

UNIVERSITÀ DI PISA
DICI - Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale

TECNOLOGIA DELLE COSTRUZIONI

Ing. Marco Palazzuoli

PAS 2014 – ORARIO LEZIONI E ESAME

Sabato	17/05	18:30-20:45
Sabato	24/05	14:00-16:15
Sabato	31/05	18:30-20:45
Sabato	07/06	14:00-16:15
Mercoledì	11/06	14:00-16:15
Sabato	14/06	18:30-20:45

ESAME: sabato 21 giugno 2014 ore 17:00 Aula F9 *A016, A033, A072, C430*

PROGRAMMA LEZIONI

Introduzione

Approcci progettuali

Il calcestruzzo

Strutture di fondazione

Strutture di elevazione a telaio in c.a.

Strutture di elevazione a telaio in acciaio

Strutture di elevazione a pareti portanti

Strutture di elevazione orizzontali e inclinate

Chiusure verticali: pareti perimetrali verticali opache, pareti verticali trasparenti

Infissi esterni verticali

Chiusure orizzontali inferiori

Chiusure orizzontali superiori (coperture piane, inclinate, trasparenti)

Partizioni interne orizzontali e verticali

Schermature esterne

Costruzioni in legno

Tecnologia stratificata a secco

Utilizzo del fibrocemento

Sistemi edilizi per il risparmio energetico (materiali, tecnologia, caratteristiche.)

Il progetto dalle esigenze alle prestazioni: approcci progettuali

L'**APPROCCIO ESIGENZIALE PRESTAZIONALE** alla progettazione consiste nell'adozione di un metodo di progettare gli edifici che parte dall'analisi e dalla valutazione delle **esigenze espresse** dall'utente o dagli altri soggetti interessati alla realizzazione dell'opera, passando attraverso la definizione dei **requisiti a cui devono rispondere i diversi elementi della costruzione e l'edificio** nel suo insieme, fino ad arrivare alla definizione delle **prestazioni espresse dalle componenti** fisiche dell'edificio in grado di soddisfare i requisiti.

Le **prestazioni** di una costruzione sono quindi definite come quell'**insieme di proprietà che identificano l'attitudine di una costruzione a svolgere correttamente le sue diverse funzioni e costituiscono la risposta tecnica alle esigenze dell'utilizzatore.**

APPROCCIO ALLA PROGETTAZIONE DI TIPO OGGETTUALE-DESCRITTIVO: metodo che definisce il progetto attraverso la descrizione delle specifiche caratteristiche morfologiche, tecnologiche e produttive di ogni elemento tecnico della costruzione, contando sul fatto che ad oggetti definiti corrisponda un determinato livello di qualità. Non consente di sperimentare nuovi materiali e nuovi metodi costruttivi poiché prescinde dalla definizione a monte degli obiettivi di prestazioni che sono richiesti dal progetto.

APPROCCIO ESTETICO-COMPOSITIVO o che privilegi la definizione del modello strutturale di un edificio: con lo sviluppo attuale delle tecniche costruttive e con un'industria delle costruzioni in grado di offrire sempre nuovi prodotti che pongono il progettista di fronte ad un'ampia scelta di soluzioni tecniche per la realizzazione dell'organismo edilizio, si rende necessaria l'adozione di un approccio analitico alla progettazione;

Più le componenti della costruzione diventano complesse, composte da materiali ed elementi eterogenei (strati o sotto elementi), più la prestazione di **ogni parte della costruzione è rappresentata dalla combinazione delle singole prestazioni degli elementi costituenti**. Pertanto il progettista deve poter controllare la qualità tecnologica degli elementi costruttivi e verificare con metodo analitico quali sono le prestazioni che meglio rispondono alle esigenze espresse.

Inoltre la concezione dell'edificio come un sistema sempre più integrato prelude al superamento dell'organismo edilizio definito per parti funzionalmente distinte: strutture, chiusure, partizioni, impianti si caratterizzano con una propria identità funzionale e tecnica, ma si configurano come parti le cui risposte in termini di prestazioni interagiscono e interferiscono fortemente, al punto di richiedere uno metodologico analitico e strumenti adottati per ricercare e gestire i risultati attesi.

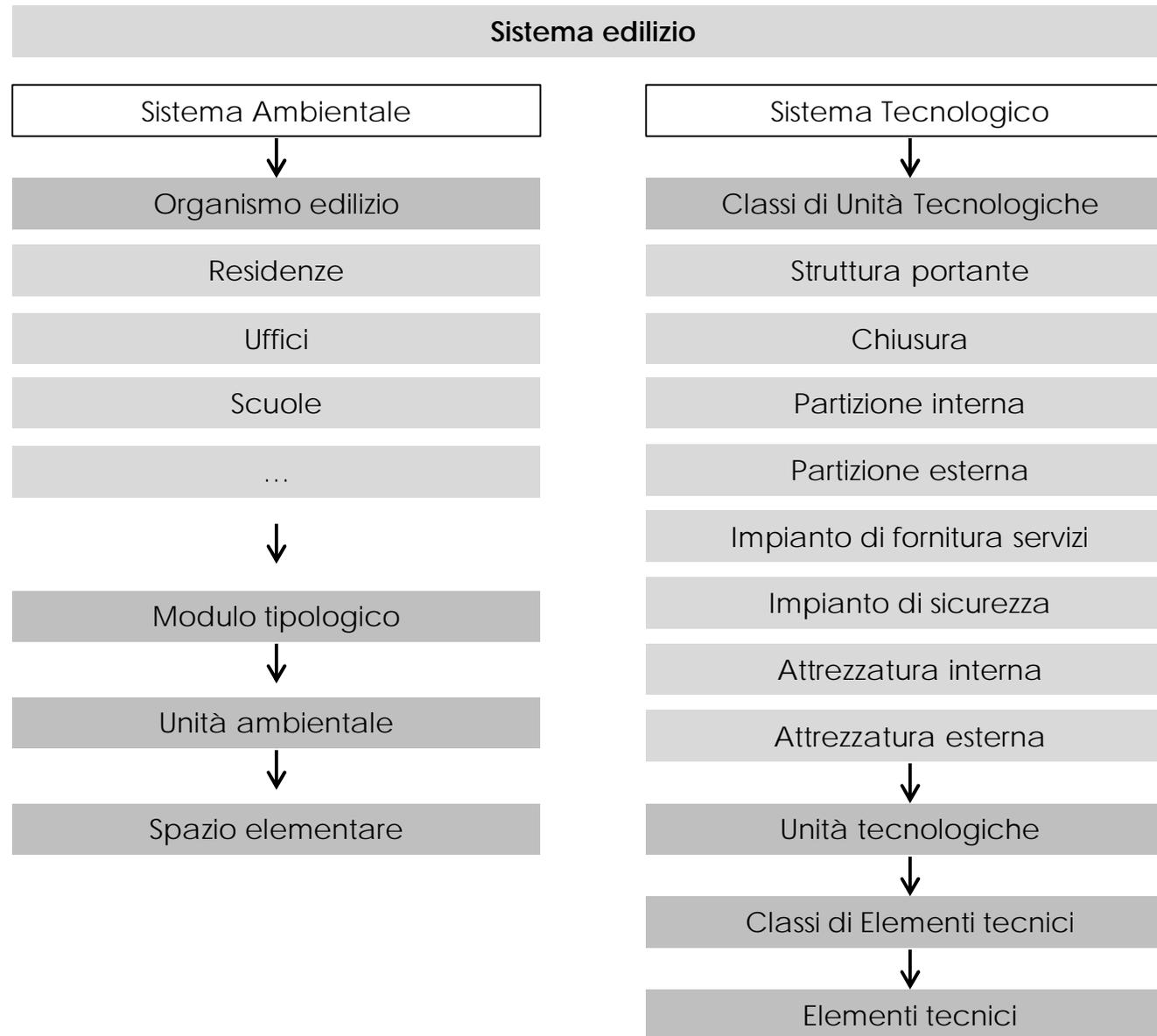
Le prestazioni delle costruzioni sono normale o livello nazionale, ma soprattutto o livello internazionale attraverso la normativa **ISO DP 6241** che definisce le raccomandazioni per lo redazione delle norme prestazionali delle costruzioni, una volta fissate statisticamente le esigenze dell'utenza.

Stabilità	Stabilità e resistenza strutturale.
Sicurezza al fuoco	Limitazione dei rischi di generazione e propagazione incendi, sicurezza degli occupanti, possibilità di evacuare in tempo un edificio in fiamme.
Sicurezza di utilizzazione	Sicurezza degli occupanti nell'utilizzo dell'edificio. Questa è una prestazione legata più agli impianti e agli infissi.
Tenuta	Tenuta al gas, ai liquidi e ai solidi. (Si applica agli impianti o agli infissi esterni).
Benessere igrotermico	Temperatura e umidità dell'aria. (Si vedrà in seguito che la temperatura è notevolmente influenzata dall'umidità sia dell'aria che delle pareti: temperatura interna e superficiale delle pareti influenzano la nostra sensazione).
Benessere atmosferico	Purezza dell'aria e limitazione degli odori.
Benessere acustico	Isolamento acustico e livello di rumorosità. (Abbassamento dei dB).
Benessere visivo	Illuminazione, aspetto degli spazi e delle pareti, vista verso l'esterno. (Esposizione migliore)
Benessere tattile	Elettricità statico, rugosità, umidità, temperatura delle superfici.

Benessere visivo	Illuminazione, aspetto degli spazi e delle pareti, vista verso l'esterno. (Esposizione migliore)
Benessere tattile	Elettricità statico, rugosità, umidità, temperatura delle superfici.
Benessere antropodinamico	Vibrazione, accelerazione e sforzi di manovra. (Esiste tutta una serie di fenomeni fisici all'interno delle canalizzazioni impiantistiche che possono produrre rumori o anche vibrazioni che possono ammalorare parti della costruzione).
Igiene	Pulizia, alimentazione idrica, eliminazione dei rifiuti. (Tutte le superfici dei materiali devono avere condizioni di igiene).
Adattabilità di utilizzazione	Numero, dimensioni, geometria e relazioni degli spazi e degli impianti. (Prestazione che riguarda la conformazione dell'edificio, cioè la possibilità di un edificio di essere modificato nel tempo per adattarsi ai modi e agli usi dell'edificio stesso. Flessibilità e adattabilità sono due termini diversi: la flessibilità di un edificio è la possibilità che al tempo zero noi modifichiamo la configurazione dell'edificio stesso, mentre la adattabilità ha a che fare con un tempo prolungato, cioè la possibilità nel tempo che ha questo edificio a modificarsi per adattarsi agli usi che cambiano)
Durabilità	Conservazione delle prestazioni. (La caratteristica che ha un edificio di mantenere le proprie prestazioni nel tempo. Abbiamo molti materiali che se al montaggio offrono elevate prestazioni tendono a perderle in tempi molto rapidi. Altri invece, come la pietra, conservano inalterate nel tempo le proprie prestazioni).
Economia	Costi di costruzione, di funzionamento e di manutenzione. (Ogni prestazione che noi forniamo all'edificio ha un costo. L'esempio più palese è quello di richiesta da parte del committente di prestazioni di economia, richiesta che vincola il progettista e che influenzerà la risposta prestazionale dell'edificio).

Classi di esigenze e relative definizioni UNI 00501

Sicurezza	Insieme delle condizioni relative all'incolumità degli utenti, nonché alla difesa e prevenzione di danni in dipendenza da fattori accidentali, nell'esercizio del sistema edilizio.
Benessere	Insieme delle condizioni relative agli stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti.
Fruibilità	Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività.
Aspetto	Insieme delle condizioni relative alla fruizione percettiva del sistema edilizio da parte degli utenti.
Gestione	Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio.
Integrabilità	Insieme delle condizioni relative all'attitudine delle unità e degli elementi del sistema edilizio a connettersi funzionalmente tra di loro.
Salvaguardia dell'ambiente	Insieme delle condizioni relative al mantenimento e al miglioramento degli stati dei sovrasistemi di cui il sistema edilizio fa parte.



IL SISTEMA AMBIENTALE

Il sistema ambientale, classificando spazi della costruzione che sottendono a funzioni omogenee, vede una prima articolazione in relazione alla destinazione d'uso delle **unità immobiliari** da realizzare (edifici per la residenza, uffici, edifici scolastici o universitari, organismi edilizi per lo sport o per il commercio) e che sono caratterizzati da sistemi ambientali estremamente differenti, per funzioni ed attività svolte e per le relative esigenze in termini di sicurezza, benessere, funzionalità, ecc.

L'unità minima del sistema ambientale è lo **SPAZIO ELEMENTARE**, ovvero la porzione di superficie e di volume necessari ad un utente per svolgere una determinata attività, comprensivo dello spazio occupato dagli arredi e di quello occorrente per collegarsi ad altri spazi elementari.

L'UNITÀ AMBIENTALE, unità oggetto di riferimento dei requisiti ambientali, viene definito come l'aggregazione di spazi elementari – compatibili temporalmente e spazialmente- in relazione a determinati modelli di comportamento dell'utenza (ad esempio negli uffici: le sale riunioni dimensionate per successivi moduli aggregativi, o gli spazi di relax, o gli spazi di lavoro singoli o collettivi).

Il **MODULO TIPOLOGICO** è la ulteriore aggregazione funzionale di unità ambientali e di sistemi di distribuzione a formare parti dell'edificio funzionalmente indipendenti e rispondenti a logiche di aggregazione di macro spazi coerenti con modelli tipologici edilizi (modulo tipologico a corte interna, in linea, o torre, o padiglione, ecc.).

L'aggregazione di più moduli tipologici fino a formare un'unità immobiliare autonomo in relazione con l'ambiente circostante viene, infine, convenzionalmente definita **ORGANISMO EDILIZIO**.

IL SISTEMA TECNOLOGICO (scomposizione del sistema tecnologico UNI 8290)

È possibile individuare un'articolazione gerarchico anche per gli elementi del **SISTEMA TECNOLOGICO**, in cui, a seconda dei livelli di complessità decrescenti, si riconoscono:

-**CLASSI DI UNITÀ TECNOLOGICHE**, cui appartengono gli elementi complessi ed aggregati del sistema tecnologico, e cioè le strutture, le chiusure, le partizioni interne, le partizioni esterne, gli impianti di fornitura dei servizi;

-**UNITÀ TECNOLOGICHE**, cioè gli elementi costitutivi delle singole parti della costruzione differenziati per caratteristiche strutturali e funzionali;

-**CLASSI DI ELEMENTI TECNICI**, che articolano le unità tecnologiche a seconda del loro posizionamento nell'edificio e in funzione della loro identificazione come elementi costruttivi autonomi, anche eventualmente realizzabili in stabilimento;

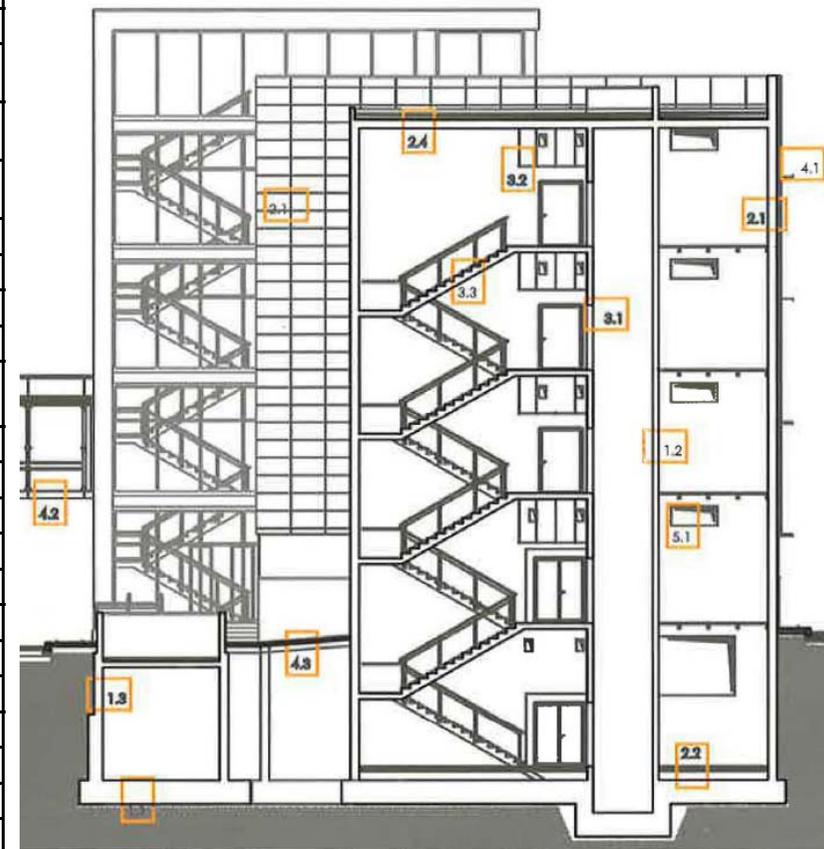
- **ELEMENTI TECNICI**, la categoria alla base della complessa articolazione, sempre più dettagliati e sempre più definiti in termini di morfologia, materiali e tecnologia costruttiva, pure non individuando ancora un prodotto edilizio specifico.

Classi di Unità tecnologica	Unità tecnologiche
1.Struttura	1.1 Struttura di fondazione
	1.2 Struttura di elevazione
	1.3 Struttura di contenimento
2. Chiusura	2.1 Chiusura verticale
	2.2 Chiusura orizzontale
	2.3 Chiusura orizzontale su spazi aperti
	2.4 Chiusura superiore
3. Partizione interna	3.1 Partizione interna verticale
	3.2 Partizione interna orizzontale
	3.3 Partizione interna inclinata
4.Partizione esterna	4.1 Partizione esterna verticale
	4.2 Partizione esterna orizzontale
	4.3 Partizione esterna inclinata

Classi di Unità tecnologica	Unità tecnologiche
5 Impianto di fornitura servizi	5.1 Impianto di climatizzazione
	5.2 Impianto idro-sanitario
	5.3 Impianto di smaltimento liquidi
	5.4 Impianto di smaltimento solidi
	5.5 Impianto di distribuzione gas
	5.6 Impianto elettrico
	5.7 Impianto di telecomunicazione
	5.8 Impianto fisso di trasporto
6. Impianto di sicurezza	6.1 Impianto antincendio
	6.2 Impianto di messa a terra
	6.3 Impianto parafulmine
	6.4 Impianto antifurto e antiruggine
7. Attrezzatura interna	7.1 Arredo domestico
	7.2 Blocco servizi

Classi di Unità tecnologica	Unità tecnologiche
8. Attrezzatura esterna	8.1 Arredi esterni collettivi
	8.2 Allestimenti esterni
	8..3 Impianti esterni

Classi di unità tecnologiche	Unità tecnologiche	Classi di elementi tecnici
1. Struttura portante	1.1 Struttura di fondazione	Struttura di fondazione diretta
		Struttura di fondazione indiretta
	1.2 Struttura di elevazione	Struttura di elevazione verticale
		Struttura di elevazione orizzontale e inclinata
	1.3 Struttura di contenimento	Struttura di contenimento verticale
		Struttura di contenimento orizzontale
2. Chiusura	2.1 Chiusura verticale	Pareti perimetrali verticali
		Infissi
	2.2 Chiusura orizzontale inferiore	Solaio a terra
		Infissi orizzontali
	2.3 Chiusura orizzontale su spazi aperti	Solai su spazi aperti
2.4 Chiusura superiore	Coperture	
	Infissi esterni orizzontali	
3. Partizione interna	3.1 Partizione interna verticale	Pareti interne verticali
		Infissi interni verticali
		Elementi di proiezione
	3.2 Partizione interna orizzontale	Solai
		Soppalchi
	3.3 Partizione interna inclinata	Scale interne
Rampe interne		
4. Partizione esterna	4.1 Partizione esterna verticale	Elementi di proiezione
		Elementi di separazione
	4.2 Partizione esterna orizzontale	Balconi e logge
		Passerelle
4.3 Partizione esterna inclinata	Scale Esterne	
	Rampe esterne	



Il termine *struttura* indica *l'insieme complesso delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici* appartenenti al sistema edilizio che assolvono alle funzioni di sostenere l'edificio e di ripartire i carichi che l'edificio deve sopportare: carichi d'esercizio e carichi accidentali.

La struttura portante inoltre assolve alla funzione di collegamento statico delle sue parti.

La struttura portante costituisce il sistema complesso entro cui si configurano le unità ambientali ed i collegamenti (verticali ed orizzontali), delimita orizzontalmente e predispone verticalmente la ripartizione delle superfici e dei volumi degli organismi edilizi.

La struttura portante può essere realizzata con elementi bidimensionali, tradizionalmente costituiti da setti murari e solai, oppure con elementi lineari, costituiti da telai di pilastri e travi, oppure ancora con elementi tridimensionali costituiti da più elementi piani solidali tra loro o anche da elementi complessi con superfici curve.



La **struttura portante a telaio** viene generalmente celata dalle pareti esterne per realizzare la continuità dell'involucro architettonico, ma può essere anche lasciata in vista attraverso la realizzazione di pareti arretrate rispetto al filo esterno dei solai ovvero con l'utilizzo di pareti trasparenti.

Le **strutture portanti devono comunque essere protette dagli agenti atmosferici** aggressivi per preservare le proprie caratteristiche statiche e per evitare deterioramenti alle altre parti della costruzione.

È possibile classificare ulteriormente la struttura portante, con riguardo alle varie disposizioni e soluzioni consentite dall'utilizzo di materiali e metodi di costruzione, secondo i principi dettati dalla scienza delle costruzioni e in relazione alla tecnologia degli elementi costruttivi.

Una prima classificazione, basata sulla gerarchia delle parti che la compongono, avviene mediante l'enucleazione delle unità tecnologiche, che distinguono la struttura portante in:

- **STRUTTURE DI FONDAZIONE**
- **STRUTTURE DI ELEVAZIONE**
- **STRUTTURE DI CONTENIMENTO**

IL CALCESTRUZZO ARMATO

Il cemento è un legante idraulico che si presenta sotto forma di una polvere finissima.

LEGANTE ha la capacità di legare degli elementi solidi inerti

IDRAULICO indurisce e si lega alle materie inerti reagendo e combinandosi con l'acqua (la reazione avviene sia all'aria che in acqua)

Il componente principale è un prodotto risultante dalla cottura di materiali naturali, il CLINKER, che combinato con componenti vari dà origine ai vari tipi di cemento.

CLINKER costituito da calce (proveniente da rocce calcaree - 65%), silice (proveniente da sabbie, argille e scisti - 25%), allumina (4-10 %), ossidi di ferro e di magnesio (1-3 %) e componenti minori variabili

La fabbricazione del clinker avviene attraverso due fasi:

- 1). estrazione delle materie prime e preparazione della miscela cruda
- 2). cottura della miscela cruda ad alta temperatura

ESTRAZIONE

Si impiegano generalmente due tipi di rocce, uno costituito da carbonato di calcio l'altro costituito da argille o calcari marnosi che oltre al carbonato di calcio contengono silicati di alluminio e silicati di ferro. I materiali vengono estratti dalle cave con sistemi diversi e per essere utilizzati devono essere frantumati accuratamente per ottenere un prodotto omogeneo realizzando una miscela dei vari componenti. Si usano due metodi:

- per via umida: per i minerali che si spappolano facilmente nell'acqua per ottenere una melma fine ed omogenea
- per via secca: per i materiali duri che si possono essiccare e ridurre in polvere per ottenere una polvere fine ed omogenea

COTTURA

La materia prima passa alla cottura ad una temperatura di circa 1400-1500° C in forni appositi attraversando varie fasi:

- **disidratazione**: evaporazione dell'acqua libera e combinata fino a temperature intorno a 700° C
- **decarbonatazione e calcinazione**: liberazione dell'anidride carbonica e volatilizzazione degli alcali fra 900° e 1000° C
- **cottura (clinkerizzazione)**: formazione di composti chimici aventi proprietà idrauliche grazie a reazioni che avvengono a temperature da 1000° a 1500° C

La miscela del clinker e degli altri componenti viene eseguita in proporzioni prestabilite ed è resa omogenea con il processo di **MACINAZIONE** che riduce il materiale allo stato di polvere finissima (fino a 0.06 mm di diametro). Più è spinta la macinazione, ovvero più è fine la polvere ottenuta, tanto maggiore è la capacità di reagire con l'acqua rapidamente



cemento portland: viene definito come il prodotto ottenuto per macinazione di clinker con aggiunta di gesso o anidrite, dosato nella quantità necessaria per regolarizzare il processo di idratazione iniziale

cemento pozzolanico: ottenuto dalla macinazione, senza aggiunta di materie inerti, di una mescolanza di clinker puro e di pozzolana (materiale siliceo di origine vulcanica) e gesso

cemento d'alto forno: è una miscela omogenea ottenuta con la macinazione di clinker e loppa basica granulata d'alto forno (più il gesso)

cemento per sbarramenti di ritenuta: può essere un cemento portland, pozzolanico o d'alto forno, caratterizzato da un basso calore di idratazione e con particolari caratteristiche fisico-meccaniche

cemento alluminoso: ottenuto dalla macinazione di clinker costituito soprattutto da alluminati idraulici di calcio (in questo caso le materie di partenza sono calcare e bauxite)

cemento bianco: utilizzando calcare puro o caolino o altre materie prime prive di ossidi di ferro (che danno la colorazione bruna) si ottiene un cemento di colore bianco

cemento ferrico: preparato da un clinker in cui alluminio e ossido di ferro sono presenti in proporzione equimolecolare. Il cemento ottenuto ha un'elevata resistenza chimica nei confronti delle acque aggressive, da basso calore di idratazione e da un basso ritiro

cemento ferrico pozzolanico: è ottenuto macinando il clinker ferrico con pozzolana. Il risultato è un cemento che unisce, esaltandole, le caratteristiche dei cementi ferrici e di quelli pozzolanici

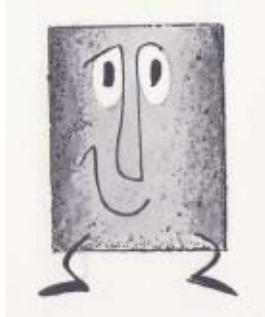
cemento per pozzi petroliferi: adatti alla cementazione e regolati in modo che la presa permetta la cementazione in ambienti caratterizzati da alte pressioni e alte temperature

A contatto con l'acqua il cemento reagisce con essa dando luogo a varie trasformazioni chimico fisiche che si manifestano in due fenomeni principali:

1) PRESA: consiste in un progressivo indurimento della pasta di cemento (cemento + acqua) o della malta (cemento + inerti + acqua). La presa non deve iniziare prima di 45 minuti e non oltre 12 ore dal confezionamento per garantire la lavorabilità

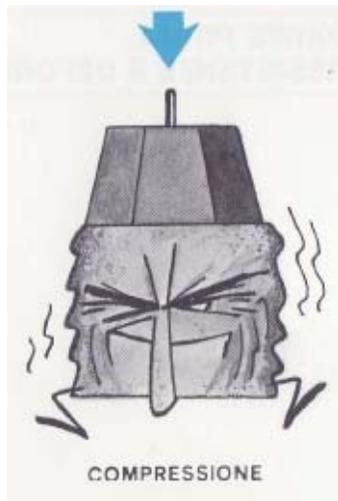
2) INDURIMENTO: è il fenomeno che segue la presa. La pasta ottenuta continua ad indurirsi nel tempo, nei primi giorni con rapidità, lentamente dopo (per mesi e anni). Per il controllo delle resistenze meccaniche si considerano i primi 28 giorni

l'evolversi del processo di idratazione e quindi dell'acquisizioni delle proprietà di resistenza meccanica è accompagnato da una notevole produzione di calore, variabile per i vari tipi di cemento



Come per tutti i materiali impiegati nelle costruzioni, le sollecitazioni fondamentali a cui può essere soggetto il calcestruzzo sono: compressione, trazione, taglio. In relazione alla destinazione delle opere in cls, anche abrasione, urto, aggressioni chimiche.

COMPRESSIONE

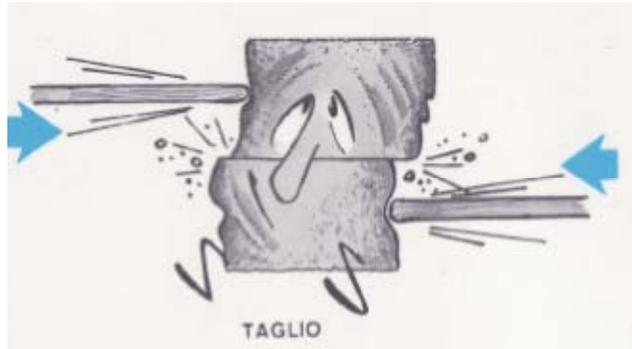


La compressione è dovuta ad un carico che agisce su un corpo comprimendolo fino al totale schiacciamento (rottura). La resistenza a compressione è il valore del carico che produce lo schiacciamento del corpo.



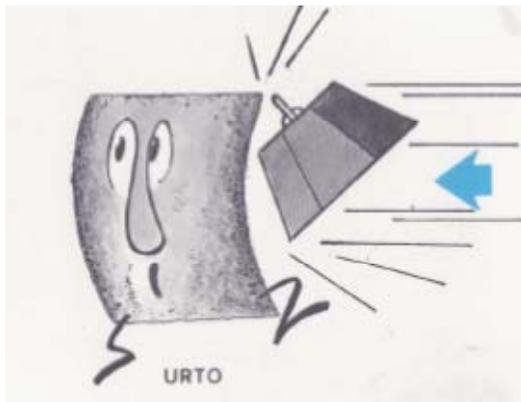
TRAZIONE

La trazione è dovuta ad un carico che agisce su un corpo nel senso di allungarlo fino a rottura. Il valore che determina si chiama resistenza a trazione. Nel cls le resistenze a trazione sono quasi 1/10 di quelle a compressione.



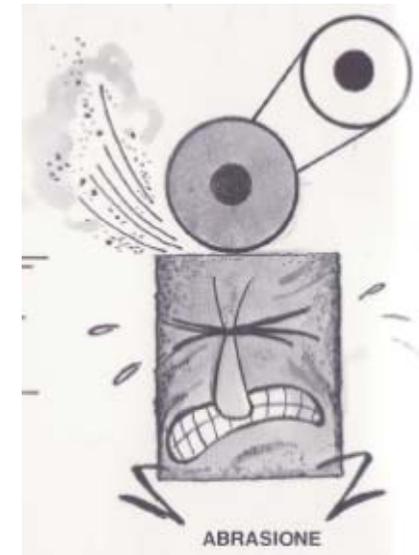
TAGLIO

Il taglio è l'azione dovuta a **forze che agiscono in senso contrapposto** in modo da determinare il distacco di una parte rispetto all'altra ed il loro reciproco scorrimento.



URTO

L'urto è una **sollecitazione che risulta dall'applicazione impulsiva di un carico** che può provocare le sollecitazioni precedenti fino a rottura. La capacità di resistere all'urto è molto elevata nel cls e dipende dalla elasticità dello stesso: calcestruzzi più rigidi sono più fragili.

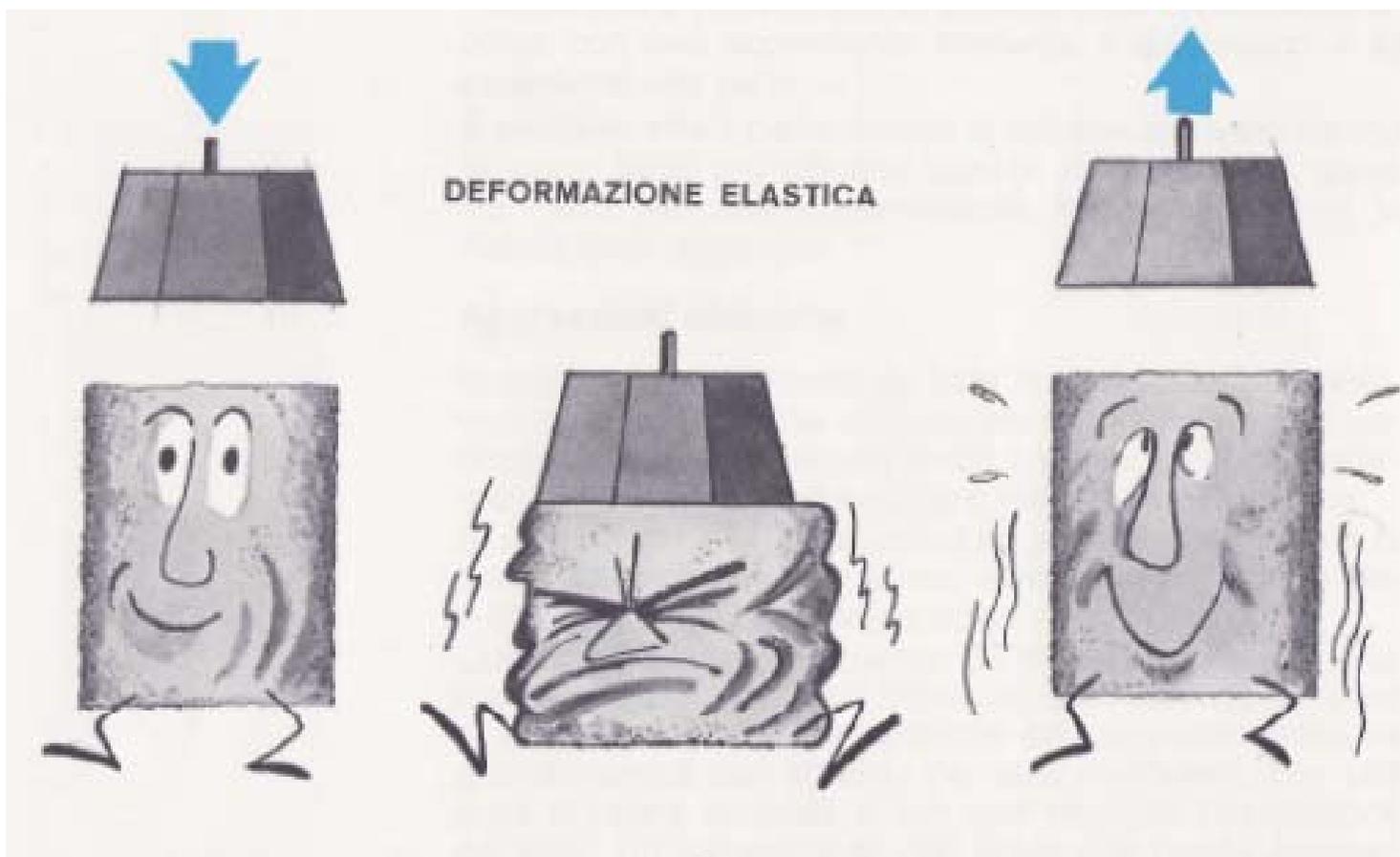


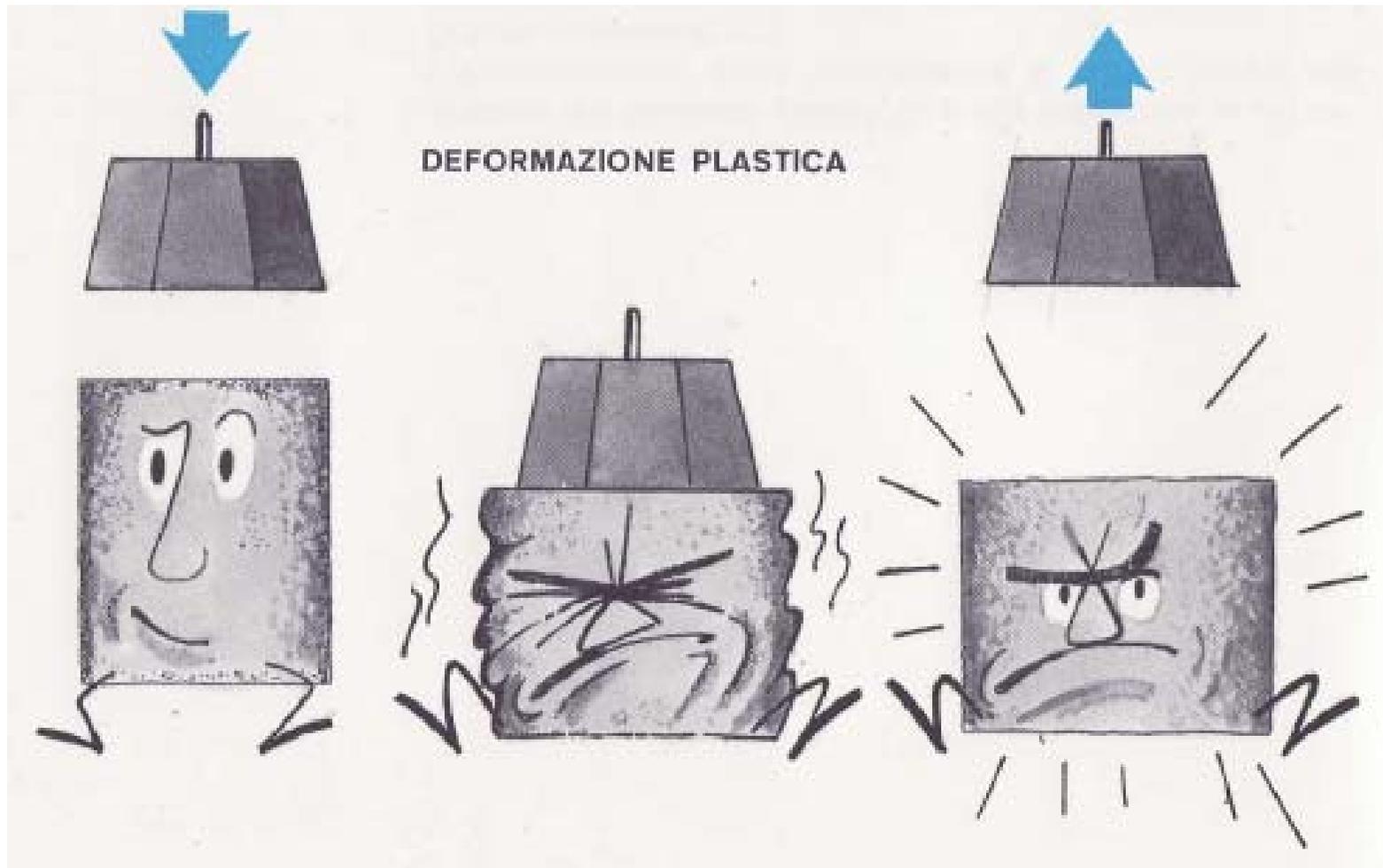
ABRASIONE

E' l'azione che si esercita sulla superficie di un corpo con uno **scorrimento tendente a disgregarlo** e ad asportarne una parte.

La fase di indurimento del calcestruzzo all'aria è accompagnata da riduzione di volume con la perdita di una parte dell'acqua di impasto. L'entità del ritiro è collegata alla quantità di acqua perduta: il fenomeno dipende dalle condizioni dell'ambiente nel quale avviene la maturazione; se l'ambiente è l'aria il **RITIRO** è funzione dell'umidità relativa di quest'ultima; se l'ambiente è l'acqua il fenomeno si inverte e invece di ritiro si ha **RIGONFIAMENTO**. La celerità con cui il fenomeno di ritiro si sviluppa è in relazione con la velocità di evaporazione dell'acqua di impasto: più rapido è il ritiro, più gravi saranno le fessurazioni conseguenti in quanto avvengono in un momento in cui il calcestruzzo non è ancora resistente. Ecco l'importanza di curare i getti nei primi momenti di stagionatura per evitare una rapida evaporazione, soprattutto nel caso dei rivestimenti e in generale nei getti di grande superficie e di piccolo spessore. Per ridurre il ritiro occorre proporzionare opportunamente la quantità di pasta presente nel calcestruzzo e non deve essere ostacolato, per evitare nel calcestruzzo possibili fessurazioni; per le costruzioni nelle quali questo libero movimento del calcestruzzo non sia garantito è necessario prevedere dei giunti di costruzione. Il rinforzo delle armature con l'aggiunta di una percentuale di esse anche nella zona compressa della sezione, è un altro mezzo per ridurre al minimo il fenomeno della fessurazione.

In tutti i corpi ad ogni variazione termica si accompagna una variazione di volume. L'attitudine di ogni corpo a subire variazioni di volume in funzione delle variazioni di temperatura è indicata dal **coefficiente di dilatazione**. Il coefficiente di dilatazione del calcestruzzo è variabile in funzione della natura degli aggregati e della qualità e quantità del cemento; quello medio non si discosta molto da quello dell'acciaio, $0.012 \text{ mm/m}^\circ\text{C}$ e, questo fatto ha permesso l'accoppiamento dei due materiali nel cemento armato: risulta necessario prevedere nelle strutture in cemento armato di notevole lunghezza dei dispositivi in grado di permettere il libero sviluppo di queste variazioni dimensionali. Uno dei metodi più semplici è la creazione di un **giunto di dilatazione** verticale che interrompe per tutta l'altezza la continuità delle strutture. Un altro sistema è quello di appoggiare la struttura su elementi mobili come rulli (travate dei ponti).

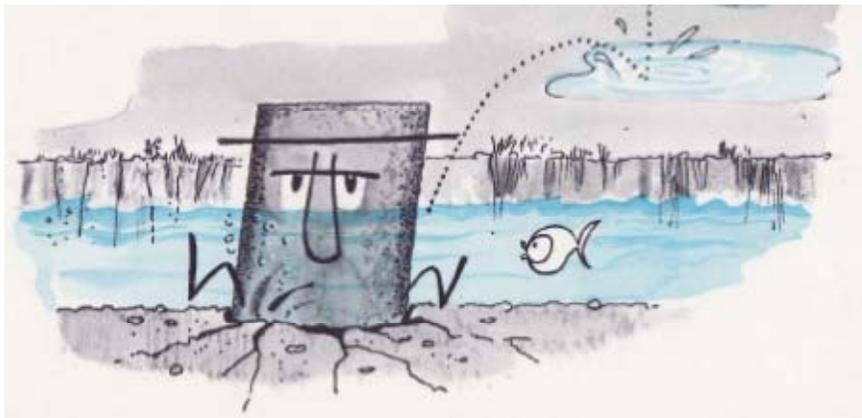






L'atmosfera è l'ambiente naturale in cui generalmente nascono e vivono le opere in calcestruzzo. Il cls si trova esposto a situazioni mutevoli che possono influenzare le sue caratteristiche, sia all'atto della sua preparazione e messa in opera che durante il periodo di stagionatura e successivamente ad opera finita.

Le condizioni termoigrometriche (temperatura, umidità, presenza di vento) **in presenza delle quali il cls indurisce** influiscono sullo sviluppo delle resistenze meccaniche e sull'entità del ritiro.



L'acqua ha una notevole importanza nella vita del calcestruzzo: essa interviene nella sua confezione, esercita una notevole influenza nella fase di maturazione e spesso è l'elemento con cui si trova in contatto, saltuariamente o permanentemente una volta indurito. **Il comportamento del calcestruzzo nei confronti dell'acqua dipende dalla natura dell'acqua stessa e dal momento in cui essa interviene.**

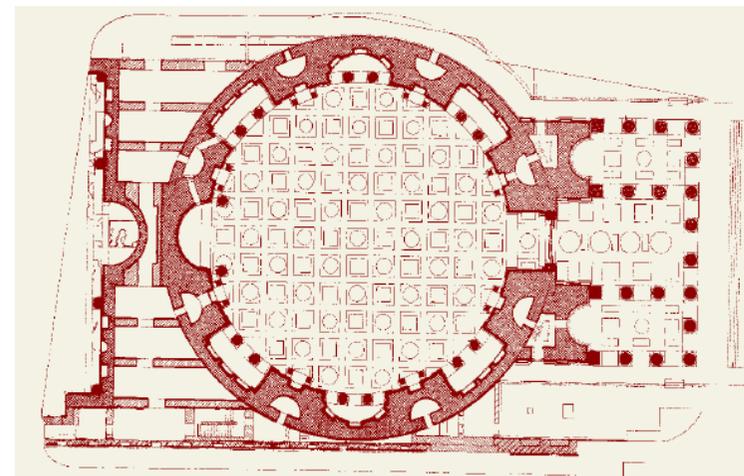


L'azione aggressiva diretta sui calcestruzzi tende a provocare il disgregamento e a compromettere la loro resistenza meccanica. Si è già detto che il calcestruzzo per resistere a tutte le sollecitazioni deve possedere come condizione fondamentale, una elevata compattezza. Questa caratteristica dipende da molti fattori; in effetti **la compattezza aumenta col diminuire della quantità di acqua di impasto, aumenta ugualmente con una composizione granulometrica ben studiata dei suoi costituenti, con una posa in opera accurata e con una energica costipazione dei getti.** Un calcestruzzo che abbia una buona compattezza avrà anche una elevata resistenza meccanica ed una grande impermeabilità. L'accrescimento della compattezza è legato anche alla quantità del cemento impiegato e alle condizioni in cui avviene il suo indurimento.

Un primo tipo di calcestruzzo, avente per legante la pozzolana mista a calce, fu impiegato dai romani con il nome di "*betunium*"; dal nome latino deriva quello di "*beton*" usato oggi da francesi e tedeschi. Si trattava di un conglomerato impiegato per fondazioni, per murature di grande spessore e, qualche volta, per riempire i cassettoni delle cupole compresi tra i costoloni di muratura di mattoni disposti secondo i meridiani e i paralleli ovvero per realizzare delle cupole.



La cupola del Pantheon a Roma è un chiaro esempio dell'impiego di questo conglomerato, al cui interno si ritrovano cocci di laterizio e di altro materiale, in quanto il confezionamento del *betunium* era anche l'occasione per smaltire notevoli quantità di materiali di risulta. L'inserimento di armature metalliche nel calcestruzzo è un'operazione remota perché già nei conglomerati di epoca romana sono state trovate barre e grate di ferro. Ancora una volta è più aderente alla realtà l'ipotesi di uno smaltimento di materiale di risulta, secondo una prassi che è proseguita fino al secolo scorso e si è estesa anche ad altre tipologie costruttive.



Il cemento armato nacque nella **seconda metà del XIX secolo**, preceduto da circa un secolo di ricerche sui leganti (calce e cemento) iniziate da **Smeaton (1756)** e da **Parker (1796)** ai quali si deve la **scoperta** delle **proprietà di presa e di indurimento** dei calcari argillosi convenientemente calcinati. Seguirono gli studi di **Lesage (1800)** e di **Vicat (1818)**, di cui si impiega ancora oggi l'*ago di Vicat* per la misura della consistenza della pasta cementizia, che consentirono il sorgere delle prime fabbriche di cemento a Portland (1824) ed a Boulogne sur Mer (1840). Furono proprio le ricerche e le conoscenze scientifiche sui leganti, seguite dalla produzione industriale del cemento, a permettere lo sviluppo del cemento armato come sistema costruttivo. Il cemento oggi noto come **cemento Portland** deve il suo nome alla collocazione geografica della prima fabbrica di cemento; **oggi s'individua con questo nome un cemento, di origine artificiale come tutti i cementi moderni, con composizione chimica analoga a quella prodotta a Portland mediante la calcinazione dei calcari argillosi della zona.**

Secondo l'opinione più diffusa l'esempio più antico di costruzione in cui sia possibile riconoscere principi abbastanza prossimi a quelli dell'odierno cemento armato è il **canotto eseguito nel 1850 dal francese Lambot** e presentato **all'Esposizione Universale di Parigi nel 1855**. E' curioso osservare che negli anni '50 vennero riproposti scafi in cemento armato realizzati con spessori ridotti facendo ricorso alle moderne tecniche di vibrazione e compattazione dei getti e alle tecniche per rendere impermeabile il calcestruzzo. Anche questi scafi, come il canotto di Lambot, rimasero al livello sperimentale.

Nel 1861 l'ing. **Francesco Coignet**, nel volume "*Béton agglomérés appliqués à l'art de construire*" pubblicava i risultati ottenuti sperimentando travi, solette e volte nelle quali aveva incorporato profilati di acciaio, primo esempio di applicazione del cemento armato a quello che ne sarebbe divenuto il settore principe: le costruzioni civili.

Il maggior contributo allo sviluppo del cemento armato, però, lo si deve al giardiniere parigino **Giuseppe Monier** il quale brevettò nel 1867 il **procedimento per costruire vasi in malta di cemento rinforzata con un'ossatura di fili di ferro**, primo vero esempio di conglomerato cementizio rinforzato con armature metalliche per sopperire all'intrinseca debolezza a trazione del materiale. Monier estese, poi, il sistema al campo delle costruzioni vere e proprie depositando una lunga serie di brevetti riguardanti inizialmente la sua attività, tubi e serbatoi (1868), ma subito dopo anche le costruzioni: solettoni (1869), ponti (1873), scale e volte (1875). In questi brevetti sono contenuti elementi e principi sulla disposizione delle armature i quali, anche se basati su concetti empirici che spesso tradiscono l'origine empirica ed applicativa delle conoscenze del Monier, testimoniano la sua larghezza di vedute e consentono di ritenere che egli sia stato il vero ideatore del cemento armato.

Nonostante i brevetti di Monier arrivino tutti prima del 1875, si dovranno attendere ancora circa 30 anni per assistere alla diffusione senza più sosta del cemento armato come tecnica costruttiva in quanto i precursori del nuovo mezzo costruttivo cercavano intuitivamente di conferire al calcestruzzo la necessaria resistenza a flessione e, pur basandosi sui suggerimenti dell'esperienza, non sempre riuscivano a darne la giustificazione statica. A questo modo riuscivano a ottenere valide soluzioni per specifici problemi, ma non riuscirono a fornire le indicazioni di validità generale necessarie per l'applicazione su vasta scala della nuova tecnologia.

Quasi contemporaneamente a Monier, l'americano **Taddeo Hyatt eseguiva prove su travi armate con ferri piatti**; i risultati, pubblicati nel 1877, risultarono assai importanti perché fissarono un accettabile rapporto ($n = 20$) tra i moduli d'elasticità dell'acciaio e del calcestruzzo e stabilirono l'uguaglianza dei coefficienti di dilatazione termica dei due materiali.

Nel 1884 i brevetti Monier si diffusero in Germania e, soprattutto per merito dell'ing. Gustav Adolf Wayss e della ditta Freytag, i laboratori e gli ingegneri cominciarono ad interessarsi attivamente del nuovo materiale. Ed è proprio alla scuola tedesca, a cui, per altro, risale la più tarda ma non meno feconda scuola italiana, che si deve l'organizzazione sistematica delle conoscenze sul cemento armato, come noi le conosciamo oggi, e la sua applicazione su vasta scala. **L'ing. Wayss ed il prof. Bauschinger di Monaco, sulla base di una serie di esperienze sperimentali, fissarono i principi fondamentali del sistema: l'aderenza acciaio-calcestruzzo impone ai due materiali di agire staticamente assieme ed il posizionamento delle armature in prossimità del lembo teso.** I risultati furono pubblicati nel **1887** da Wayss nel volume "*Das System Monier. Eisengrippe mit Zementumhüllung*" ed in questa pubblicazione, con enorme anticipo sui tempi, viene già posto e affrontato il problema della protezione del ferro.

A partire dalla pubblicazione delle esperienze di Wayss e Bauschinger divenne evidente l'eccezionale importanza tecnica del cemento armato: le ricerche teoriche e sperimentali ne ebbero un impulso che avrebbe fornito la spinta propulsiva per i 90 anni seguenti. I primi fondamenti del calcolo furono pubblicati da Mattias Könen nel "*Zentralblatt der Bauverwaltung*" del 1886. Approfondite ricerche teorico-sperimentali furono compiute in Germania anche da **Mörsch** (cui si deve il fondamentale *traliccio di Mörsch*, prima ed insuperata intuizione sul funzionamento meccanico interno delle strutture in cemento armato, cui ancora oggi, con opportuni adeguamenti, si richiamano i ricercatori), Back e Kleinloghel (cui siamo tutti debitori di tabelle ancora oggi in uso per il calcolo del cemento armato). Le prime norme sul calcolo e sulla esecuzione delle strutture in cemento armato non a caso furono tedesche e giunsero nel 1904.

La nuova tecnologia si era ormai diffusa in tutta l'Europa centrale, cosicché in questi anni si ritrovano diversi studi eseguiti in tutta Europa:

- in Austria lavoravano Neumann, Melan (si ricordino le centine *Melan* per la costruzione dei ponti) ed Empergher;
- **in Svizzera si occuparono di cemento armato Richter** (che elaborò il *metodo delle sezioni canoniche* o *metodo di Richter* per la soluzione delle strutture reticolari isostatiche insegnato ancora oggi) e **Schüle**;
- negli Stati Uniti, sulla strada indicata da Hyatt, si affermarono i nuovi sistemi costruttivi Ransome e Wilson;
- **in Italia** si ebbero numerose, anche se ignorate, applicazioni nell'ultimo decennio dell'800; le costruzioni in cemento armato furono più frequenti in regioni soggette a movimenti tellurici **e fu il terremoto di Messina del 1908 a metterne in evidenza la resistenza alle azioni sismiche.**

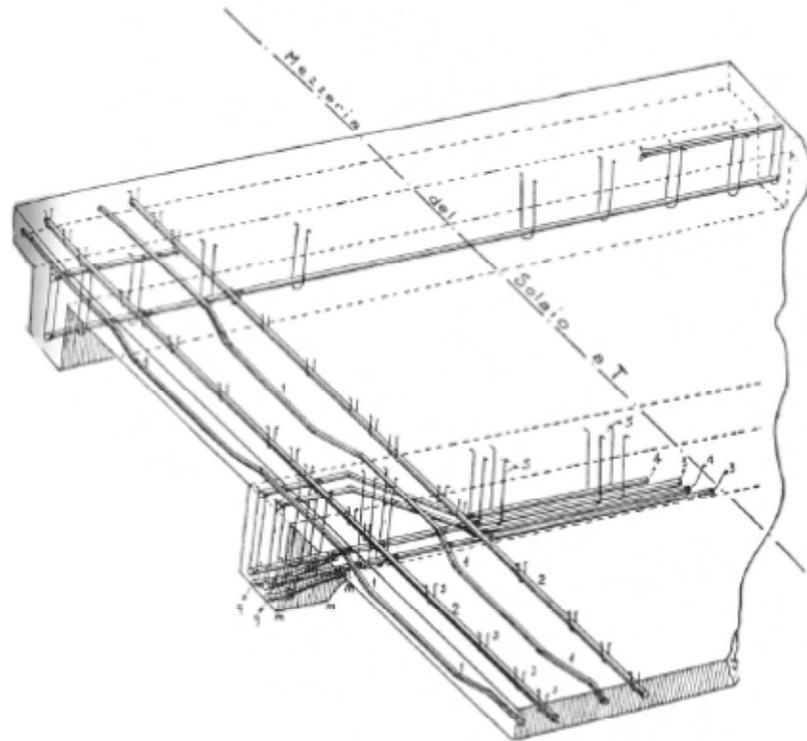
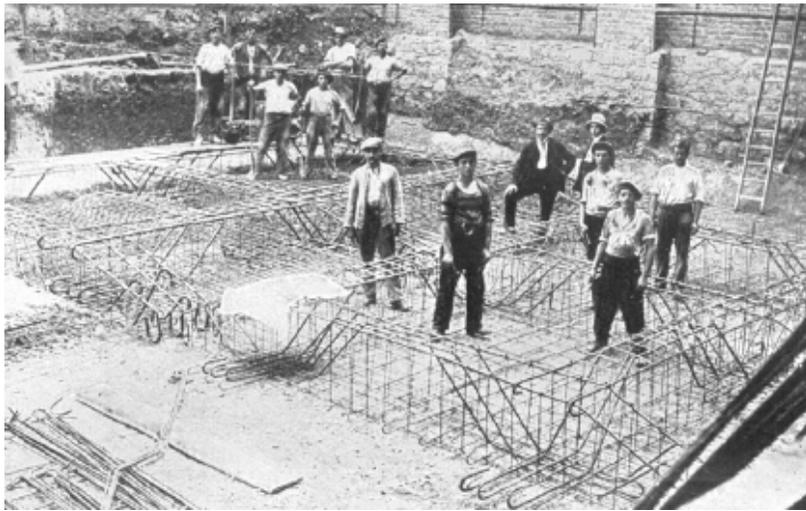
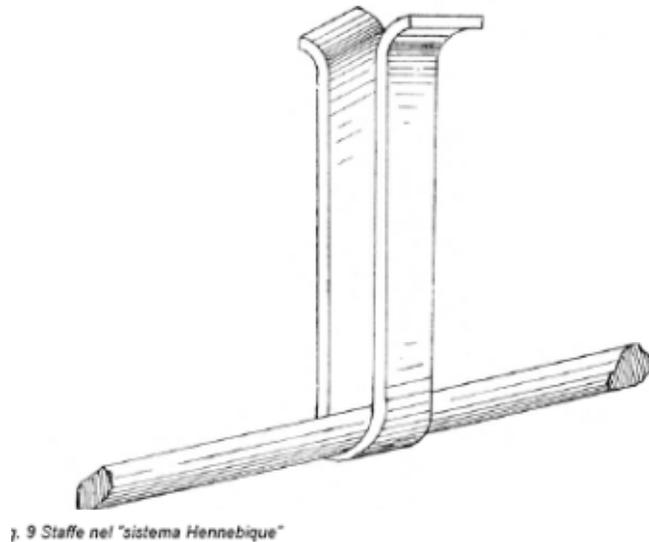


Fig. 8 Sistemi di solaio a t secondo il brevetto Hennebique. Si può notare la disposizione delle armature filanti inferiori che vengono in parte rialzate in prossimità degli appoggi. (da Hutte)

FIG. 8

La Francia continuò ad essere un polo di sviluppo della nuova tecnologia: all'Esposizione Universale di Parigi del 1889 furono presentati i sistemi *Bordenave* e *Cottancin*, mentre solo tre anni più tardi e fino al 1895 pubblicò i risultati, basati su un buon rigore scientifico, delle proprie esperienze Edoardo Coignet (figlio di Francesco) e del belga Francesco Hennebique, di formazione più empirica.



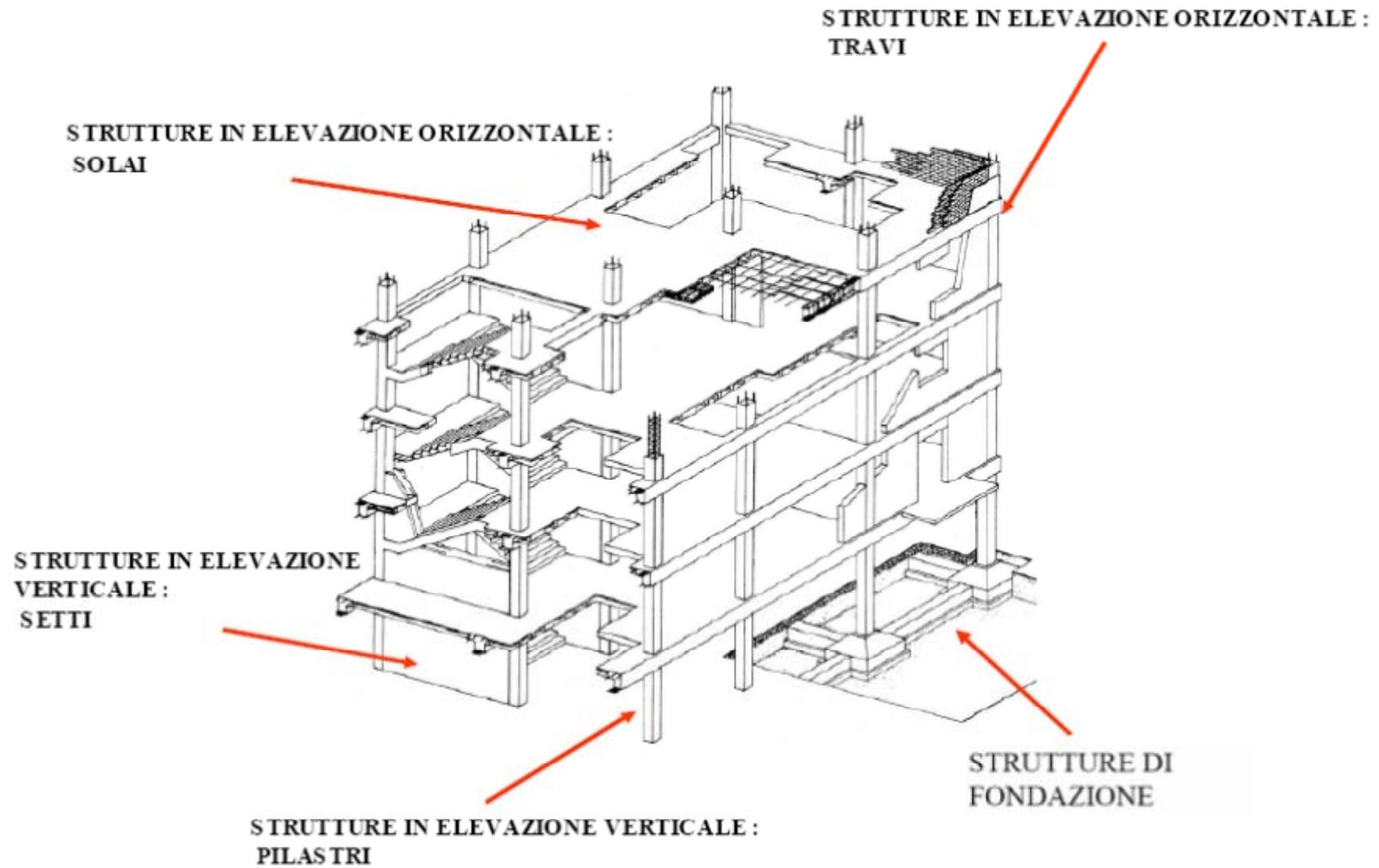
Nel 1896 si ebbero le prime rilevanti realizzazioni in cemento armato ad opera di Emperger e Thacher che costruirono, col sistema Melan, il primo ponte ad arco secondo uno schema statico introdotto dallo stesso Emperger. Una grande influenza sugli sviluppi delle costruzioni in cemento armato fu esercitata soprattutto in Francia ed in Italia dal belga Francesco Hennebique il quale, con il suo eccezionale intuito statico e con il suo raro senso costruttivo che sopperivano alla sua non profonda preparazione teorica, seppe diffondere un sistema che portava il proprio nome.

L'inizio del XX secolo segnò la grande diffusione del cemento armato in Italia; il merito fu soprattutto della *Società Ing. Porcheddu* di Torino che introdusse il sistema Hennebique e costruì importanti opere pubbliche. Ad essa va il merito dell'esecuzione, nel 1910, su progetto dell'intuitivo Hennebique, del **ponte Risorgimento di Roma, ponte di oltre 100 m di luce**. L'opera, di risonanza mondiale per il suo ardimento, fu oggetto di studio (e di polemiche) per molti anni dopo la sua costruzione in quanto il ponte presenta un diffuso e rilevante stato di fessurazione che si manifestò a breve dalla sua costruzione. L'interesse che suscitò la costruzione del ponte è dovuta in parte all'assenza di una rigorosa procedura di calcolo nel procedimento della sua progettazione, e al suo disarmo precoce, pare ordinato da Hennebique a soli due giorni dal getto ed eseguito nottetempo per superare le perplessità dei tecnici che erano coinvolti nell'esecuzione dell'opera.

Oggi, a distanza di 90 anni il ponte gode di ottima salute, ma forse proprio per l'intervento dei Hennebique che, ordinando un disarmo precoce, da un lato favorì la fessurazione della struttura, ma dall'altro favorì anche la redistribuzione delle tensioni all'interno della struttura verso l'assetto statico che ha consentito al ponte di giungere fino a noi pressoché intatto.

In Italia le ricerche furono condotte da numerosi studiosi, ma la diffusione della teoria del cemento armato è da attribuirsi ai professori Silvio Canevazzi e Camillo Guidi che, con le loro originali ricerche scientifiche, arricchirono le conoscenze del sistema costruttivo.

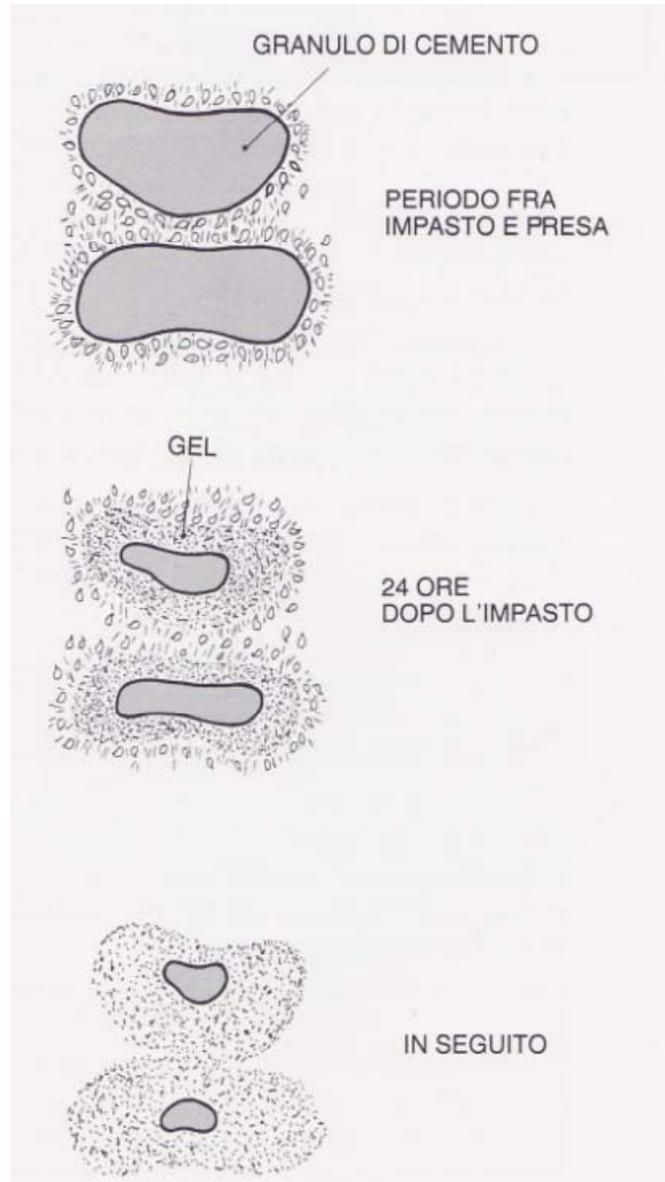
Sostanzialmente, quindi, il cemento armato è nato nell'ultimo decennio del secolo scorso con lo scopo di produrre elementi prefabbricati di solai e scale da inserire in costruzioni a prevalente struttura muraria.



Il calcestruzzo indurito è una pietra artificiale che si ottiene mescolando insieme, in opportune proporzioni, cemento, aggregati o inerti e acqua, più eventuali additivi o aggiunte. Il cemento a contatto con l'acqua fa presa e indurisce, legando tra loro gli aggregati in un'unica massa compatta e resistente. Il calcestruzzo va considerato come un materiale formato da due componenti fondamentali:

1. la pasta di cemento (cemento + acqua), che una volta indurita diventa pietra cementizia;
2. gli aggregati.

Per reazione con l'acqua, attorno ad ogni granulo di cemento si forma una massa gelatinosa finemente cristallina, detta gel, che si sviluppa con continuità, irrigidendosi. Il processo dura parecchi mesi e la trasformazione avviene gradualmente, dall'esterno all'interno dei granuli di cemento. Naturalmente i grani più piccoli si trasformano prima. Di fondamentale importanza in questo processo è la quantità di acqua impiegata, o meglio il rapporto fra il peso dell'acqua e quello del cemento, detto anche rapporto acqua cemento (A/C).

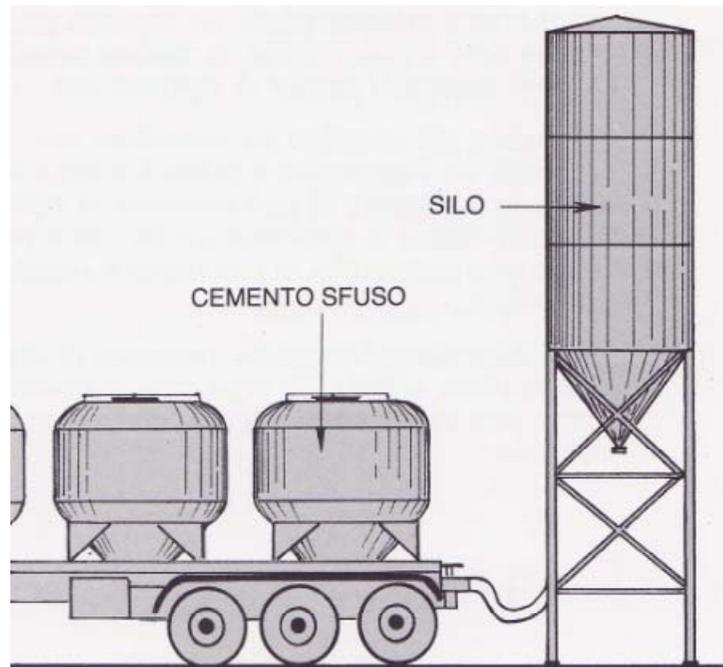


Per rendere lavorabile la pasta e poter aggiungere inerti al fine di ottenere il calcestruzzo, occorre adoperare più acqua di quella necessaria per l'idratazione; ma è necessario limitare al minimo il valore del rapporto acqua/cemento.

L'acqua in eccesso forma nella pasta di cemento che ha fatto presa (e cioè nella pietra cementizia), dei pori capillari tanto più grandi quanto maggiore è il suddetto rapporto. Pertanto aumentano il suo ritiro e l'assorbimento di acqua.

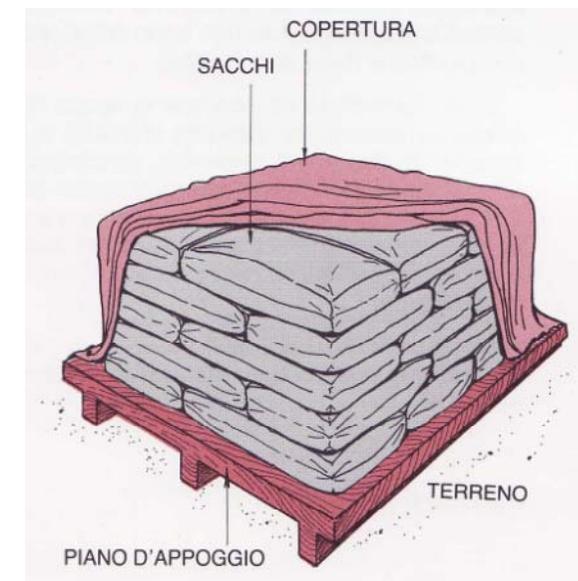
CEMENTI	Res. a compressione kg/cm ² dopo giorni				
	1	3	7	28	90
normali, 325			175	325	
ad alta resistenza, 425		175	325	425	
ad alta resistenza e rapido indurimento ed alluminoso, 525	175	325		525	
per sbarramenti di ritenuta, 225				225	350

resistenza di alcuni tipi di
cemento al variare del tempo



Se è fornito in sacchi questi non vanno mai tenuti all'aperto, ma conservati in ambienti asciutti e chiusi, lasciando sempre delle intercapedini fra piano di appoggio e terreno. Se consegnato sfuso, il cemento deve essere conservato in appositi silos. Il cemento che presenta grumi non facilmente friabili con le dita è da ritenersi degradato.

I cementi sono forniti in sacchi da 50 kg, oppure alla rinfusa in appositi contenitori. La legge prescrive che venga indicata la cementeria produttrice, la classe del cemento e quindi la sua resistenza minima dopo 28 giorni. Sul posto di lavoro il cemento deve essere sempre protetto contro l'umidità.



Gli aggregati che si impiegano per i calcestruzzi ordinari sono costituiti da:

- ghiaie o sabbie alluvionali estratte da letti di fiume o da cave
- pietrischi e sabbie provenienti dalla frantumazione di rocce.

In genere gli aggregati comuni hanno una resistenza superiore a quella della pasta di cemento; è necessario però che la resistenza sia uniforme, e cioè che siano assenti gli elementi friabili, e anche quelli di forma appiattita.

Perché il calcestruzzo sia durabile è anche necessario che gli aggregati non siano gelivi, cioè molto porosi.



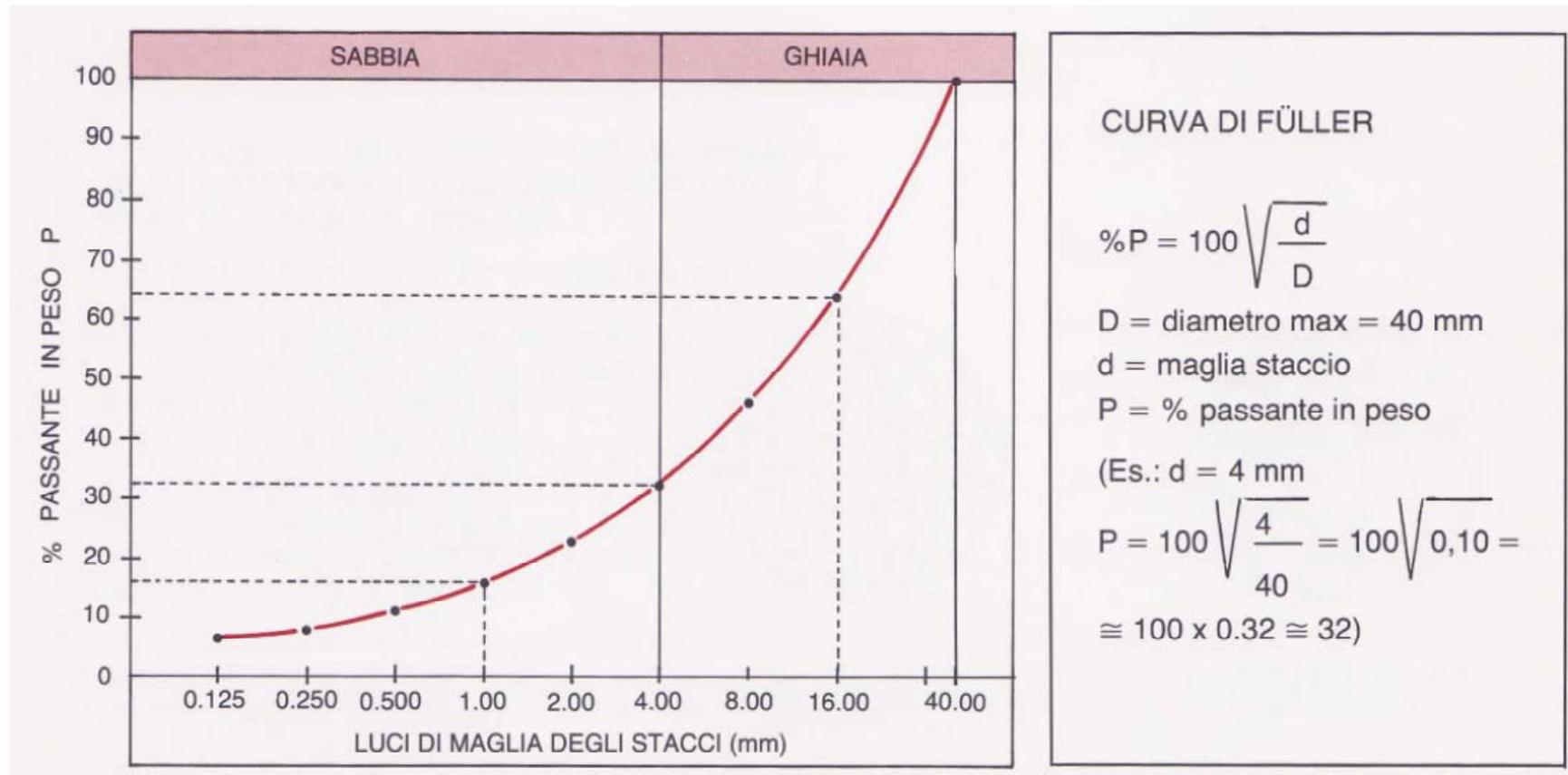
Un semplice esame visivo può talvolta fornire un'idea della qualità dell'aggregato: si osserva in particolare la forma e lo stato superficiale dei granuli (forma arrotondata e superficie compatta e non alterata). Gli aggregati devono essere puliti, perché le impurità influiscono negativamente sulla resistenza del calcestruzzo e possono provocare sfioriture, rigonfiamenti, fessurazioni. Le impurità più comuni sono il limo, l'argilla, le materie organiche, i terreni vegetali, i residui di carbone etc... Il mezzo più semplice ed immediato per accertarsi se l'aggregato è pulito è ancora quello visivo. In particolare si può prendere in mano un pugno di sabbia e strofinarla un po'; se il palmo della mano resta pulito, si può ritenere accettabile il materiale.

L'acqua da impiegare nella confezione del calcestruzzo deve essere sufficientemente pura e non deve contenere apprezzabili quantità di sostanze nocive, quali limi, argille, humus, acidi organici, alcali e sali. Se disponibile, l'acqua d 'impasto più sicura è quella potabile: altrimenti occorre analizzare chimicamente quella che si intende impiegare in modo da accertarne l'idoneità. Il semplice odore e colore non sono criteri sufficienti per giudicare della sua qualità. Sono comunque da scartare le acque di rifiuto, quelle provenienti da fabbriche chimiche in genere, da aziende di prodotti alimentari, da concerie e da altre aziende industriali: particolarmente dannosa è la presenza di residui grassi, oleosi e zuccherini, perché anche piccole tracce di queste sostanze possono disturbare la presa e l'indurimento del calcestruzzo. L'acqua di mare pur non essendo consigliabile può tuttavia essere usata in particolari casi in cui non sia disponibile quella dolce.

Oltre ai componenti normali (cemento, aggregati, acqua), si usano spesso dei prodotti chimici come additivi alla miscela. Gli additivi hanno lo scopo di migliorare certe prerogative del calcestruzzo, ad esempio i fluidificanti e superfluidificanti migliorano la lavorabilità degli impasti senza aumentare la quantità di acqua richiesta. Ci sono poi additivi che ritardano la presa del cemento oppure l'accelerano; additivi che introducono l'aria, migliorando così la resistenza al gelo, e quelli che conferiscono qualità impermeabilizzanti. L'uso degli additivi deve essere fatto con attenzione seguendo le istruzioni del fornitore. Un uso non corretto, specie nella quantità può dare effetti secondari negativi.



Deve accadere che ogni granulo di aggregato risulti avvolto dalla pasta, e che tra un grano e l'altro non rimangano vuoti, o comunque che siano i più piccoli possibili. L'aggregato deve essere composto da grani di dimensione assortita, secondo una composizione granulometrica scelta in modo appropriato.



Ideale sarebbe avere un aggregato diviso in 4 frazioni granulometriche: tra 0 e 1 mm, tra 1 mm e 4 mm, tra 4 e 16 mm e tra 16 e 40 mm. Così si otterrebbe rapidamente una distribuzione granulometrica soddisfacente prendendo ad esempio: il 15% della frazione 0 - 1 mm; il 15% della frazione 1 - 4 mm; il 35% della frazione 4 -16 mm; il 35% della frazione 16 - 40 mm



Calcestruzzo armato

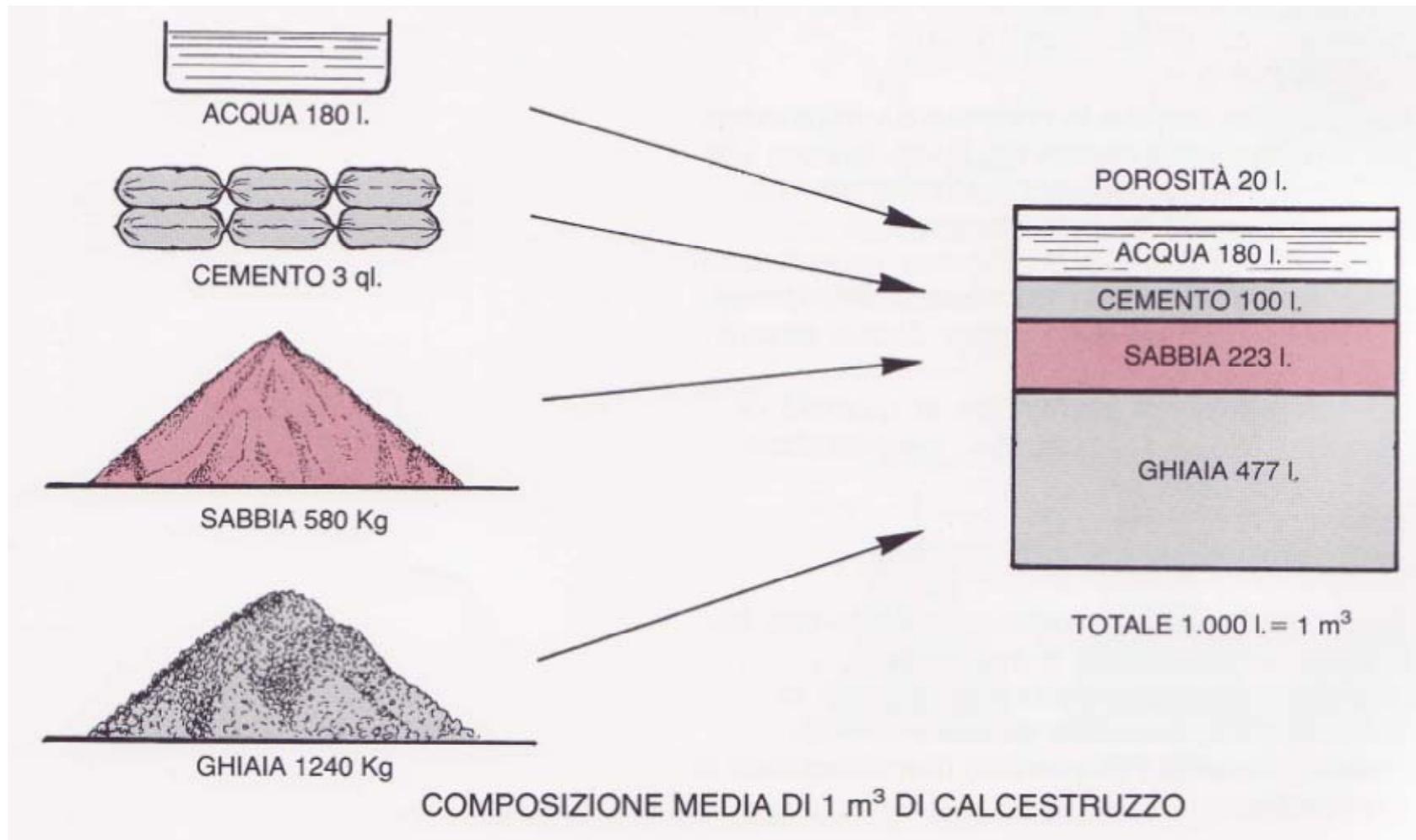
A/C	Resistenze medie a 28 giorni dei calcestruzzi					
	Cemento					
	325		425		525	
	(N/mm ²)	(Kg/cm ²)	(N/mm ²)	(Kg/cm ²)	(N/mm ²)	(Kg/cm ²)
0,50	30	300	40	400	50	500
0,60	25	250	32	320	40	400
0,70	20	200	25	250	30	300
0,80	15	150	20	200	25	250

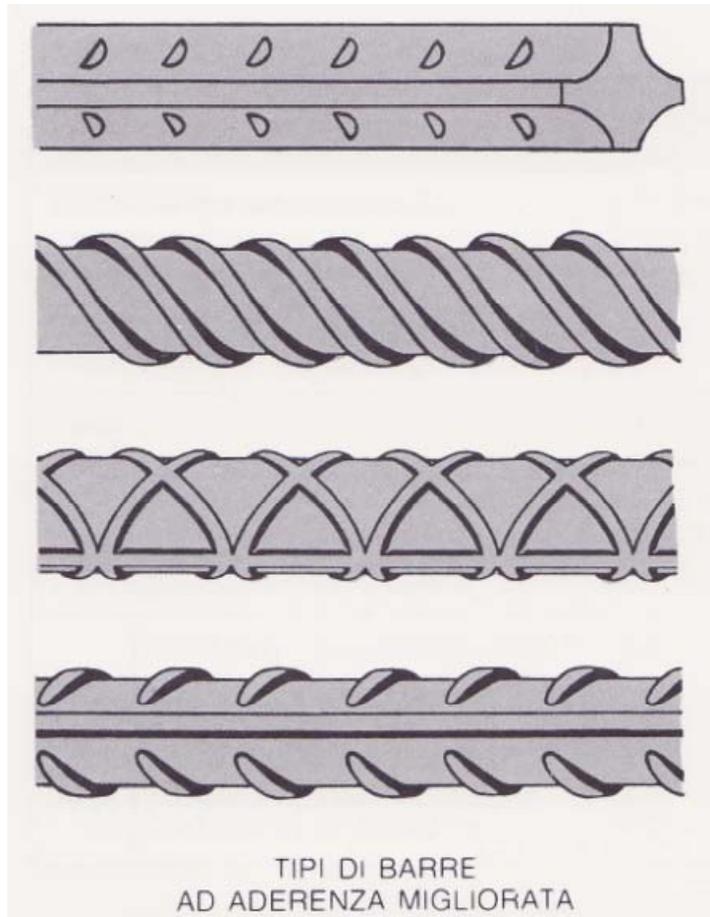
una volta definite le caratteristiche dei materiali componenti, si tratta di stabilire in quali proporzioni devono essere mescolati tra loro per ottenere un impasto che abbia:

1. adeguata LAVORABILITA' allo stato fresco
2. necessaria RESISTENZA allo stato indurito

La **LAVORABILITA'** è l'attitudine del calcestruzzo fresco ad essere manipolato e messo in opera; questa caratteristica è misurata attraverso la consistenza dell'impasto fresco, cioè il suo grado di fluidità.

La **RESISTENZA** è determinata sostanzialmente dalla resistenza della pasta che è l'elemento più debole.





Le armature metalliche per cemento armato hanno la forma di barre di acciaio tonde, dette anche tondini. I diametri delle barre variano da 5 a 26 mm, mentre le lunghezze commerciali raggiungono i 12-15 m. Gli acciai utilizzati per la produzione delle barre possono essere suddivisi in:

- Acciai dolci laminati a caldo, senza particolari trattamenti successivi
- Acciai incruditi a freddo, sottoposti a trattamenti speciali a freddo per raggiungere una maggiore resistenza e una minore deformazione a rottura
- Acciai speciali, che vengono temperati o rinvenuti

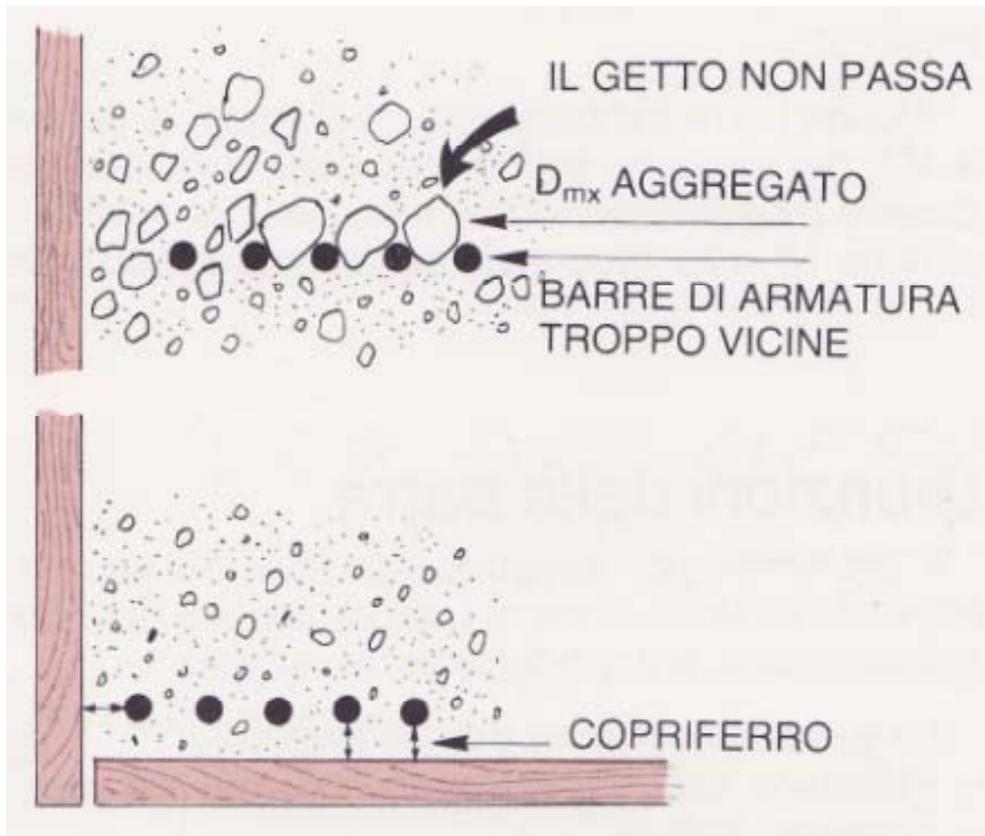
Per la confezione delle barre si impiegano acciai unificati laminati a caldo ad alta duttilità, il B450C, per tutte le tipologie di prodotto (barre, rotoli, reti e tralicci). Questo acciaio è caratterizzato dai seguenti valori nominali delle tensioni:

f_y nom 450 N/mm² tensione caratteristica di snervamento

f_t nom 540 N/mm² tensione caratteristica di rottura

Le armature nelle strutture in c.a. devono essere poste nelle posizioni in cui è richiesta una resistenza agli sforzi di trazioni (resistenza che il cls non è in grado di fornire). Visto che gli elementi strutturali sono soggetti a sollecitazioni composte e variabili la disposizione delle barre dovrà seguire la variazione delle stesse sollecitazioni. In più si deve tener conto di alcuni fattori, quali:

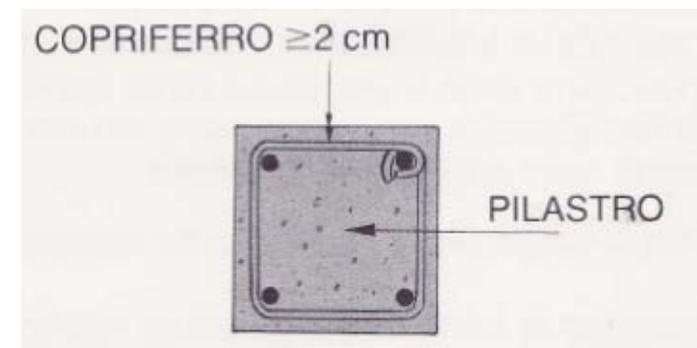
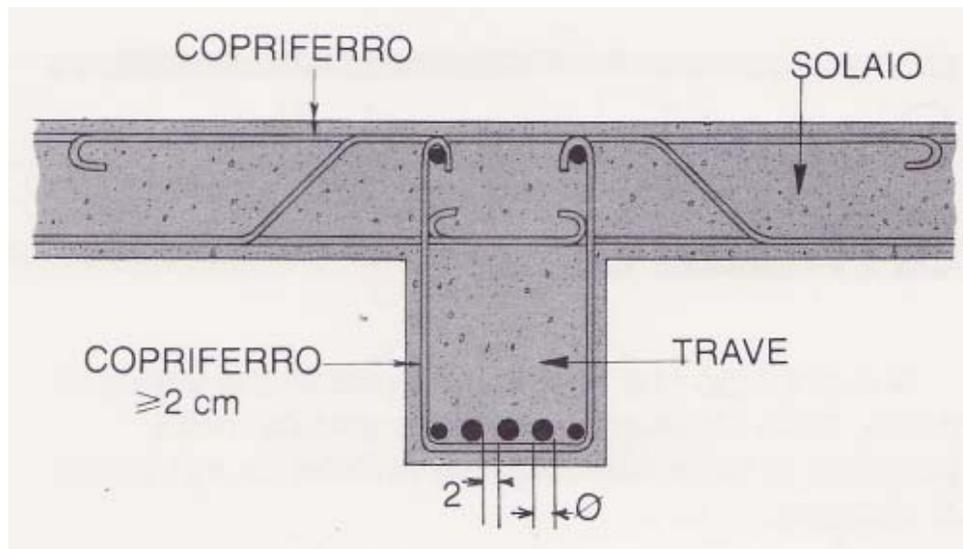
- 1. Attraverso le barre dovrà passare il getto del cls e gli strumenti per il suo costipamento**
- 2. Le barre dovranno essere protette verso l'esterno da un adeguato spessore di cls**
- 3. Le barre dovranno costituire un'armatura continua con una solida aderenza alla massa del cls**

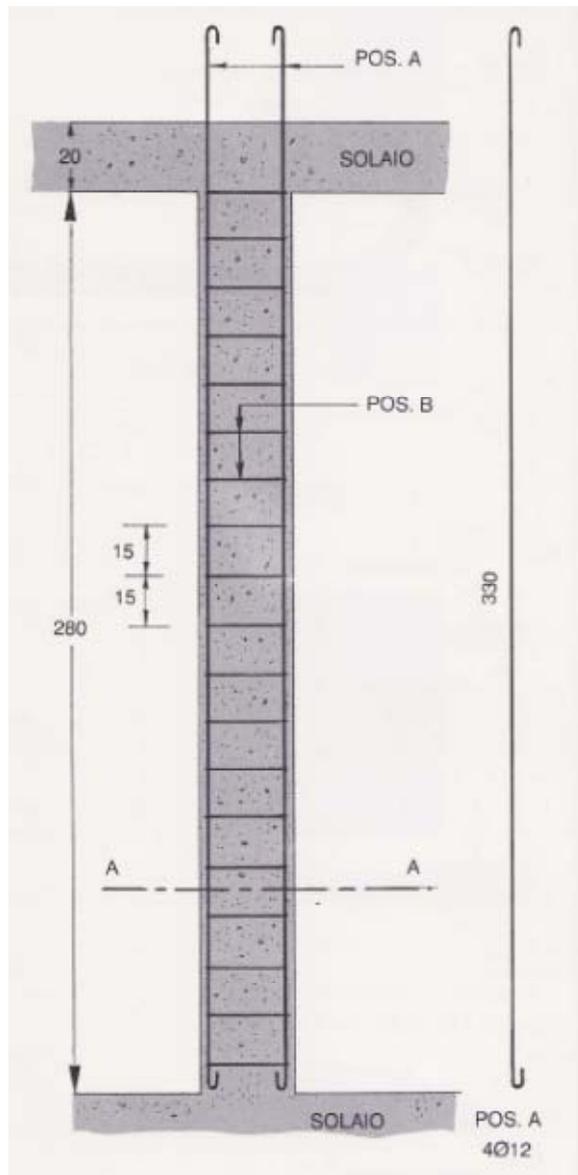


La distanza libera tra le barre deve essere uguale al maggiore tra i valori:

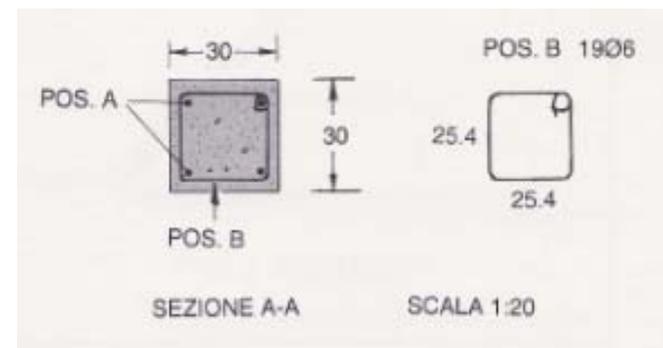
- 2 cm
- 1 volta il diametro del cerchio circoscritto alla maggiore barra adiacente
- 1.2 volte il diametro massimo dell'aggregato

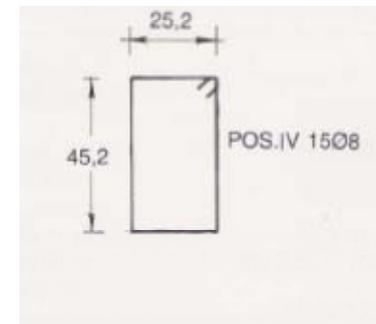
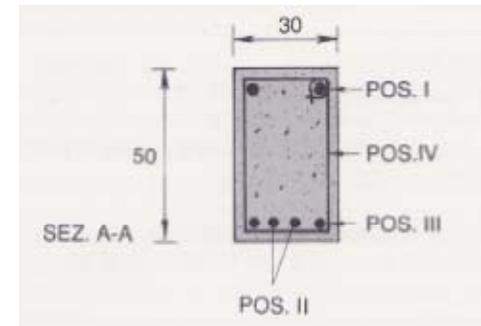
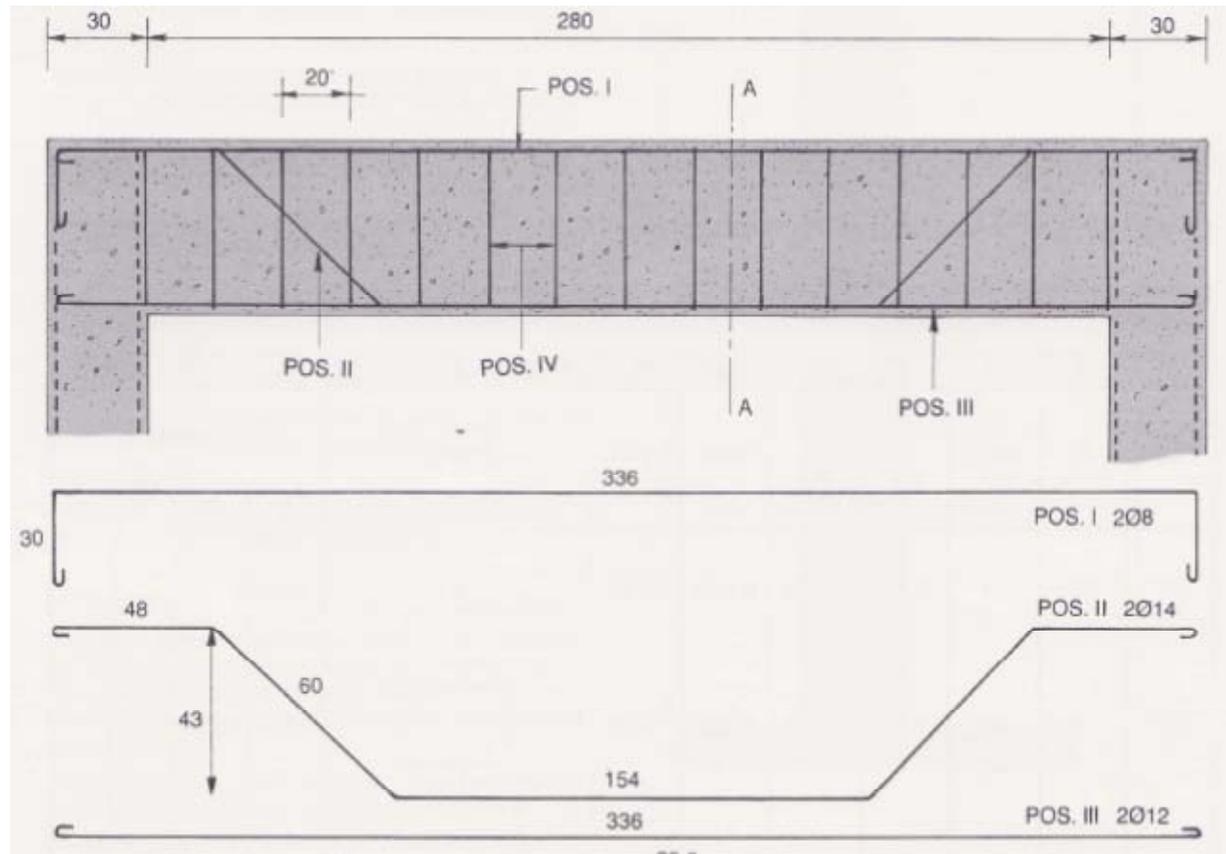
Per assicurare un'adeguata durabilità alle strutture in c.a. è necessario che tutte le barre metalliche siano ricoperte da uno strato di calcestruzzo. La superficie dell'armatura resistente deve cioè scostarsi dalla faccia esterna del getto, di una quantità variabile a seconda dei casi. Per le strutture comuni, travi e pilastri, il ricoprimento, copriferro, può variare da 2 a 5 cm. Il valore più basso vale nel caso di strutture che si trovano in ambiente poco aggressivo (ad esempio nell'interno dei fabbricati), il valore più alto per ambienti molto aggressivi con presenza di liquidi o gas corrosivi (acque pure, salmastre, gas o terreni corrosivi). Nel caso di strutture a sezione sottile, come ad esempio solette, diaframmi, elementi prefabbricati, il copriferro può diminuire fino a 1 – 2 cm.



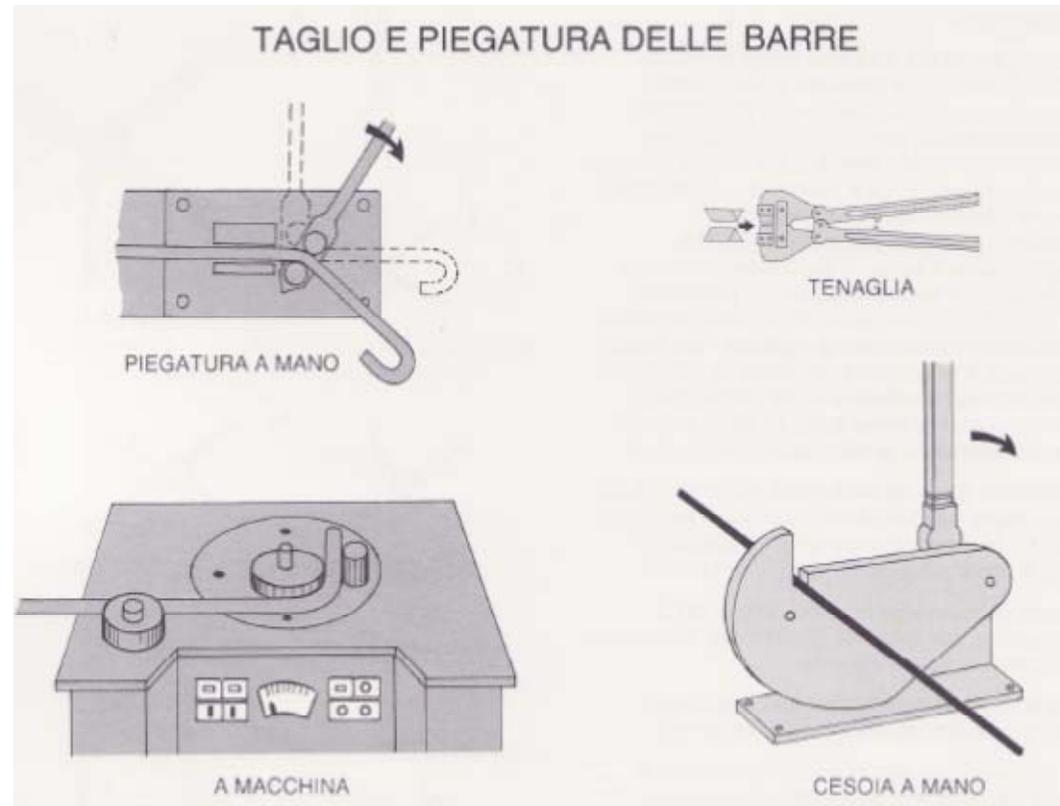


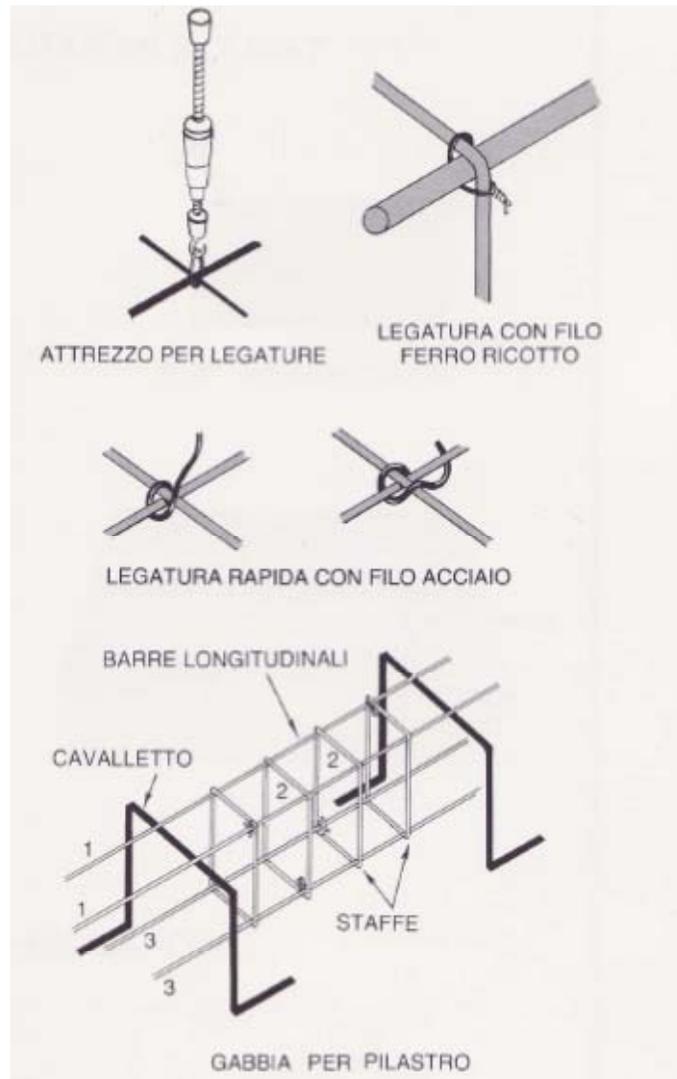
I disegni di progetto per una struttura in c.a. comprendono tutte le istruzioni relative ai ferri di armatura: posizioni, forma, lunghezza e peso. La rappresentazione viene fatta indicando con una linea sottile il profilo della struttura finita e all'interno di essa con linee marcate i ferri di armatura, andando poi a corredare il tutto con i disegni dei particolari. Tutte le informazioni precedenti vengono poi riassunte in una tavola detta "distinta dei ferri".





Le operazioni necessarie alla lavorazione delle barre metalliche consistono essenzialmente nella preparazione delle barre dritte con la lunghezza totale richiesta, e nella piegatura delle barre stesse per ottenere la sagomatura prevista nel progetto. Queste operazioni possono essere fatte in cantiere usando semplici attrezzature come le cesoie per il taglio, ed un bancone con piastra ed attrezzo piegaferri; le stesse operazioni possono però essere affidate a macchine più o meno automatiche.





Per costruire la gabbia di un pilastro si dispongono su cavalletti le barre longitudinali esterne, su queste si infilano poi le staffe e quindi ad esse si appendono le altre barre longitudinali. Si eseguono poi le quattro legature di ogni staffa, facendo ruotare nelle staffe successive la posizione degli uncini, in modo che questi punti deboli non vengano a trovarsi tutti nella stessa direzione. Le legature sono fatte con filo di ferro cotto passato attorno alle barre da legare e poi stretto con tenaglie o con speciale attrezzo. Per una legatura rapida si usano anche dei monconi di acciaio, appositamente sagomati. Con lo stesso sistema si possono montare le gabbie di travi o di altri elementi più complessi.

