frac{dl}{l} = -\frac{dS}{S}$$

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} = -\frac{dS}{S}$$

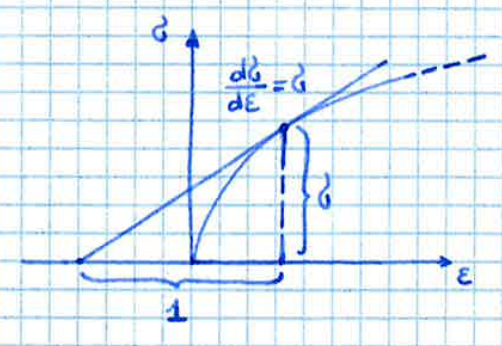
$$S \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma \frac{dS}{S} \frac{S}{dS} \right) = 0$$

$$\downarrow$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma$$

Punto in cui mat. raggiunge instabilità

→ Per riconoscerne su curva reale INSTABILITÀ




© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 340

# MECCANICA DEI MATERIALI

Meccanica di un corpo deformabile

↓

Leggi costitutive

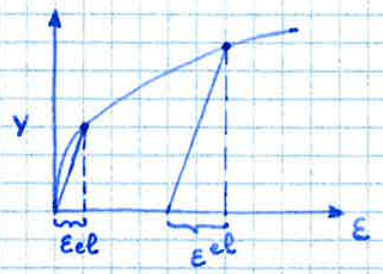
↓

Relazioni tensioni - deformazioni

Deformazione totale

$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}$

→ Fenomeni indipendenti tra loro




In def. plastica

↳ Aumenta anche def. elastica (distanza interatomica)

Legge di Hollomon

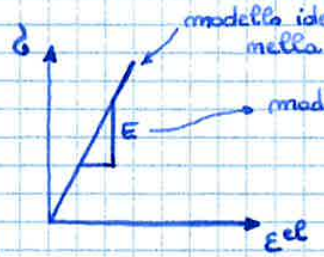
$\sigma = K \cdot \varepsilon^{n}$

↓ $\varepsilon^{pl}$ valida in campo plastico

In campo elastico → Deformazione reversibile e linearmente proporzionale a tensione

Legge di Hooke

$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

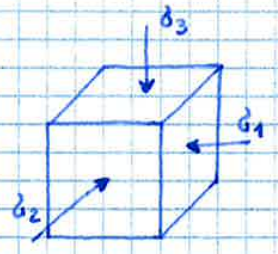



modello ideale di caratteristica di un materiale nella zona elastica

→ modulo di elasticità (di Young)

Acciai
$E = 210\ GPa$

$G = 10^9$




Analisi triassiale delle tensioni

↓

Tensore delle tensioni

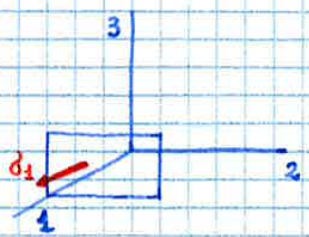
Ci mettiamo in Sistema di riferimento principale

↓ Sole Tensioni normali → in piani perpendicolari a direz. principali

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

$\bar{\bar{\sigma}} = \sigma_{ij} \quad i = 1, \dots, 3 \ , \ j = 1, \dots, 3$




© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 340

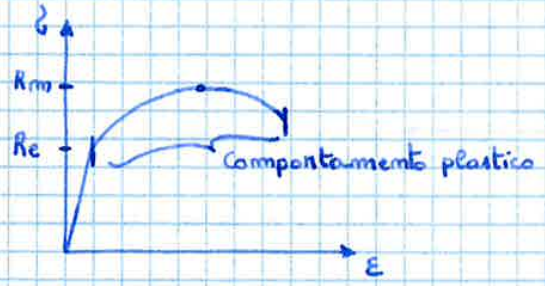
## Legge di Hooke (per tensioni triassiali)

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{E}\left[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)\right] \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{E}\left[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)\right] \\ \varepsilon_3 = \frac{1}{E}\left[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)\right] \end{cases}$$

Coeff. di Poisson → Peso di diminuzione laterale (strizione)

→ È circa 0,3 negli acciai

## COMPORTAMENTO PLASTICO



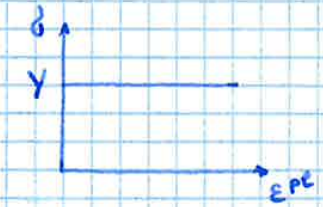

**Materiali rigido - plastici**

- Volume costante
- Non c'è più dipendenza di ε da σ (in campo plastico)
- ε è permanente (ha memoria)

→ $\varepsilon = f(\sigma)$ elastico

→ $\varepsilon = f(\varepsilon_0)$ plastico

↳ dipende da quanto è stato def. prima




$$\varepsilon = \varepsilon_0 + d\varepsilon$$

↓

ε diventa una variabile di stato

Tensione è costante, deformaz. tot. si distribuisce sulle tre direz. principali

↓

Ma direzione in cui si applica tensione

↳ Dice in che direzione si deforma il provino

Def. plastica → A Volume costante → Solo una parte di tensioni

↳ Tolgo $\sigma_m$ perché non influisce → Varia solo il volume

**Tensioni deviatoniche**

Responsabili di deformazione plastica

$$\begin{cases} S_1 = \sigma_1 - \sigma_m \\ S_2 = \sigma_2 - \sigma_m \\ S_3 = \sigma_3 - \sigma_m \end{cases}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 340

Quando direzione di tensione non varia

↓ posso scrivere

$\dot{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon$ : $\varepsilon_1 = H \cdot \left(\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\right)$

Integrata nel tempo

Altrimenti non si può fare

↓

Caso generale

Prova di trazione

Limite di snervamento → Oltre esso il materiale inizia a deformarsi plasticam.

Si può assumere che dipenda solo da stato di tensione applicato al corpo (dopo aver definito materiale)

↓

A sua volta dipende da applicazione di forze (sollecitazioni)

- Occorre trovare relazione univoca tra stato tensionale e il limite di snervamento

⇓

Criterio di snervamento (di PLASTICITÀ) → Affinché deformazione plastica continui

↳ Valido per tutto il campo plastico

→ Non aumenta def plastica se $\sigma$ non sorpassa un certo valore

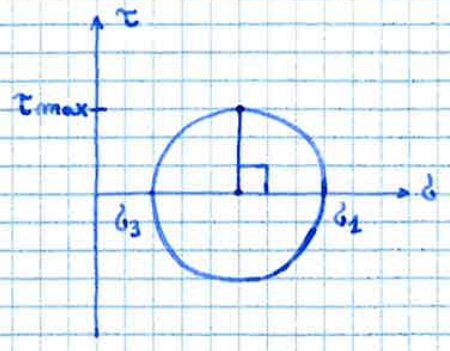
Criterio di Tresca (tensione tang. max)

$\sigma_1 - \sigma_3 = Y$

Mat. si deforma plasticamente quando $\tau_{max}$ sorpassa un certo valore

↳ TENSIONE MONOASSIALE DI SNERVAMENTO A TAGLIO K

In piano 1-3 → Cerchio più grande




$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ (Raggio del cerchio di Mohr)

$\tau_{max} \geq \frac{Y}{2}$

$\left(K = \frac{Y}{2}\right)$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 340

## Tensione equivalente

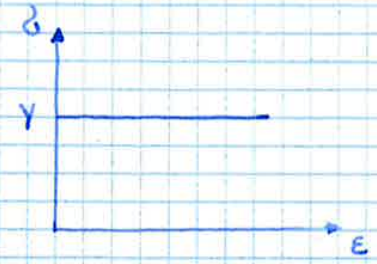
da situazione generale
a
un solo valore → uniassiale
equivalente

$$(\sigma_1-\sigma_2)^2+\ldots=2Y^2=2\sigma_{eq}^2$$

Ottengo

$\boxed{\sigma_{eq} \text{ coincide con } Y}$

$$\sigma_{eq}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}$$




$\sigma_{eq}$ variabile
$Y$ costante → Quando $\sigma_{eq}=Y$ → Deformazione plastica

Per qualsiasi stato di tensione

## Deformazione equivalente

$$L=\int S_1\,d\varepsilon_1+S_2\,d\varepsilon_2+S_3\,d\varepsilon_3$$

↓

$$L=\sigma_{eq}\cdot d\varepsilon_{eq}$$

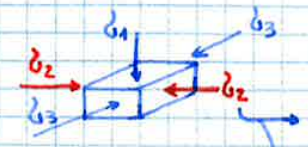
→ moltiplicato per $\sigma_{eq}$ dà lavoro di deformazione plastica

$$\varepsilon_{eq}=\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 340

• Deformazione piana




$\varepsilon_2 = 0 \rightarrow \sigma_2 \neq 0$

Per impedire che materiale si deformi in direzione 2 (Ad esempio in uno stampo)

È una REAZIONE VINCOLARE

Se $\sigma_1$ e $\sigma_3 = 0 \rightarrow \sigma_2 = 0$

Valore di $\sigma_2$ non è dato a priori ma varia per bilanciare sempre $\sigma_1$ e $\sigma_3$

<u>Tresca</u> $\sigma_1 - \sigma_3 = Y$ → Vale solo per alcuni materiali non metallici e duttili

→ È più semplice da calcolare

<u>Von Mises</u>

$$\varepsilon_2 \propto \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) = 0$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) = \sigma_m$$

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

$$\left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\right]^2 + \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\right]^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2Y^2$$

$$\frac{3}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2Y^2$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \approx 1{,}15\, Y$$

Criterio giusto per metalli (acciai)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 340

Tensione media

$$\bar{Y} = \frac{1}{\varepsilon_{fin}} \int_0^{\varepsilon_{fin}} \sigma_{eq} \cdot d\varepsilon_{eq}$$

Nel caso di legge esponenziale

$$\sigma_{eq} = C \cdot \varepsilon_{eq}^{n}$$

$$\boxed{\bar{Y} = C \cdot \frac{\varepsilon_{fin}^{n}}{n+1}}$$

Limite di plasticità media

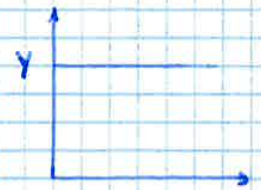
Si può usare come COSTANTE

Perché in teoria limite si alza in curva di def. plastica

Formula del lavoro a tensione media di deformazione

$$\boxed{L = V \cdot \bar{Y} \cdot \varepsilon}$$

Se c'è mat. con incrudimento




$Y = 600$ MPa costante

Se mat. rigido - plastico ideale

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 340

Von Mises

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \dots}$$

Quando $\sigma_{eq} = Y$ → Si passa in campo plastico

Deformazione piana

(Tresca)

$\sigma_1 - \sigma_3 = Y$

$\varepsilon_2 = 0$

$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$

$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = Y$

V.M. $\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y = Y'$

Tensioni assialsimmetriche

$\sigma_r = \sigma_c$

T = V.M. → $\sigma_1 - \sigma_3 = Y$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 340

Scopo di prove → garantire con un certo livello di confidenza l'assenza del difetto dal pezzo

Falsi positivi → Solo ricaduta economica

Falsi negativi → Ricaduta pesante se si rompe in uso

→ Ogni PND deve permettere identificazione dei difetti pericolosi trascurando quelli accettabili

Applicazione di PND

- Collaudi di accettazione : Controlli di qualità sui semilavorati presso i fornitori o all'arrivo in magazzino (Liquidi penetranti e ultrasuoni)
- Controlli in processo : - Sostituiscono i collaudi finali
  - Controlli automatici
- Controlli in servizio : Controlli effettuati durante la vita della macchina, in funzionamento o in manutenzione (industria nucleare)
  ↓ Ad esempio in zone critiche di aerei

## Prova a liquidi penetranti

- Costa poco
- Ma è LENTA → Non usata in industria di auto e componenti meccanici

Analizza difetti su superficie del pezzo

↓ liquido poco viscoso → con tensione superficiale → Per capillarità viene attirato in difetti e discontinuità

Se liquido è colorato si notano difetti prima invisibili ad occhio nudo

In fusione → Materiale si ritira

↳ le due sup. interne si allontanano
↓ Si genera cricca

- Si pulisce superficie
- Si applica liquido penetrante su superficie
- Si rimuove da superficie non difettata
- Si mette Agente evidenziante (Assorbente)
  ↳ Spesso compreso in soluzione (sospensione) in liquidi penetranti

(Evidenzia) ← Colora il liquido restante

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 340

# MAGNETOSCOPIA

Rileva difetti → Superficiali
→ Sub-superficiali

Molto sensibile e veloce → fino a 4÷5 mm di profondità

Solo su pezzi ferromagnetici è applicabile

} Molto usata per auto / componenti meccanici

Proprietà fisica:

Permeabilità magnetica → Ferromagnetici molto ALTA
→ Aria ce l'ha molto BASSA

↓

aria in croce devia le linee di flusso in superficie
→ Generato in modo che si chiuda all'interno del pezzo

Dalla loro distribuzione si deduce la presenza di difetti ← Evidenziato con particelle magnetiche → Brillano dove sono distante / attratte

↓

Linee di flusso deviate anche a distanza da difetto

↓

Proprietà fluorescenti → illuminate

→ Rileva difetti anche se sono di poco sotto-superfic.

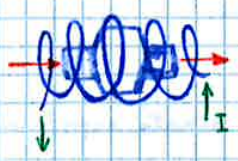
Difettosità sotto pelle

Se difetto è molto sub-superficiale o è allineato a linee di flusso

↓

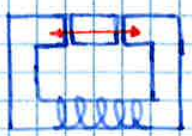
NON RILEVABILE

Per creare flusso sul pezzo
→ Induzione magnetica circolare




Cavo elettrico in cui passa corrente
→ Crea campo magnetico

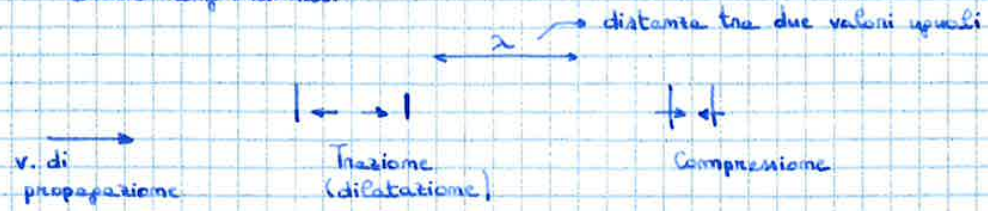
Oppure si può chiudere circuito
→ facendo AVVOLGIMENTO MAGNETICO



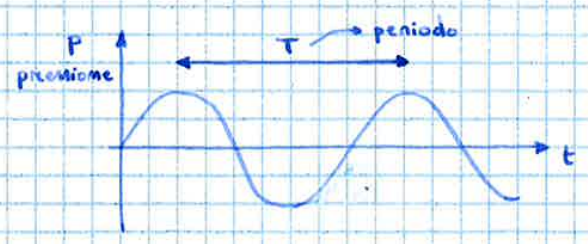
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 340

Onde longitudinali




Concentrandosi su un punto




distanza di t tra due valori uguali di onda

Andam. sinusoidale
↳ Andam. reale può essere visto come somma di funzioni sinusoidali

Frequenza $f = \frac{1}{T}$ oscillazioni in un secondo

Lunghezza d'onda $\lambda = x(t+T) - x(t)$

Andam. periodico
↳ $y(t+T) = y(T)$

Velocità $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

Impedenza acustica $Z = \rho \cdot v$

| | $\rho$ (t/m³) | v (m/s) | Z (s·t/m²) |
|---|---|---|---|
| Acciaio | 7,8 | 5,85 | 45000 |
| Acqua | 1,0 | 1,48 | 1480 |

Grossa differenza

In passaggio tra acciaio e aria
↓ Z varia molto
↓ fenomeno di RIFLESSIONE
Onda riflessa se superficie che riflette ha dimensioni paragonabili a lunghezza d'onda
↓
Onde acustiche normali hanno λ troppo alta
↳ 20 Hz → λ ≅ 10 m

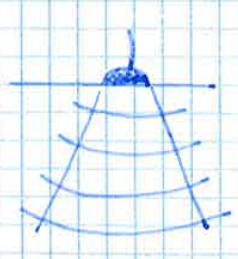
Ultrasuoni
↳ 2 MHz → $\lambda \cong \frac{1}{1000}$ mm

v di trasmissione è costante

$v = \lambda \cdot f = cost.$
↳ λ piccola → f grande

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 340

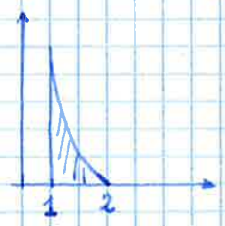
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 340

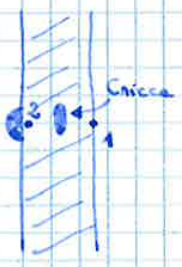


Svantaggi

1. Non si può usare per pezzi troppo spessi
   ↓ Onda si attenua troppo

2. Coda di impulso




Se cricca è compresa in emissione di onda
↓ Non rilevata

Cricche in primi millimetri sono mascherate da coda di onda emessa

Vantaggi

Può rilevare:

- Grado di omogeneità
- Presenza di vuoti / fessure
- Entità di discontinuità
- Localizzaz. di zone alterate
- Variazioni di propr. dei materiali nel tempo
- Stima del valore di E
- Stima di resistenza del materiale

## Tecnica RADIOGRAFICA

Rilevamento su pellicola di variazione di attenuazione che un fascio a raggi X (Frequenze ALTE) subisce in funzione degli spessori attraversati

- Discontinuità sono zone annerite

- Per spessori maggiori (fino 150 mm) si usano i raggi γ → con esposizione panoramica
  ↓ Per oltre 10 cm → Si usano acceleratori lineari

- Si possono rilevare difetti dell'ordine di 1 ÷ 2 % dello spessore del pezzo

Per spessori piccoli non si apprezza variazione di attenuazione
↳ Per sensibilità maggiori si usa il metodo ad ultrasuoni

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 340

Sommario

PND → Hanno una affidabilità dichiarata

→ Non alterano i pezzi

→ Forniscono indicazioni indirette sulla salute del pezzo

↳ Ma occorre esperienza per distinguere i difetti dagli artefatti

→ Bisogna bilanciarne uso per non far lievitare i costi

MODULO B:

Processi di FORMATURA

## La produzione industriale

Minerali —Altoforno→ Ghisa —Forno elettrico→ Acciaio → Colata continua

Acciaio → Colata in lingottiera → LINGOTTI

Acciaio → Semilavorati

Semilavorati → In laminatoi (a caldo) di solito

Semilavorati → Semiprodotti a sezione (Spessi) □ ▭ ○ (quad., rett., circolare) → Billette, Blumi, Bramme

Semiprodotti → Sottili → Slabs, Piatti

In laminatoi → Lavorazioni a caldo
- Lamiere, Nastri → Coil
- Barre (Sono billette più piccole)
- Profilati

Semilavorati → Lavorazioni a freddo (Laminazioni) → Fogli, Fili metallici

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 340

# IL PROCESSO DI FUSIONE

Verso materiale allo stato liquido in FORMA ("Mold") (Contenitore)

↓

Lo Faccio solidificare → Ottengo il GETTO

↓

Estraggo

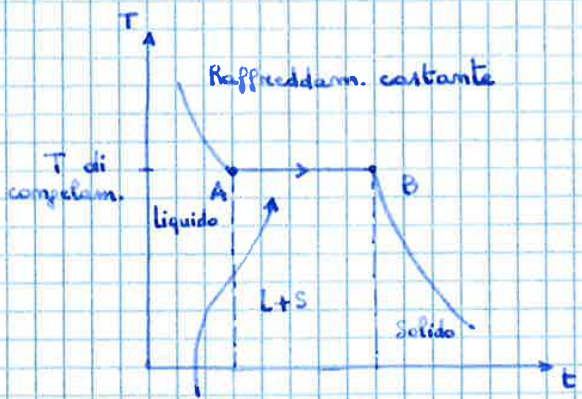
↓

Abbiamo formato il materiale → Dato forma di stampo

Ha **Molti problemi** → Nonostante sia il più economico non usato molto sovente

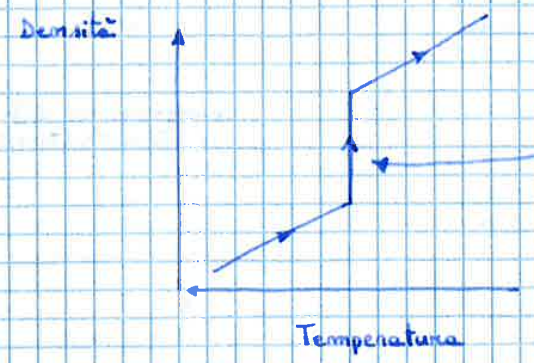
## 1° PROBLEMA: Ritiro

Metallo puro




AB: materiale ha cambiato STATO

Ci sono 2 fasi → T devono essere costanti → Per Regola delle fasi di Gibbs




A T costante → Grosso aumento di densità in solidificaz.

↓

diminuisce molto di dimensioni → RITIRO

→ Solo GETTO

Perché la FORMA è sempre solida → Non cambia di molto dimensioni

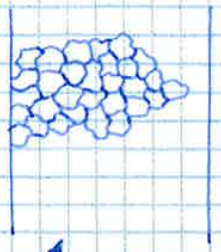
E sente anche T inferiori

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 340

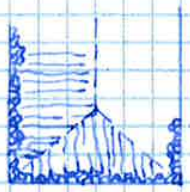
## Solidificazione uniforme

- Germi di nucleazione
  ↓
  Accrescimento finché i grani non si toccano

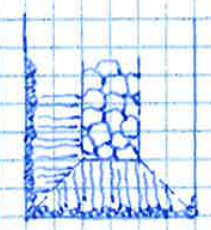


- Se hanno tempo per crescere
  ↳ Diventano Sferici
  ↳ Struttura equiassiale con grani grossi e uniformi

- Se recipiente ha pareti fredde (come di solito è)
  ↓
  Solidifica velocemente in superficie
  ↳ Tantissimi germi che non hanno tempo di crescere



Calore fluisce perpendicolarmente alle pareti
↓
Grani successivi crescono in direzione perpendicolare alle pareti
↳ Strutture colonnari
↳ Grani stretti e allungati



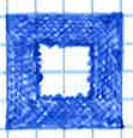
In realtà
↳ Pareti influenzano solo zone vicine → struttura colonnare
↓
Nel cuore del pezzo grani grossi ed equiassiali
↳ Solidificano normalmente

Come evolve solidificazione dopo la colata

Strutture colonnari → A DENDRITI → Se raffreddamento è lento → con forma di TERRA si ottiene

↳ Tendenza a intrappolare porosità e bolle d'aria o gas → NEGATIVO

Solo se la lega è BIFASICA



- Se la solidificazione è veloce o la fase uniforme → forma di ACCIAIO
  ↳ Non si formano dendriti
  ↳ PIÙ UNIFORME

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 340

## Materiale del getto

- Buona colabilità → poco viscoso
  altrimenti può non raggiungere delle zone
- Bassa temperatura di fusione (1600°C)
- Capacità di solidificare in maniera omogenea
- Assenza di difetti nei getti → Bolle / Porosità

## Forma

- Transitoria → Dopo una colata si rompe / sbriciola per estrarre pezzo
- Permanente → A conchiglia
  - → Molto costosa da produrre
    - → Se devo formare pochi pezzi non conviene
      - → conviene usare forma transitoria
  - → Riutilizzabile

## Modello

→ Intorno a cui far indurire la forma (terra di fonderia)

- → Legno → duro e poco igroscopico
- → Resina (materie plastiche)
- → leghe metalliche in bronzo, leghe leggere, ghise, acciai

Divisa in 2 → per togliere modello

↓

Spesso anche modello è diviso in 2

↓

Placca di centratura → con riferimenti per centrare i due semimodelli in modo perfetto

## Anima

→ Impedisce a metallo fuso di riempire cavità

→ Si possono creare pezzi forati

## Greggio di fusione

→ Prodotto finito di fusione

↓

a meno di un sovrametallo → È più grosso di prodotto finito

↓

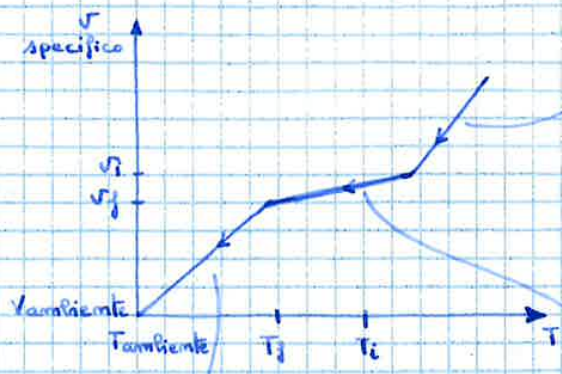
A fine fusione superfici sono troppo poco precise

→ Lavorazioni ad asportazione per migliorare superfici

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 340

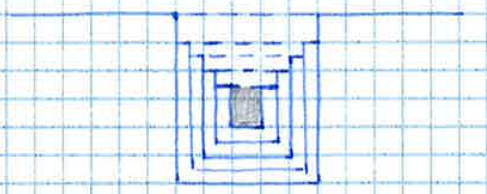
Fenomeno del ritiro




Ritiro in fase liquida
↓
Si abbassa livello
↓
No problemi

Ritiro in fase solida:
Tutto il solido cambia dimensioni contemporaneamente

Ritiro solo dove sta solidificando in quel momento



Man mano che uno strato solidifica
↓
Altezza minore di livello di liquido
↘
Solido ha altezza minore

Se processo avviene continuamente
→ CONO DI RITIRO
↓
oppure cavità interna di ritiro

MATEROZZA → "Collegata" tramite collare d'attacco

- Serbatoio di metallo che alimenta continuamente il getto
  - → Solidifica per ultima → Avrà cono di ritiro
    - ↓ Parte sacrificabile
    - ↓ Poi si taglia materozza
    - ↓ "Smaterozzatura"
  - ↓ Funzione: compensare la variazione di volume dovuta al ritiro globale del getto in fase di solidificazione
    - → Evita formazione di cavità di ritiro all'interno del getto

Può essere → A cielo aperto → Contatto costante con Patm
→ Affiora in parte sup. di forma

→ Cieca → In zone del getto difficilmente raggiungibili

Punta in terra di fonderia rallenta la solidificazione della zona

Totalmente immersa nella forma

Gli deve arrivare aria per non andare in depressione
→ a contatto con Patm

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 340

Cubo → $M = \frac{l}{6}$

Sfera → $M = \frac{d}{6}$ → Ma per creare stesso volume
↓ Sfera ha un d maggiore

Progetto sistemi di colata in modo che avvenga
↓ SOLIDIFICAZIONE DIREZIONALE

Parti con modulo di raffreddamento sempre più grande (Almeno del 10%)
↳ Man mano che ci si avvicina a materozza
↓ ultima
↓ In modo che solidificazione segua direzione

- A volte Pezzo un po' diverso da quello richiesto da progettista
↓
Altrimenti → Più di una materozza
↓ diverse direzioni di solidificazione
→ Sistemi di raffreddamento di alcune zone
↳ Accelerano normale raffreddamento

Si può simulare solidificazione
↓
Ma spesso si approssima considerando solo i moduli di raffreddamento

Materozza per solidificare per ultima
↳ deve avere $M \approx M_{pezzo}(1+20\%)$

PIANO DI DIVISIONE
↳ Per estrarre modello
↳ Associato a SIST. DI COLATA → deve garantire impresso di mat. fluido il più veloce possibile
↳ Se no solidifica
→ Ma il fluido non deve entrare in MOTO TURBOLENTO
↓ Sgretolerebbe la FORMA
↓ Parti inglobate in metallo
Im più cattura dell'aria
→ Si ottiene con tanti ripagnoli che arrivano in zone diverse
Divisione in tanti piccoli condotti
↓ Si ottiene G elevata e v bassa

Deve minimizzare i sottosquadri

Pezzi tra le due semiforme hanno uno sfrido

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 340

# PRINCIPI BASE

- **Legge di Bernoulli** → Principio di conservaz. dell'energia

$$h + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = k$$

costante in funzione del livello di energia del fluido

- $h$ → Ene. potenziale → Altezza del punto di colata
- $\frac{P}{\rho g}$ → $\frac{\text{Pressione}}{\text{Densità} \cdot g}$ del fluido
- $\frac{v^2}{2g}$ → Ene. cinetica → velocità di colata

- Cambiando $h$
  - → Aumenta $v$ o $p$ → Se non è pressurizzato
    - ↓ Solo $v$ aumenta
- Per diminuzione di sezione sia $v$ che $p$ crescono → perché pressurizzato

- **Legge di continuità della portata**

Portata volumica $Q$ ($m^3/s$)

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

→ Se diminuisce sezione → $v$ deve aumentare → Se sezioni sono a stessa quota → $p$ diminuisce

- **Regime di flusso** → Per dire se il moto è turbolento o meno
  - → $Re = \frac{v D \rho}{\eta}$ Numero di Reynolds
  - ↓ Se $Re \geq 2000$ Turbolento

Anche se in sistemi di colata il moto non è uniforme → Contento
↓ Non riusciamo ad usarlo

- **Principio di Archimede**
  - → Frammenti di Terra di fonderia che si staccano da forma
    - ↓ Tendono a galleggiare
  - → Forma è spinta verso l'alto (Parte superiore)
    - ↓ Spinte metallostatiche

densità minore del metallo $\approx 2\ kg/dm^3$

Acciaio: $7\ kg/dm^3$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 340

Processo (Forme transitorie)

- Disegno del pezzo
  - ↓ Si deve costruire il MODELLO (Diviso in 2 semimodelli)
    - → Pareti fatte con angolo di sformo
    - ↓ Più grande: per fenomeno del ritiro
    - ↓ Spigoli vivi arrotondati
      - → Per moto non turbolento
    - ↓ Sporgente per realizz. portate d'anima

- Montato su placca modello
  - ↓ Messa la prima staffa
    - → Riempita con terra di fonderia
      - ↓ Da compattare (pigiare)
        - → VIBROCOMPRESSIONE

- Si capovolge prima staffa e Allo stesso modo si monta seconda semiforma (Staffa)
  - ↓ Mettendo su semi modello componenti (canale di colata, materozza)
    - ↓ Riempio la (seconda) staffa compattandola
      - ↓ Apro le staffe e tolgo il modello (DISTAFFATURA)
        - ↓ Su cui si era spruzzata una polvere distaccante
          - ↓ Per non portare via terra in estrazione

- Preparazione delle anime
  - ↓ Modello di anima: CASSA D'ANIMA

- Si posiziona anima in forma

PROCESSO DI FUSIONE
- → Si fonde il metallo in forno
- → Colata nella forma attraverso un sistema di colata

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 340

Come eseguiti processi di fusione in azienda

- Forma transitoria → In terra — Prezzo fino bassissimo → Piccole serie
- Forma permanente → In metallo
  Stampi molto costosi → Grandi serie

FORMA TRANSITORIA

Molto antica
↓
Evoluzione della formatura in terra

migliorata → qualità dei getti
→ economicità dei procedimenti
→ controllo → materiale più puro, più uniforme
→ Più preciso

Terra di fonderia → grasse (argilla > 18 %)
→ semigrasse (8 % < argilla < 18 %)
→ magre (argilla < 8 %)
→ Naturale
→ Sintetica — miscela controllata di materiali refrattari (sabbie)
→ (Sabbie mescolate a silicati e altro)
↓ Non fondono ad alte T (di solito 2000 °C)

Formata da
- SILICE granulare (Refrattario)
- Legante → Pertenere insieme forma (coesione)
  - ARGILLOIDE → Con compressione meccanica
  - RESINE FENOLICHE → Con riscaldamento
  
  → metodi differenti di solidific. della forma
- Additivi → Sost. distaccante di solito → per estrarre modello
  ↓ Grafite
  → Correggono caratteristiche del materiale da fonderia

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 340

**Processo di formatura in terra sintetica** (indurim. MECCANICO) → Formatura con staffe meccanizzata

Anche Per pezzi enormi → No limiti dimensionali

↓

Si scava una fossa in fonderia

↓

COLATA in FOSSA

In base a dimensione di staffe

• Qualità di superfici basse → Servono grani grossi per permeabilità

E anche dettagli non realizzabili

↳ Pezzi grossolani

- Legante → BETONITE → 10 % : formatura a verde (senza essiccazione)
  → 4 % : formatura a secco
- Additivi < 2 % della terra → Amido / Farina di cereali / Peci polverizzate

**Processo al $CO_2$** (indurim. CHIMICO)

- Indurente : Anidride carbonica (gassosa) → Non inquinante

↓

Ma la terra non è riutilizzabile come in indurim. meccanico

↓

riutilizzab. al 100 %

- Legante : Silicato di sodio (vetro solubile)

- Precisione molto superiore a metodi meccanici
- Processo automatizzabile facilmente

- Additivi : resine ureiche e fenoliche

SHELL MOLDING (Fusione in guscio sottile)

Grani molto piccoli → Forma ROBUSTA

↓

sottile e molto dettagliata

MODELLO in acciaio

↳ Costa MOLTO

↓

Lo ricopro con un coperchio

↓

- Modello riscaldato a 300°C (con corrente elettrica)

↓

- Inietto tra coperchio e modello terra di fonderia con resina fenolica come legante

↓

In pressione → Riempie tutte cavità e dettagli → E poi si solidifica

↓

modello non si danneggia perché in acciaio

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 340

Caratteristiche

- Ritiro della cera e della lega → Devo tenerne conto in dimensionamento
  ↳ Doppio ritiro
- Non adatto a grosse dimensioni
  ↳ Ordine del Kg (max 5 Kg)
- Per produrre modello in cera
  ↓ STAMPO IN ACCIAIO → Lungo e costoso → Adatto per piccola e media serie
- Si ottiene una precisione ottima e finitura superficiale ottima
- Colate con qualsiasi tipo di lega

Metodo POLICAST → Rapido e poco costoso

Modello in polistirolo → Versato sulla metallo fuso
↓
A contatto con metallo il polistirolo evapora

Precisione inferiore
↳ Perché polistirolo può includersi in metallo e anche superfici sono meno precise

(Pezzi spesso fatti per strati)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 340

Ma per gravità
DALL'ALTO [1]
↓
I primi schizzi battendo contro metallo solidificano subito (prima di altro materiale che arriva dopo)
↳ Creano difetti nel getto
↓
Soluzione: Si fa entrare dolcemente inclinando la forma
↓
CON BASCULAMENTO

- Colata in sorgente [2] → È quella che dà meno problemi
  ↓
  Si fa salire dal basso il metallo fuso
- Fondo è ultimo a solidificare

Oppure Colata Laterale [3]

Se voglio perdere meno tempo possibile (Con gravità 1 min.) ci vuole circa

PRESSOFUSIONE
↓
- In Pressione → da 0,7 a 700 MPa
  → Ci mette poco
  → Sicuro di riempire tutti gli spazi

(PRESSO COLATA)
↓
Macchina enorme → Stampo mobile + stampo fisso → Per ridurre tempi di lavorazione
↓ Permettono rapida rimozione del getto
↳ Molta energia per tenere chiusi gli stampi
↓ Grossa spinta metallo-statica
↓
Molto più grossa di forma normale

Iniezione — Sistema a Camera calda → Metallo tenuto fuso
→ Veloce ma solo per materiali molto fluo fondenti

Iniezione — Sistema A Camera Fredda → Mat. fuso e colato solo al momento in cui mi serve

Solidificazione rapida grazie ad un sistema refrigerante
↳ E poi getto estratto con un estrattore

Limiti

- Impossibilità di lavorare leghe del ferro (T di fusione troppo elevata)
- Consistente porosità del getto dovuta alle turbolenze durante l'iniezione del getto

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 340

Modulo C:

Processi di deformazione plastica

Processi — Sono moltissimi
- → Lavorazioni a caldo
- → Lavorazioni a freddo
- → Lavorazioni a semicaldo

A CALDO

Materiale scaldato prima di lavorazione
↓
a T < Tm poco → Acciaio ≈ 1100 - 1200 °C
- → Bassa resist. meccanica
- → Annullam. di incrudim.
- → dipende da velocità di deformaz. → Comp. Visco-plastico
- → Ricristallizzazione

Vantaggi:
- → Permette grosse deformazioni
- → Presse sono semplici → Realizzano forme complesse
- → Forze da applicare ridotte

Svantaggi
- → Materiale va scaldato → costa energia
  - → Lunghi tempi per scaldarlo → Bisogna farlo molto prima e dopo assicurarsi che macchina sia libera
- → Sicurezza — Pezzo a 1100 °C
  - → Problemi di trasporto all'interno di azienda
  - → Pezzi a 200 - 300 °C → Colore neutro (Sembrano freddi)
- → Con aumentare di T → Aumenta v di ossidazione → $Fe_2O_3$
  - → Patina fragile che si stacca → Si perde 1-2-3 % di materiale → dimensioni vanno maggiorate al 4-5 % non so quanto
- Max: Tolleranza di 1-2 mm ← Si ottiene una BASSA PRECISIONE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 340

A TIEPIDO (SEMI-CALDO)

(Warm)

≈ 800°C ≈ $\frac{T_m}{2}$

→ Buona precisione e finitura superficiale

→ Anche per grandi deformazioni

↳ Si portano al limite lavoraz. a freddo

↓ Aumenta deformabilità e diminuisce resistenza } → Ma senza arrivare a visco-plasticità

↓ materiale ha comportamento critico

Applicazioni
- Per semiassi di automobili
- o giunti a tulip → grossi e molto deformati

→ Pezzo non richiede ulteriori lavorazioni → (Come a freddo)

↳ dove non è richiesta specifica rugosità superficiale

V di ossidazione più lenta

↓

Ma comunque si cerca di lavorare in atmosfera riducente

↓ Forno attaccato a macchina (Amb. riducente)

↓ Stampato immediatamente uscito dal forno

↳ Non ha tempo per ossidarsi

Svantaggi

→ Conosciuti da pochi

→ Macchinari simili a stampaggio a freddo

→ Solo pezzi assialsimmetrici (non troppo complessi)

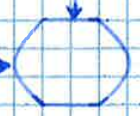
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 340

Barreling → Materiale subisce Deformaz. differenziale

↓ Zone morte (A contatto con stampi)

↓ Zone parecchio deformate (Al centro della "frotte")



→ Si creano tensioni di TRAZIONE su superfici laterali

↳ Si rompe facilmente (Anche se processo è di compressione)

Allineamento di piani cristallini → Struttura FIBROSA

↓ In deformazione

↓ Dà più resistenza

↓ Voluta

Con Barreling → Ma non sono dritte le fibre (Simile a buccia di cipolla)

↓ Fibre circondano sup. di pezzo

↓ Tensioni sono ⊥ → Più resistente

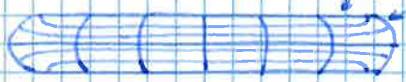
Con def. plastica

↳ Ottengo pezzo più resistente di tutti altri processi

Ma → Fibre → non uniformi

→ Tensioni e def. → non uniformi

↳ LAVORO RIDONDANTE entra in gioco



Comprimo

Allungato → TRAZIONE → pericoloso

Per calcolo di tensioni

→ Analisi ideale (approssimat.) → Senza barreling → metodo del lavoro uniforme

→ Si scrivono tutte eq. → Calcolo a elem. finiti

Via di mezzo → Calcolo a elementi sottili

↓ Piccola approssimazione

↓ Metodo usato anche in azienda

↳ per geometrie semplici (LAMINAZIONE)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 340

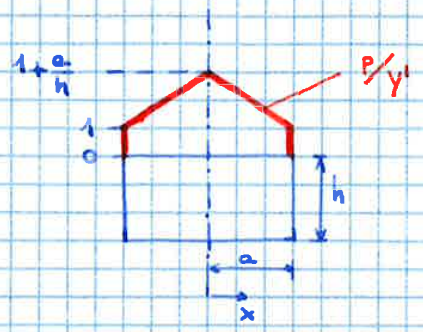
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 340

Attrito per adesione

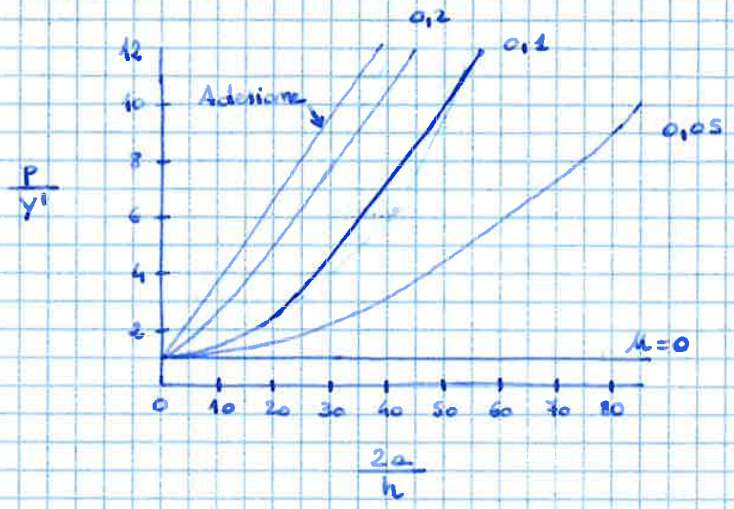
↓ Calcolo degli attriti

↳ È lineare → Una retta

$$P = Y'\left(1 + \frac{a-x}{h}\right)$$



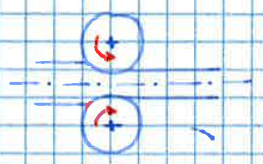

Effetto dell'attrito




© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 340

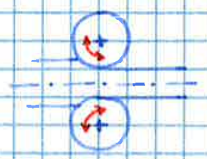
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 340

## LAMINATOIO A DUO SEMPLICE



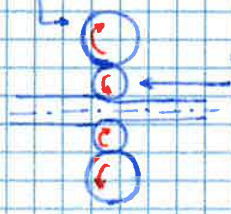
Usato a caldo di solito
↓
Fiamme necessaria

## LAMINATOIO A DUO REVERSIBILE



↳ Può invertire verso di laminazione

## LAMINATOIO A QUARTO




Molto usato — A Freddo

- Più rullo è piccolo → Meno forza impiegata
  ↓ MA
  Si deforma sotto azione di forza
  ↳ Si appoggia sopra un rullo più grosso per non far deformare il rullo più piccolo

## METODO SENDZIMIR

Per lamiere sottili (FOGLI)

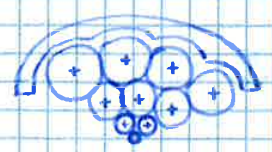
[Piatto - Lamiera - Foglio]

↓

Serie di rulli d'appoggio → per dar rigidezza
- rulli condotti
- rulli motore

- rulli di lavoro → Molto piccoli

Tutto in Gabbia di Laminazione



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 340

$\dot{V} = v \cdot A = v \cdot h \cdot w = cost.$

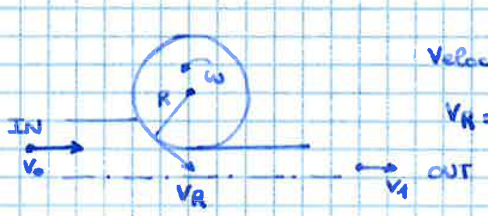
$v_0 h_0 \cdot \cancel{w_0} = v_1 \cdot h_1 \cdot \cancel{w_1}$

$\frac{v_1}{v_0} = \frac{h_0}{h_1}$ → Riducendo spessore di uscita
↓
v di uscita aumenta

Se $h_1 = \frac{h_0}{2}$

$v_1 = v_0 \cdot \frac{h_0}{h_1} = 2 v_0$

• Rulli ruotano a velocità costante ω



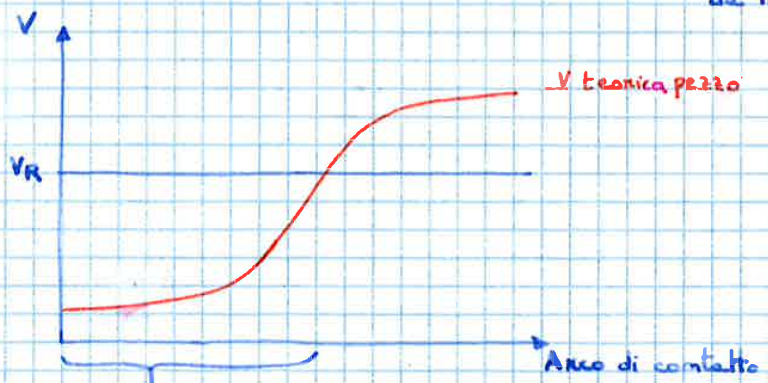

Velocità periferica di rullo

$v_R = R \cdot \omega$

PRECESSIONE → $P_R = \frac{v_1}{v_R}$ È circa 1,1 di solito

Rapporto tra v in uscita e v di rullo

v sono diverse → Materiale strisciera
→ v di materiale aumenta progressivamente da ingresso a uscita



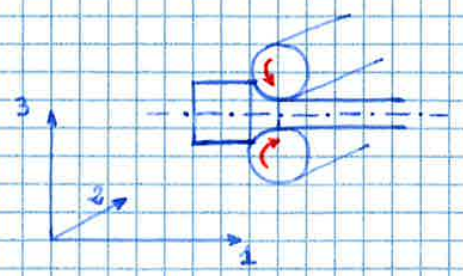

Rullo più veloce → Trascina materiale per attrito → Mat. acquista velocità per riduz. di spessore
In più

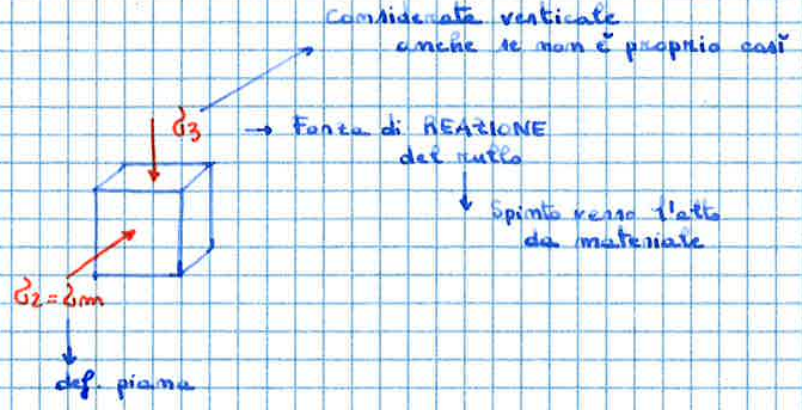
Dopo incrocio → Rullo frena il materiale
↓
Che però continua ad accelerare

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 340

## Dimensionamento energetico




Se non c'è attrito → $\sigma_1 = 0$

Caso SENZA ATTRITO

Pressione su sup. di rullo → distribuzione uniforme

$p_m = -\sigma_3$

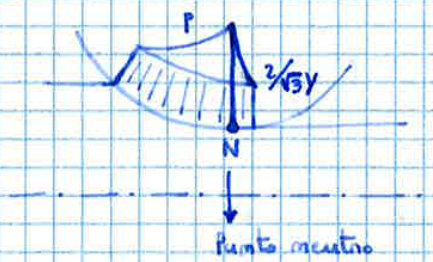
$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y$ Criterio di von Mises per snervamento

$p_m = \underbrace{\frac{2}{\sqrt{3}}}_{} Y$

→ A causa di <u>deformazione piana</u> (Altrimenti $p_m = Y$)

(↓ Aiuta in resistenza)

CON ATTRITO




(Calcolo con elementi sottili)

Integrando equazione differenziale si ottiene

$$p_m = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \left(1 + \underbrace{\frac{1}{2} \mu \frac{L}{h_m}}_{}\right)$$

→ Maggiorazione dovuta ad attrito

Con <u>approssimazioni</u>

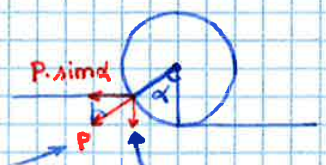
Andam. lineare di pressione

$h_m$ : spessore medio (con punto neutro a metà di arco di contatto) per approssimaz.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 340

## Condizione di imbocco




Forza radiale del cilindro sul materiale (di reazione)

Comp. verticale bilanciata da rullo sottostante

$\alpha$: angolo di imbocco (o di laminazione)

↓ Angolo tra punto di ingresso e di uscita

↓ Pensato sulla verticale

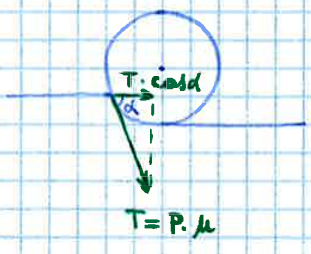
(Anche se in realtà non è così per deformaz. di materiale)

$P \sin\alpha$ (comp. orizzontale)

↳ Spinge verso ingresso (indietro)

↳ Si oppone a imbocco

Ma forza tangenziale di attrito si porta dietro il materiale




Comp. verticale → Bilanciata da altro rullo

Comp. orizz. ($T \cdot \cos\alpha$)

↳ Trascina mat. verso uscita

Cond. d'imbocco → affinché il materiale avanzi

$$\mu \cdot \cancel{P} \cdot \cos\alpha \geq \cancel{P} \sin\alpha$$

- Se sono uguali → No accelerazione
- Altrimenti → Accelera il materiale

$$\boxed{\mu \geq tg\,\alpha}$$

## Condizione di trascinamento

↓ Mat. già entrato nei rulli

↓ Come prima le componenti orizzontali si devono bilanciare

- Ora però, nel PUNTO NEUTRO ci troviamo → Angolo di apertura : $\alpha'$

↓ In buona approssimazione $\alpha' = \frac{\alpha}{2}$

$$\mu \geq tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$ → Serve meno attrito

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 340

Cond. d'imbocco

$\mu \geq \tan\alpha \simeq \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$

$\mu^2 \geq \frac{\Delta h}{R} \longrightarrow \boxed{\Delta h \leq \mu^2 \cdot R}$ MASSIMA RIDUZIONE DI SPESSORE AMMISSIBILE

Ma industrialmente non viene rispettata

Dipende molto da CONDIZIONI di processo

Noi abbiamo fatto molte approssimazioni

Su base di questo principio

NON si usa lubrificante in laminazione

A volte fatti anche dentini su rulli

aumentano $\mu$

Aumenta trascinamento

Servono rulli grandi rispetto allo spessore del materiale

R grande

Varie ed eventuali

Laminaz. a caldo → RICRISTALLIZZANO i grani

grani più fini dopo la laminazione

Tanti grani di piccole dimensioni

resist. e propr. meccaniche migliori

Allunga grani

Anisotropia

I lingotti venivano laminati

mat. con caratt. meccaniche migliori

Colata era preferibile IN CONTINUO

meno costosi ma qualità meccaniche inferiori

Grani GROSSI

Forma tixotropica o fusa

metallo pastoso

Ultimam. più usata per via del costo minore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 340

$\tau_b$ ami causa → avere forza di attrito maggiore

↓

Ma diminuisce pressione

↓

Si USA di norma in laminazioni a freddo → che necessitano pressioni maggiori

RULLO → Trave caricata al centro → FLESSIONE (Elastica) → Al rullo non succede nulla

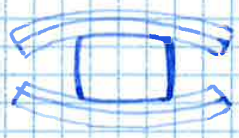
↓

Lungo 3 metri

→ Si flette di 2-3 mm (freccia max.)

↓

Per materiale in laminaz. → Può cambiare molto spessore tra zona centrale e periferia



V diverse → esterno più veloce

→ Si strappa o si ondula il materiale

Per compensare effetto

↓

1. Trattamento di CAMBER (Campanatura)

→ Pareti vengono lombate ("TAVOLE")

→ Sotto flessione diventano PIANE

superfici esterne dei rulli

(freccia)

Ma flessione dipende da, CARICO

→ In base a materiale

→ In base a spessore ecc.

→ Si mette un camber che vada in media BENE

2. In più RULLI DI APPOGGIO → Molto più spessi → Impediscono flessione

↓

Da qualche mm

↓

a $\frac{1}{10}$ mm

3. Poi si aggiungono forze (bending)

→ Con cilindri idraulici detti di "bending"

→ Per bilanciare piegatura di rullo

→ o forzarla se necessario

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 340

Processi CONTINUI → Mat. passa attraverso un foro sagomato → Riduce sezione

Estrusione e Trafilatura

ESTRUSIONE

Come si fa uscire dentifricio dal tubetto

Compressione uniforme in camera di estrusione → Metallo esce da matrice

Metallo caldo è pastoso

Lavorazione → Quasi sempre a caldo → mat. più semplice da deformare

(Laminaz. → Successione di passaggi successivi)

Estrusione → Tutto in un unico passaggio → Spessore si può ridurre a piacere → Metallo subisce forte compressione

"Un pezzo per volta" (materiale inserito in camera di estr.)

Vantaggi → Elevata produttività

Elevata precisione dimensionale e finitura superficiale

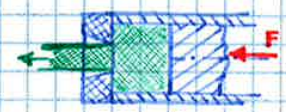
Costi relativamente contenuti

Prodotti → Barre lunghe con forme diverse → Tubolari

→ Cilindriche piene

→ Variamente sagomate

Estrusione → DIRETTA → variabilità di materiale da zona a zona




Mat. in camera di estrusione → Pistone lo fa uscire da foro sagomato con pressione (MATRICE)

→ Stessa direzione di carico e di materiale

INVERSA → Pistone rappresenta matrice anche → Ha fori → materiale esce estruso in direzione opposta a moto di pistone (spintore)

Materiale più uniforme → No problema di zone morte

MA COSTA DI PIÙ → Pistone / matrice molto costoso

Caricate e usure → Dura dev'essere

carichi dinamici → Serve duttile

Trattamenti differenziati

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 340

## Pressione di estrusione

In base a → resistenza alla deformazione
→ Forma della filletta

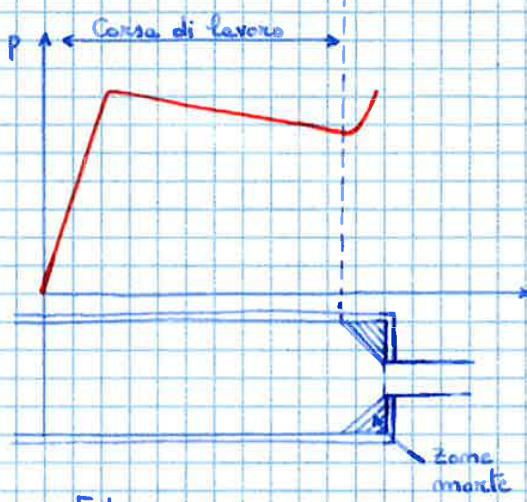
Rapporto di estrusione → Anche valori elevati
→ $R = \frac{A_0}{A_u}$

Coeff. di attrito tra filletta e pareti di camera di estrusione → lunghezza e diametro di filletta

Andam. di p in funzione di corsa di lavoro

→ Diminuisce fino a zona morta → Dove aumenta molto
↳ all'aumentare della corsa
↓ Tende ad infinito

### Estrusione diretta




2 soluzioni

- Interrompo estrusione → pezzo va bene con la testa
  ↓ Non spreco materiale
- Interrompo estrusione e tutto materiale rimasto nella camera

→ corsa spintore

- Pendenza in zona di lavoro è funzione di v dello spintore
- Attrito dipende da lunghezza della filletta

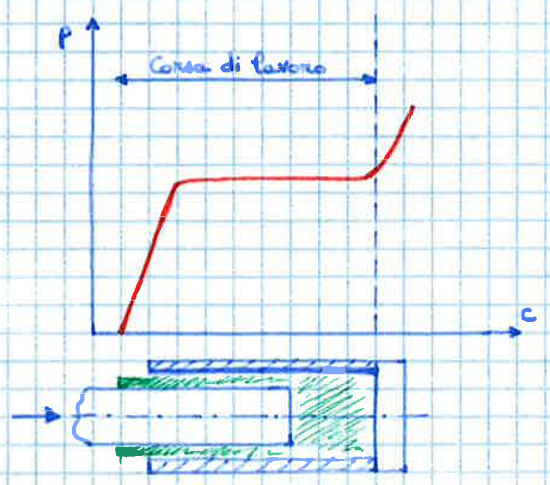
### Estrusione inversa

→ p rimane costante → Ed è minore

- Materiale non si sposta in camera
  → Meno usura e meno problemi di lubrificazione
  → piccole zone morte ma che non influiscono

→ Attrito trascurabile durante la corsa dello spintore

- MA costa di più




© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 340

Lavoro di def. uniforme (interno) → Nessuna perdita per attrito
→ Comportamento plastico ideale
→ Per mat. incrudenti → $\bar{Y}$

$L = Y \cdot \varepsilon \cdot V$

$\varepsilon$ → def. totale

Se c'è incrudimento $\bar{Y}$

• No utilizzati elementi sottili perché piani non rimangono piani → variano dimensioni

$L = Y \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot c$ → Area del pistone per la sua corsa

$L = F \cdot c$ Lavoro di forze esterne (forza di estrusione) → È uguale a lavoro di def. interna

$F \cdot \cancel{c} = Y \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot \cancel{c}$

$F = Y \cdot \varepsilon \cdot A_0$ Forza ideale di estrusione con def. uniforme e senza attrito

Per dati reali → RENDIMENTO → Ma è diverso per ogni processo
→ Non facile da calcolare
→ Su esperimenti, esperienza

$$F_R = \frac{Y \cdot \varepsilon \cdot A_0}{\eta}$$

$$L_R = F_R \cdot c = \frac{Y \cdot \varepsilon \cdot V}{\eta}$$

Estrusione
- → Verticale → pezzo perfettamente simmetrico
  - → Ma limita lunghezza
- → Orizzontale → Pavimento più freddo
  - → Aria meno → Pezzo si incurva per differenze di velocità di raffreddamento

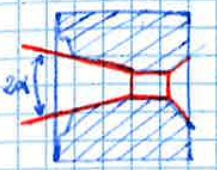
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 340

FILIERA → Per fili molto fini → filiera in diamante → minima deformazione
↳ NON con mat. ferrosi → Diffusione di Carbonio

↓
Conicità molto poco pronunciata → Angolo di apertura molto piccolo
↓ dimensione varia gradualmente

↓ Attrito molto basso → LUBRIFICATO




Cilindro → per rendente riusabili → per rigenerare filiera → Materiale da portar via per rifilare filiera usurata ed ottenere stesso diametro finale (con molte)
↳ detto di CALIBRATURA
+
Svasatura in uscita → per non tagliare filo in uscita
↓
NO spigolo vivo

Prima di trafilatura:

- APPUNTATURA
  ↓ per far entrare filo → impresso di vergella nel foro della filiera
  - laminati segnano solo la punta del filo → con cilindri che schiacciano punta
    ↓
    ASSOTTIGLIANO
- ELIMINAZIONE DI OSSIDO → per non danneggiare olio
  ↓ DECAPAGGIO → sottoposto ad un acido
  ↳ con detriti non funziona più bene da lubrificante e con materiali diversi

  Acido corrode ossido su superficie → creatosi in laminazione a caldo
  ↓
  LAVAGGIO → Va poi lavato per togliere acido → per non inquinare bagno d'olio con acido

  TRATTAMENTO IN LATTE DI CALCE → è trattato con base forte
  → idrossido di calcio
  ↓ Crea sale solubile facilmente
  ↳ Neutralizza ultimi resti di acido

  ASCIUGATURA

  PATENTAMENTO
  ↓
  • Tempra fino a 500°C circa
  è mantenuto materiale a 500°C finché
  (Rinvenimento)
  ↳ Austenite diventa di struttura sorbitica
  ↓ Resistente e duttile allo stesso tempo
  ↓ Non fragile
  Struttura globulare omogenea e molto fine
  In un bagno di sali fusi

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 340

$$L_R = F_R \cdot c = \frac{Y \cdot \varepsilon \cdot V}{\eta}$$

Condizione iniziale

$$F_R < Y \cdot A_u$$

$$\frac{Y \cdot \varepsilon \cdot \cancel{A_u}}{\eta} < Y \cdot \cancel{A_u}$$

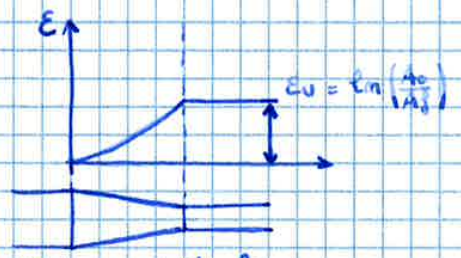
$$\downarrow$$

$$\varepsilon < \eta$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \longrightarrow$$

per conservazione del volume

$$l_f \cdot A_f = l_0 \cdot A_0 \rightarrow \frac{l_f}{l_0} = \frac{A_0}{A_f}$$




$\varepsilon < \eta \sim 1 \rightarrow$ Caso quasi ideale

$$\ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) < 1$$

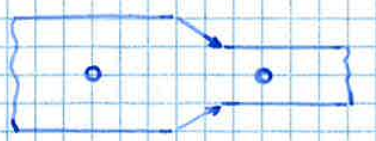
$$\frac{A_0}{A_f} < e \approx 2{,}7 \rightarrow \text{Di solito } \frac{A_0}{A_f} = 2 \rightarrow \varepsilon = 0{,}69$$

Ma pratica industriale → Richiede rapporti molto più piccoli

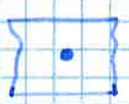
$\varepsilon = 0{,}2$

Aziende vanno per esperienza → Con la pratica

Ci sono tanti altri fattori → Vibrazioni, USURA, Inclusioni nel filo → Riducono resistenza



Con sezione più piccola → inclusione può non essere trascurabile



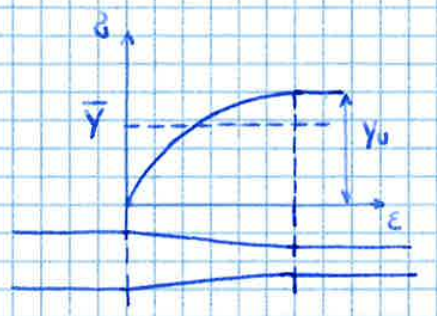
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 340

$$\sigma_u = \bar{Y} \cdot \left[ \ln R \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \right]$$

Parametri condizionanti

- Coefficiente d'attrito $\mu$ → Piccolo → più piccola differenza tra $\sigma_u$ e tensione reale $\bar{Y} \cdot \varepsilon$
- Angolo d'apertura della filiera → Se $\alpha$ è grande → Si riduce attrito → Sup. di contatto si riduce
- Incrudimento




Problema
→ Stato di tensione disuniforme
↓
Si creano tensioni residue
→ Alcune zone rimangono tensionate

RADIALMENTE
→ In superficie tensione si annulla
→ Massima compressione al centro

LONGITUDINALMENTE (e TRASVERSALMENTE)
→ Superficie in trazione
→ Centro in compressione

generano comportamento in trazione
→ non uniforme
↓
Arrotolandoli si oppongono / cadettano

Per annullare effetto
↓
Trattamenti termici → Ricottura o Normalizzazione

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 340

Maglio → Fa cadere massa dall'alto
↓ Si può ripetere più volte

Pressa → In linea di massima un solo processo

Fucinatura
Stampaggio
→ Devono costare poco → MA fucinatura richiede specialisti
↓ Devo pagare poco manodopera
↓ Aziende vanno all'estero

· Pezzi forgiati

→ Migliore resistenza → Chiude / Salda le porosità, i difetti, le aperture
↓ Battendo metallo
→ A caldo → Ricristallizza grani piccoli ($\frac{2}{3}$ T fusione)
↳ riduce incrudim.
↳ Migliori caratt. meccaniche
→ Orientazioni preferenziali di fibre lungo direzioni
↳ Stesse in cui saranno soggetti a tensioni
↓ Miglior resistenza
→ Prestazioni molto migliori di pezzi fusi
→ PESI MINORI

→ Forma quasi definitiva → Richiedono piccole asportazioni
↓ Piccolo sovrametallo

→ Elevata produttività → Pressa ha velocità di 60 colpi / min
↓ 60 pezzi / min.
↓ Ma poi devono subire asportazione di sovrametallo
↓ Perso molto tempo

In Giappone hanno fatto studi su forgiatura in forma definitiva
→ Vanno evitate OSSIDAZIONI
→ Buona precisione 1/10 mm
↓ Produttività aumenterebbe molto → Basso costo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 340

STAMPAGGIO

→ Considerato processo a massa costante 2 kg

↓

Ma nel taglio di spezzoni un po' di materiale lo perdo

Inoltre → Gruppo di stampaggio ha BAVE

↓

Vanno asportate (-0,5 kg)

↓ Poi

Asportazione di sovrametallo (-0,5 kg)

↓

Partendo da un peso di 2 kg

↓

ottengo finito di 1 kg

Per tagliare spezzone

→ TRONCATURA → istantanea e meno precisa

→ SEGATURA → Più precisa ma più lunga

→ Se materiale è crudo → Può avere zone più dure e zone meno

↓

Può rompere denti di segatura

↓

Viene fatta RICOTTURA

Poi con pezzi forgiati

→ Tempra + rinvenimento (Bonifica)

↓

Dopo il pezzo è più resistente

↓

Non si può più forgiare

↓

lo rovinerebbe

→ Ultimamente si usano acciai legati AUTOTEMPRANTI

Dopo forgiatura → Serve NORMALIZZAZIONE per facilitare lavorazione all'utensile

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 340

Per muovere pezzi
↓
macchina detta

MANIPOLATORE → Ha una pinza idraulica per afferrare il pezzo
→ Deve permettere rotazione di un angolo a mio piacimento
↓
Per ruotare il pezzo della giusta quantità

Di solito viaggiano su rotaie
→ Pavimento è spesso SPORCO e CALDO
↓
Pneumatici si consumerebbero velocemente

macchina molto grossa
→ Deve esercitare molta forza

→ Alimentati da terra o con un cavo volante → No grossa mobilità

STAMPAGGIO
→ Pezzi più piccoli → Come biella e pistone
→ Forma decisa da forma di stampo → Possono essere più complesse
→ Più precisa

Prima: SBOZZATURA in stampo aperto

Durante stampaggio → Si genera <u>lava</u> tra le due parti dello stampo
→ Poi si taglia e si rimuove ossido generato in raffreddamento
↓
GRANIGLIATURA
(Sabbia / grani abrasivi sparati contro la superficie del pezzo)

Diversi passaggi di STAMPAGGIO → poco per volta aumento i dettagli

Spesso si fa un secondo stampaggio a freddo
→ CONIATURA → Si ridà forma desiderata

Perché dopo trattamenti il pezzo subisce piccole deformazioni
(Ad es. in tranciatura lava, graniglia tura)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 340

## Ciclo a caldo

Taglio spezzoni → Riscaldo spezzoni

oppure → Scaldo billetta → Taglio billetta in spezzoni

Sbozzatura → Forma non bene definita

Stampaggio

Tranciatura, brave / foratura (Troncature)

→ Operazioni con forze elevate, impulsive e concentrate → Danneggiano prese → Fatte su prese diverse, meno precise

Trattamento termico (o Autotempra in aria)

Sabbiatura → È a volte decapaggio se ho particolari esigenze

Coniatura

→ Controllo durezza e magnetoscopico

durezza → A campione su alcuni pezzi → Per bruciature

durezza → Brinell di solito

magnetoscopico → Su tutti i pezzi → Stampaggi possono creare tasche → Ripiegamenti di materiale su se stesso che creano cavità

durezza → A volte fatti prima di coniatura → Evito coniatura di pezzi difettati

Esempio: BIELLETTA

Stiratura → Si sposta molto materiale → Fatto con stampo aperto (fucinatura)

Stampo → Lascia fuori da stampo PRESA del pezzo → Per prenderlo con tenaglia

Operazioni con massime forze → Al centro di stampo → Per non deformare colonne di pressa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 340

Camere scarto lava

↳ Necessarie per ritiro e ossidazione

↓

Compensano eccesso di massa previsto

↓ Favoriscono completo riempimento di cavità dello stampo

Difetti

- Rottura di stampo
- Bruciature

→ FORMAZIONE DI TASCHE → Materiale si piega su se stesso

↳ Se ci sono raggi di raccordo troppo piccoli

↓

Cavità chiuse all'interno del pezzo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 340

Vantaggi di LAMIERE → Facile da lavorare

→ Pesa molto poco → È sottile

↓

Si va verso spessori più sottili

↓

Grazie ad acciai alto resistenziali

## Acciaio utilizzato in formatura di lamiera

↓

Acciai per IMBUTITURA (P01, P02, ..., P06)

→ In base a caratteristiche

→ Allungamento a rottura del 40 - 50 % (elevato) → Necessario perché è un processo a freddo e di trazione

→ Bassa tensione di snervamento e di rottura (< 200 MPa)

n elevato (coeff. di incrudimento)

Dopo rimane molto orizzontale

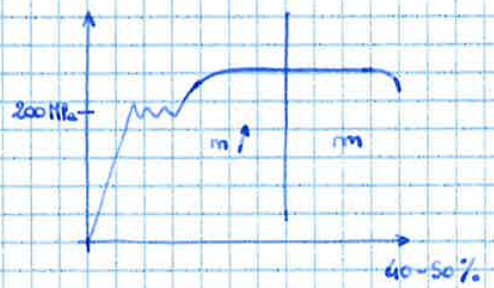
↓

Dopo instabilità

↓

Fenomeno diventa dinamico

↳ Vale coeff. di incrudim. dinamico m $\sigma = K \cdot \dot{\varepsilon}^m$




↓

m elevato → Grande sensibilità a velocità di deformazione

↓ Strizione diffusa

↓ Con bassi aumenti di velocità

↓ $\dot{\varepsilon}$ aumenta molto

Zona di snervamento → Allungata

Soggetta a fenomeno di BANDE di LUEDERS

↓

Alcune zone non subiscono grandi deformazioni

↓ Rimangono in zona elastica → Curva è ancora in zona di snervamento

↓

Si formano le bande → Punti di materiale snervate

↓ Proseguendo si amplificano finché si snerva tutto il materiale

→ Altre no → rimangono in campo elastico

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 340

Mi aspetto che in dir. di spessore

↓

Si sia deformato meno

In direzione di larghezza → Si sia deformato di più

RAPPORTO DI ANISOTROPIA

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

In acciai per imbutitura

$R = 2{,}5 \div 3$

Se $R = 3$ → $\varepsilon_w = 3\,\varepsilon_t$

Sono contento che succeda

↓

Forte anisotropia → migliora deformazione

Non voglio che spessore diminuisca troppo

Ma si deve stare attenti

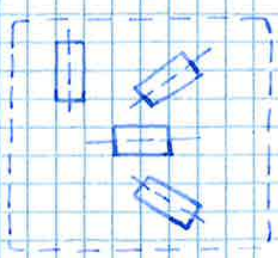
↓

Stampato in direzione di laminazione o in direz. perpendicolare a laminazione } Si ottengono risultati diversi

→ Si prendono 4 provini

↓

Tagliati in direzioni diverse



Si ottengono 4 rapporti di anisotropia differenti

→ Si fa media di anisotropia

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

Quanto è variabile anisotropia in piano di lamiera

↑

Anisotropia planare

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

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 340

Provino di lamiera

Fascia rettangolare in trazione

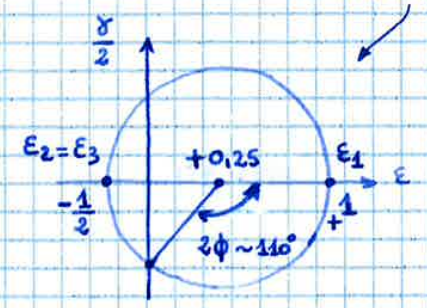
↓

Non riesce a stringersi lungo tutta larghezza (in strizione)

↓ Solo leggermente

Come se fosse
Deformazione piana ($\varepsilon = 0$)

Cerchio di Mohr particolare




$\left(\varepsilon_{xy} = \frac{\gamma}{2}\right)$

Considerando materiale ISOTROPO ⟶ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{1}{2}\varepsilon_1$

↳ In realtà è anisotropo

STRIZIONE si verifica nel punto a $\varepsilon = 0$

↳ Per geometria

Angolo rispetto a $\varepsilon_1$ è 110°

↓ $2\phi \sim 110°$

$\phi = 55°$ Banda di strizione a 55°

(Di solito era a 45°)
in prova di traz. normale

Tempo fa
C'era un problema: logistico

INVECCHIAMENTO ⟶ Dopo qualche settimana dopo SKIN PASS tornava in condizioni originali la lamiera

↓

Stampaggio andava fatto subito dopo skin passatura

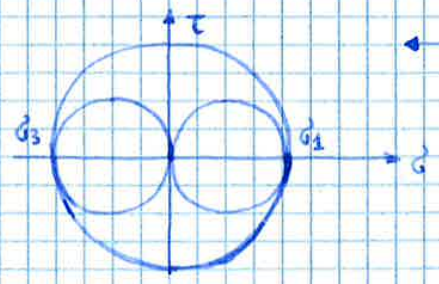
↓

Per evitare formazione di bande di Lueders

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 340

# Forza di tranciatura




Taglio puro → Cerchio di Mohr centrato in origine

$$\sigma_1 - \sigma_3 = R_m$$

$$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{max}$$

$$\tau_{max} = \frac{R_m}{2}$$

In realtà → No taglio puro

↓

Si usa un coeff. di proporzionalità (coeff. correttivo)

$$\tau_{max} = k \cdot R_m$$

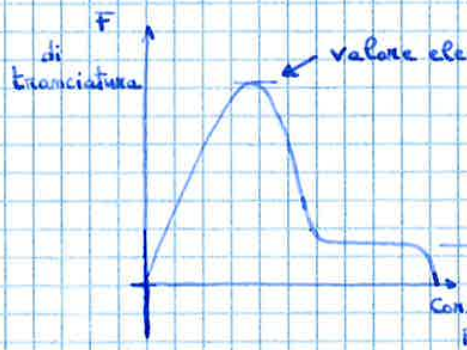
$k \approx 0{,}8$

$A = p \cdot s$ ← Superficie di sezione resistente

perimetro x spessore

$$F = k \cdot R_m \cdot A$$

Andamento di F di tranciatura




valore elevato → Può danneggiare anche macchina se sbilanciata → Prepare presse, ecc

Punzoni subiscono forze impulsive elevate → Sensibili a carico di punta

Si comprano in grandi quantità

Si consumano velocemente

→ Non va a 0 per strisciamento di punzone su lamiera

Integrale non è facile

↓

$$L = \int_0^s F \cdot ds$$

Per calcolare lavoro si usa una costante

$$L \cong F_{max} \cdot k_1 \cdot s$$

$s$ → corsa del punzone approssimata a spessore di lamiera

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 340

Per grosse forze in gioco
↓ Si usano punzoni CON TAGLIO OBLIQUO
↓ Progressivamente taglia alcune zone di lamiera
↓ No carico impulsivo in un punto

MA nasce componente orizzontale
↳ Si flette PUNZONE

Taglio obliquo da due parti opposte di lamiera per bilanciare comp. orizzontale → Ma costa di più fare 2 tagli

Sbarbature → Gioco minimo possibile
↳ per precisione

Si può fare con stesso PUNZONE → che ha una seconda forma a coltello in lunghezza

Spesso si usano STAMPI PROGRESSIVI
↳ Si fanno tranciature successive

NASTRO che muove lamiera → Ogni zona ha un suo ruolo
↳ Successivi passaggi usando stesso STAMPO che si apre e chiude più volte → Striscia di lamiera scorre

Si velocizzano operazioni

Tutto stampo lavora

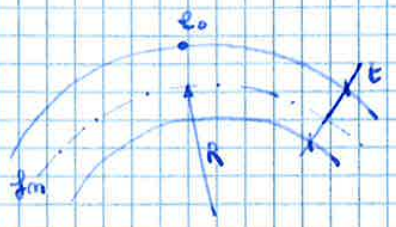
Problema di progettazione
↳ Ideo oggetto immaginando successione di operazioni che si eseguiranno

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 340

Quanto più è spessa lamiera
↓
Tante più fibre interne ed esterne vanno deformate

Lamiera sottile → Subisce poca deformazione → Più facile da piegare




$$e_0 = \frac{L_f - L_i}{L_i} = \frac{\left(R+\frac{t}{2}\right)\cdot\alpha - R\cdot\alpha}{R\cdot\alpha}$$

$$e_0 = \frac{t}{2R} \qquad \varepsilon_0 = \ell_m(1+e_0)$$

$$e_i = -\frac{t}{2R} \qquad \varepsilon_i = \ell_m(1+e_i)$$

Non andati a leggere fine

Alcuni tentativi in automotive (MULTIPLA)

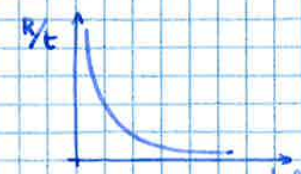
Non è una laminazione

Rullo piega solo la lamiera a causa della sua forma

Solo primo e ultimo rullo sono motorizzati

Pezzi vanno poi tagliati

Più è grande R rispetto a t
↳ Più è piccola deformazione




Se $\frac{R}{t}$ è piccolo → Grande deformazione
↓
Rischio che lamiera si rompa

C'è un RAGGIO MINIMO di piegatura per non rompere lamiera

Se $\frac{R}{t}$ è esageratamente piccolo → FESSURAZIONI in funzione di anisotropia

In processi massivi → Grandi def. plastiche
↳ Ritorno elastico ininfluente

Ora → piccole deformazioni
↳ Lamiera con RITORNO ELASTICO

modifica raggio di piegatura e centro di raggio

modifica angolo di piegatura finale

FUNZIONE DI
- $R_{p02}$
- v di deformaz.
- tipo di piegatura
- spessore di lamiera
- Raggio di piegatura

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 340

Esempi Processi di PIEGATURA
→ Sotto pressa
↓
Flangiatura
↳ di solito a 90°
↓
Per aumentare rigidezza dei componenti

Forza di piegatura (Carico di flessione)
↳ Basse → Non si fa nemmeno verifica

modulo di resist. a flessione $W = \frac{b \cdot s^2}{6}$

Tensione $\sigma_f$ generata $\sigma_f = \frac{F \cdot L}{4W}$

Quando

Si richiede che $\sigma_f$ sia uguale a $2Y$ per piegatura → $L \approx 6 \div 12\,s$, $R = s$

$$F = k \cdot \frac{L \cdot s^2 \cdot \sigma_f}{b}$$

→ dipende da molti fattori
→ Anche in funzione di attrito

Processo più importante: STAMPAGGIO e IMBUTITURA

IMBUTITURA
↳ Lamiera da forma piana → A forma a coppa concava
↓ Per fare
Lavabi, Pentole, Coppe dell'olio, Piccitti

detta "profonda"
↓
Lamiera non cambia spessore

→ Se si preme tra stampo e contrastampo (STAMPAGGIO) → Assume forma determinata
↓ Spessore diminuisce
↓
Grande precisione
Ma non può essere profonda (deforma poco)
↓
Si rompereb̀be per diminuzione di spessore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 340

Dopo IMBUTITURA

Rimane BORDINO sotto a premi lamiera
↓ detto
FUORIFIGURA (non richiesto da progettista)
↳ Tranciato con molla

Libero di scorrere tra premilamiera e matrice
↳ Se mat. è molto distante da fondo di punzone
↓
Sopra una certa profondità si rompe

e punzone ha r di raccordo bassi
↓
Punzone tira il mat. e lo STRAPPA

STAMPAGGIO → Parte sotto premilamiera è vincolata
↓ Non può scorrere
↓
Deformandosi varia spessore
↳ Se diventa troppo piccolo
↳ Si rompe

(Simile a differenza tra fucinatura e stampaggio)

IRONING
↳ Combinazione di imbutitura e stampaggio → Si uniscono i vantaggi dei due
↓
Lamiera costretta anche a diminuire di spessore
↳ Messa in "trazione"

Lamiera non è vincolata

Gioco tra punzone e matrice è minore di spessore → Per passare si deve ridurre di spessore

IMBUTITURA

→ Mancava premione su fondo → grinzatura

Unione di 3/4 processi → Scorrimento
→ Piegatura
→ Raddrizzatura
→ Scorrimento in verticale

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 340

Prima di imbutitura
si deve
progettare il foglio di lamiera (BLANK)

Se imbutitura è circolare
foglio circolare

Per geometrie
complesse
→ Molto difficile da progettare

Esempio di scatola rettangolare
↓
SVILUPPO di pareti dritte

Si somma lungh. di raccordo + altezza di parete

Per angoli → Come se fosse una imbutitura circolare $D = d + H + \pi \cdot \frac{\pi}{2}$
↓
E poi si fa raccordo tra
lato e cerchio di angolo
di parete
dritta

Durante IMBUTITURA
↓
Flusso di materiale diverso tra → lati dritti (2 piegature) subiscono

Angoli → riduz. di lungh. circonf.
+ 2 piegature
+ scorrim. verticale

Se non si prendono
contro misure
↓
Lati dritti scorrono
più velocemente di angoli
→ Creano grinze

Si mettono ostacoli
che rallentano velocità
di flusso di lamiera
in pareti dritte

ROMPIGRINZE
→ Ma rovinano materiale
→ Da usare senza abusarne

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 340

FORMATURA SUPERPLASTICA

↓ Molto usato adesso

Alcune leghe eutettoidi

↳ Hanno proprietà particolari

↳ A T determinate ($\frac{1}{2}$ Tm ≈)

↳ A v di deformazioni basse

Comportamenti superplastici

↓ m = 0 (coeff. di incrudimento)

Per processi di diffusione e ricristallizzazione

Comp. viscoplastico

Def. dipende solo da v di deformazione

Fino a 1000 % di allungamento

Materiali con quel comportamento

- Alcuni acciai
- Qualche lega di Al
- Titanio

Ti 6 Al 4 V → Ha queste proprietà

↳ Lega di titanio più diffusa

↓ A 800 - 900 °C

→ Usato per fare forme complesse → Accoppiato con "idroformatura" con gas in pressione al posto di olio

↓ Solo con stampo (no punzone)

FORMATURA SUPERPLASTICA

Spesso unita a Diffusion bonding (incollaggio)

2 lamiere premute da premilamiera superiore

↓ Tra esse

↳ Pellicola di isolante

↓ Lamiera inferiore si deforma e riempie cavità → Anche complesse essendo superplastico

Dopo con gas in pressione

↓ Si comprimono lamiere (senza isolante adesso)

↓ Si uniscono per diffusione

↓ Struttura a nido d'ape

Rigide e leggere

USO in ambito aeronautico e aerospaziale

Ora Interesse di costruttori automobilistici

↳ per serie speciali di auto

↳ Caratteristiche particolari / differenti da base

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 340

Coi risultati di prova
↓
Curva di deformabilità (Spessore non si riesce a misurare)

Curva delimita → PEZZI SANI → Sotto curva
→ PEZZI ROTTI (difettosi) → Sopra curva
↳ Probabile che pezzo si rompa

Prova di formabilità è soggettiva per decidere curva limite di formabilità
↳ Quando pezzi si rompono
↳ "A occhio"

A $\varepsilon_1$ e $\varepsilon_2 > 0$
↳ C'è sempre STRIZIONE DIFFUSA
(Trazione Biassiale)

$\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 < 0$ STRIZIONE LOCALIZZATA
↓
Trazione unidirezionale
↓
oppure trazione + compressione

In realtà non è proprio rispettata perfettamente curva limite di def.

Disegnando cerchi prima e dopo su lamiera → si vede come si deforma zona
(Serigrafando)
↓ Si può disegnare diagramma di formabilità

• Linee a 45° → Sotto non esiste nulla perché se $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$
↓ $\varepsilon_2$ è def. massima

Oggi → Analisi con elementi finiti su lamiere
↳ Non analizza zona ma singoli punti → Analisi migliore (più precisa) e più completa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 340

Nella realtà il taglio non è quasi mai
- libero
- ortogonale
- piano

Materiale asportato: TRUCIOLO → Ogni tanto si stacca dal pezzo (si rompe) → Accorgimenti per far sì che succeda

↓

Truciolo segmentato
oppure
Truciolo fluente
(si stacca solo finito il taglio)

· Scopo di taglio: portar via sovrametallo
↳ Convertito in TRUCIOLO
↙ Schiacciato
↓ molto deformato e con strutt. diversa → Scorrim. di piani cristallini uno rispetto all'altro (longitudin.)

1. Sviluppo di calore
2. Truciolo è deformato → Struttura interna si modifica
3. Spessore di truciolo è maggiore di sovrametallo

→ È UNA DEFORMAZIONE PLASTICA

Come uno stampo che sta schiacciando sovrametallo
→ RICALCATURA OBLIQUA
→ Parte più complessa di processo

Fenomeno di taglio e distacco di mat.
↓ Necessita poca forza, non critico
↓
Trascurato in dimensionam. di processo

Metallo è resistente
↓ Serve utensile duro → In mat sinterizzati duri e fragili → Solo a compressione (No trazione)
(non lama sottile)
↓
la romperebbe

Vogliamo superficie molto levigata → oltre a propagare fratture
↓
Serve schiacciamento plastico
Sviluppo di calore porta materiale ad essere più plastico e fluido → Superfici più levigate

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 340

## Ipotesi

- Utensile monotagliente e perfettamente affilato → $\alpha$ suff. ampio per non creare taglionamento

- Fianchi di utensile non tagliano → Larghezza del tagliente > larghezza del pezzo

- No allargamento di truciolo → Largh. del truciolo = Largh. iniziale del pezzo in lavorazione
  → deformazione piana

- Velocità di taglio costante

- Profondità di passata costante → $h_0$ = cost.
  (spessore di truciolo)

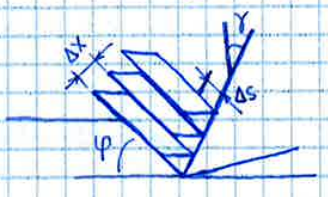
## Modello teorico delle carte da gioco (modello di Pij spanen)

↓ Come un mazzo di carte in cui ognuna scorre una sull'altra

Piani rimangono piani

↓ Si deforma per scorrimento obliquo di elementi sottili piani

↓ Rimangono piani dopo def. plastica
(In processo reale si incurvano)




Ma non tutti i piani sono di scorrimento → Spessori piani a successivi
↳ distanza tra uno e il successivo : $\Delta x$

Deformaz. → Dipende da inclinazione di piano di scorrimento
(Angolo di scorrimento)

↓ Se $\varphi$ è grande → Deformazione grande

Se $\varphi = 45°$ → Deformazione minore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 340

Si calcola

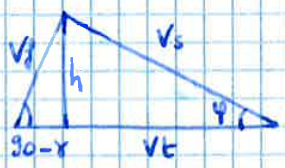
$V_f = V_t \cdot \frac{h_0}{h_1}$ $\qquad$ $V_f = R_c \cdot V_t$

Spesso $h_f \approx 3h_0$

$V_f = \frac{V_t}{3}$ → ma comunque è una velocità alta

↓ USURA l'utensile

$\frac{h_0}{h_1}$ = FATTORE DI RICALCAMENTO $R_c$ → $\frac{\text{spessore indef.}}{\text{spessore deformato}}$




$h = V_s \cdot \sin\varphi = V_f \cdot \sin(90-\gamma)$

$V_s \cdot \sin\varphi = V_f \cdot \cos(\gamma)$

$V_s = R_c \cdot V_t \cdot \frac{\cos\gamma}{\sin\varphi}$

↳ Ci serve un modo per calcolare $\varphi$ per i materiali

$V_t = \frac{V_s \cos\varphi}{1 - R_c \sin\varphi}$

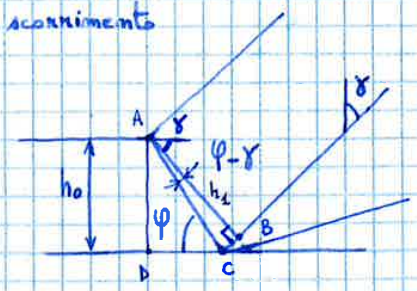
$V_t = V_s \cos\varphi + V_f \sin\gamma$

$V_t = V_s \cos\varphi + V_t R_c \sin\gamma$

Direzione rispetto a cui calcoliamo $h_1$

↳ Non è ⊥ a piano di scorrimento

$\tan\varphi = \frac{\cos\gamma}{\left(\frac{1}{R_c} - \sin\gamma\right)}$




$R_c = \frac{AD}{AB} = \frac{\sin\varphi}{\cos(\varphi-\gamma)}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 340

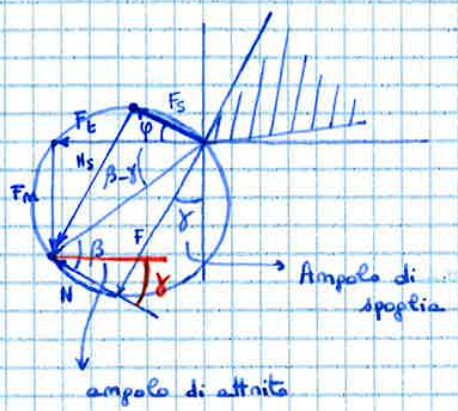
Se forze sono applicate su punta di utensile

↓

CERCHIO DI MERCHANT → Cerchio che ha risultante come diametro

Angolo al centro di 180°

↳ Ogni angolo alla circonferenza è la metà → 90°




$F_t = R \cos(\beta-\gamma)$

$F_n = R \sin(\beta-\gamma)$

$F_s = R \cos(\varphi+\beta-\gamma)$

$N_s = R \sin(\varphi+\beta-\gamma)$

$F = R \sin\beta$

$N = R \cos\beta$

Usate

→ Per conoscere valore di forza di attrito (ricavato da Forza di taglio)

→ Per conoscere forza di taglio da Forza di scorrimento

↳ $F_s = A_s \cdot \tau_s$ → Tensione di scorrimento dinamica → raggiunta sul piano di scorrimento

$A_s$ = Spessore di truciolo su piano di scorrim. × Lunghezza di pezzo

$A_s = \dfrac{A_0}{\sin\phi}$

$F_s = \dfrac{A_0}{\sin\phi} \cdot \tau_s$ $\quad (A_0 = h_0 \cdot L)$ → Area del truciolo prima di deformazione

$$R = \frac{F_s}{\cos(\phi+\beta-\gamma)} = \frac{A_0 \cdot \tau_s}{\sin\phi \cdot \cos(\phi+\beta-\gamma)}$$

$$F_t = R\cos(\beta-\gamma) = \frac{A_0 \cdot \tau_s \cdot \cos(\beta-\gamma)}{\sin\phi \cdot \cos(\phi+\beta-\gamma)}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 340

## Metodo del $K_s$

$F_t = K_s \cdot A_0$ → Sezione del truciolo indeformato

$K_s$ → Pressione di taglio

$K_s = K_{s0} \cdot A_0^{-1/m}$ → costante che dipende dal materiale

$K_{s0}$ → pressione specifica di taglio → Si trova in tabelle dei materiali in catalogo di utensili

Per Acciai

RELAZIONE DI KRONEMBERG

$$K_{s0} = 2{,}4 \cdot R_m^{0{,}454} \cdot \beta^{0{,}666}$$

Metodo tecnologico → Per calcolo di forze In condizioni reali di lavoro

Per determinare $K_s$

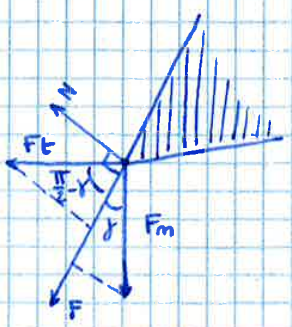
- Si scelgono condizioni sperimentali → Si fa una prova di taglio
  - → Si misura $F_T$
  - → Ricavo $K_s$ come $\frac{F_t}{A_0}$
    - → Usato poi in tutte le lavorazioni

Calcolo dell'angolo di attrito

$$F = F_n \cdot \cos\gamma + F_t \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = F_n \cdot \cos\gamma + F_t \sin\gamma$$

$$N = -F_n \cdot \sin\gamma + F_t \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = -F_n \cdot \sin\gamma + F_t \cos\gamma$$

$$\tan\beta = \frac{F}{N}$$




Partendo da $F_t$, $F_n$ e $\gamma_c$ misurati

Si ricavano

$\beta, \varphi, \gamma_s, \tau_s, C$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 340

Se aumenta ancora V

↓

Aumenta P

↓

Aumenta T → A 600°C

↳ Materiale diventa duttile

↓

Si deforma più facilmente

↓

NON si forma tagliente di riporto

Velocità di lavorazione devono essere → Basse

→ Alte

↓

Se sono medie → Si forma tagliente di riporto

TAGLIENTE DI RIPORTO

↳ Aumenta γ → Lo fa diventare molto grande

↓

Taglio diventa più semplice

MA rovina molto la superficie lavorata

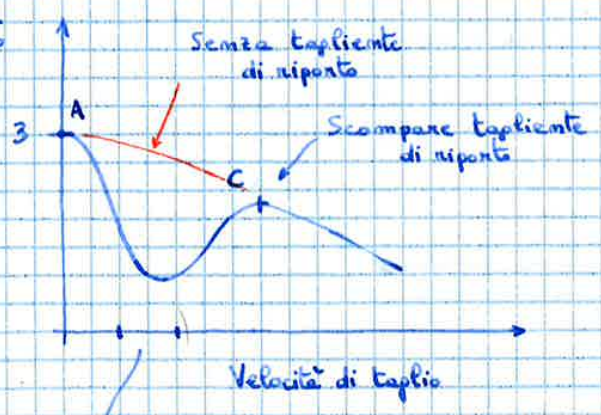
↳ Superficie finita → di scarsa qualità

E quando si stacca

↓

crea danno a superficie

$\frac{1}{R_c} = \frac{h}{h_0}$




A-C → curva dovuta a effetto di temperatura sul tagliente di riporto

Tagliente di riporto → Facilita taglio → $\frac{h}{h_0}$ minore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 340

# Classificazione dei processi di taglio

In base a
MOTO DI TAGLIO
(Relativo utensile - pezzo)
↳ Normalmente o si muove utensile o pezzo

- Rotatorio
- Traslatorio

Con pezzo assialsimmetrico
↓
La sfruttiamo (simmetria)
usando un moto di taglio rotatorio
↳ Facendo ruotare il pezzo e tenendo fermo l'utensile
↳ TORNITURA

Velocità di rotazione $\omega$
↓
Velocità di taglio → $\omega \cdot R$
↓
Ma velocità varia per pezzi più vicine al centro
↓
Varia di poco → Trascurata

$$V_t = \omega \cdot R = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

$D$ → diametro del pezzo

$$\left.\begin{array}{l} \omega = 2\pi n \\ R = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{1000} \end{array}\right\} V = 2\pi n \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{1000} = \frac{\pi n D}{1000} \quad \left[\frac{m}{min}\right]$$

$n$ → giri/min
$D$ → in mm
$\left[\frac{m}{min}\right]$ → consuetudine

Ma serve anche un
MOTO di ALIMENTAZIONE → Sposta zona di contatto tra utensile e pezzo
↓
Di solito TRASLATORIO (longitud. o trasvers.)
↳ Per avere nuovo materiale da asportare

Se pezzo è grande e utensile piccolo → Si muove utensile

Se pezzo è piccolo e utensile è grosso → si muove pezzo

} A seconda di processo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 340

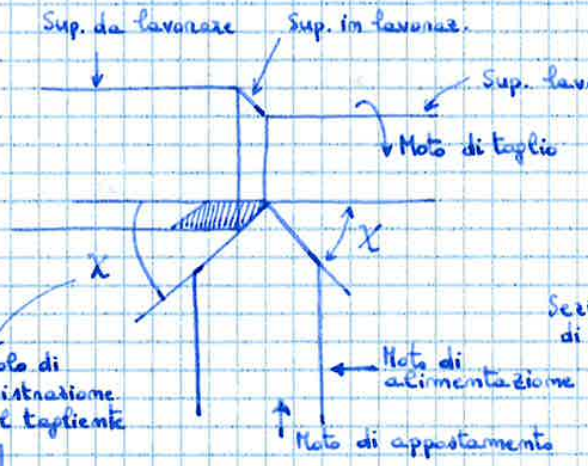
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 340

In base a composizione di moto di taglio / alimentazione

In macch. piane si muove utensile

| Macchine | Moto di taglio | Alimentazione | Utensile |
|---|---|---|---|
| Fresatrice | Rotatorio, utensile | Traslatorio, pezzo | Fresa |
| Tornio | Rotatorio, pezzo | Traslatorio, utensile | Ut. a taglio singolo |
| Trapano → per forature | Rotatorio, ut. | Traslatorio, ut. | Punta elicoidale |

Esempio di tornitura




Truciolo → Parallelogramma
↓
Sezione di truciolo $A_0 = a \cdot p$

Angolo di registrazione del tagliente
↓
Più è piccolo → Più è lungo il tratto di contatto tra utensile e pezzo → Utensile si consuma di meno
↓ c'è una pressione minore su utensile

Se è grande → Tratto di contatto molto piccolo
↓
Si generano pressioni alte

MA se sto facendo uno spallamento in cui mi devo fermare
↓
Serve $\chi = 90°$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 340

Taglio ortogonale piano

↓

Cinematica → $V_s$
→ $V_f$
→ $V_t$

↓

Dinamica
→ Risultante di F in punta di utensile
→ Utensile perfettamente affilato
] → Cerchio di Merchant
↓
Si calcolano componenti

↓

Massima tensione tangenziale
↓
Equazione di Ernst e Merchant
(per calcolare $\varphi$)

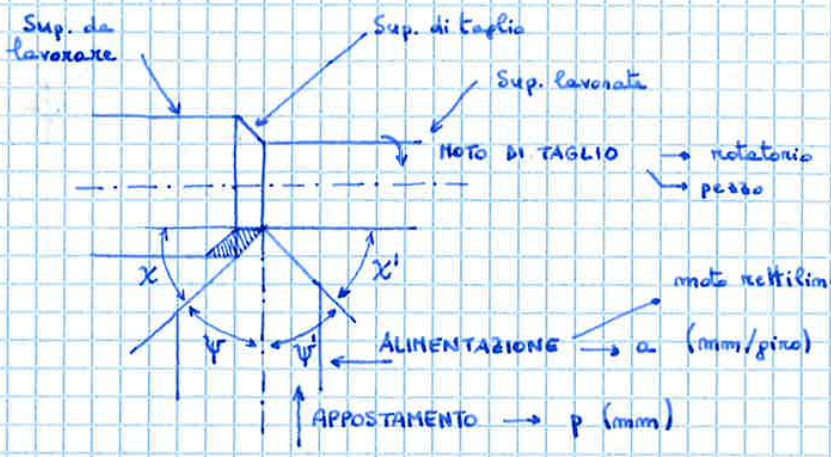
→ In azienda si usa metodo del $K_s$

– Tensioni sul petto

– Tagliente di riporto → Si genera a velocità di taglio medie → Temperature medie

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 340



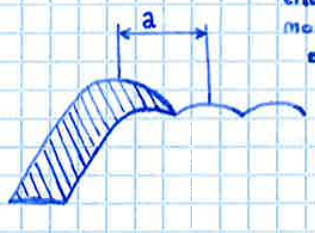

Tagliente che sta tagliando (spigolo)
→ Taglia in direzione <u>circonferenziale</u> (uscente dal foglio)

Truciolo a forma di parallelogramma → Area è sempre $\boxed{a \times p}$ → profondità di passata
Sezione del truciolo teorica
avanzamento

Utensile → percorso a elica → moto circolare di taglio + moto rettilineo di avanz.
Moto di lavoro (combinazione di)

Si nota dal profilo di superficie lavorata → Per piccole ondulazioni
contro luce o toccando

Essendo la forma del truciolo non perfettamente a parallelogramma
Utensile spostandosi non lo ricopre completamente




Ma noi per semplicità usiamo sezione teorica del truciolo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 340

Angoli del profilo

$\psi$ angolo del tagliente principale

$\psi'$ angolo del tagliente secondario

$\varepsilon$ Angolo dei taglienti

$\lambda$: angolo di inclinazione del tagliente principale $\lambda$

Esistono anche $\chi$ e $\chi'$ (Angoli di registrazione principali e secondari)

↓

Conseguenza di $\psi$ e $\psi'$ → Angoli del tagliente

↓

Complementare

↓

inclinazione di tagliente rispetto a superficie da lavorare

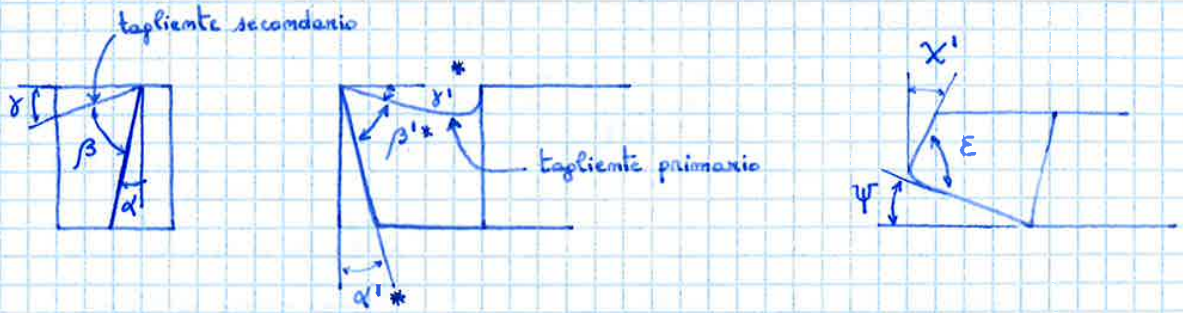
$\psi$: tra proiezioni del tagliente principale e dell'asse dello stelo sul piano di riferimento

$\psi'$: " " " " secondario " " " " " " " "

$\varepsilon$: Sul piano di riferimento tra proiezione di tagliente principale e di secondario

$\lambda$: angolo di tagliente principale con il piano di riferimento

Sezione normale e del profilo




Utensile destro

→ In lavoro si sposta da destra verso sinistra

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 340

## Angolo di spoglia superiore principale $\gamma$

$\gamma$
→ Influenza scorrimento ($\varphi$)
↓ Influenza (insieme a $\lambda$) Come si forma il truciolo
→ Influenza deformazione del truciolo
→ Influenza anche scorrimento sul petto dell'utensile
↓ $\gamma$ grande
↓ scorrimento favorito
→ Angolo di scorrim. $\varphi$ cresce

Se $\gamma$ aumenta → $\varphi$ aumenta

$\gamma$ piccolo → $\varphi$ diminuisce

Sarebbe meglio usare $\gamma$ grande
→ Diminuisce $F_t$
→ Diminuisce $\varepsilon$ (deformazione)
→ Meno attrito
↓ T più bassa
→ Riduzione di potenze assorbite

MA diminuisce robustezza di utensile (spigolo del tagliente)
→ Utensili moderni fragili
→ $\gamma$ anche negativo
→ Se si deve lavorare acciaio duro
→ Serve $\gamma$ piccolo

$\gamma$ influenza anche
→ Attrito di scorrimento del truciolo sul petto dell'ut.
→ Si riduce all'aumentare di $\gamma$
→ Estensione di sezione resistente
→ Si riduce all'aumentare di $\gamma$

2 Strumenti → $\gamma$ positivo → Truciolo continuo perfettamente fluente
→ $\gamma$ negativo → Truciolo ha forma più segmentata

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 340

$\chi$ influisce su rugosità di superficie lavorata

Determina forma che avrà la superficie lavorata

Dipende da $\chi$

da a (avanzamento)

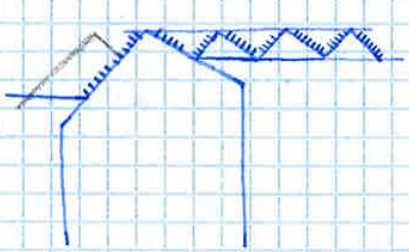
da raggio di raccordo tra i due taglienti

Tagliente perfettamente inclinato e affilato

↓

Anche se ripassa su stessa zona

↳ Una piccola ondulazione rimane



## Angolo di inclinazione $\lambda$

↓

Ha influenza su robustezza della punta dell'utensile

Se $\lambda < 0$

↓

utensile sottoposto solo a compressione

↓

Meglio → Soprattutto per ceramici fragili

Influisce insieme a $\psi$ su direzione che prende il truciolo

$\lambda > 0$ → Truciolo se ne va verso esterno del pezzo

$\psi = 0$ (Utensile a coltello)

$\lambda < 0$ → Truciolo va verso interno del pezzo → Difficoltà di evacuazione

↓

Può danneggiare superficie lavorata [1]

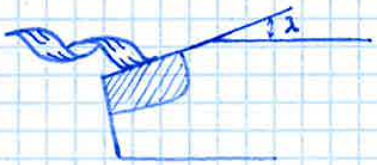
→ [2] operatore → Truciolo è a 1000 °C

→ [3] organi di macchina

Se usato si mette ROMPITRUCIOLO su utensile

↳ Fa in modo che si rompa in tante piccole scaglie

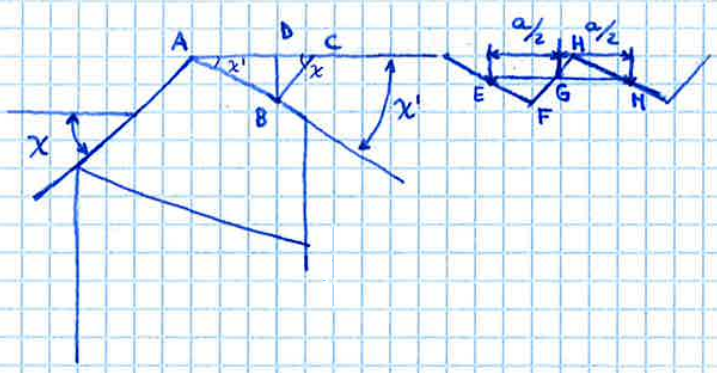
Con mat. ceramici




$\psi = 0$ (utensile a coltello)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 340




Rugosità massima $Rt^*$ → dislivello massimo tra picco e valle di superficie

↳ Si riduce grazie a raggio di raccordo

↓

BD

$$AD = BD \cdot \frac{\cos \chi'}{\sin \chi'} = BD \cot \chi'$$

$$DC = BD \cdot \frac{\cos \chi}{\sin \chi} = BD \cdot \cot \chi$$

$$AD + DC = a \quad \text{(avanzamento)}$$

$$BD \cdot (\cot \chi' + \cot \chi) = a$$

$$BD = Rt^* = \frac{a}{(\cot \chi' + \cot \chi)} \cdot 10^3 \rightarrow (\mu m)$$

↓ Al crescere di ampoli di registrazione e di avanzamento

↳ Aumenta rugosità teorica

→ Si usano ampoli di registrazione bassi e piccolo avanzamento

Lo stesso vale per la rugosità media Ra

$$Ra = \frac{\text{area } EFG + \text{area } GHM}{a} = 2 \frac{\text{area } EFG}{a} = \frac{Rt^*}{4}$$

$$\left( \frac{\text{area } ABC}{a} = \frac{Rt^*}{2} \right)$$

↑

Per linea media aritmetica

$$A = \frac{b \cdot h}{2}$$

Lavorazione si divide in più passaggi

Sgrossatura (a ampio)

↓

Portan via più mat. possibile

Finitura (a piccolo)

↓

Passate per ottenere buona rugosità

Non interessa portar via materiale

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 340

Problemi di tipo chimico

↳ T elevate → Attenzione a ossidazione di acciaio

↓ MA se non si usa acciaio

↓ In mat. di utensile c'è CARBONIO

↓ Diffusione verso acciaio

↓ Utensili si DECARBURANO (si indeboliscono)

↓ Attenzione a saldature tra utensile e pezzo a causa della elevata temperatura di lavoro

Mat. principali per utensili

- Acciai (usati sin da '800)

↳ A inizio '900 → Acciai rapidi

e poi → Acciai supernapidi

↓ Con elevato tenore di carbonio (fino 1%)

↳ Più duri

↳ Meno tenaci (più fragili)

↓ Ma la sua durezza a T elevata CROLLA

↓ Non si possono superare 300°

↳ A velocità basse solo

Acciai rapidi → Legati con TUNGSTENO (18 %) → Elevata percentuale

(Molibdeno) 10%

↓ Ha durezza maggiore

↓ Ma comunque crolla ad alta temperatura

Acciai supernapidi → Hanno anche COBALTO

↓ Riduce durezza → HV = 850 ma la garantisce fino a 500°C

↓ Usati spesso perché sono sagomabili facilmente e economici

↳ Forme che voglio

↓ hanno resilienza

↓ Non si rompono

↓ Vibrazioni → URTI

→ Vanno bene per grezzi di fusione → molto difettati → URTI

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 340

Inserti di carburi metallici → Tutti i lati sono taglienti
(8 taglienti utilizzabili)
↓ Si gira quando si usura un tagliente
↓ NO affilatura tradizionale

↓ Bloccati su stelo
↓ Spesso con VITI o morsetti

Materiali ceramici (ossidi di alluminio) → sinterizzazioni di ossidi di alluminio e ossidi alcalino terrosi
↳ Prestazioni ancora più elevate
→ HV maggiore → Fino a 2000
→ T maggiore di lavoro possibile
↳ HV diminuisce meno con T
↳ fino a 1200°C

↓ MA
Troppo fragili
↳ Fino a qualche anno fa non usati
↳ Ora → macchine vibrano meno
↳ Usata miscela CERMET (con dei metalli) per migliorare fragilità

## Nitruro di Boro cubico

(Come mat. ceramici)
→ Durezza molto molto elevata (simile al diamante)
→ Meno fragile di diamante
e NON ha carbonio → No diffusione in pezzo metallico
→ Prestazioni superiori a tutti altri → T a 1200°C e oltre
↓ molto costoso
↳ ma in espansione per prestazioni elevate

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 340

Se strumenti si usurano → Taglienti si danneggiano

↓

Progressivo deterioramento delle superfici che lavoriamo → non mantiene geom. iniziale per un tempo infinito

↓

È importante per qualità (uniformità dei pezzi prodotti)

Per sollecitazioni meccaniche, termiche e chimiche

Diversi tipi di usura

- Usura per abrasione → Presenza di particelle di elevata durezza
- Usura per diffusione → Passaggio di atomi tra utensile e materiale per affinità chimica
- Usura per ossidazione → Ossidi di W e Co
- Usura per adesione → Tagliente di riporto si salda
- Usura per fatica → Cicli di forze e temperature che variano
  ↓ Danneggiano utensile
- Usura per deformazione plastica → Compressione e scorrimento - deformazione

Principali modi di usura di utensile

→ LABBRO DI USURA → Sul tagliente (su fianco) si asporta materiale → danneggia utensile
↓ Si ripercuote direttamente su finitura superficiale

→ CRATERE DI USURA → Si stacca del materiale da petto
↓ indebolim. di utensile

Per misurare l'usura → Non ci sono misurazioni univoche → Lungh. di labbro di usura / Profondità del cratere ecc.

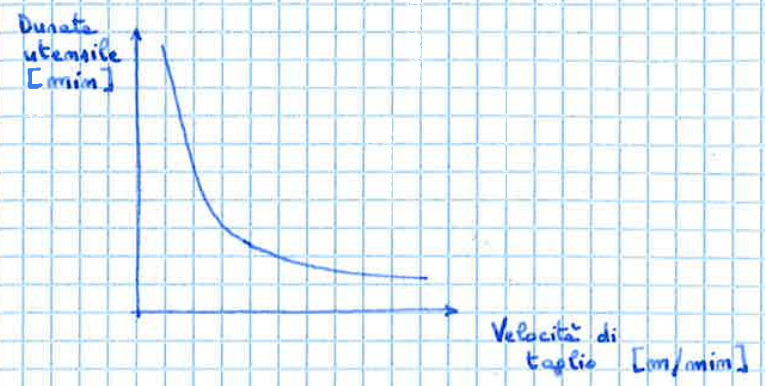
↳ Spesso indirettamente → vedendo rugosità di superficie lavorata

Un indicatore: RUMORE

↓ Utensile cambia la sua frequenza propria

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 340




Per Stampaggio → Problema di fattibilità

Processi di taglio
↓
Si possono sempre realizzare
↓
PROBLEMA → Costo
→ ottimizzazione di tempi di lavoro per aumentare produttività
↓
Gestito da Ufficio tempi e metodi

Costi dipendono dai parametri di taglio
- → Profondità di passata p
- → Velocità di avanzamento Va
- → Velocità di taglio Vt

Criteri di ottimizzazione
- → Criterio del minimo costo → V bassa → usura meno l'utensile
- → Criterio del minimo tempo (massima produttività) → Costo alto → V elevata

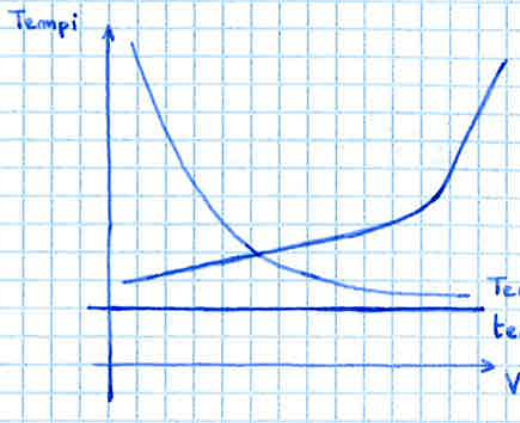
Estremi → In aziende: VIA DI MEZZO

Dipendono da → esigenze funzionali
- → Parametri di macchina
- → Parametri di lavorazione

} Condizioni limite

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 340




Tempo di cambio utensile $t_u = \frac{t_\ell}{T}$

→ Aumentano (e costi) tempi di cambio utensile perché diminuisce vita utile di tagliente

Tempo di lavorazione $t_\ell$

tempi passivi $t_p$

Prima di Controllo numerico

$t_p \gg t_\ell$

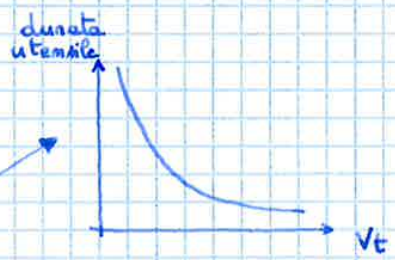
→ Non ci si curava di avere V di taglio tanto elevate

Tempo di lavorazione

$$t_\ell = \frac{L}{V_a} = \frac{L}{a \cdot n} \qquad \left( n = \frac{V_t \cdot 1000}{D \cdot \pi} \right)$$

$V_a$ → velocità di avanzamento

$$t_\ell = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{a \cdot V_t \cdot 1000}$$




Per durata del tagliente si usa legge di Taylor

$$V_t \cdot T^m = C$$

$$T = \left( \frac{C}{V_t} \right)^{1/m}$$

m: coeff. di durata dell'utensile

C: costante di v di taglio che consente un min. di durata di utensile

Per minimizzare il costo / il tempo

→ Dove curva crescente e decrescente sommandosi → Hanno il minimo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 340

Criterio di Massima produttività → In generale non conviene

↳ $t_t$ non diminuisce di molto ($t_p$ è comunque alto)

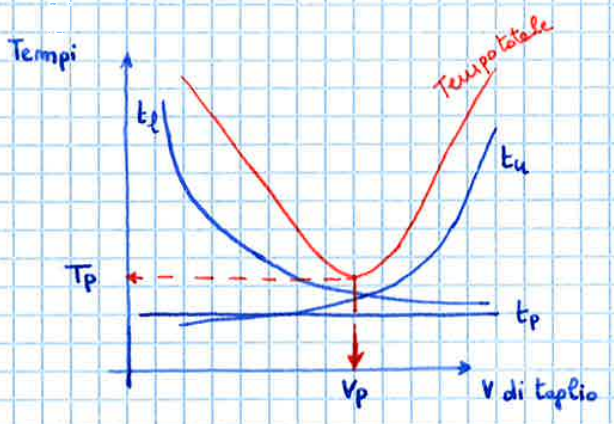
↓ E costi aumentano abbastanza

$$t_t = t_p + t_\ell + t_u \cdot \frac{t_\ell}{T}$$

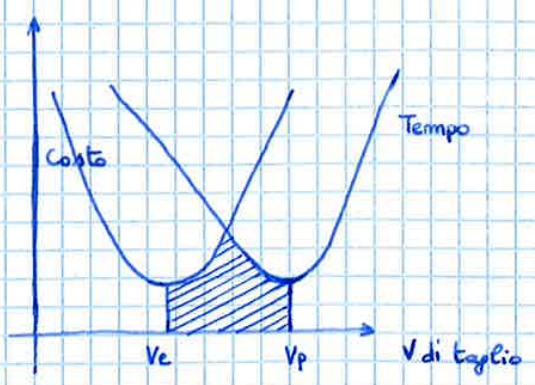
$$\frac{dt_t}{dV_t} = 0 \longrightarrow T_p = \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot t_u$$

↳ Solo tempo perso per cambiare utensile

$$V_p = \frac{C}{T_p^{\,m}}$$




Mettendo insieme i due grafici




Zona $V_e < V < V_p$

↳ Buona per decidere in che condizione lavorare

↓ A seconda anche di domanda mercato

$V_e < V_p$

A $V < V_e$ → Aumentano costi e tempi

A $V > V_p$ → Aumentano tempi e costi

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 340

Tempo totale

$$t_{tot} = t_p + t_{lav} + t_u \cdot \frac{t_{lav}}{T}$$

$t_{tot}$ → Ecom: 2,65 min

$t_{tot}$ → Max. Prod: 1,91 min

Costi di lavorazione

$$C_{tot} = C_p \cdot \left(t_p + t_{lav} + t_u \cdot \frac{t_{lav}}{T}\right) + C_u \cdot \frac{t_{lav}}{T}$$

$C_{tot}$ → Ecom: 1,10 €

$C_{tot}$ → Max. Prod: 2,39 €

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 340

→ Componenti filettati → Tornitura / Fresatura / Rettifica
Rullatura
Maschiatura
↘ Servono processi specializzati

→ Forme di piccole dimensioni complesse
(Inferiori al millimetro) → Microfusione, Sinterizzazione

→ Forme di grandi dimensioni → Fresatura chimica o assemblaggio
↘ Stampaggio, fonderia, saldatura

Competitività di azienda dipende molto da ciclo di lavorazione
e
Produttività
↓ Importante perché può ridurre di molto costo di produzione
Costo di manodopera è una piccola %

Ciclo va pianificato in modo razionale → Insieme ordinato per arrivare in passi successivi a forma finale
↓ No doppioni / scarti, ecc.
↳ Si pianifica posizione tenendo conto di effetto su lavorazioni successive

↓ Non c'è una soluzione univoca
↳ Pianificazione non si è riuscita ad automatizzarla con CAP
↓ Rimane Manuale
↓ Dipende molto da esperienza
↳ Spesso si adatta a macchine che si dispongono in azienda

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 340

## Analisi del disegno

1: quote → per vedere dimensioni e capire che macchine si possono usare
→ Per scegliere grezzo di partenza

2: Tolleranze (dimens. e geom.) e rugosità richieste → A seconda di esse
↓
Si scelgono i processi da usare
→ Ci sono diverse operazioni che realizzano stesse tolleranze (rugosità)

Noi lo facciamo solo di tornitura partendo da un cilindro grezzo
↓ Ciclo semplice
→ Di 3 tipi:
- Sgrossatura
- Finitura
- Rettifica

3: Caratteristiche meccaniche
(materiale del pezzo ed elementi significativi)

4: Numero di pezzi da produrre

5: Connessione con altri elementi

Foro con $Ra = 1,6$ con fondo conico → Utensili con punta elicoidale

Scanalatura + Rugosità molto bassa
↓
Forse si monterà un cuscinetto a sfere
↓
Per ottenerla serve mola
↓
Non lavora bene di spigolo
↓
Serve spazio di fuga a mola per rettifica
↓
Scanalatura

Smussi per evitare di tagliarsi
↓ approssimativi

Raccordo R0,5 max
→ Poco importante
→ Implica una bassa rugosità con quegli strumenti
↓
Non oltre un certo livello

Ci sono indicazioni per la tecnologia → Se uso un'operazione a cui non servono (un metodo)
↓
Posso non considerarle

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 340

## Rugosità

25 ÷ 12 Fusione - Stampaggio

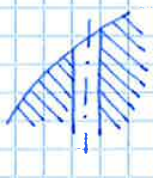
6 ÷ 3,2 ÷ 1 Tornitura → Oggi si può arrivare anche a 0,5 - 0,8 con macchine normali
↓
Sono più precise

Sotto 1 μm Rettifica

Sotto 0,2 ÷ 0,1 Lappatura

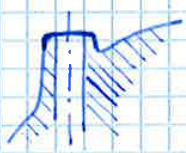
Disegno
↳ Si può ancora modificare se ci sono problemi per lavorazioni

Es: Problema di foratura

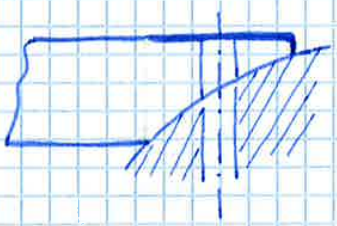


Punta elicoidale viene deviata

Soluzioni



Si possono realizzare attrezzature apposta
↓
ES: MASCHERA DI FORATURA
↓
Costoso → Ad esempio Maserati spendeva molto solo in attrezzature
↓
le ha potute ridurre



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 340

Sottofasi sono poi suddivise in Operazioni elementari → Che possono essere di sgrossatura o di finitura

Tornitura → 1ª Sottofase → Sfacciatura
→ Tornitura Cilindrica

Tornitura → 2ª sottofase → Sfacciatura
→ Tornit. cilindrica
→ Centratura
→ Foratura
→ Alesatura

Fresatura → Spianatura
→ Contornatura

Rettificatura → Rettificatura cilindrica interna

Scelta della sequenza
↓
Coerenza logica e minimo costo

a → Sfruttando meno macchine utensili possibili
↓
Raggruppamento di operazioni per MU
↓
Tant'è che si sono modificati i torni → Per fare più lavorazioni

b → Evitando ripetuti montaggi / smontaggi
→ Non hanno valore aggiunto → Non alzano prezzo di vendita
→ Devono essere ridotte al minimo possibile
→ Ridotte fasi e sottofasi
→ In un montaggio si fanno tutte lavoraz. possibili con quella configurazione
↓
Anche per precisione → Ad ogni montaggio / smont. Cambia posizione di asse
→ Meno preciso

c → Valutare operazioni indispensabili
→ Facendo a meno di quelle che non lo sono
↓
Sacrificabili

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 340

# MATERIALI

| | Finitura | Costo | Resist. shock termici | Resist usura | Vt | Tenacità (Resistenza) | Durezza a caldo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Acciai al carbonio | Ruposa | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| HSS | Ruposa | | | | | | |
| WC | Buona | | | | | | |
| WC rivestiti | Buona | | | | | | |
| Ceramica | Molto buona | | | | | | |
| CBN | Molto buona | | | | | | |
| Diamante | Eccellente | | | | | | |

Se mi serve resistenza a shock termici e tenacità (probl. di urti)
→ Acciai

Se ho probl. di usura → Usati ceramici / CBN

Geometria di inserti
- → Unificate
- → Molto varie
- → Più tozzi : poco precisi ma robusti
- → Romboidali : precisi ma delicati
  - ↓ Va bene per finitura

In finitura → Serve utensile preciso → che tagli superficie con esattezza

In sgrossatura → serve utensile robusto

Per Sgrossatura e Finitura → 2 utensili diversi (anche se forma è uguale)

↓ Perché con sgrossatura si deforma, usura e rovina inserto
→ dopo, in finitura, mi serve utensile preciso

Sgrossatura → Tornazzamenti ad alte V di avanz. e grande p di passata
- ↓ moto semplice e rettilineo
- → Lascia segno di tornazze (gradini)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 340

Con $f_m$ e $x_c$

Ottengo $R_{max}$ → Da cui poi si calcola Ra (rugosità media)

↓

Rugosità massima

V di taglio in tabella

↓

Relativa ad una durata del tagliente

↓

Se voglio durata maggiore / minore

↓

Coefficiente correttivo ottenuto con legge di Taylor

Per realizzare GOLE / scanalature

Utensili per gola (di forma)

↓

Hanno dimensioni di gola proprio

Per foratura

↓

Operazione preliminare necessaria

↓ Senza:

Punta vennebbe flessa per pressione in fase di impresso → Foro viene più grosso di quello desiderato (perché utensile entra storto)

CENTRATURA

↳ Invito per fare in modo che punta sia centrata sul centro del foro

In tornitura → Noi consideriamo movimento di pezzo in mandrino e utensile fermo

↳ Spesso in azienda si mette un mandrino sull'utensile

↓

Utensili motorizzati

↳ Per pezzi non assialsimmetrici

Per noi lavorazioni non assialsimmetriche

↳ Su Fresa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 340

avanzam. / Vt / N / T : tempo di lavorazione

V di taglio — velocità di rotazione

Si deve scegliere da che parte iniziare (posizionamento)

↓ In modo che in ultimo montaggio

↓ presa su materiale più robusto e meno preciso

↓ In modo da fare lavorazz. più delicate per ultime

FORO (anche se passante)

↓

Dev'essere fatto tutto da un lato

↳ Perché smontando / Rimontando si perde asse di simmetria → Si perde precisione

Sgrossatura
- Sfacciatura
- Tornitura cilindrica esterna di sgrossatura → Attenzione a parte in presa
  ↳ Conviene disegnare "vincoli" per ricordarsene
- Smusso a 45° esterno

Lavorazioni tutte con stesso utensile → per risparmiare tempo di cambio utensile

RIBALTAMENTO

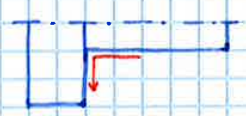
↳ Serve ricercarsi sup. di riferimento (a ogni sottofase) → Sfacciatura di sgrossatura ($\chi = 45°$)

- Tornitura cilindrica esterna di sgrossatura → spallamento → $\chi = 95°$
  ↳ profondità di passata : 14,5 → differenza dei raggi
  - 1 passata da 2,5
  - 4 passate da $p = 2$

- Sfacciatura di finitura
- Tornitura cilindrica esterna di finitura

→ processi lunghi ma precisi

+ esecuzione di spallamento



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 340

Esempio di cartellino industriale

↓

Per macchine a controllo numerico

↳ Ogni indicazione corrisponde ad un blocco codice di macchina

Esempio di tornitura alla barra

↓

permette di lavorare pezzo tutto da un lato

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 199 di 340

Controtesta → per dare rigidità a pezzi lunghi

→ può essere usata per fare i fori → se si sostituisce contropunta con punta elicoidale

→ Ferma con pezzo che ruota

Utensili → Tutti montati su torretta

↓ Ruota quando si vuole cambiare utensile

## Operazioni di tornitura

- → Sfacciatura
- → Tornitura cilindrica o conica

} Fondamentali

- → Lavorazione di Gole
- → Filettatura
  - angolo tra taglienti
  - avanzam.

  } → Ben definiti → Per ottenere precisione

- → Godronatura → crea rigone per rendere semplice afferraggio
- → Foratura

## Tornitura cilindrica esterna

→ Pezzo in rotazione

- Avanzam. longitudinale
- Profondità di passata $\frac{D_1 - D_2}{2}$
- $F_t$ unica considerata per dimensionamento di motore elettrico (potenza)

$F_r$ e $F_a$ → Vanno minimizzate perché creano vibrazioni

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 199 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 201 di 340

## Filettatura

- Interna → Utensile montato molto a SBALZO → Meno preciso
- Esterna → Più precisa (meno vibrazioni)

Si lavora in 1ª passata un fianco
in 2ª passata altro fianco
→ Solo per alcuni materiali duri fatti insieme i due fianchi

## Formatura di Gole

→ Semplice inserimento di utensile di forma dove la voglio eseguire
→ Avanzamento frontale

- Se proseguo fino al centro → Troncatura
  - ↓ Ma meno precisa di sfacciatura
- Esterne
- interne

## Foratura con punta elicoidale

- Si sostituisce a contro punta in contrasta
- Per centratura spesso non è necessaria
  - La macchina garantisce allineamento su sede di contro punta

## Godronatura (Zigrinatura)

- Per superficie ruvide e per aumentare attrito di afferraggio
  - Con delle ruote scanalate contro pezzo → Poco preciso
    - Creano deformazione plastica su superficie del pezzo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 201 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 203 di 340

# LAVORAZIONE DEI FORI

Foro → Lavoraz. meccanica più varia di tutte

- → Passante } Lavorazione Base → Su qualsiasi macchina
- → Cieco
- → Filettato (maschiatura)
- → Alesato → Tolleranze di circolarità strette
- → Svasati
- → Con Lamature — Con spallamento al suo interno
  - → Ad es: per testa della vite
- → Centratura
- → Allargatura

Filettatura e Alesatura } → Macchine particolari

→ Su fresatrice a controllo numerico

Moto
- → di taglio → Rotatorio, continuo, posseduto dall'utensile
- → di alimentazione → Rettilineo, può essere dell'utensile o del pezzo
- → di appostamento → Consiste nel far coincidere l'asse dell'utensile con il centro del foro che si deve effettuare
  - → Può essere posseduto da pezzo o da utensile

• Profondità di passata coincide con mezzo avanzamento per giro (essendoci 2 taglienti)

Finitura superficiale → Con punta elicoidale
- → Base (IT 11) e Ra: 3 μm
- → Foro è leggermente più largo → Poco preciso
- → Grado di qualità tipico di una sgrossatura

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 203 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 205 di 340

Nocciolo centrale di solito è 1/10 di diametro

↓ Se fosse troppo grosso (per robustezza)

↓ Ricalca molto → Serve molta F

↓ Fa inflettere punta

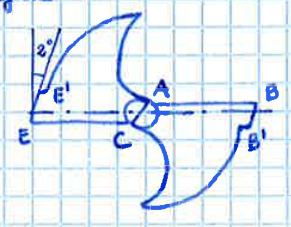
↳ foro è più grosso

"Quadretto" → Liscia superficie } → grazie a piccolo angolo di spoglia inferiore (circa 2°)

→ Fa da "guida" }

→ Ruolo di tagliente secondario

"spigolo elicoidale di guida" EE' e BB'




AB ed EC } → Taglienti

## Angoli caratteristici

φ determina maggiore/minore facilità di evacuazione di truciolo

↳ E spinta contraria a direzione di avanzamento

η determina superficie di contatto e geometria del truciolo → in modo da interferire il meno possibile con l'utensile e minimizzare attriti

Devono → garantire angolo di spoglia superiore che si adatti al tipo di materiale lavorato

→ Conferire alla punta la necessaria resistenza

→ Che impedisca rottura durante foratura

Scelti a seconda di materiali (divisi in classi)

→ N : foratura di acciai da costruzione, ghisa grigia, leghe non ferrose di media durezza

→ D : foratura di materiali duri e tenaci → punte più acuminate

↓ No probl. di evacuaz. truciolo

→ T : foratura di materiali teneri e malleabili

↳ punte meno acuminate

↳ problema di evacuazione del truciolo richiede più spazio

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 205 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 207 di 340

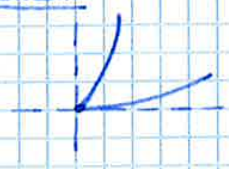
Per trovare $\phi$ → P percorre un'elica → Da combinazione dei moti rotatorio di taglio e rettilineo di avanzamento

→ sviluppata in piano crea triangolo di lati $a$ e $\pi \cdot d$

$$tg\,\phi = \frac{a}{\pi d}$$

Varia in base a posizione di P e ad avanzam.

→ Angoli di spoglia effettivi variano



Se P è sull'asse di punta → $\phi = \frac{\pi}{2}$

↓

Avvicinandoci al centro $\phi$ aumenta

↓

Ad un certo punto avremo tallonamento ($\alpha$ diventa nullo)

→ Tagliente striscia su superficie lavorata

Per risolvere problema → Affilatura particolare con angoli non costanti dal centro alla periferia

In realtà forma di taglienti

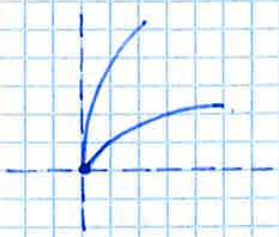
→ Per angolo di spoglia dorsale

fatto in modo che ↓ (apparente) angolo di spoglia nominale $\alpha_0$ vari

Più grande verso asse e più piccolo verso periferia

↓

perché angolo $\alpha$ effettivo crescerebbe verso periferia (diminuendo $\phi$)



Per angolo di spoglia frontale

→ Fatto in modo che Angolo effettivo $\gamma$ diminuisca da periferia a punta (diminuendo $\phi$) verso periferia

→ $\gamma_0$ cresce verso periferia

↓

diminuisce verso il centro

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 207 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 209 di 340

## Alesatura

→ Foro già fatto

Obiettivo non è asportaz. di materiale come in foratura e allargatura

Si porta via pochissimo materiale ($1/10$ mm di sovrametallo)

Per migliorare di molto le tolleranze del foro → CALIBRATO

→ Circolarità e Rugosità $Ra = 0,8$ μm

Testa di alesatura → Trasmette moto a mandrino
collegata a
Stelo con utensile monotagliente
e
a dispositivi di registrazione micrometrica

↓ Utensile leggermente sbilanciato

↓ non molto preciso

→ Si usano alesatori pluri taglienti → se fori sono piccoli e utensile monot. non entra

→ Bilanciati

- Non serve profilo elicoidale perché si asporta poco materiale
  → Taglienti di piccole dimensioni
- Alesatore entra all'inizio perché leggermente CONICO (1:50) in "imbocco"
  ↓ Avanza tagliando circolarmente
  → Moto elicoidale
  → parte successiva (guida) è cilindrica o leggerm. rastremata verso il codolo
  ↓ per ridurre attrito contro sup. del foro alesato

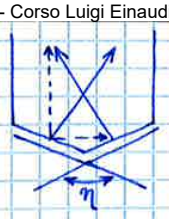
- Utensili a mano
  → Più lunghi i taglienti
  → per fare da guida nel foro

- Taglienti a denti diritti
  → Soggetti a vibrazione torsionale
  ↓ Conseguenze negative su finitura superficiale del foro
  - elicoidali

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 209 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 211 di 340

## Coppia e potenza di taglio

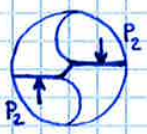



Forza di taglio (penetrazione) → 2 componenti radiali equilibrate tra loro

→ 2 componenti assiali che non si bilanciano → Forza di penetrazione

→ Moltiplicata poi per due per tener conto di nocciolo

Coppia di fonatura → Si immagina F applicata a metà tagliente




$P_t$ pressione di taglio

Sezione di truciolo → metà avanzamento $\left(\frac{a}{2}\right)$ per raggio $\left(\frac{D}{2}\right)$ (per ogni tagliente) → Ce n'è 2

$$S = \frac{a \cdot D}{4}$$

$$P_t \cdot S = F_t$$

$$F_t \cdot \underbrace{\frac{D}{2}}_{\left(\frac{\pi}{2} \cdot 2\right)} = C_t = P_t \cdot \frac{a \cdot D^2}{8} \cdot \frac{1}{1000} \quad [N \cdot m]$$

Basta calcolo approssimato → Di solito sovradimensionato

Potenza $W_t = C \cdot \frac{2\pi n}{60}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 211 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 213 di 340

**Fresatura**

- Su pezzi prismatici → per superfici piane o inclinate
- Se Manuale → O sul piano — spianatura
  - No superfici complesse
  - → Cavità o scanalature o fori → Su pezzi privi di asse di simmetria rotazionale
- Con utensili pluritaglienti detti FRESE → ogni singolo dente ha sue caratteristiche geometriche
  - → Produttività elevata → ogni pino asporta più materiale

Moto di taglio circolare posseduto da utensile

- Utensile può lavorare su sup. → LATERALE / FRONTALE

Fresatura periferica → Asse di rotazione di fresa è parallelo alla superficie di lavorazione

- → Fresa a disco o cilindrica → Tagliente su sup. laterale del disco
- → Si può sostenere fresa su entrambe estremità
  - → Supporto rigido
    - → Si può ottenere grande precisione
- Non può fare percorsi complessi
- Alternandosi i taglienti → molti urti (ogni volta che un dente entra in contatto su sup. del pezzo)
  - → Grandi vibrazioni

Soluzione: denti elicoidali

- → Ci sono sempre più denti in presa
  - → In ogni sezione diverse configurazioni
- → Distribuzione più regolare → NO vibrazioni
- → E denti entrano in presa gradualmente

Unico problema → generano spinta assiale i denti elicoidali

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 213 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 215 di 340

In fresatrice
↳ Testa mette in rotaz. mandrino

Movimenti di avanzamento e di appostamento ] → Posseduti da tavola portapezzo (su slitta)
↓
Funziona a mensola

↓
2 motori elettrici (1 in mensola e 1 in mandr.)

In tornio (c'è solo 1 motore elettrico per tutto)

In fresatrici moderne a CN
↳ Si muove solo testa
(Pezzo tenuto fermo)

Brocciatura

Per realizzare fori sagomati
↳ Utensile che abbia in negativo la sagoma
↓
Dopo aver realizzato foro → utensile scorre rettilineamente in foro

Utensile con una serie di denti che tagliano frontalmente
↓
I primi: meno profondi (di sgrossatura) ] → Come per maschio
fino a denti di finitura più profondi
C'è una fase intermedia

Lavorazioni → Veloci e precise

MA ogni utensile deve avere una propria forma
↓
deve essere costruito appositamente

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 215 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 217 di 340

Appostamento
- → Fresa manuale → dato al pezzo
- → Fresa a CN → dato a mandrino

## RETTIFICA

Finitura per migliorare qualità del pezzo
↓
Si asporta pochissimo materiale con MOLA → Trucioli piccolissimi
MA
→ Si muove a velocità elevate (10 volte quella di fresa)

Si ottiene Superficie NON lucida
→ Piastrelle di grani

(Lucidatura poco precisa → Solo estetica)

Utensile con geometria non definita
↓
Gran numero di grani abrasivi messi in agglomerato
↓
Ognuno si comporta come se fosse un tagliente
Non si possono controllare parametri e geometria

Risultato → Precisione dimensionale elevata (1 μm)
↓
IT 6

→ Rugosità molto bassa (sotto a 0.1 μm)

Si può controllare appostamento in FORZA
→ Si possono lavorare pezzi presi di fusione / stampaggio con mole
→ Mole è indifferente a geometria
↓
Levigatura

- Oppure si possono rettificare pezzi già lavorati per asportazione di truciolo o che abbiano subito trattamenti termici

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 217 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 219 di 340

Rettifica → Simile a tornitura cilindrica esterna (Rettifica IN TONDO)
→ mola montata su testa
↓ Può ruotare → moto di taglio
→ Ha moto di appostam.

Pezzo ruota e trasla → Doppio avanzamento
↓
Unico caso con avanzamento rotatorio

Rettifica → Come fresatura (Rettifica IN PIANO)
→ Tangenziale — prod. limitata
→ Frontale → Si controlla meglio macchina
ma a sbalzo → meno precisa

(• C'è anche una rettificatrice universale)

• Speciale
↓
per gole, filettature, ruote dentate, ecc.

A Televate (1000°C)
↓ → Si usano lubrorefrigeranti
Attrito: microsaldature ↔

<u>Codifica NORTON</u>
↓
per le mole

1: Tipo di abrasivo — di cosa è fatto grano abrasivo → $Al_2O_3$ → equivalenti a utensili ceramici
"Alundum"
→ SiC
"Carborundum"
↓ molto duri e fragili
↓ non possono essere usati da soli
Serve legante resiliente

2: Dimensioni di grano abrasivo
↓
"Numero di reticolati che un setaccio deve avere per pollice per estranei"

Polvere di diamante (Solo superficie esterna)

Oltre i 200 (molto fini) → Polvere in sospensione acquosa → grani piccoli rimangono a galla per tensione superficiale

– Grani piccoli → per avere finitura maggiore

grossi → per asportare più materiale → MA finitura peggiore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 219 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 221 di 340

## Lappatura

Processi di SUPERFINITURA
→ Precisione maggiore di rettifica

Non c'è utensile → Grani abrasivi in sospensione in olio
↓
Da mandare in pressione sul pezzo

(Tra disco e pezzo c'è olio vincolato)
↓ Premuto e tenuto in pressione su sup. di pezzo
↓
Mettendo in moto il disco
→ Per attrito idrodinamico olio si mette in movimento
↓ vortici
→ Grani abrasivi vanno a sbattere su superficie di pezzo
↓
Abbassa molto rugosità

Annulla picchi di rugosità
↓
Unendo due pezzi
→ Non si riescono più a separare
↓ Patm li tiene uniti perché tra essi non c'è più aria

Uso → Pezzi per verifiche e collaudi in metrologia

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 221 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 223 di 340

TORNITURA CONICA

↓ inclino utensile (tornetta) e a mano lo faccio avanzare → Si muove su retta inclinata

↳ Poco precisa (CN precisa)

Se tornitura piccola (conicità piccola)

↳ tornetta avanza normalm.

↳ Contrattesta spostata radialmente

↳ Asse di pezzo inclinato

FILETTATURA

↳ Prima serve gola / smusso

↓ Per non far rompere utensili / rompere filetto

↳ Fatta per ultima

↳ Ultimo montaggio per permettere filettatura da altra parte

Per montare i pezzi sul tornio

→ Punta e contropunta → Va bene per pezzi lunghi

↓ No flessione

↓ Preclude una serie di lavorazioni

↓ Richiede centratura → rovina una superficie

→ Montato su mandrino testa autocentrante → Pezzo montato a sbalzo

↳ 3 griffe che si chiudono di stessa quantità → Centriamo pezzo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 223 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 225 di 340

# MACCHINE A CONTROLLO NUMERICO

Da macchina utensile
↓ a
Sistema di produzione : Insieme di macchine e risorse umane che compiono operaz. complesse → Trasformazione o montaggio di un grezzo o di una parte

Se si controllano le diverse attrezz. / macchine con computer → CN

Include
- Sistemi di Movimentazione e sostituzione di utensile
- Macchine utensili per la lavorazione
- Attrezzature di bloccaggio
- Computer in grado di controllare / coordinare gli altri componenti

Macchinari Tutti integrati e controllati da computer

## Automazione

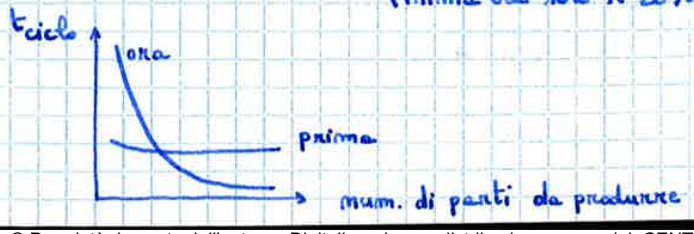
- Specializzazione di operazioni → $-t_{improduttivo}$
  (No macchina universale)
- Operazioni contemporanee → $-t_{te}$ (taglio effettivo)
- Riduzione dei tempi di attrezzaggio (set up) → $-t_{su}$ (set up)
- Automaz. di movimentaz. dei pezzi → $-t_{improduttivo}$

$$t_{ciclo} = t_{taglio\ effettivo} + \underbrace{t_{improduttivo} + t_{set\ up}/Q}_{t_{passivi}}$$

$Q$ → dimensione del lotto

In alcuni casi $t_{set\ up}$ così breve che si possono fare lotti unitari

$t_{taglio\ effettivo}$ diventa 80-90 % di $t_{TOT}$
(Prima era solo il 20 %)




© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 225 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 227 di 340

Con CN

Un sist. automatico opera secondo un percorso fisso

↳ In sistemi semi-automatici
↳ Si possono modificare LINEE di produzione
↳ Non più obbligati a seguire linea (percorso fisso)
↳ Approccio da officina meccanica

FMS
Flexible manufactory system
↳ Percorso che deve seguire pezzo deciso in modo flessibile
↳ Con carrello robotizzato AGV

Movimentazione del pezzo → diretta
↳ Attraverso un pallet (attrezzo di bloccaggio trasportato insieme al pezzo) da lavorare

Funzioni del Calcolatore

- Fa eseguire programmi / istruzioni (come cicli di lavoraz.)
- Controlla movimentazioni → Può fare qualsiasi percorso (Contemporaneam. in direzioni diverse)
  ↳ Può realizz. superfici complesse (scolturate)
- Verifica di sist. di qualità in tempo reale
- Download di programmi di lavoro
- Gestisce operazioni
- Schedulazione della produzione
- Diagnostica dei guasti
- Statistica
- Comunica con operatore e da istruzioni

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 227 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 229 di 340

CN

"Sistema in cui azioni sono controllate da inserimento di dati numerici ad un certo punto"
↳ Convertiti in segnali di OUTPUT

- Nato prima del calcolatore 1950 circa

Con avvento del PC → Tante macchine con un solo PC (1960) che le controlla
↳ DNC: controllo numerico diretto

Da 1970 → CNC controllo numerico computerizzato

Centri di lavoraz. con CN a bordo macchina → PC è parte della macchina
↓
Si programma direttamente PC vicino a macchina
↓
Operazioni computazionali semplici
↳ Bastano computer poco potenti

Costava sostituire tutte le macchine
↓
Non ebbe diffusione immediata

## Idea di Base

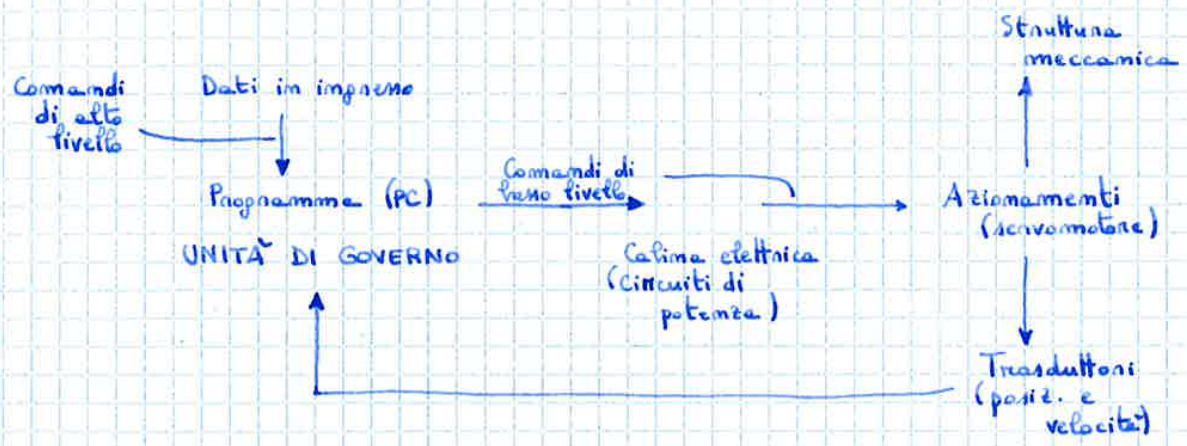
Comandi dati da PC alla macchina
↓ Inserendo in sistema
Istruzioni codificate → Non sono molte → Codici e programmi semplici
↳ Il sistema le interpreta e le fa fare alla macchina (azioni) e movimenti
↓
Sequenza di operazioni da eseguire in numeri e lettere

Prima: Disegno → Interpretazione, misura → Set up manuale
↓
A discrezione dell'uomo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 229 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 231 di 340

## Macchina utensile a CN




## Applicazione

CN è inizio del CAM (Computer aided manufacturing)

↓ Usato in

| | | |
|---|---|---|
| Fresatura | Taglio lamiera | Manipolazione |
| Tornitura | Elettroerosione | Montaggio |
| Rettifica | Tranciatura | Misura |
| Foratura | Saldatura | |
| Alesatura | | |

## Vantaggi e limiti

- Flessibilità di struttura produttiva
- Ripetibilità
- Alta velocità di produzione
- Elevata qualità di prodotto e meno scarti
- Riduzione costi diretti di manodopera e attrezzature → meno competente e specializzata
- Più operazioni con singolo setup → minor tempo per riposizionamenti
- Lavoro non presidiato → Una persona per più macchine
- Riduzione aree occupate

Costo maggiore
- → Trasduttori
- → Sistemi di protezione da truciolo
- → Gestione senza accompimenti di operai → Servono attrezzature più costose
- → Richiedono qualità garantita

Programmazione richiede tempi e costi

Manutenzione → In determinati periodi da personale specializzato → Più costoso

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 231 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 233 di 340

Spesso servono di DUPLICATI di asse X, Y e Z

→ U, V, W

Programm. di MU

si fa dando coordinate rispetto a assi X, Y, Z → importanti

MU 2 Assi : torni

2 e $\frac{1}{2}$ Assi : Fresatrici per foratura → ($\frac{1}{2}$ asse è penetrazione)

3 ... 5 Assi : Fresatrici → Con 5 Assi → Sup. complesse

→ 3 Assi → Meno costose e più facili da programmare

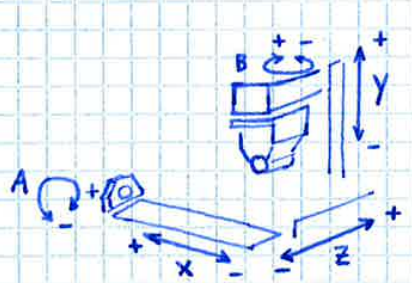
→ Non si possono realizzare sottosquadri

→ Ci possono essere problemi di tallonamento

→ Si possono eventualmente aggiungere in un secondo momento altri assi

> 5 Assi : Robot

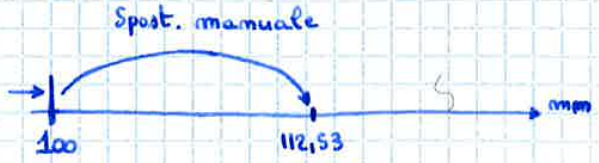
Esempio di MU a 5 assi




© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 233 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 235 di 340

Esempio




Trasd. incrementale misura 0,00 → Ha perso traccia dello zero

Trasd. assoluto misura +112,53 (Posiz. rispetto a zero iniziale)

Trasd assoluto ciclico con passo 2 mm
misura +0,53
↳ 6 p → 0,53

3. Modo di effettuare misura → misura indiretta
↳ posizionati su asse della vite della macchina (albero motore)
↓ Semplici, economici e precisi
MA
Se in accopp. vite - madrevite ci sono dei giochi
↳ Li perdo

misura diretta
↳ montato su tavola della macchina
→ Più costosi, ma più precisi
↓ Serve precisione molto alta
↳ perché di solito a molti pini di vite
↓ spostamenti di tavola sono piccoli
↓ Con precisione indiretta di 3°
↓ 1/100 mm su tavola

Per avere precisione su tavola di 1/100 mm
↓ 1/100 mm di precisione diretta

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 235 di 340

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 237 di 340

Esempi di macchine utensili a CN

- A 3 Assi → X, Y, Z

- Tornio a 4 assi (2 sdoppiati)
  - (movim. posseduto da testa di mandrino)
  - → Realizza pezzi anche con geometrie non assialsimmetriche
    - ↓ complessi

In vecchie fresatrici → Si muoveva pezzo

In quelle moderne → Si tende a tener fermo il pezzo e muovere la testa

Centro di lavoro a CN
- → deve avere → possibilità di cambiare pezzo → movimentazione del pezzo
- → Possibilità di cambiare automaticamente l'utensile
  - ATC
    Automatic tool change
    - → toglie utensile vecchio
    - prende ut. nuovo
    - mette ut. vecchio in magazzino utensili → 50/100 utensili
      - e poi mette ut. nuovo su disco portautensile
    - In magazzino porta utensili ci sarà ordine casuale
      - → sistema ottico per riconoscere utensile
  - DISCO su cui sono montati utensili diversi
    - ↓ PORTAUTENSILI UNIFICATO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 237 di 340