

Morfologia Strutturale

(Rev 02/2020)

Le seguenti 'slides' costituiscono solo una base per lo sviluppo delle lezioni e, pertanto, non sostituiscono i testi consigliati

Qualche definizione

Morfologia

Studio della forma [dal greco *morfé* (forma) e *lògos* (studio)]

Struttura

Parte di una costruzione che ha lo scopo di sostenere i carichi e di trasferirli al suolo.

Un'osservazione

Fu solo nel 19° secolo che nacque l'idea che la struttura (portante) di un edificio potesse essere separata dal concetto stesso dell'edificio. Oggi la separazione tra il progetto architettonico e quello strutturale è totale e ha introdotto numerosi problemi che non esistevano in passato.

Tutte le persone coinvolte nella progettazione, realizzazione, modifica o manutenzione di una costruzione dovrebbero avere una chiara comprensione concettuale del comportamento strutturale. Tutto questo si può ottenere attraverso diagrammi e descrizioni verbali, senza il ricorso a complicate formulazioni matematiche.

Qualche definizione

Progetto di una struttura (concezione strutturale)

- Consiste nel posizionamento degli elementi che la costituiscono, specificando le relazioni che consentono loro di comportarsi come un insieme unitario.
- Implica la conoscenza dei principi di base che governano il comportamento dei corpi solidi, di forma diversa, soggetti all'azione di sistemi di forze.

Analisi di una struttura

- Consiste nel verificare, attraverso l'applicazione di specifiche teorie, il grado di sicurezza di una struttura nei confronti delle azioni esterne.
- Richiede la definizione di un modello e lo sviluppo di calcoli, anche di una certa complessità.

Requisiti di una struttura

- Una struttura deve essere rigida e resistente nei confronti dei carichi che deve sostenere, durevole ed economicamente realizzabile. Nelle diverse epoche sono state adottate strategie diverse per ottenere questi requisiti.

Riferimenti bibliografici

Malcom Millais – *Building structures - understanding the basics* - 3rd Ed. – Routledge, 2017

Daniel L. Schodek – *Strutture* – Pàtron Editore, 2008

Mario Cedolini – *Morfologia strutturale in architettura* – Arsenale Editrice, 1991

Aurelio Muttoni – *L'arte delle strutture* – Mendrisio Academic Press, 2012

Gabriele Tagliaventi – *Morfologia strutturale dell'architettura* – Gangemi Editore, 1996

Dario Coronelli – *Architettura e Struttura* – Pàtron Editore, 2010

Mario Salvadori – *Perché gli edifici stanno in piedi* – Bompiani, 2011

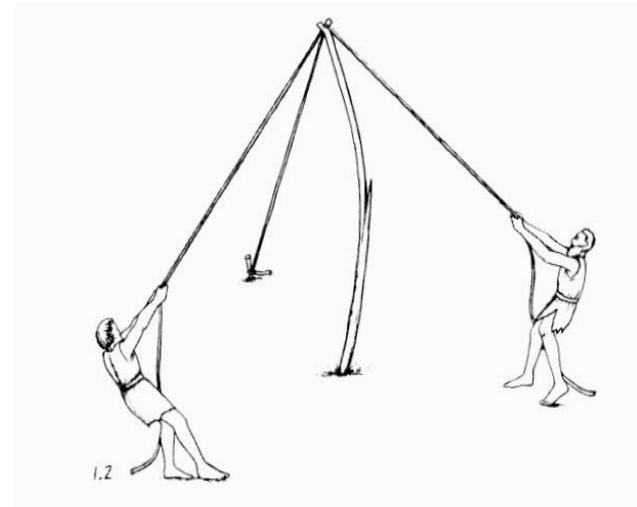
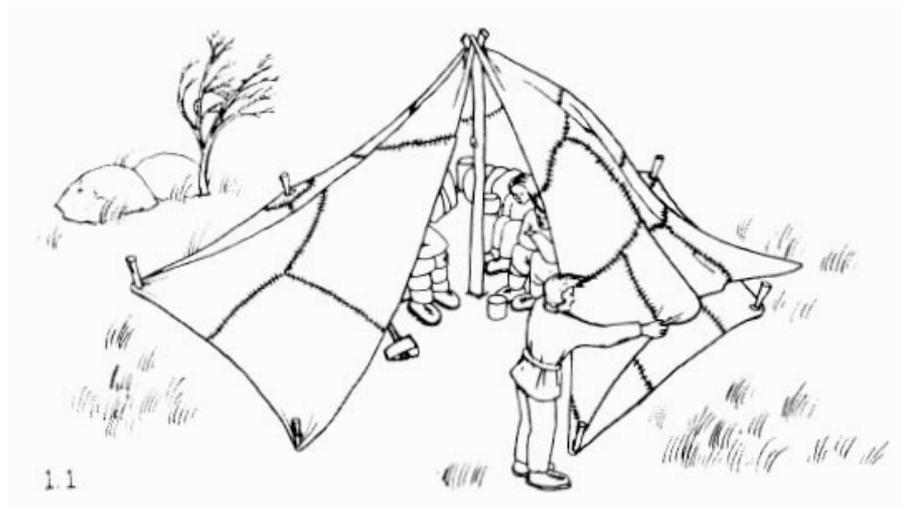
James Gordon – *Strutture sotto sforzo* – Zanichelli Editore, 1995

1 – Arte e Scienza del Costruire

(Rev 02/2020)

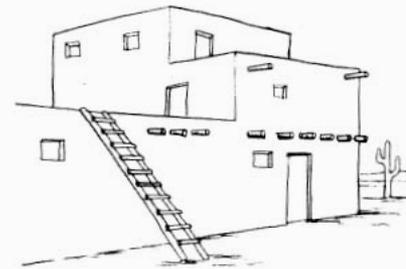
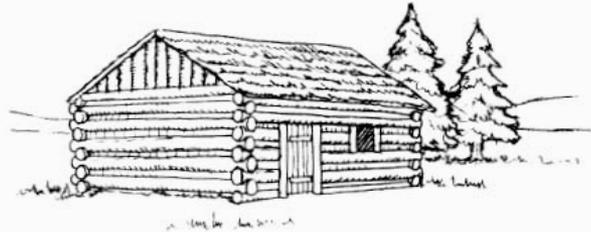
Le seguenti 'slides' costituiscono solo una base per lo sviluppo delle lezioni e, pertanto, non sostituiscono i testi consigliati

Nel periodo preistorico, i nostri progenitori vivevano in piccoli gruppi e per nutrirsi si spostavano continuamente cacciando animali e cercando piante selvatiche. Poiché erano nomadi, non costruivano ripari stabili. I rifugi che li proteggevano dalle intemperie erano costituiti da tende fatte di pelli di animali, irrigidite con funi di fibra naturale ancorate al suolo. Per costruire una tenda era anche necessario un palo centrale, costituito da un ramo di albero.

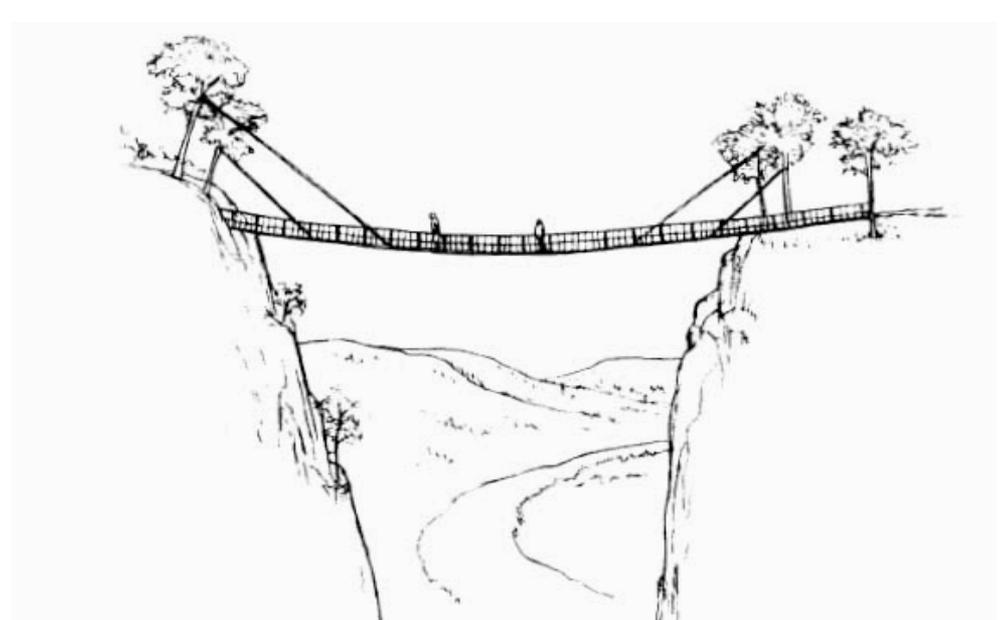
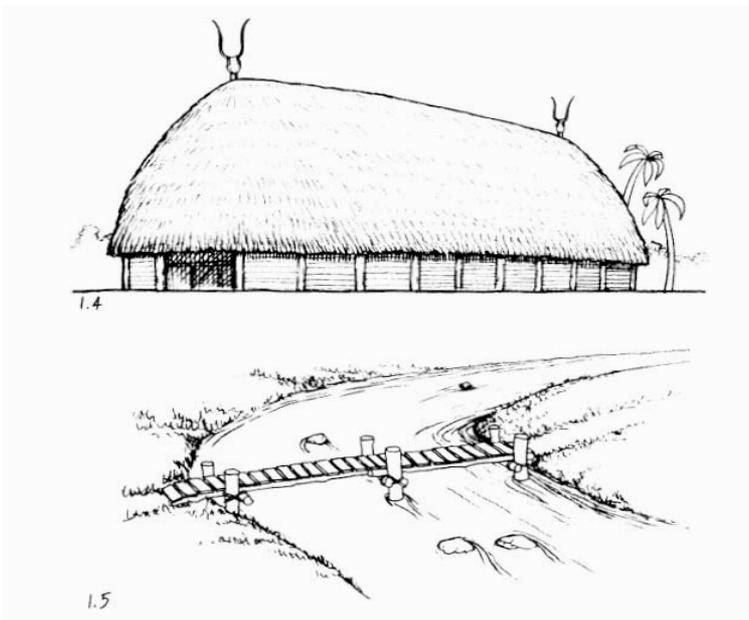


Poiché il palo era compresso dalla tensione delle funi, pali alti e sottili potevano collassare per effetto della forza del vento o quando la tensione delle funi era troppo forte. Se il palo fosse stato di spessore maggiore si poteva evitare il collasso, ma sarebbe stato troppo pesante da trasportare.

Col tempo gli uomini impararono a piantare diversi tipi di vegetali e ad allevare alcune specie di animali: nacquero così l'agricoltura e l'allevamento (Asia minore circa 8000 a.C.). Gli uomini, pertanto, non dovevano più condurre una vita nomade, ma potevano stabilirsi in luoghi favorevoli senza la necessità di doversi spostare continuamente. Allo stesso tempo cominciarono a pensare a rifugi che fossero più grandi e confortevoli delle tende: a poco a poco gli uomini divennero così anche costruttori. Divenne necessario costruire anche magazzini per conservare l'eccedenza dei prodotti, difendendoli dai nemici. Il bisogno di strutture permanenti condusse ad avanzamenti nella tecnologia delle costruzioni attraverso l'uso di materiali e tecniche diverse.



In climi freddi erano costruite con tronchi o pietre posti l'uno sull'altro. In climi moderati da argilla mista a paglia (adobe). In climi caldi da pali di legno e tetti di paglia. Molte famiglie vivevano vicine e ciò diede origine ai villaggi. Per incontrarsi e prendere decisioni furono costruiti edifici grandi che servivano anche per le funzioni religiose. Per andare da un villaggio all'altro furono costruite strade. Per attraversare fiumi o strette valli furono costruiti ponti utilizzando funi in fibra vegetale e legno. Gradualmente gli uomini impararono a usare i materiali naturali, come pietre, legno e fibre vegetali.



Questi edifici con le loro strutture resistenti furono costruiti da uomini senza alcuna conoscenza scientifica e senza l'abilità di leggere e scrivere. La loro cultura era pratica, basata sul lavoro e sull'esperienza.

Gli sviluppi della civiltà, che rappresenta una cultura sempre in evoluzione, richiesero tipi di edifici sempre diversi. Emblematici sono le piramidi, il Partenone, il Colosseo, ...

Per queste costruzioni speciali erano richieste sempre nuove tecnologie e procedimenti costruttivi. La maggior parte erano realizzate in pietra e i carichi permanenti erano quelli predominanti. Durante la costruzione, tuttavia, si manifestavano spesso fratture e dissesti. Molti crolli si sono verificati, ma anche le strutture superstiti mostrano segni di riparazioni.

I processi costruttivi non sono noti con certezza, ma non c'è nessuna traccia di teoria delle costruzioni fino al 1742.



Piramide piegata di Snefru
(circa 200 a.C. - $56^{\circ}/43^{\circ}$)



Santa Sofia (Istanbul)
(537 d.C.)

Nel Medioevo, dopo l'anno 1000, fu sviluppato un vasto programma di costruzione di chiese in Nord Europa: le cattedrali gotiche, che esprimono l'aspirazione umana a costruire sempre più in altezza per glorificare Dio. La loro costruzione richiedeva esperti di geometria per fare combaciare tutti i pezzi.



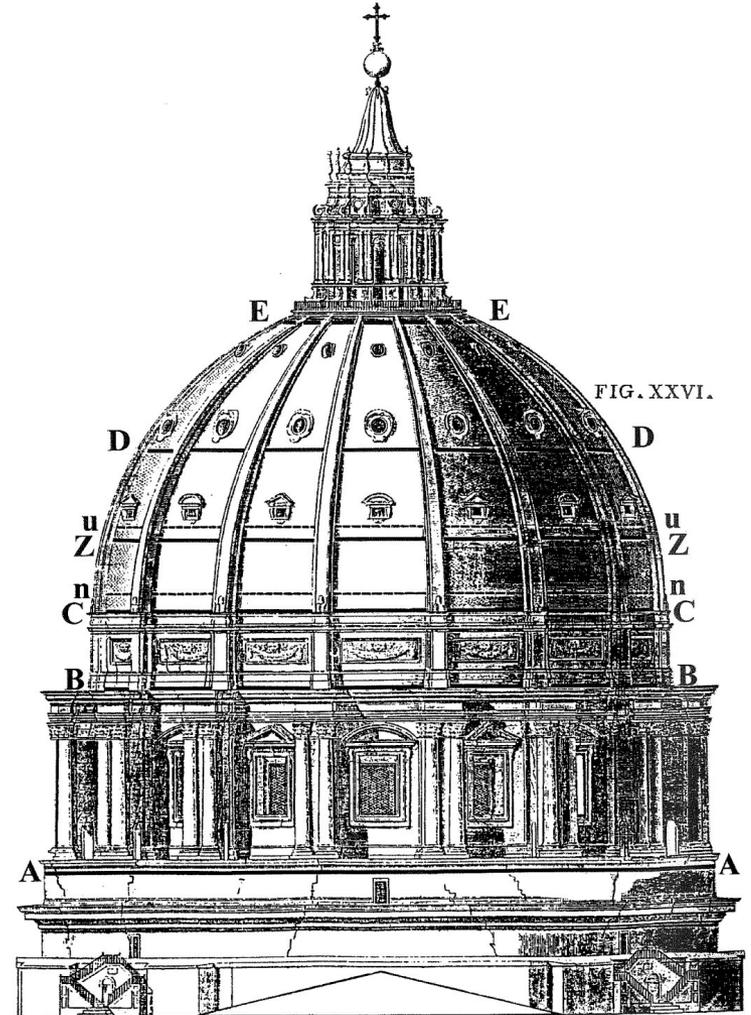
Alcuni dissesti strutturali si manifestarono nelle cupole di grandi cattedrali, come San Pietro a Roma e St. Paul a Londra



(San Pietro – inaugurata nel 1626)



(St. Paul – inaugurata nel 1708)



L'Arte del Costruire

Fino al XIX secolo, le dimensioni degli elementi strutturali e i particolari costruttivi erano stabiliti in base a *regole empiriche*. Queste regole erano state elaborate nel corso dei secoli attraverso l'esame del comportamento delle strutture già realizzate e dei problemi che si presentavano in termini di danni o di crolli. Ogni dissesto stimolava lo sviluppo di soluzioni alternative che, quando mostravano di essere efficaci, venivano inserite nell'insieme delle regole costruttive.

Pur essendo affidabile, tuttavia, l'Arte del Costruire non consente di uscire dagli schemi della tradizione costruttiva, che riguarda principalmente le costruzioni in legno e muratura.

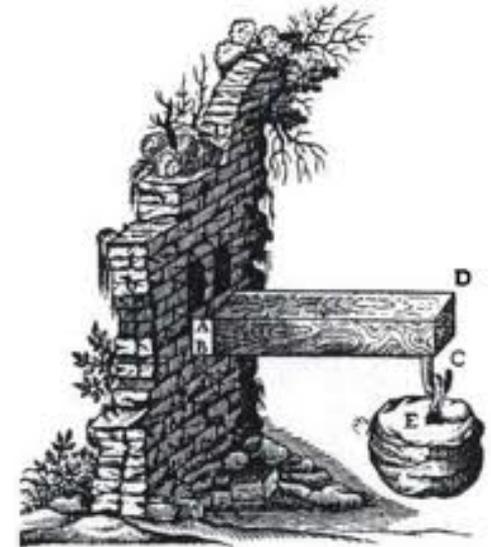
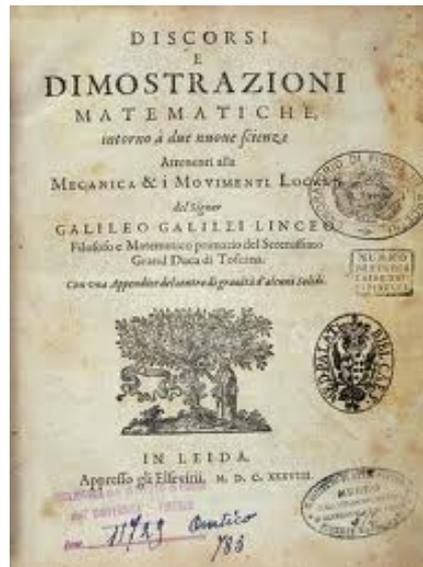
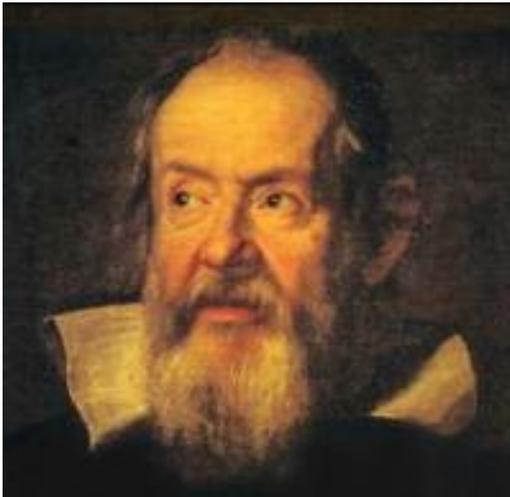
In tempi relativamente recenti, la disponibilità di nuovi materiali e la necessità di risolvere problemi costruttivi sempre più arditi, ha richiesto lo sviluppo di metodi profondamente diversi, che potessero consentire di conoscere il comportamento della struttura prima della sua realizzazione.

La ricerca della comprensione del comportamento strutturale 1/4

A partire dal pensiero di filosofi greci come Platone, Aristotele e Archimede, lenti ma continui progressi si ebbero nella comprensione dei fenomeni fisici. I primi che tentarono di spiegare il comportamento di elementi strutturali furono **Stevino** (1548-1620) e **Galileo Galilei** (1564-1642). Stevino descrisse correttamente l'equilibrio di un sistema di tre forze, mentre Galileo cercò di scoprire cosa accadesse all'interno di una trave.

La Scienza del Costruire

Il primo tentativo di tradurre le regole costruttive in formulazioni matematiche è attribuito a **Galileo Galilei**, che nel 1638 pubblicò il trattato "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze ..."



La ricerca della comprensione del comportamento strutturale 2/4



I risultati raggiunti da *Stevino* e *Galileo* furono pubblicati, ma rimasero confinati nel campo della ricerca e non furono di nessuna utilità per i progettisti dell'epoca.

L'idea di elasticità dei materiali, essenziale per comprendere il comportamento strutturale, è stata formulata indipendentemente da *Robert Hooke* (1635-1703) e da *Edme Mariotte* (1620-1684).

Hooke pubblicò la sua idea di proporzionalità nel 1678 come *Ut tensio sic vis* (come la tensione, così la deformazione), avendola già pubblicata due anni prima sotto forma di anagramma "*ceiinosstuv*".

Mariotte pubblicò i suoi risultati nel 1680, nel tentativo di scoprire cosa accadesse all'interno di una trave caricata, sebbene non pervenne a una corretta comprensione del fenomeno. Quest'ultima sarebbe arrivata un centinaio di anno dopo.

La descrizione matematica (modello) del comportamento di una trave aveva bisogno del calcolo differenziale, uno strumento matematico indispensabile nelle teorie ingegneristiche.

L'utilità di una teoria ingegneristica consiste nella sua *capacità predittiva*, cioè nella possibilità di conoscere il comportamento di un elemento strutturale prima della sua realizzazione.

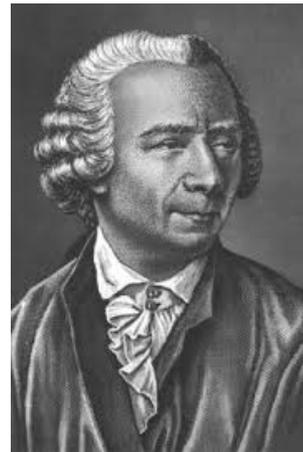


La ricerca della comprensione del comportamento strutturale 3/4

Il calcolo differenziale fu sviluppato simultaneamente e indipendentemente da *Isaac Newton* (1643-1727) e da *Gottfried Wilhelm Leibniz* (1646-1716). Tuttavia, nessuno di loro lo applicò alla teoria delle strutture.

La teoria matematica della trave fu chiarita dal matematico svizzero *Leonard Euler* (1707-1783) il cui principale interesse era costituito dalle curve elastiche. Il suo lavoro, anche se non fu di grande utilità per gli ingegneri del suo tempo, si dimostrò estremamente prezioso nel lungo periodo. Successivamente la teoria fu ulteriormente sviluppata dal matematico francese *Charles Augustine de Coulomb* (1736-1806).

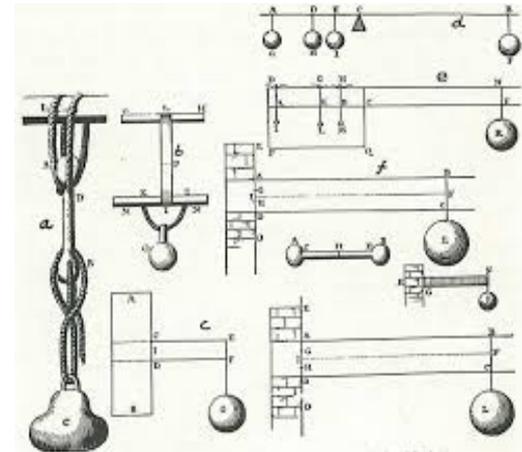
Così, intorno alla fine del XVIII secolo, esisteva una teoria matematica che descriveva il comportamento ingegneristico di una semplice trave e che poteva essere utilizzata per predire il suo comportamento.



La ricerca della comprensione del comportamento strutturale 4/4

La comprensione dell'esistenza delle tensioni tangenziali venne più tardi, nel 1858, ad opera di *William John Macquorn Rankine* (1820-1872). La spiegazione dell'andamento delle tensioni tangenziali composte, come quelle a doppio T, dovette aspettare fino al 1950.

Nel 1826 fu pubblicato il lavoro del matematico e ingegnere francese *Claude Louis Navier* (1785-1836). Nelle sue note, *Navier* formulò una teoria matematica generale dell'elasticità che costituì il fondamento dell'approccio moderno.



Lo sviluppo della teoria impegnò gli scienziati per diversi secoli. Tuttavia, la mancanza di una teoria predittiva non impedì l'uso delle travi, che erano dimensionate attraverso l'esperienza e regole pratiche di progettazione.

La Scienza del Costruire

Riepilogo

A partire da Galileo e attraverso il contributo di moltissimi studiosi e ricercatori, la **Matematica** e la **Meccanica** sono entrate gradualmente a far parte della pratica progettuale. L'Arte del Costruire ha assunto progressivamente il ruolo di una disciplina scientifica, trasformandosi a poco a poco in **Scienza del Costruire**.

La Scienza del Costruire consente la formulazione di **modelli matematici** che supportano il progettista nelle proprie scelte.

Per **modello** si intende una rappresentazione concettuale, inevitabilmente semplificata, di un fenomeno fisico, capace di spiegarne il funzionamento ricorrendo a una formulazione matematica.

Sicurezza strutturale

Modello di calcolo

Per prevedere e controllare il comportamento di un sistema strutturale prima che il processo di costruzione sia avviato, il progettista fa ricorso a modelli sperimentali o astratti come per esempio:

- modello per lo schema geometrico della struttura e dei suoi elementi costituenti
- modello per la schematizzazione dei vincoli
- modello del comportamento meccanico dei materiali (legami costitutivi)
- modello per la definizione delle azioni agenti
- modello per la valutazione delle sollecitazioni massime (tipo di analisi)

che insieme costituiscono il cosiddetto *modello di calcolo*.

Tuttavia, la realtà è sempre molto più complessa del modello di calcolo. Si rende quindi necessario un giudizio sul suo *grado di affidabilità*.

In questo ambito si inserisce il concetto di *sicurezza*, che tende a compensare le incertezze del modello di calcolo con adeguati margini.

L'approccio moderno al progetto strutturale

L'approccio moderno al progetto strutturale, in definitiva, consiste nel verificare un sistema strutturale attraverso calcoli numerici. Questi calcoli sono basati su un *modello matematico* che descrive il comportamento fisico del sistema. Il calcolo può essere sviluppato partendo da valori assegnati delle dimensioni degli elementi strutturali, dei carichi e delle proprietà meccaniche dei materiali. Il risultato numerico indica se il sistema strutturale si comporterà in maniera soddisfacente oppure no.

Il XIX secolo è stato il secolo in cui l'approccio moderno si è affermato perché una corretta teoria del comportamento strutturale era stata finalmente messa a punto e c'era una necessità pratica di disporre di metodi predittivi di calcolo delle strutture.

Numerosi matematici, fisici e ingegneri hanno ulteriormente sviluppato la teoria strutturale nel corso del secolo XIX e sono state eseguite molte prove sperimentali per ottenere correlazioni tra le previsioni teoriche e il comportamento reale degli elementi strutturali.

Inizialmente i calcoli venivano eseguiti manualmente, ricorrendo anche a schemi semplificati. Oggi, la potenza e la velocità degli elaboratori elettronici consentono di utilizzare teorie matematiche molto sofisticate.

Tuttavia, l'importanza dei calcoli manuali è ancora attuale, perché possono contribuire a far comprendere concettualmente il comportamento globale dell'intero organismo strutturale.

2 - Principi di Meccanica e di Equilibrio

(Rev 02/2020)

Le seguenti 'slides' costituiscono solo una base per lo sviluppo delle lezioni e, pertanto, non sostituiscono i testi consigliati

- Nella Meccanica Classica (Meccanica Newtoniana) si assume che tra corpi diversi, così come tra le diverse parti di uno stesso corpo, si possono trasmettere reciproche interazioni, sia a distanza sia a contatto.
- Tali interazioni prendono il nome di **forze**.
- Le forze sono quantità vettoriali, caratterizzate da una retta d'azione, un modulo e un verso.
- Le forze possono essere **concentrate** o **distribuite**.



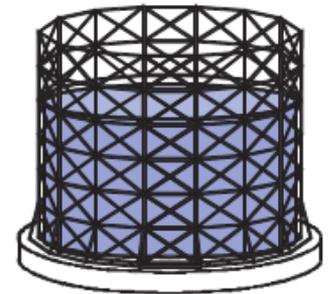
a)



d)



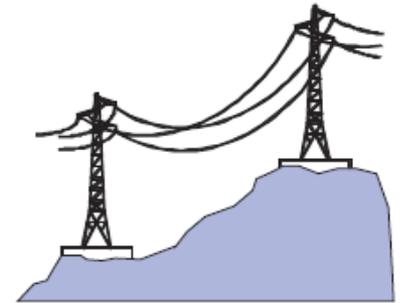
b)



e)



c)



f)

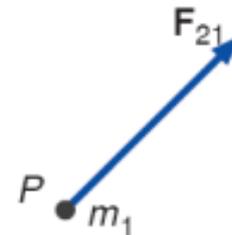
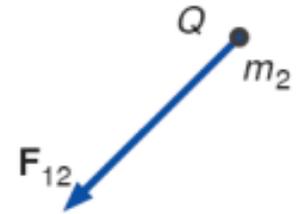
- Nel caso delle azioni a distanza, si assume che due qualunque masse m_1 e m_2 esercitano l'una sull'altra la **forza gravitazionale**

$$F_{12} = F_{21} = h \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

La forza gravitazionale è direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Inoltre, h è un coefficiente che prende il nome di **costante di gravitazione universale**.

La forza gravitazionale è sempre di mutua **attrazione**. In termini vettoriali si ha

$$\mathbf{F}_{12} = h \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{vers } (P - Q) \quad \mathbf{F}_{21} = h \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{vers } (Q - P)$$



La forza peso

Tra le forze che agiscono sui corpi, di grande importanza è la forza peso, dovuta all'attrazione gravitazionale che la Terra esercita sul corpo. La forza peso si ottiene dalla relazione della forza gravitazionale

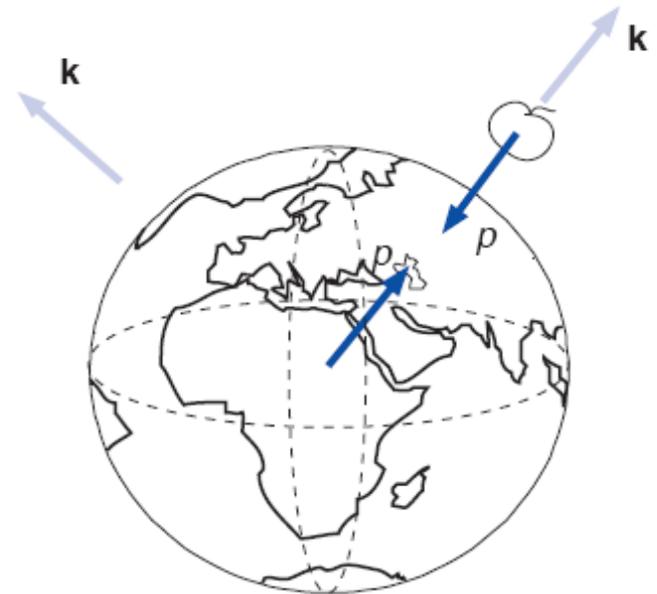
$$F = p = \frac{hM}{R^2}m$$

in cui h è la costante di gravitazione universale, M ed R sono rispettivamente la massa e il raggio della Terra, m è la massa del corpo. Il coefficiente

$$\frac{hM}{R^2} = g$$

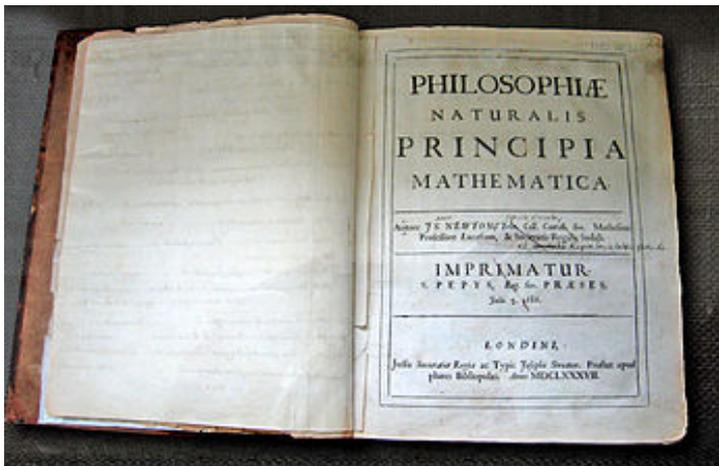
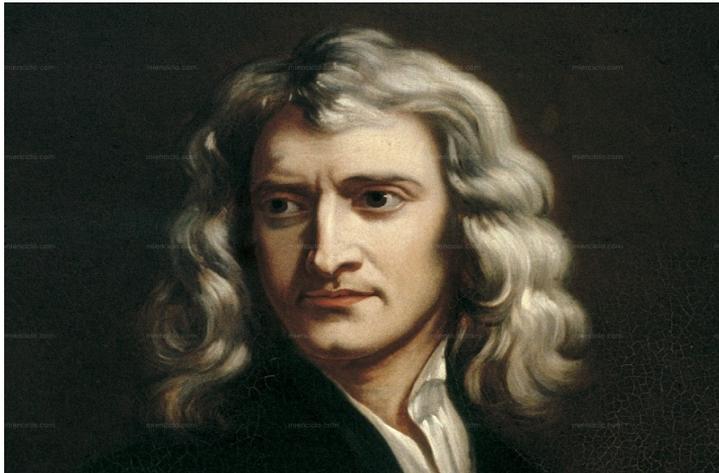
di dimensioni $[LT^{-2}]$ è l'accelerazione di gravità, indicata con $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$. La relazione precedente assume quindi la forma

$$p = mg$$



Prima legge di Newton (Principio d'inerzia)

In assenza di forze applicate, un punto materiale permane in uno stato o di quiete (sta fermo rispetto all'osservatore), o di moto rettilineo uniforme.



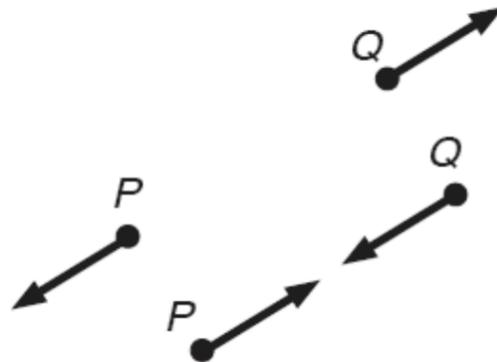
Seconda legge di Newton

Per effetto di una forza applicata \mathbf{F} , un punto materiale acquista un'accelerazione \mathbf{a} (variazione di velocità). Il coefficiente di proporzionalità è pari alla massa m del punto. Si ha cioè

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

Terza legge di Newton (Principio di azione e reazione)

Quando due corpi interagiscono, la forza che il primo corpo esercita sul secondo è uguale e opposta alla forza che il secondo esercita sul primo.



Definizione di forza

- Interazione tra corpi materiali
- Causa che altera lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, o che provoca deformazioni

Definizione di massa

- Quantità di materia di un corpo
- Attitudine ad attrarre o a farsi attrarre da un altro corpo
- Capacità di un corpo di perseverare nel suo stato corrente, sia esso di quiete o di moto uniforme lungo una linea retta (resistenza/inerzia a lasciarsi accelerare)

Definizione di equilibrio

L'**equilibrio** di un punto materiale va inteso come mantenimento della **quiete**. Pertanto si ha che:

condizione necessaria e sufficiente per l'equilibrio di un punto materiale è che sia nulla la risultante di tutte le forze agenti su di esso, cioè

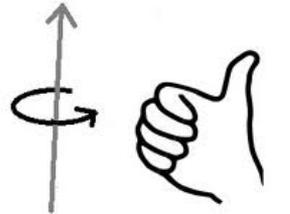
$$\mathbf{R} = \mathbf{0}$$

Momento di una forza rispetto a un polo

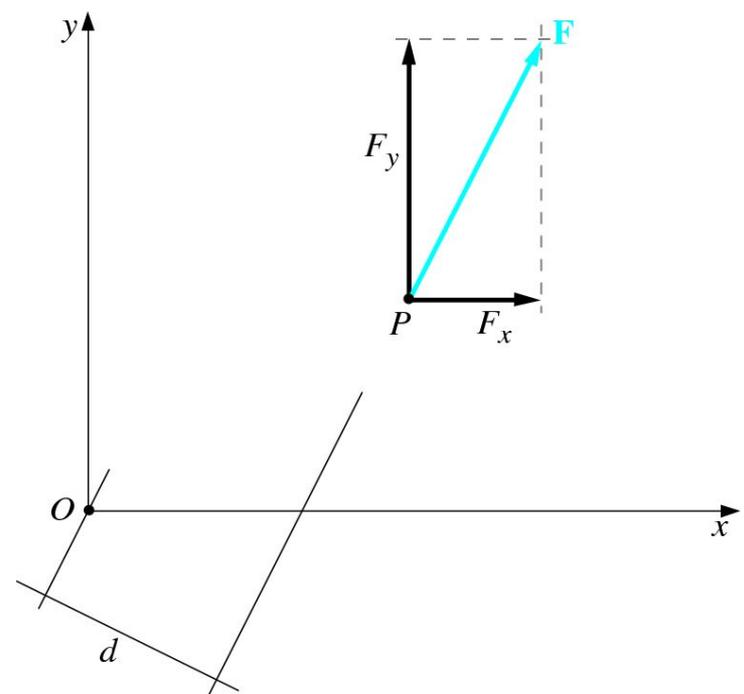
Si definisce momento di una forza \mathbf{F} rispetto a un polo O la quantità

$$M_O = \pm |\mathbf{F}| d$$

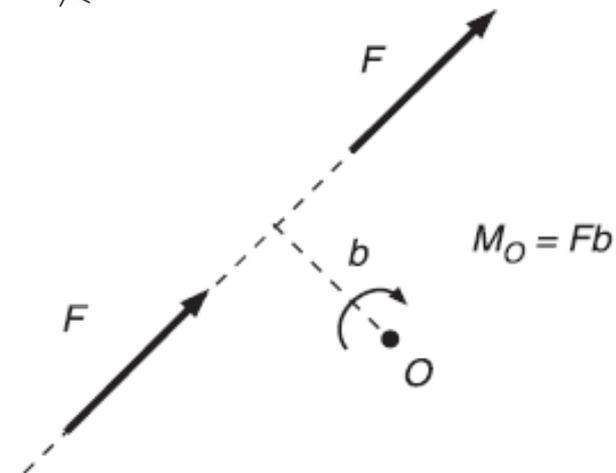
Il momento si considera positivo se la forza “gira” in senso antiorario rispetto al polo.



Right Hand Rule © sbainvent.com



Il momento di una forza rispetto a un polo non varia se si fa scorrere la forza lungo la sua retta d'azione. Non mutano, infatti, né il modulo della forza, né il braccio, né il verso della rotazione associata.



Equivalenza di sistemi di forze

Sistemi di forze equivalenti

Due sistemi di forze si dicono equivalenti quando sono ottenibili l'uno dall'altro con sole operazioni sulle forze.

I due sistemi sono sostituibili l'uno all'altro per quanto riguarda la quiete o il moto del sistema materiale su cui agiscono.

Si può dimostrare che due sistemi di forze equivalenti hanno lo stesso risultante \mathbf{R} e lo stesso momento \mathbf{M} rispetto a un qualunque polo (*condizione necessaria e sufficiente*).

Condizione necessaria e sufficiente affinché due sistemi di forze siano equivalenti è che abbiano ugual risultante e ugual momento rispetto a un punto arbitrario O .

Si dice che un sistema materiale è in **equilibrio** quando è in quiete rispetto a un sistema di riferimento inerziale.

Si assumono validi i seguenti postulati della statica:

1. Se su un sistema materiale in quiete non agisce nessuna forza esterna, il sistema **persevera** nel suo stato di quiete.
2. Se agisce una sola forza esterna il sistema **non persevera** nel suo stato di quiete.
3. Se agiscono due forze esterne, il sistema persevera nel suo stato di quiete se e solo se le due forze sono **opposte e allineate**.

Ne consegue che:

Un corpo rigido è in equilibrio sotto l'azione di un sistema di forze se e solo se risulta

$$\mathbf{R} = \mathbf{0} \quad \mathbf{M}_A = \mathbf{0}$$

...

$$\mathbf{R} = \mathbf{0} \quad \mathbf{M}_A = \mathbf{0}$$

In altre parole:

Condizione necessaria e sufficiente per l'equilibrio di un corpo rigido è che il sistema di forze agente su di esso abbia risultante nullo e momento nullo rispetto a ogni punto.

Tali equazioni prendono il nome di **equazioni cardinali della statica**.

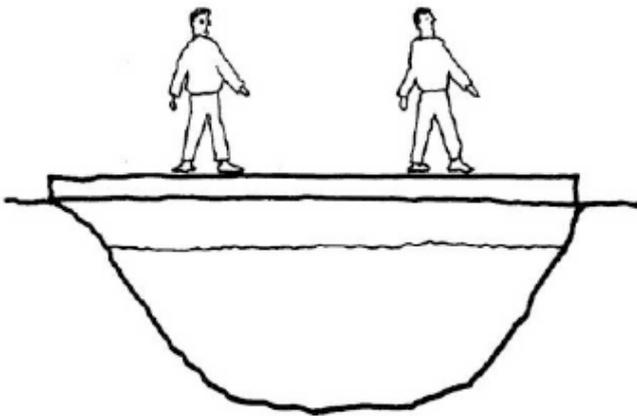
Osservazione

La seconda equazione impone che il momento sia nullo rispetto a un punto arbitrario. Infatti, se la prima equazione è soddisfatta il sistema equivale a una coppia che ha momento costante rispetto a un qualunque punto.

La comprensione concettuale di come le strutture si comportano quando sono caricate può essere raggiunta senza il bisogno della matematica. Tale comprensione si può ottenere cercando le risposte a una serie di interrogativi.

1 - *Qual è la funzione di una struttura portante?*

Si potrebbe rispondere *portare i carichi*, ma anche *portare i carichi da un posto a un altro*, cioè *trasferire i carichi*. Il seguente semplice esempio illustra quest'ultima affermazione: la trave trasferisce il peso delle persone da un punto sopra l'acqua, che non è in grado di sostenerlo, in punti dell'argine che invece sono in grado di farlo.



Lo scopo della trave è di trasferire il punto di applicazione del carico in un punto dove il carico può essere sostenuto, cioè il suolo. Nel fare questo, la trave si comporta come una struttura.

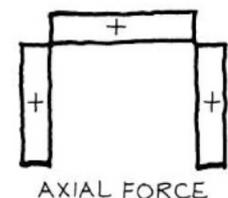
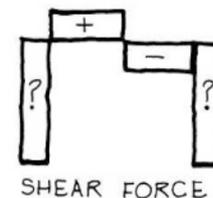
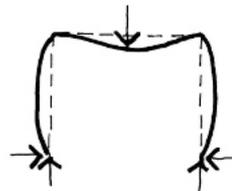
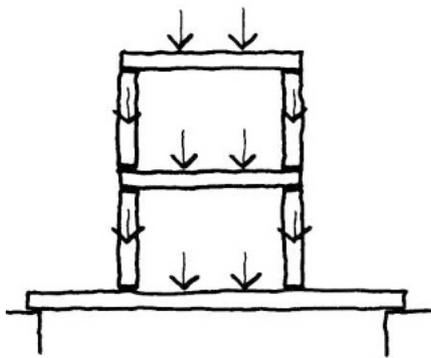
Il trasferimento dei carichi rappresenta lo scopo principale di tutte le strutture, sia che si tratti di un oggetto d'uso, sia che si tratti di un'opera di alta ingegneria.

2 - Cosa sono i carichi e cosa si intende per “percorso dei carichi”?

I carichi su una struttura sono una combinazione di carichi naturali, cioè quelli causati dalla natura, come la gravità, la neve, il vento, il sisma, e quelli causati dall'uso specifico dell'edificio, che sono i carichi utili. Nel caso precedente il carico naturale è il peso della trave, mentre il carico utile è il peso delle persone che passano sulla trave. Ogni carico agente è trasferito alle strutture di fondazione che, a loro volta, lo trasferiscono al suolo. La fondazione è l'elemento che collega la struttura a ciò che non ne fa parte, cioè al suolo. La sequenza degli elementi strutturali che collegano un carico alla fondazione prende il nome di *percorso del carico*.

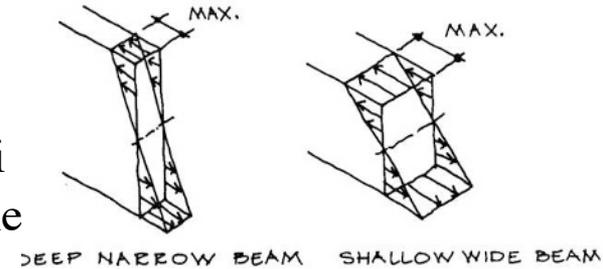
3 - Come fa una struttura a trasferire i carichi?

La struttura trasferisce i carichi mediante gli sforzi che agiscono all'interno di ogni elemento del percorso dei carichi e mediante le forze che si trasmettono da un elemento all'altro.



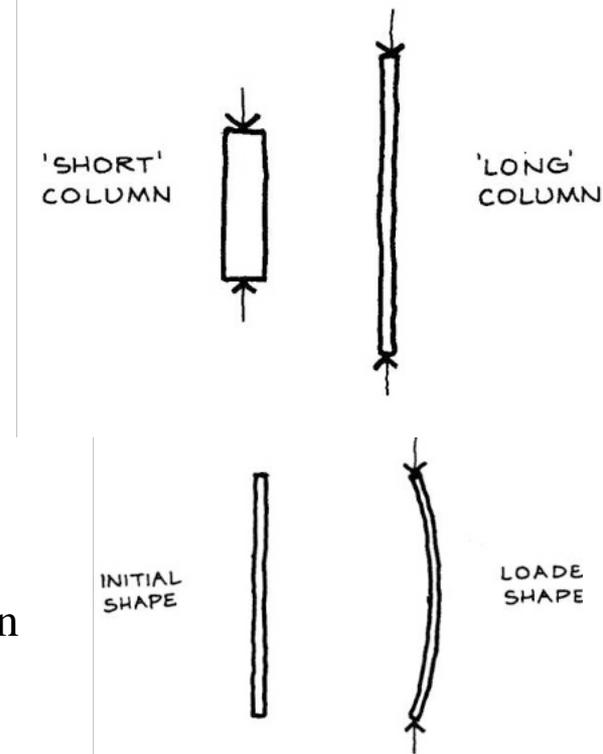
4 - Quali sono gli sforzi interni agli elementi strutturali?

Vi sono sforzi che agiscono nella direzione dell'elemento strutturale e sforzi che agiscono nella direzione trasversale; sforzi che inflettono gli elementi, o sforzi che lo sottopongono a torsione. L'analisi concettuale di una struttura ha lo scopo di identificare quali di questi sforzi agiscono nei diversi elementi strutturali a causa dei diversi carichi agenti.



5 - La struttura è globalmente stabile?

In certe condizioni, un sistema strutturale può collassare improvvisamente. La perdita di stabilità globale è un fenomeno molto pericoloso e va evitata in ogni caso.



6 - Un elemento strutturale è troppo snello?

Se una colonna è corta e larga, aumentare il carico porterà a un collasso per perdita di resistenza del materiale, mentre se la colonna è snella e sottile potrà sbandare lateralmente anche per un carico decisamente inferiore.