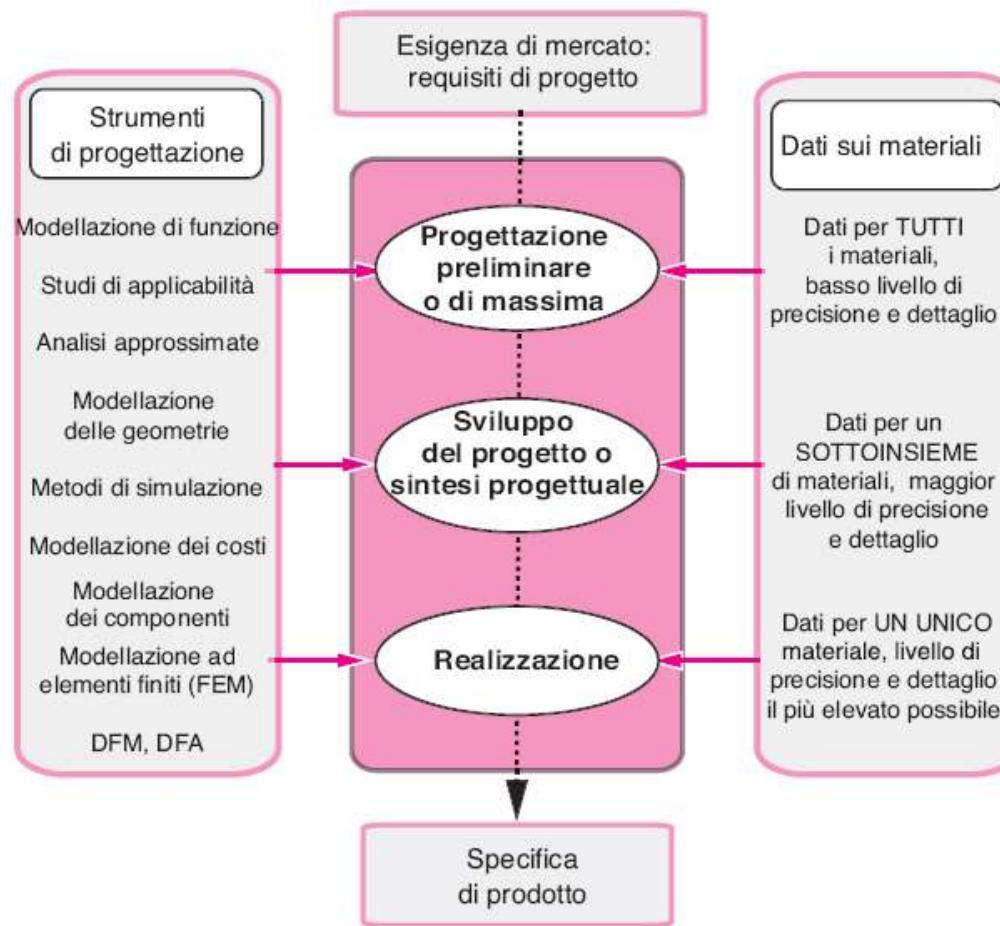
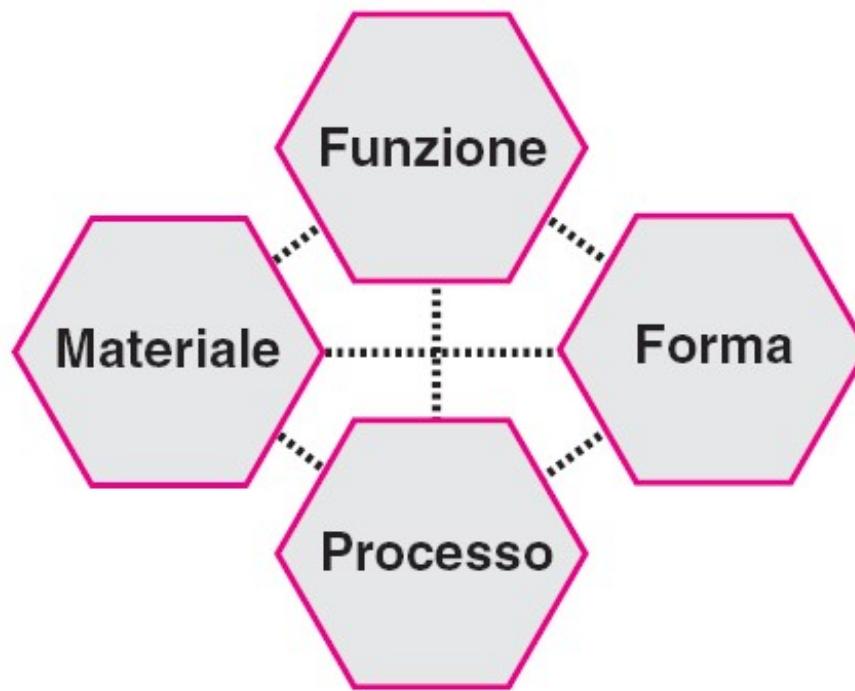


Scelta del materiale e del processo



Le informazioni sui materiali sono necessarie in ogni fase, ma a diversi livelli di estensione e di precisione.

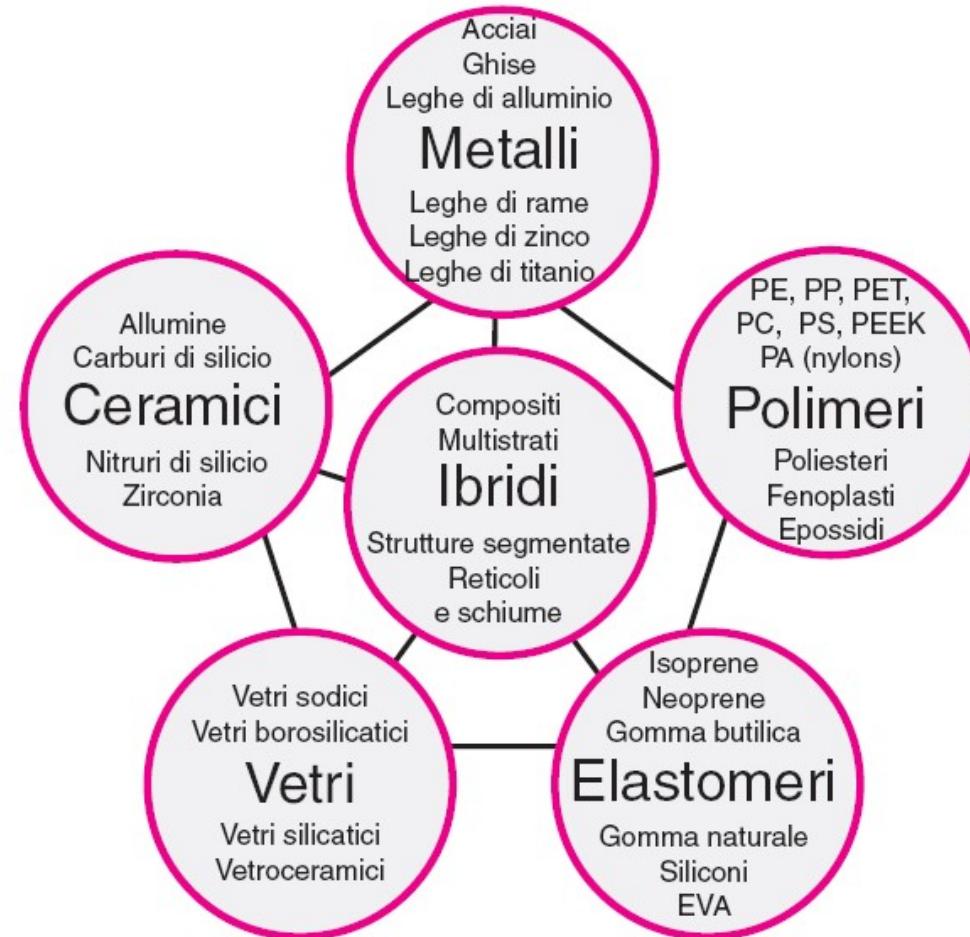
Scelta del materiale e del processo



L'interazione fra funzione, materiale, forma e processo è l'aspetto cruciale della procedura di scelta del materiale.

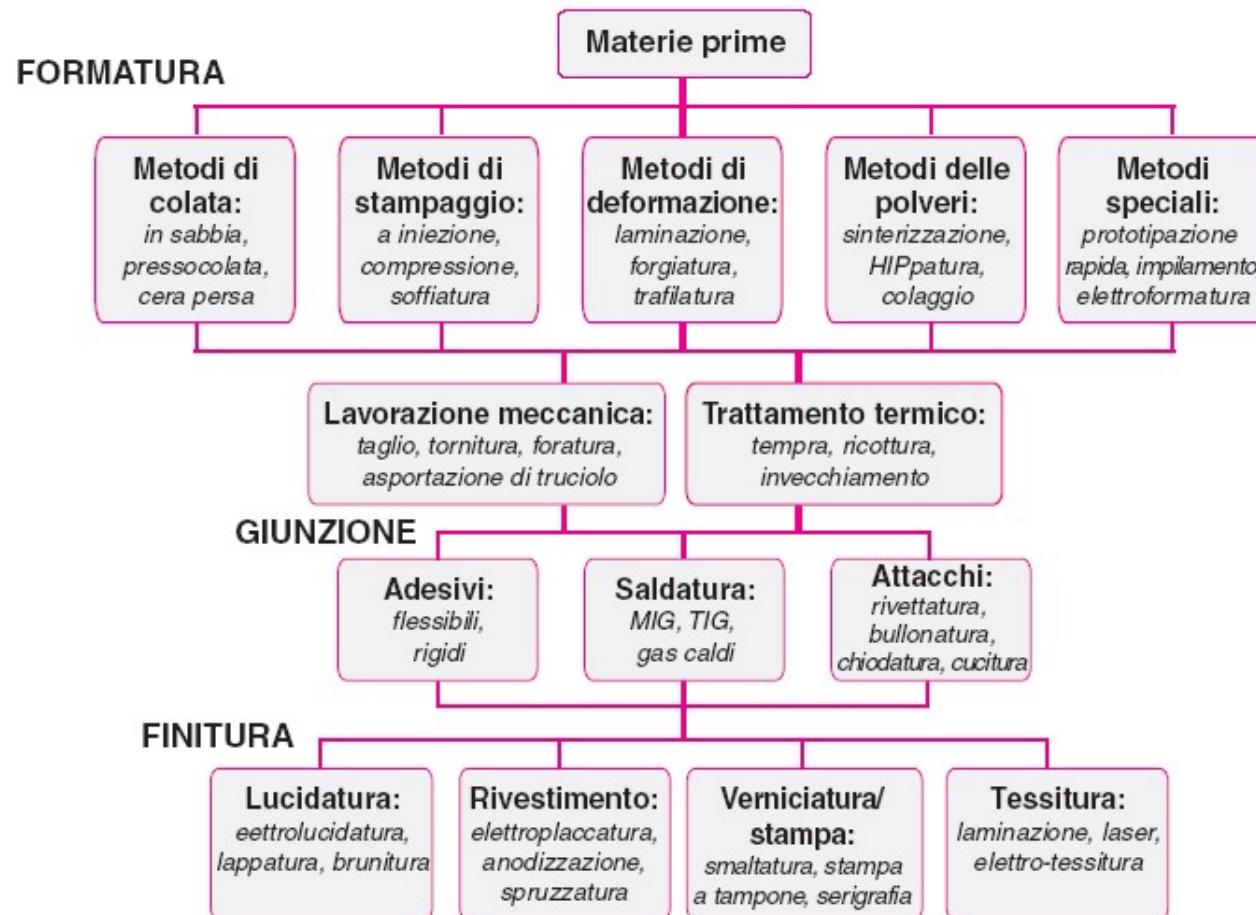
Spesso una determina le altre e viceversa

Scelta del materiale e del processo



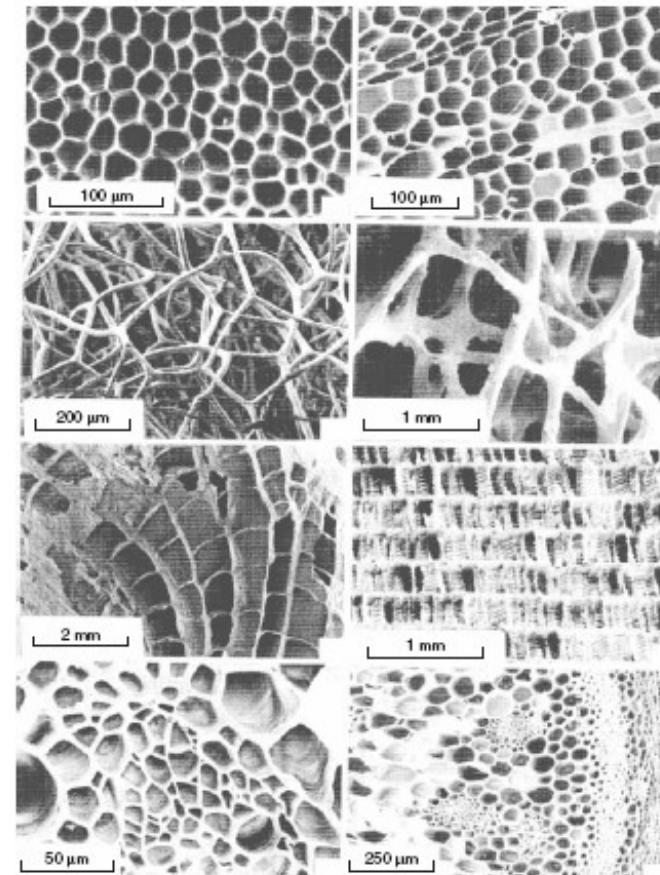
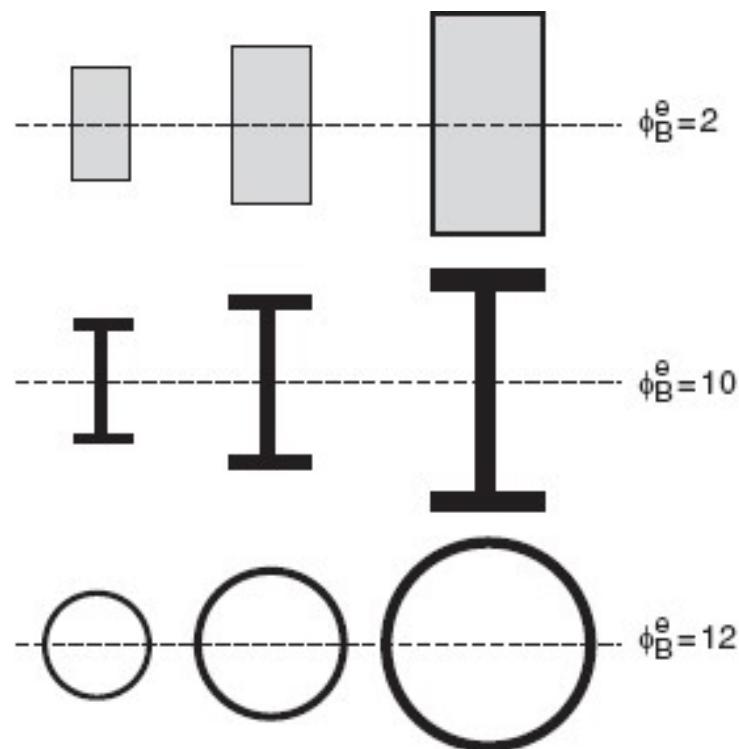
Tra le diverse famiglie dei materiali, quale sarà più indicata per realizzare un determinato prodotto?

Scelta del materiale e del processo



Tra le diverse famiglie dei processi, quale sarà più indicata per realizzare un determinato prodotto?

Scelta della forma



Tra le diverse tipologie di forma (macro- e micro- scopica), quale sarà più indicata per realizzare un determinato prodotto?

Riassumendo

- 1) Individuazione di un'**esigenza di mercato** e di una **nuova idea** per soddisfarla
- 2) Ottenimento della **specifica** completa di un prodotto che soddisfa l'esigenza e concretizza l'idea.
- 3) Un'esigenza deve essere ben identificata prima di poter essere soddisfatta, ed è essenziale definirla con precisione, attraverso la formulazione di una serie di **requisiti di progetto**.
- 4) Requisiti di progetto devono essere **neutrali**
- 5) Un progetto è **originale** soltanto se frutto di un'idea o di un principio di funzionamento nuovi
- 6) I nuovi materiali, che possono offrire combinazioni di proprietà uniche, permettono di realizzare progetti originali.
- 7) Il progetto **adattativo** parte da un prodotto già realizzato e tenta di incrementarne la prestazione attraverso un miglioramento del principio di funzionamento
- 8) Il progetto **variante** riguarda un cambiamento di scala, di dimensione o di dettagli senza modificare la funzione o il metodo per realizzarla.

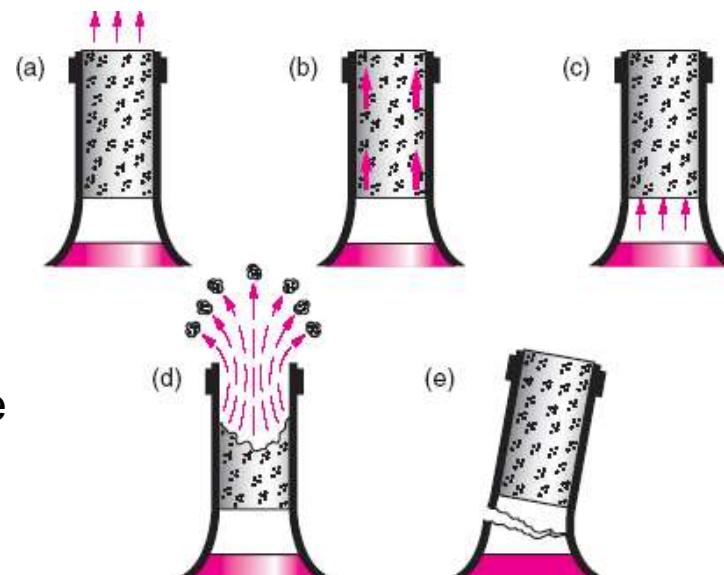
Un esempio: vino e tappi

Una bottiglia tappata:

ESIGENZA: poter accedere al vino contenuto al suo interno.

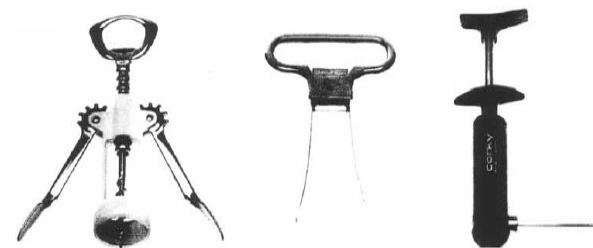
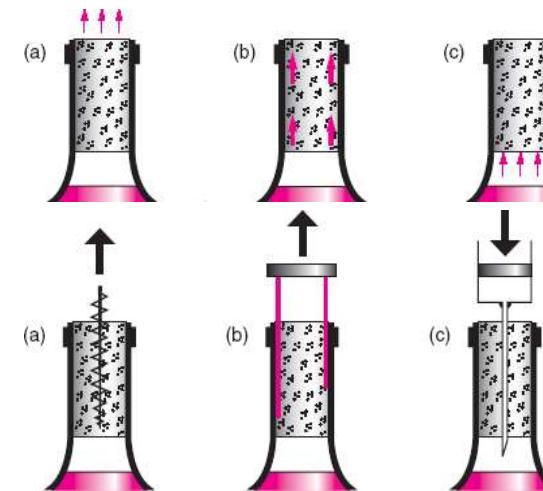
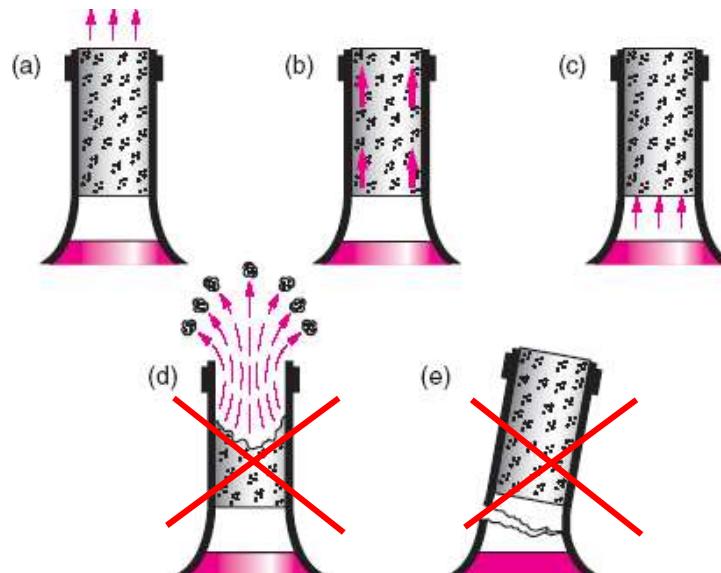
REQUISITO DI PROGETTO: È necessario un dispositivo per estrarre i tappi dalle bottiglie di vino.

Formulazione non è **neutra**. Infatti, lo scopo è di ottenere l'accesso al vino e l'espressione precedente implica che questo sarà fatto rimuovendo il tappo, e che esso sarà rimosso per estrazione. Ci potrebbero essere altri modi per accedere al vino.

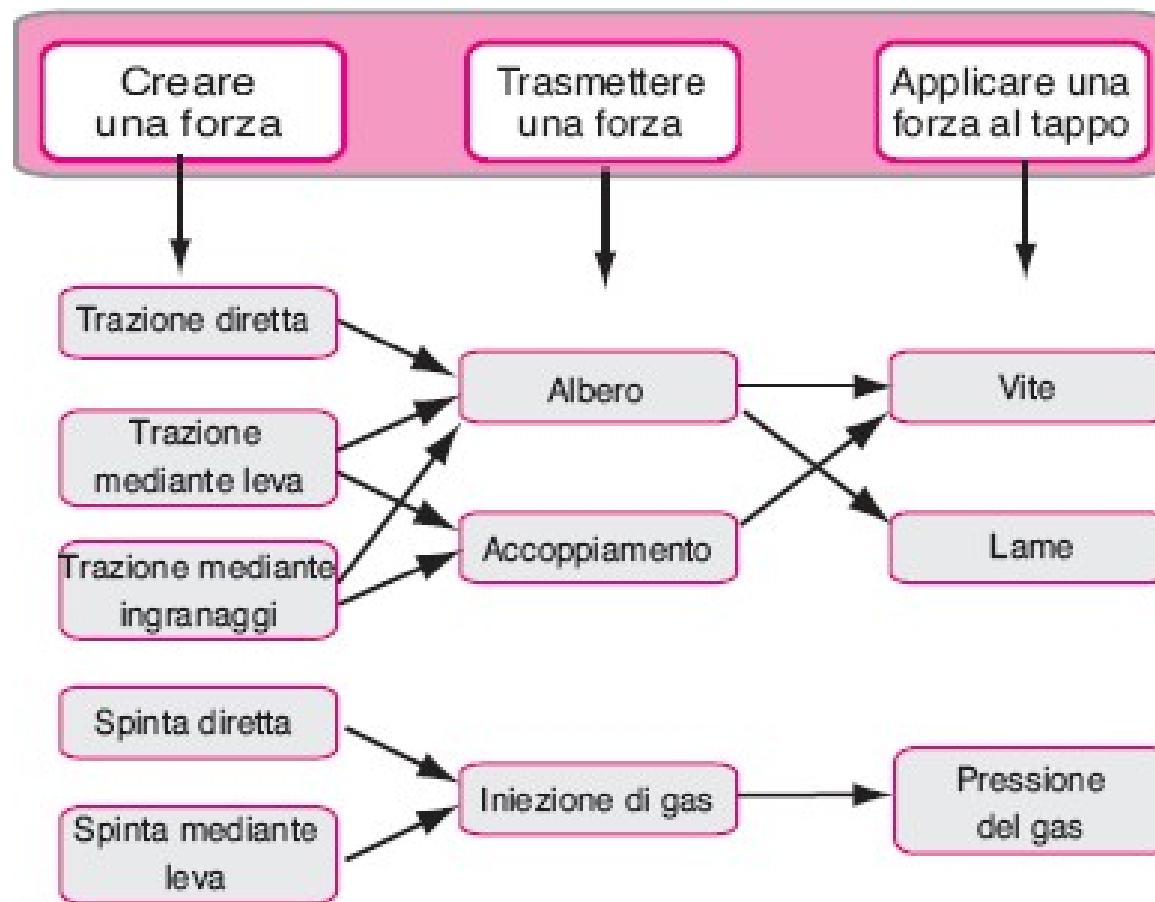


Un esempio: vino e tappi

REQUISITO DI PROGETTO NEUTRO: È necessario un dispositivo che permetta l'accesso al vino contenuto in una bottiglia tappata, con comodità, a un modico costo, e senza contaminare il vino



Un esempio: vino e tappi



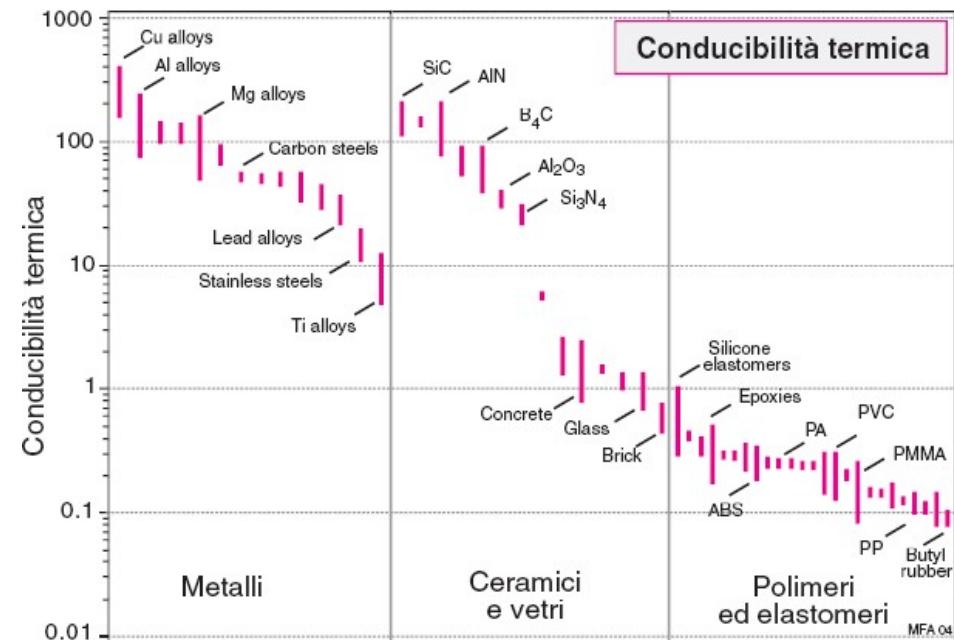
Diagrammi delle proprietà dei materiali

I valori di una proprietà possono essere visualizzati, per i vari materiali, come **liste tabelle** o come **diagrammi a barre**. È comunque raro che le prestazioni di un componente dipendano da una sola proprietà.

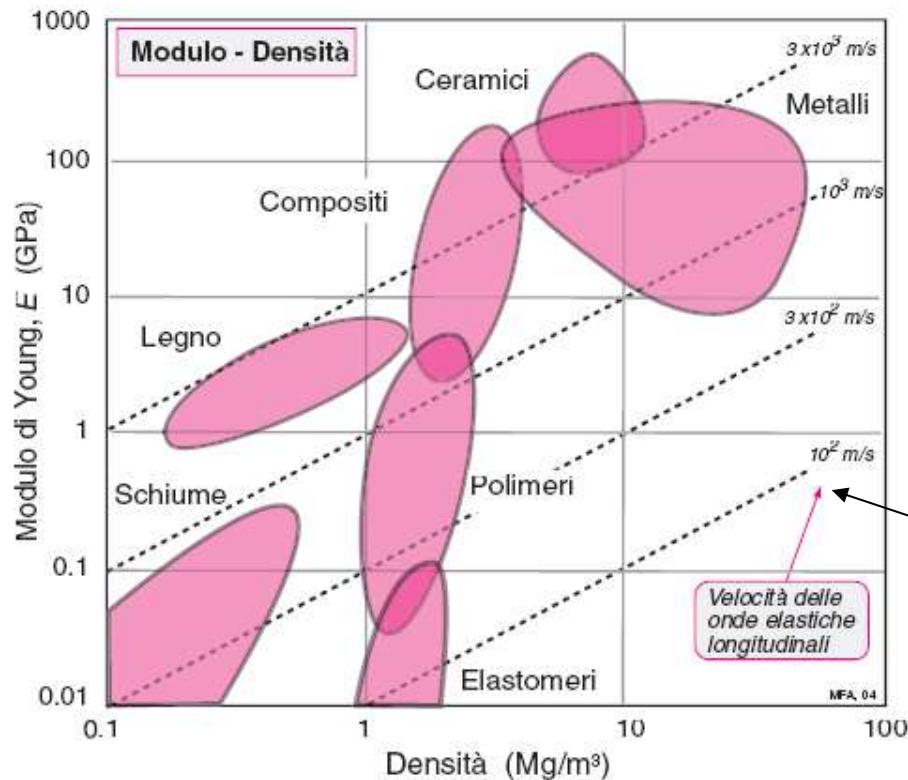
Quasi sempre è una **combinazione di proprietà** che entra in gioco: si pensi, ad esempio, al rapporto resistenza-peso σ/ρ , o al rapporto rigidezza-peso, E/ρ , utilizzati per la progettazione di componenti leggeri.

È opportuno, quindi, poter considerare in contemporanea almeno due proprietà, e un modo per farlo consiste nel realizzare **grafici dove ogni classe di materiali occupa una ben precisa regione spaziale**, e i singoli materiali occupano a loro volta ben precise posizioni all'interno delle regioni così individuate.

Visto che molte proprietà variano su diversi ordini di grandezza, generalmente è preferibile utilizzare una **scala logaritmica**



Diagrammi delle proprietà dei materiali

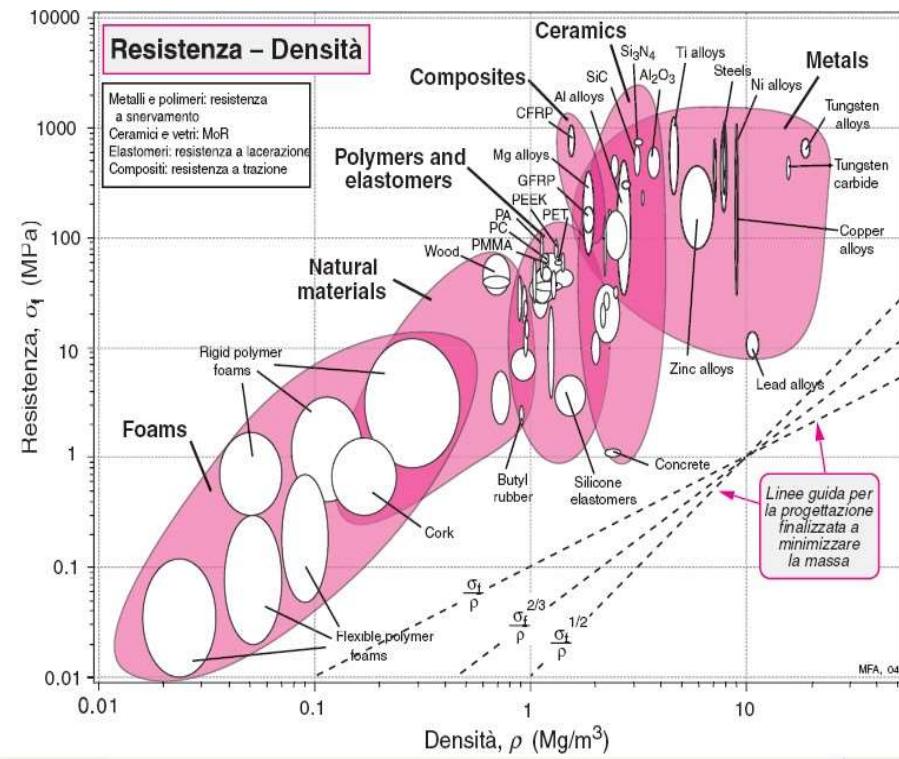
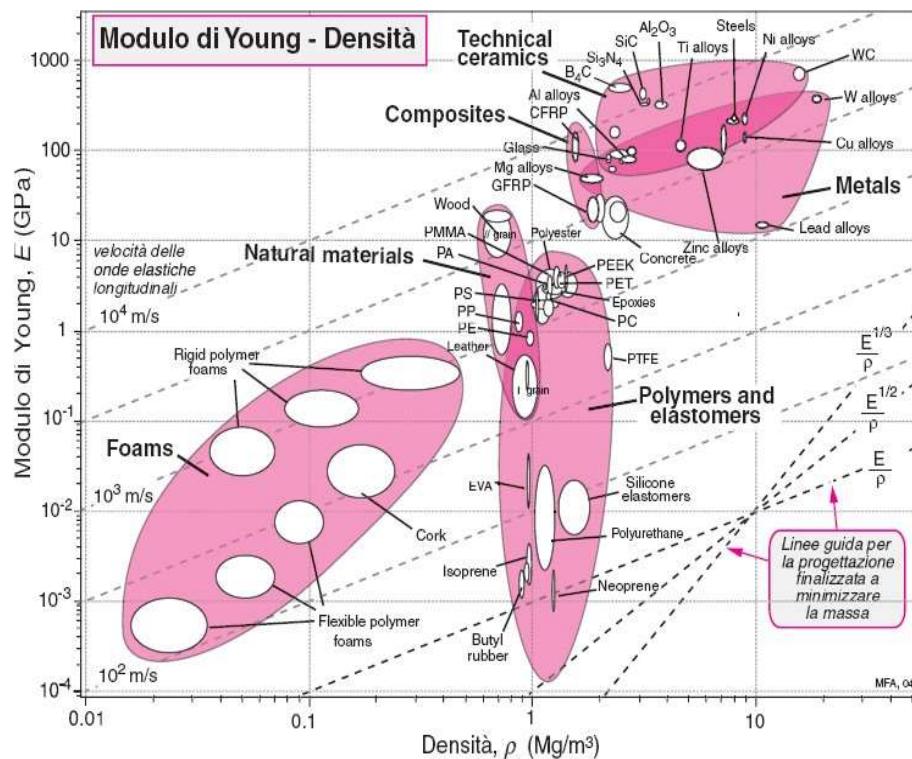


$$v = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

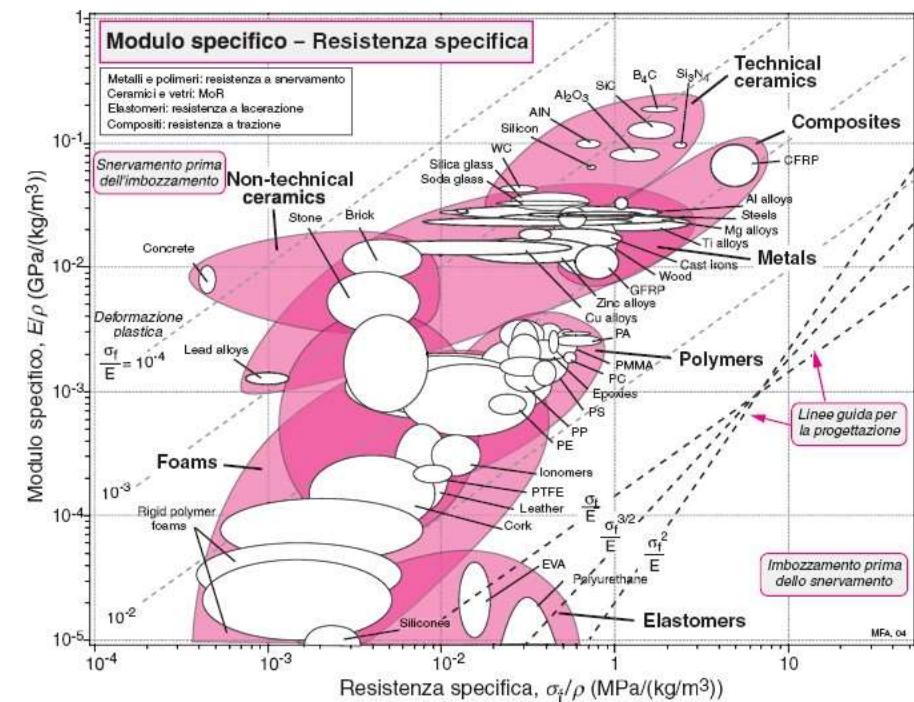
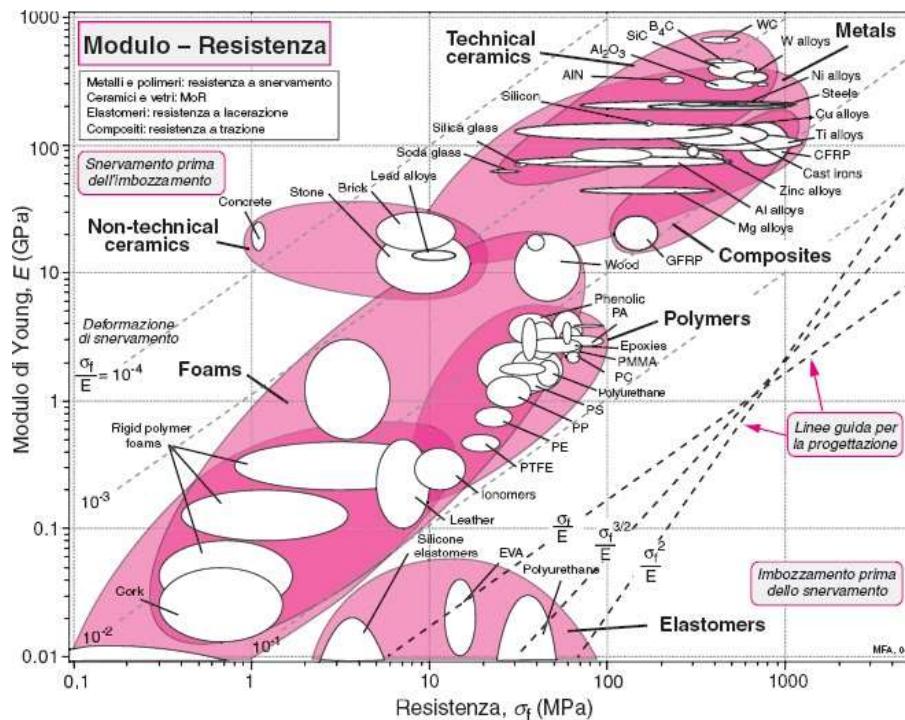
$$\log E = \log \rho + 2 \log v$$

Su questi grafici è poi possibile rappresentare aree o contorni lungo i quali una determinata proprietà, funzione delle due riportate lungo gli assi, è costante

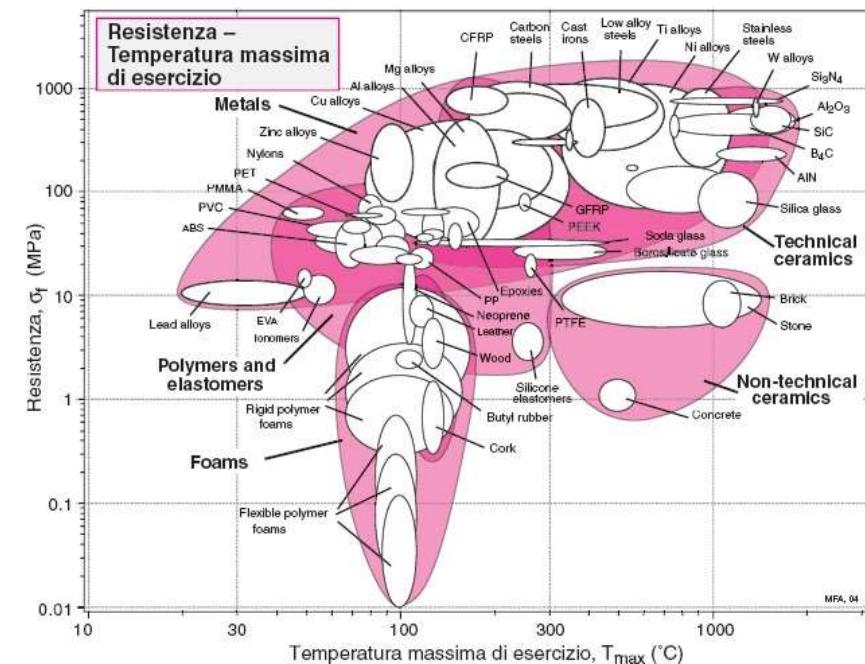
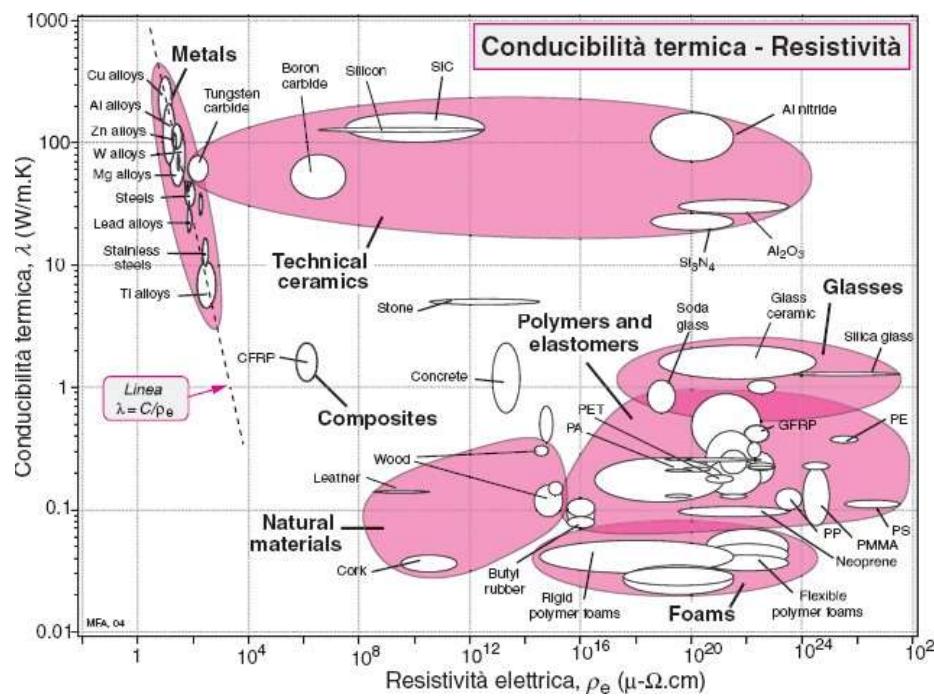
Diagrammi delle proprietà dei materiali



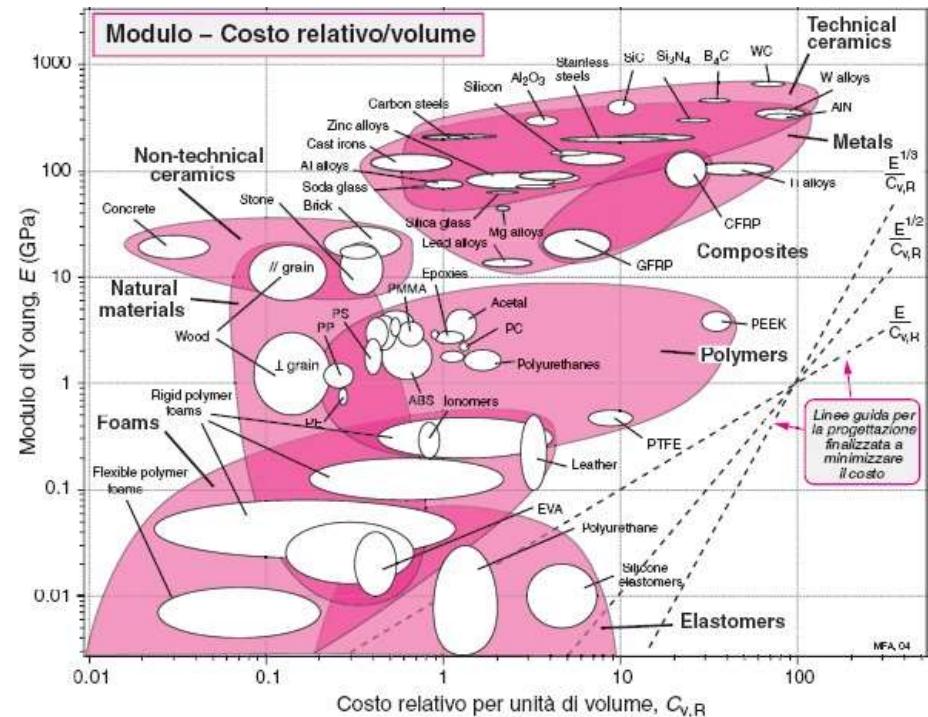
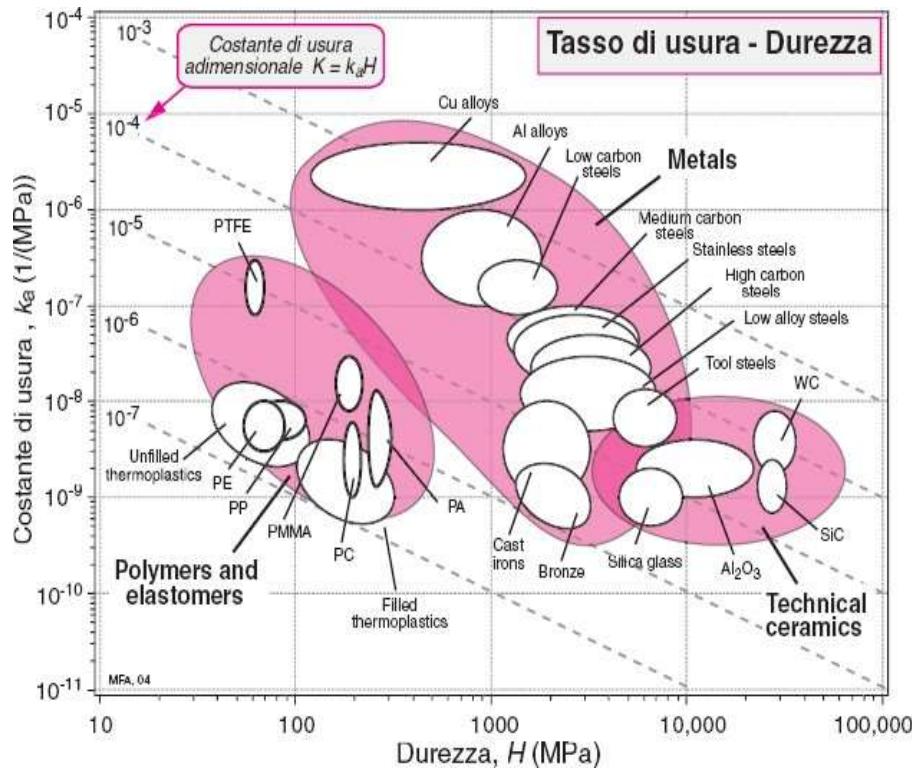
Diagrammi delle proprietà dei materiali



Diagrammi delle proprietà dei materiali



Diagrammi delle proprietà dei materiali



La scelta del materiale



Procedura per la scelta del materiale

La scelta del materiale



Traduzione

In che modo i requisiti di progettazione per un componente (che definiscono cosa esso dovrà fare) possono venir tradotti in una ricetta per un materiale?

Qualsiasi componente ingegneristico svolge una o più **funzioni**: sopportare un carico, contenere una pressione, trasmettere calore e così via.

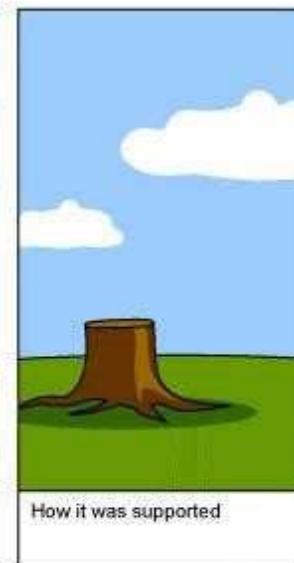
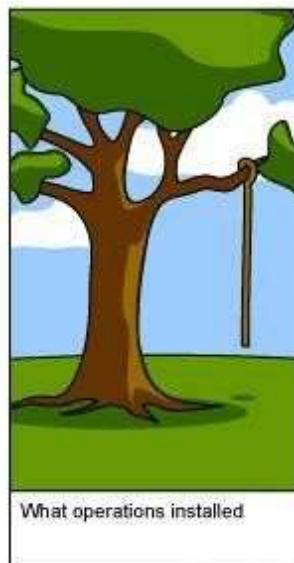
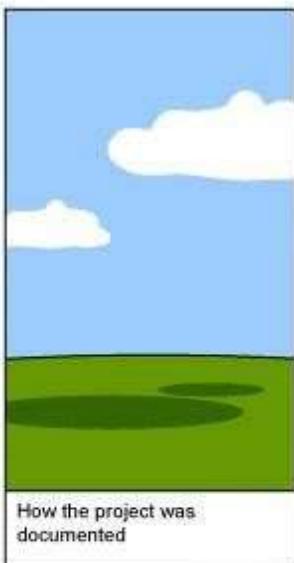
La funzione deve poter essere svolta garantendo al contempo il rispetto di particolari **vincoli**: certe dimensioni sono fisse, ...

Durante la progettazione del componente, il progettista ha un **obiettivo**: realizzarlo nel modo più economico/leggero/sicuro... possibile,

Certi parametri possono essere modificati in modo da ottimizzare l'obiettivo: dimensioni che non siano soggette a vincoli di progetto, materiale da utilizzare... Questi parametri sono le **variabili libere**.

Funzione e vincoli, obiettivo e variabili libere definiscono i confini entro i quali operare la scelta del materiale. La prima fase da affrontare per mettere in relazione i requisiti di progettazione con le proprietà del materiale consiste pertanto nell'individuare in modo chiaro funzione, vincoli, obiettivo e variabili libere.

Design...



La scelta del materiale



Screening

tutti i materiali sono considerati come possibili candidati, almeno finché non emerge il contrario nelle varie fasi successive: lo screening permette di compiere una prima selezione basata sui vincoli

Lo *screening*, elimina i candidati che non possono svolgere il compito in alcun modo, perché uno o più dei loro attributi cade al di fuori dei limiti stabiliti dai vincoli.

Ad esempio, i requisiti “il componente deve funzionare in acqua bollente”, o “il componente deve essere trasparente” impongono ovvi limiti agli attributi di **massima temperatura di servizio e trasparenza ottica**, e i candidati devono rispettare questi limiti per poter essere presi in considerazione.

Questi attributi sono gli **attributi limite**.

La scelta del materiale



Classifica

Gli attributi limite non aiutano a ordinare i candidati che rimangono. Per fare questo servono dei criteri di ottimizzazione. A tale proposito vengono in aiuto gli indici del materiale, che misurano in che maniera i candidati che hanno superato la fase di screening possono svolgere il lavoro.

La proprietà o il gruppo di proprietà che massimizza le prestazioni per un dato progetto prende il nome di **indice del materiale**.

Si possono identificare più indici, ciascuno associato alla massimizzazione di determinati tipi di prestazioni (resistenza, trasmissione del calore, conducibilità elettrica con costo minimo,...).

Essi forniscono **criteri di eccellenza** che permettono di classificare i materiali in base alla loro capacità di esercitare bene una certa funzione.

La scelta del materiale



Informazioni di supporto

Una volta rimasti pochi candidati, una scelta oculata richiede comunque il reperimento di informazioni di supporto, sia per le necessarie semplificazioni effettuate nella fase precedente, sia per acquisire ulteriori informazioni utili

Il risultato delle varie fasi precedenti è una lista ordinata, la più corta possibile, dei vari candidati che rispettano i vincoli e che massimizzano o minimizzano il criterio di eccellenza.

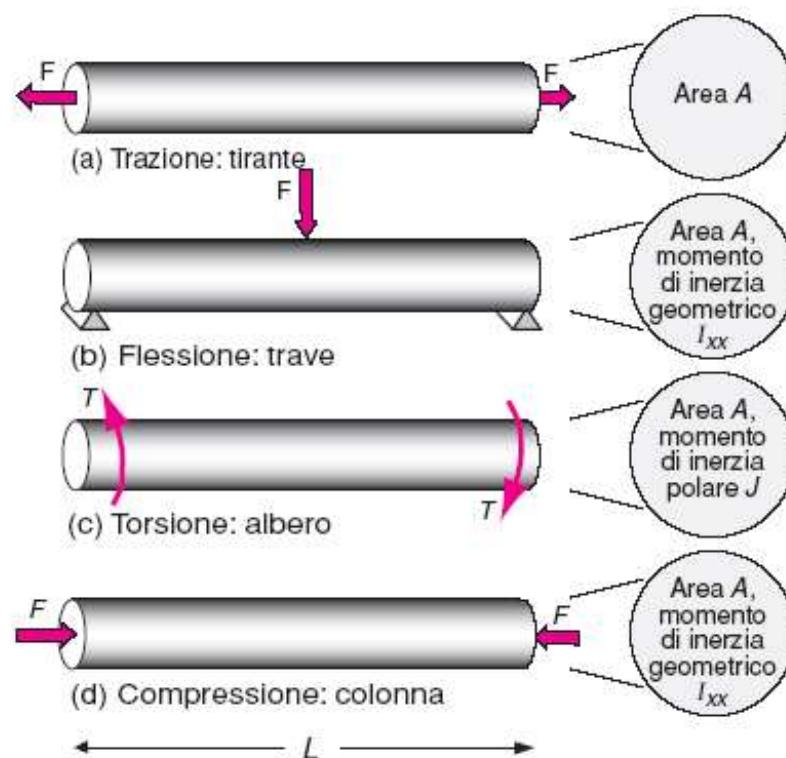
A questo punto si può semplicemente scegliere il candidato primo della lista, ma Quali sono i suoi punti di forza e le sue debolezze? E' già stato utilizzato in precedenza in applicazioni simili? Quale è, insomma, il suo grado di affidabilità?

Per procedere oltre bisogna disporre di un profilo particolareggiato per ciascuno dei candidati rimasti: necessitano cioè **informazioni di supporto**

Un esempio semplice

Il carico che agisce su un componente può in genere essere scomposto in una combinazione di trazione assiale, flessione, torsione e compressione. Di solito, in esercizio prevale uno solo di questi modi di carico, tanto che esso viene utilizzato per assegnare il nome funzionale al componente sollecitato:

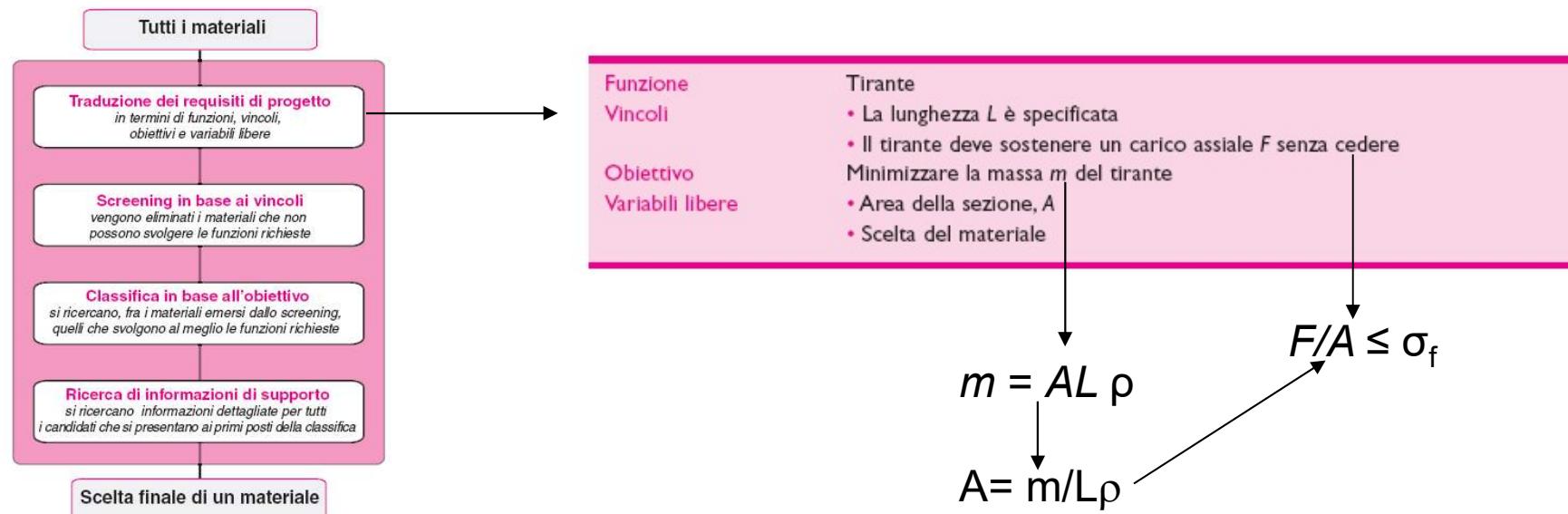
- i tiranti sostengono carichi in trazione,
- le travi momenti flettenti;
- gli alberi sostengono torsioni,
- le colonne carichi assiali di compressione



Un esempio semplice

Si deve progettare un tirante cilindrico di lunghezza L in grado di sostenere senza cedere un carico F , che genera una sollecitazione di trazione.
Il tirante deve avere la minor massa possibile

La lunghezza L è specificata, la sezione A no. In questo caso “massimizzare le prestazioni” significa “minimizzare la massa e sostenere il carico F in modo sicuro”.

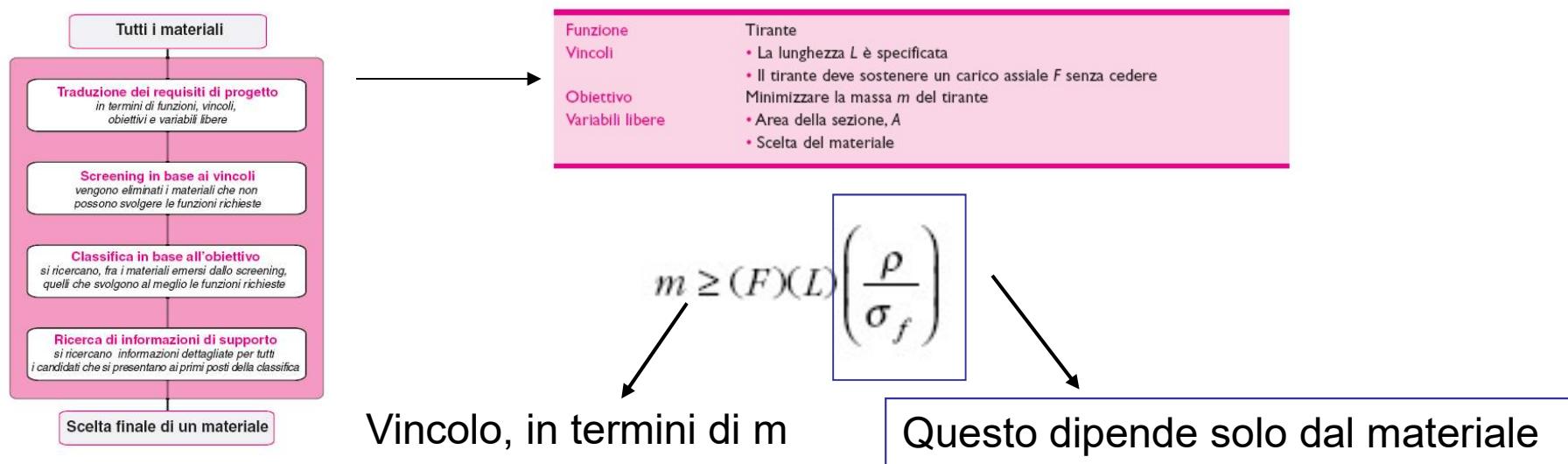


Un esempio semplice

Si deve progettare un tirante cilindrico di lunghezza L in grado di sostenere senza cedere un carico F , che genera una sollecitazione di trazione.

Il tirante deve avere la minor massa possibile

La lunghezza L è specificata, la sezione A no. In questo caso “massimizzare le prestazioni” significa “minimizzare la massa e sostenere il carico F in modo sicuro”.



Allora il tirante più leggero in grado di sostenere F in sicurezza è quello realizzato col materiale che presenta il minor valore di ρ/σ_f .

Un esempio semplice

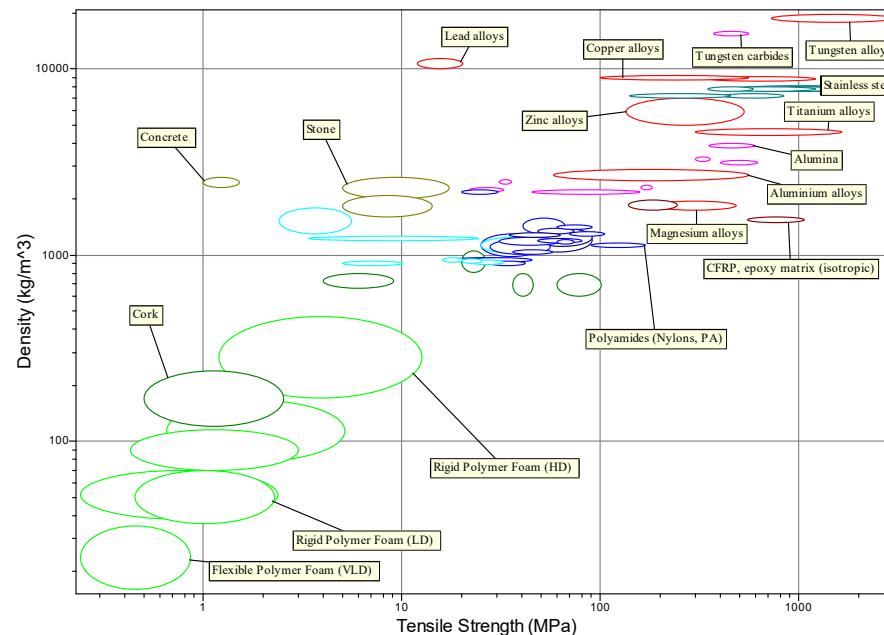
Si deve progettare un tirante cilindrico di lunghezza L in grado di sostenere senza cedere un carico F , che genera una sollecitazione di trazione.

Il tirante deve avere la minor massa possibile

Vuole dire che posso considerare ρ / σ_f come **indice del materiale** che, nel caso particolare, dovrebbe essere minimizzato

Di solito si preferisce massimizzare, per cui basterà fare l'inverso:

$$M = \frac{\sigma_f}{\rho}$$



Un esempio semplice

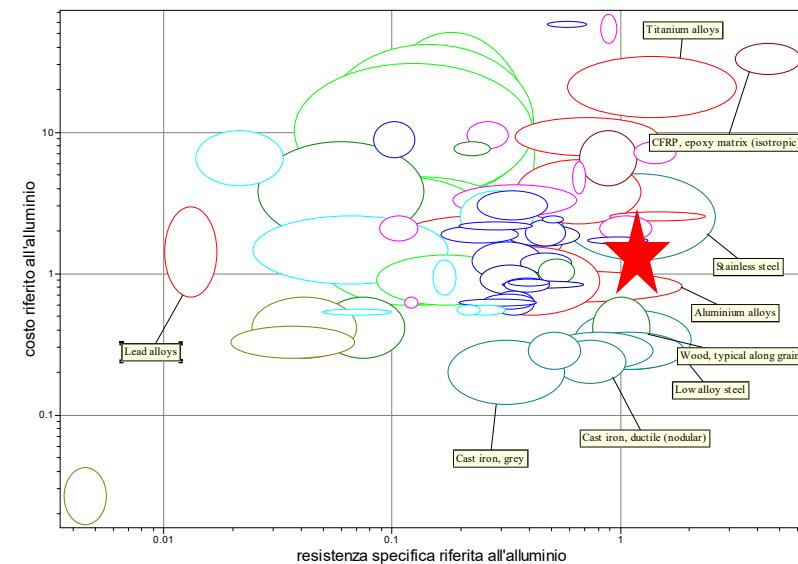
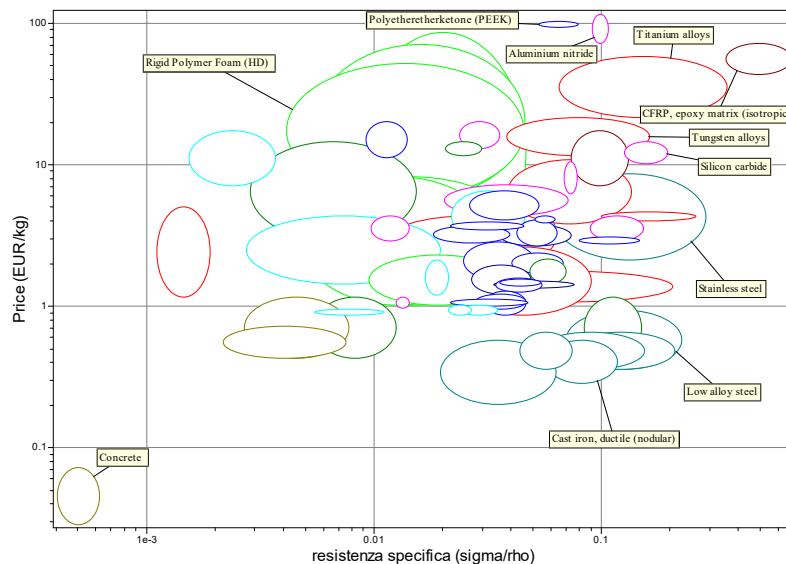
Si deve progettare un tirante cilindrico di lunghezza L in grado di sostenere senza cedere un carico F , che genera una sollecitazione di trazione.

Il tirante deve avere la minor massa possibile

Con opportuni strumenti software, è possibile rappresentare anche funzioni dei parametri di interesse. Ad esempio, M è anche detto resistenza specifica.

In questo caso, è possibile anche fare comparire un'ulteriore parametro, ad esempio il costo

E' anche possibile, ad esempio, riferire tutto alla soluzione attualmente in uso.. Ad esempio, se ora si ha un tirante fatto di lega di alluminio con densità 2700 kg/m³; resistenza a trazione 300 MPa, che costa 1.7 €/kg, esso sarà alle coordinate (1,1)

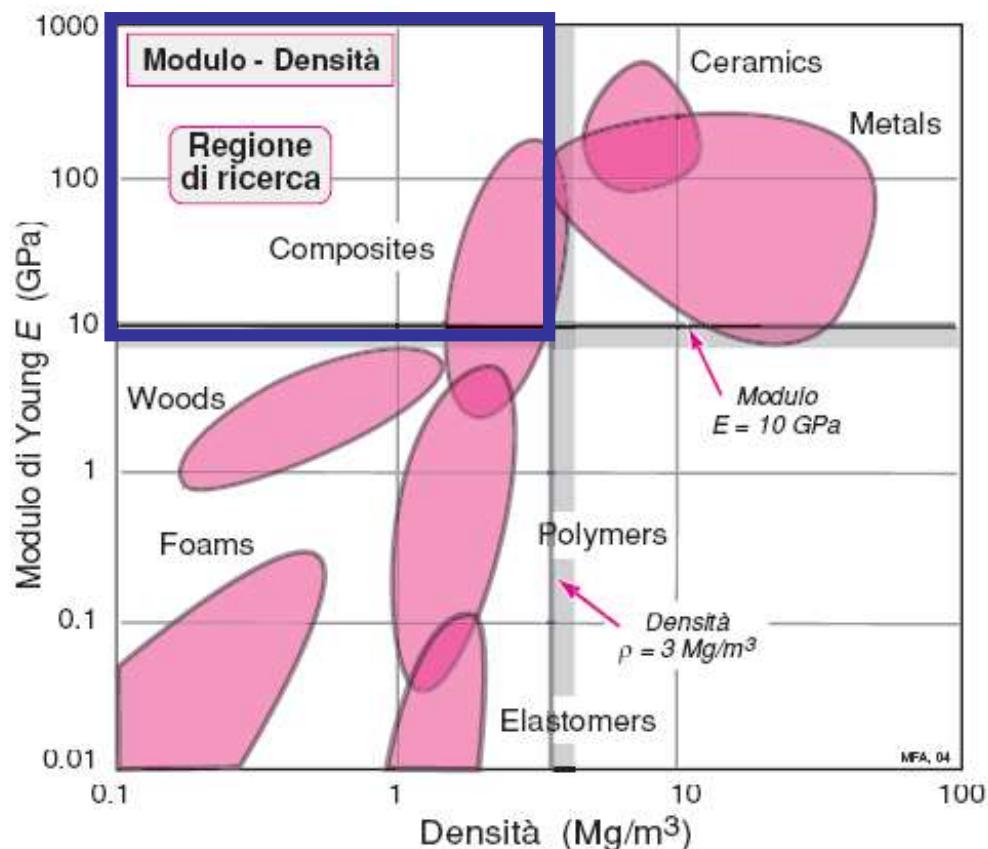


Riassumendo...

Fase	Azione	Traduzione
1	Definire i requisiti di progetto: (a) Funzione: cosa deve fare il componente? (b) Vincoli: requisiti essenziali che devono essere garantiti: rigidezza, resistenza, resistenza a corrosione, caratteristiche di formatura ecc. (c) Obiettivo: cosa deve essere massimizzato o minimizzato? (d) Variabili libere: quali sono le variabili del problema libere da vincoli?	
2	Elencare i vincoli (no snervamento; no frattura; no imbozzamento ecc.) e sviluppare una relativa equazione se necessario.	
3	Sviluppare un'equazione che esprima l'obiettivo in termini di requisiti funzionali, geometria e proprietà del materiale (la funzione obiettivo).	
4	Identificare le variabili libere (cioè quelle non specificate dal progetto).	
5	Sostituire le espressioni relative alle variabili libere ricavate dalle equazioni dei vincoli all'interno della funzione obiettivo.	
6	Separare le variabili in tre gruppi: requisiti funzionali, F , geometria, G , e proprietà del materiale, M , in modo da ottenere un'equazione di questo tipo: indice di prestazione $P \leq f_1(F) f_2(G) f_3(M)$ o indice di prestazione $P \geq f_1(F) f_2(G) f_3(M)$	
7	Ricavare l'indice del materiale, espresso come M , che permette di ottimizzare l'indice di prestazione P . M è il criterio di eccellenza.	

Riassumendo...

screening

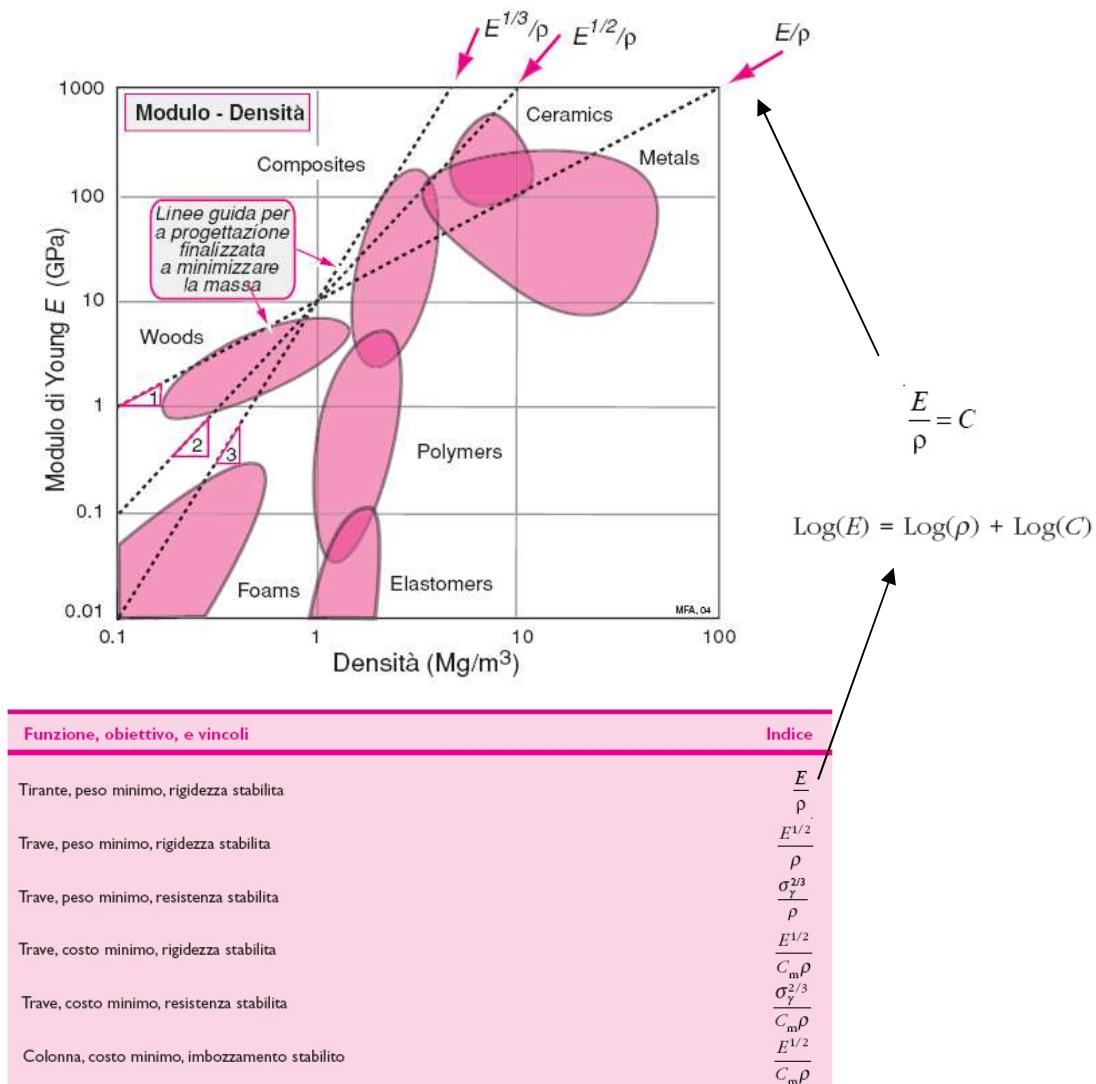


Sui diagrammi di selezione dei materiali gli **attributi limite** identificano linee orizzontali o verticali.

Ad esempio, nel caso in cui il progetto imponga come limiti $E > 10 \text{ GPa}$ e $\rho < 3 \text{ Mg}/\text{m}^3$, la ricerca del materiale ottimale si restringe alla zona delimitata dalle linee che rappresentano questi limiti, la cosiddetta **regione di ricerca**.

Riassumendo...

classifica



Bisogna rappresentare l'indice del materiale sui diagrammi

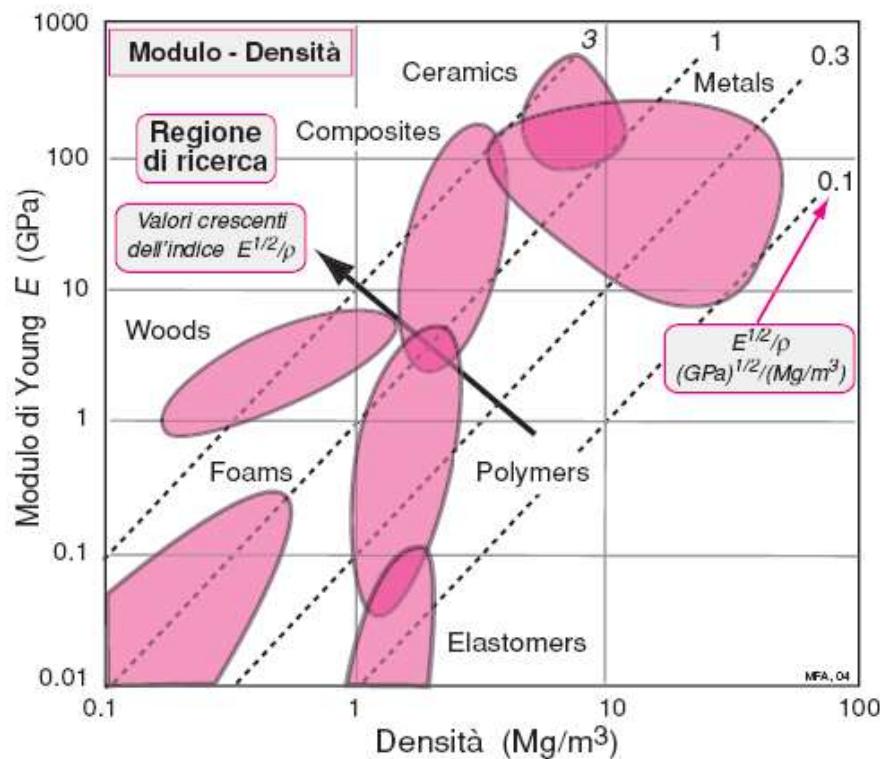
Ad es- Tutti i materiali intercettati da una linea a $E^{1/2}/\rho = C$ svolgono ugualmente bene la funzione di trave leggera e rigida.

Quelli che si trovano al di sopra della linea sono migliori; quelli che sono al di sotto risultano peggiori.

Il tutto, naturalmente, deve stare entro la regione di ricerca

Riassumendo...

classifica



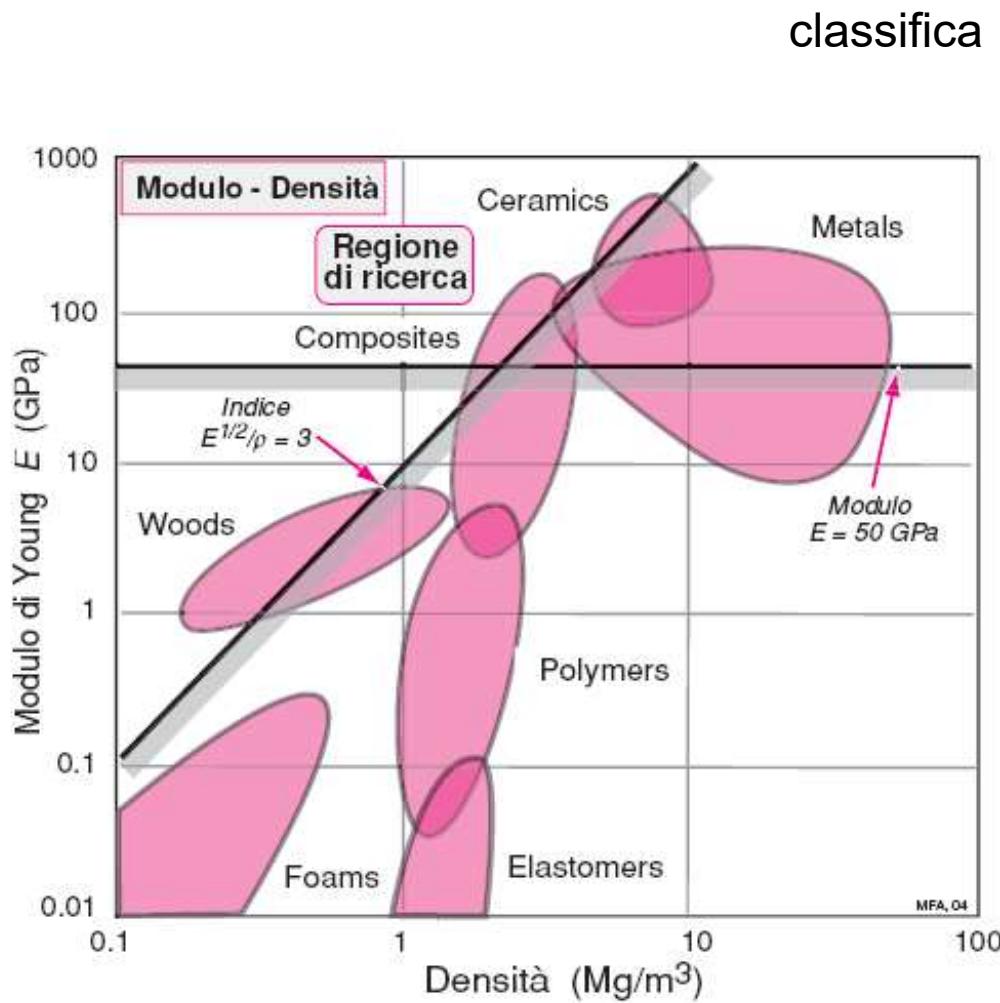
Bisogna rappresentare l'indice del materiale sui diagrammi

Ad es- Tutti i materiali intercettati da una linea a $E^{1/2}/\rho = C$ svolgono ugualmente bene la funzione di trave leggera e rigida.

Quelli che si trovano al di sopra della linea sono migliori; quelli che sono al di sotto risultano peggiori.

Il tutto, naturalmente, deve stare entro la regione di ricerca

Riassumendo...



Bisogna rappresentare l'indice del materiale sui diagrammi

Ad es- Tutti i materiali intercettati da una linea a $E^{1/2}/\rho = C$ svolgono ugualmente bene la funzione di trave leggera e rigida.

Quelli che si trovano al di sopra della linea sono migliori; quelli che sono al di sotto risultano peggiori.

Il tutto, naturalmente, deve stare entro la regione di ricerca

Riassumendo...

Informazioni di supporto

Ora, individuati i candidati, si devono cercare le informazioni di supporto

Description

The Material

Aluminum was once so rare and precious that the Emperor Napoleon III of France had a set of cutlery made from it that cost him more than silver. But that was 1860; today, nearly 150 years later, aluminum spoons are things you throw away - a testament to our ability to be both technically creative and wasteful. Aluminum, the first of the 'light alloys' (with magnesium and titanium), is the third most abundant metal in the earth's crust (after iron and silicon) but extracting it costs much energy. It has grown to be the second most important metal in the economy (steel comes first), and the mainstay of the aerospace industry.

Composition

Al + alloying elements, e.g. Mg, Mn, Cr, Cu, Zn, Zr, Li

Image



Caption

Aluminum can formed both by casting and by deformation.

General properties

Density	2500	-	2900	kg/m ³
Price	1.092	-	1.77	EUR/kg

Mechanical properties

Young's Modulus	68	-	82	GPa
Elastic Limit	30	-	500	MPa
Tensile Strength	58	-	550	MPa
Elongation	1	-	44	%
Hardness - Vickers	12	-	150.5	HV
Endurance Limit	21.6	-	157	MPa
Fracture Toughness	22	-	35	MPa.m ^{1/2}

Thermal properties

Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal Conductivity	76	-	235	W/m.K
Thermal Expansion	21	-	24	μstrain/°C
Specific Heat	857	-	990	J/kg.K
Melting Point	474.9	-	676.9	°C
Maximum Service Temperature	120	-	210	°C

Electrical properties

Electrical conductor or insulator?	Good conductor
------------------------------------	----------------

Optical properties

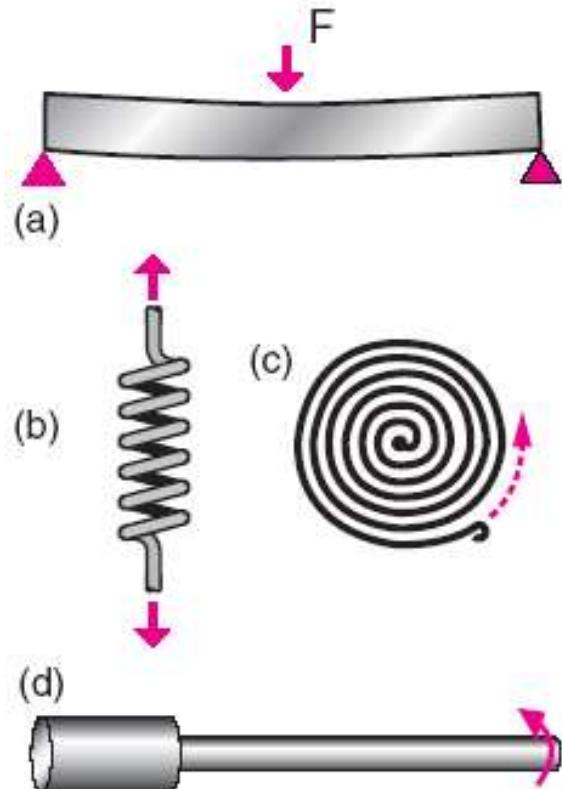
Transparency	Opaque
--------------	--------

Supporting information

Typical uses

Aerospace engineering; automotive engineering - pistons, clutch housings, exhaust manifolds; die cast chassis for household and electronic products; siding for buildings; foil for containers and packaging; beverage cans; electrical and thermal conductors.

Un caso pratico



Esistono molle di diversa forma, realizzate per diversi impieghi: molle assiali (le fasce elastiche), molle a lamina, ad elica, a spirale, barre di torsione ecc.

La funzione primaria di una molla è quella di immagazzinare energia che, quando richiesto, dovrà essere rilasciata.

Si vuole realizzare una molla che si la più piccola possibile, o la più leggera possibile

Sono di fatto due casi separati

Un caso pratico

Funzione	Molla elastica
Vincoli	Non avere cedimenti, cioè $\sigma < \sigma_f$ in ogni parte della molla
Obiettivo	<ul style="list-style-type: none">• Massimizzare l'energia immagazzinata per unità di volume, oppure• Massimizzare l'energia immagazzinata per unità di peso
Variabili libere	Scelta del materiale

Per ora limitiamo l'attenzione alla minimizzazione del volume

(il peso verrà minimizzato dividendo l'indice per la densità del materiale)

$$W_v = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}$$

Energia elastica immagazzinata, per unità di volume, in un materiale elastico soggetto a carico assiale uniforme σ

Obiettivo, si vuole massimizzare

Un caso pratico

Applicando il vincolo diventa

$$W_v = \frac{1}{2} \frac{\sigma_f^2}{E}$$

Per le molle a lamina:

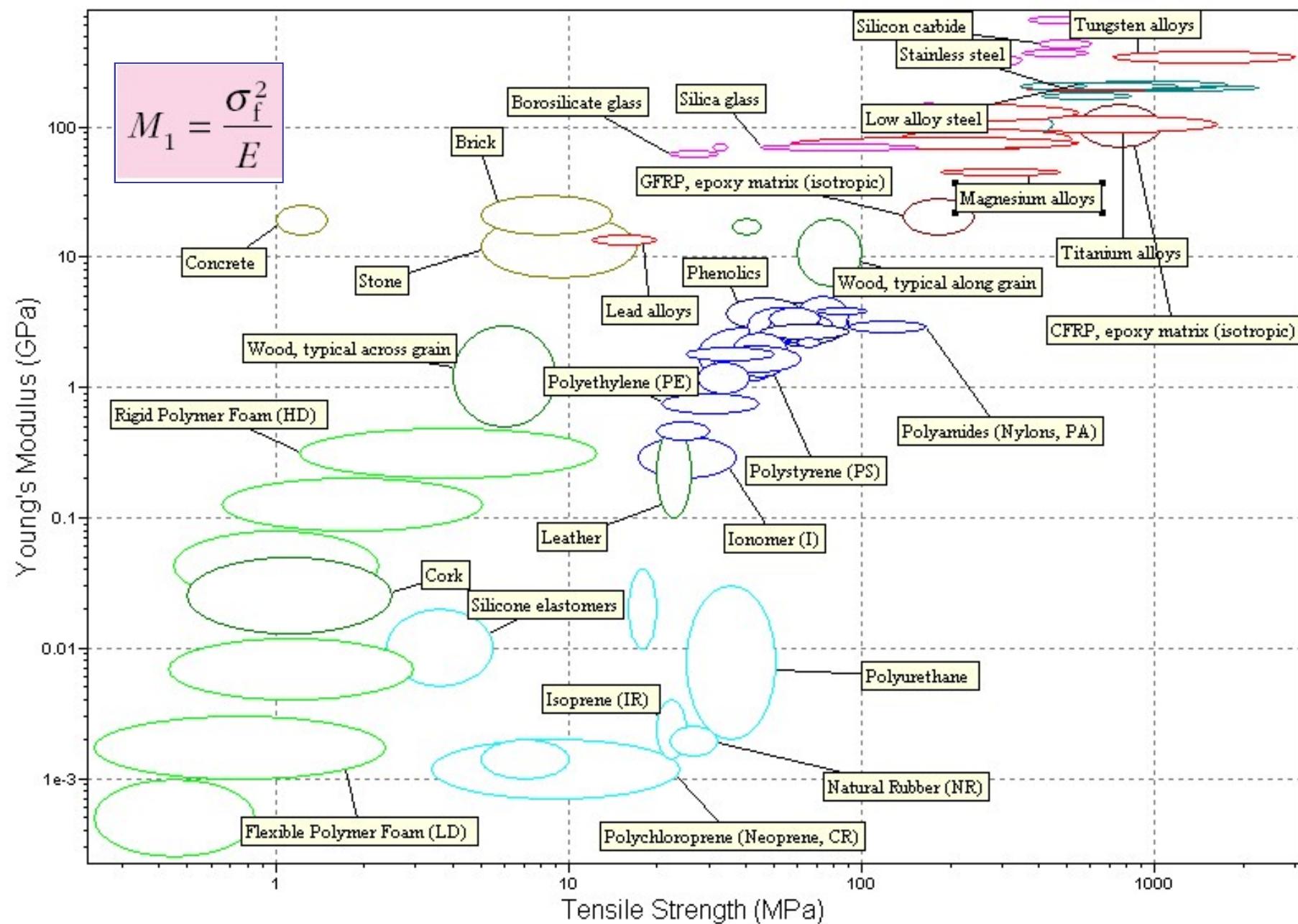
$$W_v = \frac{1}{4} \frac{\sigma_f^2}{E}$$

per le barre di torsione:

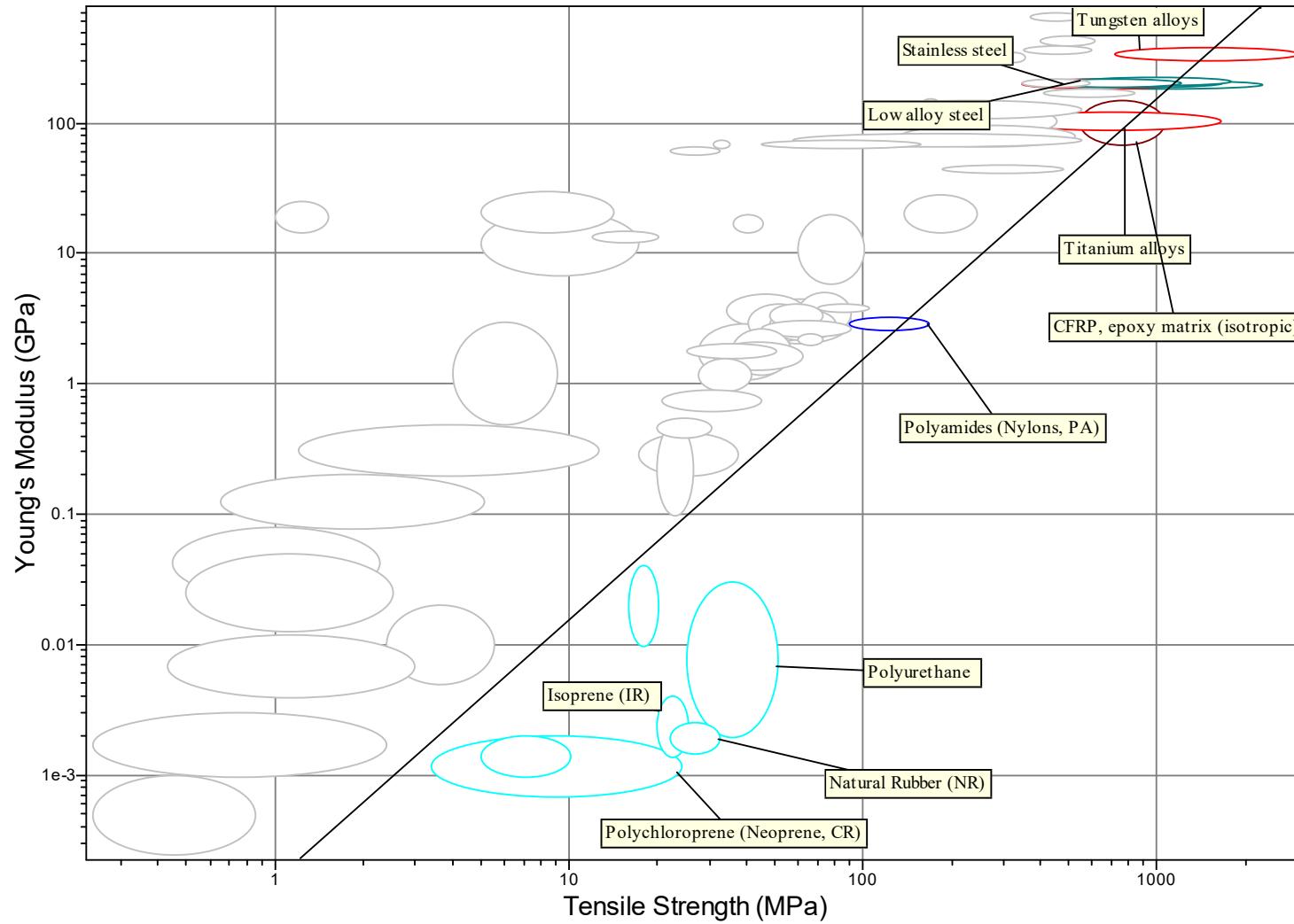
$$W_v = \frac{1}{3} \frac{\sigma_f^2}{E}$$

Bisogna quindi massimizzare, indipendentemente dalla geometria della molla, l'indice

$$M_1 = \frac{\sigma_f^2}{E}$$



Un caso pratico

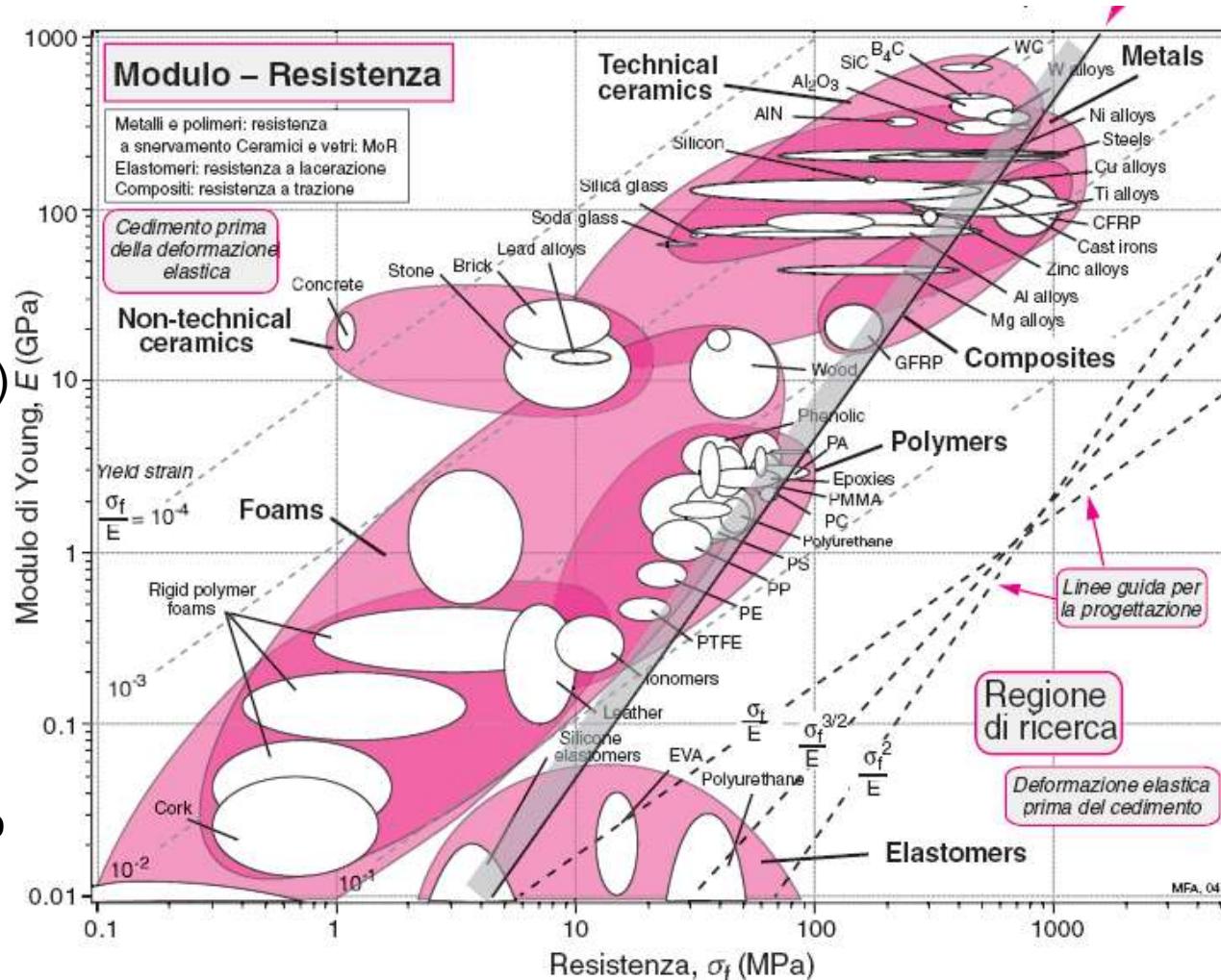


Un caso pratico

$$M_1 = \frac{\sigma_f^2}{E}$$

$$\log(M_1) = 2 \log(\sigma_f) - \log(E)$$

Cioè retta di pendenza 2 e interessano tutte quelle soluzioni che stanno a destra della linea (alta resistenza): M₁ cresce mano a mano che la linea si sposta verso destra



Un caso pratico

Materiale	$MI = \sigma_f^2/E$ (MJ/m ³)	Commenti
Leghe di Ti	4-12	Costose, resistenti a corrosione
CFRP	6-10	Paragonabile, in termini di prestazioni, all'acciaio, ma costoso
Acciaio per molle	3-7	La scelta tradizionale: facile da formare e trattabile termicamente
Nylon	1,5-2,5	Economico e facile da formare, ma con un elevato coefficiente di smorzamento
Gomma	20-50	Migliore dell'acciaio per molle, ma con un elevato coefficiente di smorzamento

La scelta ottimale
risulta essere l'**acciaio ad alta resistenza**, situato vicino all'estremità superiore della retta considerata.

Altri possibili materiali sono: **CFRP** (utilizzato per realizzare molle per le sospensioni degli autocarri),
leghe di titanio (ottime ma costose),
nylon (le molle dei giocattoli per bambini sono spesso realizzate in nylon),
elastomeri.

Un caso pratico

Il processo di selezione dei materiali per molle richiederebbe tutta una serie di considerazioni aggiuntive.

Ad esempio:

- le molle per gli ammortizzatori degli autoveicoli devono essere **resistenti a corrosione e a fatica**;
- le molle per le valvole dei motori devono poter **sopportare alte temperature**.

Un aspetto più delicato è rappresentato invece dal **coefficiente di smorzamento**:

- polimeri hanno un coefficiente di smorzamento piuttosto elevato, quindi dissipano energia quando vibrano;
- metalli invece, se temprati, non generano questo tipo di problema.

Infine occorre considerare che i polimeri, per via del processo di **creep**, non risultano adatti per molle che devono sopportare carichi statici, mentre sono perfetti per molle di arresto e di confinamento che sono scariche per la maggior parte del tempo.

Un altro caso pratico

Materiale per volani:

I volani sono dispositivi che immagazzinano energia:

- Giocatoli per bambini in piombo
- Motori a vapore in ghisa
- Nelle automobili non sono visibili e lo scopo è rendere più uniforme la trasmissione della forza mortice in acciaio
- volani sono stati proposti per realizzare dispositivi di immagazzinamento di forza motrice e per sistemi frenanti a recupero di energia negli autoveicoli in HSLA o compositi

Data l'insolita varietà di materiali utilizzati per realizzare il medesimo dispositivo (piombo, ghisa, acciaio, compositi), c'è da chiedersi **quale sia il miglior materiale per costruire volani.**

Un altro caso pratico

Materiale per volani:

Due progettazioni:

- Massima energia immagazzinata: un volano efficiente immagazzina la maggior quantità possibile di **energia per unità di peso** (velocità angolare variabile)
- Velocità angolare costante: massima **energia immagazzinata per unità di volume a una velocità angolare costante e specificata** (giocattolo)

Quando al volano viene impresso il movimento rotatorio, aumentandone la velocità angolare ω , esso immagazzina energia: maggiore è la velocità angolare, maggiore è la quantità di energia immagazzinata.

Due vincoli:

- Il limite è fissato dal cedimento per carico centrifugo eccessivo: se si supera la resistenza a trazione del materiale (o la sua resistenza a fatica), si ha un cedimento strutturale del volano: in progettazione, uno dei vincoli è garantire che questo non accada.
- Esiste inoltre un vincolo sul raggio esterno, R , in quanto il volano deve essere inserito in uno spazio predefinito e di solito limitato (volano confinato).

Un altro caso pratico

(a) massima energia immagazzinata

Funzione Volano per Immagazzinare energia

- Vincoli**
- Raggio esterno, R , fissato
 - Non deve cedere
 - Tenacità sufficiente ad evitare fratture

Ottettivo Massimizzare l'energia cinetica per unità di massa

Varabili libere Scelta del materiale

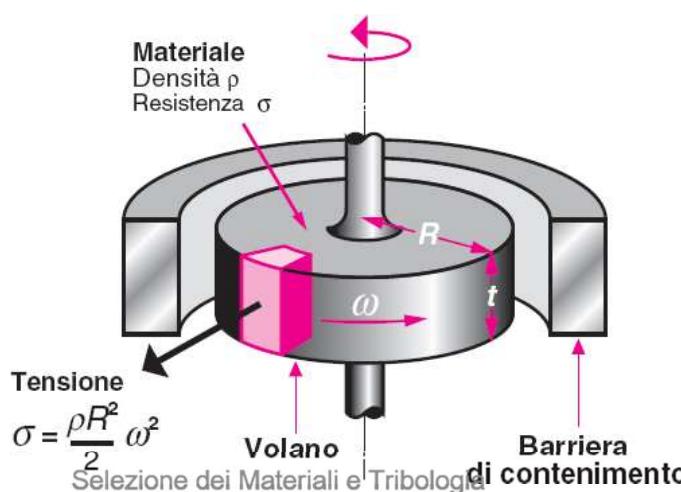
(b) velocità angolare costante

Funzione Volano per un giocattolo

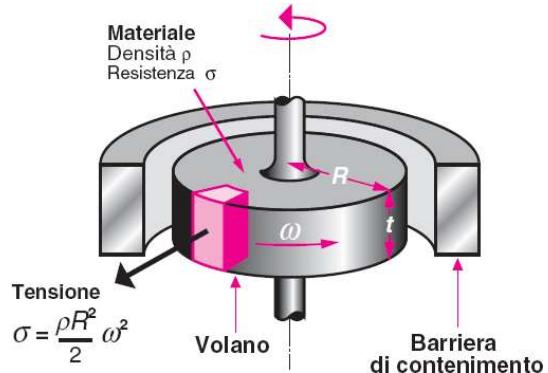
Vincoli Raggio esterno, R , fissato

Ottettivo Massimizzare l'energia cinetica per unità di volume a una velocità angolare fissata

Varabili libere Scelta del materiale



Un altro caso pratico



$$U = \frac{1}{2} J \omega^2$$

dove $J = (\pi/2)\rho R^4 t$ è il momento di inerzia polare del disco e ρ la densità del materiale col quale è realizzato. Quindi:

$$U = \frac{\pi}{4} \rho R^4 t \omega^2$$

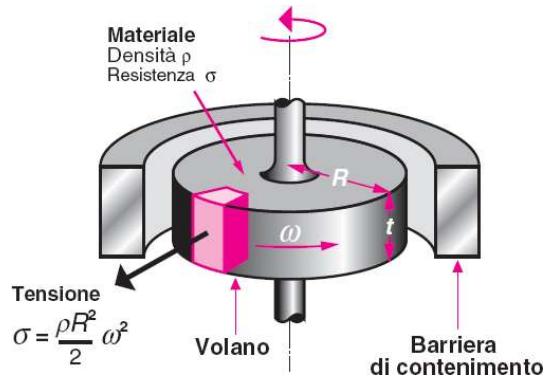
La massa del disco è data da:

$$m = \pi R^4 t \rho$$

La quantità da massimizzare è l'energia cinetica immagazzinata per unità di massa, cioè il rapporto fra le due equazioni precedenti:

$$\frac{U}{m} = \frac{1}{4} R^2 \omega^2$$

Un altro caso pratico

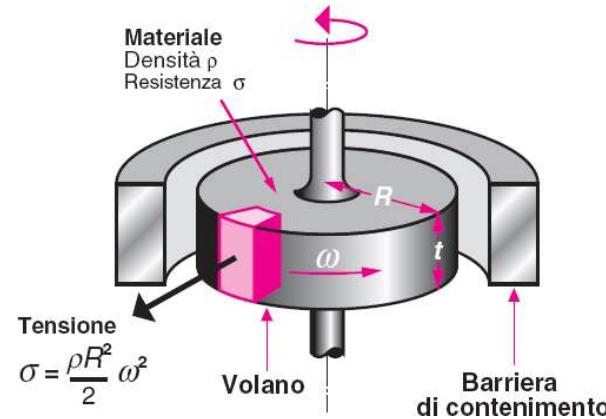


Incrementando la velocità di rotazione del volano, l'energia immagazzinata cresce, ma allo stesso tempo si ha un aumento delle tensioni dovute alla forza centrifuga. La tensione principale massima per un disco rotante di spessore uniforme è

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{3 + v}{8} \right) \rho R^2 \omega^2 < \sigma_f$$

dove v è il rapporto di Poisson ($v = 1/3$). Questa tensione non deve superare la resistenza a cedimento σ_f del materiale

Un altro caso pratico



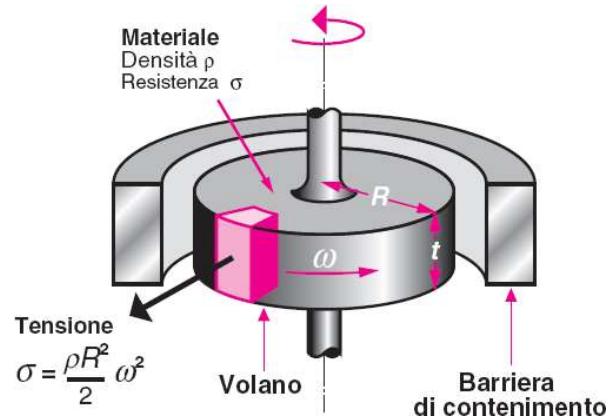
$$\frac{U}{m} = \frac{1}{4} R^2 \omega^2$$

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{3 + v}{8} \right) \rho R^2 \omega^2$$

$$\frac{U}{m} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_f}{\rho} \right)$$



Un altro caso pratico

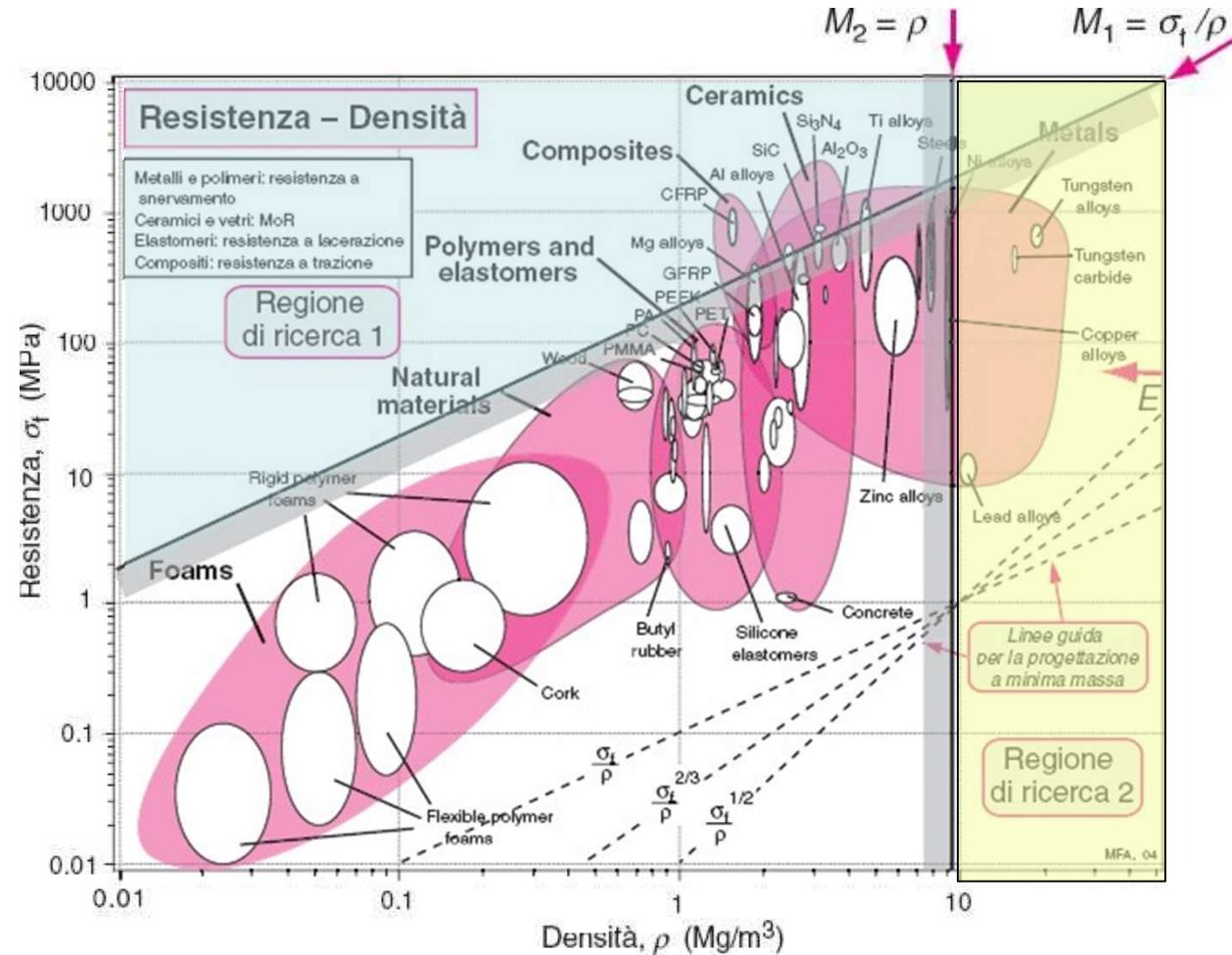


Si consideri l'altro tipo di volano, tipicamente usato nei giocattoli per bambini. In questo caso si cerca il materiale che immagazzina la maggior quantità di energia per unità di volume V a una velocità angolare costante, ω . L'energia per unità di volume a una data velocità angolare ω è:

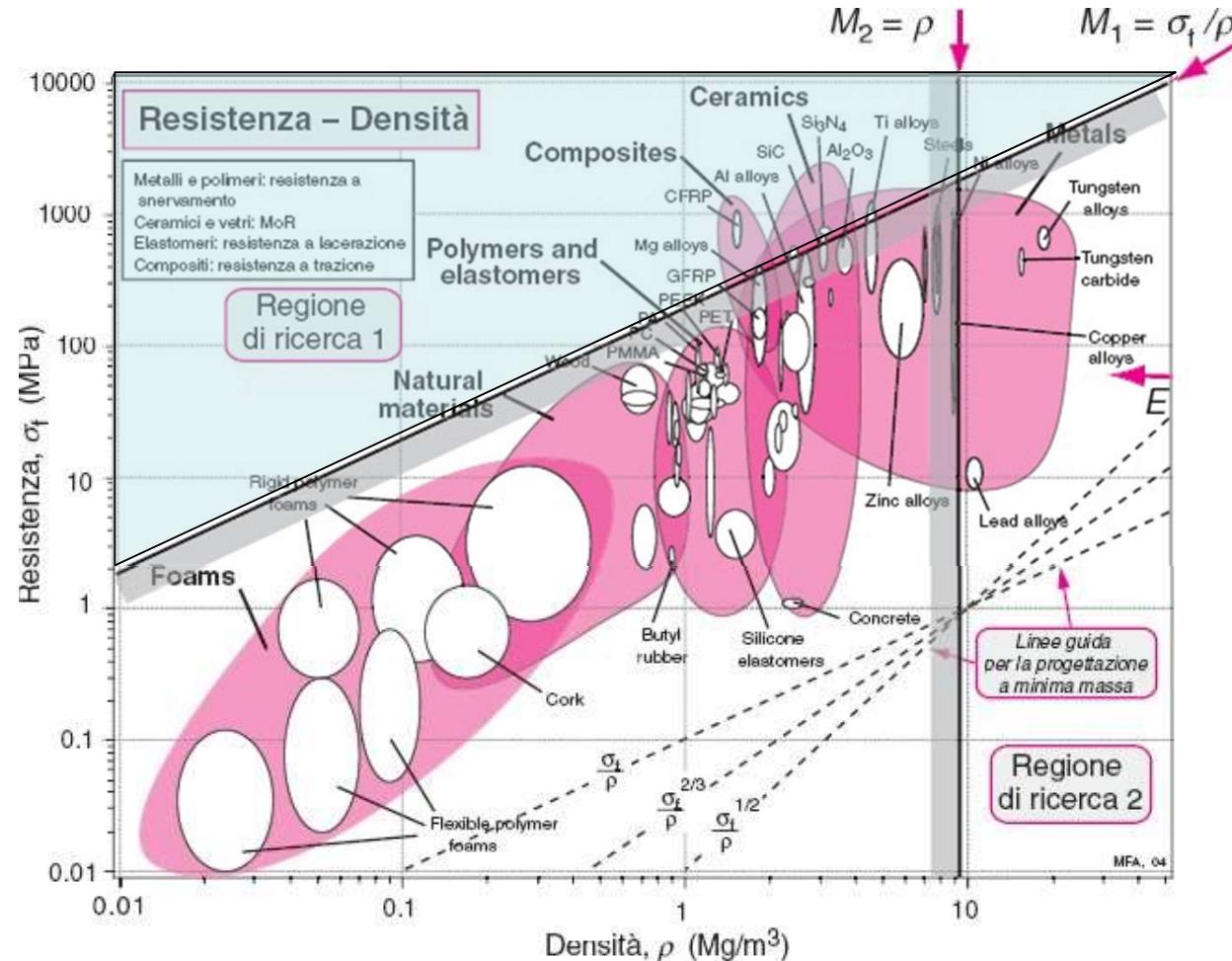
$$\frac{U}{V} = \frac{1}{4} \rho R^2 \omega^2$$

M2

Un altro caso pratico

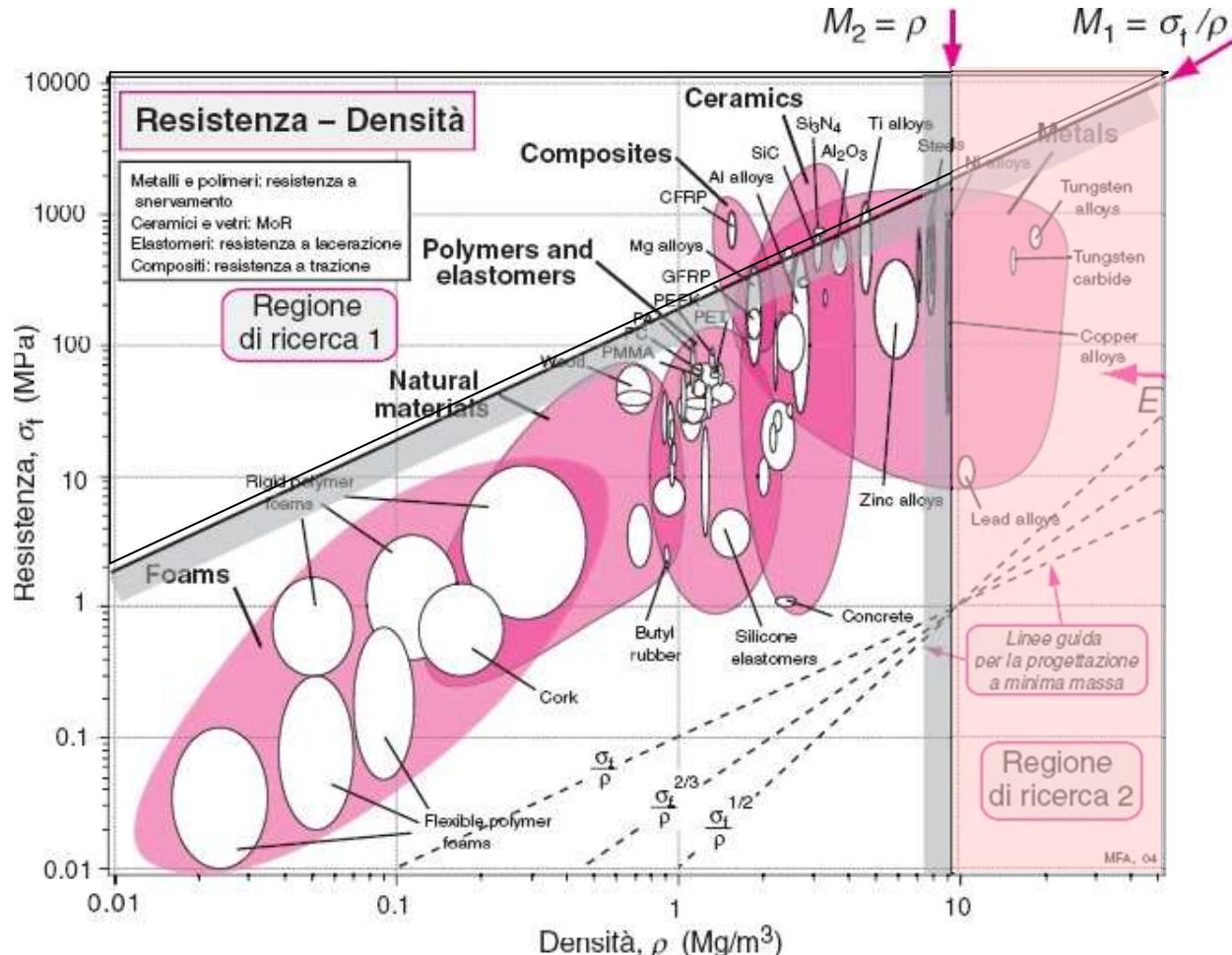


Un altro caso pratico



I materiali che presentano i valori più elevati dell'indice M_1 giacciono nella regione di ricerca situata in prossimità dell'angolo superiore sinistro del diagramma. La scelta ottimale è rappresentata da una serie di materiali inaspettati: compositi, in particolare **CFRP, leghe di titanio ad alta resistenza e alcuni ceramici**, anche se questi ultimi dovranno essere scartati per via della scarsa tenacità.

Un altro caso pratico



Tradizionalmente i volani per i giocattoli sono realizzati in piombo

Si è optato per il piombo perché nel caso dei volani per giocattoli il vincolo è differente rispetto ai volani efficienti.

Nemmeno un super-bambino può caricare il volano di un giocattolo tanto da farlo girare a velocità tali da raggiungere il cedimento strutturale. La velocità angolare ω risulta limitata dal meccanismo di trasmissione (fascette a strappo, trasmissione a frizione).

E se abbiamo obiettivi contrastanti?

In tutti campi, e nella maggior parte dei casi, prendere delle decisioni richiede di giungere a **compromessi**. A volte, il compromesso consiste nel far fronte a **vincoli o obiettivi in conflitto tra loro**.

- Pagare due fatture con un fondo
- Essere ricchi ma anche felici
- Contenitore a perdere delle bevande del caffè (minimizzare costo, cedibilità, rigidezza e resistenza meccanica)
- Longherone dell'ala di un aereo (minimizzato il peso, rigidezza, la resistenza a fatica, la tenacità e la geometria)

Obiettivo UNICO ma VINCOLI MULTIPLI:

Si impongono i vincoli in successione, scartando di volta in volta il materiale che non li rispetta. I superstiti sono i candidati per realizzare il progetto. A questo punto, è sufficiente classificarli in funzione della loro effettiva capacità di raggiungere il singolo obiettivo desiderato, e infine focalizzare l'attenzione solo sui candidati meglio piazzati in questa classifica.

Ma se si hanno molteplici obiettivi, eventualmente contrastanti, la selezione del materiale diviene più difficile

E se abbiamo obiettivi contrastanti?

PLURALITA' DEGLI OBIETTIVI

Longherone dell'aereo SIA più economico SIA più leggero

il **metodo dei fattori ponderali** (o **metodo dei pesi relativi**): consiste nell'assegnare ad ogni vincolo/requisito un peso, dando un peso maggiore al vincolo/requisito che si ritiene più importante.

Questo metodo di scelta ha il vantaggio di essere semplice, ma presenta indubbiie problematiche:

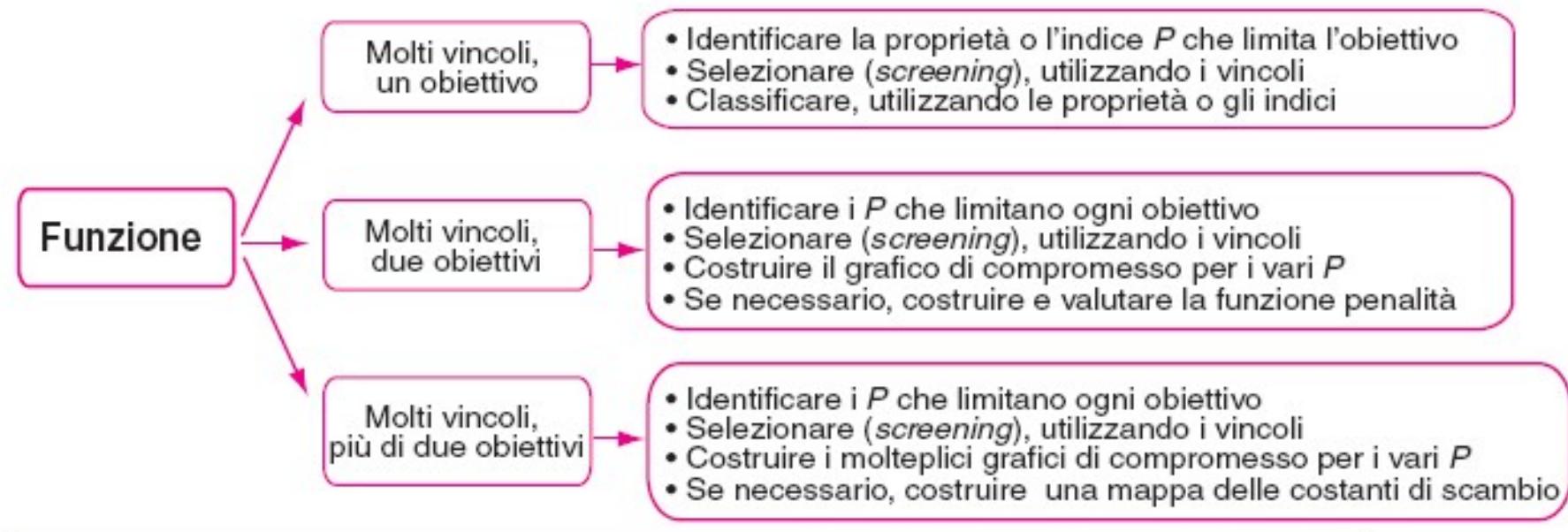
- La soggettività con cui vengono attribuiti i pesi
- Richiede una certa esperienza del progettista nell'attribuzione dei pesi

La soggettività viene eliminata utilizzando il **metodo del vincolo attivo** (*active constraint method*) per i vincoli in conflitto, e combinando gli obiettivi contrastanti in una singola **funzione di penalità**.

Questi sono gli strumenti standard dell'ottimizzazione multifunzionale.

Il loro uso implica la convenzione di esprimere tutti gli obiettivi come quantità da **minimizzare**: senza questo artificio, il metodo della funzione penalità non potrebbe funzionare.

E se abbiamo obiettivi contrastanti?



Strategie per affrontare problemi di selezione con vincoli multipli e obiettivi contrastanti.

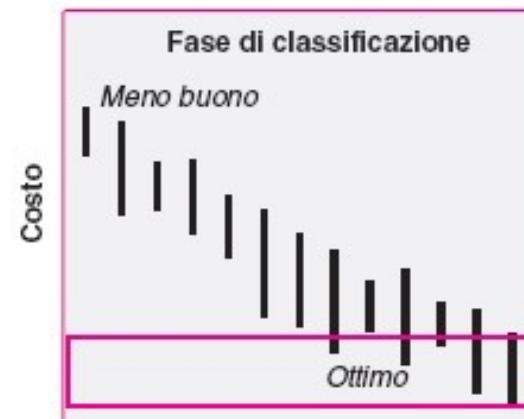
Selezione con vincoli multipli

Quasi tutti i problemi di scelta dei materiali sono sovra-vincolati, nel senso che ci sono più vincoli che variabili indipendenti.

I problemi a vincoli multipli vengono affrontati individuando i vincoli e gli obiettivi imposti dai requisiti di progetto, ed effettuando le seguenti operazioni:

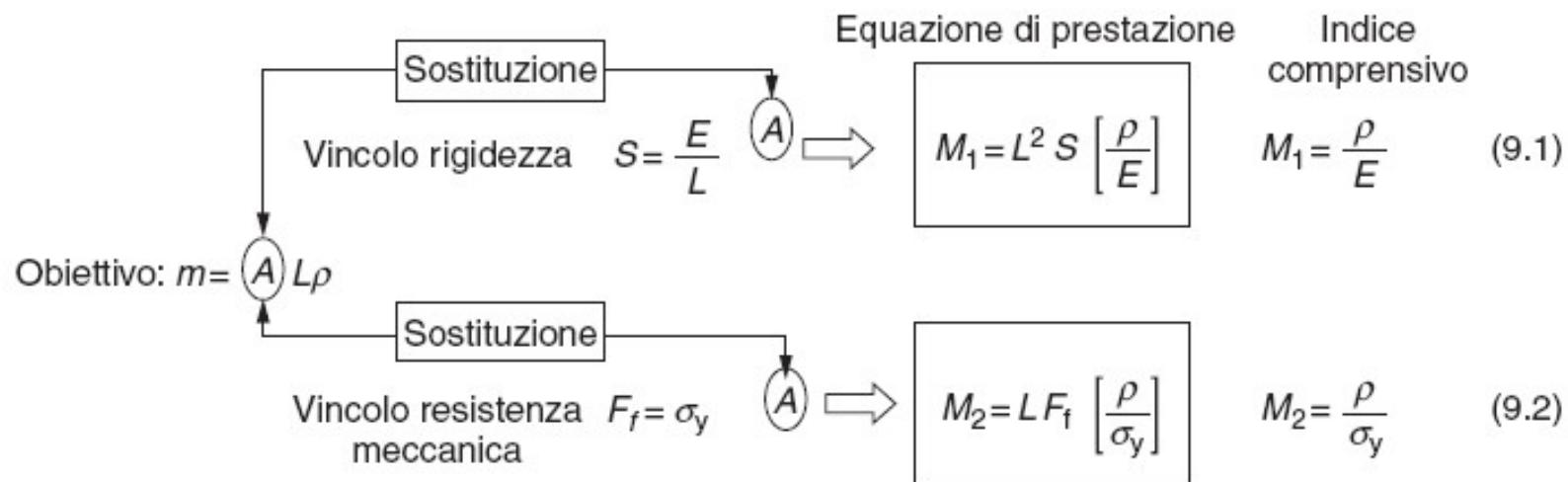
- **screening:** utilizzando un vincolo per volta;
- **classificazione:** usando il valore numerico della prestazione (P) usata nella descrizione dell'obiettivo (di solito massa, volume o costo), o semplicemente sulla base del valore della proprietà del materiale che entra nell'equazione per valutare la prestazione;
- **ricerca di informazioni di supporto** per i candidati meglio classificati, e utilizzo di tali informazioni per giungere alla scelta finale.

Fase di screening	
Modulo di Young	>100 GPa
Resistenza allo snervamento	>250 MPa
Conducibilità termica	>80 W/m.K
Max temperatura di servizio	>300 °C
Resistenza alla corrosione	Buona
In grado di essere pressoccolato	Sì



Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (1 obiettivo) che abbia (2) vincoli su rigidezza e resistenza meccanica – metodo analitico



I simboli hanno il significato usuale: A = area, L = lunghezza, ρ = densità, S = rigidezza, E = modulo di Young, F_f = carico al collasso, σ_y = resistenza allo snervamento o limite elastico

Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (obiettivo) che abbia vincoli su rigidezza e resistenza meccanica

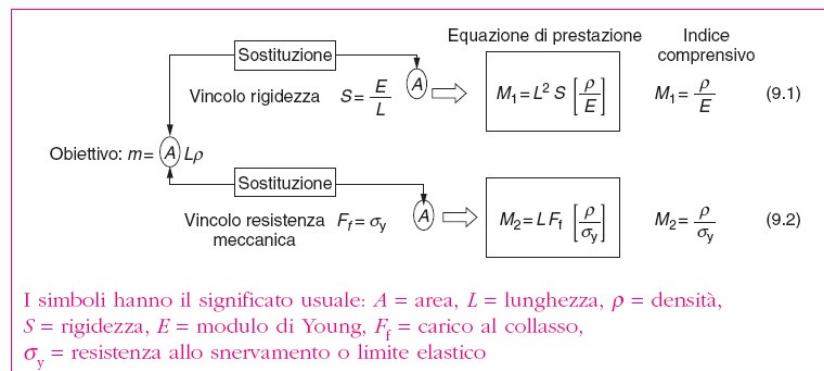
- **Se** il vincolo dominante è la rigidezza **allora** la massa del tirante è m_1
- **Se** il vincolo dominante è la resistenza meccanica **allora** la massa è m_2
- **Se** il tirante deve soddisfare entrambi i requisiti **allora** $\tilde{m} = \max(m_1, m_2)$
la sua massa dovrà essere la più grande tra m_1 e m_2 (se fosse la più piccola, uno dei 2 requisiti non sarebbe soddisfatto!!!) e il minimo fra i massimi (problema di min-max)

Questo è un esempio di un problema “min-max”, non infrequente nel mondo dell’ottimizzazione.

Si cerca cioè il valore più piccolo (min) di una grandezza che è la più grande (max) tra due o più alternative.

Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (obiettivo) che abbia vincoli su rigidezza e resistenza meccanica – **metodo analitico**



Se i vincoli sono:

$$L = 1\text{m}$$

$$S = 3 \times 10^7 \text{N/m}$$

$$F_f = 10^5 \text{N}$$

Materiale	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	σ_y (MPa)	m_2 (kg)	m_1 (kg)
Acciaio 1020 UNI EN 1.0402	7850	205	320	1,15	2,45
6061 Al	2700	70	120	1,16	2,25
Ti-6-4	4400	115	950	1,15	0,46

Quale scegliere tra questi 3 materiali?? E che massa (minimizzata) avrà il tirante?

Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (obiettivo) che abbia vincoli su rigidezza e resistenza meccanica – **metodo analitico**

Materiale	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	σ_y (MPa)	m_1 (kg)	m_2 (kg)	\tilde{m} (kg)
Acciaio 1020 UNI EN 1.0402	7850	205	320	1,15	2,45	2,45
6061 Al	2700	70	120	1,16	2,25	2,25
Ti-6-4	4400	115	950	1,15	0,46	<u>1,15</u>

Quando invece di tre ci sono 3000 materiali candidati tra cui scegliere, si possono usare semplici algoritmi implementati su calcolatore per ordinarli e classificarli.

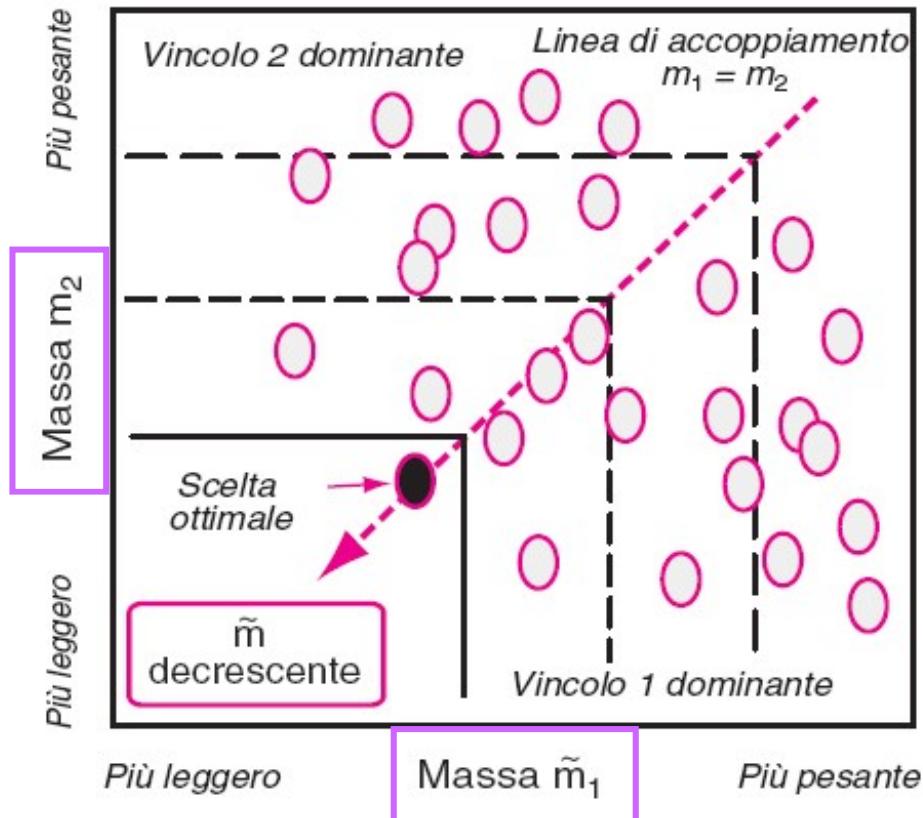
Limiti di questo approccio numerico:

- manca dell'immediatezza di un approccio visivo, e dello stimolo al pensiero creativo che invece un metodo più grafico permetterebbe
- pre-selezione
- vincolato a parametri selezionati L- S e F

Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (obiettivo) che abbia vincoli su rigidezza e resistenza meccanica – **metodo grafico**

Conviene rappresentare i materiali su un grafico m_1 e m_2



La linea $m_1 = m_2$ divide il diagramma in due regioni: in una, $m_1 > m_2$ e il vincolo 1 è dominante; nell'altra, $m_2 > m_1$ e il vincolo 2 è dominante.

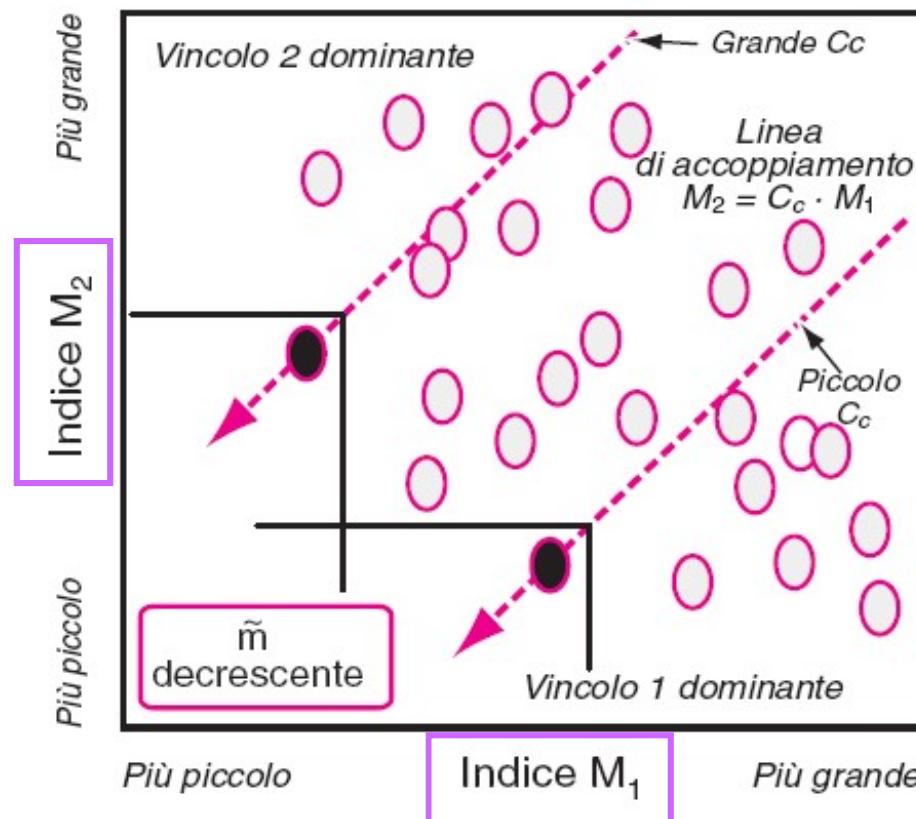
Nella regione 1 l'obiettivo è minimizzare m_1 , visto che è maggiore di m_2 ; nella regione 2 vale l'opposto.

Questo definisce una **casella di selezione**, con il vertice sulla linea $m_1 = m_2$. Se si sposta la casella verso la zona in basso a sinistra del diagramma, il valore di \tilde{m} diventa più piccolo. La scelta migliore è data dall'ultimo materiale che rimane entro la casella di selezione, mano a mano che questa si sposta verso la zona in basso a sinistra.

Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (obiettivo) che abbia vincoli su rigidezza e resistenza meccanica – **metodo analitico**

Il grafico però vale solo per una terna ben precisa di L,S, Ff: se cambia qualcosa, anche di poco, bisogna ridisegnare il grafico, per ogni materiale



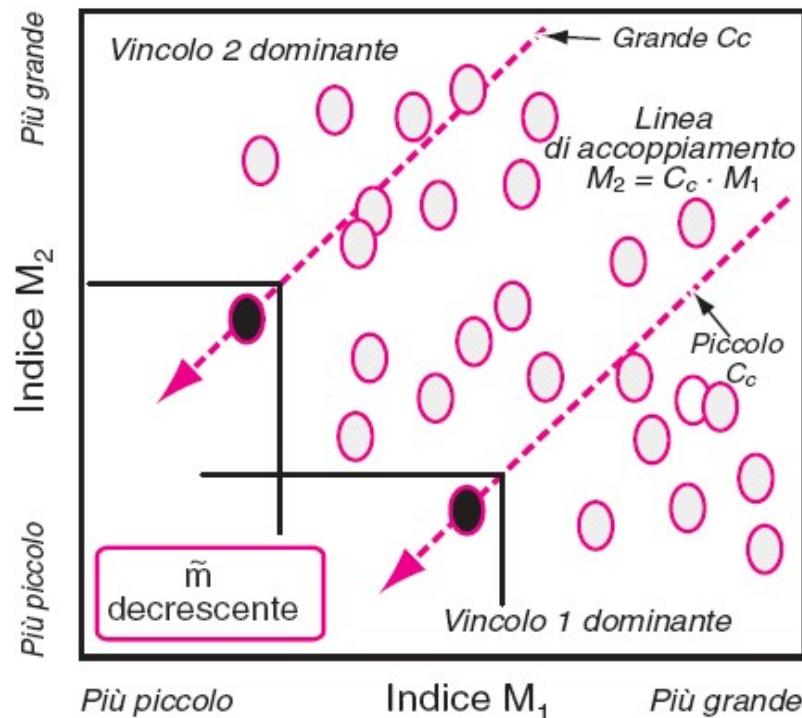
Si supponga, invece, di porre in grafico gli indici del materiale,
 $M_1 = \rho/E$
 $M_2 = \rho/\sigma_y$,

che fanno parte delle equazioni di prestazione. Ora, ogni bolla dipende solo dalle proprietà del materiale e la sua posizione non dipende dai valori di S, L, o Ff.

La condizione $m_1 = m_2$ porta alla relazione:

Selezione con vincoli multipli

Esempio: tirante leggero (obiettivo) che abbia vincoli su rigidezza e resistenza meccanica – **metodo analitico**



ora il grafico ha una valenza molto più generale, che copre tutti i possibili valori di S e F_f e geometrie (descritte da L)

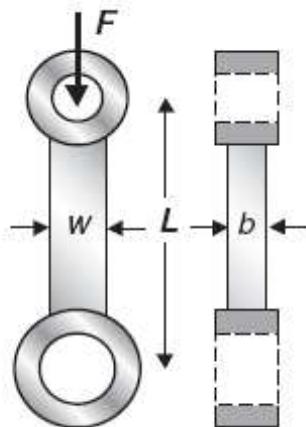
$$M_2 = \left(\frac{LS}{F_f} \right) M_1$$

$$\log(M_2) = \log(M_1) + \log\left(\frac{LS}{F_f}\right)$$

Questa relazione descrive una retta di pendenza unitaria, detta **linea di accoppiamento**, inserita in una posizione che dipende dal valore LS/F_f , la cosiddetta **costante di accoppiamento**, indicata con C_c

Biella per motore ad alte prestazioni

Biella di un motore, un compressore o una pompa ad alte prestazione che non deve cedere per fatica o per imbozzamento e deve essere il più leggero possibile



Funzione	Bielle per motore alternativo o pompa alternativa
Vincoli	<ul style="list-style-type: none">• Non deve cedere per fatica ad alto numero di cicli, o• Non deve cedere per imbozzamento• Corsa, e quindi lunghezza L della biella, specificata
Obiettivo	Minimizzare la massa
Variabili libere	<ul style="list-style-type: none">• Sezione A• Scelta del materiale

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_e$$

$$m_1 = \beta F L \left(\frac{\rho}{\sigma_e} \right)$$

M1

$$F \leq \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

$$m_2 = \beta \left(\frac{12F}{\alpha \pi^2} \right)^{1/2} L^2 \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$$

M2

Biella per motore ad alte prestazioni:

Biella ad alte prestazione che non deve cedere per fatica o per imbozzamento e deve essere il più leggero possibile – **metodo analitico**

Se i vincoli sono:

$$L = 200\text{mm}$$

$$F = 50 \text{ kN}$$

$$\alpha = 0.8$$

$$\beta=1.5$$

Quale scegliere tra questi i materiali??

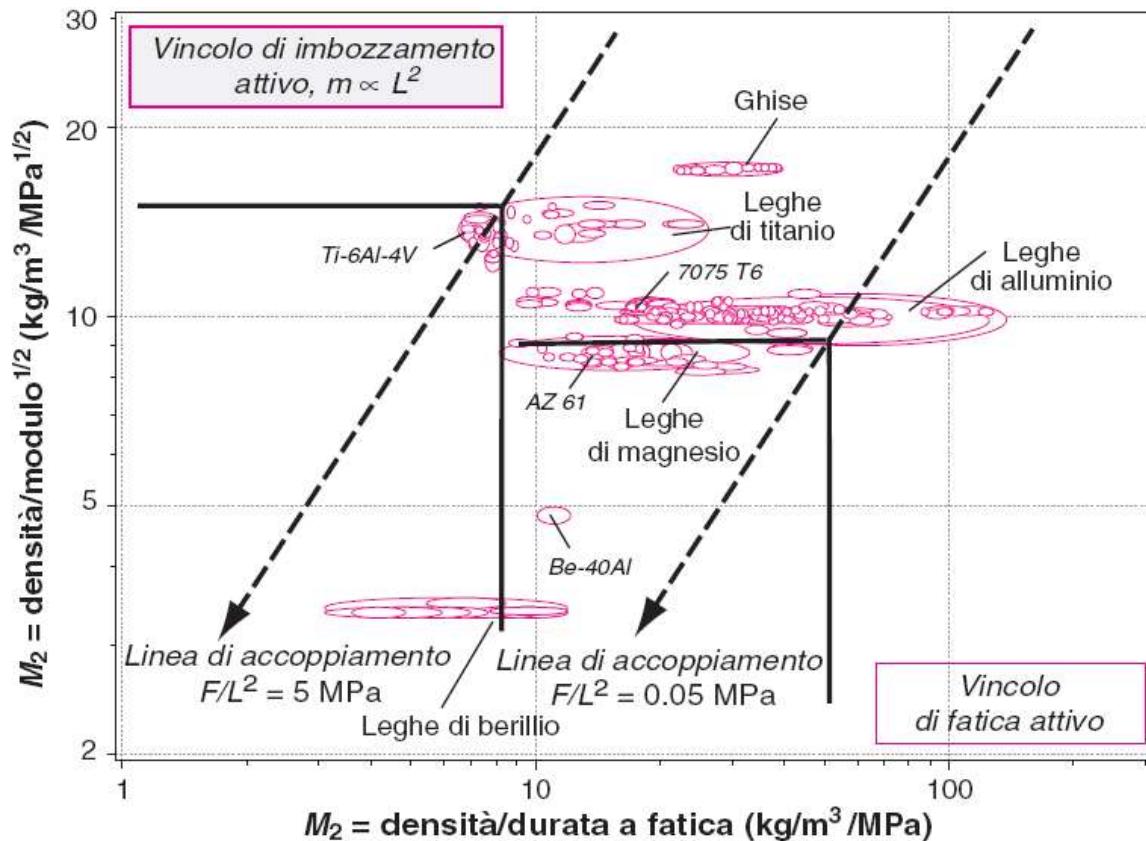
Material	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	σ_e (MPa)	m_1 (kg)	m_2 (kg)	$\tilde{m} = \max(m_1, m_2)$ (kg)
Nodular cast iron	7150	178	250	0.43	0.22	0.43
HSLA steel 4140 (o.q. T-315)	7850	210	590	0.20	0.28	0.28
Al S355.0 casting alloy	2700	70	95	0.39	0.14	0.39
Duralcan Al-SiC(p) composite	2880	110	230	0.18	0.12	0.18
Titanium 6Al 4V	4400	115	530	0.12	0.17	0.17

Limite:

Pre-selezione

Vincolato da L e F

Biella per motore ad alte prestazioni



$m_1=m_2$

$$M_2 = \left[\left(\frac{\alpha \pi^2}{12} \cdot \frac{F}{L^2} \right)^{1/2} \right] \cdot M_1$$

Eqz linea di accoppiamento

Per $\alpha=(F/L^2)=0.8$, di fatto
l'equazione è

$$M_2 = k F/L^2 M_1$$

ovvero

$$\log(M_2) = \log(k F/L^2) + \log(M_1)$$

Retta a pendenza 1 e intercetta
funzione del valore di F/L^2

Si considerino 2 valori di F/L^2 :
alto (5 MPa) e basso (0.05 MPa)

Material	Comment
Magnesium alloys	AZ61 and related alloys offer good all-round performance
Titanium alloys	Ti-6-4 is the best choice for high F/L^2
Beryllium alloys	The ultimate choice, but difficult to process and very expensive
Aluminum alloys	Cheaper than titanium or magnesium, but lower performance

Selezione con obiettivi contrastanti

La selezione di materiali richiede quasi sempre il raggiungimento di un compromesso tra obiettivi contrastanti. Il più delle volte, gli obiettivi in contrasto risultano essere i seguenti:

- minimizzare la **massa** – un obiettivo sempre presente nella progettazione di componenti che si muovono o che devono essere movimentati, che oscillano, che devono rispondere rapidamente a una forza di piccola entità
- minimizzare il **volume** – perché vuol dire usare meno materiale, e perché lo spazio sta diventando sempre più prezioso
- minimizzare il **costo** – la redditività dipende dalla differenza tra il prezzo di vendita e il costo di produzione, il modo più ovvio per accrescere questa differenza è ridurre il costo.
- minimizzare l'**impatto ambientale** – il danno all'ambiente circostante causato dalla fabbricazione e dall'uso del prodotto.

Le unità di misura in cui possono essere espressi questi obiettivi sono diverse. Come confrontarli??

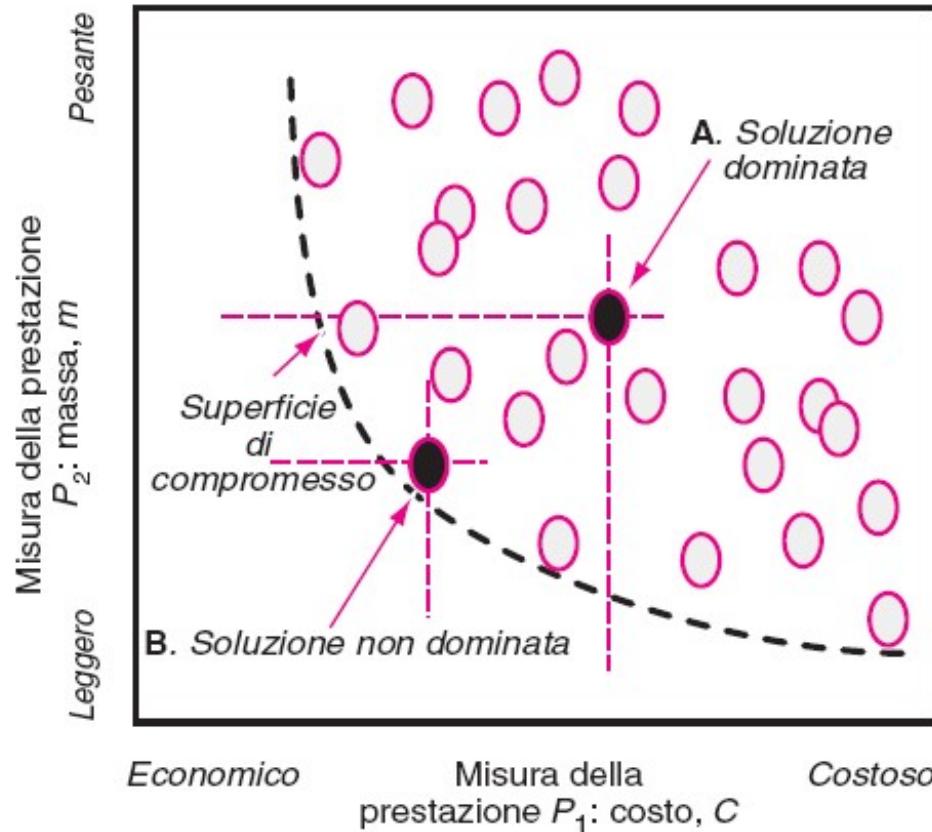
Selezione con obiettivi contrastanti

Rimanendo nel caso dei quattro obiettivi più comuni indicati, ognuno di essi può essere quantificato tramite un parametro prestazionale P_i (in seguito indicato come **misura della prestazione**) e, nella pratica, almeno due di questi compaiono nella progettazione di ogni prodotto.

I conflitti nascono perché, in generale, la scelta che ottimizza un obiettivo non farà lo stesso per gli altri. Quindi, la scelta migliore è un compromesso, che non ottimizza nessun obiettivo ma che, compatibilmente con la loro interdipendenza, li porta tutti il più vicino possibile al valore ottimale.

Tutto ciò pone in evidenza il problema centrale: come si può confrontare la massa con il costo o il volume con l'impatto ambientale?

Strategie di compromesso



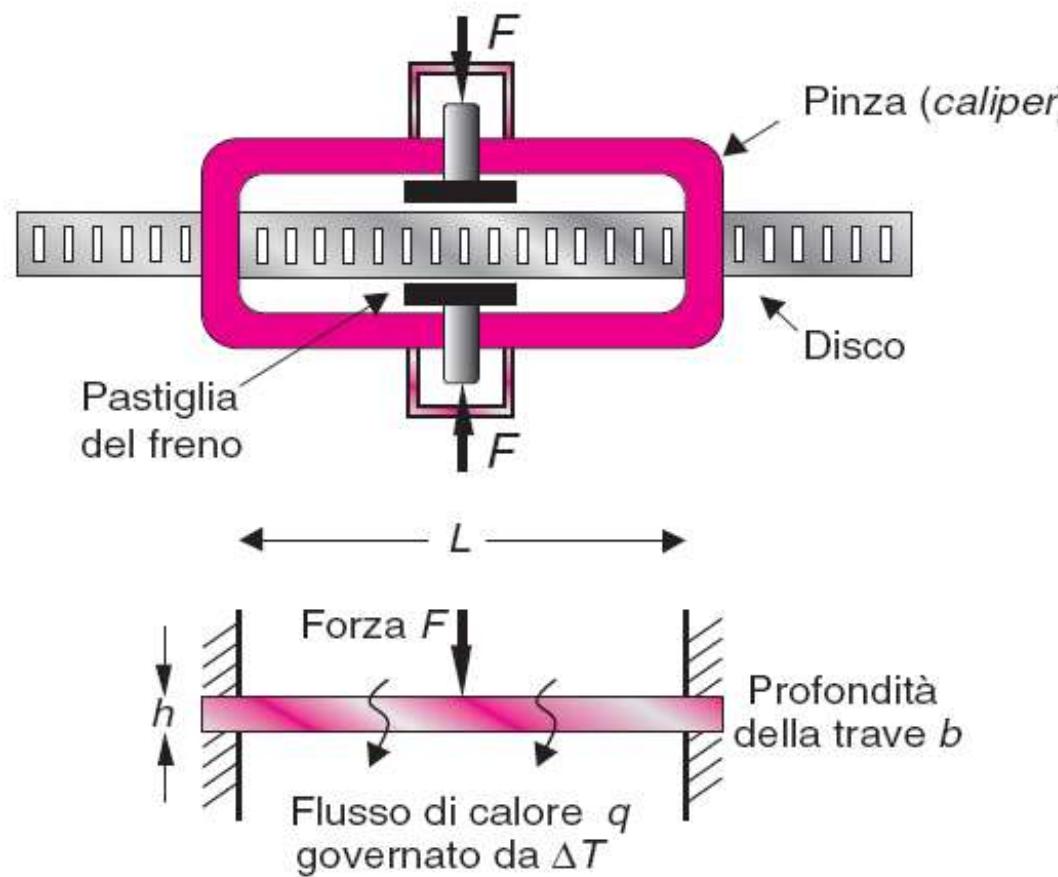
Si consideri la scelta di un materiale con l'obiettivo di minimizzare sia la massa (misura della prestazione P_2) sia il costo (misura della prestazione P_1), soddisfacendo

contemporaneamente un insieme di vincoli quali la richiesta di una temperatura di servizio massima o della resistenza a corrosione in un determinato ambiente.

Seguendo la terminologia standard della **teoria dell'ottimizzazione**, si definisce

soluzione l'individuazione (e la scelta) di un materiale che rispetta tutti i vincoli, ma che non necessariamente ottimizza entrambi gli obiettivi.

Pinze di freno a disco



La pinza del freno a disco può essere schematizzata come due travi di lunghezza L , larghezza b e spessore h , le cui estremità siano collegate tra loro

Quando si aziona il freno, entrambe le travi vengono sollecitate a flessione e, poiché si genera calore, si riscaldano. La **rigidezza S** della trave è un parametro critico: se non è sufficiente, la pinza si flette, compromettendo l'efficacia della frenata e originando vibrazioni. Anche la **capacità di trasmettere il calore** è critica, poiché parte del calore generato durante la frenata deve essere asportato attraverso la pinza stessa.

Pinze di freno a disco

Funzione	Pinza del freno
Vincoli	<ul style="list-style-type: none">Rigidezza flessionale, S^*, specificataDimensioni L e b specificate
Obiettivo	<ul style="list-style-type: none">Minimizzare la massa della pinzaMassimizzare il trasporto di calore attraverso la pinzaMinimizzare il costo del materiale
Variabili libere	<ul style="list-style-type: none">Spessore h delle pareti della pinzaScelta del materiale

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} = \frac{C_1 E b h^3}{12 L^3} \geq S^* \text{ (unità: N/m)}$$

Rigidezza flessionale
(vincolo)

$$b \geq \left(\frac{12 S^*}{C_1 b E} \right)^{1/3} L$$

$$m_a = b \rho \quad (\text{unità : kg/m}^2)$$

Massa per unità di superficie di pinza

$$q_a = \lambda \frac{\Delta T}{h} \quad (\text{unità:Watts/m}^2)$$

Flusso di calore per unità di superficie

Pinze di freno a disco

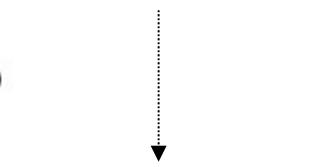
$$b \geq \left(\frac{12S^*}{C_1 b E} \right)^{1/3} L$$

$$m_a = b\rho \text{ (unità : kg/m}^2\text{)}$$

Massa per unità di superficie di pinza

$$q_a = \lambda \frac{\Delta T}{b} \text{ (unità:Watts/m}^2\text{)}$$

Flusso di calore per unità di superficie



$$m_a \geq \left(\frac{12S^*}{C_1 b} \right)^{1/3} L \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \text{ (unità kg/m}^2\text{)}$$

$$q_a = \frac{\Delta T}{L} \left(\frac{C_1 b}{12S^*} \right)^{1/3} (\lambda E^{1/3}) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

M1

M2

Generalmente le pinze sono fatte in ghisa sferoidale. Se si rapportano i vari indici ai valori di riferimento per la ghisa sferoidale (E_0 , λ_0 , ρ_0), i materiali posti nell'angolo in basso a sinistra individuano materiali migliori della ghisa relativamente ad entrambi gli obiettivi

Pinze di freno a disco

$$\frac{m_a}{m_{a,0}} = \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \left(\frac{E_0^{1/3}}{\rho_0} \right)$$

In modo da avere la stessa funzione di E

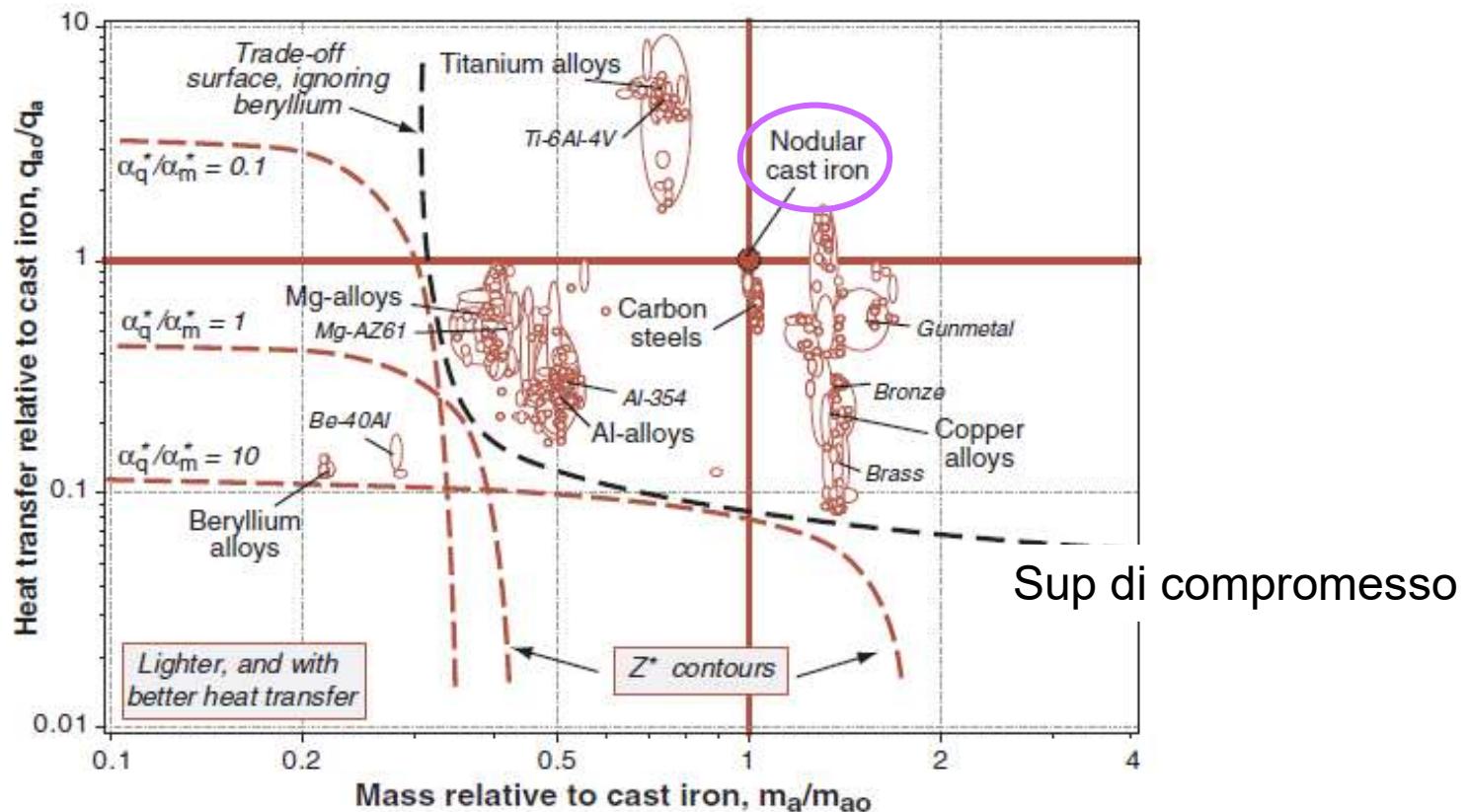
$$\rightarrow \frac{q_{a,0}}{q_a} = \frac{\lambda_0 E_0^{1/3}}{\lambda E^{1/3}}$$

Prendendo come riferimento:

$$E_0 = 170 \text{ GPa}$$

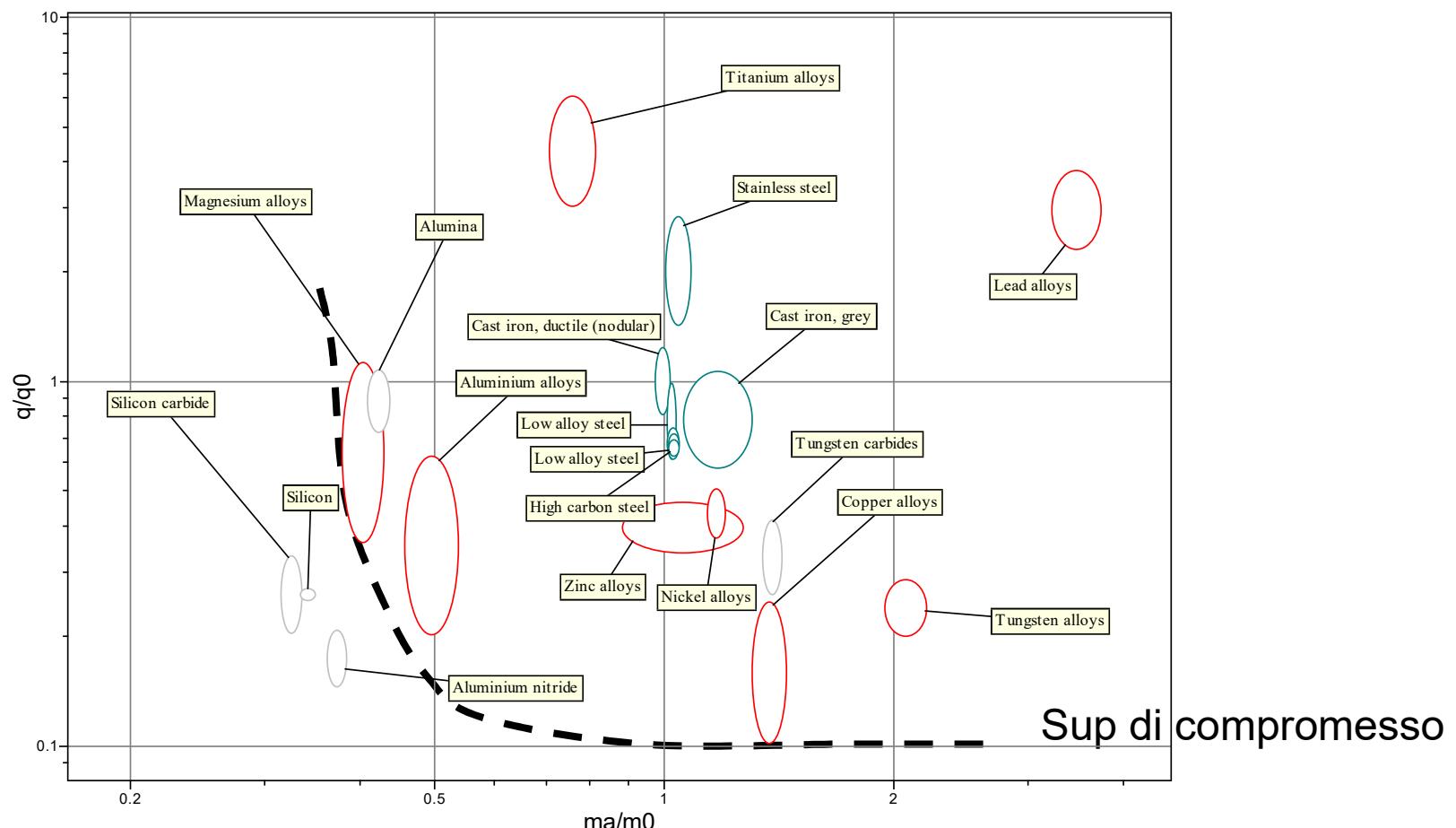
$$\lambda_0 = 36 \text{ W/mK}$$

$$\rho_0 = 7150 \text{ kg/m}^3$$



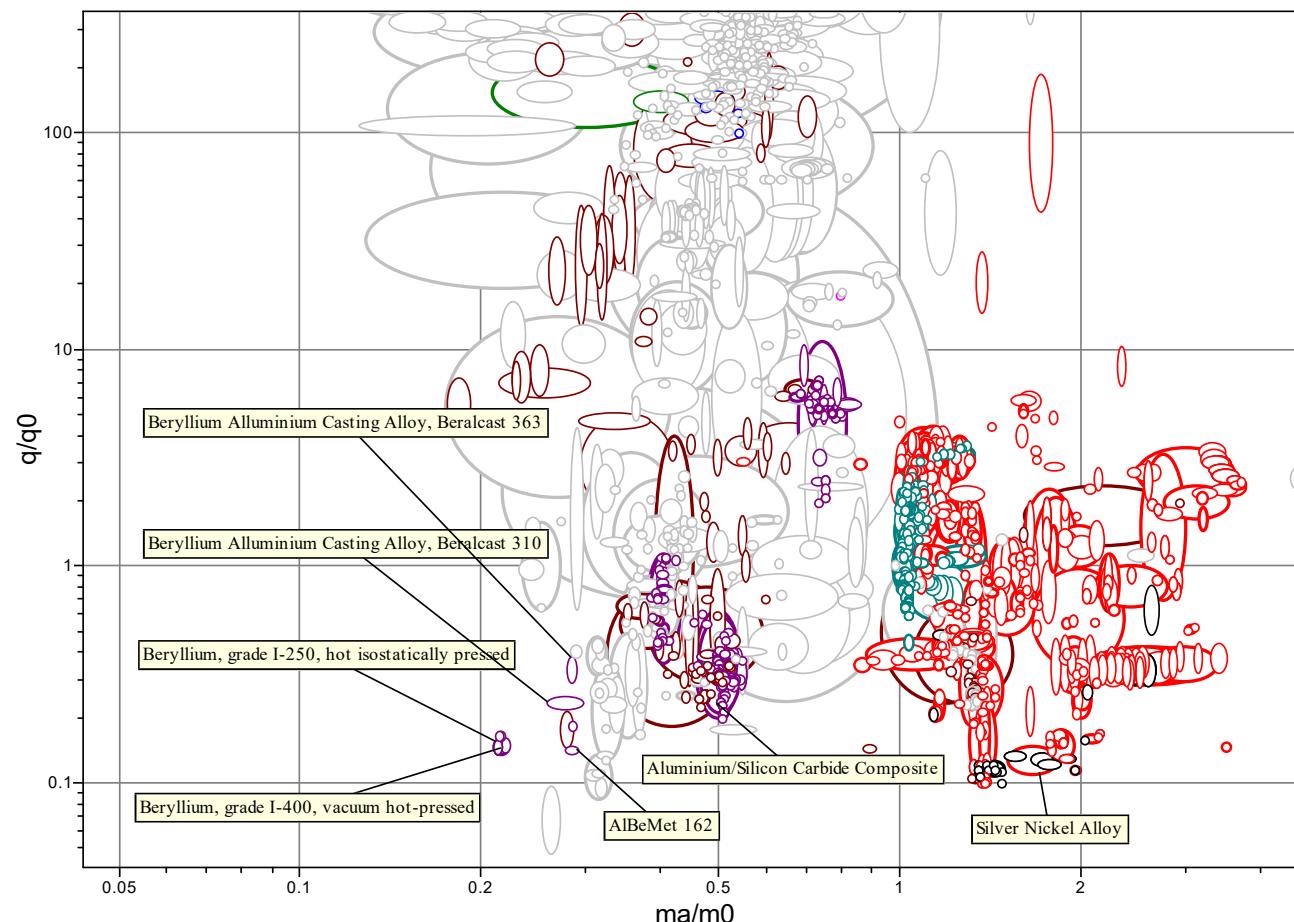
Pinze di freno a disco

Aggiungendo un vincolo sulla tenacità a frattura (no materiali fragili)



Pinze di freno a disco

Chiaramente non possono essere selezionati i materiali che non sono nel database dal quale viene effettuata selezione e scelta...

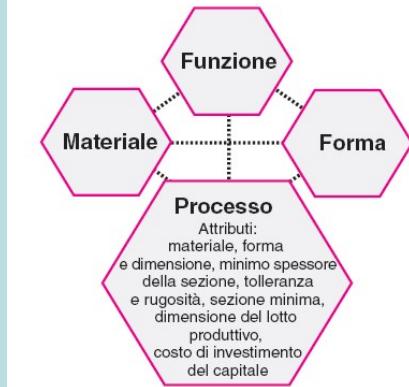


Pinze di freno a disco



Pinza del freno composita in Al-Be per una monoposto da corsa Ferrari Formula 1
(Marder, 1997).

La scelta del processo



Il processo di lavorazione è il mezzo che permette la formatura, la giunzione o la finitura di un materiale.

La **colata in sabbia**, lo **stampaggio a iniezione**, la **saldatura per fusione**, sono tutti processi di lavorazione; ne esistono centinaia.

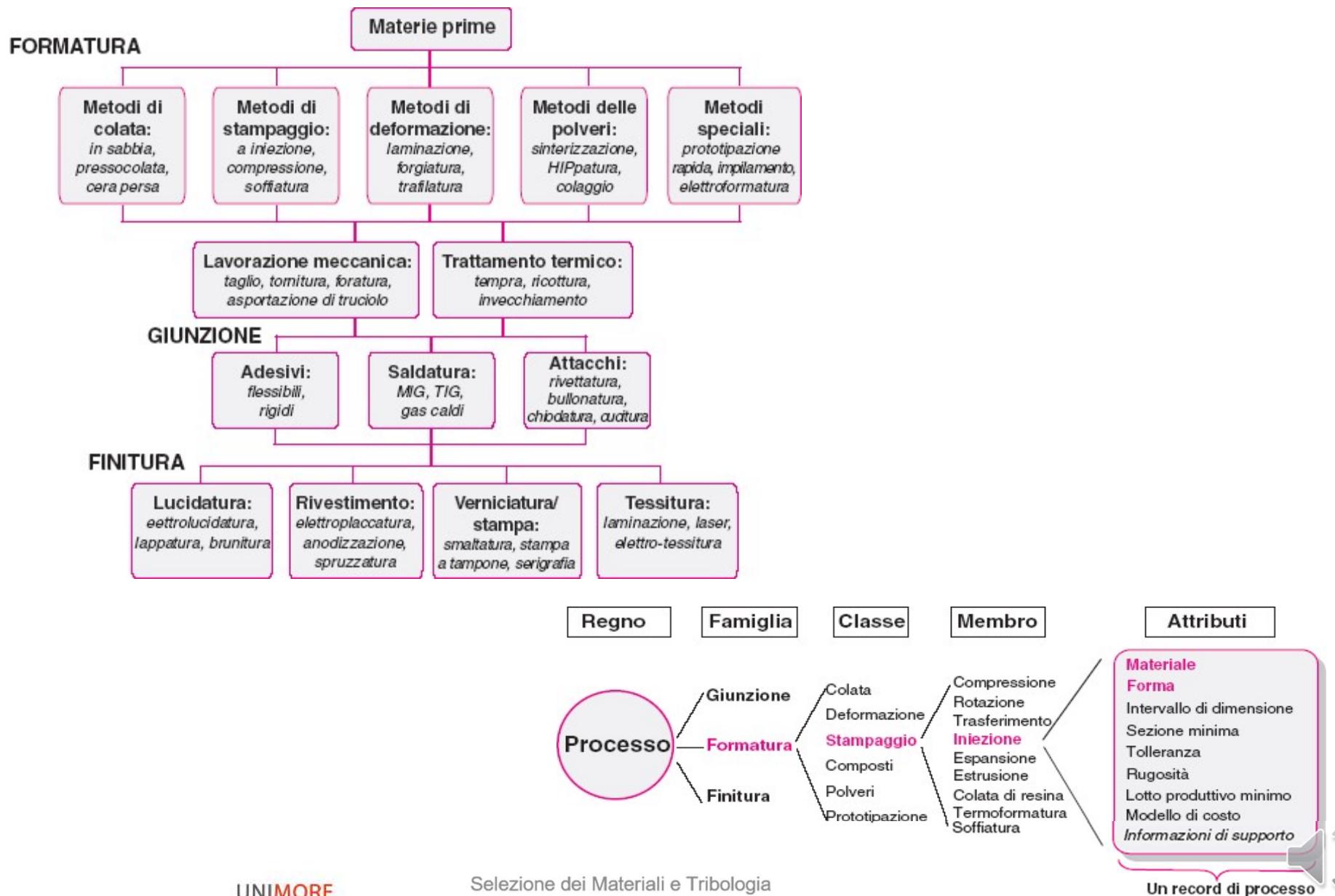
È importante scegliere l'adatta tipologia e la giusta sequenza dei processi fin dall'inizio della progettazione, cioè prima che diventi troppo onerosa la penalizzazione in termini di costo a seguito di modifiche in itinere. La scelta, per un dato componente, dipende dal materiale con cui verrà realizzato, dalla dimensione, forma e precisione che si vogliono ottenere, e dalla quantità di pezzi da produrre: in breve, dai **requisiti di progetto**.

Un cambiamento dei requisiti di progetto può comportare modifiche nella tipologia e nella sequenza dei processi.

Ogni processo è caratterizzato da un insieme di **attributi**: i materiali che può trattare, le forme che può realizzare e la precisione, complessità e dimensione ottenibili.



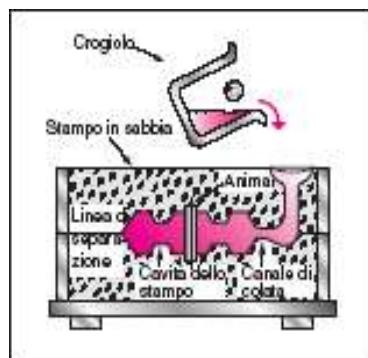
La scelta del processo



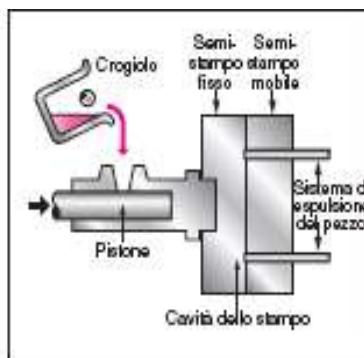
La scelta del processo

formatura

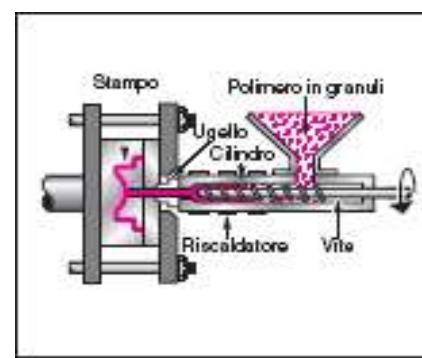
Processi fusori



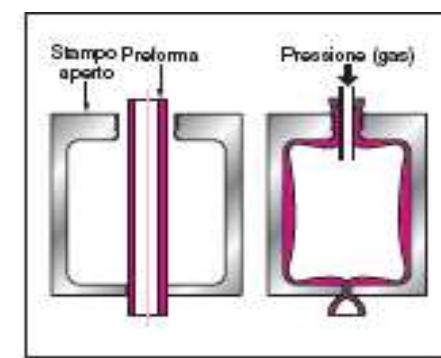
Colata in sabbia



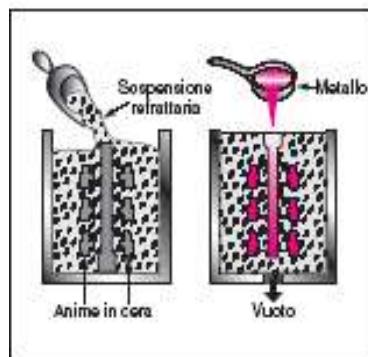
Pressocottura



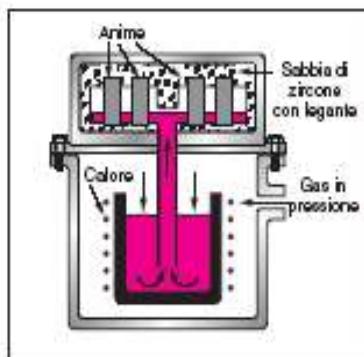
Estrusione di polimero



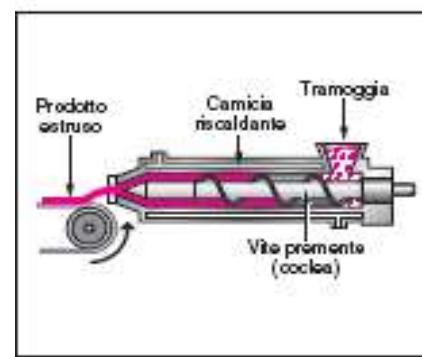
Stampaggio per soffiatura



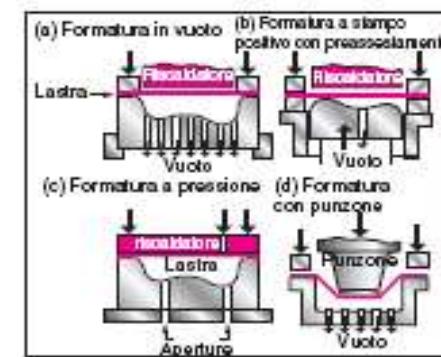
Fusione a cera persa.



Colata a bassa pressione



Termoformatura

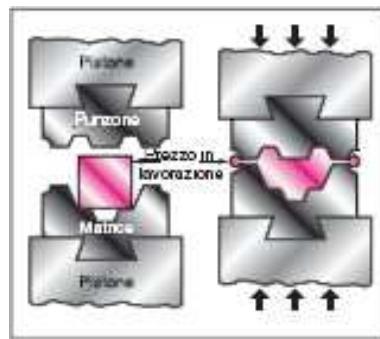


Formatura a pressione

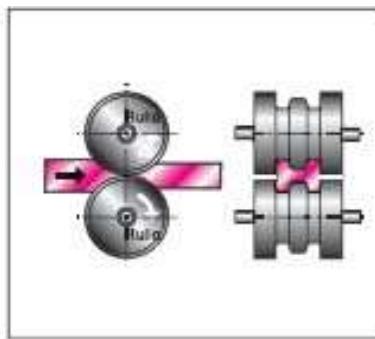


La scelta del processo

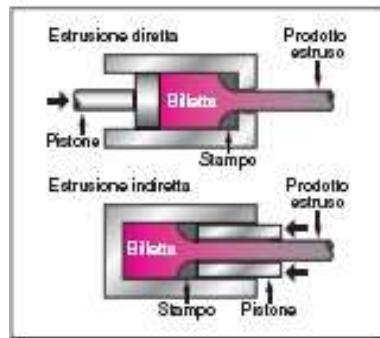
Deformazione plastica



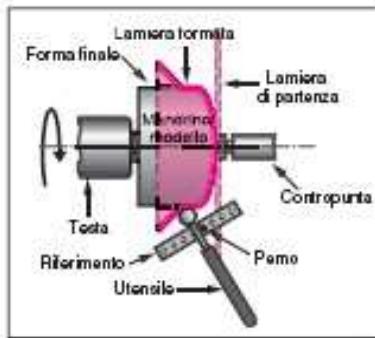
Forgatura



Laminazione

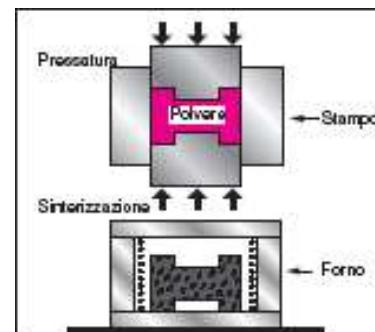


Estrusione

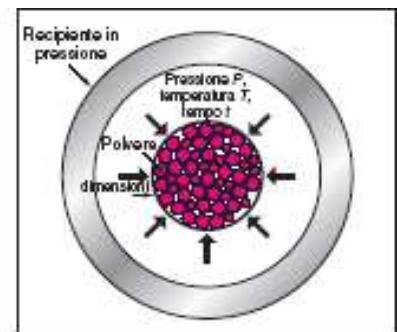


Imbrinatura su tornio

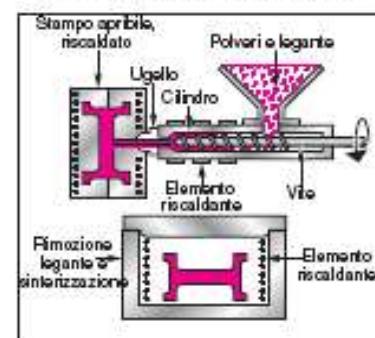
Metodi da Polveri



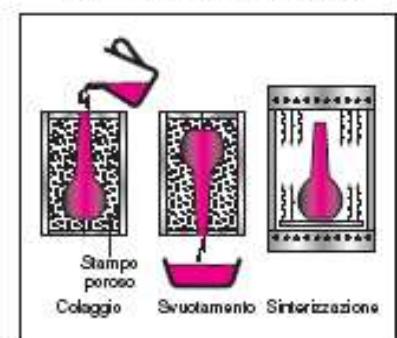
Pressatura uniaxiale e sinterizzazione



Pressatura isotatica a caldo (HIP)



Stampaggio a iniezione di polveri



Colaggio

A caldo: $T > 0.55 T_m$

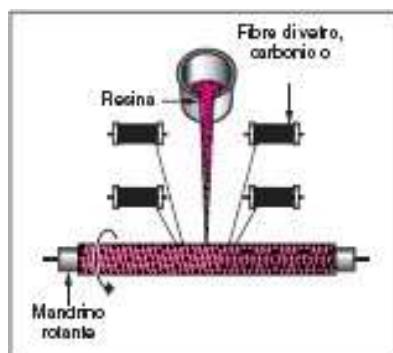
Tiepido: $0.35 T_m < T < 0.55 T_m$

A freddo: $T < 0.35 T_m$

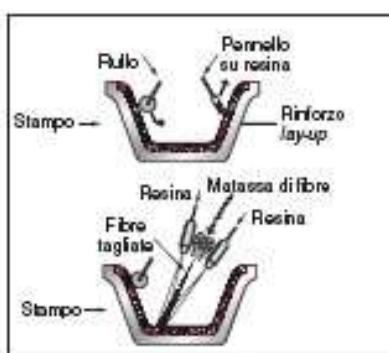


La scelta del processo

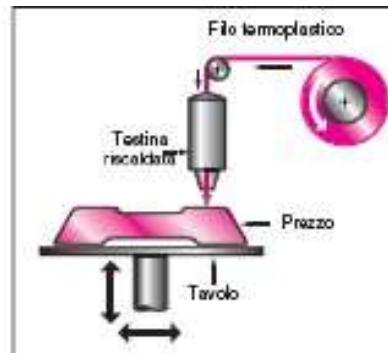
Metodi formatura materiali compositi



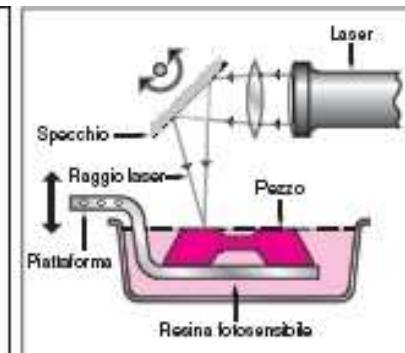
Filament winding



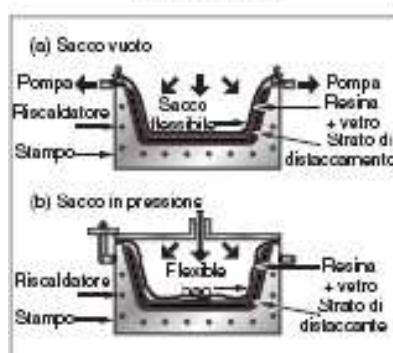
Roll e spray lay-up



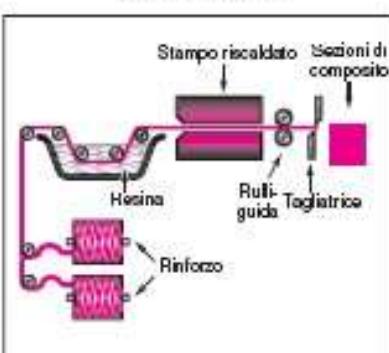
Formatura per deposizione



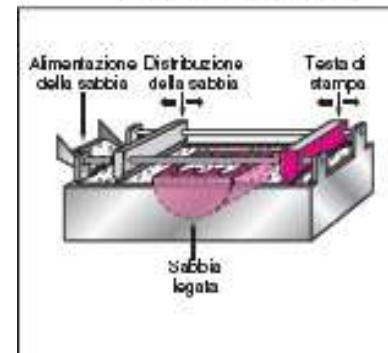
Stereolitografia, SLA



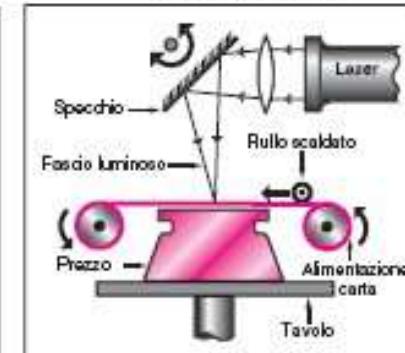
Stampaggio in vuoto e in sacco a pressione



Pultrusione



Formatura per stampaggio diretto

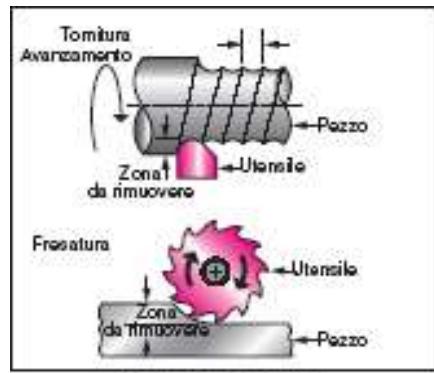


Fabbricazione stratificata dell'oggetto, LOM

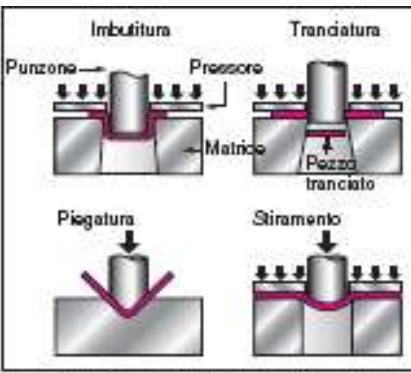


La scelta del processo

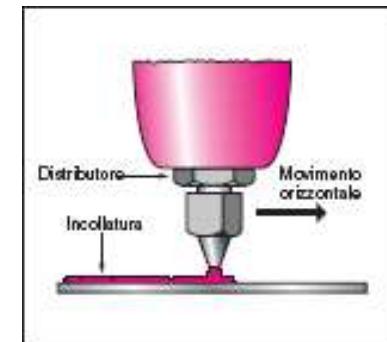
Lavorazione Meccanica



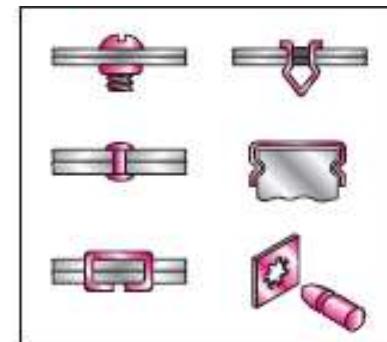
Tomitura e fresatura



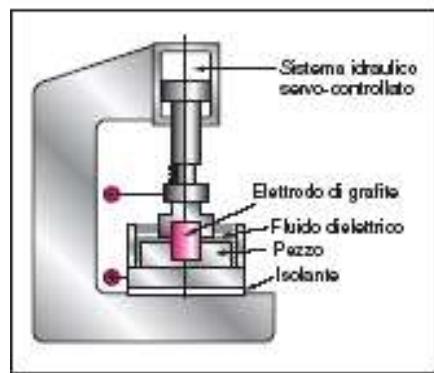
Imbutitura, tranciatura e stiramento



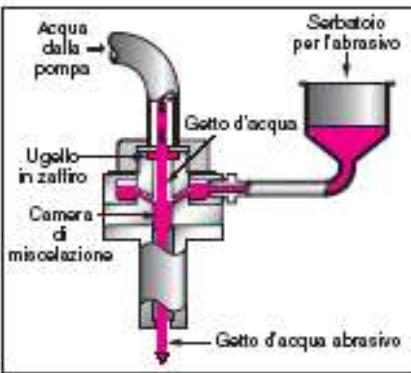
Adesivi



Connettori e attacchi



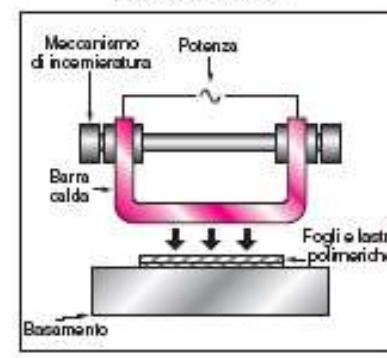
Elettroerosione



Taglio water-jet



Saldatura manuale ad arco

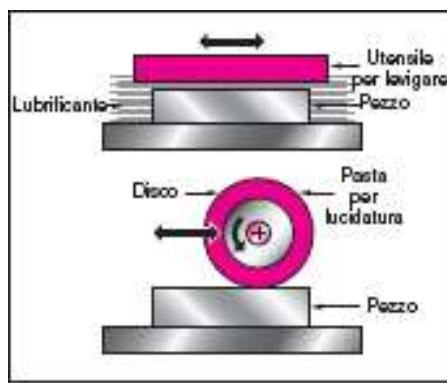


Saldatura di polimeri mediante barra calda

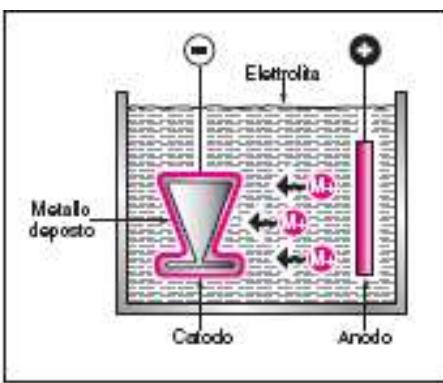


La scelta del processo

finitura



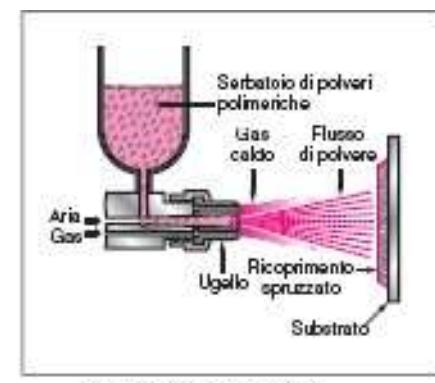
Lucidatura meccanica



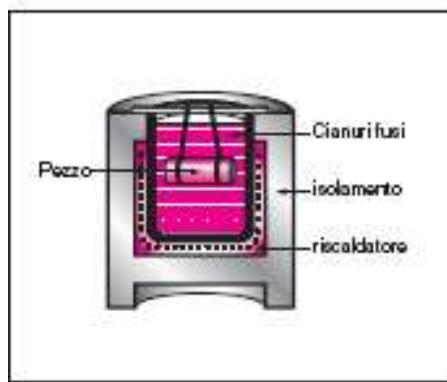
Elettroplaccatura



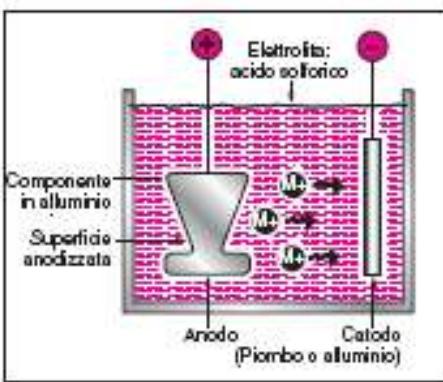
Verniciatura a spruzzo



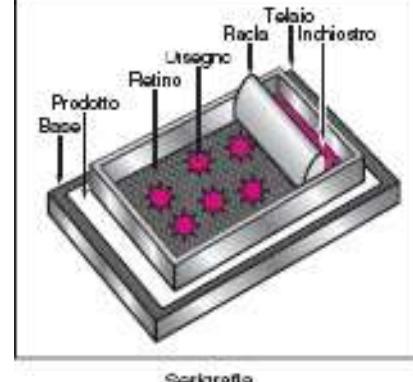
Verniciatura con polimeri



Trattamento termico: carboalloyazione



Anodizzazione



Serigrafia



tampografia



La scelta del processo

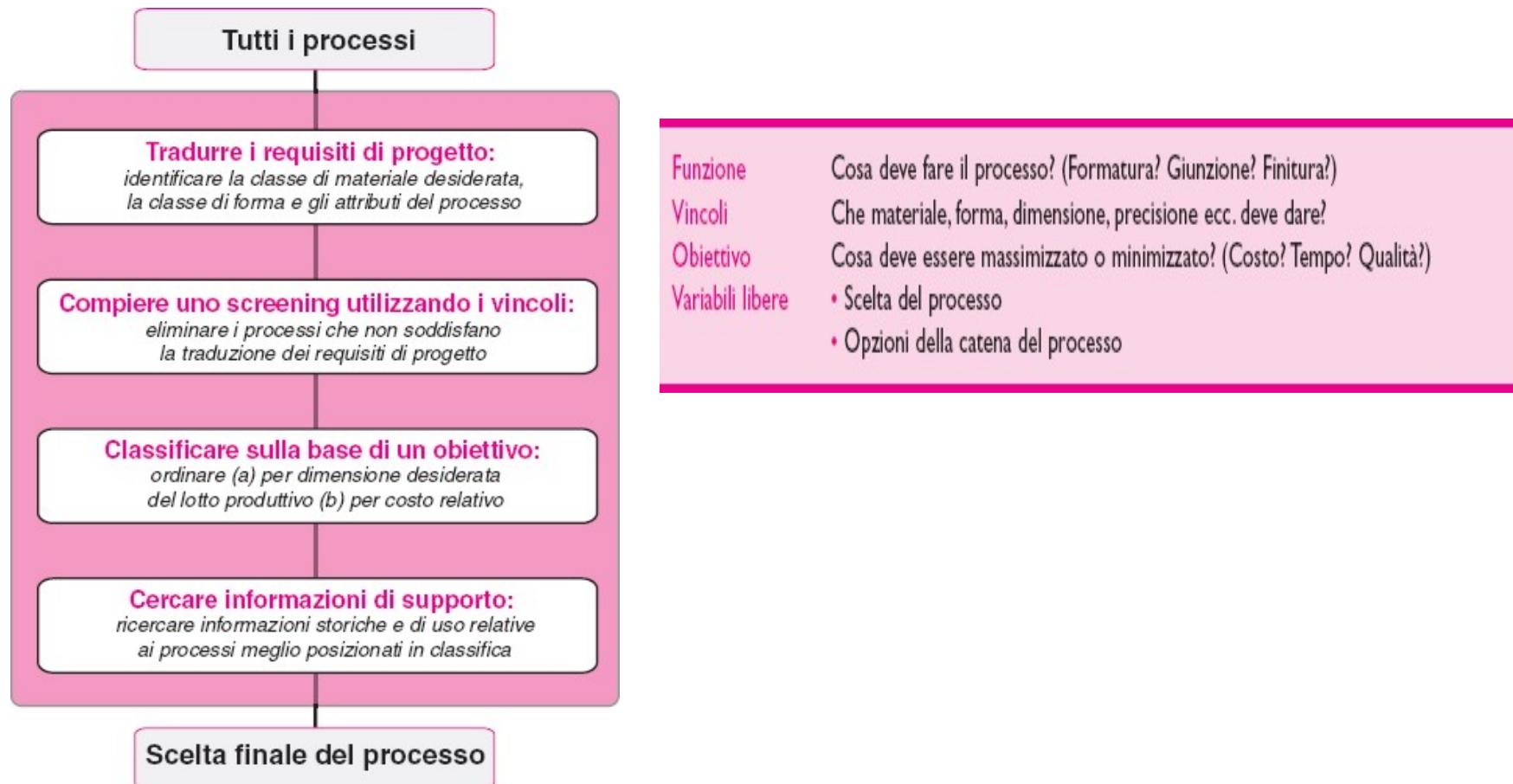
La strategia per la scelta dei processi è analoga a quella per la scelta di materiali. Il punto di partenza è che tutti i processi devono essere considerati come possibili candidati fino a che non si abbia evidenza del contrario, ovvero della loro non applicabilità al caso specifico.

Le fasi della procedura sono le solite: **traduzione, screening, classifica e ricerca di informazioni di supporto.**

Nella traduzione, i requisiti di progetto vengono espressi come vincoli su materiale, forma, dimensione, tolleranza, rugosità e altri parametri inerenti il processo.

I vincoli sono utilizzati per eliminare i processi che non sono in grado di rispettarli, utilizzando diagrammi di selezione del processo (o il loro equivalente informatico). I processi superstiti vengono quindi classificati sulla base di indicatori economici. Infine, i candidati meglio classificati vengono analizzati nel dettaglio, cercando il maggior numero possibile di informazioni di supporto per mettersi in condizione di effettuare la scelta finale

La scelta del processo: traduzione



Matrice di compatibilità processo-materiale

	Metalli ferrosi	Metalli non ferrosi	Ceramici	Vetri	Elastomeri	Termoplastici	Termodurenti	Polymeri espansi	Compositi
Colata in sabbia	●								
Pressocolata	●	●							
Fusione a cera persa	●	●							
Colata a bassa pressione		●							
Forgiatura	●	●							
Estrusione		●							
Stampaggio di lastre	●	●							
Metodi delle polveri	●	●	●						
Elettroerosione	●	●	●						
Lavorazione meccanica convenzionale	●	●	●	●	●	●	●	●	
Stampaggio a iniezione			●	●	●	●	●	●	
Stampaggio per soffiatura			●			●			
Stampaggio per compressione			●		●	●	●	●	
Stampaggio rotazionale				●	●	●	●	●	
Termoformatura				●	●	●	●	●	
Colata di polimero				●	●	●	●	●	
RTM - resin transfer molding					●	●	●	●	
Filament winding									
Metodi di rinforzo nello stampaggio									
Sacco a vuoto									●
<hr/>									
Giunzione									
Adesivi	●	●	●	●	●	●	●	●	
Saldatura, metalli	●	●							
Saldatura, polymeri					●	●	●	●	
connettori e attacchi	●	●	●	●	●	●	●	●	
<hr/>									
Finitura									
Lavorazione di precisione	●	●					●	●	
Levigatura	●	●	●	●					
Lucidatura	●	●	●	●					
Lappatura	●	●	●	●		●	●		

Un determinato processo può essere adatto alla formatura, alla giunzione o alla finitura di alcuni materiali, ma non di altri: la matrice mostra i legami tra il materiale e le classi di processo. In prima analisi è da escludere l'impiego di quei processi che non sono in grado di formare il materiale scelto.



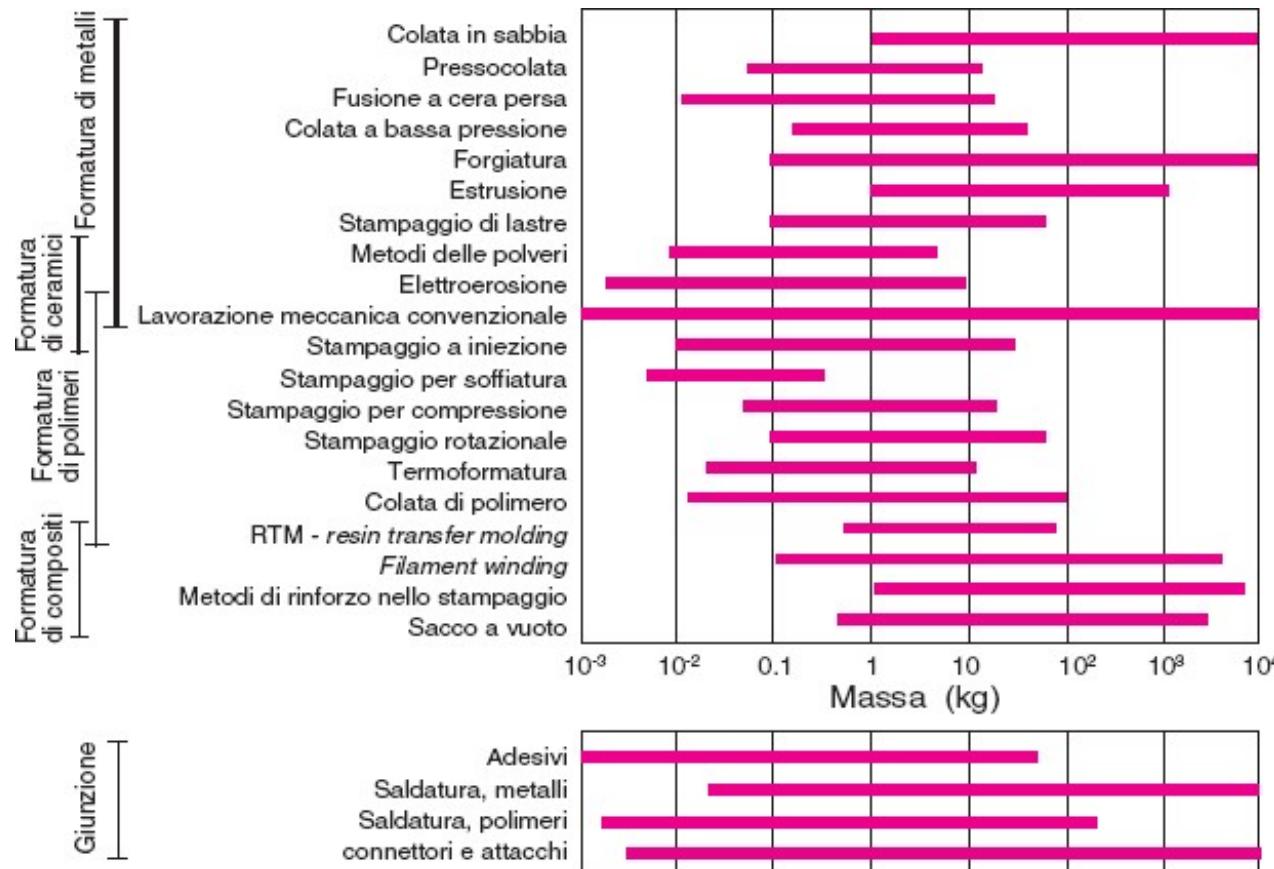
Matrice di compatibilità processo-forma

	Circolare prismatico	Non circolare prismatico	Superficie planare	Superficie curva concava	3D-pieno	3D-cavo
Colata in sabbia	●		●		●	●
Pressocolata	●	●			●	●
Fusione a cera persa	●	●			●	●
Colata a bassa pressione	●	●			●	●
Forgiatura	●	●			●	
Estrusione	●	●				
Stampaggio di lastre	●	●	●	●		
Metodi delle polveri	●	●	●		●	●
Elettroerosione	●	●	●		●	●
Lavorazione meccanica convenzionale	●	●	●	●	●	●
Stampaggio a iniezione	●	●			●	●
Stampaggio per soffiatura						
Stampaggio per compressione			●	●	●	
Stampaggio rotazionale				●		●
Terмоformatura				●		
Colata di polimero	●	●		●	●	●
RTM - resin transfer molding	●	●	●	●	●	●
Filament winding	●	●		●		●
Metodi di rinforzo nello stampaggio			●	●	●	
Sacco a vuoto			●	●		

La forma è l'attributo più difficile da caratterizzare. Molti processi implicano la rotazione o la traslazione di un utensile o del materiale. La matrice correla tra loro processo e forma. Qualora un processo non fosse in grado di realizzare la forma desiderata, si potrebbe combinarlo con un processo secondario, originando una catena di processo in grado di produrre le caratteristiche volute.



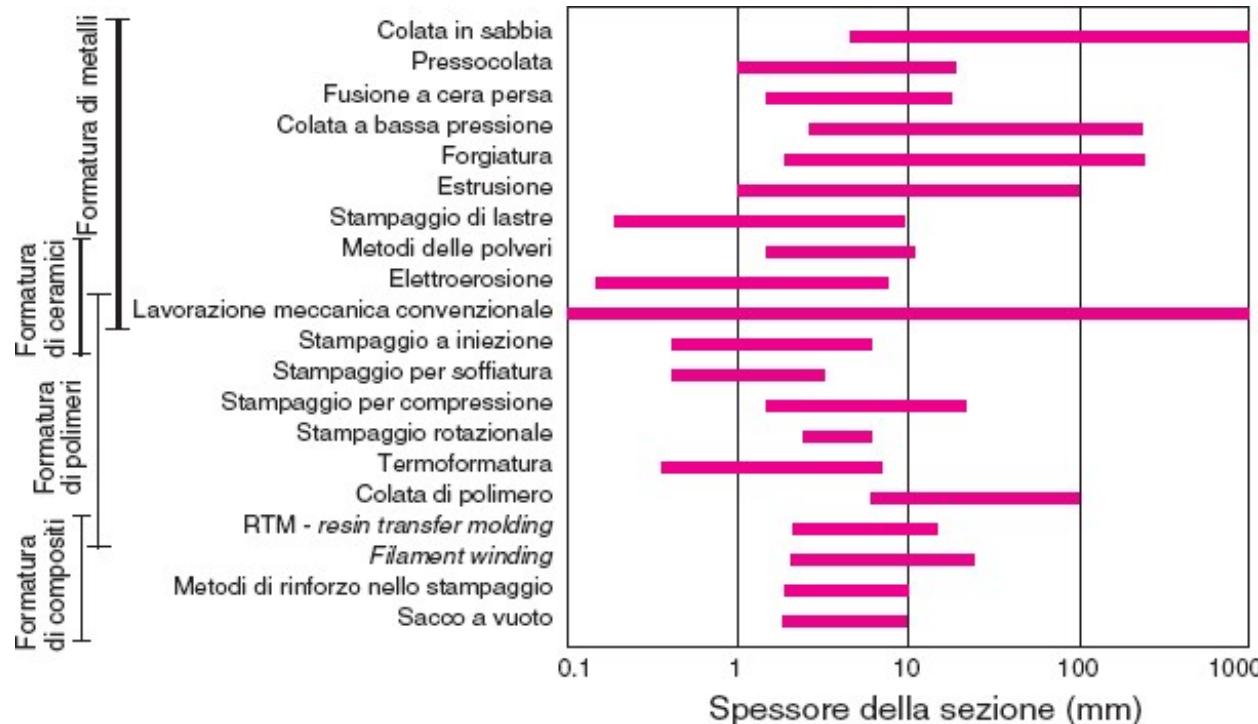
Diagramma di compatibilità processo-massa



Il diagramma a barre mostra, per ogni processo, la massa dei componenti realizzabili. Questi diagrammi sono utilizzati generalmente per i vincoli, in termini di massa del pezzo, spessore della sezione, tolleranza e rugosità superficiale.



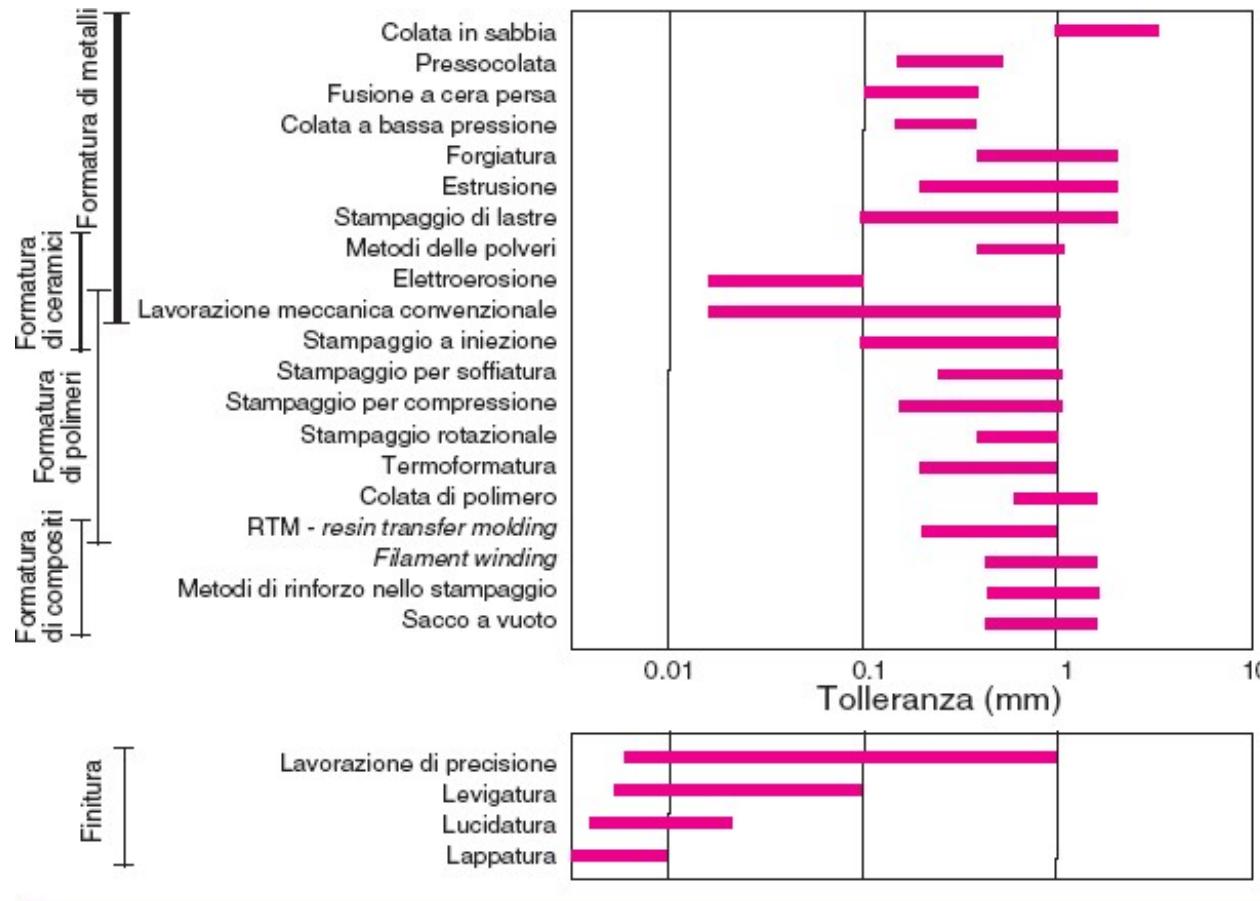
Diagramma di compatibilità processo-spessore sezione



Il diagramma a barre mostra, per ogni processo, la massa dei componenti realizzabili. Questi diagrammi sono utilizzati generalmente per i vincoli, in termini di massa del pezzo, spessore della sezione, tolleranza e rugosità superficiale.



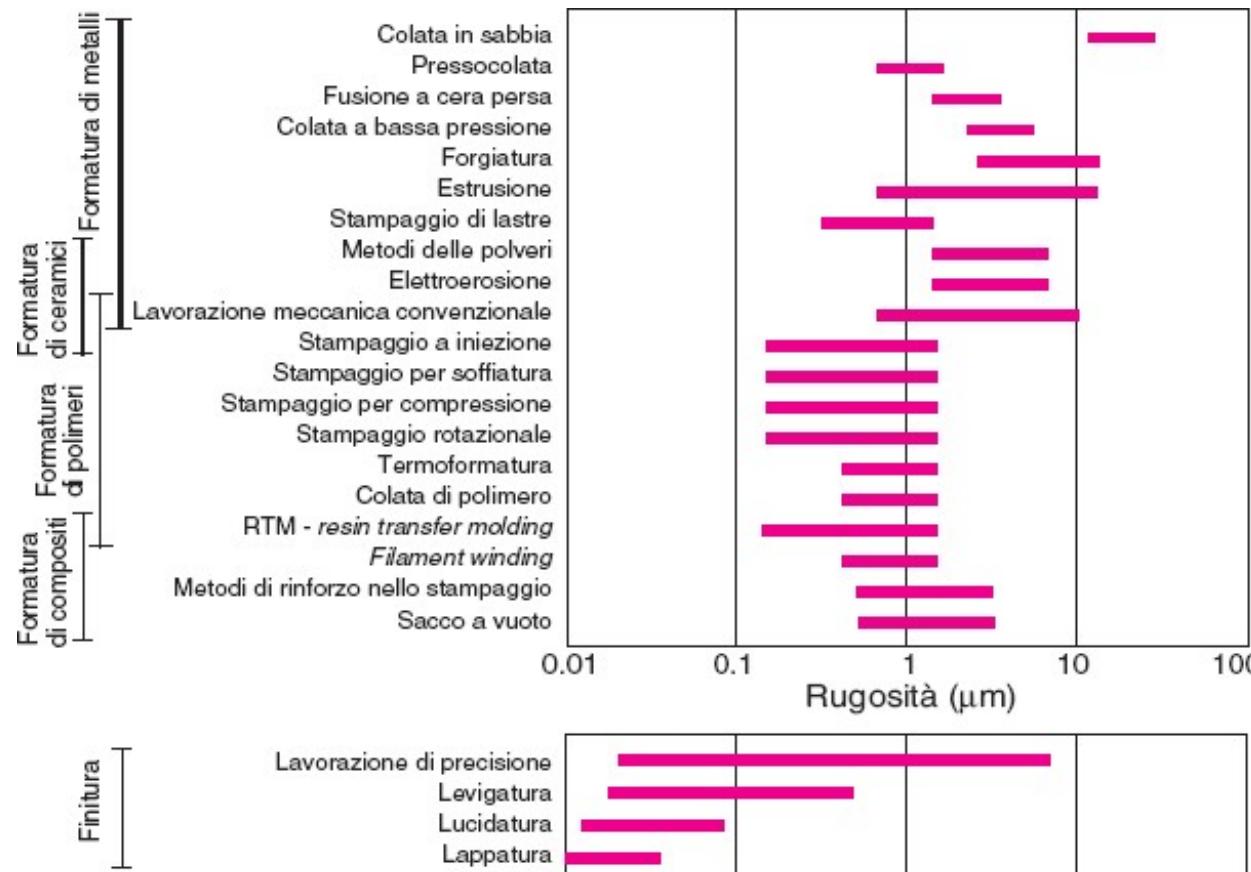
Diagramma di compatibilità processo-tolleranza



Il diagramma a barre mostra, per ogni processo, la massa dei componenti realizzabili. Questi diagrammi sono utilizzati generalmente per i vincoli, in termini di massa del pezzo, spessore della sezione, tolleranza e rugosità superficiale.



Diagramma di compatibilità processo- rugosità



Il diagramma a barre mostra, per ogni processo, la massa dei componenti realizzabili. Questi diagrammi sono utilizzati generalmente per i vincoli, in termini di massa del pezzo, spessore della sezione, tolleranza e rugosità superficiale.



Classifica: il costo...

Solo una parte del costo di un componente è da attribuire al materiale di cui è costituito: il resto è il costo di fabbricazione, cioè della formatura nella forma desiderata e di eventuali giunzione e finitura.

Quattro regole, basate sul buon senso, che il progettista dovrebbe tenere a mente per minimizzare i costi:

Impiegare elementi standard Cercare la semplicità

Rendere le parti facili da assemblare (Design for Assembly) Non richiedere prestazioni più elevate del necessario



Criteri economico di selezione: il lotto produttivo

Per fare la punta ad una matita...

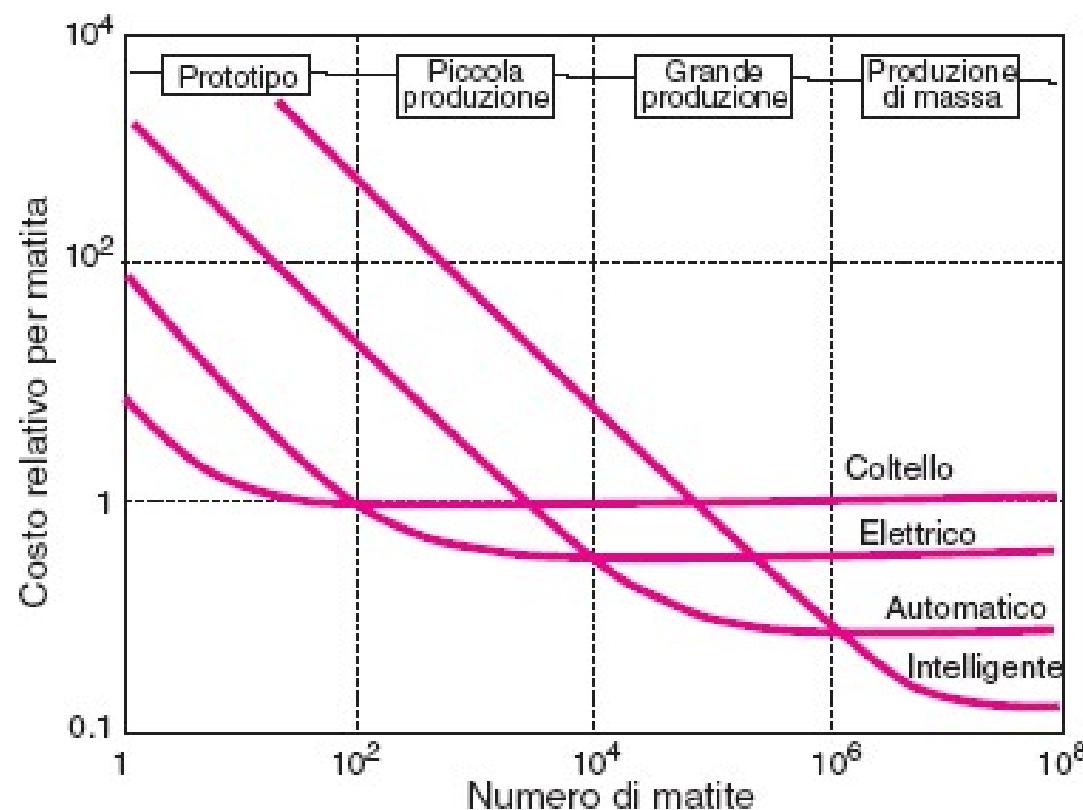
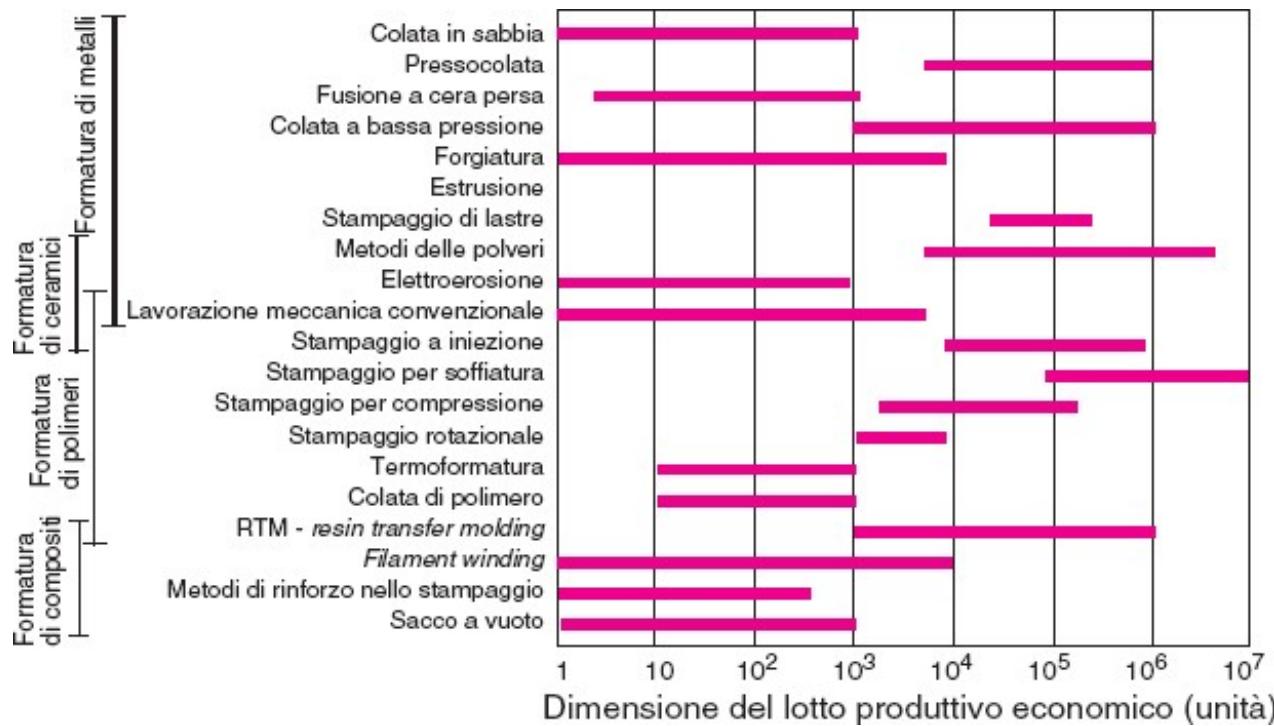


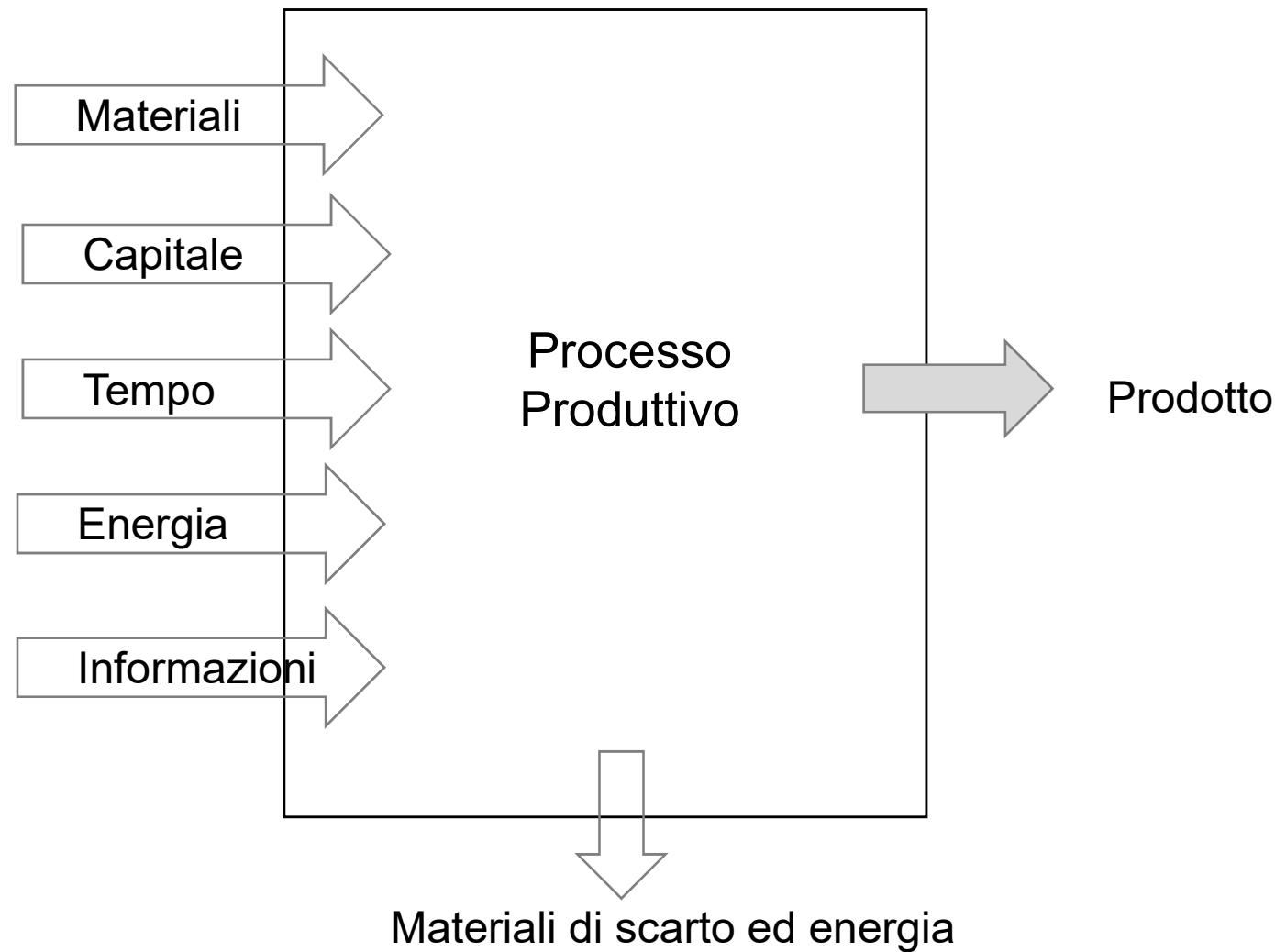
Diagramma di compatibilità processo-dimensione economica del lotto produttivo



Il diagramma a barre mostra, per ogni processo, la dimensione economica del lotto produttivo.



Simulazione numerica del costo



Simulazione numerica del costo

Resource	Symbol	Unit
Materials		
Including consumables	C_m	\$/kg
Capital		
Cost of tooling	C_t	\$
Cost of equipment	C_c	\$
Time		
Overhead rate, including labor, administration, rent, ...	\dot{C}_{oh}	\$/h
Energy		
Cost of energy	C_e	\$/h
Information		
R & D or royalty payments	C_i	\$/year

$$C_1 = \frac{mC_m}{(1-f)}$$

$$C_2 = \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int}\left(\frac{n}{n_t} + 0.51\right) \right\}$$

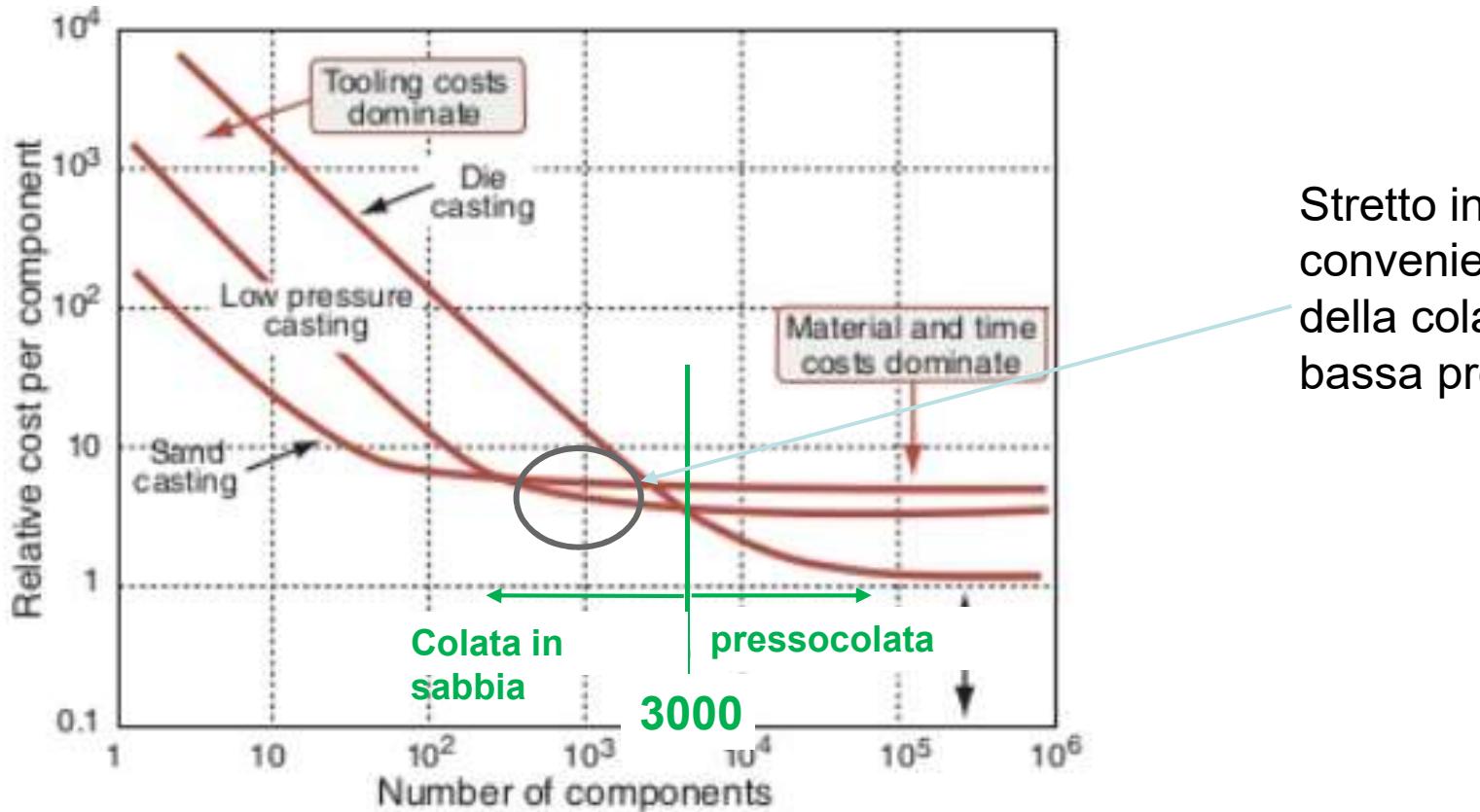
$$C_3 = \frac{1}{\dot{n}} \left(\frac{C_c}{Lt_{wo}} \right)$$

$$C_4 = \frac{\dot{C}_{oh}}{\dot{n}}$$

$$C_S = \frac{mC_m}{(1-f)} + \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int}\left(\frac{n}{n_t} + 0.51\right) \right\} + \frac{1}{\dot{n}} \left(\frac{C_c}{Lt_{wo}} + \dot{C}_{oh} \right)$$



Simulazione numerica del costo



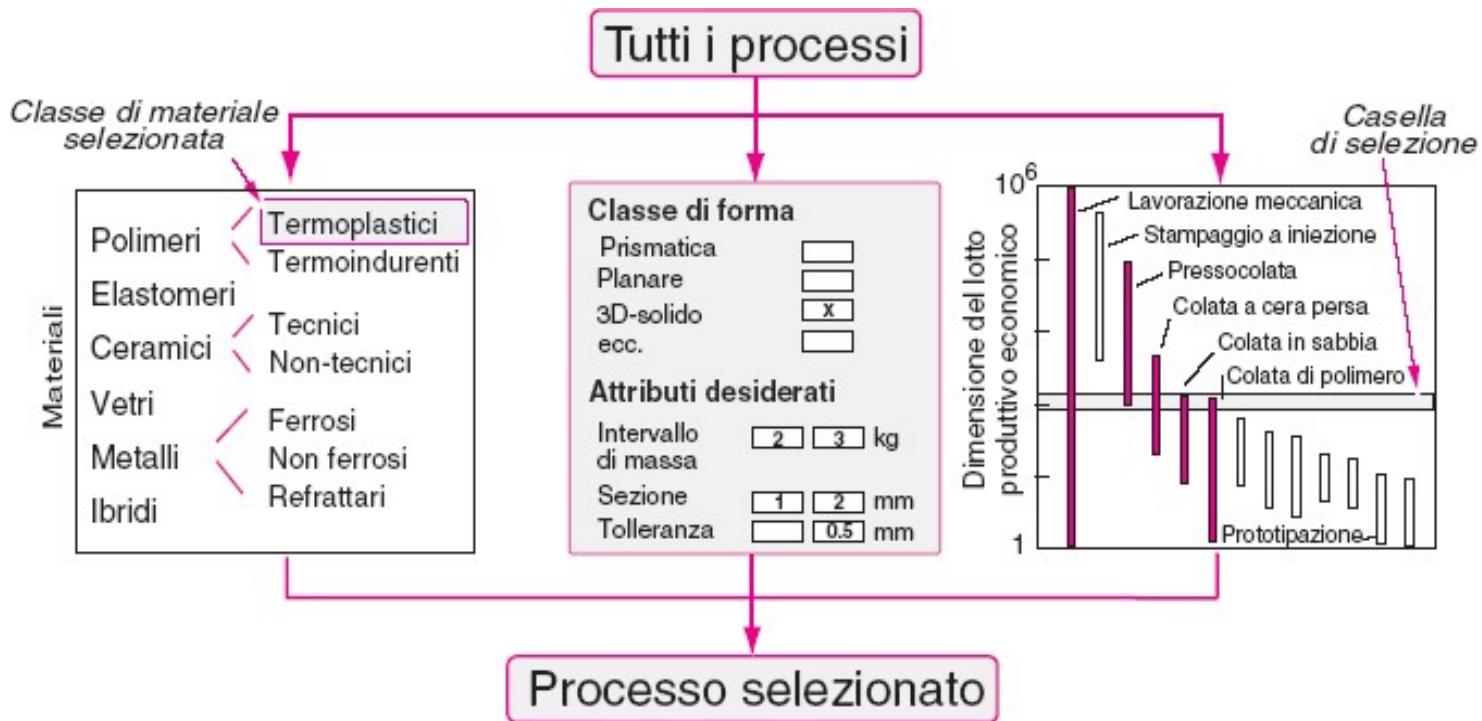
Stretto intervallo
convenienza
della colata in
bassa pressione

Relative cost*	Sand casting	Die casting	Low pressure casting	Comment
Material, $mC_m/(1-f)$	1	1	1	
Basic overhead, C_{oh} (per hour)	10	10	10	Process independent parameters
Capital write-off time, t_{wo} (yrs)	5	5	5	
Load factor	0.5	0.5	0.5	
Dedicated tool cost, C_t	210	16,000	2000	
Capital cost, C_c	800	30,000	8000	Process dependent parameters
Batch rate, \dot{n} (per hour)	3	100	10	
Tool life, n_t (number of units)	200,000	1,000,000	500,000	

* All costs normalized to the material cost.



Riassumendo...



Selezione del processo.

Sono evidenziati tre stadi della procedura.

Il primo impone dei vincoli di materiale,
il secondo dei vincoli di forma e attributi numerici,
il terzo permette di ordinare sulla base della dimensione economica del lotto produttivo.

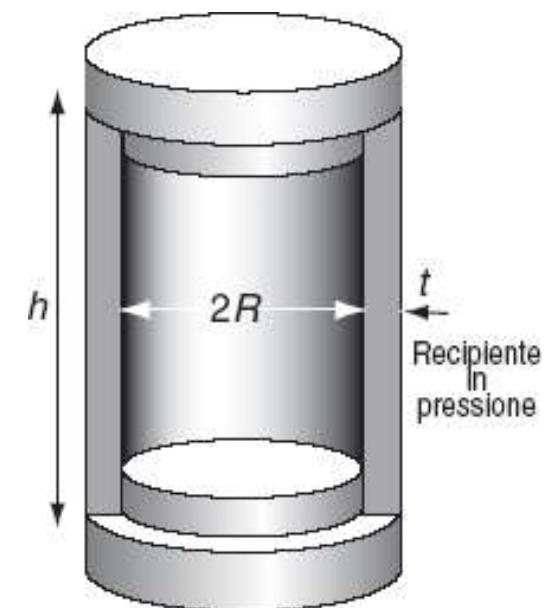


Esempio: recipiente in pressione

Fabbricazione di un recipiente in grado di sopportare le pressioni elevate necessarie nella pressatura isostatica a caldo (HIP). I materiali per recipienti in pressione migliori (si può applicare il processo di selezione del materiale) sono acciai tenaci.

Requisiti di progetto. Il progetto è relativo a un recipiente in pressione cilindrico, di raggio interno $R = 0,3$ m e altezza $h = 2$ m, con coperchi rimovibili. Deve essere in grado di sopportare senza collasso una pressione p di 50 MPa.

Si è deciso di utilizzare un acciaio con resistenza allo snervamento σ_y di 500 MPa. Lo spessore di parete richiesto t si ottiene approssimativamente uguagliando la tensione circonferenziale agente sulla parete, circa pR/t , alla resistenza allo snervamento del materiale del recipiente, σ_y , assumendo un coefficiente di sicurezza S_f pari a 2.



$$t = \frac{2pR}{\sigma_y} = 80 \text{ mm}$$



Esempio: recipiente in pressione

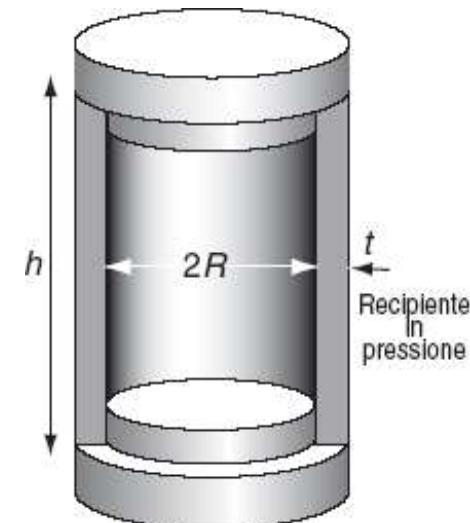
Con queste dimensioni, il raggio esterno R_0 , pertanto, risulta essere 0,38 m. Il volume V di acciaio per il cilindro è circa 0,34 m³.

Sembra un valore piccolo, ma data la densità dell'acciaio, il recipiente pesa 2,7 tonnellate.

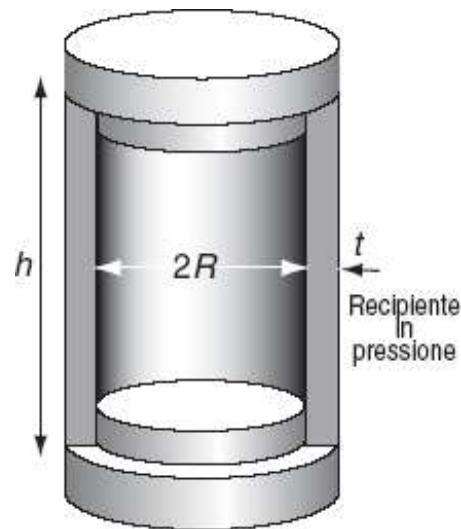
Per rendere più competitiva la fase di progettazione, conviene prevedere la costruzione di recipienti in pressione diversi, considerando variazioni del raggio interno e della pressione di lavoro del recipiente cilindrico di un fattore pari a 2, e ricordando che, definita la pressione, risulta individuato anche il rapporto di forma R/t .

La precisione e la rugosità superficiale del cilindro non rivestono un ruolo importante nella scelta dell'operazione di formatura primaria, visto che, in ogni caso, le basi e le filettature interne dovranno essere lavorate meccanicamente.

La serie considerata è di 10 cilindri. Quali processi si possono utilizzare per produrli?



Esempio: recipiente in pressione



Funzione

Recipiente in pressione

Vincoli

- Materiale: acciaio
- Forma: prismatica circolare
- Massa: 2720 kg
- Sezione minima: 80 mm
- Dimensione del lotto produttivo: 10

Obiettivi

Minimizzare i costi

Variabili libere

- Scelta del processo
- Opzioni per una sequenza di processi



Esempio: recipiente in pressione

	Metalli ferrosi	Metalli non ferrosi	Ceramici	Vetri	Elastomeri	Termoindurenti	Polimeri espansi	Compositi
Colata in sabbia	●	●						
Pressocolata	●	●						
Fusione a cera persa	●	●						
Colata a bassa pressione	●	●						
Forgiatura	●	●						
Estrusione	●	●						
Stampaggio di lastre	●	●						
Metodi delle polveri	●	●	●					
Elettroerosione	●	●	●					
Lavorazione meccanica convenzionale	●	●	●	●	●	●	●	●
Stampaggio a iniezione			●	●	●	●	●	●
Stampaggio per soffiatura			●	●	●	●	●	●
Stampaggio per compressione			●	●	●	●	●	●
Stampaggio rotazionale			●	●	●	●	●	●
Termoformatura			●	●	●	●	●	●
Colata di polimero			●	●	●	●	●	●
RTM - <i>resin transfer molding</i>			●	●	●	●	●	●
<i>Filament winding</i>								●
Metodi di rinforzo nello stampaggio								●
Sacco a vuoto								●
Giunzione								
Adesivi	●	●	●	●	●	●	●	●
Saldatura, metalli	●	●						
Saldatura, polimeri								
connettori e attacchi	●	●	●	●	●	●	●	●
Finitura								
Lavorazione di precisione	●	●				●	●	●
Levigatura	●	●	●	●	●			●
Lucidatura	●	●	●	●	●			●
Lappatura	●	●	●	●	●			●

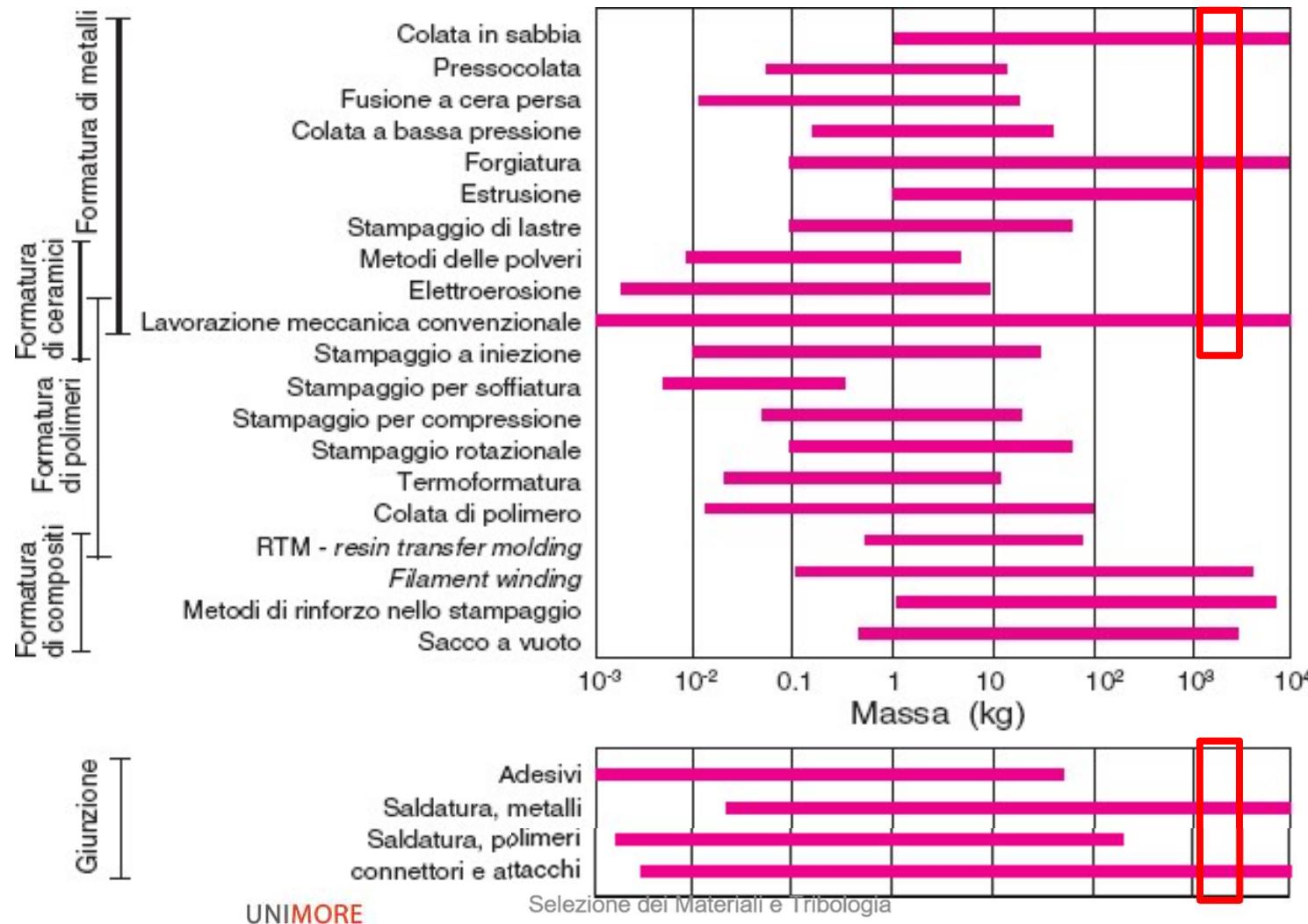


Esempio: recipiente in pressione

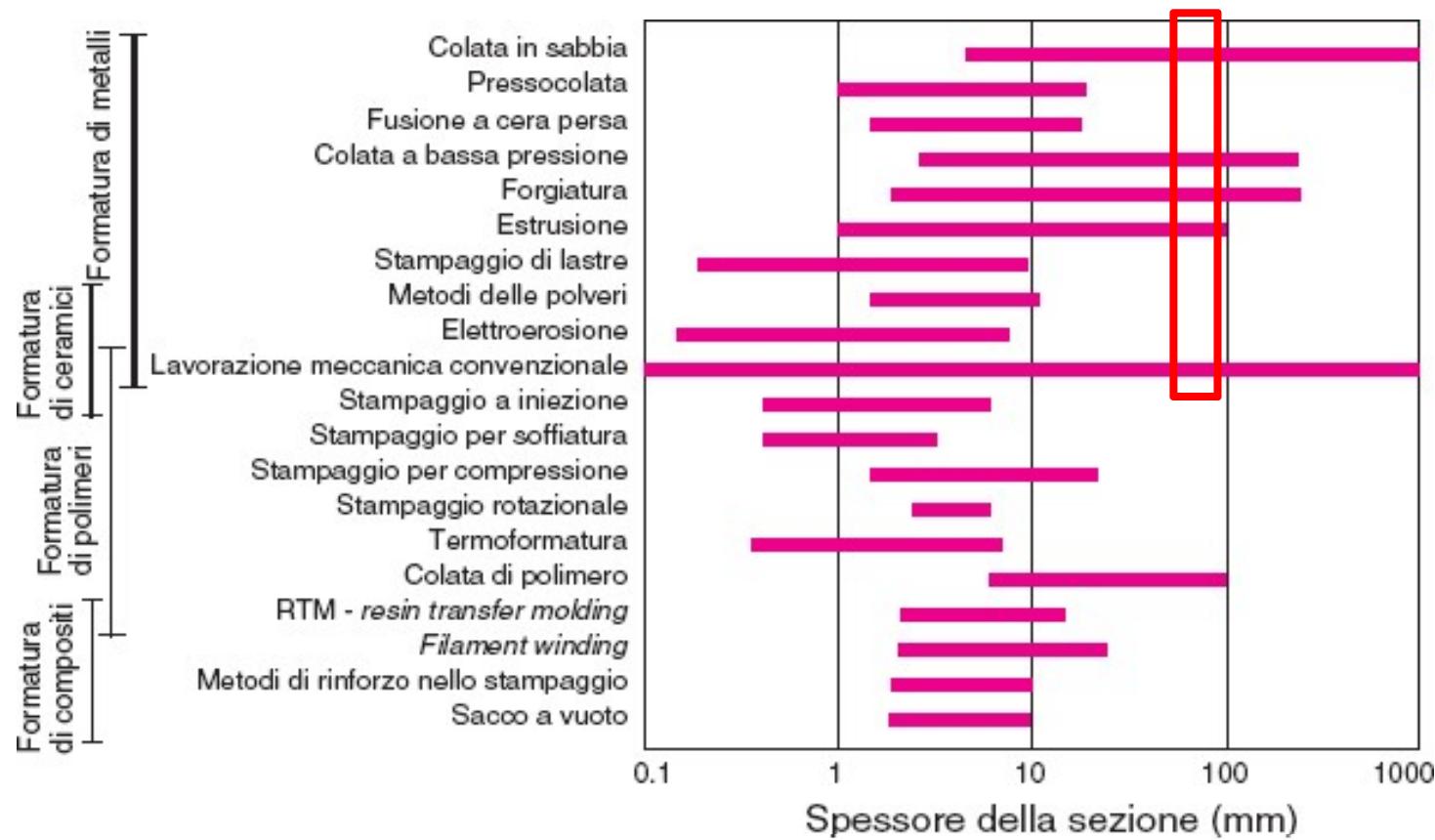
	Circolare prismatico	Non circolare prismatico	Superficie planare	Superficie curva concava	3D-pieno	3D-cavo
Colata in sabbia	●	●			●	●
Pressocolata	●	●			●	●
Fusione a cera persa	●	●			●	●
Colata a bassa pressione	●	●			●	●
Forgiatura	●	●			●	
Estrusione	●	●			●	
Stampaggio di lastre	●	●	●	●		
Metodi delle polveri	●	●	●		●	●
Elettroerosione	●	●	●		●	●
Lavorazione meccanica convenzionale	●	●	●	●	●	●
Stampaggio a iniezione	●	●			●	●
Stampaggio per soffiatura						
Stampaggio per compressione			●	●	●	
Stampaggio rotazionale				●		●
Termoformatura				●		
Colata di polimero	●	●			●	●
RTM - resin transfer molding	●	●	●	●	●	●
Filament winding	●	●		●		●
Metodi di rinforzo nello stampaggio			●	●	●	
Sacco a vuoto			●	●		



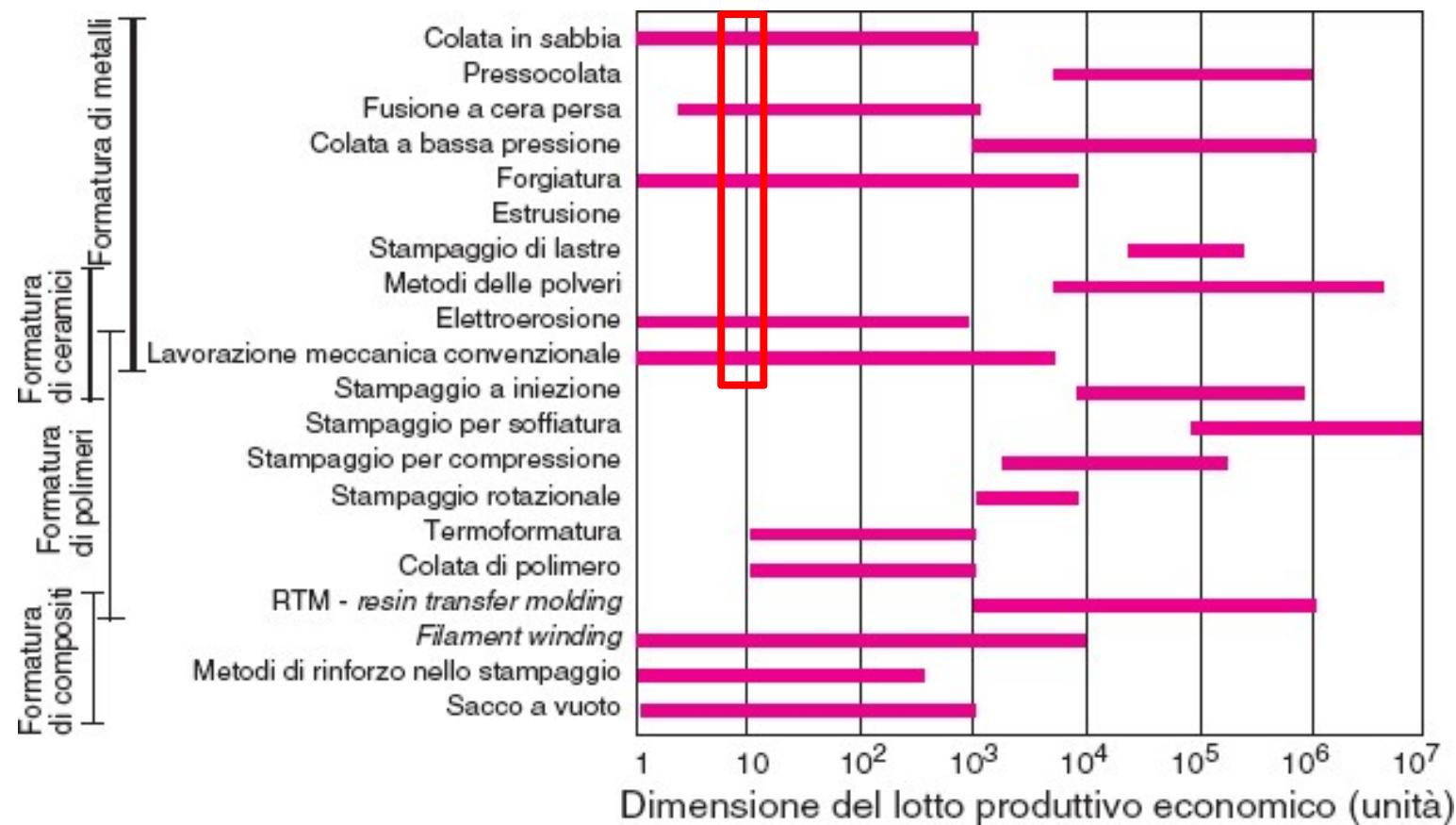
Esempio: recipiente in pressione



Esempio: recipiente in pressione



Esempio: recipiente in pressione



Esempio: recipiente in pressione

Processo	Commenti
Lavorazione meccanica	Lavorazione da pieno (billetta laminata o forgiata) Molto materiale scartato, ma prodotto affidabile Indicato per produzioni di esemplari singoli
Forgiatura a caldo	Acciaio forgiato in tubo a pareti spesse, e finito per lavorazione all'utensile di facce, porte ecc. Strada da preferire per l'economicità dell'impiego del materiale (poco scarto)
Colata	Fondere e colare un tubo cilindrico, da finire mediante lavorazione all'utensile delle basi e delle porte. Problemi di difetti di colata
Fabbricazione e giunzione	Saldatura di piastre preformate. Non adatto per HIP; utile solo per recipienti molto grandi (ad esempio per recipienti in pressione per il settore nucleare)



Esempio: recipiente in pressione

In questo caso i requisiti discriminanti sono la massa e la dimensione del lotto produttivo, i quali restringono la scelta a quattro possibili candidati: il recipiente può essere ottenuto per :

**lavorazione meccanica dal pieno,
forgiatura,
colata
tramite saldatura di lastre preformate.**

Tolleranza e rugosità non sono importanti, se non sulle basi e sulle filettature (dove i coperchi devono combaciare perfettamente), e su ogni eventuale porta sul mantello: per queste parti è richiesta una precisione di $\pm 0,1$ mm. In tal caso, la soluzione consiste nell'aggiungere un ulteriore operazione di lavorazione meccanica o rettifica, per ottenere il risultato voluto.



Esempio: recipiente in pressione

NOTA – informazioni di supporto:

Non è impossibile produrre un recipiente in pressione per colata, ma esso verrebbe guardato con sospetto da un esperto del settore, a causa della potenziale presenza di difetti;

la sicurezza imporrebbe allora di effettuare prove tecnologiche e complesse indagini non distruttive.

Il solo modo per produrre un recipiente in pressione di grandi dimensioni è per saldatura, si incontra però di nuovo lo stesso problema: le saldature sono sedi di difetti e possono essere accettate solo dopo approfondite ispezioni.

La forgiatura, o la lavorazione meccanica di una billetta precedentemente forgiata, sono le scelte migliori, perché le grandi deformazioni indotte per compressione riparano i difetti e allineano gli ossidi e le altre inclusioni in configurazioni meno dannose.

Queste sono solo semplici indicazioni: per il resto ci si dovrà rivolgere a un esperto.



