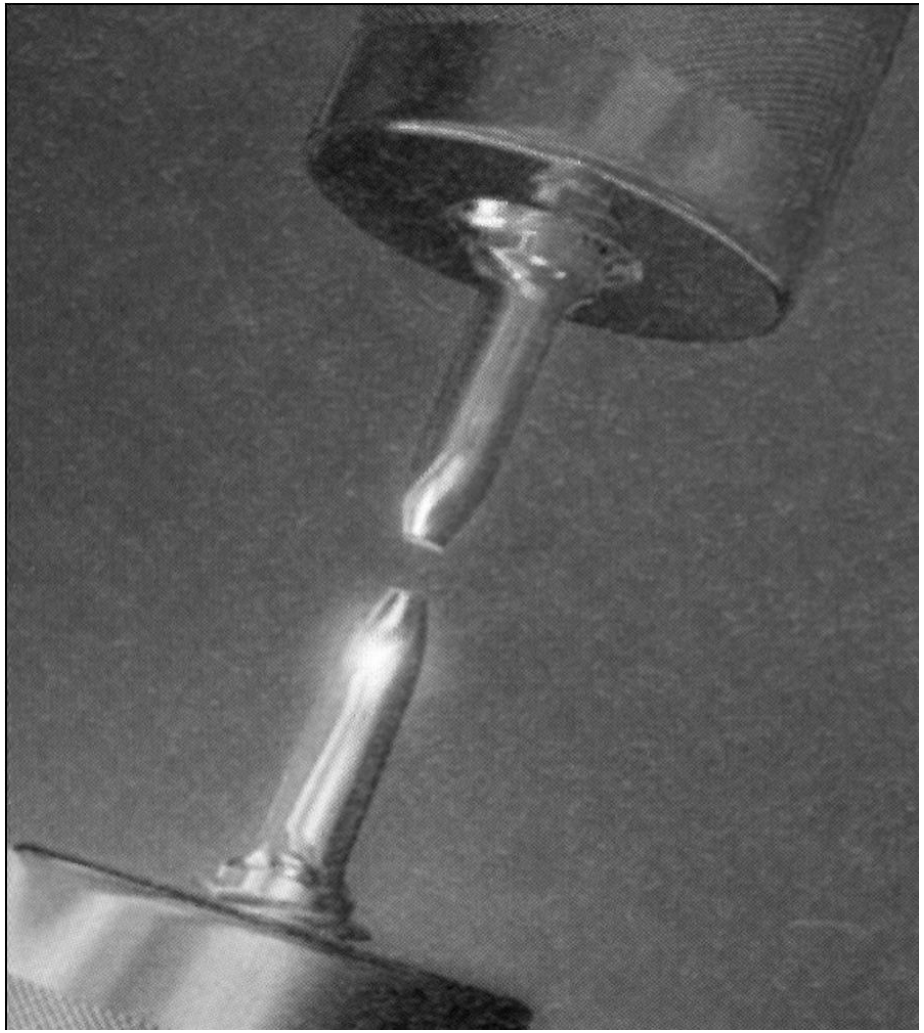
Comportamento meccanico dei materiali metallici

Principi e caratterizzazione in ambito manifatturiero



Enrico Simonetto

Precision Manufacturing Group

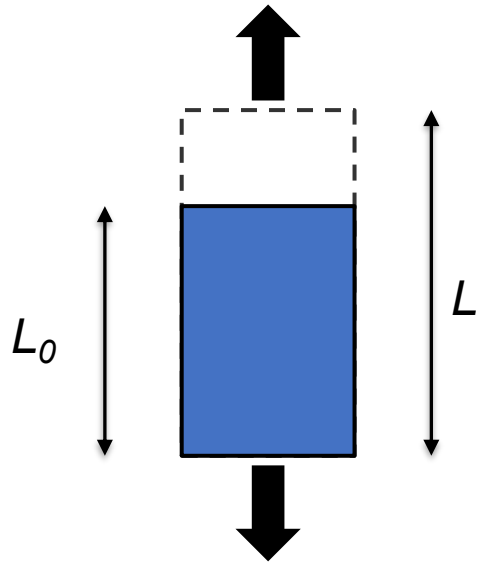
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Università di Padova

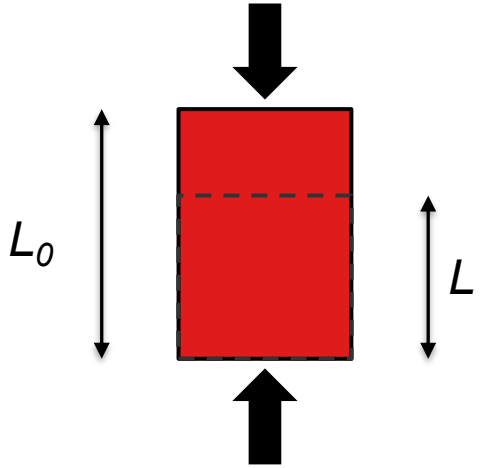
Enrico.simonetto.1@unipd.it

Definizione di deformazione

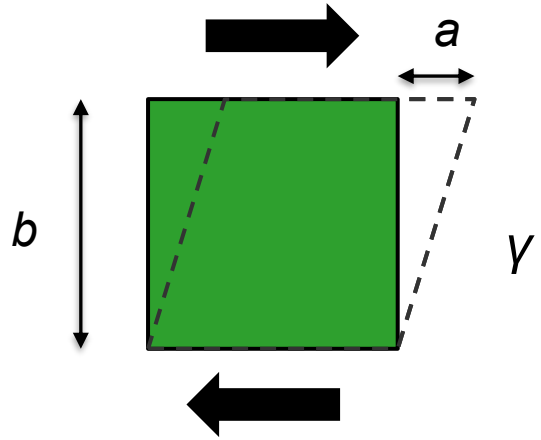
(a) Trazione



(b) Compressione



(c) Taglio



Deformazione ingegneristica

$$e = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$$

Deformazione reale

$$d\varepsilon = dL / L \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \ln (L / L_0) = \ln (1 + e)$$

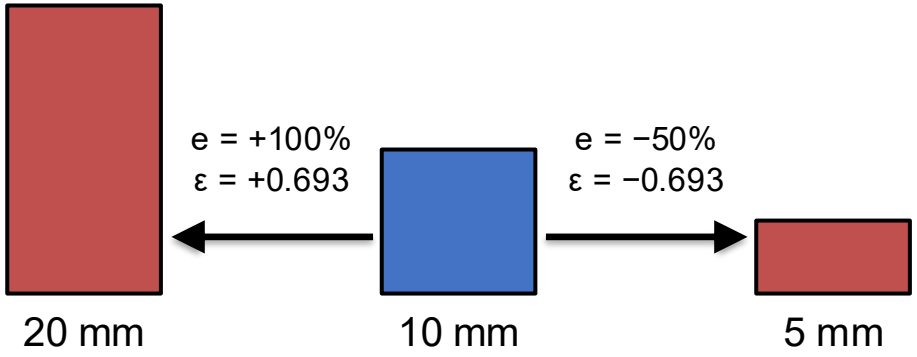
In compressione $L < L_0$: e ed ε sono negative

Deformazione di taglio

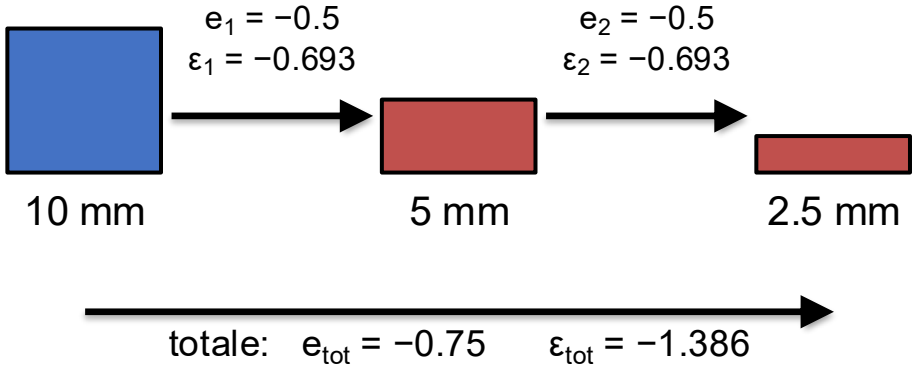
$$\gamma \approx \tan \gamma = a / b$$

Deformazione ingegneristica e reale: proprietà

Simmetria



Additività



10 → 20 mm: e = +1.00 (+100%) ε = ln 2 = +0.693

10 → 5 mm: e = −0.50 (−50%) ε = ln 0.5 = −0.693

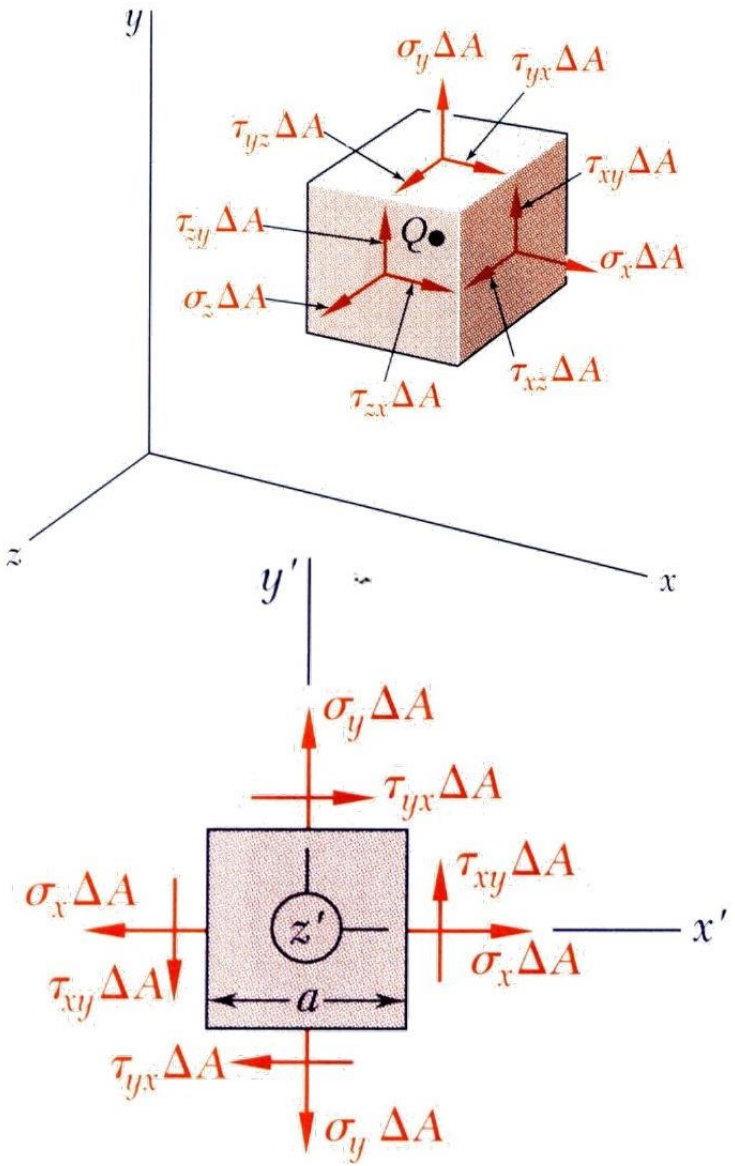
La deformazione reale è simmetrica: raddoppio e dimezzamento hanno lo stesso valore assoluto. Quella ingegneristica no.

$e_{tot} = -0.75 \neq e_1 + e_2 = -1.0$

$\varepsilon_{tot} = \ln(2.5 / 10) = -1.386 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

Le deformazioni reali si sommano, quelle ingegneristiche no.

State of stress



- Stress components are defined for the planes cut parallel to the *x*, *y* and *z* axes. For equilibrium, equal and opposite stresses are exerted on the hidden planes.
- The combination of forces generated by the stresses must satisfy the conditions for equilibrium:

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0$$

$$\sum M_x = \sum M_y = \sum M_z = 0$$

- Consider the moments about the *z* axis:

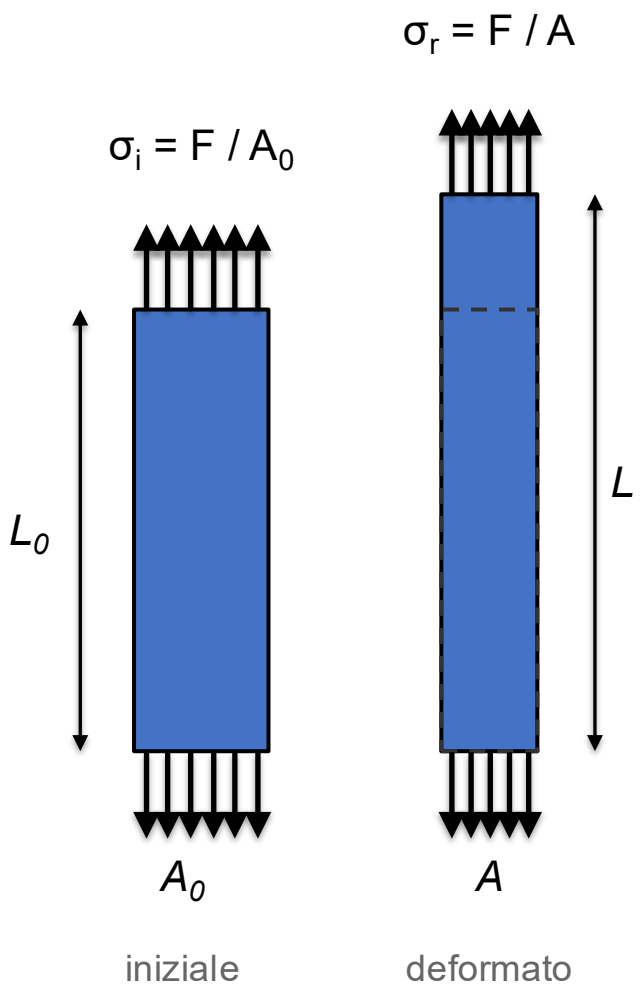
$$\sum M_z = 0 = (\tau_{xy}\Delta A)a - (\tau_{yx}\Delta A)a$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

similarly, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ and $\tau_{yz} = \tau_{zy}$

- It follows that only 6 components of stress are required to define the complete state of stress

Tensione e deformazione: ingegneristiche e reali



Ingegneristiche (nominali)

$\sigma_i = F / A_0$ $\quad e = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$

Reali (vere)

$\sigma_r = F / A$ $\quad \varepsilon = \int dL / L = \ln (L / L_0)$

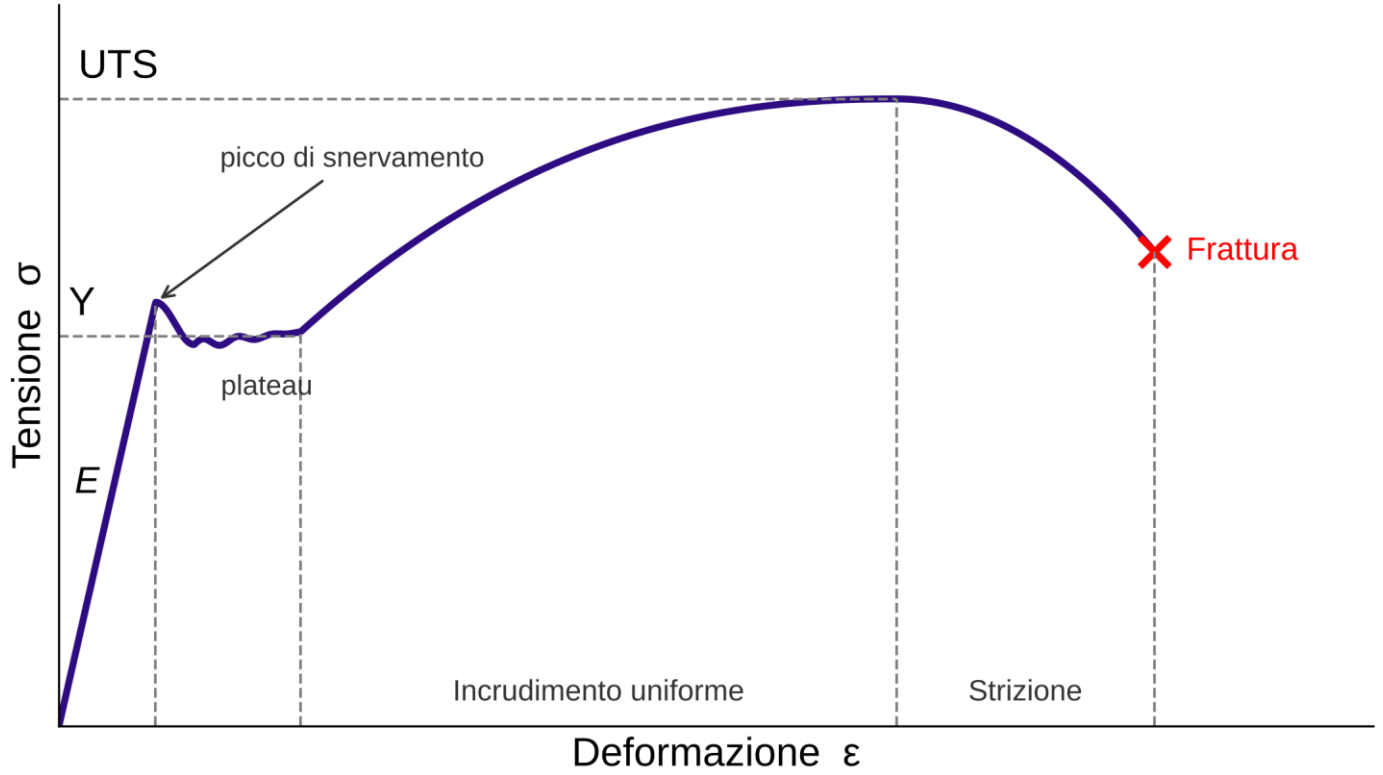
Relazioni (deformazione uniforme, volume costante)

$\sigma_r = \sigma_i (1 + e)$ $\quad \varepsilon = \ln (1 + e)$

valide fino all'inizio della strizione

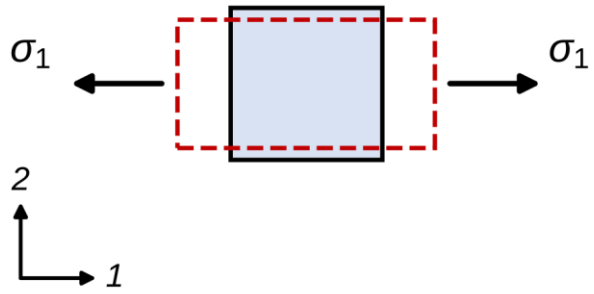
Comportamento dei materiali metallici

- Per comportamento dei materiali metallici si intende la relazione che c'è, per un dato materiale, tra tensioni e deformazioni



Stati di tensione e di deformazione notevoli

Tensione monoassiale



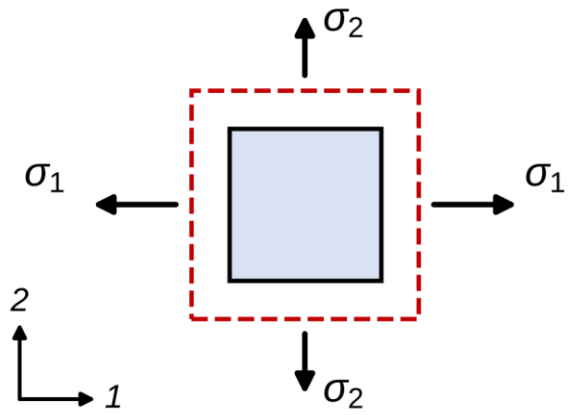
Stato tensionale principale

$\sigma_1 \neq 0;\ \sigma_2 = \sigma_3 = 0$

Stato deformativo principale

$\varepsilon_1 \neq 0;\ \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_1/2$

Tensione piana



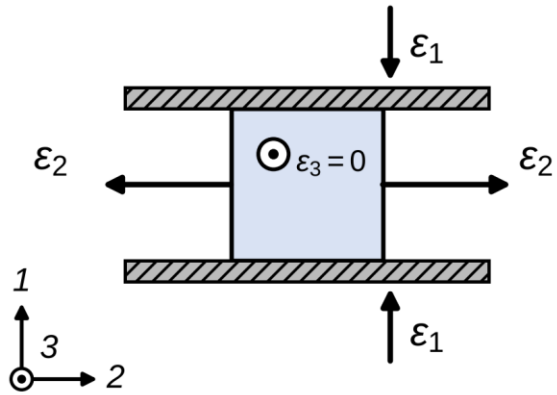
Stato tensionale principale

$\sigma_1, \sigma_2 \neq 0;\ \sigma_3 = 0$

Stato deformativo principale

$\varepsilon_1, \varepsilon_2 \neq 0;\ \varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$

Deformazione piana



Stato tensionale principale

$\sigma_1 \neq 0;\ \sigma_2 = 0;\ \sigma_3 = \sigma_1 / 2$

(in generale $\sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$)

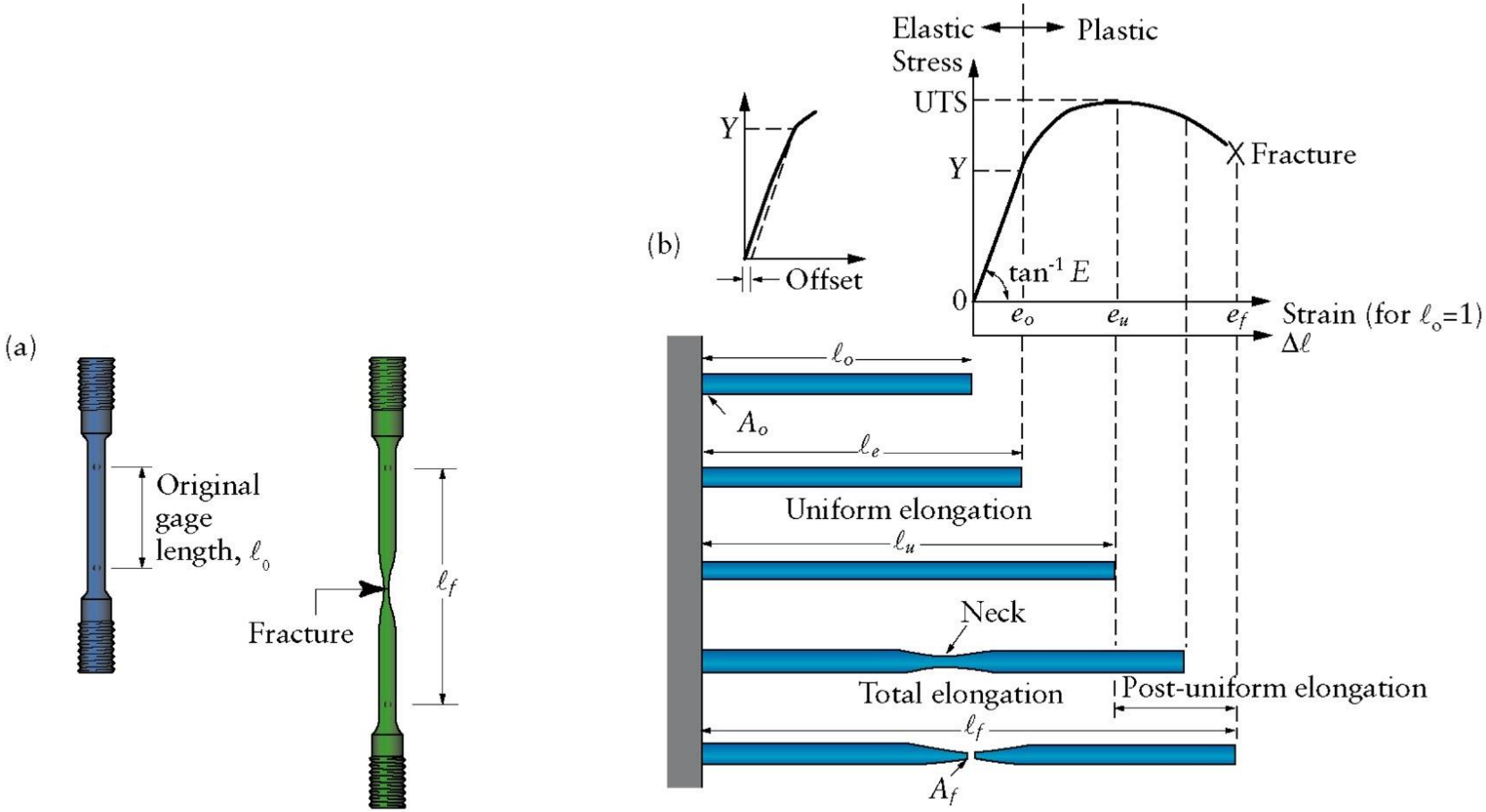
Stato deformativo principale

$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \neq 0;\ \varepsilon_3 = 0$

($\varepsilon_1 < 0$: compressione; $\varepsilon_2 > 0$: espansione)

1, 2, 3 = direzioni principali. Relazioni valide in campo plastico, a volume costante ($\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$), per materiale isotropo.

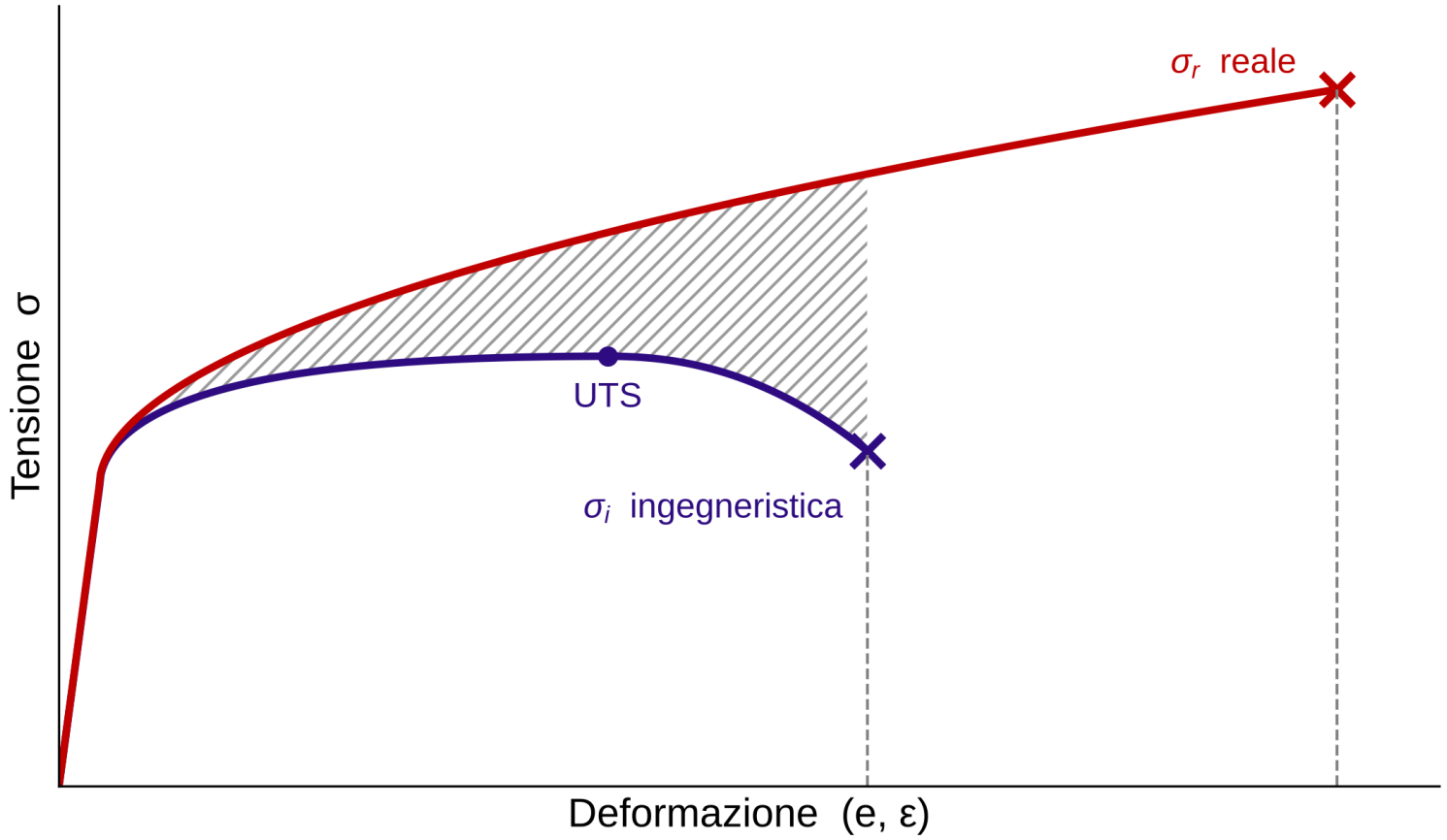
Tension Test



(a) Original and final shape of a standard tensile-test specimen. (b) Outline of a tensile-test sequence showing stages in the elongation of the specimen.

Prova monoassiale: $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

Curva ingegneristica e curva reale



Ingegneristica

$\sigma_i = F / A_0$

Reale

$\sigma_r = F / A$

Legame

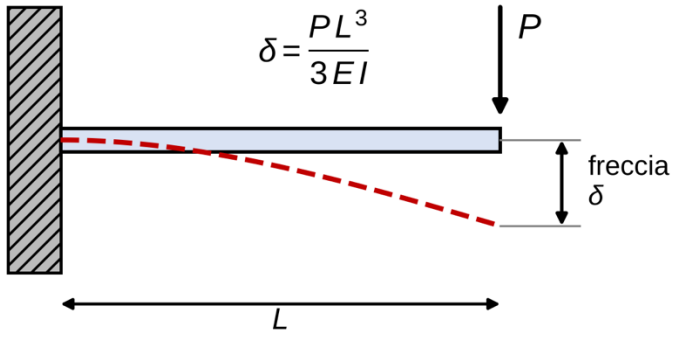
$\sigma_r = \sigma_i (1 + e)$

Oltre l'UTS la curva ingegneristica scende fino alla rottura; quella reale continua a crescere e arriva a deformazioni maggiori.

Cosa ci interessa sapere dalla prova?

Dimensionamento delle strutture

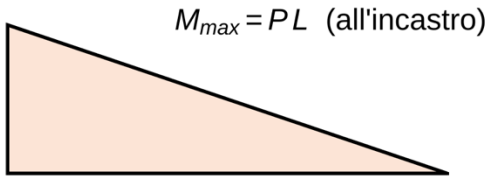
Trave incastrata



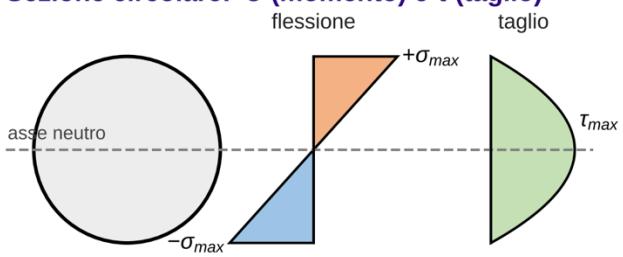
Taglio V

$V = -P$ (costante)

Momento flettente M



Sezione circolare: σ (momento) e τ (taglio)



$\sigma = \frac{My}{I}$ $\quad \sigma_{max} = \frac{32M}{\pi d^3}$ $\quad \tau_{max} = \frac{4V}{3A}$



$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq Y$

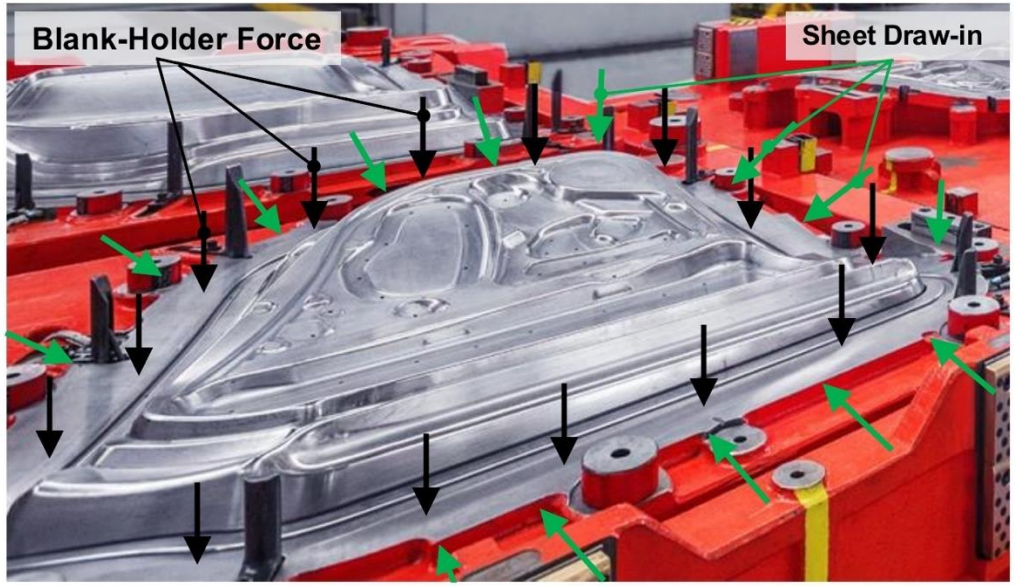
tensione totale (criterio di von Mises) da confrontare con Y

Servono le proprietà del materiale per:

- calcolare la deformata e la freccia (E)
- verificare il coefficiente di sicurezza: la tensione totale (momento e taglio) rispetto a Y
- stimare la vita a fatica
- tenere conto dell'anisotropia delle proprietà, nelle strutture complesse
- applicare i criteri di snervamento: confrontare uno stato tensionale complesso (σ e τ) con la prova monoassiale

Cosa ci interessa sapere dalla prova?

Simulazione di un processo







- Modulo elastico e tensione di snervamento: ancora rilevanti, legati ad esempio al ritorno elastico
- **Più importante la curva di flusso completa, per:**
  - dimensionare il carico totale di processo
  - capire il ritorno elastico
  - individuare i limiti di formabilità
  - prevedere le instabilità: grinze e strizioni
  - stimare le proprietà finali del componente
- Anisotropia: influenza il flusso del materiale e i limiti di formabilità

Comportamento meccanico dei materiali metallici

- Importanza della caratterizzazione
- Origine della variabilità
- Influenza dei parametri di processo
- Modelli del materiale e loro impiego nella simulazione
- Prove per la determinazione della curva di flusso
- Prove di formabilità

Scopo della prova, prova e strumenti

Scopo	Prova	Strumenti
Modulo elastico e snervamento	Prova di trazione con cicli di carico e scarico	Estensometri
Curva ingegneristica e limite a strizione	Prova di trazione completa, monitorando forza e corsa	Cella di carico e spostamento della traversa
Curva reale del comportamento del materiale	Prova di trazione completa, con misura delle deformazioni locali	Sistema DIC: deformazioni globali del pezzo e deformazione reale lungo il provino
Anisotropia (lamiera)	Prove in più direzioni rispetto alla laminazione	Come sopra, su provini orientati in modo diverso
Influenza di velocità e temperatura	Prove a velocità e a temperatura diverse	Sistema meccanico che impone velocità diverse e sistema di condizionamento della temperatura

Mechanical Properties of Materials (room temperature)

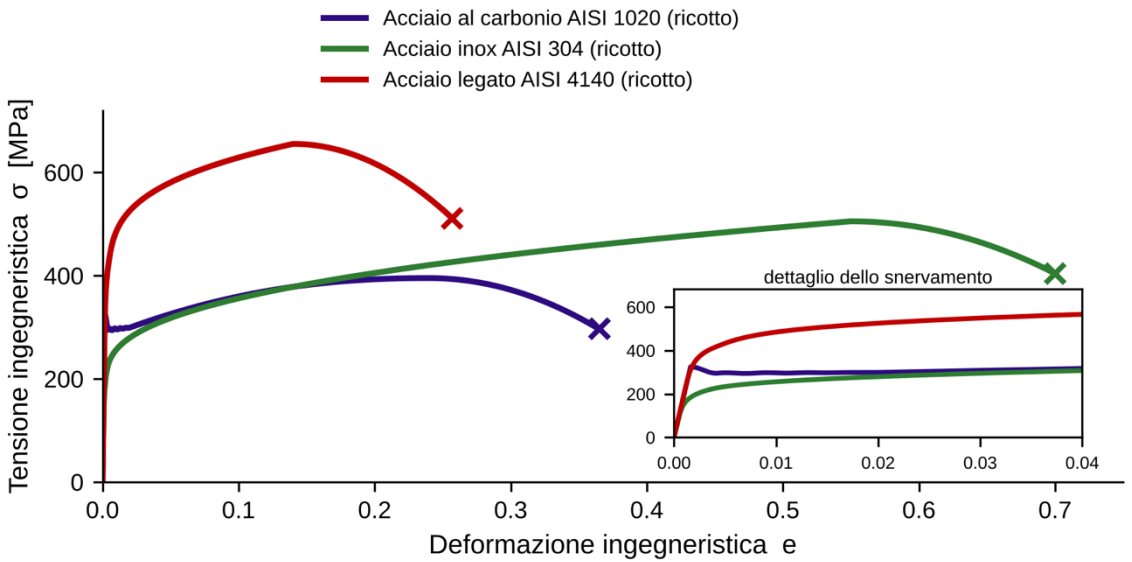
METALS (WROUGHT)	*E* (GPa)	*Y* (MPa)	UTS (MPa)	ELONGATION (%) in 50 mm	POISSONÕS RATIO (ν)
Aluminum and its alloys	69-79	35-550	90-600	45-5	0.31-0.34
Copper and its alloys	105-150	76-1100	140-1310	65-3	0.33-0.35
Lead and its alloys	14	14	20-55	50-9	0.43
Magnesium and its alloys	41-45	130-305	240-380	21-5	0.29-0.35
Molybdenum and its alloys	330-360	80-2070	90-2340	40-30	0.32
Nickel and its alloys	180-214	105-1200	345-1450	60-5	0.31
Steels	190-200	205-1725	415-1750	65-2	0.28-0.33
Stainless steels	190-200	240-480	480-760	60-20	0.28-0.30
Titanium and its alloys	80-130	344-1380	415-1450	25-7	0.31-0.34
Tungsten and its alloys	350-400	550-690	620-760	0	0.27
NONMETALLIC MATERIALS					
Ceramics	70-1000	-	140-2600	0	0.2
Diamond	820-1050	-	-	-	-
Glass and porcelain	70-80	-	140	0	0.24
Rubbers	0.01-0.1	-	-	-	0.5
Thermoplastics	1.4-3.4	-	7-80	1000-5	0.32-0.40
Thermoplastics, reinforced	2-50	-	20-120	10-1	-
Thermosets	3.5-17	-	35-170	0	0.34
Boron fiber	380	-	3500	0	-
Carbon fibers	275-415	-	2000-5300	1-2	-
Glass fibers (S, E)	73-85	-	3500-4600	5	-
Kevlar fibers (29, 49, 129)	70-113	-	3000-3400	3-4	-
Spectra fibers (900, 1000)	73-100	-	2400-2800	3	-

Note: In the upper table the lowest values for *E*, *Y*, and UTS and the highest values for elongation are for the pure metals. Multiply GPa by 145,000 to obtain psi, and MPa by 145 to obtain psi. For example, 100 GPa = 14,500 ksi, and 100 MPa = 14,500 psi.

Origine della variabilità: composizione chimica

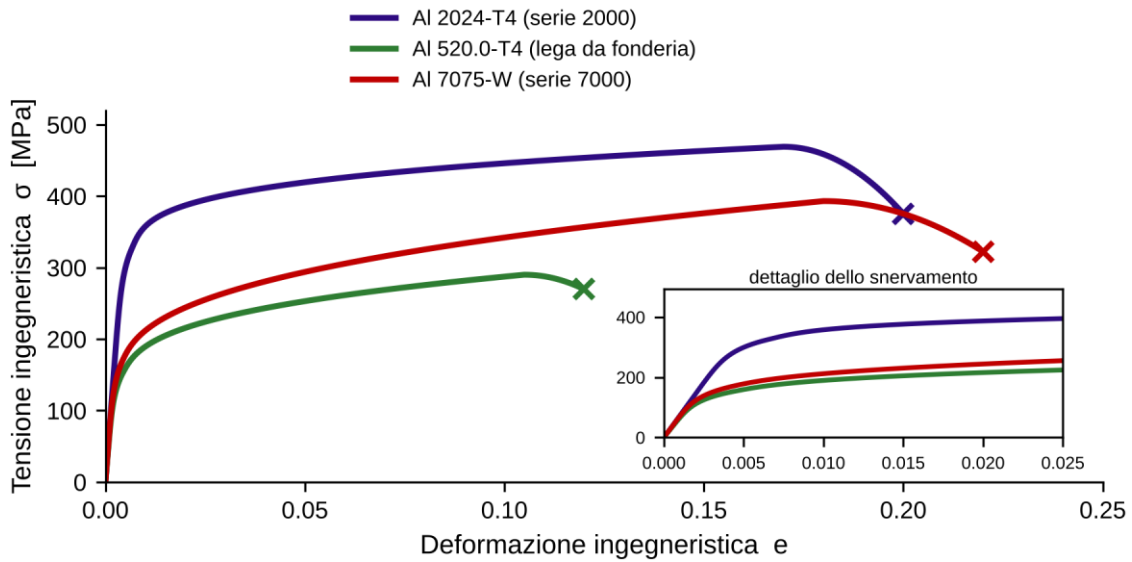
Il modulo elastico varia poco; snervamento, UTS e allungamento molto di più

Acciai (stesso stato di fornitura: ricotto)



Materiale	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	A [%]	Ag* [%]
1020 (carbonio)	200	295	395	36.5	24
304 (inossidabile)	193	215	505	70	55
4140 (legato)	205	415	655	25.7	14

Leghe di alluminio (stesso stato: solubilizzato)



Materiale	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	A [%]	Ag* [%]
2024-T4 (serie 2000)	73.1	324	469	20	17
520.0-T4 (fonderia)	66	152	290	12	10.5
7075-W (serie 7000)	71.7	171	393	22	18

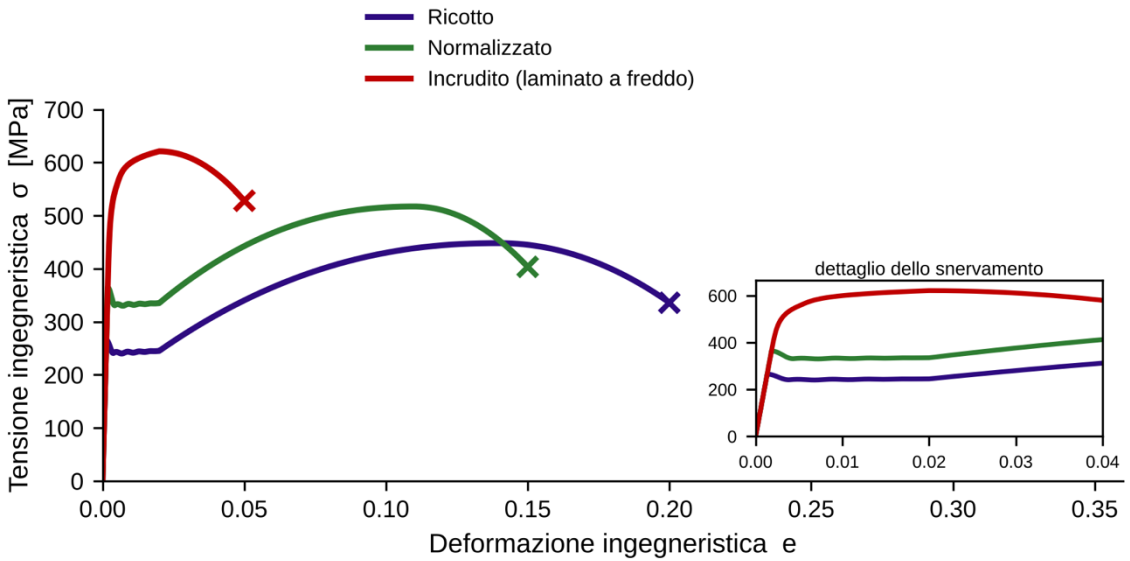
*Y: tensione di snervamento (1020: limite inferiore di snervamento; altri: $R_{p0.2}$). A: allungamento a rottura. *Ag: deformazione uniforme assunta per costruire le curve; il tratto di strizione è schematico.*

T4: solubilizzato + invecchiamento naturale; W: solubilizzato e temprato. Valori tipici da letteratura e schede di materiale (520.0-T4: minimi ASTM B26): da verificare sulle schede tecniche.

Origine della variabilità: trattamento termico e incrudimento

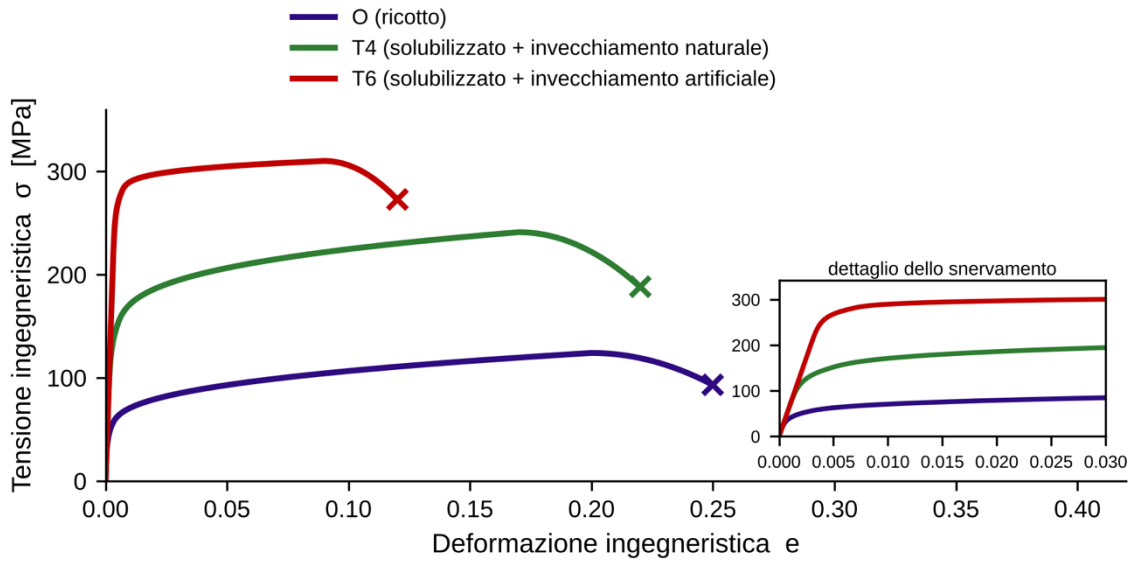
Stessa composizione, stato diverso: cambiano snervamento, UTS e allungamento, non il modulo elastico

Acciaio AISI 1045



Stato	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	A [%]	Ag* [%]
Ricotto	200	241	448	20	14
Normalizzato	200	331	517	15	11
Incrudito (laminato a freddo)	200	552	621	5	2

Lega di alluminio 6061 (trattabile termicamente)



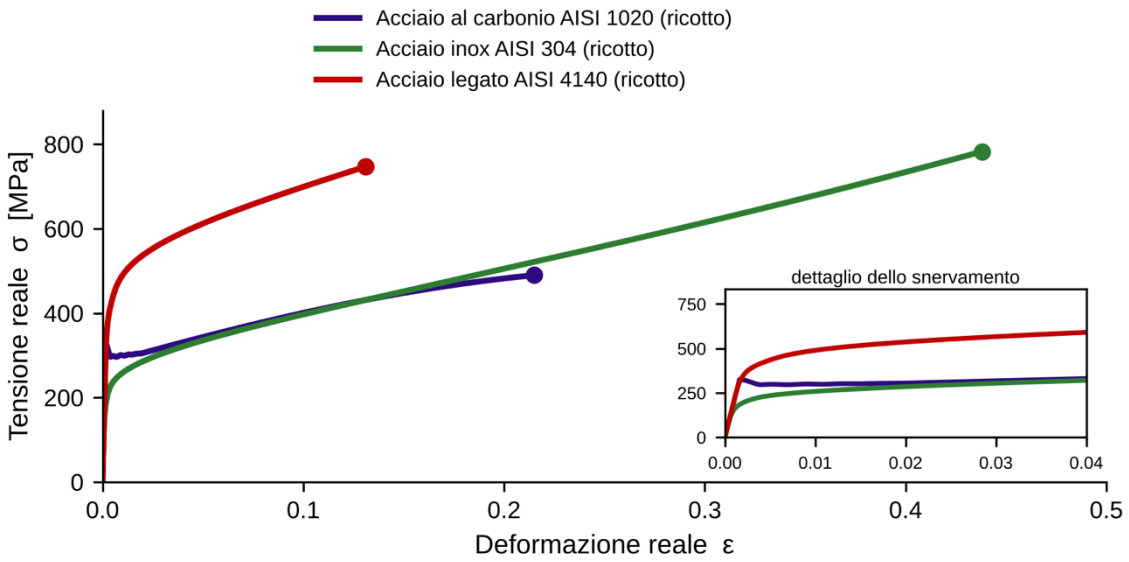
Stato	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	A [%]	Ag* [%]
O (ricotto)	68.9	55	124	25	20
T4 (solubilizzato + invecchiamento naturale)	68.9	145	241	22	17
T6 (solubilizzato + invecchiamento artificiale)	68.9	276	310	12	9

*Y: tensione di snervamento (1045 ricotto e normalizzato: limite inferiore di snervamento; altri: $R_{p0.2}$). A: allungamento a rottura. *Ag: deformazione uniforme*

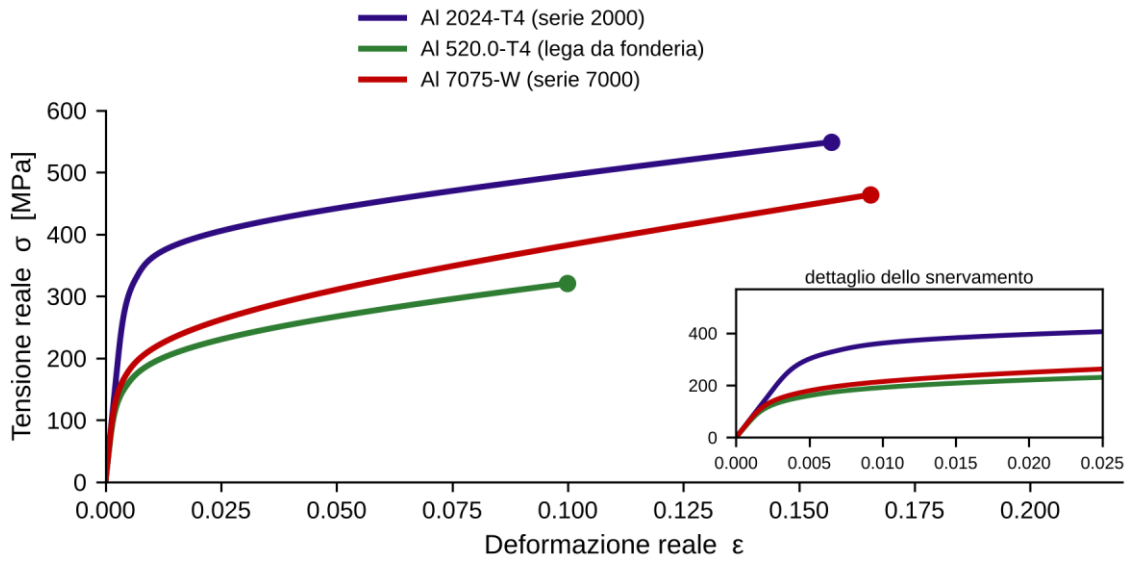
Origine della variabilità: composizione chimica (curve reali)

Curve reali: il modulo elastico varia poco; snervamento e resistenza molto di più

Acciai (stesso stato di fornitura: ricotto)



Leghe di alluminio (stesso stato: solubilizzato)



Materiale	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	σ_r a UTS	ε_u
1020 (carbonio)	200	295	395	490	0.215
304 (inossidabile)	193	215	505	783	0.438
4140 (legato)	205	415	655	747	0.131

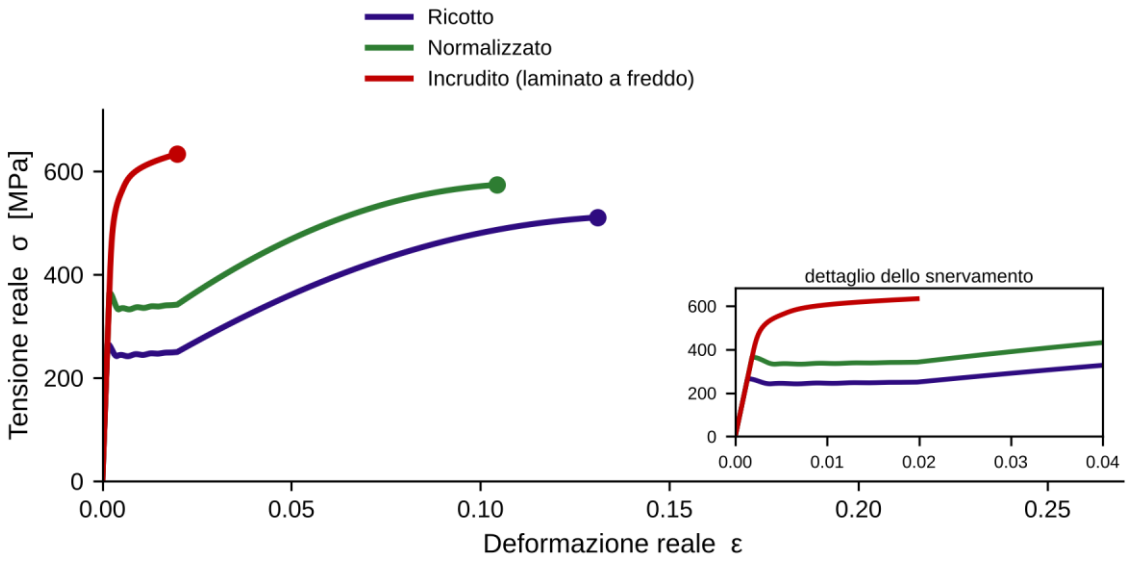
Materiale	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	σ_r a UTS	ε_u
2024-T4 (serie 2000)	73.1	324	469	549	0.157
520.0-T4 (fonderia)	66	152	290	320	0.100
7075-W (serie 7000)	71.7	171	393	464	0.166

Curve costruite dalle curve ingegneristiche con $\sigma_r = \sigma_i (1 + e)$ ed $\varepsilon = \ln (1 + e)$, valide fino all'inizio della strizione (punto): σ_r a UTS = UTS · (1 + Ag), $\varepsilon_u = \ln (1 + Ag)$,

Origine della variabilità: trattamento termico e incrudimento (curve reali)

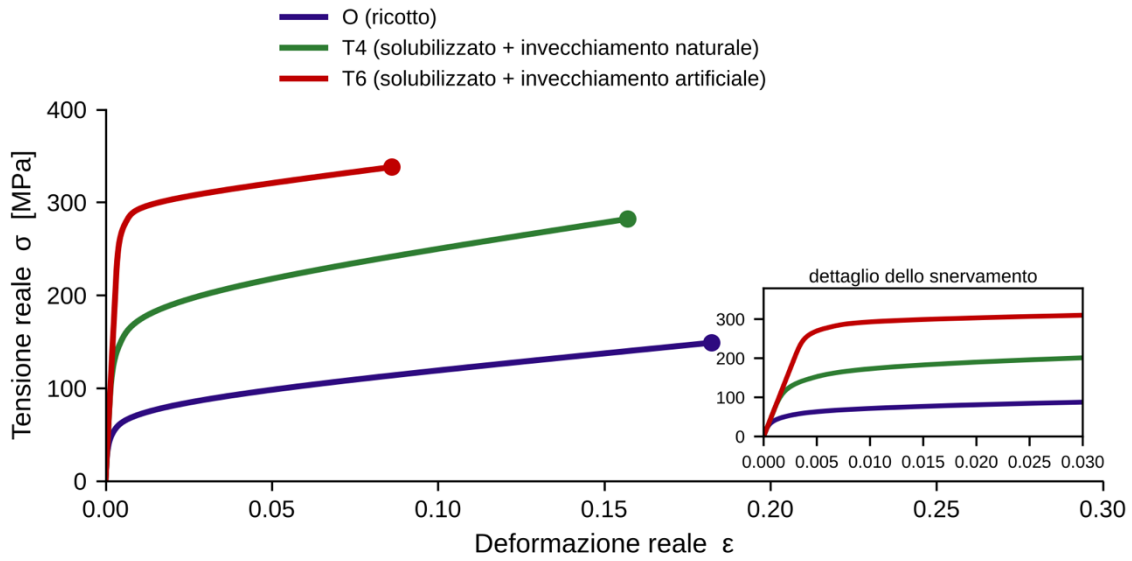
Curve reali, stessa composizione: cambiano snervamento e resistenza, non il modulo elastico

Acciaio AISI 1045



Materiale	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	σ_r a UTS	ε_u
Ricotto	200	241	448	511	0.131
Normalizzato	200	331	517	574	0.104
Incrudito (laminato a freddo)	200	552	621	633	0.020

Lega di alluminio 6061 (trattabile termicamente)



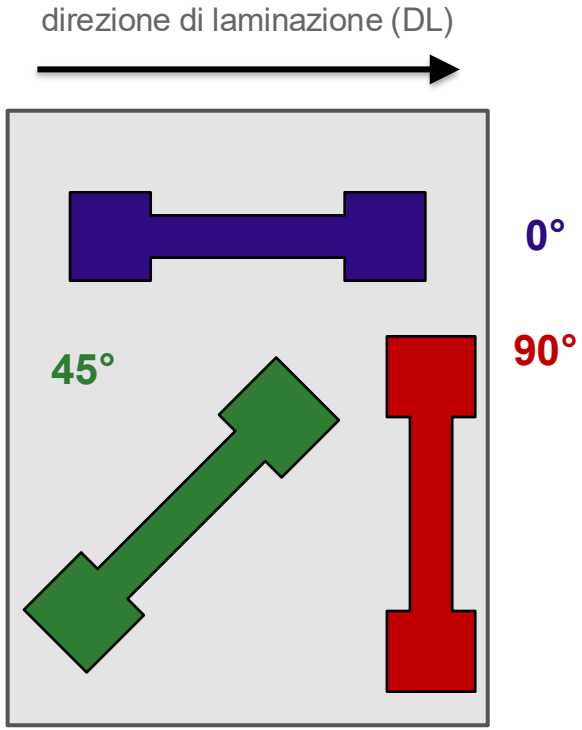
Materiale	E [GPa]	Y [MPa]	UTS [MPa]	σ_r a UTS	ε_u
O (ricotto)	68.9	55	124	149	0.182
T4 (solubilizzato + invecchiamento naturale)	68.9	145	241	282	0.157
T6 (solubilizzato + invecchiamento artificiale)	68.9	276	310	338	0.086

Curve reali fino all'inizio della strizione (punto): σ_r a UTS = UTS · (1 + Ag), ε_u = ln (1 + Ag)

Origine della variabilità: direzione di laminazione

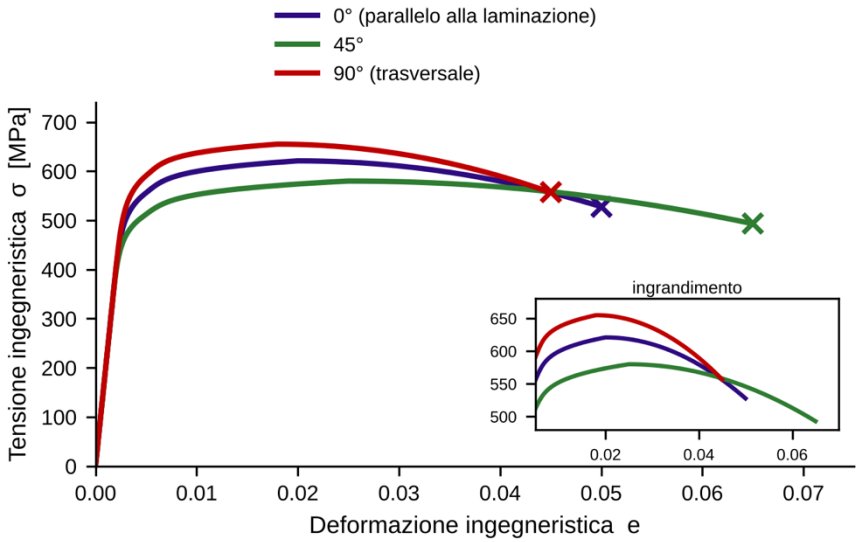
Anisotropia: la curva dipende dalla direzione di prelievo del provino (0°, 45° e 90° dalla laminazione)

Lamiera



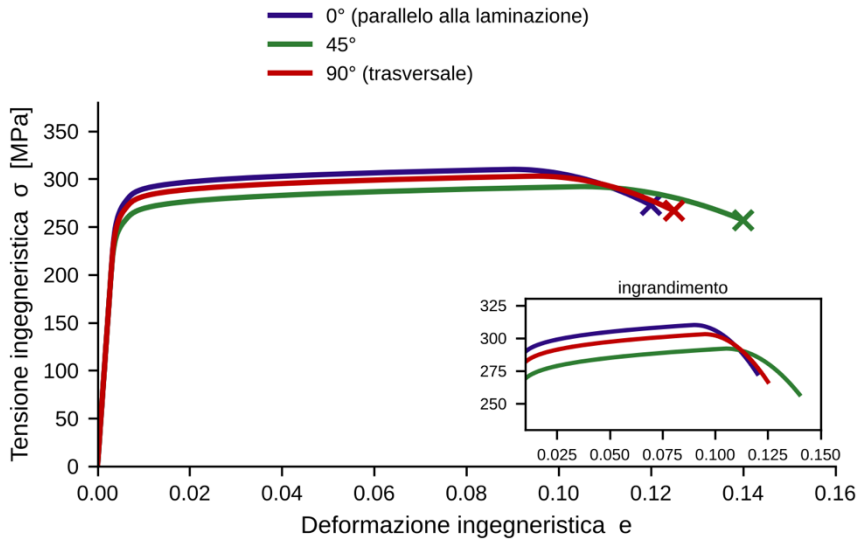
Provini prelevati a 0°, 45° e 90° dalla direzione di laminazione

Acciaio AISI 1045 laminato a freddo



Direzione	Y [MPa]	UTS [MPa]	A [%]	Ag* [%]
0°	552	621	5	2
45°	505	580	6.5	2.5
90°	590	655	4.5	1.8

Lega di alluminio 6061-T6

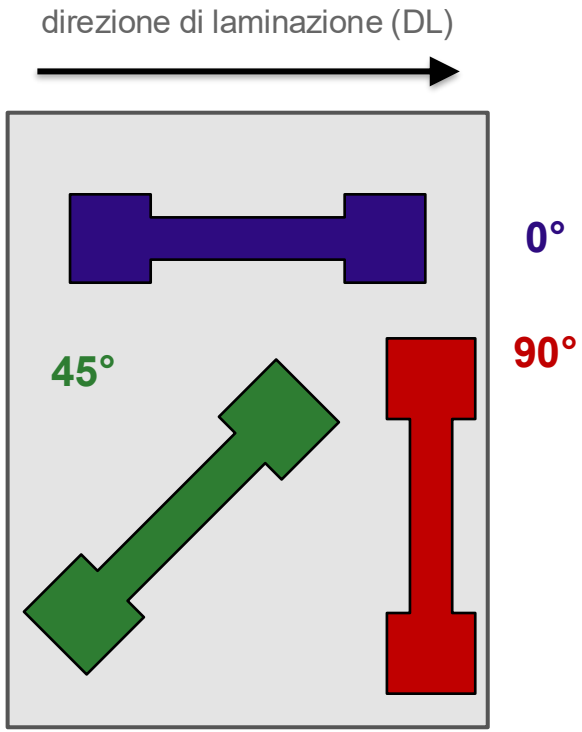


Direzione	Y [MPa]	UTS [MPa]	A [%]	Ag* [%]
0°	276	310	12	9
45°	255	292	14	10.5
90°	268	303	12.5	9.5

Origine della variabilità: direzione di laminazione (curve reali)

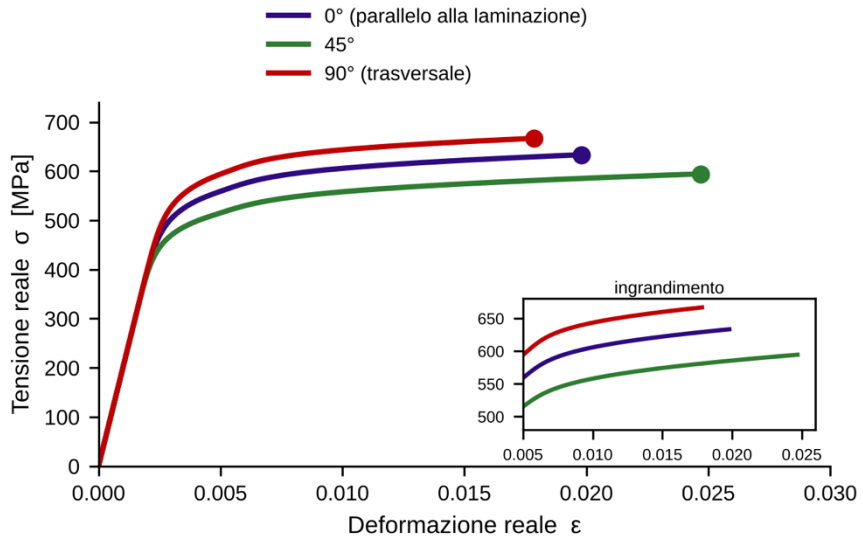
Anisotropia: la curva dipende dalla direzione di prelievo del provino (0°, 45° e 90° dalla laminazione)

Lamiera



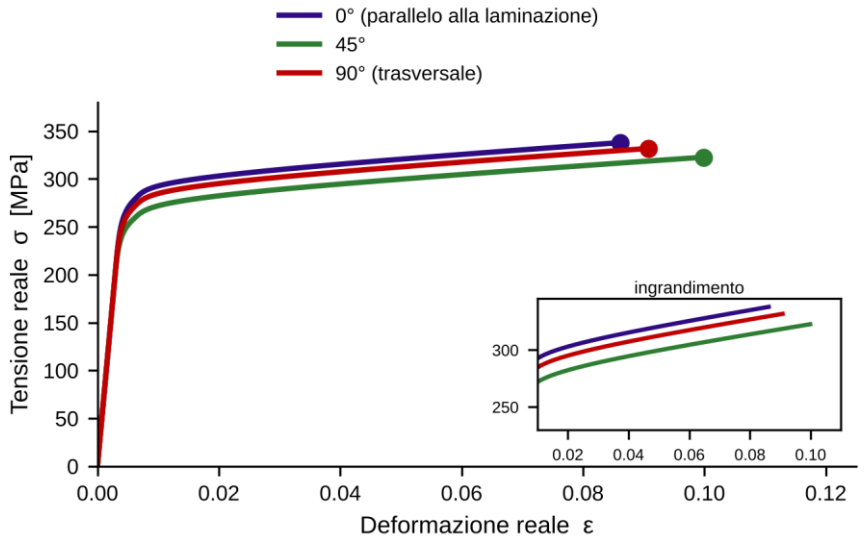
Provini prelevati a 0°, 45° e 90° dalla direzione di laminazione

Acciaio AISI 1045 laminato a freddo



Direzione	Y [MPa]	UTS [MPa]	σ_r a UTS	ε_u
0°	552	621	633	0.020
45°	505	580	595	0.025
90°	590	655	667	0.018

Lega di alluminio 6061-T6

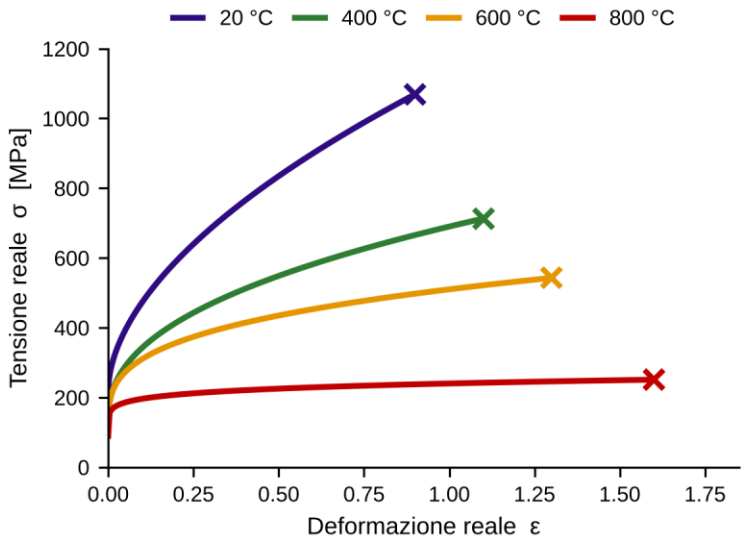


Direzione	Y [MPa]	UTS [MPa]	σ_r a UTS	ε_u
0°	276	310	338	0.086
45°	255	292	323	0.100
90°	268	303	332	0.091

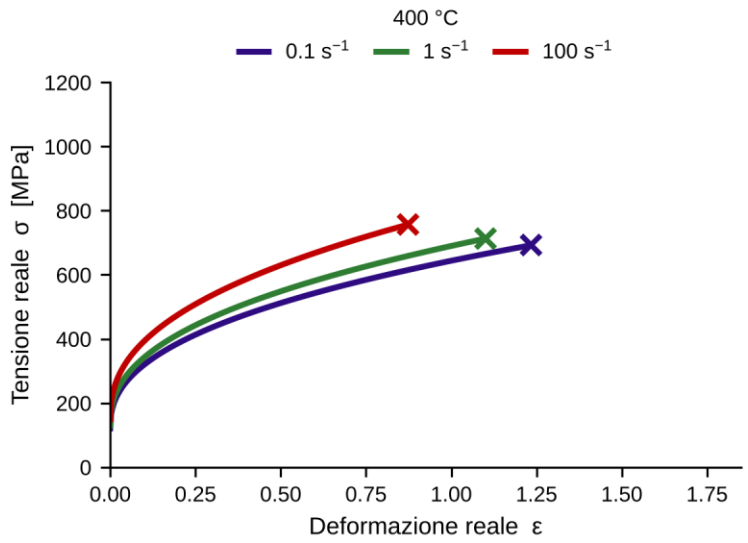
Parametri di processo: temperatura e velocità di deformazione

Più caldo: tensione di flusso più bassa e formabilità maggiore. Più veloce: tensione più alta e, a freddo, formabilità ridotta

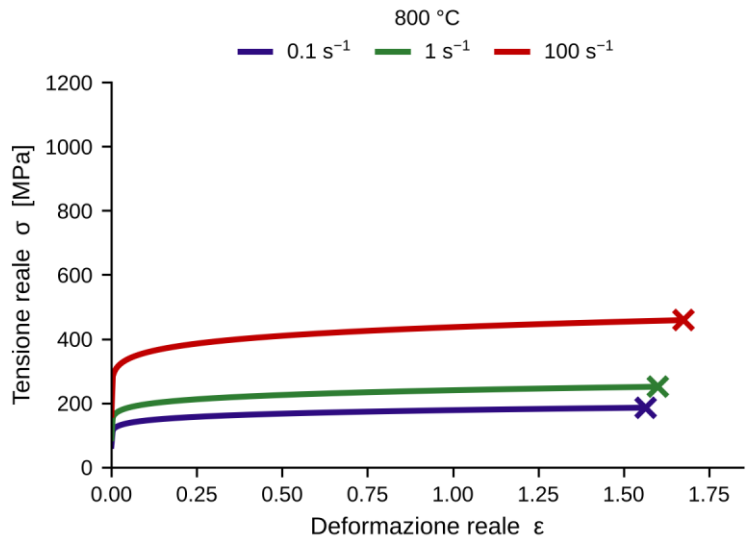
Effetto della temperatura (1 s^{-1})



Velocità di deformazione a 400 °C (m = 0.03)



Velocità di deformazione a 800 °C (m = 0.13)



T [°C]	σ a ε = 0.1	ε_f	m
20	474	0.9	0.012
400	343	1.1	0.03
600	310	1.3	0.06
800	196	1.6	0.13

Velocità	σ a ε = 0.1	ε_f
0.1 s^{-1}	320	1.23
1 s^{-1}	343	1.1
100 s^{-1}	394	0.87

Velocità	σ a ε = 0.1	ε_f
0.1 s^{-1}	145	1.56
1 s^{-1}	196	1.6
100 s^{-1}	357	1.68

acciaio austenitico (tipo AISI 304) senza trasformazioni di fase tra 20 e 800 °C

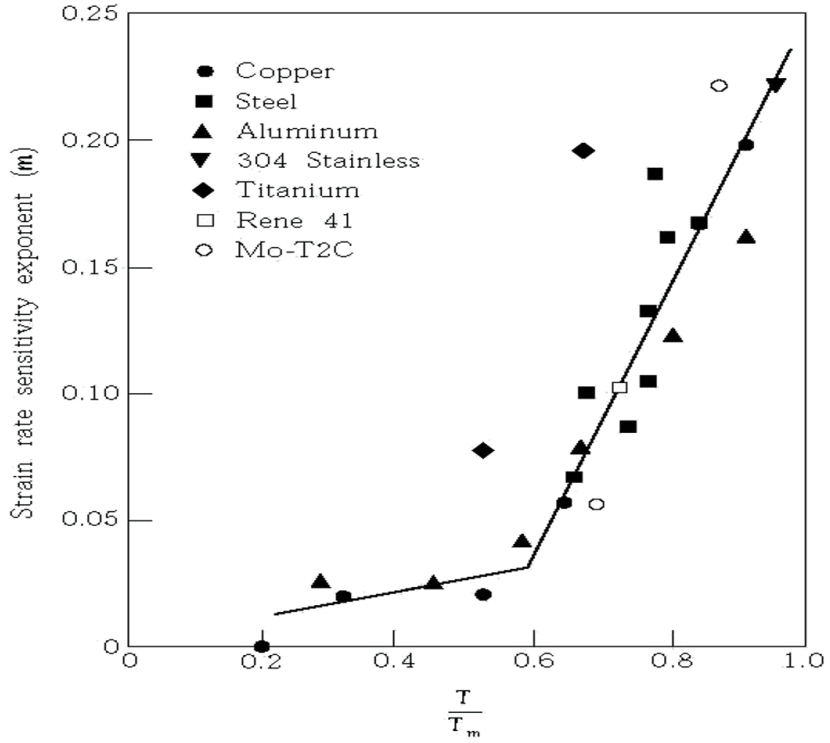
Ordini di grandezza di deformazione e velocità nei processi

Riferimenti per scegliere deformazione e velocità delle prove di caratterizzazione

Processo	Deformazione reale	Velocità [m/s]	$\dot{\varepsilon}$ [s^{-1}]
Lavorazioni a freddo			
Forgiatura, laminazione	0.1–0.5	0.1–100	$1–10^3$
Trafilatura di filo e tubo	0.05–0.5	0.1–100	$1–10^4$
Formatura esplosiva	0.05–0.2	10–100	$10–10^5$
Lavorazioni a caldo e a tiepido			
Forgiatura, laminazione	0.1–0.5	0.1–30	$1–10^3$
Estrusione	2–5	0.1–1	$10^{-1}–10^2$
Altri processi			
Asportazione di truciolo	1–10	0.1–100	$10^3–10^6$
Formatura di lamiera	0.1–0.5	0.05–2	$1–10^2$
Formatura superplastica	0.2–3	$10^{-4}–10^{-2}$	$10^{-4}–10^{-2}$

Intervalli tipici: servono come ordine di grandezza per scegliere le condizioni di prova (velocità di deformazione, temperatura) rappresentative del processo.

Sensibilità alla velocità di deformazione m in funzione di T/T_m

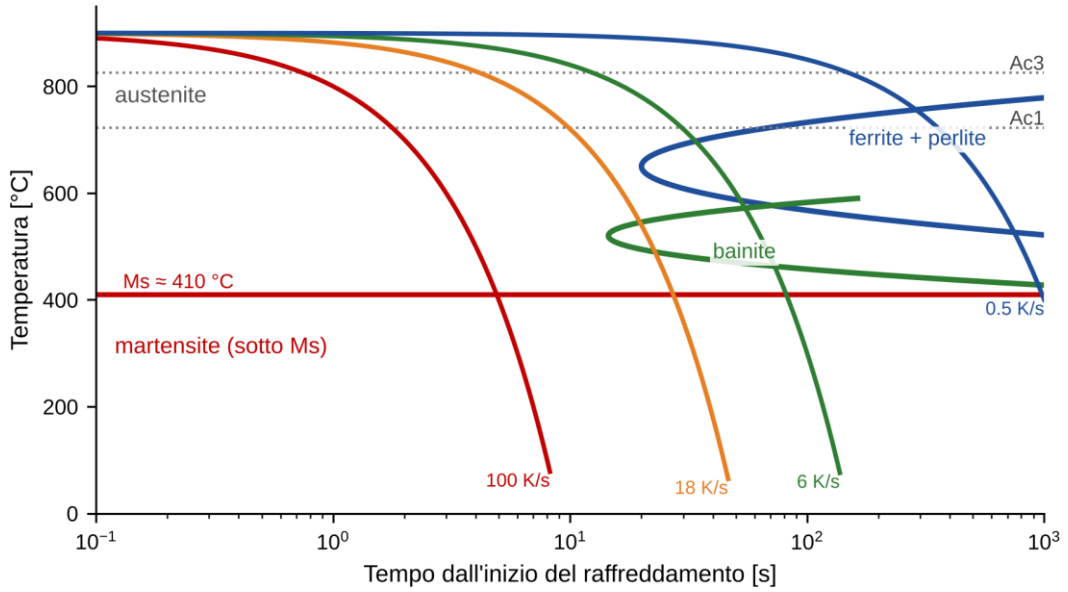


Esponente m ($\sigma \propto \varepsilon^m$) in funzione della temperatura omologa T/T_m: T è la temperatura di prova e T_m la temperatura di fusione, entrambe assolute. Oltre circa $T/T_m = 0.6$ (vicino alla ricristallizzazione) m cresce rapidamente (da F. W. Boulger).

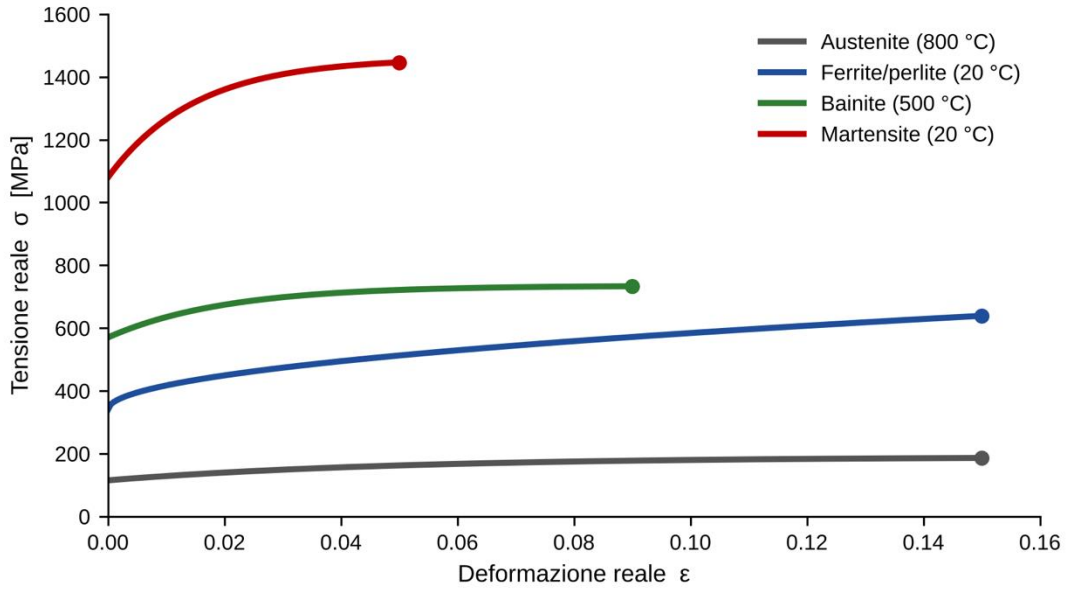
Percorso termico e microstruttura (acciaio da stampaggio a caldo)

Stesso acciaio, percorso termico diverso: microstrutture e comportamento molto diversi

Raffreddamento da 900 °C sovrapposto al diagramma CCT



Curva di flusso per microstruttura

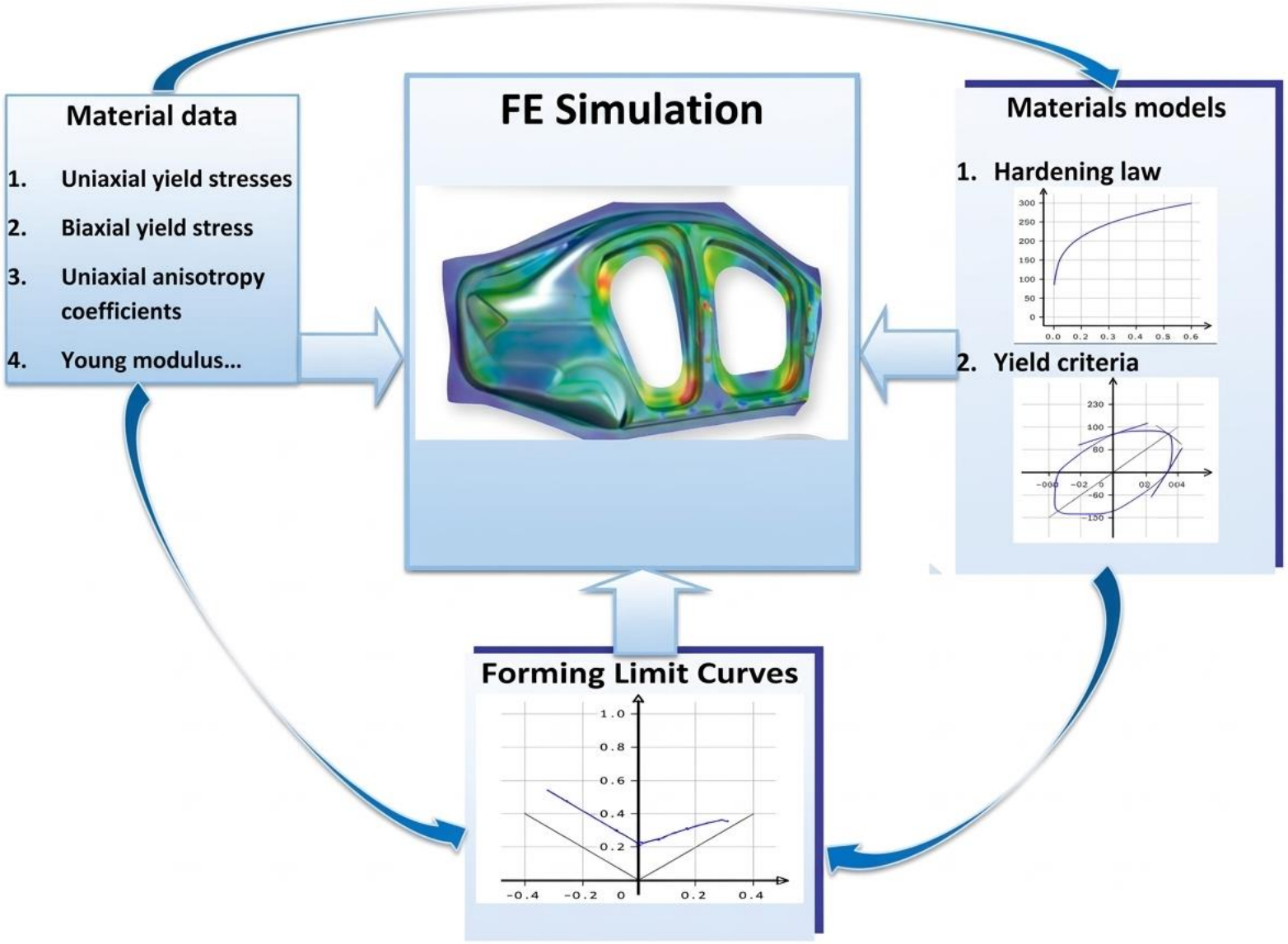


Velocità di raffreddamento	Microstruttura finale
100 K/s	martensite
18 K/s	bainite + martensite
6 K/s	ferrite + bainite
0.5 K/s	ferrite + perlite

Microstruttura	T [°C]	σ a ε = 0 [MPa]	σ a ε = 0.05 [MPa]
Austenite	800	115	162
Ferrite/perlite	20	340	513
Bainite	500	570	721
Martensite	20	1080	1446

Schema qualitativo per un acciaio al boro tipo 22MnB5: Ac1 ≈ 722 °C, Ac3 ≈ 825 °C, velocità critica per martensite totale ≈ 26 K/s (letteratura: 25-27 K/s), Ms ≈ 410 °C (valore tipico); forma e posizione delle curve CCT sono illustrative. Curve di flusso schematiche, non misure.

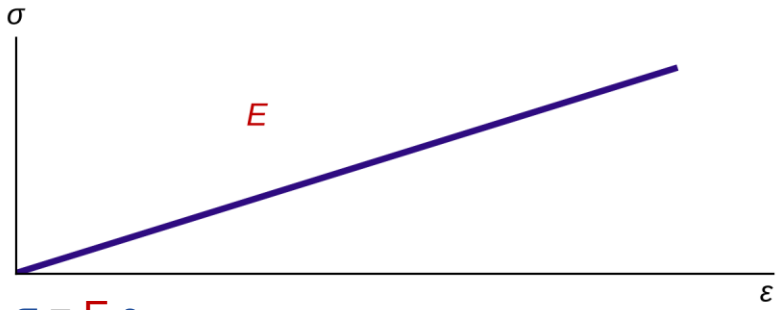
Modellazione materiale



Modelli di comportamento: curve idealizzate

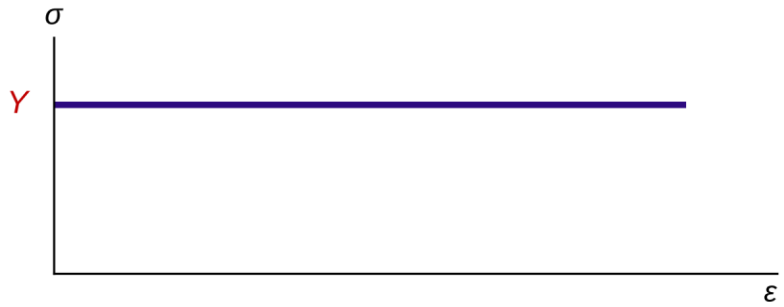
Modelli semplificati del legame tensione-deformazione, a temperatura ambiente

Elastico lineare



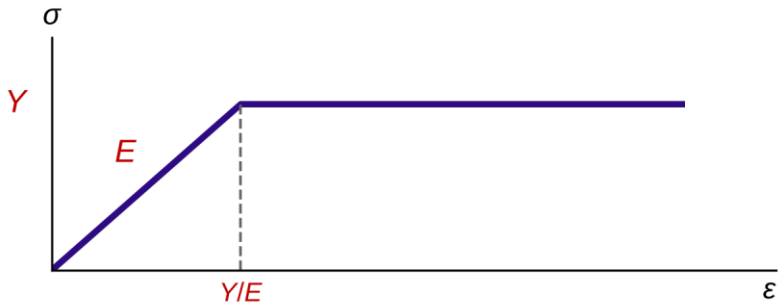
$\sigma = E\,\varepsilon$

Rigido perfettamente plastico



$\sigma = Y$

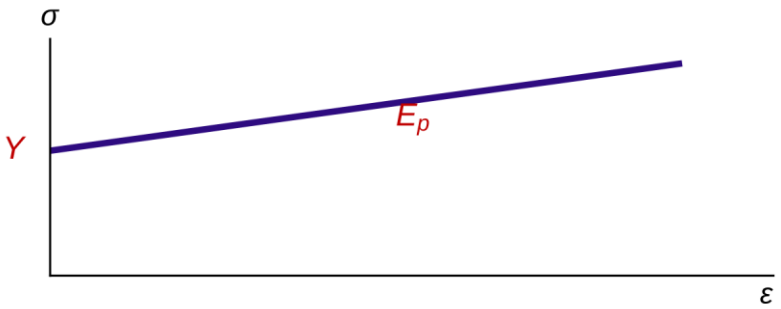
Elastico perfettamente plastico



$\sigma = E\,\varepsilon \quad (\varepsilon \le Y / E)$

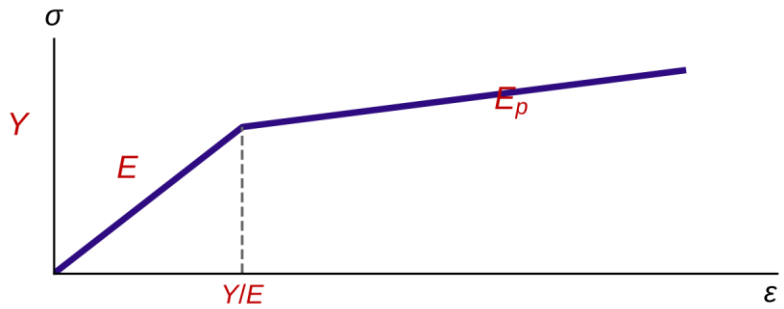
$\sigma = Y \quad (\varepsilon > Y / E)$

Rigido con incrudimento lineare



$\sigma = Y + E_p\,\varepsilon$

Elastico con incrudimento lineare (bilineare)



$\sigma = E\,\varepsilon \quad (\varepsilon \le Y / E)$

$\sigma = Y + E_p\,(\varepsilon - Y / E) \quad (\varepsilon > Y / E)$

Modelli molto semplici

Descrivono la curva solo a temperatura ambiente, senza effetto di temperatura, velocità di deformazione e storia di carico.

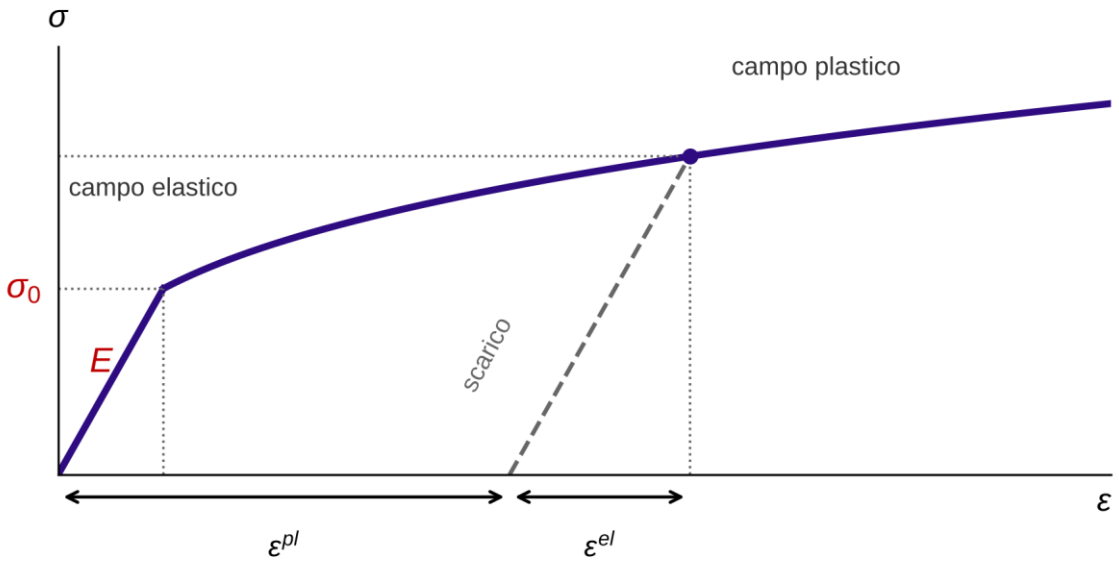
Variabili: σ, ε.

Parametri da determinare: E, Y, E_p.

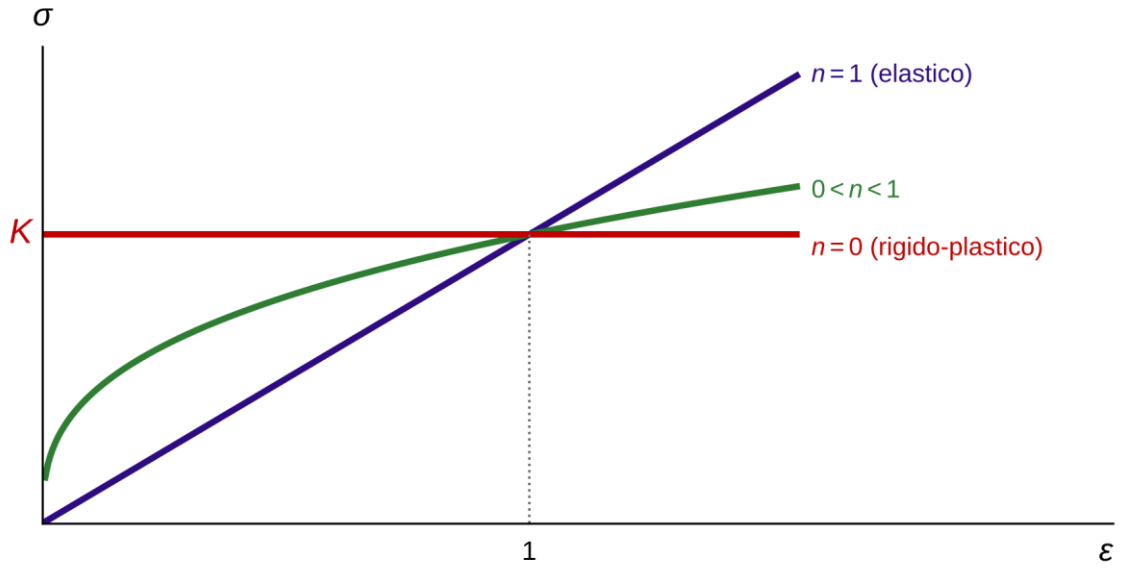
Modello elasto-plastico: curva di flusso a temperatura ambiente

Modello molto semplice: descrive la curva solo a temperatura ambiente

Curva tensione-deformazione



Effetto dell'esponente di incrudimento



Campo elastico ($\sigma < \sigma_0$): legge di Hooke

$\sigma = E\,\varepsilon$

Campo plastico ($\sigma \geq \sigma_0$): legge di Hollomon

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

Legge di potenza

K: tensione a ε = 1; n: esponente di incrudimento ($0 \leq n \leq 1$)

n = 1: comportamento elastico; n = 0: rigido perfettamente plastico

Parametri da determinare: E, σ_0, K, n (rosso). Variabili: σ, ε (blu). Il modello non contiene temperatura, velocità di deformazione e storia di carico.

Altri modelli per la curva di flusso a temperatura ambiente

Stessi dati, modelli diversi: simili nell'intervallo di taratura, diversi nell'estrapolazione

Hollomon *due parametri; cresce sempre*

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

Ludwik *aggiunge la tensione di snervamento*

$$\sigma = \sigma_0 + K\,\varepsilon^{n}$$

Swift *ε_0: deformazione pregressa*

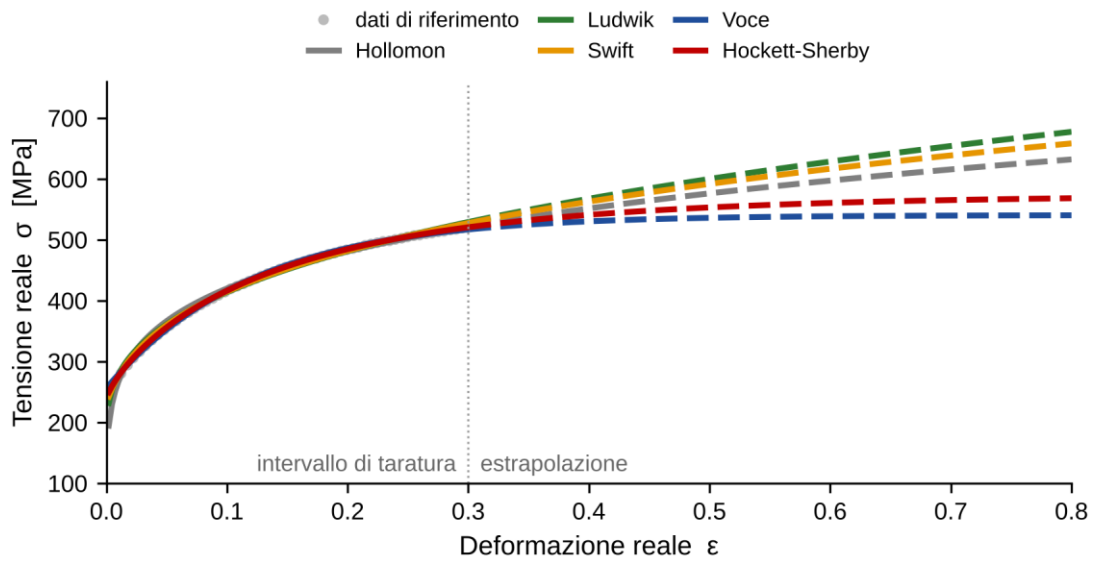
$$\sigma = K\,(\varepsilon_0 + \varepsilon)^{n}$$

Voce *satura: adatto a grandi deformazioni*

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_0)\exp(-b\,\varepsilon)$$

Hockett-Sherby *come Voce, con un parametro in più (p)*

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_0)\exp(-b\,\varepsilon^{p})$$



Modello	Parametri tarati	σ a ε = 0.8
Hollomon	K = 660 MPa, n = 0.197	632 MPa
Ludwik	σ_0 = 170 MPa, K = 548 MPa, n = 0.353	677 MPa
Swift	K = 691 MPa, ε_0 = 0.0085, n = 0.230	658 MPa
Voce	σ_0 = 256 MPa, σsat = 540 MPa, b = 8.30	540 MPa
Hockett-Sherby	σ_0 = 239 MPa, σsat = 574 MPa, b = 4.86, p = 0.809	568 MPa

● **variabili** ● **parametri da determinare.** *Dati di riferimento sintetici (acciaio dolce schematico); taratura ai minimi quadrati tra ε = 0.002 e 0.3, estrapolazione tratteggiata.*

Modelli a caldo: Johnson-Cook e Hansel-Spittel

Includono l'effetto della temperatura e della velocità di deformazione sulla curva di flusso

Johnson-Cook

$$\begin{cases} \sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - (T^*)^m) \\ \dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \\ T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r) \end{cases}$$

- $(A + B\,\varepsilon^n)$: incrudimento a T e velocità di riferimento
- $(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$: sensibilità alla velocità
- $(1 - T^{*m})$: addolcimento termico
- Effetti disaccoppiati: prodotto di tre termini
- **5 parametri da determinare: A, B, n, C, m**

Hansel-Spittel

$$\sigma = A\mathrm{e}^{m_1 T}\varepsilon^{m_2}\dot{\varepsilon}^{m_3}\mathrm{e}^{m_4/\varepsilon}(1+\varepsilon)^{m_5 T}\mathrm{e}^{m_7\varepsilon\dot{\varepsilon}^{m_8 T}}T^{m_9}$$

- Termini accoppiati con la temperatura: $(1 + \varepsilon)^{m5\,T}$ ed $\varepsilon^{m8\,T}$
- Adatto a un ampio intervallo di T, ε e $\dot{\varepsilon}$, tipico della formatura a caldo; spesso si usa un sottoinsieme dei termini
- **Parametri da determinare: A, m_1 … m_9 (m_6 non è usato)**

● variabili (ε, $\dot{\varepsilon}$, T) ● parametri da determinare ● costanti note (riferimenti e fusione)

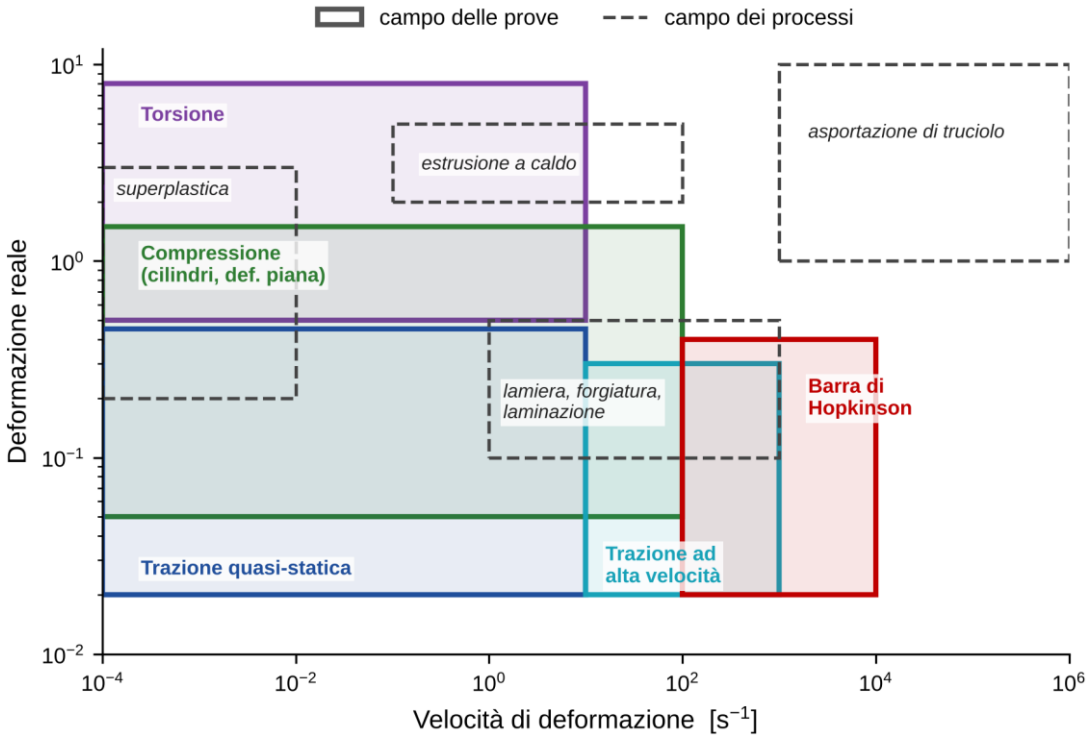
I parametri si identificano con regressione non lineare o analisi inversa su prove a diverse temperature e velocità di deformazione.

Scegliere la prova in base al processo da simulare

La prova ideale è quella che meglio rappresenta il processo di interesse

Se simulo…	prova più rappresentativa	perché
Un componente in lamiera (stampaggio)	**Trazione (e prove di formabilità, ad esempio Nakajima)**	Stato di tensione piano e deformazioni moderate, come nel processo
Una forgiatura a freddo	**Compressione di cilindri**	Grandi deformazioni in compressione, come nel processo
Una laminazione o un'estrusione a caldo	**Compressione in deformazione piana, torsione**	Grandi deformazioni ad alta temperatura, con stato di deformazione piana
Impatto o lavorazioni ad alta velocità	**Barra di Hopkinson, trazione ad alta velocità**	Velocità di deformazione da 10^2 a 10^4 s^{-1}

Campo di utilizzo di prove e processi

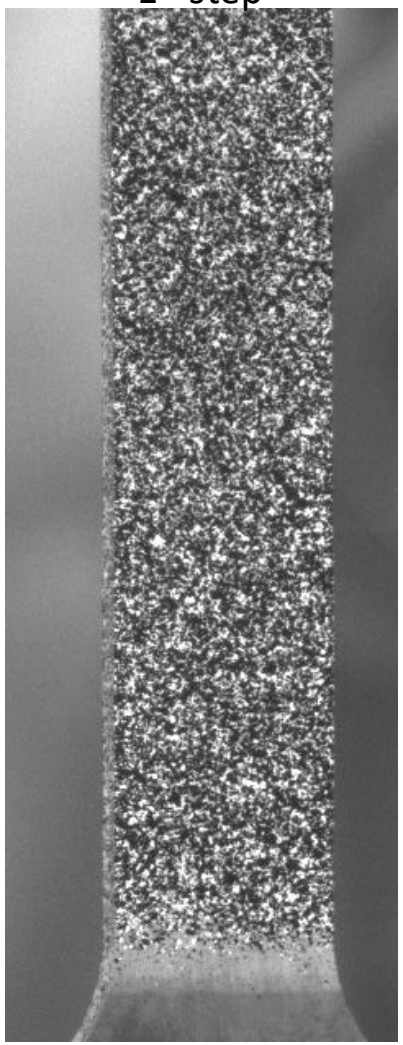


Campi indicativi, tipici delle attrezzature e dei processi (vedi la tabella degli ordini di grandezza).

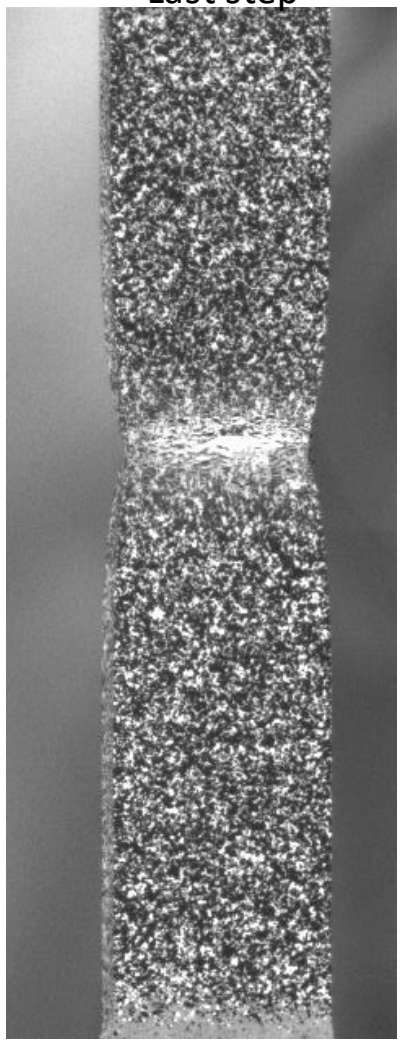
Le prove vanno eseguite in condizioni che replichino quelle di impiego (deformazione, velocità di deformazione, temperatura, stato del materiale), così che i modelli numerici in cui vengono caricate permettano, per quanto possibile, di interpolare i dati e non di estrapolarli.

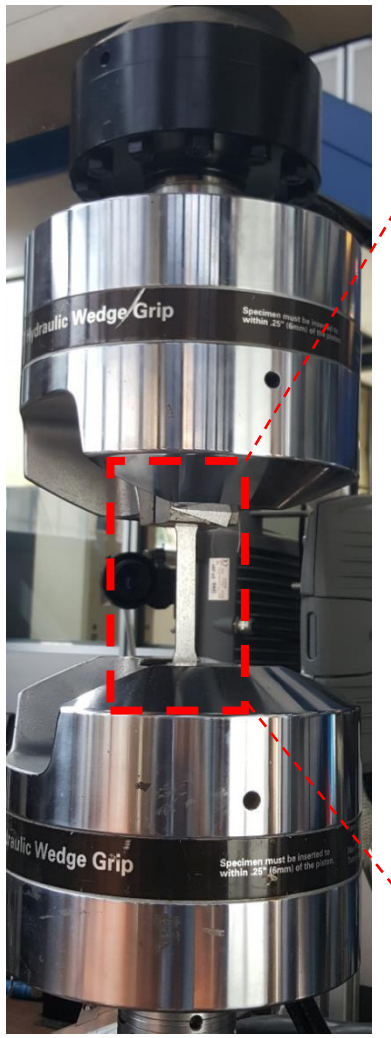
Tensile test: Digital Image Correlation systems

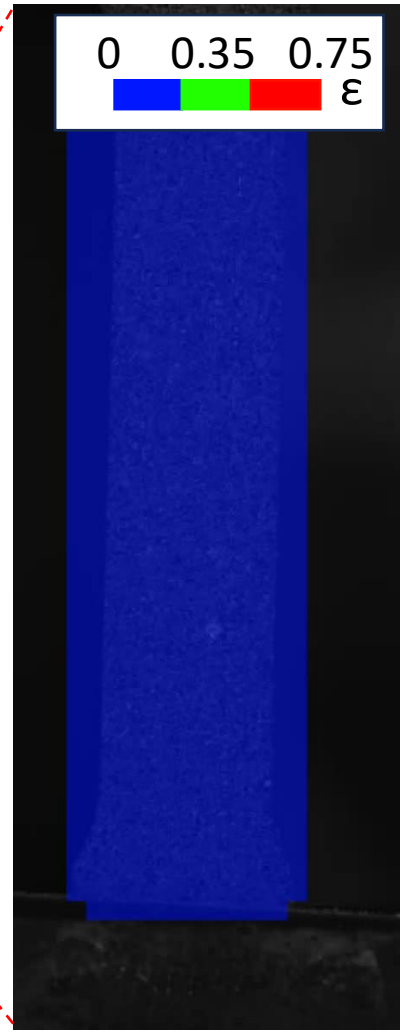
1st step



Last step

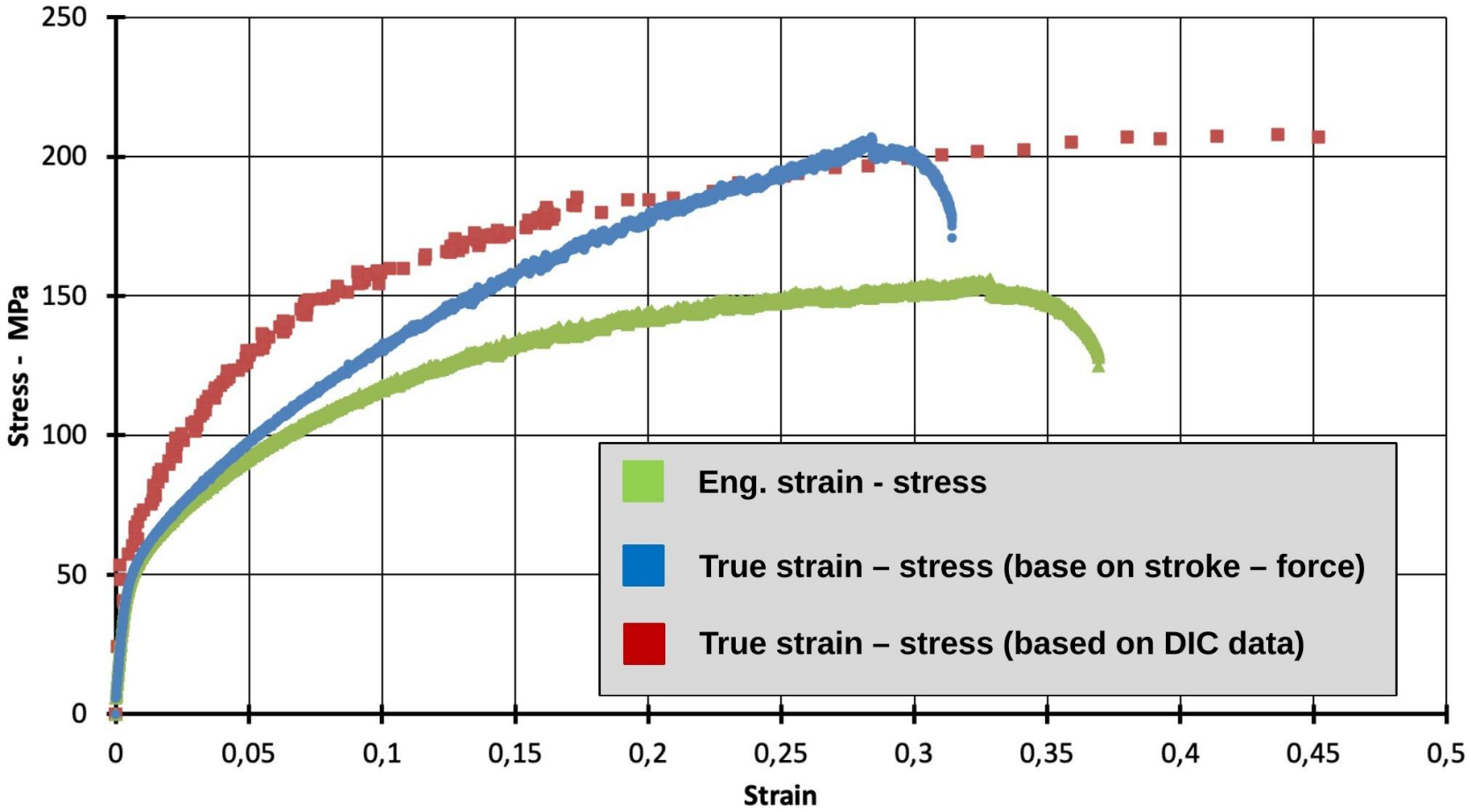






- Un pattern di vernice stocastico viene applicato al provino.
- Una telecamera ad alta frequenza acquisisce la prova di trazione.
- Il software DIC (es: Aramis GOM (Zeiss)) analizzando l'evoluzione del pattern calcola la distribuzione di deformazione reale durante la prova.
- I dati possono poi essere sincronizzati con le forze misurate per il calcolo della tensione reale.

Tensile Test - comparison

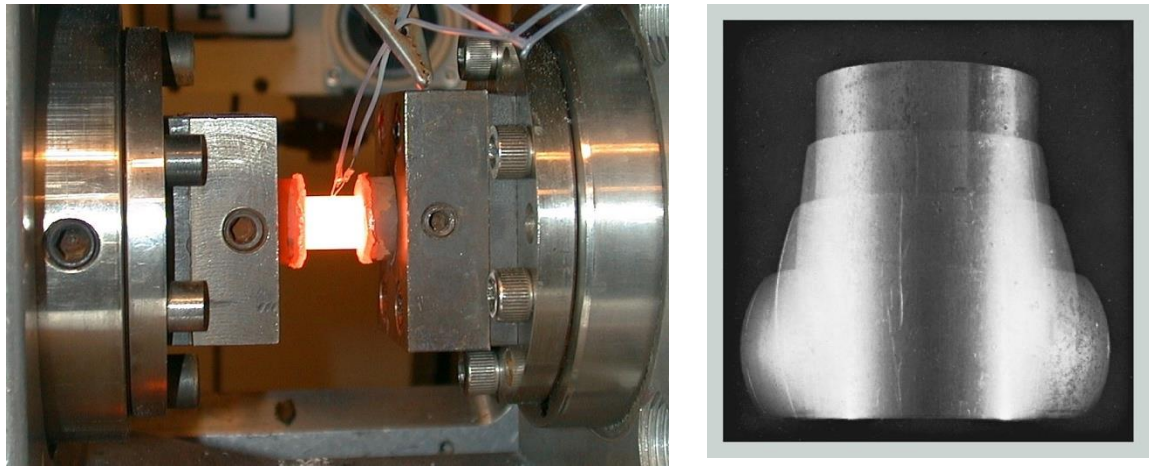


- Curve grezze, non filtrate – necessitano di ulteriore elaborazione.
- Comportamento reologico del materiale (lega AA) al variare dello strumento utilizzato per analisi dei dati.
- Software ‘’mal tollerano’’ curve non filtrate o che si intersecano nelle diverse condizioni. (modelli non hanno questo problema)

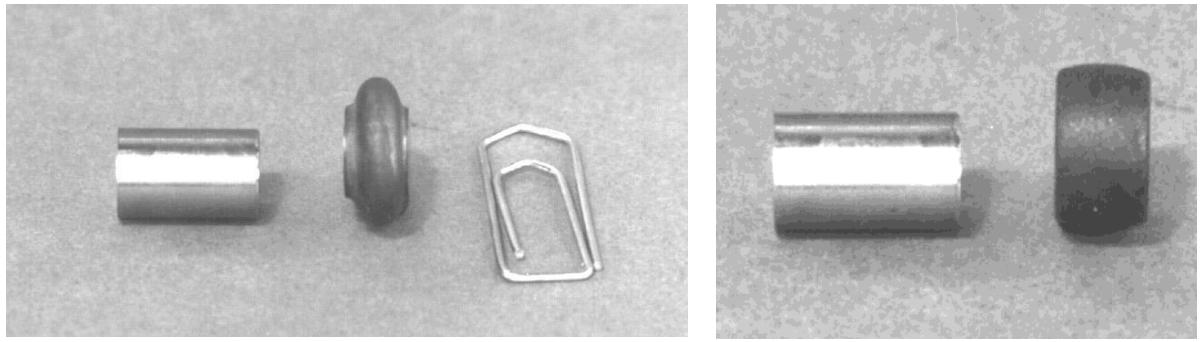
Prova di compressione

Adatta ai processi con grandi deformazioni in compressione, come la forgiatura

Setup di prova e barreling

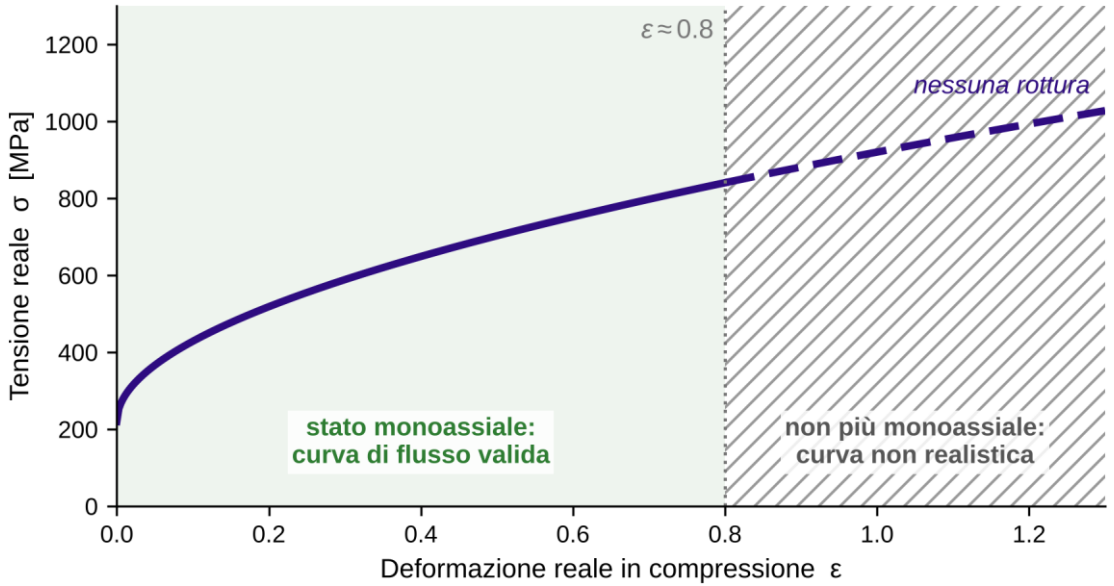


A sinistra: provino cilindrico riscaldato tra due piatti. A destra: evoluzione del barreling (rigonfiamento) con la deformazione.



Provini prima e dopo la prova: il barreling nasce dall'attrito all'interfaccia con i piatti, che ostacola il flusso libero del materiale.

Curva tensione-deformazione in compressione

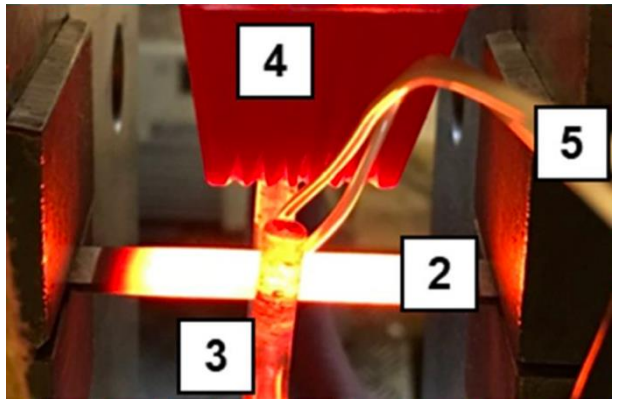


- In compressione in genere non si arriva a rottura: si può applicare una deformazione elevata
- Oltre $\varepsilon \approx 0.8$ la prova non è più monoassiale (barreling, attrito): la curva di flusso ricavata non è più realistica

Prove a caldo: trazione su Gleeble e dilatometria

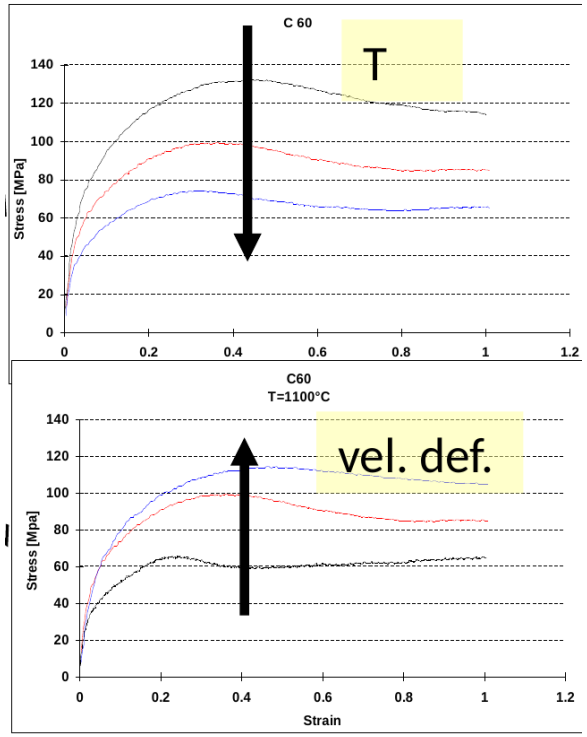
Le attrezzature a caldo permettono prove termomeccaniche e misure dilatometriche

Trazione a caldo (Gleeble)



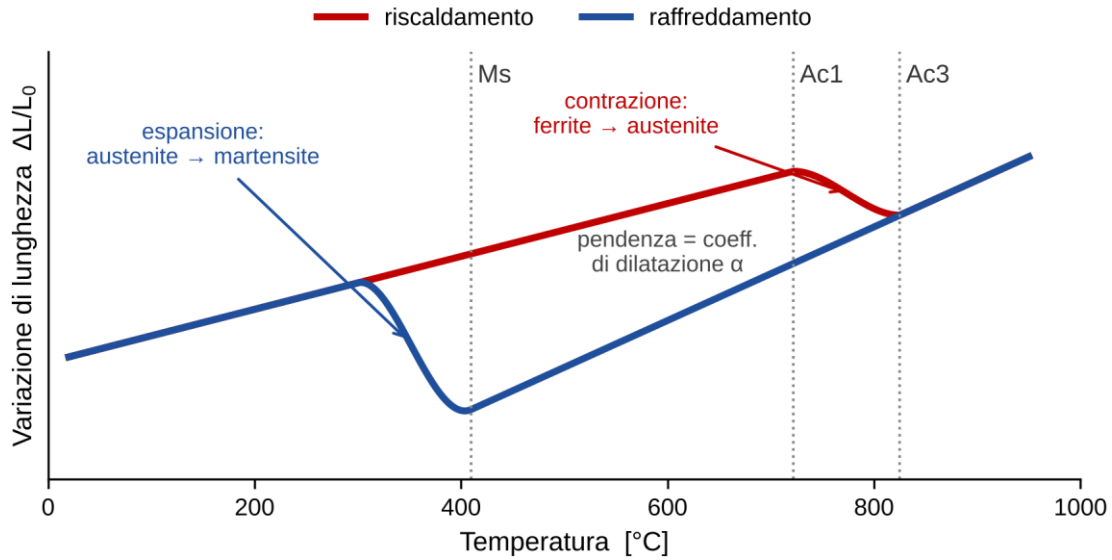
Provino riscaldato per effetto Joule durante la prova di trazione.

- Curve a diverse T e velocità di deformazione: base per tarare i modelli a caldo



Acciaio C60: curve di flusso a diverse temperature (T) e velocità di deformazione.

Dilatometria

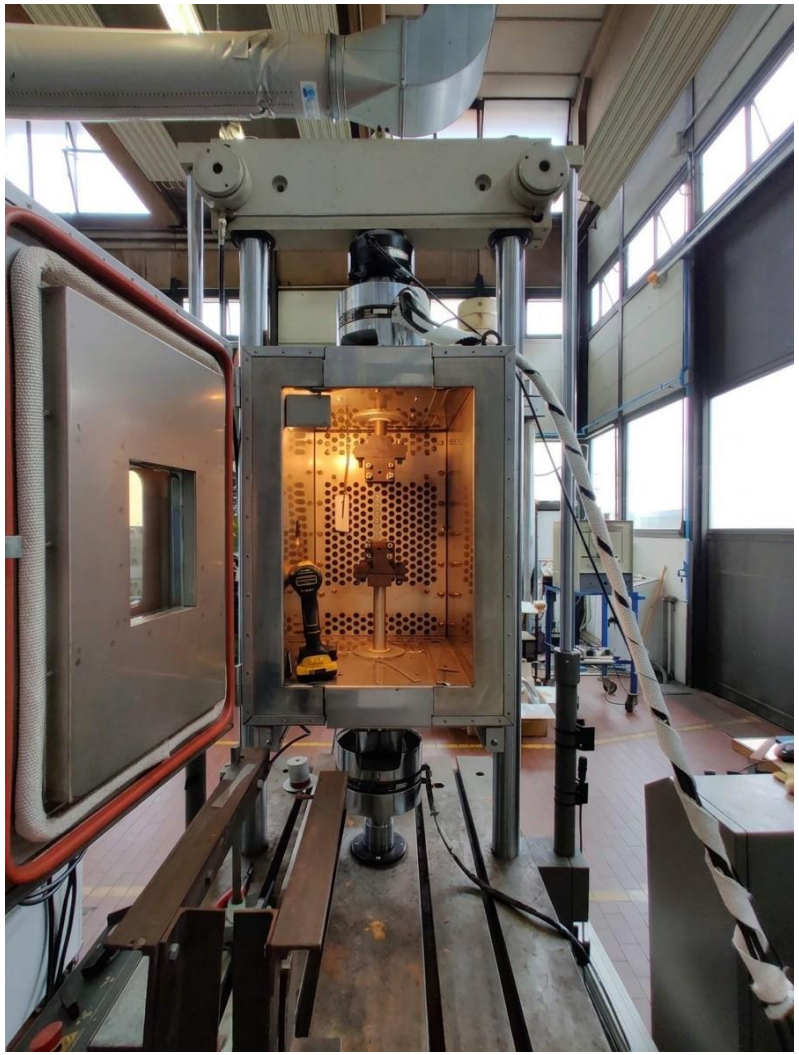


- Le attrezzature a caldo possono avere un dilatometro, che misura con precisione le variazioni dimensionali del provino
- Si ricavano i coefficienti di dilatazione termica (pendenza) e i punti di trasformazione di fase (Ac1, Ac3, Ms)
- Ogni microstruttura ha un diverso volume specifico (l'austenite è la più compatta): la trasformazione appare come variazione di lunghezza

Curva di dilatometria schematica (acciaio al carbonio): valori di Ac1, Ac3 e Ms indicativi.

Altri sistemi di riscaldamento: la camera climatica

Condiziona l'intero ambiente di prova intorno al provino



Camera climatica montata sulla macchina di prova.

−120 °C **+300 °C**

Vantaggi

- Temperatura controllata e omogenea
- Ampio intervallo: da −120 a +300 °C
- Condiziona l'intero ambiente: provino, afferraggi e attrezzatura

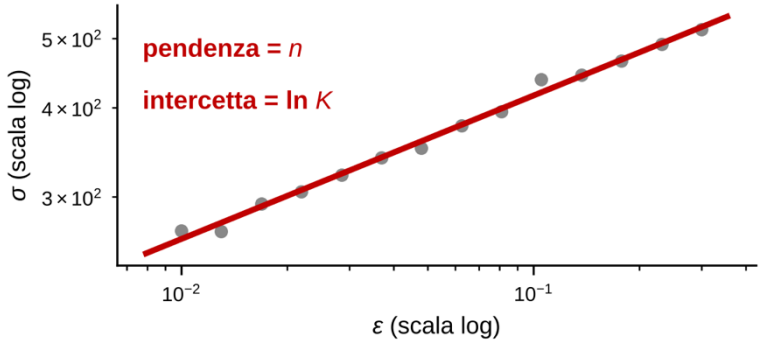
Limiti

- Non è possibile usare DIC
- Non è possibile usare estensometri
- Non si controllano le velocità di riscaldamento e raffreddamento

Taratura dei parametri dei modelli: tre approcci

Dalle curve sperimentali ai parametri del modello

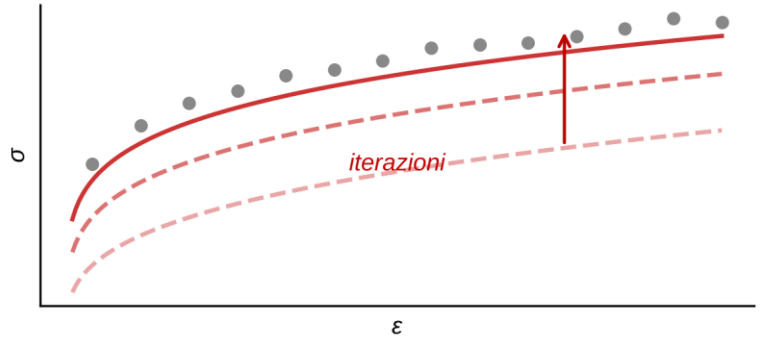
Metodo diretto



- Calcoli e regressioni sui dati sperimentali
- E dalla pendenza elastica, Y dalla deformazione residua dello 0.2%
- Hollomon: ln σ = ln K + n ln ε, una retta nel piano log-log
- Hansel-Spittel: il logaritmo è lineare nei parametri, quindi regressione lineare multipla

Semplice e rapido; richiede curve di flusso già corrette (attrito, strizione).

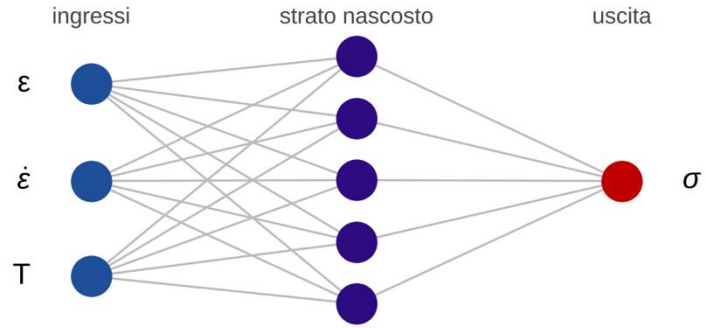
Analisi inversa



- Un modello numerico (FE) simula la prova
- Si variano i parametri finché la curva simulata coincide con quella sperimentale
- Si minimizza la distanza tra le curve (funzione obiettivo)
- Tiene conto di attrito, strizione e gradienti

Più onerosa, ma più accurata.

Modelli basati sui dati



- Reti neurali: apprendono σ = f(ε, ε̇, T) direttamente dai dati, senza forma analitica
- Algoritmi genetici: ottimizzatori per l'analisi inversa
- Servono molti dati e si comportano male fuori dal campo di taratura

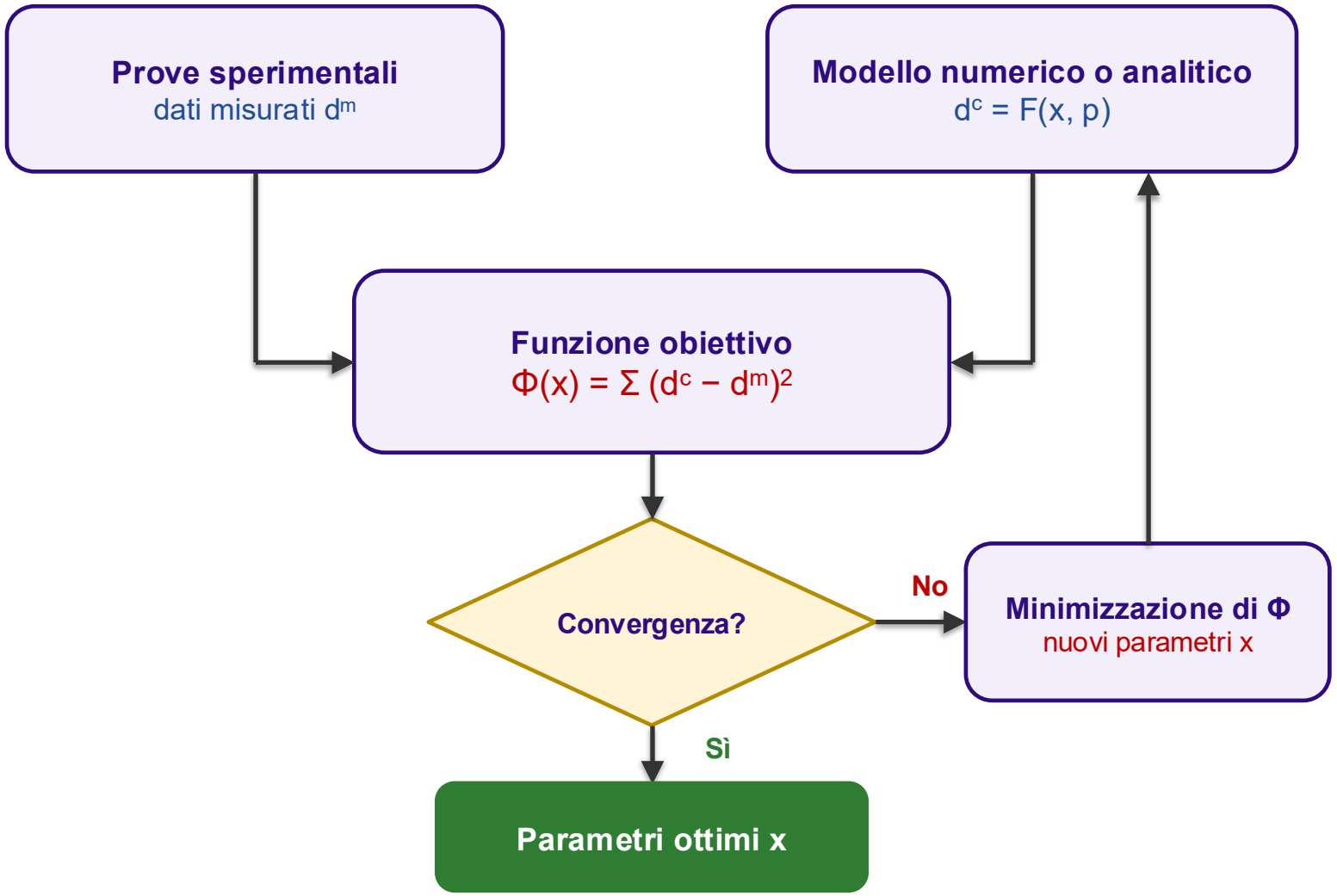
Nel nostro gruppo: reti neurali addestrate su simulazioni FE parametriche (variando K, n, σ_y e deformazione a rottura) per stimare i parametri da prove su provini intagliati.

In ogni caso: più i dati coprono il campo di impiego, meno si estrapola.

Analisi inversa: schema di identificazione dei parametri

Il modello numerico viene ripetuto variando i parametri fino a riprodurre la curva sperimentale

p: dati di input del processo



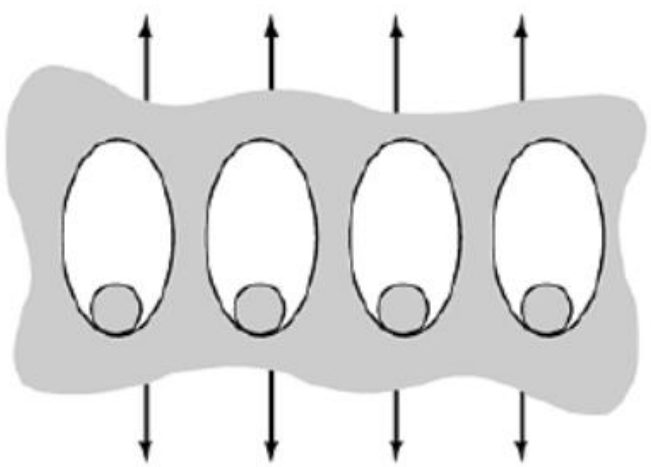
Punti chiave

- Analisi di sensibilità: quanto ogni parametro influenza la funzione obiettivo
- Scelta delle grandezze misurate, per evitare problemi mal condizionati
- Ottimizzatori: a gradiente, simplex, algoritmi genetici
- Il modello numerico include attrito e gradienti: la curva di flusso si ricava anche quando la prova non è ideale (barreling, strizione)

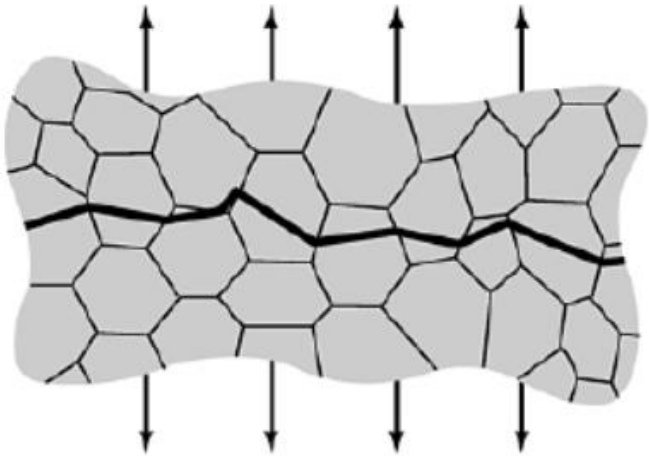
x: parametri del modello (incogniti) p: dati di input del processo
d^m: dati misurati d^c: dati calcolati

Meccanismi di rottura nei metalli

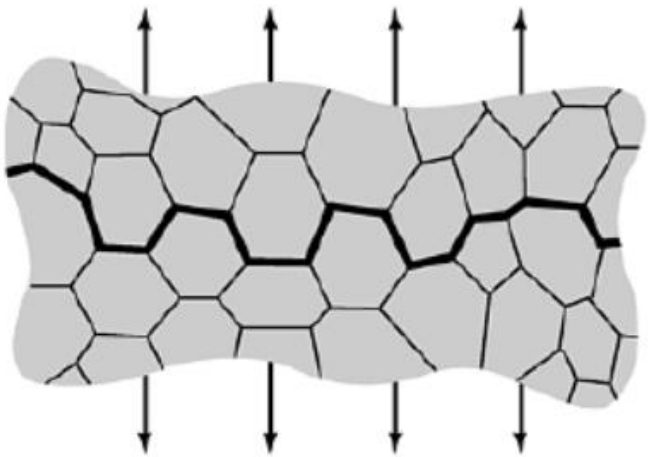
Tre modi principali di frattura: duttile, per clivaggio e intergranulare



Ductile fracture



Cleavage fracture



Intergranular fracture

Duttile

- Forte deformazione plastica prima della rottura
- Nucleazione, crescita e coalescenza di vuoti
- Tipica dei metalli duttili e della formatura a freddo

Per clivaggio (fragile)

- Rottura trans-granulare lungo piani cristallografici
- Poca deformazione plastica, propagazione rapida
- Favorita da bassa temperatura, alta velocità e stati triassiali

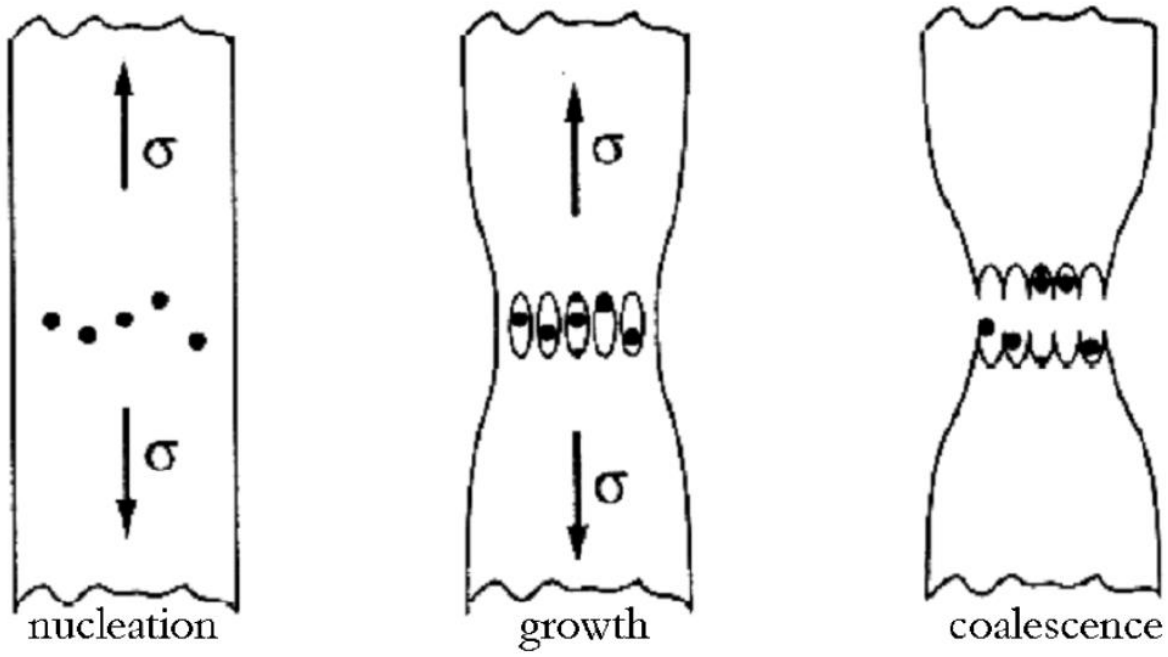
Intergranulare

- La cricca segue i bordi di grano
- Bordi indeboliti: fragilizzazione, segregazioni, idrogeno, scorrimento viscoso ad alta temperatura

Nella formatura a freddo il meccanismo che conta di più è quello duttile: lo vediamo nel dettaglio.

Frattura duttile: nucleazione, crescita e coalescenza dei vuoti

Le tre fasi della micromeccanica della frattura duttile



Le tre fasi in una prova di trazione: i vuoti si formano e crescono nella strizione, poi si uniscono.

1 **Nucleazione dei vuoti**

Di solito al bordo di particelle di seconda fase o inclusioni

controllata dalla tensione

2 **Crescita dei vuoti**

I vuoti aumentano di volume e cambiano forma per la deformazione della matrice plastica circostante

controllata dalla deformazione

3 **Coalescenza dei vuoti**

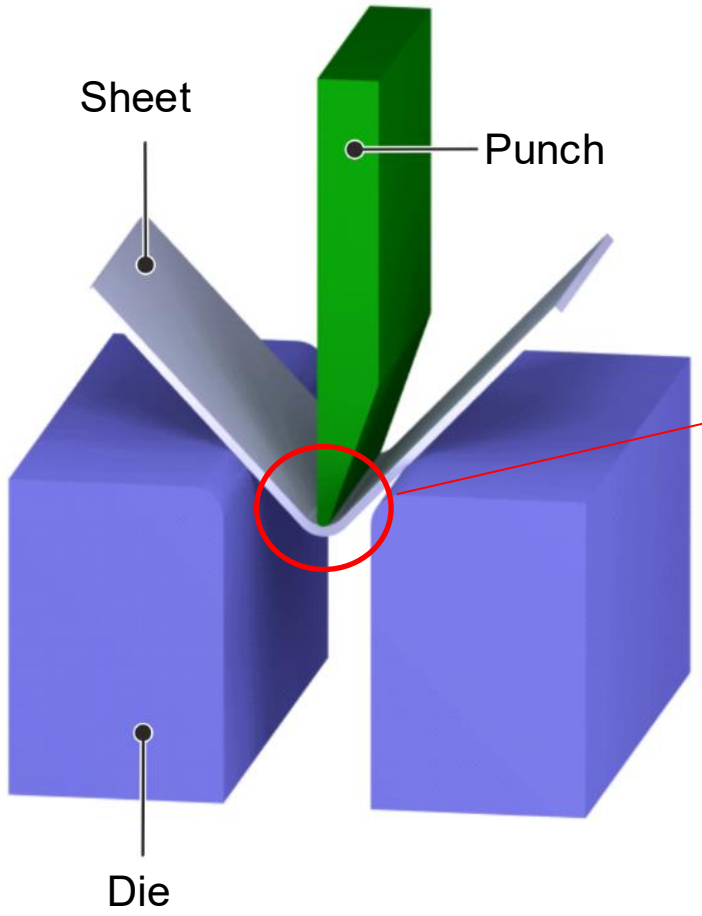
Per l'interazione tra vuoti vicini grandi inizia e si propaga la frattura macroscopica

controllata dalla deformazione

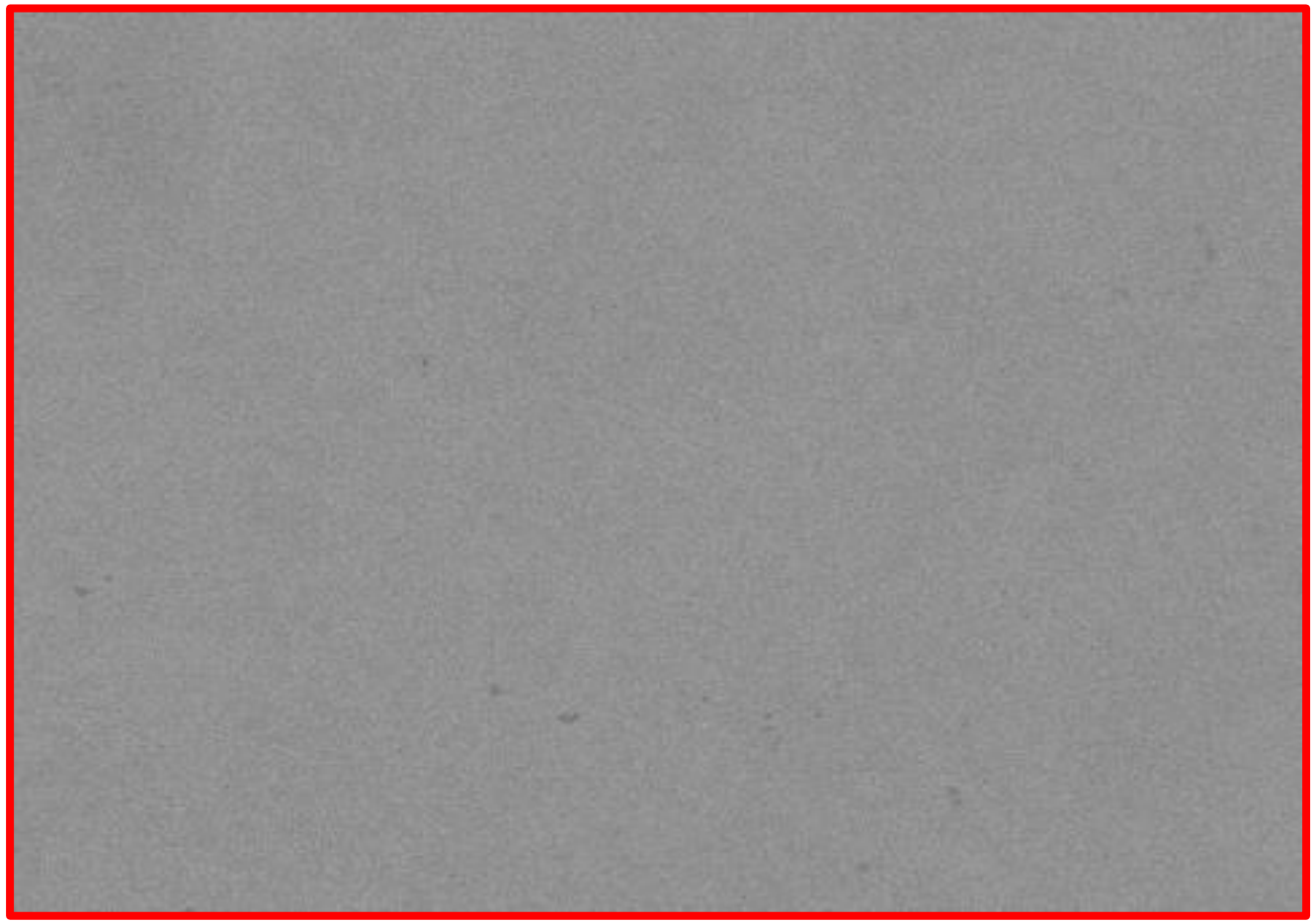
Crescita e coalescenza sono controllate dalla deformazione: i vuoti accumulati sono il "danno" che riduce la formabilità (slide seguente).

Visualization of forming-induced Damage

Crescita dei vuoti durante la piegatura: dal pezzo alla microstruttura



Void growth during bending



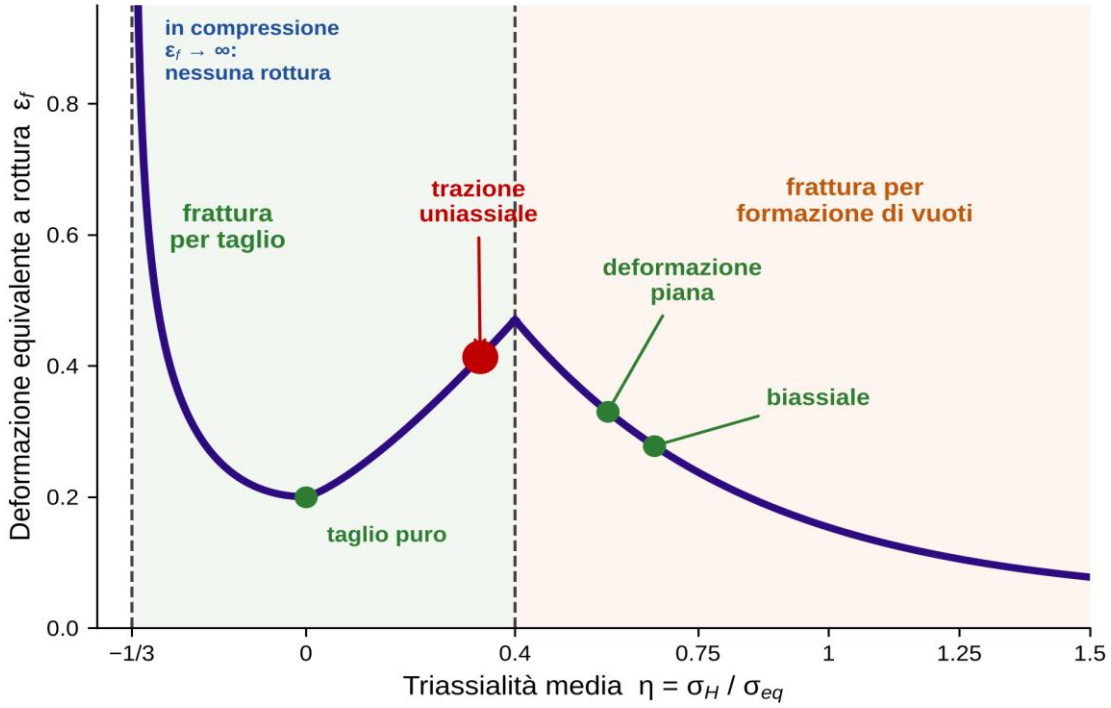
100 µm (magnification: 200x)

Dunlap et al., GFE, RWTH Aachen

La trazione dà già una deformazione a rottura: perché non basta?

Perché la deformazione a rottura dipende dallo stato di tensione, e in trazione è monoassiale

- La prova di trazione fornisce già un valore di deformazione a rottura ε_f
- **Ma lo stato di tensione è monoassiale: $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$**
- Nei processi il materiale è deformato e sollecitato in più direzioni: biassiale, deformazione piana, taglio, compressione
- La deformazione a rottura dipende dallo stato di tensione, descritto dalla triassialità $\eta = \sigma_m / \sigma_{eq}$ (σ_m: tensione media)
- A bassa triassialità la frattura è per taglio, ad alta triassialità per formazione di vuoti
- Non è quindi una proprietà del solo materiale: servono prove con stati di tensione diversi



Curva schematica, senza valori misurati: andamento tipico della deformazione equivalente a rottura in funzione della triassialità media.

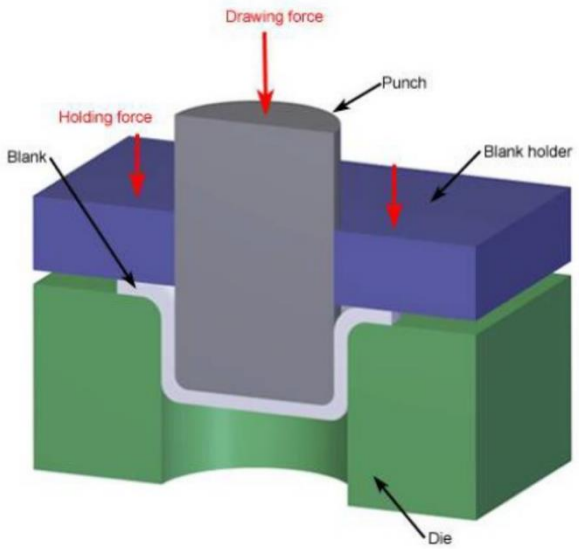
Formabilità

Capacità del materiale di subire deformazione plastica senza difetti

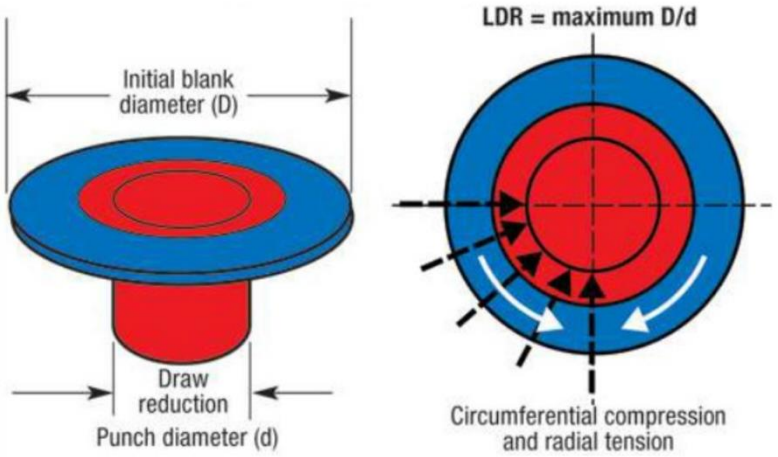
Quali difetti	Come si valuta	Da cosa dipende
◆ Rottura (splitting) ◆ Grinze (wrinkling) ◆ Pieghe (folds)	◆ Prove generiche, in condizioni semplici di tensione ◆ Prove simulative, che replicano in scala di laboratorio le condizioni del processo	◆ Proprietà del materiale: in particolare anisotropia r ed esponente di incrudimento n ◆ Geometria del pezzo ◆ Forma degli stampi ◆ Parametri di processo (temperatura, attrito…)

Imbutitura: processo e stati di tensione nella flangia

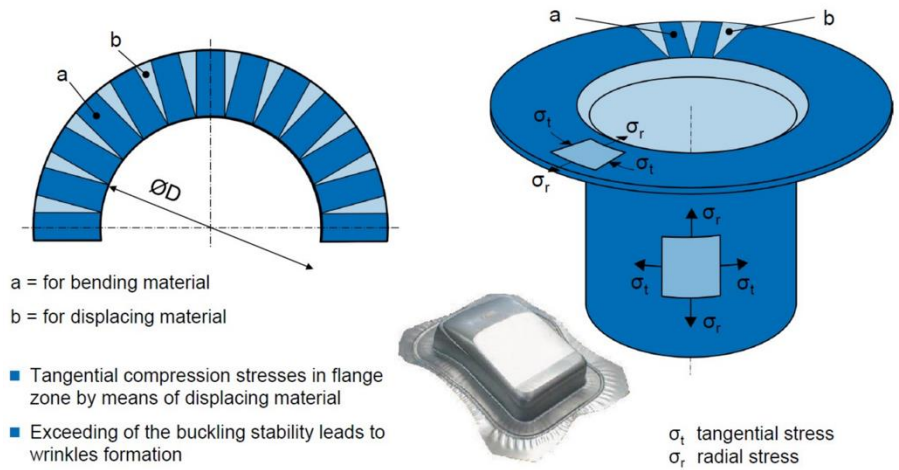
Il bloccalamiera previene le grinze e riduce il ritorno elastico



Schema del processo



Rapporto limite di imbutitura: LDR = D/d massimo

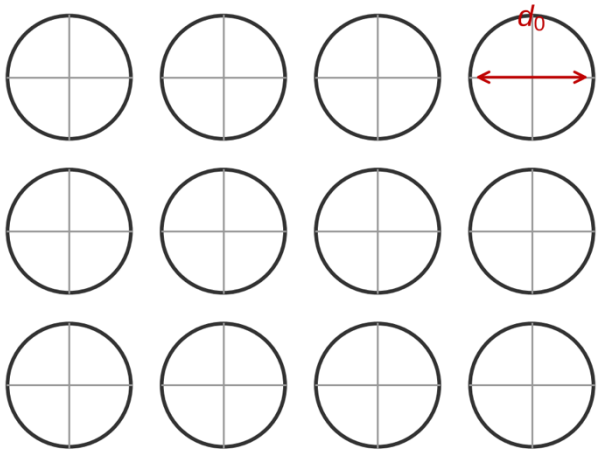


Flangia: compressione tangenziale e trazione radiale

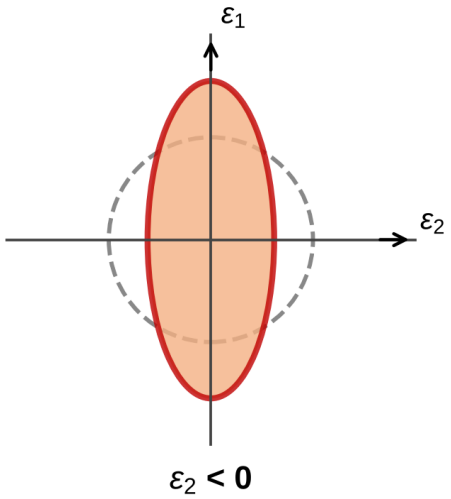
- Nella flangia il materiale è in compressione circonferenziale (σ_t) e trazione radiale (σ_r)
- Se la compressione tangenziale supera la stabilità della lamiera, si formano grinze
- Il bloccalamiera esercita una forza che le impedisce, ma una forza troppo alta aumenta il rischio di rottura
- LDR: massimo rapporto tra diametro del tondello D e del punzone d imbutibile in un colpo

Misura della deformazione: griglia di cerchi (visioplasticità)

Dai cerchi deformati in ellissi si ricavano le deformazioni principali

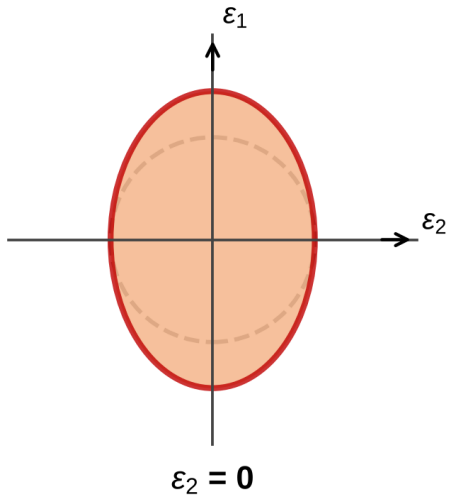


Griglia prima della deformazione



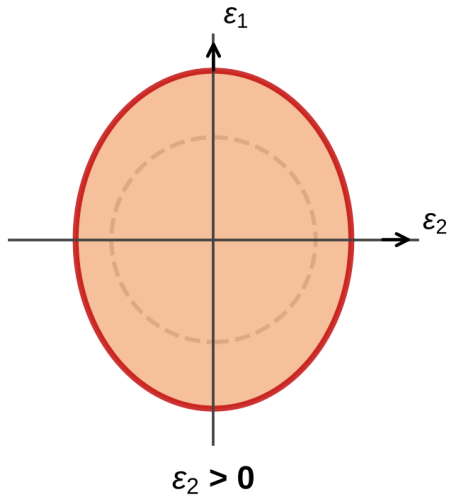
$\varepsilon_2 < 0$

trazione uniassiale



$\varepsilon_2 = 0$

deformazione piana



$\varepsilon_2 > 0$

stiramento biassiale

Cerchio originale (tratteggio) ed ellisse dopo la deformazione, nei tre casi più comuni

- Sulla lamiera si riproduce una griglia di cerchi (ad esempio per incisione elettrochimica) prima della deformazione
- Al termine della prova si misura la deformazione dei cerchi, diventati ellissi, nelle due direzioni principali
- Deformazione minore positiva: stiramento biassiale
- Deformazione minore negativa: il cerchio si contrae nella direzione minore e diventa un'ellisse allungata

Deformazioni reali

$$\varepsilon_1 = \ln (d_1 / d_0)$$

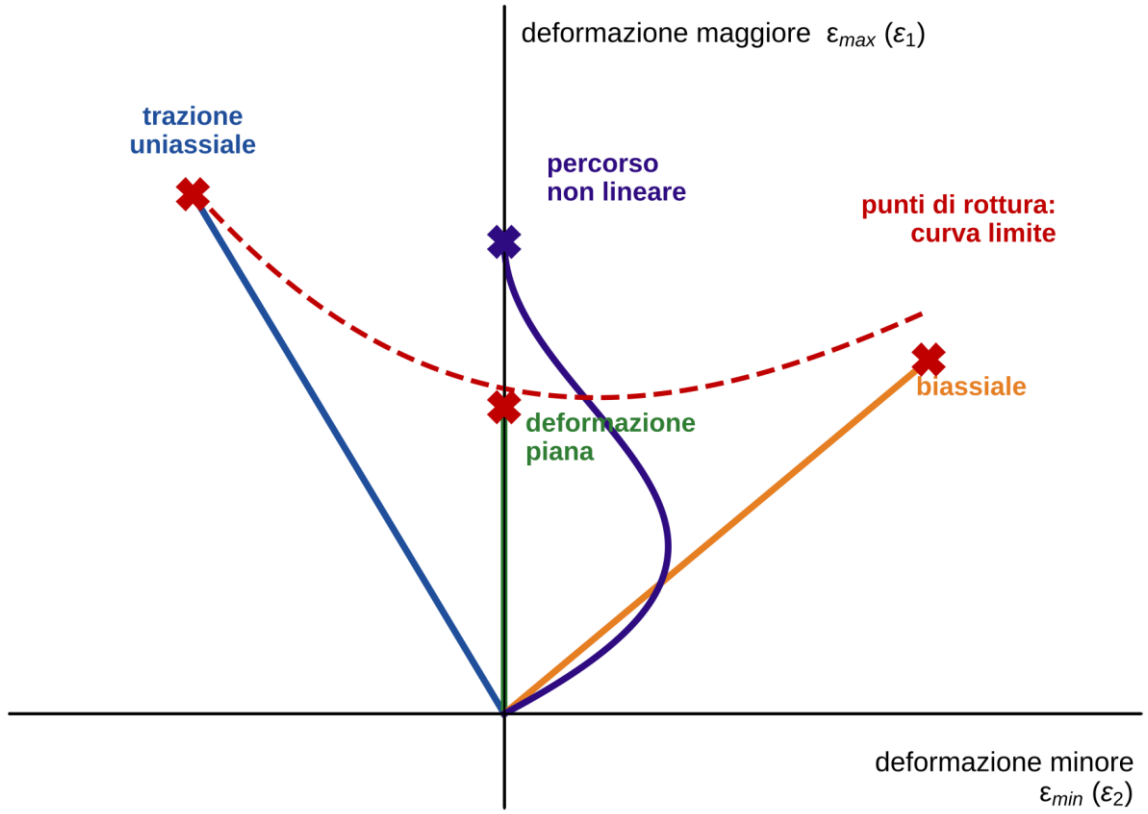
$$\varepsilon_2 = \ln (d_2 / d_0)$$

$$\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

d_0: diametro originale; ε_3 da volume costante

Misura della deformazione: piano delle deformazioni principali

Ogni punto della lamiera descrive un percorso nel piano $\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$

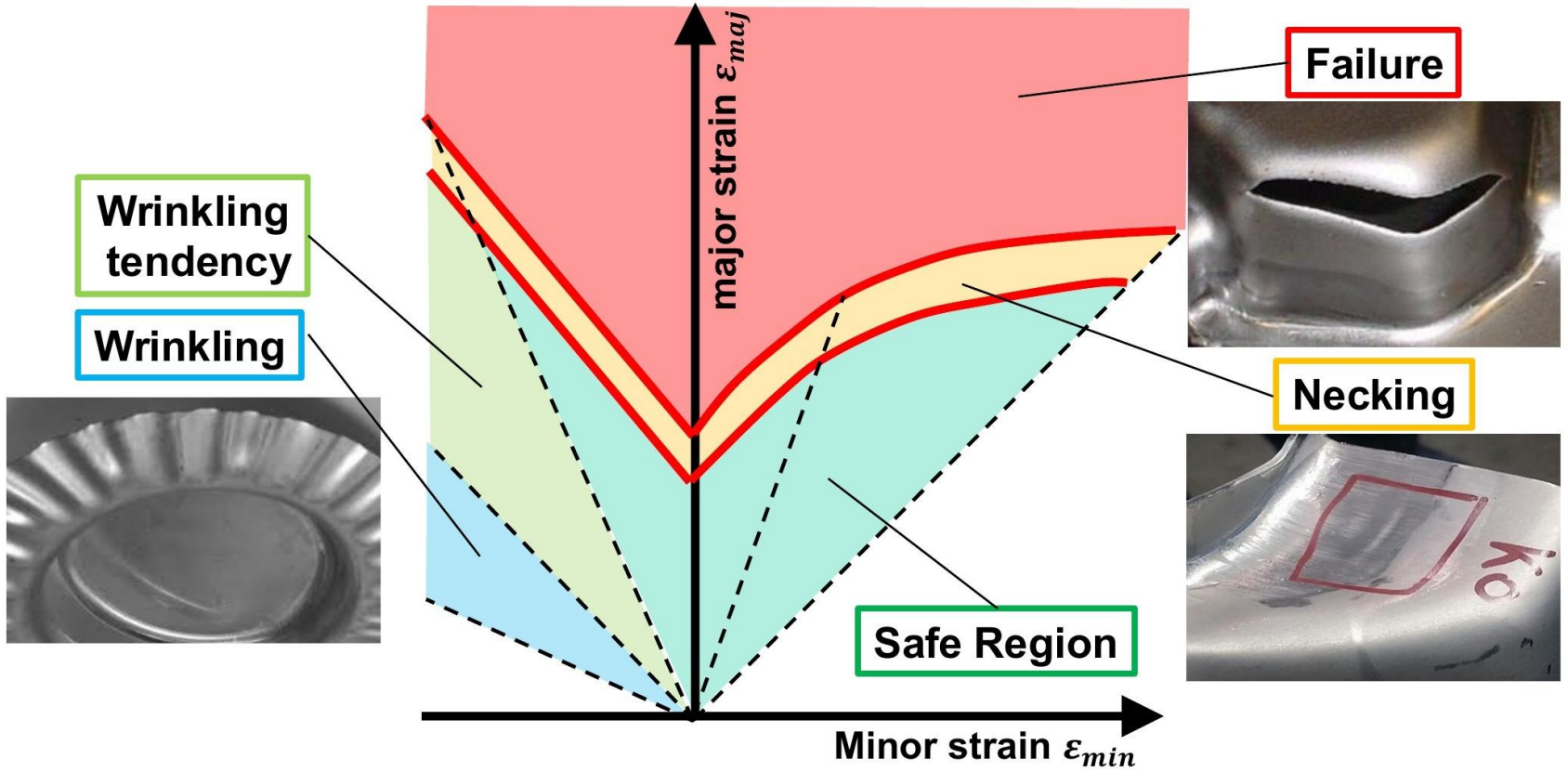


- Dominio: piano cartesiano con deformazione maggiore sull'asse verticale e minore sull'asse orizzontale
- La terza deformazione si ricava dall'ipotesi di volume costante: $\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$
- Con tensioni proporzionali (rapporto circa costante) la storia di deformazione è lineare
- Il punto finale del percorso è la rottura (×): l'insieme dei punti di rottura forma la curva limite di formabilità

Percorsi schematici.

Sheet metal forming – Formability

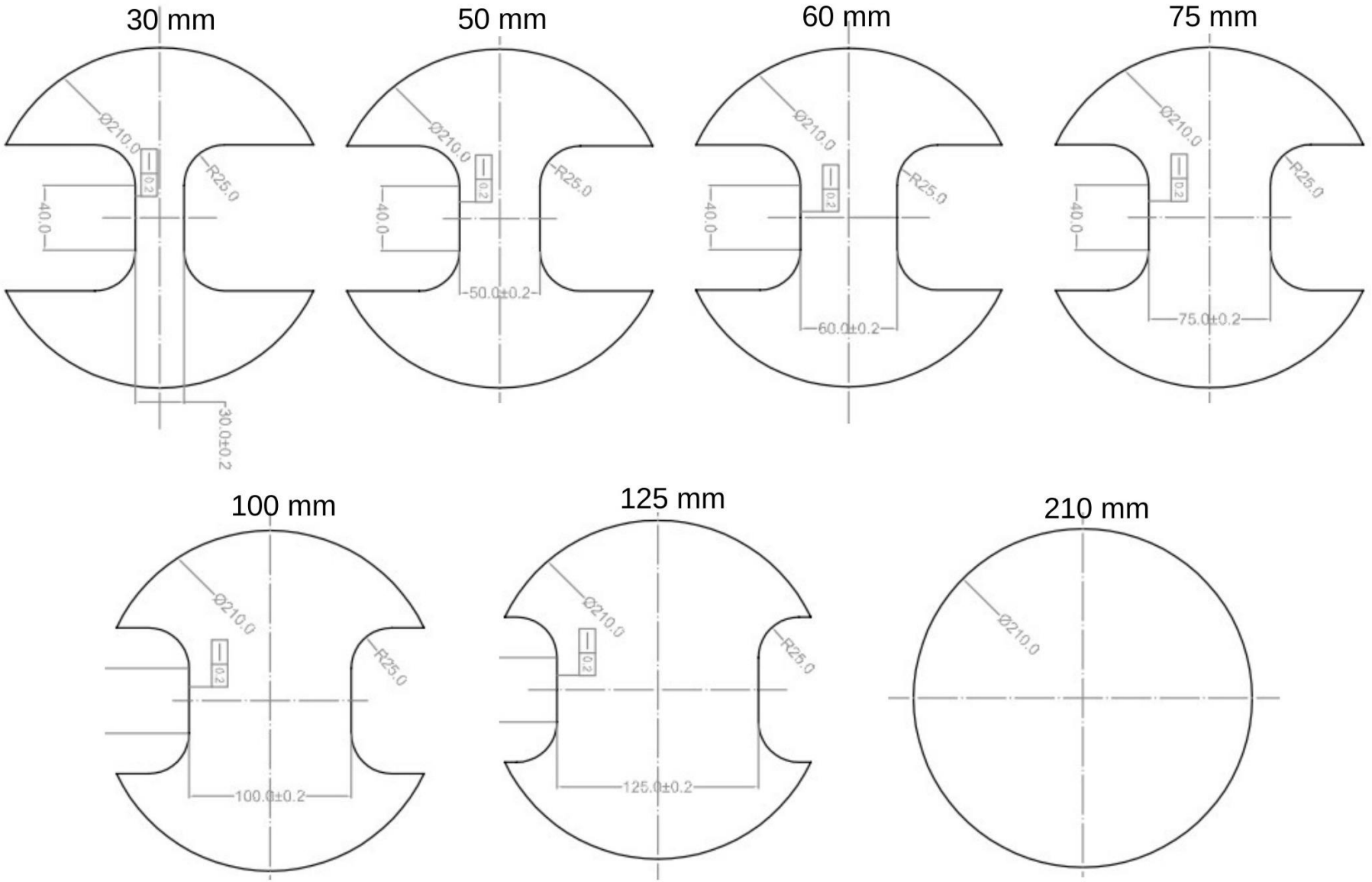
- The **design of sheet metal forming processes** must account for the **main defects that may occur during stamping**, such as wrinkling, tearing, and necking
- For **complex geometries**, it is not sufficient to characterize the material only through **tensile tests to determine the flow stress**.
- It is also necessary to evaluate the **formability of the sheet**, for example through **Forming Limit Diagrams (FLD)**, which allow identifying the **limits of safe deformation and the boundaries of the process window**.



Limits of Forming Limit Diagrams

- La loro forma dipende da molti fattori:
  - Cosa si vuole stimare (frattura o strizione)
  - Materiale e spessore della lamiera
  - Dimensione della griglia
  - Tipo di test
- La rappresentazione è valida solo per
  - Spessori relativamente bassi (<4mm)
  - Storie di carico lineari
- Influiscono anche
  - Velocità di deformazione, temperatura, microstruttura, vibrazioni

Nakajima test

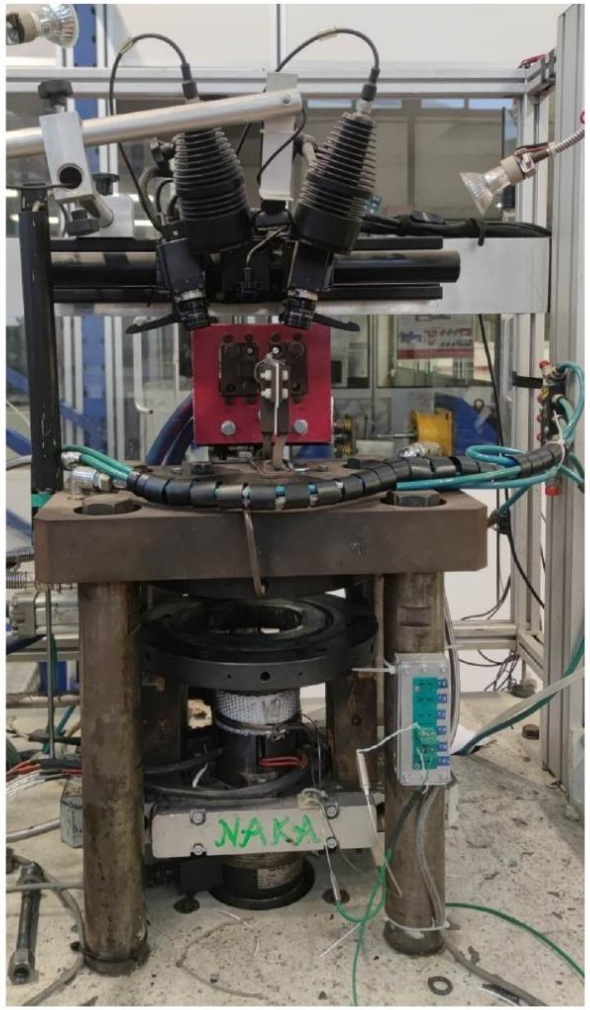


Nakajima test

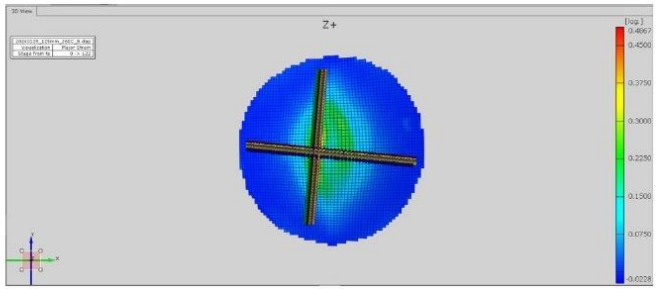
Preparation

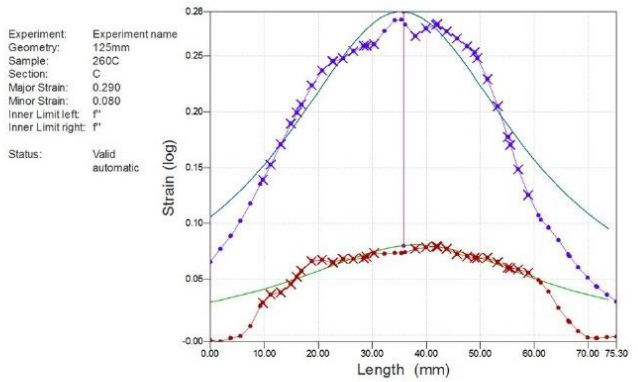


Testing



Aramis analysis

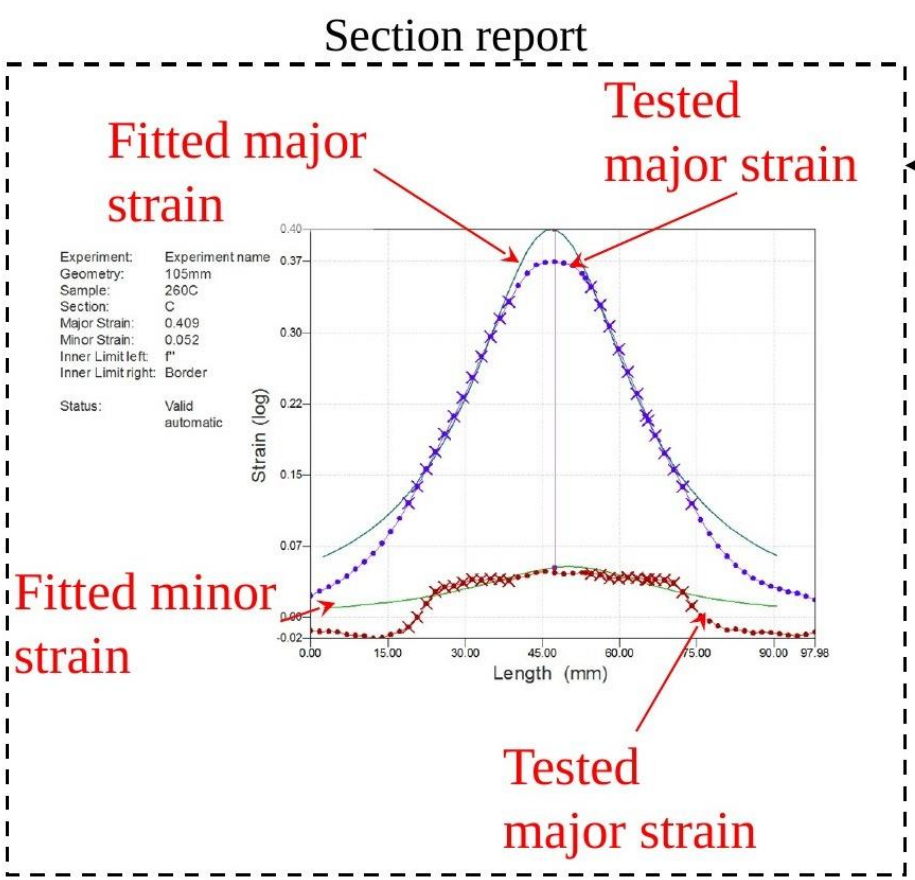


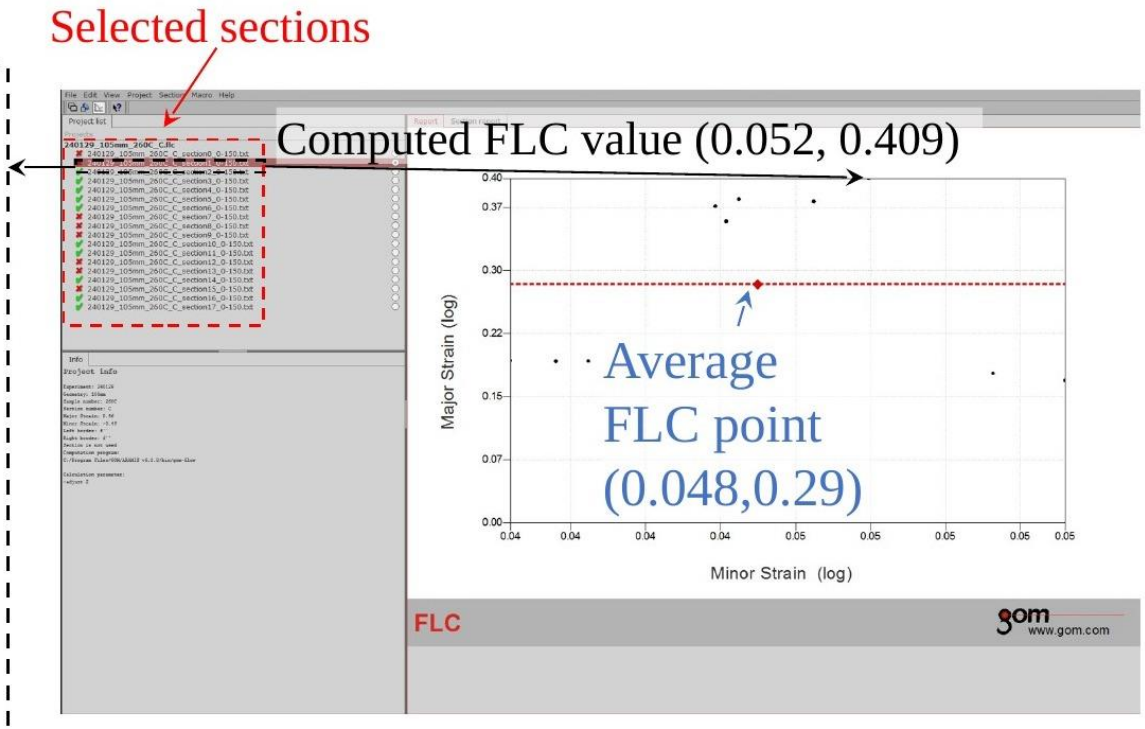


Nakajima test

Data Analysis – FLC computation

ARAMIS fits the experimental results with smooth curves. Before the computation of the FLC value, reasonable and well-fitted curved were selected. After that FLC point of each section was computed and the average point of all the selected sections was obtained.





Conclusioni

Cosa portare a casa

1

Caratterizzare serve a progettare e a simulare

Per il dimensionamento bastano E, Y e UTS; per simulare un processo serve la curva di flusso completa.

2

Curva reale, non solo ingegneristica

$\sigma_r = \sigma_i (1 + e)$ ed $\varepsilon = \ln (1 + e)$ valgono fino alla strizione; oltre servono misure locali, come la DIC.

3

Non esiste “la” curva del materiale

Dipende da composizione, trattamento, direzione (anisotropia), temperatura e velocità di deformazione.

4

I modelli hanno parametri da tarare

Da Hollomon a Johnson-Cook e Hansel-Spittel: con regressioni, analisi inversa o reti neurali.

5

La prova deve rappresentare il processo

Stesse deformazioni, velocità, temperature e stato del materiale: così i modelli interpolano invece di estrapolare.

6

La rottura dipende dallo stato di tensione

La trazione non basta: per la formabilità servono prove simulative (Nakajima) e curve limite di formabilità.

Grazie per l'attenzione

Domande?

Enrico Simonetto – Precision Manufacturing Group

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova