

INGEGNERIA MECCANICA

CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

MATERIALI COMPOSITI

INGEGNERIA MECCANICA - CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

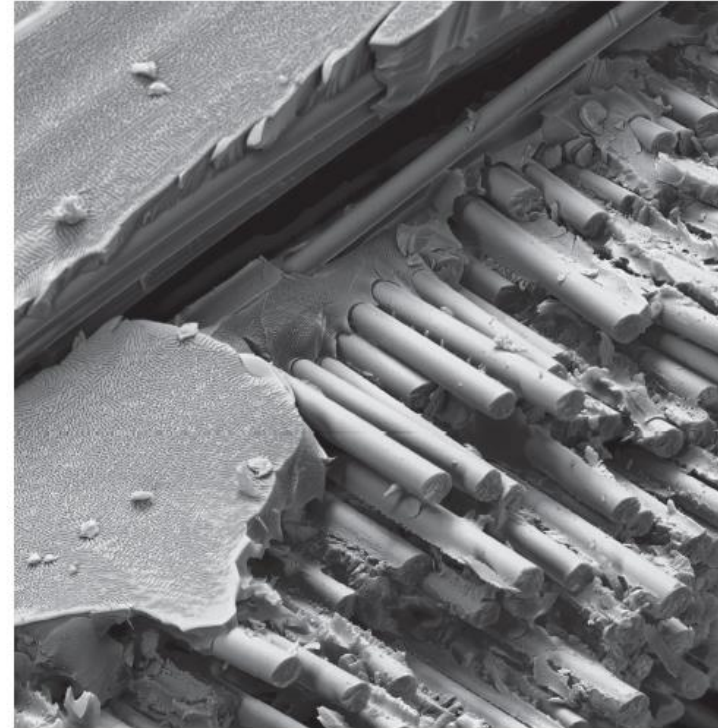
Introduzione

- I materiali compositi possiedono una combinazione di proprietà che li rendono attraenti per molti settori, tra cui quello aerospaziale, automobilistico e dei produttori di attrezzature sportive.
- In generale, i materiali compositi hanno un elevato rapporto resistenza-peso e rigidità-peso (migliore delle leghe metalliche)
- Alcuni possono tollerare temperature molto elevate pur imponendo la loro forza e il loro stato
- In alcuni casi, la rigidità e la resistenza possono essere controllate per migliorare le prestazioni in determinate direzioni
- Molti materiali compositi hanno un'elevata resistenza alla corrosione



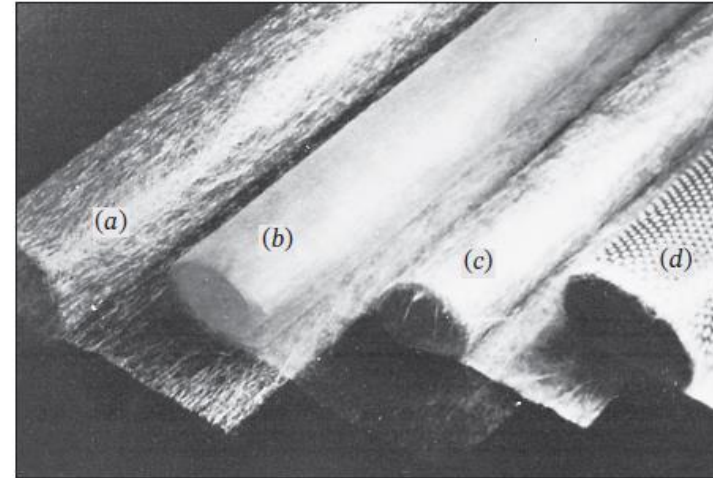
Definizione di materiale composito

- È difficile dare una definizione accurata di composito. In questo libro:
- Un materiale composito è un sistema di materiali, una miscela o una combinazione di due o più micro- o macro-costituenti che differenziano tra loro nella forma e nella composizione chimica, non formano una soluzione e sono separati da una chiara interfaccia
- Le proprietà dei materiali compositi possono essere superiori a quelle dei singoli componenti
- Esempi: plastiche rinforzate con fibre, calcestruzzo, asfalto, legno etc



Classificazione dei Materiali Compositi

- Un materiale composito è normalmente costituito da una fase **matrice** e da una fase di **rinforzo**. Può essere classificato in molti modi.
- I materiali di rinforzo potrebbero essere fibre, particolato o nano inclusioni che producono rispettivamente rinforzati con fibre, rinforzati con particelle o nanocompositi
- La **matrice** che ospita il rinforzo può essere costituita da materiali polimerici, metalli o ceramici che producono compositi a matrice polimerica, metallica o ceramica
- In tutti i casi, la forza e la rigidità derivano dalla fase di **rinforzo**
- La matrice serve per alloggiare e proteggere la fase di rinforzo oltre a trasferire il carico a tutti i tipi di rinforzo



Varie
fibre di
vetro

Vantaggi e Svantaggi

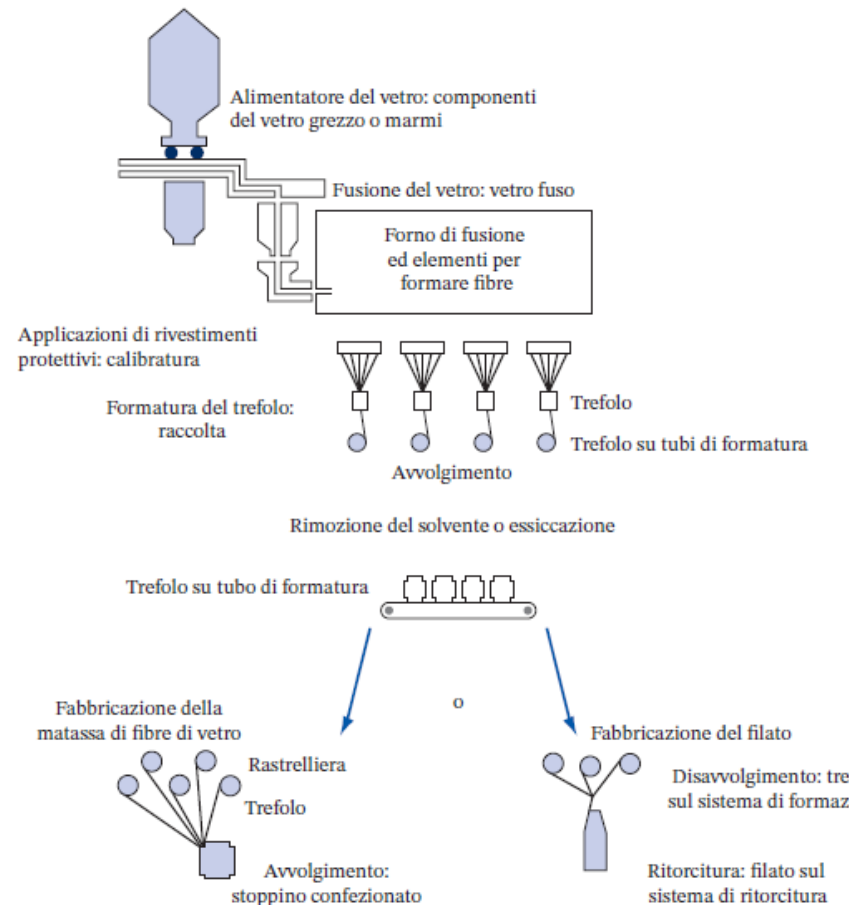
- Vantaggi:
 - Peso leggero dovuto principalmente alla bassa densità della matrice
 - Elevata resistenza e rigidità grazie alle proprietà della fase di rinforzo
 - Alto modulo specifico (E/ρ) e forza specifica (σ_{ut}/ρ).
 - Anisotropia controllata dovuta alle fibre di rinforzo.
- Svantaggi:
 - Bassa duttilità a causa della matrice fragile
 - Bassa resistenza ai danni da impatto a causa della matrice fragile

Fibre di Vetro per Rinforzare Resine Polimeriche

- I materiali compositi a matrice polimerica rinforzata con fibre di vetro hanno un elevato rapporto resistenza meccanica-peso, buona stabilità dimensionale, buona resistenza alla temperatura e alla corrosione e basso costo
 - **Vetro E (elettrico):** 52-56% SiO₂, + 12-16% Al₂O₃, 16-25% CaO + 8-13% B₂O₃
 - ❖ resistenza meccanica a trazione = 3.44 GPa, E = 72.3 Gpa
 - **Vetro S (ad alta resistenza):** usato per applicazioni militari e aerospaziali
 - 65% SiO₂ + 25% Al₂O₃ + 10% MgO
 - ❖ resistenza meccanica a trazione = 4.48 GPa, E = 85.4 GPa

Produzione delle Fibre di Vetro

- Prodotte per stiratura di monofilamenti in un forno e per assemblaggio per formare un trefolo
- I trefoli sono tenuti insieme da un legante resinoso
- Proprietà: la densità e la resistenza meccanica sono inferiori a quelle delle fibre di carbonio e aramidiche
- Maggiore allungamento
- Basso costo e quindi comunemente usate



Fibre di Carbonio per Plastiche Rinforzate

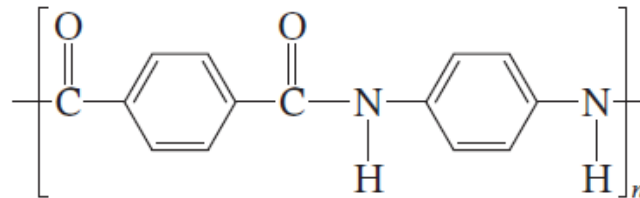
- Basso peso, elevata resistenza meccanica e alta rigidezza
- Diametro: 7-10 micrometri
- Prodotte da poliacrilonitrile (PAN) e pece
- Stadi della produzione:
 - **Stabilizzazione**: le fibre di PAN sono stirate ed ossidate in aria a circa 200°C
 - **Carbonizzazione**: le fibre di carbonio stabilizzate sono riscaldate in atmosfera inerte a 1000-1500°C portando alla eliminazione di O,H e N aumentando la resistenza a trazione
 - **Grafitizzazione**: condotta a 1800°C, aumenta il modulo di elasticità a spese di una resistenza a trazione elevata
- Resistenza a trazione = 3.1-4.45 GPa, E = 193-241 GPa, densità = 1.7-2.1 g/cc

fascio di filamenti continui (*tow*) composto da circa 6000 fibre di carbonio.



Fibre Aramidiche per il Rinforzo di Materie Plastiche

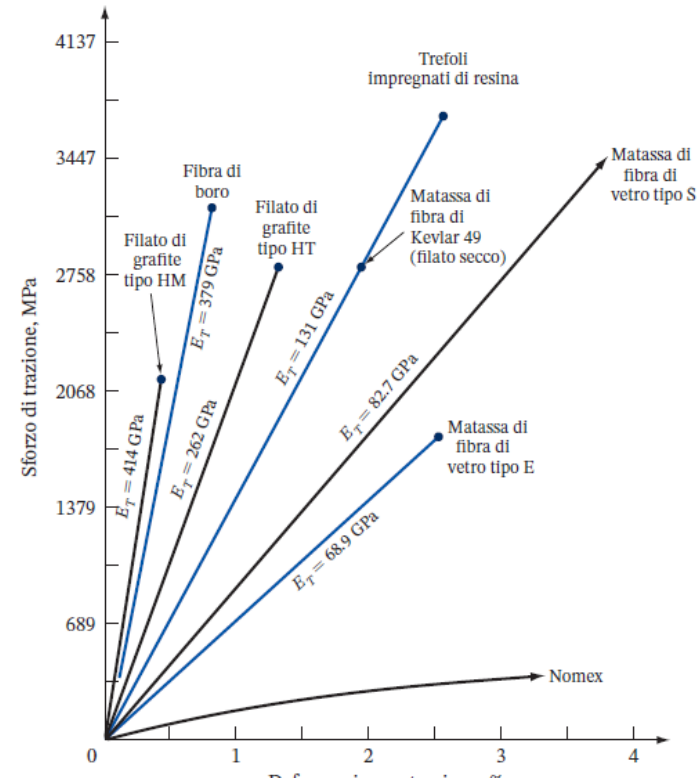
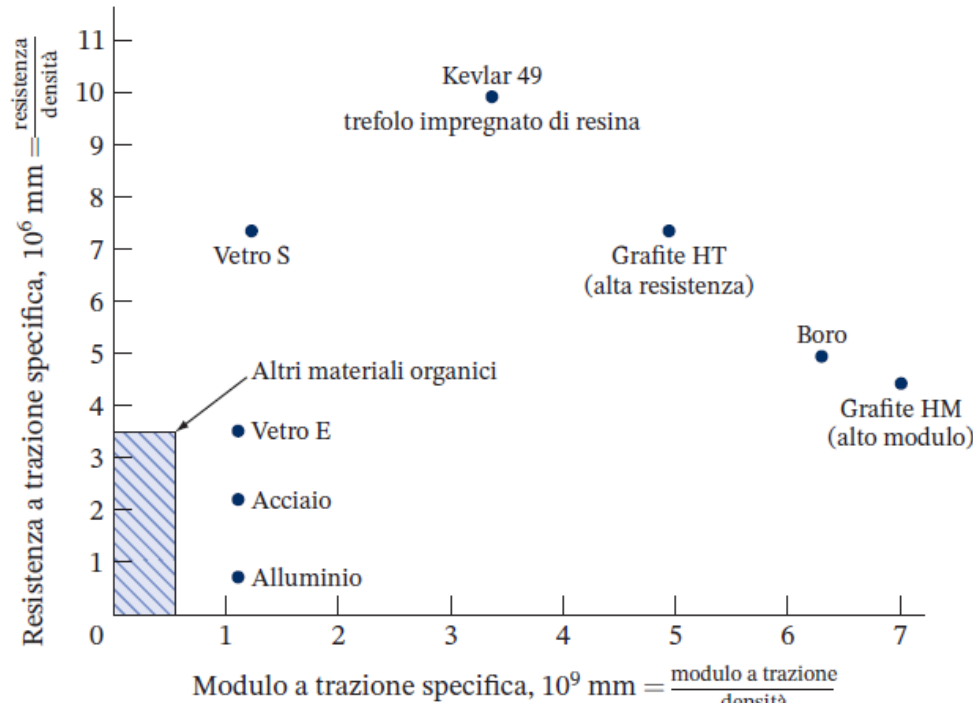
- **Fibre Aramidiche** = fibre di poliammide aromatica
- Il nome commerciale è *Kevlar*
 - Kevlar 29: bassa densità, alta resistenza meccanica, utilizzata per funi e cavi
 - Kevlar 49: bassa densità, alta resistenza meccanica ed elevato modulo, usata per applicazioni aerospaziali e automobilistiche
- Il legame idrogeno tiene insieme le fibre
- Usate quando è richiesta resistenza a fatica, alta resistenza meccanica e basso peso



Proprietà	Vetro E	Carbonio HT	Aramidica (Kevlar 49)
Resistenza a trazione, MPa	3100	3450	3600
Modulo di elasticità a trazione, GPa	76	228	131
Allungamento a rottura, %	4.5	1.6	2.8
Densità, g/cm ³	2.54	1.8	1.44

Confronto tra le Proprietà Meccaniche

- Le fibre di carbonio forniscono la migliore combinazione tra le proprietà
- Grazie alle proprietà favorevoli, i compositi rinforzati con fibre di carbonio e aramidiche hanno sostituito l'acciaio e l'alluminio in applicazioni aerospaziali



Materiali per Matrici

- Le resine poliesteri e le resine epossidiche sono due fra i più importanti materiali per matrici
- **Resine poliesteri**: costano meno delle resine epossidiche
 - Applicazioni: scafi per barche, applicazioni per autoveicoli e aeromobili
- **Resine epossidiche**: buona resistenza meccanica, minore ritiro
 - Comunemente utilizzate come matrici per compositi con fibre di carbonio e aramidiche

	Poliesteri	Epossidica
Resistenza a trazione, MPa	40-90	55-130
Modulo di elasticità a trazione, GPa	2.0-4.4	2.8-4.2
Carico di snervamento a flessione, MPa	60-160	125
Resistenza all'impatto (prova Izod con barra intagliata), J/m	10.6-21.2	5.3-53
Densità, g/cm ³	1.10-1.46	1.2-1.3

Materiali Compositi Polimerici Rinforzati con Fibre

- Resine poliesteri rinforzate con fibre di vetro:
 - maggiore la % in peso di vetro, maggiore è la resistenza meccanica della resina rinforzata
 - l'allineamento non parallelo delle fibre di vetro riduce la resistenza meccanica
- Resine epossidiche rinforzate con fibre di carbonio:
 - le fibre di carbonio contribuiscono alla rigidità e resistenza meccanica mentre la matrice epossidica contribuisce alla resistenza all'urto
 - sono utilizzate anche poliimmidi, polifenilensolfuri
 - eccezionali proprietà a fatica
 - il materiale epossidico con fibre di carbonio viene ottenuto per stratificazione per ottenere differenti caratteristiche di resistenza meccanica

Proprietà di Materie Plastiche Rinforzate con Fibre

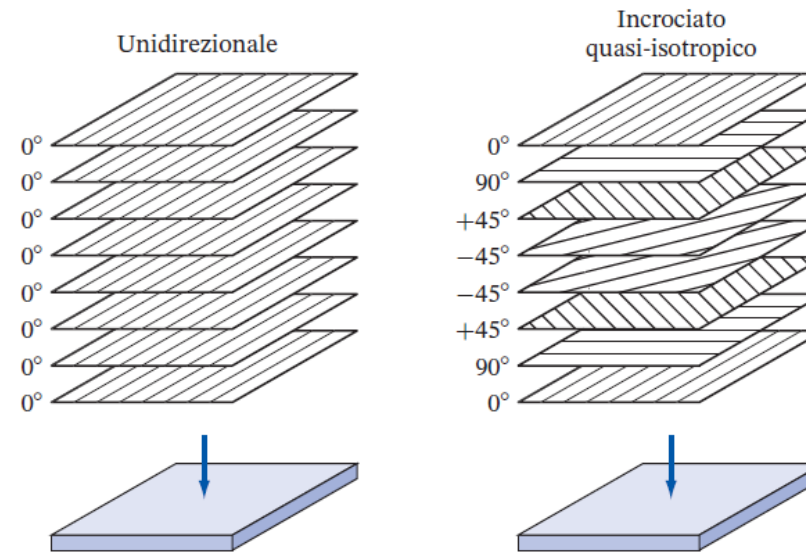
	Tessuto intrecciato	Matassa spezzettata	Composito in foglio da stampaggio
Resistenza a trazione, MPa	206-344	103-206	55-138
Modulo di elasticità a trazione, GPa	103-310	55-138	
Resistenza all'impatto (prova Izod con barra intagliata), J/m	267-1600	107-1070	374-1175
Densità, g/cm ³	1.5-2.1	1.35-2.30	1.65-2.0

Proprietà	Longitudinale, 0°	Trasversale, 90°
Resistenza a trazione, GPa	1860	65
Modulo di elasticità a trazione, MPa	145	9.4
Allungamento a rottura a trazione, %	1.2	0.70

Compositi Laminati

Uno strato unidirezionale di un polimero rinforzato con fibre è chiamato lamina. Una lamina è forte e rigida nella direzione della fibra ma non così nella direzione trasversale (vedi tabella). Vari strati in direzioni diverse vengono impilati per formare un laminato. Un laminato è forte e rigido in tutte le direzioni.

Laminazione

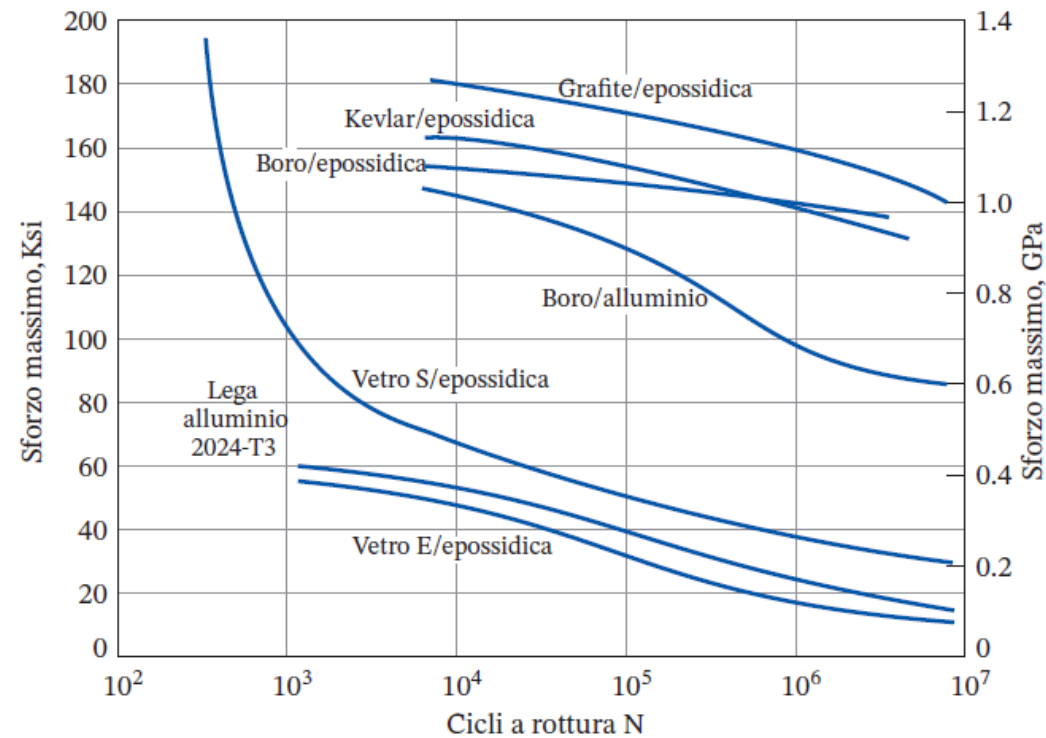


Proprietà	Longitudinale, 0°	Trasversale, 90°
Resistenza a trazione, GPa	1860	65
Modulo di elasticità a trazione, MPa	145	9.4
Allungamento a rottura a trazione, %	1.2	0.70

Fonte: Hercules, Inc.

Compositi Laminati

I compositi carbonio-resina epossidica unidirezionali hanno eccellenti proprietà a fatica:



In figura, la vita a fatica di vari compositi confrontata con quella della lega di alluminio 2024-T3:

Equazione del Modulo Elastico di un Composito Laminato

- Condizione di isodeformazione: lo sforzo agente sul composito provoca una deformazione uniforme su tutti gli strati del composito

$$P_c = P_f + P_m$$

$$\sigma = P/A$$

P_c = carico sul composito
 P_f = carico sulle fibre
 P_m = carico sulla matrice

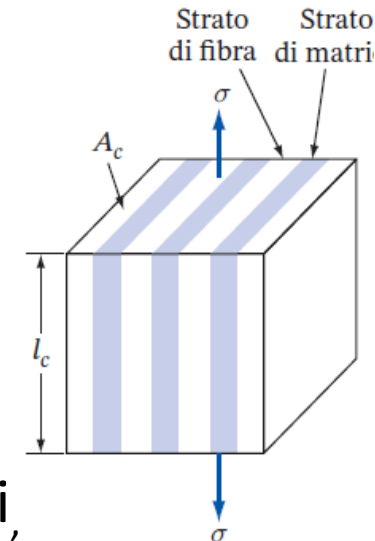
$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

Dato che le lunghezze degli strati sono uguali, $\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$ dove V_c , V_f e V_m sono frazioni di

volume ($V_c = 1$)

Poiché le deformazioni $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$:

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_f V_f}{\epsilon_f} + \frac{\sigma_m V_m}{\epsilon_m}$$



Carichi sulle Regioni delle Fibre e della Matrice



$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

Regola delle miscele di composti binari

- Poiché $P = \sigma A$ e $\sigma = E\varepsilon$

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{E_f \varepsilon_f A_f}{E_m \varepsilon_m A_m} = \frac{E_f A_f}{E_m A_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$$

Anche, $P_c = P_f + P_m$

- Da queste due equazioni, il carico sulle regioni delle fibre e matrice può essere determinato se sono noti i valori di E_f , E_m , V_f , V_m e P_c

Condizioni di Isosforzo

- Lo sforzo sulla struttura composita origina una uguale condizione di sforzo su tutti gli strati

$$\sigma_c = \sigma_f + \sigma_m \varepsilon_c$$

$$= \varepsilon_f + \varepsilon_m$$

Assumendo nessuna variazione di area e assumendo unitaria la lunghezza del composito

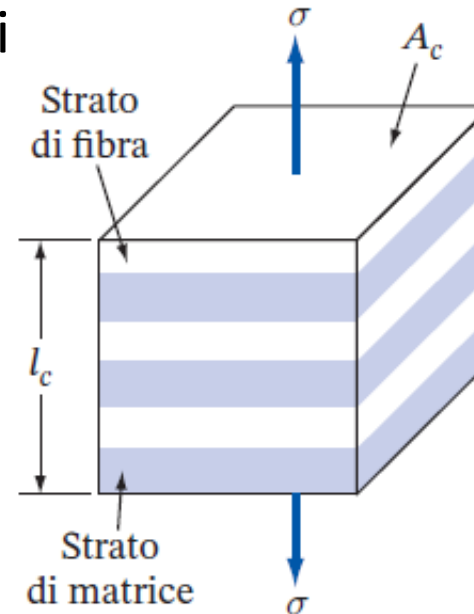
$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m$$

ma

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma}{E_c}, \varepsilon_f = \frac{\sigma}{E_f}, \varepsilon_m = \frac{\sigma}{E_m}$$

quindi

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} + \frac{\sigma_m}{E_m}$$



Modulo Elastico in Condizioni di Isosforzo

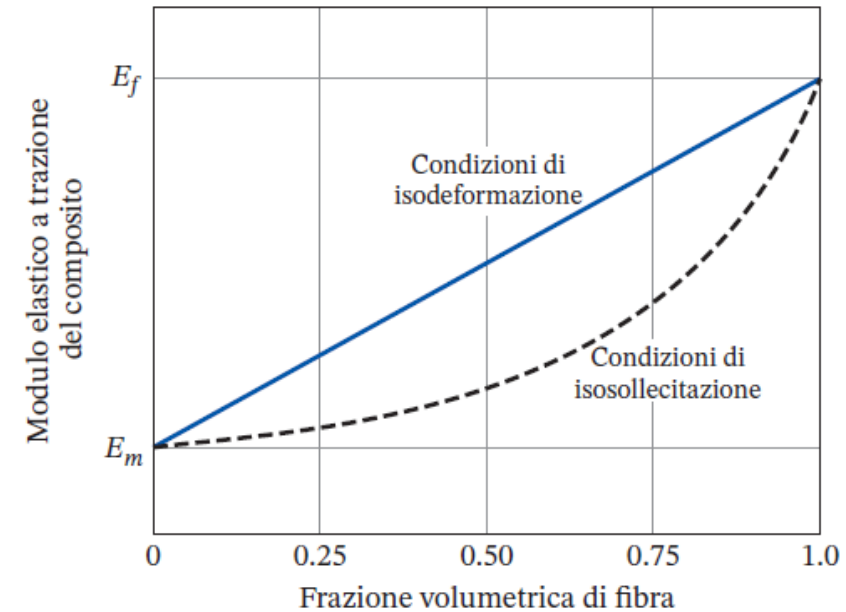
- Sappiamo che
$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma V_f}{E_f} + \frac{\sigma V_m}{E_m}$$

- Dividendo per σ

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f E_m}{E_f E_m} + \frac{V_m E_f}{E_m E_f}$$

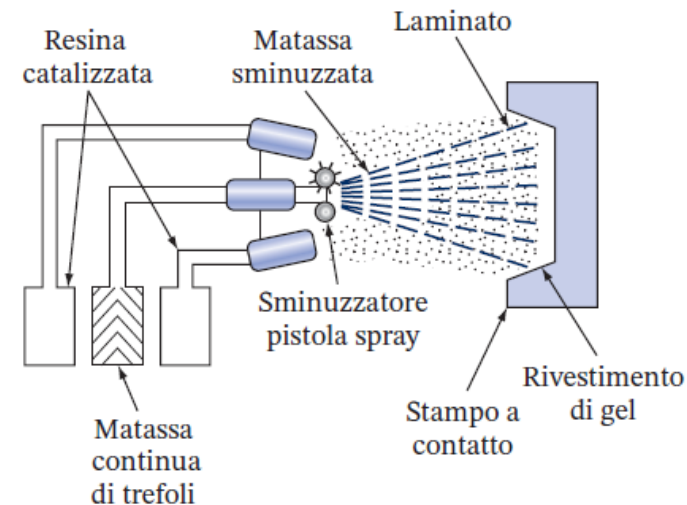
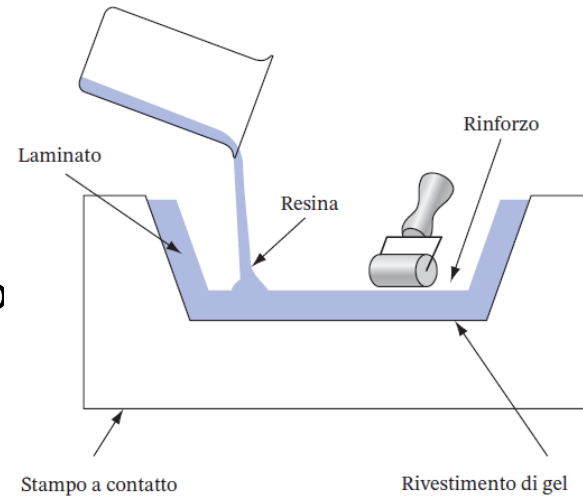
$$E_c = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f}$$



Si ottengono maggiori valori di modulo carico in condizioni di isodeformazione a parità di volume di fibre

Processi a Stampo Aperto per Materie Plastiche Rinforzate con Fibre

- Processo manuale di laminazione:
 - viene applicata una mano di gel nello stampo aperto
 - le fibre di vetro del rinforzo sono poste nello stampo
 - La resina di base mescolata con catalizzatori viene applicata per colata con pennello o a spruzzo
- Processo a spruzzo: un filo continuo attorcigliato viene posto in una pistola che taglia e spruzza simultaneamente le fibre tritate e una resina catalizzata depositandole nello stampo



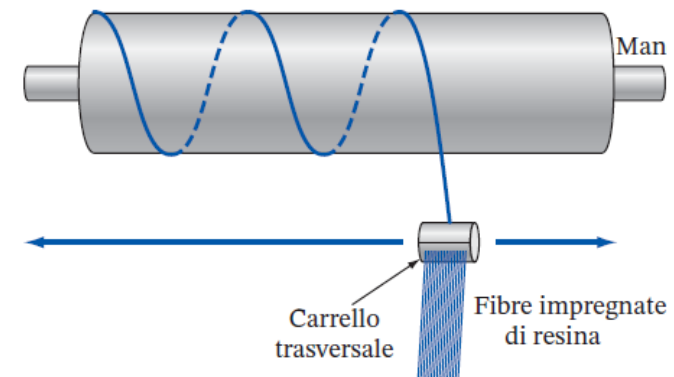
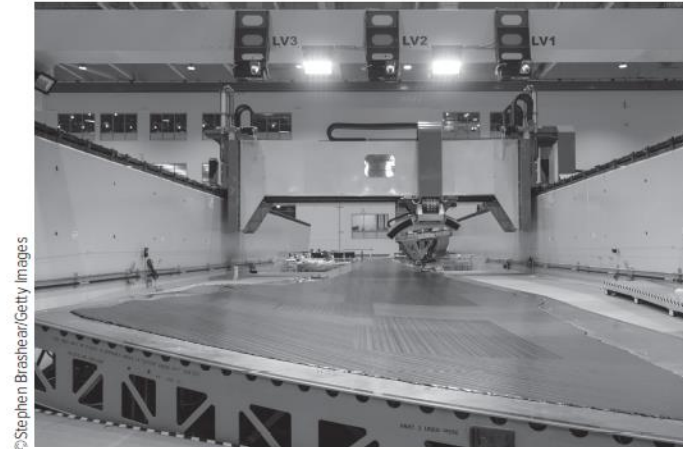
Sacco a Vuoto-Autoclave e per Avvolgimento di Filo

- **Processo sacco a vuoto - autoclave:**

- Viene posto su un banco un foglio lungo e sottile di materiale epossidico – fibre di carbonio
- Il foglio è tagliato e viene preparato un laminato
- Il laminato viene posto in un sacco a vuoto per rimuovere l'aria intrappolata e trattato per indurirlo in autoclave

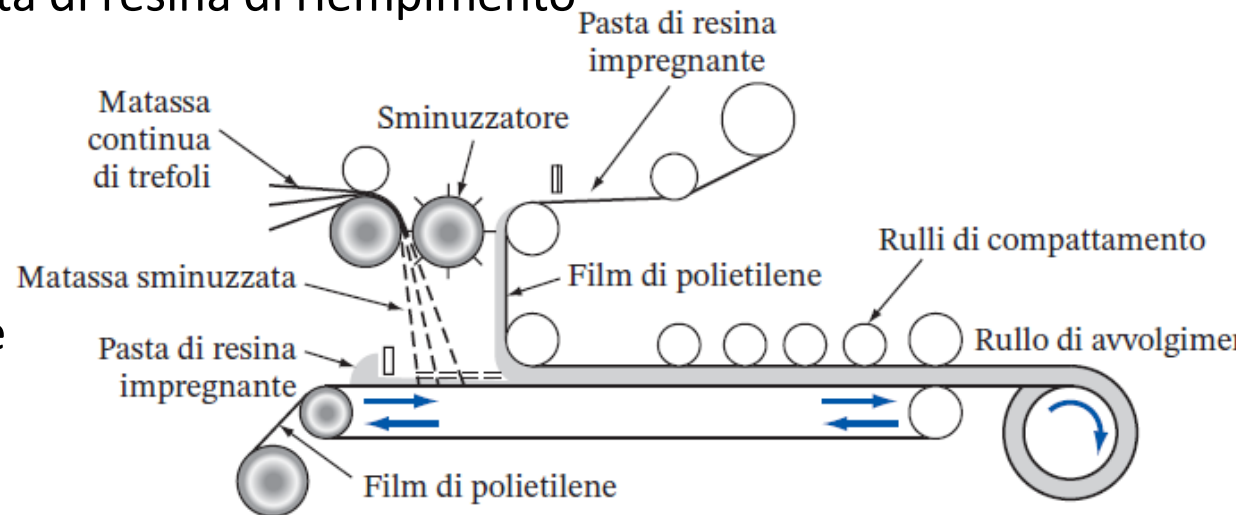
- **Processo per avvolgimento di filo (filament winding):**

- La fibra di rinforzo è fatta passare in un bagno di resina e avvolta su un opportuno mandrino
- Il mandrino viene trattato per indurirlo e la parte di stampo viene staccata dal mandrino



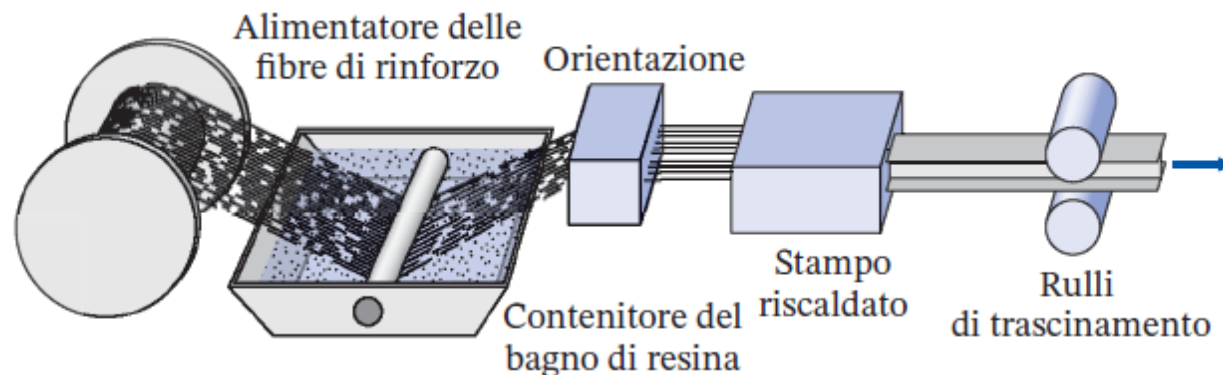
Processi in Stampo Chiuso

- **Stampaggio per compressione e iniezione:**
 - Come per processare i materiali polimerici, ma la fibra di rinforzo è mescolata alla resina
- **Processo di formatura di composito in foglio da stampaggio:**
 - Processo di formatura in continuo altamente automatizzato
 - Un trefolo continuo di fibre di vetro viene sminuzzato e depositato su uno strato di pasta di resina di riempimento
 - Un altro strato di pasta viene depositato sul primo strato
 - Il sandwich viene compattato e rullato su rulli



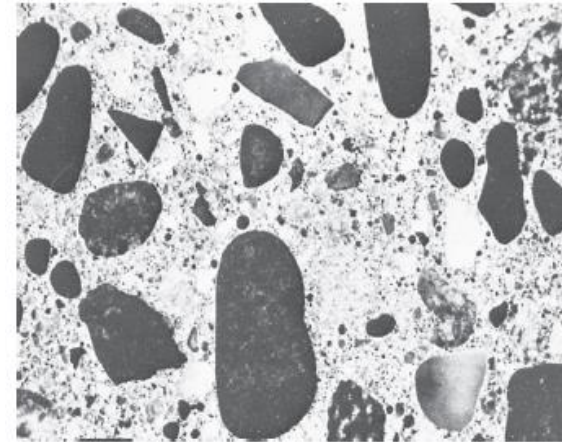
Formatura in Fogli

- Il rotolo di fogli è mantenuto in un locale di maturazione per 1-4 giorni
- I fogli sono tagliati nella forma opportuna e pressati in uno stampo a caldo (150°C) per dare origine al prodotto finito
- Efficiente, veloce, buona qualità e uniformità di produzione
- **Poltrusione continua:** trefoli di fibre continue vengono impregnati in un bagno di resina, fatti passare in uno stampo riscaldato e trafilato
 - Usata per produrre profilati, travi, canali, tubi e condotti



Calcestruzzo

- Flessibilità di progettazione, economicità, resistenza al fuoco, durabilità, prodotto sul luogo di utilizzo
- Bassa resistenza meccanica a trazione, bassa duttilità e fenomeni di ritiro
- Il calcestruzzo è un composito ceramico costituito da materiale lapideo grossolano annegato in un matrice indurita di pasta cementizia
- Calcestruzzo = 7-15% cemento Portland, 14-21% acqua, $\frac{1}{2}$ - 8% aria, 24-30% aggregato fine e 31-51% aggregato grossolano



Cemento Portland

- Produzione: le materie prime sono calce (CaO), silice (SiO₂), allumina (Al₂O₃) e ossido di ferro (Fe₂O₃)
- Le materie prime vengono frantumate, macinate e miscelate nelle proporzioni richieste per ottenere le composizioni desiderate
- La miscela viene posta in un forno rotante e riscaldata a 1400-1650°C e successivamente raffreddato e macinato finemente
- **Composizione chimica:**

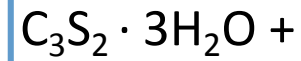
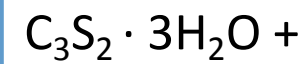
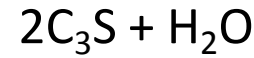
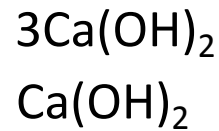
Composti	Formula chimica	Abbreviazione
Silicato tricalcico	3CaO · SiO ₂	C ₃ S
Silicato bicalcico	2CaO · SiO ₂	C ₂ S
Alluminato tricalcico	3CaO · Al ₂ O ₃	C ₃ A
Allumino ferrite tetracalcica	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tipi di Cementi Portland

- I tipi di cemento Portland sono diversi per composizione chimica
- Tipo I: usato quando non è esposto all'attacco da solfati presenti nel terreno o nell'acqua e ad aumenti di temperatura
 - Esempi: pavimentazione dei marciapiedi, edifici, ponti
- Tipo II: usato in caso di moderato attacco da solfati, come nelle strutture di drenaggio
- Tipo III: elevata resistenza meccanica per messa in esercizio veloce
- Tipo IV: basso calore di idratazione, utilizzato quando si deve minimizzare il calore e la velocità alla quale è generato
- Tipo V: usato per esposizione a severi attacchi da solfati, come nel caso di falde acquifere

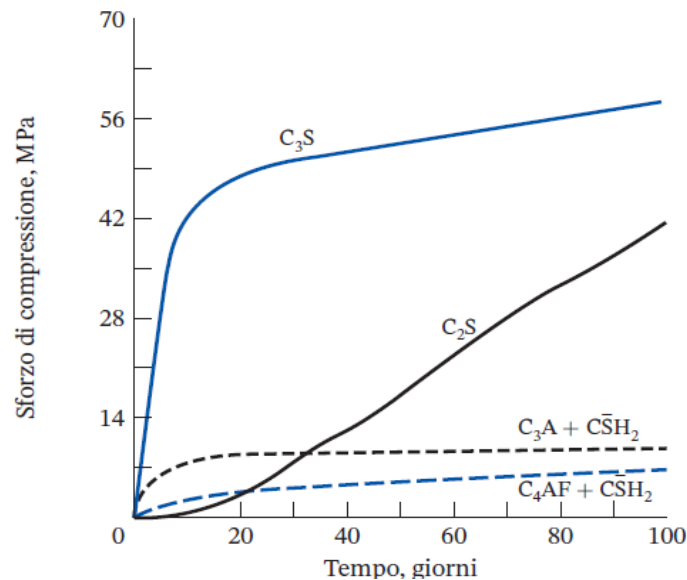
Modulo Elastico in Condizioni di Isosforzo

- Il silicato tricalcico e il silicato bicalcico costituiscono circa il 75% del cemento portland
- Reazioni di idratazione:



Silicato tricalcico idrato

- C_3S è responsabile della resistenza meccanica iniziale
- Il massimo della resistenza a compressione si manifesta in 28 giorni
- L'aumento della resistenza meccanica può proseguire per anni

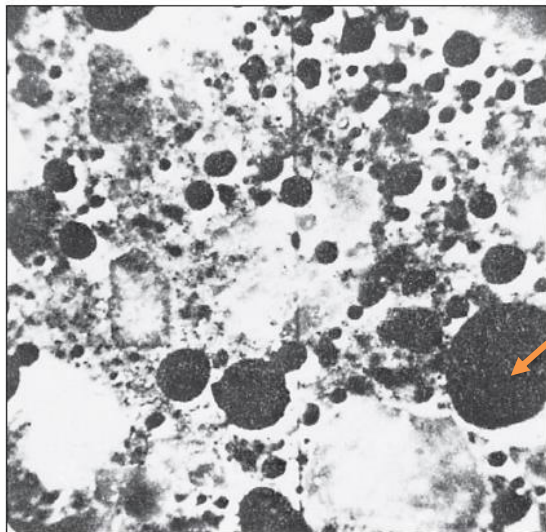


Acqua, Aggregati e Aria

- Possono essere utilizzate acque potabili e non potabili
 - l'acqua non potabile deve essere testata per valutare il livello di impurezze
- Gli aggregati costituiscono circa il 60-80% del volume del calcestruzzo
 - gli aggregati fini sono granuli di sabbia è l'aggregato grossolano è costituito da rocce
- A volte sono anche aggiunti agenti contenenti bolle d'aria
 - aumentano la resistenza ai cicli di gelo e disgelo e migliorano la lavorabilità

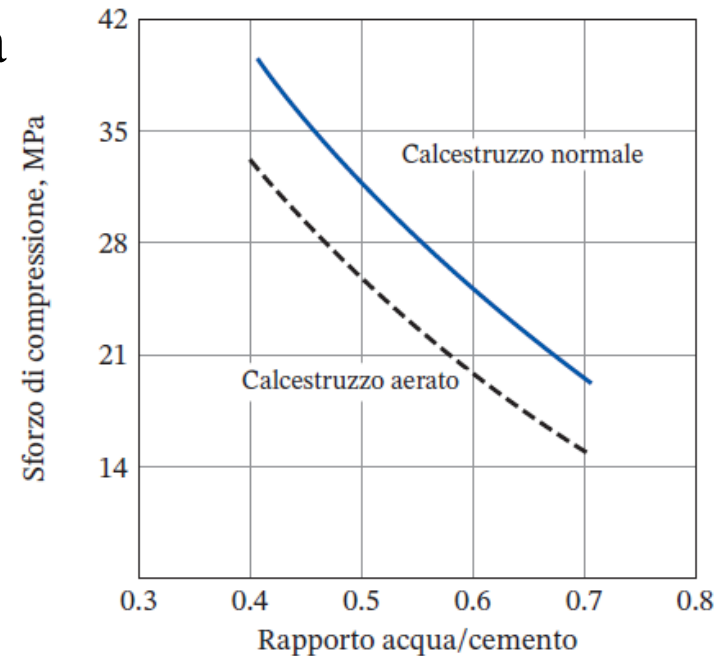
Resistenza a Compressione

- La resistenza a compressione è molto più elevata della resistenza a trazione e dipende dal tempo di indurimento
- Un alto contenuto di acqua diminuisce la resistenza a compressione
- Gli additivi aeranti migliorano la lavorabilità e quindi può essere ridotto il contenuto di acqua



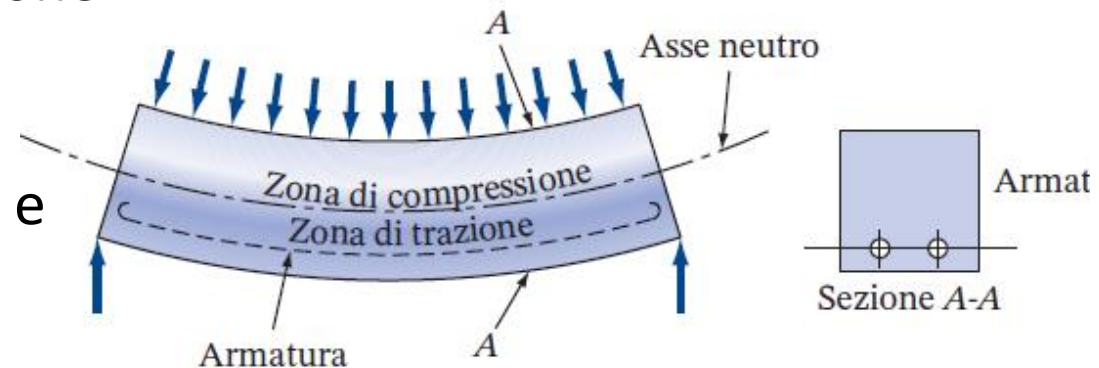
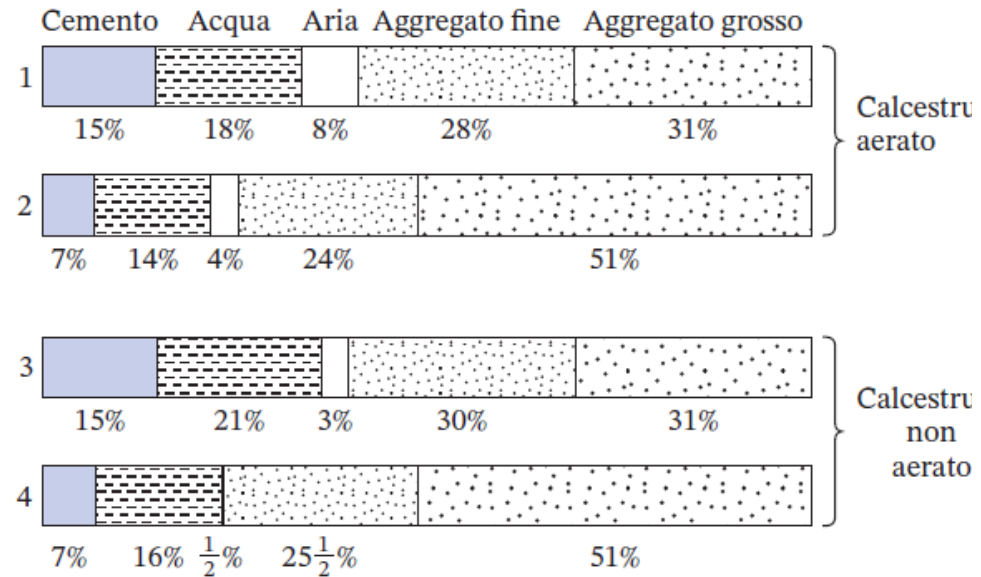
←→ (0.25 mm)

Bolle
d'aria



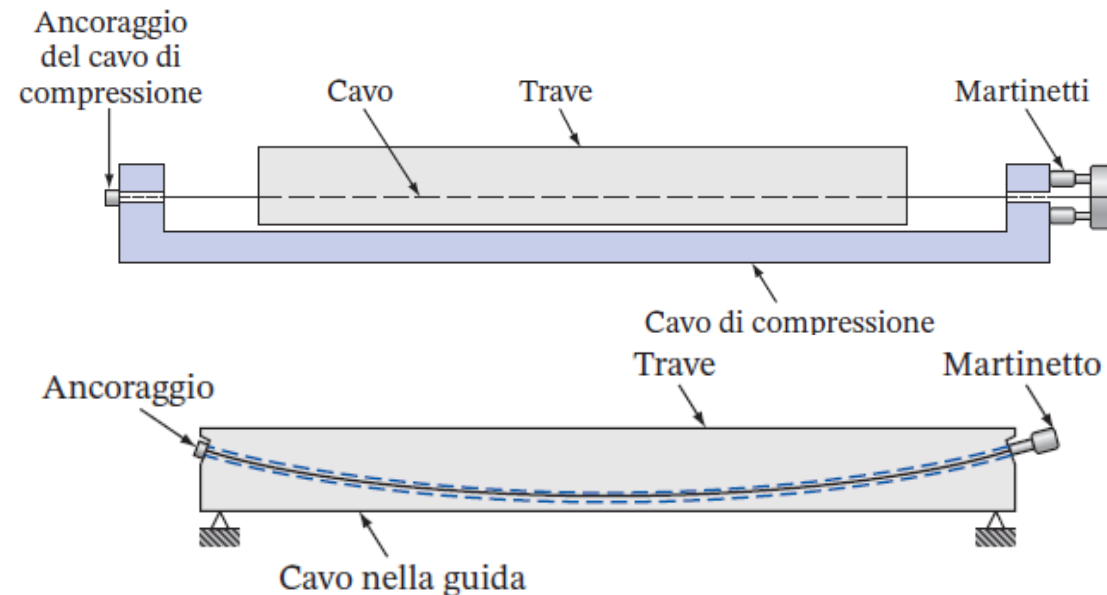
Proporzionamento della Miscela di Calcestruzzo

- Fattori da considerare:
 - lavorabilità
 - resistenza meccanica e durabilità
 - economicità di produzione
- Il rapporto acqua-cemento determina la resistenza a compressione
- Rinforzi in acciaio vengono utilizzati per migliorare le proprietà e trazione e in flessione



Cemento Armato Precompresso

- Vengono indotti sforzi di compressione per migliorare le proprietà a trazione introducendo cavi di precompressione (tondini)
- **Calcestruzzo precompresso:** il tondino viene prima posto in tensione e il calcestruzzo è gettato intorno ai cavi



- **Calcestruzzo post-teso:** i rinforzi di acciaio vengono usati per migliorare le proprietà a trazione ed in flessione