

In un cantiere edilizio, si distinguono tre tipi di calcestruzzi gettati in opera:

- il calcestruzzo di regolarizzazione; si tratta di un calcestruzzo magro, impiegato sul terreno in uno strato sottile per evitare che il calcestruzzo di fondazione si mescoli con la terra, compromettendone la resistenza;
- il calcestruzzo a basso dosaggio di cemento, formato da inerti di grandi dimensioni e mediamente dosati, viene impiegato di solito per la realizzazione di fondazioni massicce, di pozzi, di muri a sezione elevata (muri di sostegno, per esempio). Per l'assenza di armature, si suppone che questo calcestruzzo possa resistere solo alle sollecitazioni di compressione;
- il calcestruzzo armato o gettato in cassaforma, impiegato per la realizzazione di strutture edili.

Il calcestruzzo armato deriva dalla combinazione di due materiali complementari: il calcestruzzo, resistente alla compressione, e l'acciaio, resistente alla trazione. Il calcestruzzo armato, nel 95% dei casi è formato da:

- cementi nelle classi 45 o 55;
- aggregati medi (sabbia o ghiaia).

L'acciaio viene introdotto nel calcestruzzo principalmente sotto forma di:

- armature con tondini lavorati e assemblati (calcestruzzo armato);
- cavi (calcestruzzo precompresso);
- profilati nei diversi tipi in commercio (a "I", "H" o "T") che, rivestiti di calcestruzzo, costituiscono elementi misti compressi (pilastri, setti ecc.) o tesi (lastre e travi).

Per gettare in opera il calcestruzzo in cantiere occorre quindi il calcestruzzo propriamente detto, le armature e un cassero.

4.1 Posa in opera dei calcestruzzi

4.1.1 Impasto e mescolatura

4.1.1.1 Acqua di impasto e rapporto A/C

L'acqua è il fluidificante di base delle malte e dei calcestruzzi. Per il confezionamento di ciascun calcestruzzo esiste un preciso rapporto acqua/cemento (A/C), che permette la coesione ottimale.

L'eccesso dell'acqua di impasto è deleterio perché provoca perdita di omogeneità, trasudamento e se-

gregazione, ritardo di presa, diminuzione delle resistenze meccaniche e un aspetto grezzo delle superfici di disarmo.

Nella determinazione del peso dell'acqua occorre, poi, tenere conto di quella già presente negli aggregati umidi.

L'acqua di impasto non deve contenere materiale organico, sostanze in sospensione superiori a 2 g/l, impurità in quantità superiori a 15 g/l (a condizione che queste non siano incompatibili con il cemento). Non deve essere contaminata da rifiuti industriali. È bene notare che l'acqua marina può essere impiegata, al massimo, per i calcestruzzi Portland non armati. Il rapporto peso A/C ottimale può essere determinato ricorrendo a delle prove di lavorabilità; generalmente corrisponde all'incirca a 0,4.

4.1.1.2 Mescolatura

La mescolatura si esegue per ottenere un impasto omogeneo e lavorabile. La composizione impiegata, verificabile mediante eventuali prelievi, prevede la miscela di costituenti nella stessa proporzione.

Si distinguono tre tipi di betoniere:

- ad asse verticale;
- ad asse orizzontale;
- ad asse inclinato (dove l'angolo di inclinazione rispetto a quello orizzontale è generalmente inferiore a 20°).

La betoniera ad asse verticale ha prestazioni superiori rispetto alle altre, con un tempo minimo di mescolamento più breve. La tabella 4.1 riporta i tempi minimi di mescolamento (in secondi e in giri), dopo la fase di carico di una betoniera avente diametro di 1 m.

Tabella 4.1 – Tempo minimo di mescolatura

Tipo di betoniera	Secondi	Giri
Ad asse verticale	30	8
Ad asse orizzontale	60	20
Ad asse inclinato	120	40

Se il diametro D è superiore a 1 m, il tempo minimo per eseguire la mescolatura, e quindi il numero di giri, deve essere moltiplicato per \sqrt{D} (dove D è espresso in metri).

4.1.1.3 Falsa presa

Nei commenti non ufficiali alla norma che disciplina i cementi si dice che, dopo un tempo sufficiente in betoniera, il fenomeno della falsa presa non dovrebbe verificarsi e che comunque dovrebbe essere individuato secondo un metodo normalizzato. Questo fenomeno è caratterizzato da un brusco aumento della viscosità del materiale, la cui origine sarebbe imputabile alla disidratazione del gesso sopravvenuta durante la macinazione del cemento¹, o a causa di una prolungata permanenza nel silo a una temperatura elevata (100 °C). Bisogna fare attenzione a non confondere la falsa presa (che è un fenomeno plastico e mai chimico) con la presa rapida o accelerata. La prima si differenzia dalla seconda in quanto praticamente non sprigiona calore e la pasta, pur rimanendo a lungo nella betoniera, conserva la propria consistenza normale (attenzione a non commettere l'errore di aggiungere acqua nel tentativo di correggere la falsa presa).

4.1.1.4 Lavorabilità

In un calcestruzzo fresco una maggiore lavorabilità dipende da un minore attrito interno ottenibile con una minima quantità di acqua d'impasto.

È possibile stimare il valore dell'attrito interno con l'angolo di abbassamento naturale (o angolo di attrito interno, determinato dalla quantità di calcestruzzo fresco su una superficie piana. È possibile stimare la lavorabilità ottimale con apposite prove.

● Prova del cono di Abrams

Questa prova consiste nel riempire con il calcestruzzo fresco una forma troncoconica (diametro 10 e 20 cm con h = 38 cm), misurandone poi l'abbassamento dopo averlo liberato (Tab. 4.2).

Tabella 4.2 – Prova di lavorabilità con il cono di Abrams

Natura dei calcestruzzi	Cedimento (cm)
Calcestruzzo compatto destinato a essere vibrato	0-2
Calcestruzzo compatto per opere massive	3-4
Calcestruzzo plastico per opere in c.a.	5-7
Calcestruzzo fluido per solette e setti	8-15

● Prova di plasticità o lavorabilità

Questo tipo di prova consiste nel misurare il tempo di vibrazione affinché il calcestruzzo si spanda da uno stampo appositamente predisposto:

¹ Il gesso disidratato richiede molta acqua e al momento dell'impasto presenta dei cristalli che induriscono la pasta.

- nell'apparecchio EDF², modello Meynier-Orth-Diernat, si lascia affondare un pistone, misurando la profondità di penetrazione e il tempo. Questo dispositivo è utile nel caso dei calcestruzzi vibrati e di quelli plastici;
- nella prova di lavorabilità, si utilizza un dispositivo Lesage del tipo LCPC³, in cui si misura il tempo di spandimento del calcestruzzo per raggiungere diversi riferimenti sotto l'effetto delle vibrazioni. Questo dispositivo è molto sensibile e distingue bene i calcestruzzi secchi.

● Prova con tavola a scosse

Si imprimono delle scosse a una tavola sulla quale è distribuita una pasta di calcestruzzo. Le scosse, provocate da un albero a camme manovrato manualmente, devono corrispondere a 15 elevazioni in 15 secondi, seguite da cadute di 1,25 cm. Quindi si misura la distribuzione della pasta, calcolando l'aumento del diametro medio alla base rapportato al diametro iniziale. Questo dispositivo non è adatto per i calcestruzzi con consistenza troppo fluida o troppo secca.

4.1.1.5 Calcestruzzo preconfezionato

Il calcestruzzo preconfezionato, apparso negli Stati Uniti all'inizio del XX secolo, si è largamente diffuso in Francia e in Europa, soppiantando le centrali di betonaggio in cantiere. Il calcestruzzo preconfezionato consente:

- di ordinare il tipo di calcestruzzo richiesto;
- di garantire la qualità grazie all'autocontrollo e alle registrazioni effettuate nelle centrali;
- di semplificare l'organizzazione del cantiere, in particolare la gestione degli approvvigionamenti variabili.

4.1.2 Getto del calcestruzzo

Dopo aver mescolato (impastato) gli aggregati, il cemento e l'acqua, si procede a gettare il calcestruzzo quando è ancora umido e lavorabile. Il trasporto del calcestruzzo dalla betoniera fino al luogo della gettata si effettua sia tramite una gru munita di benne, sia, in certe condizioni di lavorabilità, con una pompa.

Nella fase del getto, occorre prevenire determinati movimenti interni del calcestruzzo considerati "nocivi", tra cui si possono citare:

- la segregazione, gli elementi pesanti cadono in fondo alle benne;
- la flocculazione, aggregazione disordinata delle particelle.

² EDF, Elettricità di Francia.

³ LCPC, Laboratorio centrale dei ponti e carreggiate.

4.1.3 Vibrazione del calcestruzzo

Allo scopo di ripartire correttamente gli aggregati e garantire la fluidità del calcestruzzo all'interno dei casseri, lo si vibra con diversi metodi. L'effetto del vibratore equivale a un sollevamento verso l'alto; questa forza viene detta espansione poiché tende a separare le superfici di contatto. Per permettere un movimento senza attrito, occorre far agire un'energia vibratoria in modo tale che l'espansione sia superiore alla pressione subita dal calcestruzzo.

Le molteplici superfici di contatto tra gli aggregati sviluppano delle sollecitazioni di attrito la cui risultante è un coefficiente globale di attrito interno. La vibrazione ha quindi l'effetto di ridurre o annullare l'attrito interno: il calcestruzzo senza attrito è quindi un liquido che riempie gli stampi e le casseforme spontaneamente.

La vibrazione permette di diminuire la quantità dell'acqua di impasto, aumentandone quindi la resistenza. Al contrario, una parte di calcestruzzo vibrato male o per niente va a detrimento dell'intera costruzione edile.

A seconda del caso, si utilizzano tipi differenti di vibratorii.

4.1.3.1 Tipi di vibratorii

● *Vibratorii esterni*

Si fissano sulle casseforme di acciaio che fungono quindi da membrane vibranti; l'ubicazione e la distanza tra vibratorii devono essere studiate secondo ciascun cassero; questo tipo di vibratore è adatto a elementi di modesto spessore con un'elevata densità di ferro.

● *Vibratorii superficiali*

Si tratta di tavole, di travi o di aste vibranti, oppure di vibrofinitrici. Lo spessore del calcestruzzo interessato è compreso tra i 10 e i 20 cm; la vibratura è per solette, pannelli ecc.

● *Tavole vibranti*

Le si utilizza nei prefabbricati per la realizzazione di elementi piani (solette, muri ecc.). Le aste periferiche degli stampi sono generalmente bloccate sulla piastra; in caso contrario, il movimento si trasforma in sollecitazioni.

● *Vibratorii interni (pervibratorii)*

Sono vibratorii dotati di aghi vibranti (lunghezza 40-80 cm; diametro 60 o 80 mm) posizionati sull'estremità di un tubo ad aria compressa. Introdotti e spostati manualmente nella massa di calcestruzzo,

questi vibratorii interni sono i più semplici, i più economici e i più efficaci da usare.

Un vibratore interno si caratterizza per la frequenza (tra 1.500 e 16.000 vibrazioni al minuto) e per la potenza (energia vibratoria fornita per unità di tempo, espressa generalmente in kW).

Occorre scegliere la frequenza secondo la dimensione dei grani che si intendono vibrare, cioè in funzione della granulometria del calcestruzzo:

- le basse frequenze (1.500) mettono in movimento gli aggregati di grandi dimensioni;
- le medie frequenze (3.000-6.000) fanno vibrare la ghiaia;
- le alte frequenze (12.000-20.000) agiscono sulla malta e sul cemento.

Utilizzando le alte frequenze, la malta, resa fluida, svolge una funzione lubrificante tra gli aggregati che quindi scorrono liberamente; inoltre, la malta viene essa stessa costipata dalla vibrazione. Agire direttamente su una massa più modesta risulta più economico, giustificando così la preferenza per le alte frequenze.

Il raggio di azione di un vibratore interno è la distanza oltre la quale non è più in grado di produrre lo stato liquido necessario alla posa in opera e al costipamento.

Questo raggio R viene misurato mediante prove ripetute.

Si misura l'affondamento di una barra (diametro 20 mm, lunghezza 1 m) appoggiata sul calcestruzzo: l'affondamento fino al fondo del cassero deve essere ottenuto nel giro di un minuto. Per ottenere la completa vibratura del calcestruzzo, occorre spostare l'ago di 1,5 R (l'aumento del raggio d'azione è pari alla radice quadrata della potenza del vibratore).

4.1.3.2 Costipamento

La vibratura non determina soltanto la fluidità del calcestruzzo, per consentirne il getto, ma anche il costipamento. Infatti, una parte dei grani scartati in un primo tempo dalla loro posizione iniziale, sotto l'effetto delle sollecitazioni, raggiungono una posizione più stabile, mentre l'aria viene espulsa. Ne deriva un'accresciuta compattezza: il calcestruzzo si comporta come un fluido viscoso contenente degli elementi tendenti a fuoriuscire sotto l'azione della pressione.

La pressione favorisce il costipamento, che pertanto è migliore in profondità che non in superficie. Se si fa agire una pressione esterna P per aumentare il costipamento, questa non deve superare una certa pressione P_0 per compattare i grani; detta pressione P_0 è il valore dell'espansione, in quanto quest'ultima è la forza di

scarto che si oppone alla pressione, forza necessaria allo scorrimento dei grani senza attrito.

La velocità di costipamento è massima con una pressione uguale alla metà dell'espansione; in pratica, questa pressione non supera i 200 g/cm², il che corrisponde all'altezza massima del calcestruzzo di 1 m al di sopra del fondo del cassero.

4.1.3.3 Segregazione

Poiché il calcestruzzo ha una consistenza fluida durante la vibrazione, i grani di maggiore dimensione tendono a scendere a causa della gravità: si ha allora l'effetto segregazione. In presenza di un calcestruzzo troppo fluido con malta e acqua in eccesso, il pietrisco si accumula sul fondo. Se invece la malta è presente in quantità modesta, si ha il fenomeno inverso, per cui la malta discende verso il fondo.

4.1.3.4 Fine della vibratura

Con un calcestruzzo ben confezionato, il riempimento e il costipamento si possono ritenere terminati, quando la boiaccia di cemento compare sulla superficie superiore come un sottile strato.

4.1.4 Presa e indurimento

A questo punto il calcestruzzo si rapprende, cioè "fa presa"; non è più lavorabile e, dopo un certo lasso di tempo, si indurisce, assumendo allora le proprie caratteristiche di resistenza.

Nella presa e nell'indurimento, il calcestruzzo emana calore in virtù di una combinazione chimica (reazione esotermica); la temperatura raggiunta nel termine di qualche ora, a una temperatura esterna normale, è pari a 50-60 °C.

4.1.4.1 Getto in climi freddi

La sensibilità del calcestruzzo ai climi freddi si traduce in un aumento dei tempi di presa e un rallentamento dell'indurimento (l'effetto esotermico si manifesta solo dopo 5-7 ore). Quando la temperatura del calcestruzzo è compresa tra +5 °C e 0 °C, ossia ha una media di 2,5 °C, la resistenza del calcestruzzo con cemento Portland a 3 giorni si riduce del 50% (del 65% nel caso di cemento di altoforno).

È ancora più ridotta se il freddo si manifesta più avanti nel processo di indurimento: se compare soltanto 3-7 giorni dopo, la resistenza del calcestruzzo di cemento Portland si riduce del 10% a 7 giorni (del 40% nel caso di calcestruzzo di cemento d'altoforno).

La normale resistenza viene generalmente recuperata in seguito. Se si vogliono evitare ritardi troppo importanti nel disarmo, bisogna allora eliminare i cementi con più del 20% di loppa e impiegare, preferibilmente, i cementi di classe 55 e 45. Il dosaggio non dovrà essere inferiore a 350 kg/m³, e la quantità dell'acqua di impasto dovrà essere ridotta al minimo indispensabile. Al di sotto di 0 °C, l'indurimento è completamente inibito.

Il getto in climi rigidi richiede delle precauzioni particolari, a seconda della temperatura:

● Con temperature fredde senza gelo

Ottenere calcestruzzo, allo scarico dalla betoniera, a una temperatura superiore a 10 °C (riscaldamento degli aggregati, dell'acqua di impasto ecc.). Gettare in casseri isolanti, soprattutto in caso di elementi di modesto spessore.

● Con gelo moderato

Ricorrere all'impiego di un antigelo: si raccomanda il cloruro di calcio (1% del peso del cemento), tanto più che agisce anche come acceleratore di presa (l'uso con i cementi alluminosi deve essere evitato).

4.1.4.2 Getto in climi caldi

È bene ricordare alcune raccomandazioni:

- controllare l'evaporazione dell'acqua di impasto;
- coprire o bagnare il calcestruzzo fresco quanto più a lungo possibile, minimo 5 giorni (secondo un moderno procedimento, si rende impermeabile la superficie del calcestruzzo fresco, con un prodotto che forma una pellicola impermeabile all'evaporazione; questa pellicola scompare poi lentamente);
- notare che il cemento alluminoso (fuso) si decompone se raggiunge una temperatura superiore a 35 °C prima dell'indurimento.

4.1.4.3 Trattamento del calcestruzzo con calore

Il punto fondamentale è quello di evitare che il calcestruzzo perda l'acqua d'impasto, pena l'arresto totale dell'idratazione.

● Procedure di riscaldamento

È possibile riscaldare i casseri facendo circolare acqua calda o vapore oppure elettricamente; le superfici libere sono protette da coperchi isolanti che riducono l'evaporazione e le dispersioni di calore. Nei prefabbricati, si utilizzano delle campane impermeabili che ricoprono completamente i casseri.

Ancora, è possibile riscaldare il calcestruzzo utilizzando le armature come resistenze elettriche. Per un utile trattamento dal calore, il calcestruzzo deve essere compatto e, preferibilmente, vibrato.

● *Tempi e temperatura di riscaldamento*

Nel caso di un calcestruzzo CEM V, il tempo di riscaldamento necessario per ottenere una resistenza paragonabile a quella di 4 giorni di stagionatura a 20 °C è di: 4 ore a 80 °C, 6 ore a 70 °C, 9 ore a 60 °C, 12 ore a 50 °C (tempi ai quali bisogna aggiungere, qualora il calcestruzzo non sia stato impastato a caldo, la metà di quello occorrente all'aumento di temperatura).

È opportuno quindi preriscaldare il calcestruzzo a 30-50 °C (tempi di protezione per le casseforme da 8 a 12 ore, in modo che la temperatura rimanga superiore a 60 °C). Se la temperatura supera gli 80 °C o al massimo i 90 °C, vi è rischio di essiccamento del calcestruzzo per evaporazione dell'acqua indispensabile alla stagionatura. In generale, è pericoloso eseguire trattamenti per climi caldi sui cementi alluminosi, di loppa e soprasolfatati.

4.1.5 Ripresa di getto

La realizzazione di opere in calcestruzzo in tempi diversi comporta delle riprese di getti. Occorre tenere in debita considerazione la caduta di resistenza alle riprese, tanto più elevata quanto maggiore è la differenza di tempo tra una gettata e l'altra. I giunti a 45° nel senso della trazione presentano cadute meno significative rispetto ai giunti di getti dritti; anche il trattamento del giunto con acqua riduce la caduta di resistenza.

La tabella 4.3 indica le cadute di resistenza nei giunti a seconda che il tempo trascorso dalla presa sia di 1 o di 7 giorni.

Tabella 4.3 – Cadute di resistenza ai giunti

Tempo trascorso	Giunto	Pulito a secco	Pulito ad acqua
1 giorno dopo la presa	a 90°	-65%	-20%
	a 45°	-25%	0%
7 giorni dopo la presa	a 90°	-80%	-70%
	a 45°	-50%	-35%

Per migliorare la qualità delle riprese, in caso di gettata discontinua a brevi intervalli di tempo, si può aggiungere un ritardante di presa al primo calcestruzzo gettato, in maniera tale che la gettata del nuovo calcestruzzo possa cominciare prima della presa del vecchio calcestruzzo.

Per intervalli di tempo più importanti, si può fare ricorso:

- all'applicazione, sulla ripresa, di una malta alla quale si sia aggiunto del poliaccetato di vinile (resina sintetica) in ragione del 10% del peso del cemento

(l'aderenza è eccellente a condizione che l'incollaggio sia mantenuto secco);

- a tecniche di incollaggio.

Sono previste speciali disposizioni per i calcestruzzi armati, allo scopo di garantire lunghezze di ricoprimento alle armature.

4.1.6 Incollaggio del calcestruzzo

È possibile realizzare l'incollaggio di elementi di calcestruzzo tra di loro o con altri materiali diversi: metalli, laterizi, pietre ecc. L'aderenza si ottiene grazie all'impiego di resine sintetiche che possono essere utilizzate:

- pure e stese con un pennello;
- caricate con farina minerale e stese con una spatola;
- miste a sabbia fine (senza cemento) e messe in opera con la cazzuola.

È possibile incollare: calcestruzzo secco su calcestruzzo secco, calcestruzzo bagnato su calcestruzzo secco o bagnato, calcestruzzo fresco su calcestruzzo indurito (ripresa di getto).

Questa tecnica consente di riparare parti in calcestruzzo danneggiate le cui facce da incollare devono essere prive di boiaccia di cemento e accuratamente spazzolate.

Le colle più efficaci sono quelle a base di resina epossidica + carica minerale o di resina epossidica + tiokol (caucciù sintetico). La loro efficacia, verificata mediante una serie di prove, è tale che la rottura dei provini prismatici di calcestruzzo avviene sempre in parti diverse da quelle già incollate.

4.2 Presa e stagionatura del calcestruzzo, comportamento nel tempo

Il calcestruzzo è un materiale in continua evoluzione: le sue proprietà subiscono delle modifiche nel corso della sua esistenza (si è tentato di seguire sperimentalmente questa evoluzione almeno per i primi sei anni). L'idratazione del cemento può continuare, lentamente, per anni, aumentando così le resistenze meccaniche e i moduli di deformazione. Il calcestruzzo lascia evaporare una parte dell'acqua di impasto, essendo in grado di assorbire anche l'umidità dell'aria. A seconda delle condizioni atmosferiche, la temperatura e i carichi applicati, il calcestruzzo diventa sede di numerose trasformazioni.

Innanzitutto, e in maniera del tutto indipendente dai carichi, il calcestruzzo subisce delle contrazioni durante la presa e la stagionatura, dalle quali deriva il termi-

ne di ritiro dato a quei fenomeni le cui conseguenze principali sono le seguenti:

- creazione di tensioni interne, di microfessurazioni (per esempio, tra la pasta di cemento e gli inerti), a detrimento delle caratteristiche di resistenza del materiale, soprattutto alla trazione. Queste tensioni possono essere diverse in superficie e in profondità, sono pertanto legate alla geometria dell'opera realizzata in calcestruzzo;
- creazione di fessure esterne visibili. Nuociono all'estetica e alla durata del calcestruzzo. Se sono abbastanza profonde e se riguardano le armature del calcestruzzo, queste ultime possono facilmente corrodarsi.

4.2.1 Ritiro

4.2.1.1 Ritiro idraulico (o da essiccazione interna)

È dimostrato sperimentalmente che l'indurimento del legante avviene:

- con un aumento di volume apparente della pasta pura⁴ di cemento conservata in acqua;
- con una diminuzione del volume assoluto di questa pasta, il che indica che il volume assoluto degli idrati formati è minore del volume assoluto dell'insieme cemento-acqua.

Questo fenomeno si combina con gli altri due tipi di ritiro idraulico descritti di seguito, senza che se ne possano determinare esattamente le interferenze.

4.2.1.2 Ritiro per evaporazione prima della presa

L'evaporazione prima della presa del calcestruzzo è tanto più elevata quanto maggiore è la superficie di contatto con l'aria: per esempio, nel caso di una soletta. Il calcestruzzo fresco può far evaporare più di un litro di acqua a metro quadrato, all'ora: questo fenomeno si può paragonare all'assorbimento d'acqua nel legno

⁴ Miscela di acqua + cemento.

secco dei casseri o negli aggregati porosi non umidificati. Il ritiro del calcestruzzo fresco è tanto più marcato quanto maggiore è la quantità dell'acqua di impasto (Tab. 4.4).

Tabella 4.4 – Ritiro per evaporazione

A/C (in peso)	Ritiro (mm/m)
0,45	1
0,50	1,5
0,55	2,2

L'evaporazione di quest'acqua, o l'assorbimento da parte del supporto, si traduce nell'assestamento del calcestruzzo, provocando delle microfessure interne ed esterne nelle prime ore successive al getto, e diminuendo di conseguenza la resistenza a trazione ulteriore del calcestruzzo. Le fessure formano una sorta di rete sulla superficie del calcestruzzo o della malta (rivestimento, intonaco).

Questo ritiro plastico comincia nei minuti e nelle ore successive al getto, concludendosi dopo la fine della presa. È stato evidenziato anche un secondo ritiro in questo periodo "critico" prima della fine della presa.

4.2.1.3 Ritiro idraulico dopo la presa

Poiché l'idratazione totale del cemento fissa chimicamente solo il 25% del peso all'acqua di impasto, il ritiro idraulico corrisponde a una perdita di acqua non fissata, qualora l'elemento si trovi in presenza di atmosfera secca. Ma, il cemento idrato che è venuto a formarsi si oppone all'avvicinamento dei grani, per cui il fenomeno precedentemente descritto diminuisce. Dall'atmosfera umida, l'elemento riprende una parte di acqua perduta e quindi il suo volume iniziale.

La misurazione del ritiro dopo la presa si esegue su dei provini (Tab. 4.5). In Francia, i laboratori le effettuano su tre provini prismatici di 4 × 4 × 16 cm, su pasta pura e su malta 1/3 (norme vigenti). Dopo la formatura a 24 ore, questi provini vengono conservati:

Tabella 4.5 – Ritiro dopo la presa

Fenomeni osservabili	Ritiro idraulico controllato a:			
	3 giorni	10 giorni	100 giorni	1.000 giorni
Ritiro in mm/m	-0,4	-0,7	-1,4	-1,7 ⁽¹⁾
Diminuzione del volume dell'acqua d'impasto	-20%	-30%	-40%	-45%
Rigonfiamento	+0,1	+0,23	+0,45	+0,65
Presa d'acqua del volume dell'acqua d'impasto	+10%	+15%	+18%	+20%

⁽¹⁾ Questo valore diventa -2,1 se l'umidità è pari al 25%.

- all'aria (20 °C, 50% di umidità relativa), per misurare il ritiro;
- in acqua a 20 °C, per misurare il rigonfiamento.

4.2.1.4 Elementi del ritiro idraulico

Dopo la presa, quanto sia significativo questo ritiro dipende dalla composizione del calcestruzzo e dal suo impiego.

● Cemento

Poiché il fenomeno del ritiro avviene nella pasta pura, ne deriva che il ritiro del calcestruzzo è tanto più significativo quanto più il dosaggio è elevato. La tabella 4.6 indica i risultati comparativi ottenuti a un anno.

Tabella 4.6 – Ritiro idraulico

Dosaggio (kg)	Ritiro (mm/m)
250	-0,25
300	-0,32
450	-0,40

Il ritiro dopo la presa dipende anche dalla natura del cemento e dalla sua finezza di macinazione; infatti, non tutti i cementi presentano la stessa tendenza alla fessurazione, che è un compromesso tra la velocità di ritiro, l'aumento della resistenza a trazione e il modulo di deformazione.

● Acqua d'impasto

È poco determinante se il rapporto acqua/cemento rimane nei limiti prestabiliti; per esempio, tra 0,45 e 0,60. Al contrario, il ritiro si accentua se all'acqua dell'impasto vengono aggiunti sali solubili, in particolare quelli che agiscono come acceleranti di presa.

● Natura e granulometria degli aggregati

Nel calcestruzzo il fenomeno del ritiro, che riguarda la pasta pura, sarà tanto minore quanto maggiore sarà la sua compattezza, cioè se la sua curva granulometrica è stata ben studiata (eccesso e mancanza di elementi fini aumentano il ritiro). Inoltre, il ritiro sarà tanto più significativo quanto più il modulo di deformazione è modesto (il modulo del calcare è minore di quello del quarzo) e quanto più il diametro degli aggregati è ridotto: un calcestruzzo di 0/10 mm subisce un ritiro due volte maggiore di uno di 0/100 mm⁵.

● Forma delle opere

Se il rapporto superficie di evaporazione/volume è minimo, il ritiro avviene lentamente. In presenza di un

corpo più massiccio il ritiro superficiale e il ritiro assiale avranno un comportamento diverso, con contrazioni differenti tra superficie e interno, spiegando così l'origine delle fessure che compaiono in superficie.

● Armature

Si può diminuire o eliminare il ritiro mediante armature adeguate, perché queste, così come gli aggregati, si contrappongono al ritiro della pasta pura: a titolo esemplificativo, il 2% delle armature possono ridurre il ritiro del calcestruzzo di due o tre volte.

Il ritiro idraulico finale può essere calcolato in virtù di questi diversi parametri, prevedendone l'entità in base ai seguenti valori:

- 0,15 mm/m per le regioni umide;
- 0,20 mm/m per le regioni temperate;
- 0,30 mm/m per le regioni secche.

4.2.1.5 Ritiro termico

Spesso ignorato, questo ritiro R rimane la causa principale della maggior parte delle fessure osservate sulle opere aventi uno spessore superiore a 20 cm. È proporzionale allo scarto di temperatura $\Delta\theta$ presentato dal calcestruzzo tra due momenti dati:

$$R = \alpha \times \Delta\theta$$

dove α è il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo, dell'ordine di $10 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ (debole negli inerti calcarei, più elevato negli inerti silicei).

Il ritiro termico è dovuto alle escursioni termiche che si verificano nel corso delle diverse fasi di formazione del calcestruzzo.

● Periodo di idratazione

Le reazioni di idratazione sviluppano un calore elevato⁶, dissipato tanto più lentamente quanto più la massa del calcestruzzo è importante (la conducibilità termica del calcestruzzo è bassa). Questo doppio fenomeno comporta lo sviluppo di sollecitazioni meccaniche, nonché fenomeni di fessurazione nel caso queste ultime siano superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo.

● Periodo di indurimento

Possono verificarsi dei cali di temperatura, più o meno rapidi, dovuti in particolare alle variazioni climatiche: con $\alpha = 10 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, la variazione della lunghezza del calcestruzzo è di $400 \mu\text{m}$ nel caso di una differenza di 40°C tra estate e inverno.

⁵ L'indicazione 0/10 mm significa che il diametro dei grani è compreso tra 0 e 10 mm.

⁶ Praticamente, il 25% del calore si sprigiona tra l'inizio e la fine della presa.

4.2.1.6 Misure antiritiro

Tutti questi diversi tipi di ritiro possono avere un effetto cumulativo e determinare delle condizioni gravose contro le quali occorre premunirsi, prendendo una serie di precauzioni. In particolare, è opportuno:

- mantenere umida la superficie del calcestruzzo durante i primi giorni (utilizzare, se necessario, un prodotto protettivo);
- prevedere giunti di ritiro abbastanza ravvicinati;
- confezionare un calcestruzzo compatto messo in opera con un buon costipamento;
- utilizzare cementi a basso ritiro interno e a modesto calore di idratazione;
- utilizzare casseforme a forte conducibilità termica (acciaio, per esempio);
- impiegare inerti idonei (senza traccia di argilla), duri, arrotondati, con elevato modulo di deformazione (quindi poco deformabili), con pochissimi elementi fini;
- prevedere armature nelle sezioni più sollecitate (in particolare, nei punti fissi);
- evitare l'essiccamento rapido, dopo il getto, delle parti esposte all'aria e al sole.

4.2.2 Deformazione sotto carico

Il calcestruzzo, come tutti i solidi, si deforma sotto carico. Ma questa deformazione aumenta con il tempo di carico. Si distinguono due tipi di deformazione:

- le deformazioni elastiche istantanee reversibili;
- la deformazione plastica, lenta, irreversibile.

4.2.2.1 Deformazioni elastiche reversibili

La deformazione nel senso di sollecitazione (contrazione a compressione, allungamento a trazione) è accompagnata da una deformazione trasversale di dilatazione o di contrazione, come se la materia volesse resistere a qualsiasi variazione di volume. Il rapporto tra la deformazione trasversale, e , e la deformazione longitudinale, D , viene detto coefficiente (o modulo) di Poisson. Il coefficiente e/D è compreso tra 0,10 e 0,30. Teoricamente, è sempre inferiore a 0,5 e tanto più elevato quanto più il calcestruzzo è giovane. Per misurare le deformazioni, si utilizzano diversi strumenti (quali, per esempio, estensimetri a leva o a corda vibrante, flessimetri), oppure calibri a resistenza basati sulle proprietà della resistenza dei fili metallici che varia con la deformazione subita. Il filo, disposto in genere a pettine, è incollato su carta isolante che si fa aderire sulla superficie del solido da esaminare. La conoscenza dell'elasticità del calcestruzzo è indispensabile per comprendere la deformazione delle opere. Successivamente, occorre considerare il tasso di lavoro e la deformazione elastica relativa.

● Lavoro

Il tasso di lavoro N è il carico applicato per unità di superficie, cioè il rapporto P/S , dove P è il carico applicato e S è la superficie di applicazione.

● Deformazione relativa

La deformazione relativa, d , nel senso di sforzo, è il rapporto tra la deformazione longitudinale D e la lunghezza del cilindro di calcestruzzo, ovvero $d = D/L$.

● Modulo di elasticità

Si definisce il modulo di elasticità E del calcestruzzo come il rapporto tra il lavoro N e la deformazione relativa corrispondente, ovvero:

$$E = \frac{N}{d} = \left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{P}{S}\right)$$

Nei diversi tipi di calcestruzzo, il valore E , dopo 28 giorni di maturazione, varia tra i 200.000 e i 500.000 kg/cm². Pertanto, la deformazione elastica, con un lavoro di 100 kg/cm², nei diversi moduli di elasticità, è riportata nella tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Deformazioni elastiche

E (kg/cm ²)	d (mm/m)
200.000	0,50
300.000	0,33
400.000	0,25
500.000	0,20

Si evince, quindi, facilmente che il calcestruzzo è tanto più deformabile quanto più basso è il relativo modulo di elasticità.

● Variazioni del modulo di elasticità

Il modulo di elasticità aumenta di pari passo con la resistenza e la compattezza del calcestruzzo, e quindi con tutto ciò che contribuisce al suo miglioramento: rigidità degli aggregati, tempi di indurimento, elevata umidità del mezzo ambiente; infatti, il calcestruzzo indurisce meglio all'aria umida (75% di umidità) e in acqua piuttosto che all'aria secca.

Invece, nel caso di calcestruzzo tenuto al caldo, il modulo di elasticità diminuisce quando la temperatura aumenta. La tabella 4.8 indica il calo di E in termini percentuali (temperatura iniziale: 20 °C).

Tabella 4.8 – Variazioni del modulo di elasticità

E (%)	Temperatura finale (°C)
-30	100
-60	200
-75	400

4.2.2.2 Deformazione plastica irreversibile: scorrimento viscoso (fluage)

La deformazione plastica che si sovrappone, nel verso dello sforzo, alla deformazione elastica reversibile, somiglia a quella del bitume o del piombo: si manifesta come una deformazione lenta, irreversibile, che aumenta nel corso dei mesi e degli anni, sotto carico costante, denominata scorrimento viscoso.

Pertanto un provino prismatico di calcestruzzo di 1 m (dosaggio: 350 kg/m³), posto sotto carico per 7 giorni con un tasso di lavoro di 100 kg/cm², all'aria secca (50% di umidità), dà luogo alle seguenti deformazioni:

- deformazione elastica temporanea, -0,33 mm;
- deformazione totale temporanea, -0,50 mm;
- deformazione totale a 21 giorni, -1,25 mm;
- deformazione totale in 1 anno, -1,75 mm;
- deformazione totale in 6 anni, -2,25 mm.

● Influenza dello scorrimento sulla resistenza meccanica

Se lo scorrimento in compressione non influisce sulla resistenza finale, lo scorrimento in trazione fa diminuire la resistenza corrispondente, tanto più, quanto più è elevato il carico applicato. Così, dopo scorrimento di 9 giorni a un carico di 16 kg/cm², la resistenza a trazione del calcestruzzo saggiato passa da 35 a 31 kg/cm².

● Variazioni della deformazione plastica lenta

Fattori di accrescimento dello scorrimento

- Intensità del carico applicato: la deformazione finale è pressappoco proporzionale al carico quando quest'ultimo è inferiore a un terzo del carico di rottura.
- Temperatura (θ) secondo la tabella 4.9.

Tabella 4.9 – Variazioni in funzione della temperatura

θ (°C)	Deformazione (mm/m) dopo 100 giorni di carico
20	0,6
100	1-1,8
200	2-10

- Elasticità degli aggregati: lo scorrimento di calcestruzzi con aggregati calcarei o silico-calcarei è molto maggiore rispetto a quello dei calcestruzzi con aggregati di tipo eruttivo.

Fattori di riduzione dello scorrimento

- Data di messa sotto carico: più tardi avviene, nella stagionatura del calcestruzzo, più lo scorrimento diminuisce. I risultati delle prove effettuate su provini prismatici dopo 5 anni di carico sono riportati nella tabella 4.10 (prismi conservati all'aria secca, ovvero con il 50% di umidità).

Tabella 4.10 – Variazioni in funzione della data di messa sotto carico

Carico effettuato	Fluage (mm/m)
A 7 giorni	2
A 3 mesi	1,5
A 1 anno	0,9

- Ambiente di conservazione prima della messa sotto carico: più questo ambiente è umido (può essere l'acqua stessa), più lo scorrimento è basso. Lo confermano i risultati ottenuti sullo stesso calcestruzzo di cui sopra, al termine di 3 anni sotto carico in ambiente secco (Tab.4.11).

Tabella 4.11 – Variazioni in funzione dell'umidità

Carico	Fluage (mm/m)
Dopo 7 giorni all'acqua	1,5
Dopo 3 mesi all'acqua	0,8

- Dimensioni dell'elemento: lo scorrimento diminuisce con l'aumentare delle dimensioni. I risultati ottenuti su elementi, dopo 500 giorni di carico in ambiente secco (50% di umidità), sono riportati nella tabella 4.12.

Tabella 4.12 – Variazioni in funzione delle dimensioni dei pezzi

Dimensione dei pezzi (cm)	Fluage (mm/m)
7 × 7 × 28	2,1
20 × 20 × 60	1,75
40 × 40 × 120	1,5

4.3 Rottura del calcestruzzo

La rottura del calcestruzzo è dovuta alla separazione degli elementi che lo costituiscono. La resistenza alla rottura è la forza necessaria a produrla. Nel calcestruzzo, la rottura vera e propria è preceduta da una prerottura determinata da numerosissime piccole fessure (microfessure) che, congiungendosi, si propagano portando alla formazione di strappi e alla separazione in tanti pezzetti. La produzione delle microfessure è accompagnata da leggeri scricchiolii caratteristici, rilevabili con un microfono. L'auscultazione del calcestruzzo dimostra che la prerottura appare in compressione tra il 50 e il 65% del carico di rottura.

Il carico di prerottura sembra corrispondere al limite di fatica sotto sforzi ripetuti.

4.3.1 Variazione della resistenza alla rottura a compressione

La resistenza a compressione del calcestruzzo (R_c) dipende principalmente da due fattori:

- forma del solido compresso (in particolare dal grado di snellezza), la tabella 4.13 riporta i risultati ottenuti su un cilindro di calcestruzzo avente 16 cm di diametro;

Tabella 4.13 – Variazioni in funzione della forma del solido

Altezza del cilindro (cm)	R_c (kg/cm ²)
16	360
24	330
64	300

- volume del solido, i risultati della tabella 4.14 infatti dipendono dalla dimensione delle provette (effetto scala).

Tabella 4.14 – Variazioni in funzione del volume del solido

Dimensioni del cilindro (cm)	R_c (kg/cm ²)
16 (Ø) × 24	330
100 (Ø) × 150	300

- *Valori caratteristici di resistenza in compressione dei calcestruzzi*

Le norme francesi BAEL (calcestruzzo armato agli stati limite) stabiliscono le resistenze in compressione del calcestruzzo in funzione (Tab. 4.15):

- della classe del cemento;
- delle condizioni di confezionamento, con autocontrollo sorvegliato (AS) o in condizioni normali (CC).

Tabella 4.15 – Resistenze a compressione del calcestruzzo (secondo regole BAEL)

Classi di cemento	Condizioni di fabbricazione	Dosaggio in cemento del calcestruzzo (kg/m ³)	Valori caratteristiche di resistenza a compressione del calcestruzzo (MPa)
45 e 45 R	CC	300	16
		350	20
		Da giustificare con studio approfondito	25
		Non ammesso	30 e più
45 e 45 R	AS	—	—
		325	20
		400	25
		Da giustificare con studio approfondito	30 e più
55 e 55 R	CC	—	—
		325	20
		375	25
		Da giustificare con studio approfondito	30 e più
55 e 55 AS	AS	—	—
		300	20
		350	25
		Da giustificare con studio approfondito	30 e più

AS = autocontrollo sorvegliato, SS = condizioni correnti.

4.3.2 Prove di rottura

Esistono diversi tipi di prove per la determinazione della resistenza alla rottura.

- *Prove a compressione*

Vengono effettuate sotto pressa, su provini cubici o cilindrici, con la seguente corrispondenza:

$$\frac{\text{Resistenza su cilindro } \varnothing 16 \text{ cm}}{\text{Resistenza su cubo di 14 cm}} = 0,83$$

- *Prove a trazione*

Vengono eseguite sia in trazione diretta su provetta (il provino viene incollato alle due estremità con resina a un dispositivo di trazione), sia per schiacciamento di un cilindro avente 16 cm di diametro e 32 cm di lunghezza (il cilindro è afferrato nel senso della lunghezza tra due morsetti, rompendosi secondo due generatrici opposte).

Il rapporto tra la resistenza a trazione diretta e la resistenza su fenditura è prossimo a 0,80.

- *Prove di flessione*

Vengono effettuate su provette 7 × 7 × 28 cm o 14 × 14 × 56 cm, rotte sotto uno o due carichi puntuali. Il rapporto tra la resistenza a trazione diretta e la resistenza a flessione è prossima a 0,60.

4.4 Controlli di qualità del calcestruzzo in cantiere

Per ottenere un calcestruzzo di qualità, non basta avere stabilito e controllato dall'inizio la distribuzione granulometrica ideale in funzione, da una parte, delle prestazioni da soddisfare e dall'altra parte, dei prodotti realmente impiegati, occorre ancora accertarsi che questa qualità perduri nel tempo. Da ciò quindi il miglioramento degli accorgimenti apportati alle modalità di controllo e di prova.

4.4.1 Prove di resistenza su provette

Le prove di resistenza sul calcestruzzo impiegato nella realizzazione dell'opera devono essere eseguite man mano che i lavori procedono.

Sul cantiere vengono prelevati dei campioni sia a sezione cilindrica (diametro 16 cm, lunghezza 32 cm), sia a sezione cubica di 14 o 20 cm e, una volta in laboratorio, su queste provette, si misura la consistenza del calcestruzzo, poi la resistenza dopo 28 giorni in compressione e in trazione-flessione.

Partendo dai risultati delle prove è possibile elaborare delle curve analogiche che consentono di determinare le resistenze a 90 giorni e di paragonarle con le tensioni di calcolo. È opportuno adottare particolari cautele nel campionamento di calcestruzzo fresco prelevato in cantiere, che servirà al confezionamento delle provette.

Si consiglia di prelevare almeno una volta e mezzo circa il volume delle provette e, in ogni caso, una quantità superiore a 6 litri.

Si possono fare più prelievi all'uscita dalla betoniera: per esempio, a un quarto, a metà, a tre quarti della massa di calcestruzzo.

I singoli prelievi vengono mischiati su una superficie pulita e non assorbente per garantire omogeneità. Naturalmente, si avrà cura di non alterare il campione (protezione contro le intemperie, contro l'essiccazione).

Il controllo della resistenza alla trazione in cantiere può ritornare molto utile, perché fornisce un eccellente indice di qualità. La prova più frequente è quella della flessione a momento costante⁷ effettuata su provette prismatiche di 7 × 7 × 28 cm. È opportuno prendere al più presto queste misure per potere decidere le date del disarmo.

⁷ Il momento è il prodotto di una forza per la distanza tra il punto di applicazione della forza e il punto di appoggio.

4.4.2 Prove in situ (non distruttive)

Un metodo consiste nel misurare la velocità del suono nel calcestruzzo, che sarà superiore a 4.000 m/s in un buon calcestruzzo, inferiore a 3.500 m/s in un calcestruzzo medio-crescente. Il metodo più diffuso consiste nella cosiddetta prova di rimbalzo. Si utilizza uno strumento portatile, lo sclerometro, che serve a misurare l'altezza di rimbalzo sul calcestruzzo di una sfera di acciaio. È possibile determinare la resistenza di un calcestruzzo armato in rapporto all'indice sclerometrico grazie all'elaborazione di curve di correlazione. Durante l'esecuzione dei lavori, è buona prassi abbinare le prove con lo sclerometro a quelle con le provette. La buona taratura di cui è dotato lo sclerometro consente di utilizzarlo efficacemente, riducendo il numero di prove con le provette, più casuali e più onerose.

4.5 Acciaio per calcestruzzo armato

4.5.1 Armature per calcestruzzo armato

4.5.1.1 Barre di acciaio per armature

Le armature per calcestruzzo armato sono delle strutture di barre di acciaio con caratteristiche ben definite di forma, resistenza e sezione. Si distinguono (Fig. 4.1):

- i tondini lisci o tondini per cemento armato;
- l'acciaio ad alta aderenza;
- l'acciaio nervato;
- l'acciaio zigrinato.

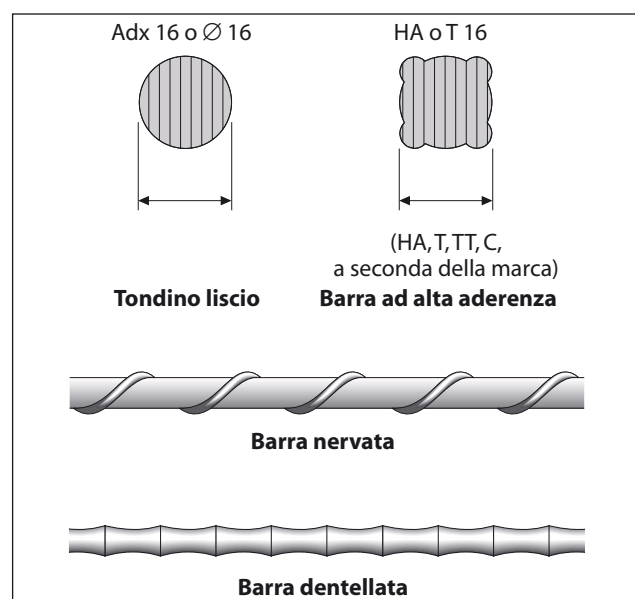


Figura 4.1 – Tipologie principali di tondini in acciaio per armature.

4.5.1.2 Sagomatura delle armature

Le armature realizzate nelle casseforme possono essere:

- sagomate e assemblate in officina o in cantiere;
- preparate nello stabilimento (reti saldate o reti stirate).

Le reti elettrosaldate (Fig. 4.2) sono formate da fili portanti e da fili di ripartizione, sovrapposti ortogonalmente ai primi. Sono disponibili in lastre (pannelli), o in rotoli per i piccoli diametri.

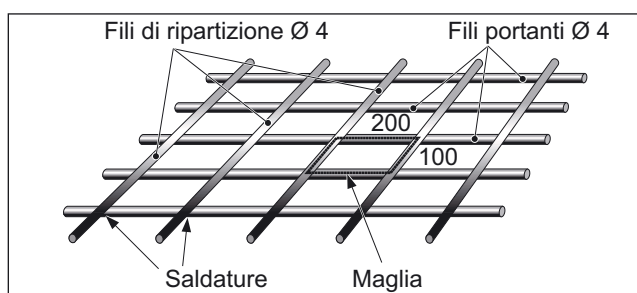


Figura 4.2 – Rete elettrosaldata.

Le reti stirate sono formate da parallelogrammi di fili di acciaio che provengono da grosse lamiere forate in piani, poi stese perpendicolarmente al senso di rotolamento del foglio.

Le officine di sagomatura e assemblaggio delle armature impiegano una manodopera specializzata e dispongono di macchine adeguate e più performanti di quelle che si trovano in cantiere.

4.5.2 Disposizione delle armature per resistere agli sforzi

Gli studi sulla resistenza dei materiali permettono di determinare, per ciascun carico, a seconda delle campate o delle condizioni di appoggio, gli sforzi che si sviluppano nelle diverse parti degli elementi della struttura (travi, setti, solette ecc.). Per resistere a questi sforzi, il calcestruzzo e le armature collaborano secondo le proprie caratteristiche intrinseche.

Per esempio, nella trave di calcestruzzo armato portante su tre appoggi, illustrata nella figura 4.3, è possibile determinare diverse zone a seconda della natura delle sollecitazioni sviluppate:

- le zone tese si stabiliscono nella parte inferiore delle campate (sforzo massimo a metà della campata) e nella parte superiore sull'appoggio centrale (sforzo massimo a metà dell'appoggio);

- le zone compresse si collocano all'opposto delle zone tese, cioè nella parte superiore delle campate e nella parte inferiore sull'appoggio centrale;
- le zone di taglio si trovano in prossimità degli appoggi dove si sviluppano tensioni suscettibili di produrre una fessurazione di calcestruzzo secondo un piano inclinato a 45°.

4.5.2.1 Tipi di armature

Le armature sono disposte innanzitutto per rispondere a questi sforzi e in secondo luogo per facilitare la costruzione degli assemblaggi (barre di montaggio). Si distingue tra armature longitudinali e armature trasversali.

● Armature longitudinali

Si sviluppano lungo le zone compresse e tese. A seconda della posizione, vengono chiamate armature inferiori o superiori, o cappello nella parte superiore su appoggio centrale (Fig. 4.3). Esse generalmente terminano sugli appoggi con un dispositivo di ancoraggio quale un gancio o un uncino.

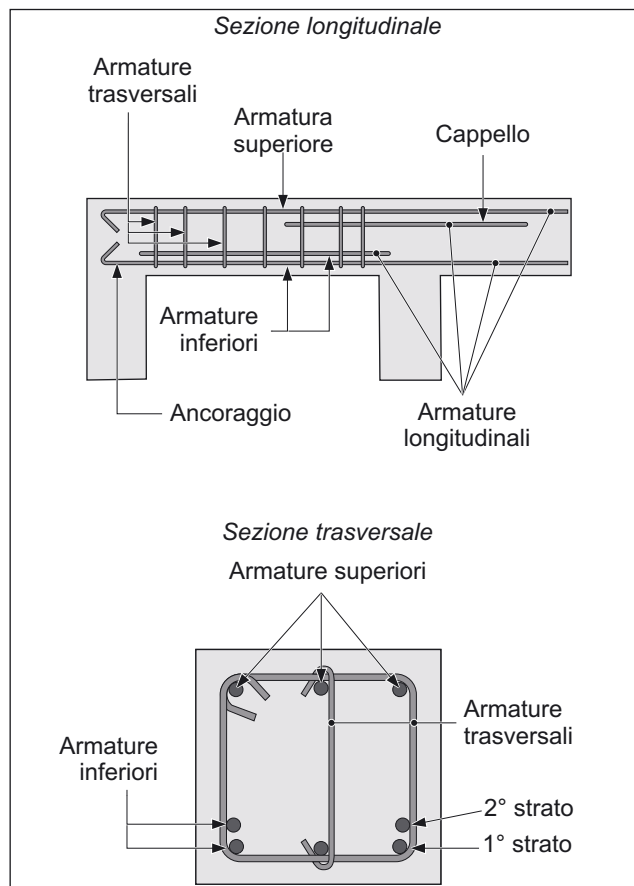


Figura 4.3 – Posizionamento delle diverse armature in una trave.

● Armature trasversali

Sono i quadri, le staffe di contenimento, gli spilli (Fig. 4.4) che collegano le barre longitudinali e si ripartiscono in intervalli (passi) sempre più ravvicinati man mano che ci si avvicina agli appoggi.

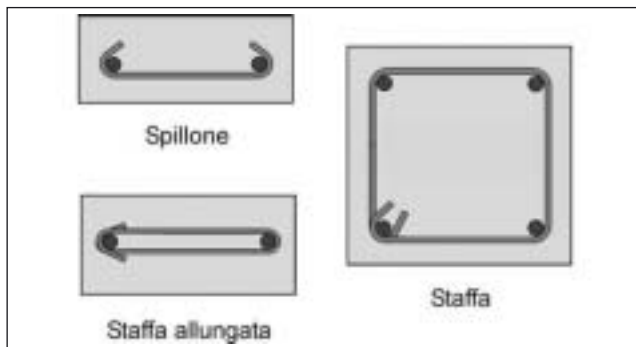


Figura 4.4 – Tipologie di armature trasversali.

4.5.2.2 Protezione delle armature

Le diverse armature sono collegate tra di loro mediante legature (Fig. 4.5). Indipendentemente dalla loro posizione nell'elemento strutturale progettato, le armature non devono subire alcuna alterazione nel tempo. Si deve temere, in particolare, l'ossidazione dovuta alla migrazione del vapore acqueo contenuto nell'aria o alla perdita di resistenza provocata da un aumento anormale della temperatura in caso di incendio.

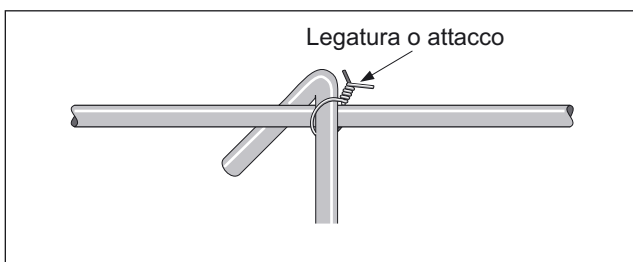


Figura 4.5 – Collegamento nelle armature trasversali.

Per questi e per molti altri motivi (urti, aggressività dei fumi, dell'acqua di mare ecc.), le armature devono essere protette con uno strato sufficientemente spesso di conglomerato⁸, ottenuto inserendo dei distanziatori (o spes-

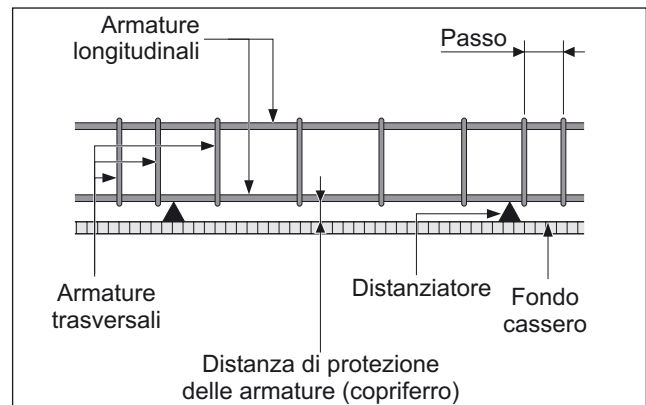


Figura 4.6 – Sistemazione delle armature longitudinali rispetto alla cassaforma.

sori) in fondo alla cassaforma (Fig. 4.6). Lo spessore del copriferro laterale si realizza generalmente con un sistema di regolazione amovibile, che sarà possibile rimuovere una volta che il conglomerato avrà raggiunto una sufficiente stagionatura, oppure con un dispositivo fisso che rimarrà annegato nei casseri.

4.5.3 Disposizione delle armature per eventuali riprese di getto

È raro che gli elementi strutturali (solette, pilastri, travi, solai ecc.) possano essere gettati in un'unica operazione; pertanto si dovrà procedere con una ripresa di getti di calcestruzzo a determinati livelli o in determinate sezioni.

Questa pratica è disciplinata da disposizioni speciali concernenti le armature momentaneamente interrotte. Dall'elemento già gettato in opera fuoriescono i ferri di attesa (realizzati con una lunghezza di ricoprimento sufficiente, stimata in funzione degli sforzi e del diametro delle armature) (Fig. 4.7) cuciti da armature trasversali.

4.5.4 Stima della quantità delle armature

In base al peso per metro lineare e ai metri lineari utilizzati, è possibile stimare il peso delle armature contenute nell'elemento realizzato in calcestruzzo armato. Rapportandolo poi al volume dell'elemento (squadatura \times lunghezza) è possibile altresì determinare la quantità di acciaio contenuto in un metro cubo.

⁸ Poiché il cemento è basico (pH 12) il calcestruzzo ha una funzione anticorrosione nelle armature. Ma questo pH può scendere al di sotto di 9 (carbonatazione – cioè fissazione di CO_2 – dei costituenti idrati che dipende dalla porosità del calcestruzzo, dalla natura del cemento, dal dosaggio, dall'A/C, dall'umidità dell'ambiente); il ferro allora si ossida, il

volume apparente aumenta di circa dieci volte, provocando sforzi di trazione distruttivi sul calcestruzzo.

Per questo è importante un cemento sufficientemente basico (ricco di calce), un calcestruzzo compatto e omogeneo, in grado di rivestire adeguatamente le armature.

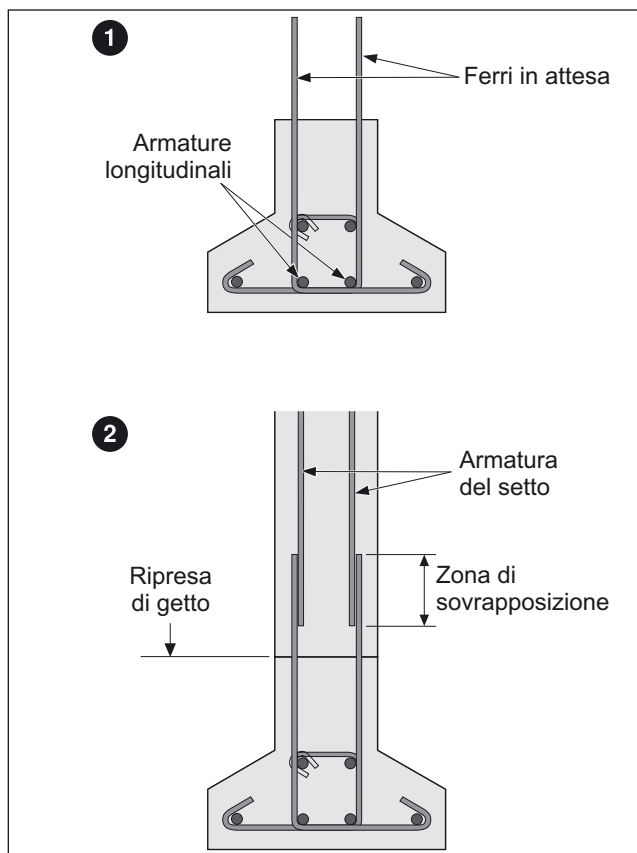


Figura 4.7 – Ripresa di getto del calcestruzzo in un setto.

La quantità di armatura a metro cubo di conglomerato, tenuto conto delle configurazioni ripetitive della costruzione, rappresenta un'informazione preziosa ai fini dell'elaborazione dei progetti di massima. Infatti, in base a questi rapporti, è possibile prevedere la quantità di armature in una costruzione, secondo la natura di ciascun elemento dell'opera (solette, pilastri, travi, setti, muri, solai ecc.).

4.6 Calcestruzzo precompresso

Il calcestruzzo precompresso, come quello armato, deriva dalla combinazione di due materiali complementari; da una parte, il calcestruzzo, dall'altra parte, un'armatura longitudinale in acciaio.

Ma, mentre nel calcestruzzo armato i due materiali (calcestruzzo indurito e acciaio) agiscono a partire dallo stato naturale, nel calcestruzzo precompresso si fa subire all'acciaio una tensione preventiva; questo stato di tensione introduce nel calcestruzzo armato indurito uno sforzo di compressione preliminare, da cui deriva, appunto, la denominazione di cemento armato precompresso.

Applicando questo trattamento, si determina uno stato di precompressione prima dell'applicazione dei carichi esterni e si agisce in maniera tale che l'effetto differenziale della precompressione e dei carichi lasci nell'elemento solo zone compresse.

La precompressione può essere applicata al calcestruzzo mediante post-tensione oppure mediante pre-tensione delle armature.

● Precompressione con armatura post-tesa

Si realizza con cavi inseriti in guaine e messi in tensione appoggiandoli sul calcestruzzo sufficientemente maturo mediante un sistema di ancoraggio alle estremità (teste di ancoraggio, in particolare).

● Precompressione con armatura pre-tesa

Si realizza con armature (trefoli) tese prima del getto su banchi di trazione fissi (banchi di precompressione). Una volta che il calcestruzzo ha raggiunto una buona maturazione, l'armatura viene liberata dai vincoli senza però poter ritornare alla posizione primitiva (quindi a una tensione nulla) per cui l'armatura viene ancorata per aderenza al calcestruzzo, realizzando così la precompressione.

● Cementi impiegati

Si impiega principalmente il cemento Portland artificiale, il cemento rapido nelle classi 45 e 55, nonché quello ad altissima resistenza.

4.6.1 Realizzazione di un elemento in calcestruzzo precompresso mediante post-tensione

4.6.1.1 Prima fase: messa in opera delle guaine metalliche (Fig. 4.8a)

Queste guaine, elastiche e impermeabili, servono a proteggere i cavi nella cassaforma dell'opera da realizzare. Vengono posate su staffe o gabbie che ne assicurano l'esatta posizione.

Un'armatura tradizionale assicura l'omogeneità del profilo. Il diametro delle guaine è compreso generalmente tra 30 e 80 mm.

4.6.1.2 Seconda fase: gettata di calcestruzzo (Fig. 4.8b)

La gettata deve essere eseguita con molta cautela allo scopo di ottenere un eccellente calcestruzzo.

4.6.1.3 Terza fase: posa dei cavi all'interno delle guaine (Fig. 4.8c)

L'acciaio impiegato ha un allungamento poco significativo, con una resistenza a trazione che può raggiungere le 16 t/cm². I cavi spesso si compongono di 12 fili il cui diametro varia tra i 5 e gli 8 mm.

4.6.1.4 Quarta fase: messa in tensione dei cavi (Fig. 4.8d)

La tensionatura ha luogo dopo il disarmo delle facce laterali. È importante che il calcestruzzo abbia già raggiunto una buona maturazione per poter sopportare gli sforzi da compressione, senza rischio di rottura. Per esempio, si tendono i primi cavi dopo 2 giorni di stagionatura, poi dopo 7 giorni e in fine gli ultimi cavi dopo 15-28 giorni.

Il calcestruzzo quindi sopporta le massime sollecitazioni tra il secondo e il ventottesimo giorno: pertanto

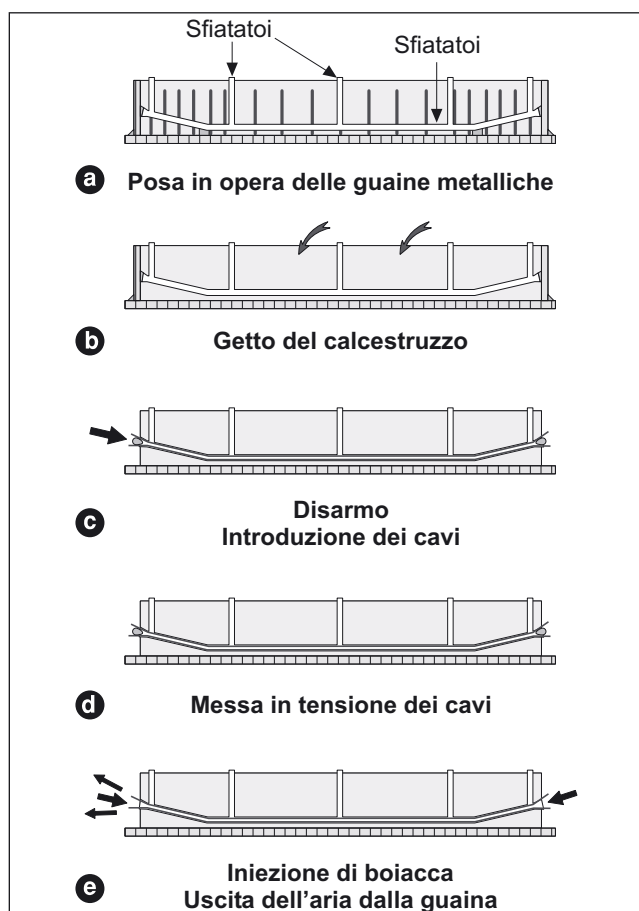


Figura 4.8 – Posa in opera di una trave di calcestruzzo precompresso in post-tensione.

occorre preparare un calcestruzzo con elevato dosaggio (400-450 kg/cm³), spesso con un cemento ad altissima resistenza.

La messa in tensione viene eseguita per mezzo di martinetti appoggiati sulle facce dell'opera (stiratura e bloccaggio). Invece, nelle piccole opere la trazione avviene solo in una delle estremità, in quanto l'altra è un ancoraggio.

4.6.1.5 Quinta fase: iniezione con boiaccia cementizia nella guaina (Fig. 4.8e)

Dotata di elevata resistenza e della fluidità necessaria per rivestire i fili senza provocare ritiro, la boiaccia ha una composizione A/C prossima a 0,4.

L'iniezione di boiaccia garantisce una protezione antiossidante dell'acciaio e una tenuta perfetta tra i diversi fili.

L'aria occlusa nella guaina viene eliminata mediante sfiatatoi che sfociano nella parte superiore della cassaforma.

4.6.2 Dispositivo di ancoraggio

La figura 4.9 illustra il sistema di ancoraggio secondo il metodo Freyssinet.

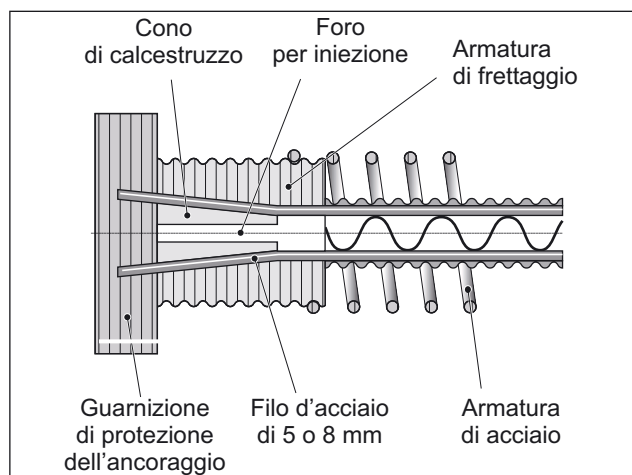


Figura 4.9 – Cono d'ancoraggio per calcestruzzo precompresso.

4.7 Casseforme per calcestruzzo armato

In questo capitolo vengono menzionati soltanto quegli strumenti per la realizzazione delle armature che in genere è possibile riutilizzare.

D'altra parte, esistono diverse tecniche di casseforme incorporate nell'opera da realizzare e in particolare:

- le predelle in calcestruzzo armato o precompresso;
- i solai metallici collaboranti;
- i blocchi per muratura armata (in particolare, blocchi speciali semipieni);
- i casseri in materiale isolante (polistirene espanso).

La funzione principale della cassaforma è innanzitutto quella di dare una forma al calcestruzzo, e in seguito quella di contenerlo fino a quando non ha raggiunto una stabilità autonoma.

La cassaforma in genere è costituita dai seguenti elementi (Fig. 4.10):

- superficie di contenimento del getto;
- elementi di rinforzo di detta superficie (ossatura):
 - elementi di irrigidimento primari che sostengono la superficie a vista;
 - elementi di irrigidimento secondari;
- dispositivi di puntellatura (puntelli a martinetto centrale, candele ecc.);
- elementi di regolazione:
 - in senso verticale (cunei di serraggio per puntelli, giunto o dado centrale per puntelli);
 - in senso trasversale (staffe);
- dispositivi di sicurezza a seconda del tipo di cassaforma (saette, puntelli per controventamenti), per assicurare la stabilità della struttura fino a che il conglomerato non ha raggiunto una resistenza sufficiente.

Le parti in legno delle casseforme sono costituite dai seguenti elementi (Fig. 4.11): tassello o listello, travicello, tavola, puntone, asse, tavolone.

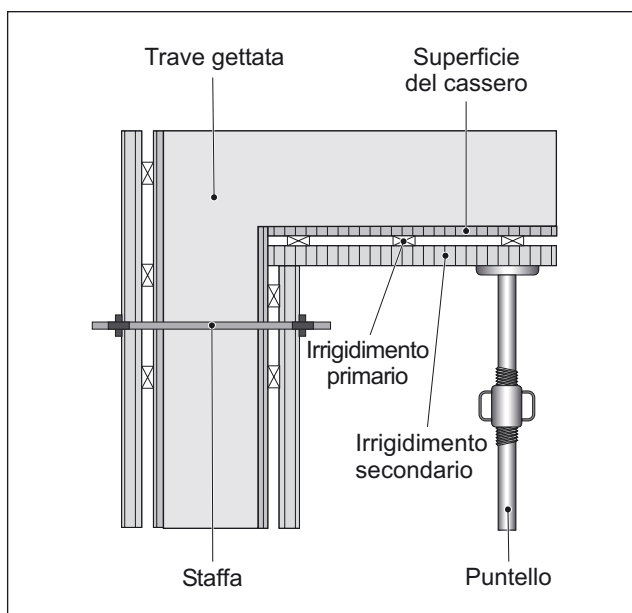


Figura 4.10 – Principali elementi costitutivi di un cassero.

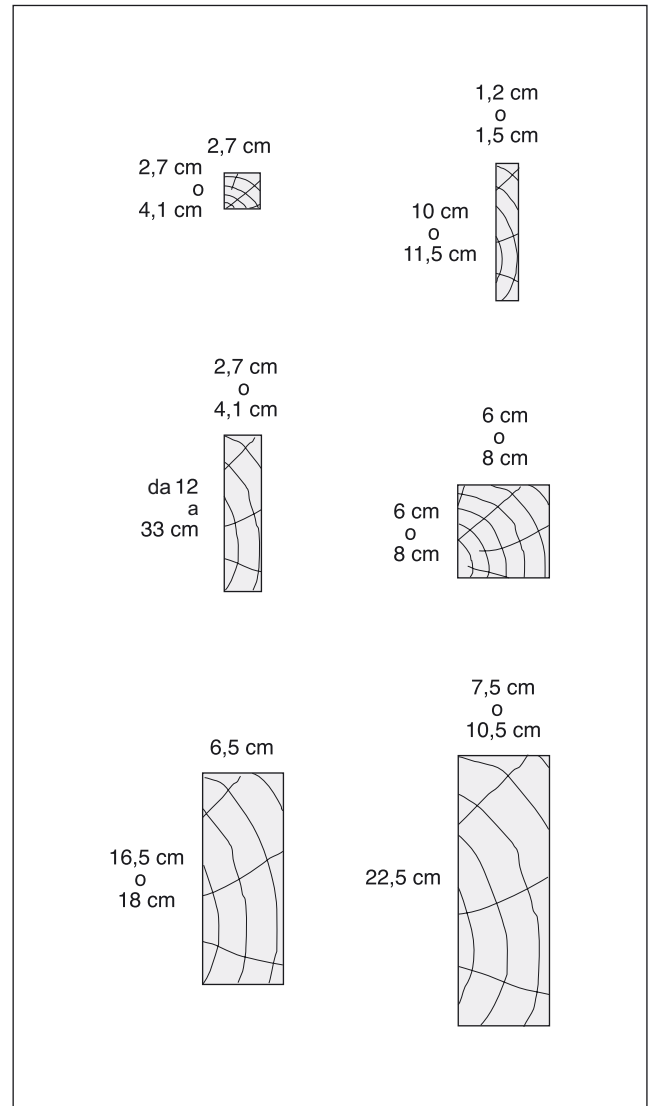


Figura 4.11 – Tipologie principali di legno per casseri.

4.7.1 Casseforme tradizionali

4.7.1.1 Trave

La cassaforma per travi (Fig. 4.12) è posizionata in altezza su una serie di puntelli.

Ciascun puntello è sormontato da una traversa che serve di appoggio alle saette, assicurando la stabilità e il controventamento laterale della cassaforma.

Le tavole sul fondo della cassaforma poggiano direttamente sulle traverse. Le tavole della cassaforma si appoggiano su montanti (o tiranti) fissati a contrafforte sulle traverse.

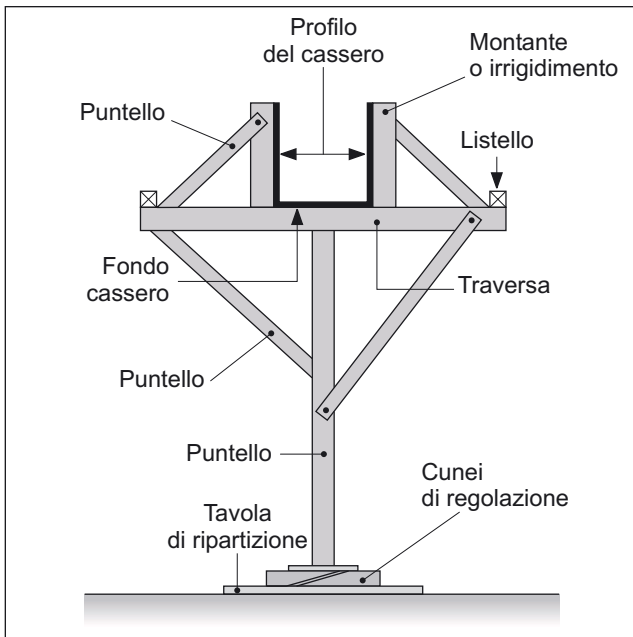


Figura 4.12 – Disposizione di cassero per travi.

Il bloccaggio provvisorio dei pezzi di legno necessari alla cassaforma si fa con l'ausilio di morsetti.

4.7.1.2 Solaio

L'impalcato (Fig. 4.13) si sviluppa in altezza con una serie di puntelli regolabili e controventati tra di loro con fili di acciaio provvisti di tenditori a vite; ciascuna fila di puntelli sostiene una trave su cui poggiano i travetti dell'impalcato.

Il fondo del cassero è costituito da pannelli di compensato (spessore 5,8 o 10 mm).

Nel caso vengano impiegati pannelli molto spessi (15 o 19 mm), l'impalcato può essere eliminato, purché il passo dei travetti sia compatibile con la resistenza del pannello a contatto con il calcestruzzo fresco.

È possibile riutilizzare più volte il compensato. Per questo occorre trattarlo con cura, proteggendolo con l'olio di disarmo e mantenendolo pulito, evitando scheggiature e ammorsature superficiali.

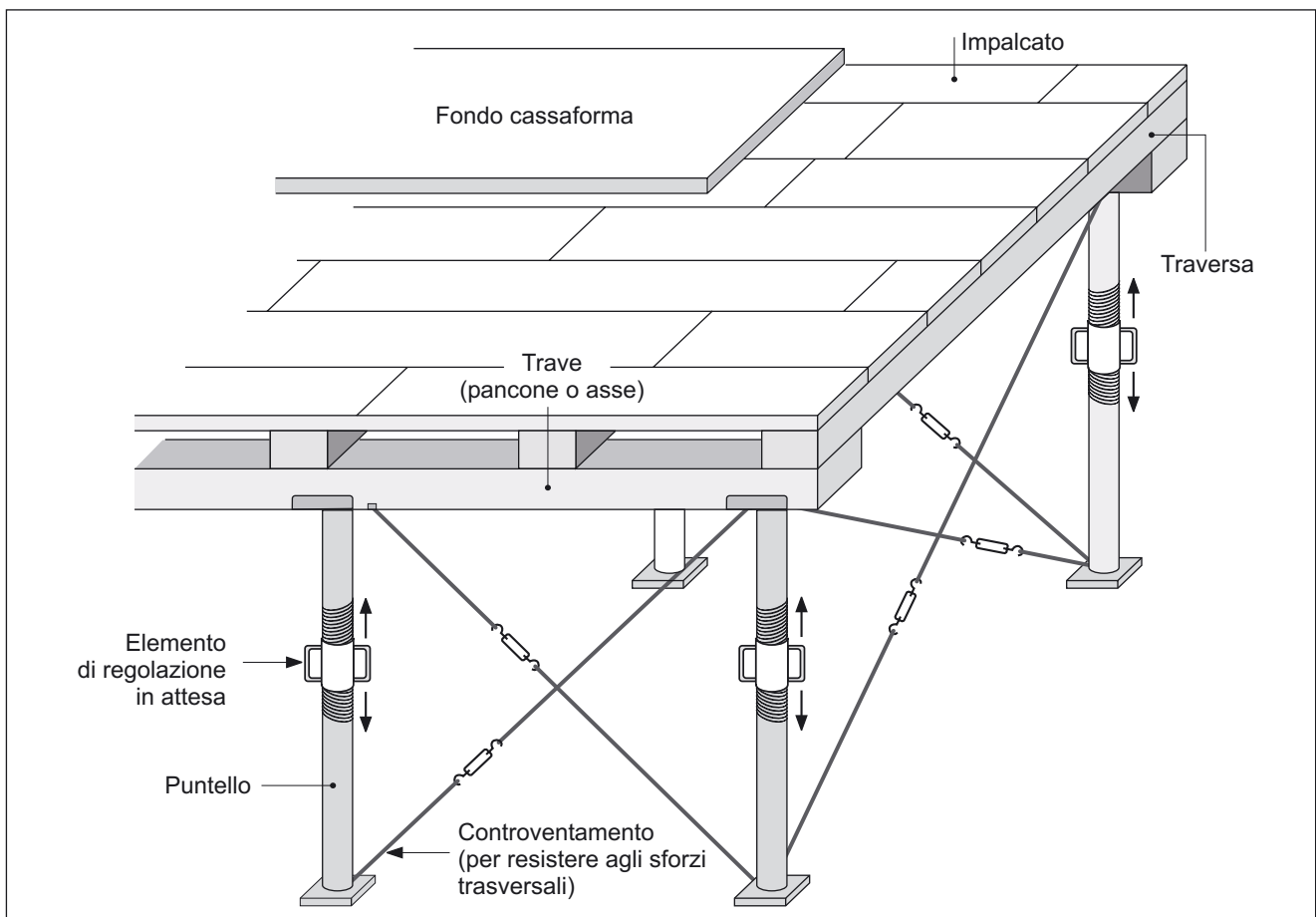


Figura 4.13 – Impalcato per cassatura di un solaio.

4.7.2 Casseforme industrializzate

Le casseforme tradizionali, concepite per opere non seriali, e i cui elementi deteriorabili offrono poche possibilità di riutilizzo, sono costose in termini di manodopera e di materiale. Per ragioni di economicità, si ricorre alle casseforme industriali, soprattutto se l'edificio presenta elementi ripetitivi nella trama architettonica.

Le attrezzature maggiormente impiegate servono ad armare contemporaneamente o separatamente solai e pareti verticali.

4.7.2.1 Casseforme verticali

● *Banches*

Le *banches* possono essere realizzate in legno, ma le imprese ricorrono sempre più alle strutture in metallo che consentono un riutilizzo più frequente. La *banche* metallica (Fig. 4.14) richiede una travatura a tralicci (tubi o profilati) su cui si appoggia il profilo della cassaforma a mezzo di due reti ortogonali di irrigidimenti.

La verticalità della cassaforma è assicurata da martinetti di bilanciamento posti ai piedi delle membrature

esterne. Nella parte superiore vengono installate le passerelle per il passaggio degli operai, opportunamente provviste di parapetti per eliminare i pericoli di caduta.

● *Cassaforma "rampante"*

La cassaforma rampante viene utilizzata per realizzare il getto di pareti verticali in continuo con l'utilizzo di un solo cassero (Fig. 4.15).

L'appoggio avviene sulla sezione della parete che deve essere disarmata, richiedendo pertanto un rapido indurimento del calcestruzzo al quale viene incorporato, all'uopo, un accelerante di presa.

● *Cassaforma scorrevole*

La cassaforma scorrevole è una variante perfezionata della cassaforma rampante; lo spostamento verticale non avviene più nelle diverse fasi del getto, ma in perfetta continuità e a velocità costante grazie all'azione dei martinetti.

La piattaforma di lavoro solidale al cassero avanza contemporaneamente. Questo tipo di cassaforma, utilizzata per la realizzazione di strutture molto alte,

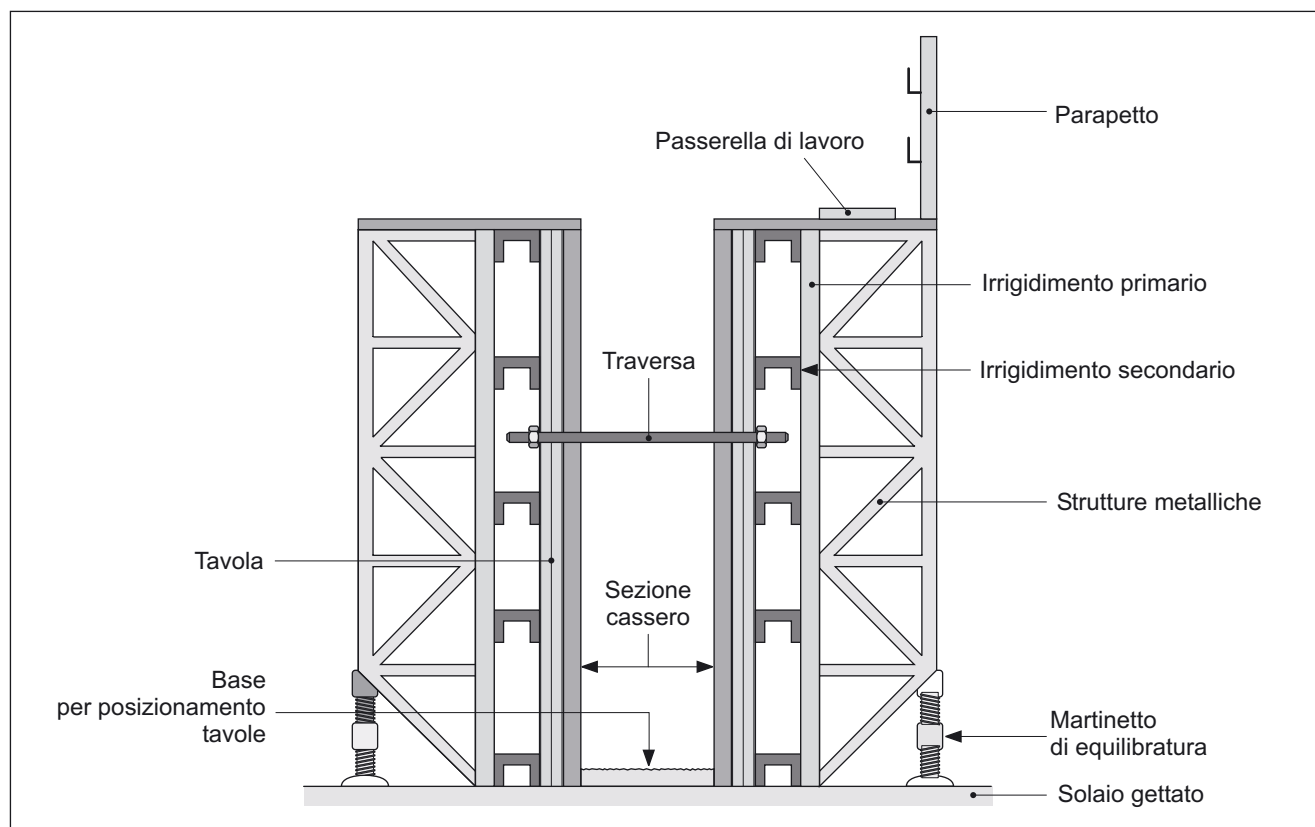


Figura 4.14 – Strutture metalliche per casserature ripetitive di setti.

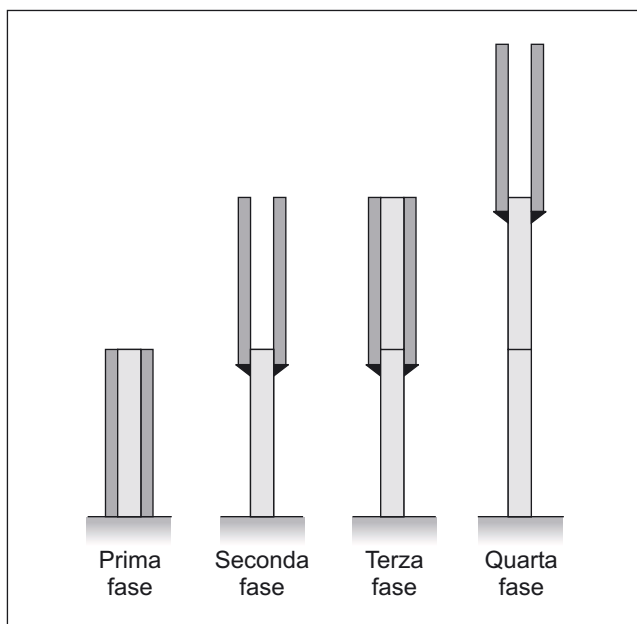


Figura 4.15 – Principio del cassero rampante per setti.

richiede la presenza costante di operai dislocati in tre postazioni.

4.7.2.2 Armature orizzontali

Se è prevista la realizzazione di solai in serie, è interessante utilizzare per tutti la stessa cassaforma. Infatti si tratta di adottare una *bancha* orizzontale adattata alle dimensioni del solaio da gettare in opera, dotata di piedi-supporti regolabili per consentire il disarmo. La variazione delle dimensioni nei due sensi (lunghezza e larghezza) avviene con la messa in opera di spessori solidali con la tavola.

4.7.2.3 Casseforme a tunnel

Per la realizzazione di grandi edifici a struttura alveolare, le imprese adottano il sistema delle casseforme a tunnel, senz'altro più perfezionato rispetto alle pannelature e alle banche. La cassaforma a tunnel, indipendentemente dal tipo di assemblaggio, è utilizzata per eseguire senza ripresa e, in un'unica operazione, i muri portanti e i solai che li ricoprono. Questa tecnica, molto diffusa in Francia negli anni Settanta, è andata scomparendo a causa delle dimensioni sempre più ridotte degli edifici progettati e della diversa progettazione architettonica.

I costruttori tendono a preferire due tipologie di dispositivi di bloccaggio per il disarmo: alcuni adottano i morsetti al traverso degli spigoli superiori, mentre altri

prediligono quelli a metà della campata. Pertanto i primi hanno optato per la meccanizzazione dell'assemblaggio delle tre *banches*, mentre i secondi scelgono il sistema dei due semigusci.

I puntelli vengono disposti a metà campata per l'esecuzione del disarmo.

● Descrizione di un semiguscio

Il semiguscio (Fig. 4.16), utilizzabile indifferentemente a destra o a sinistra, generalmente è costituito da:

- un pannello verticale e un pannello orizzontale intercambiabili (lamiera di 3 mm, profili a U in periferia, irrigidimenti ravvicinati a forma di omega);
- due saette regolabili per il controventamento;
- un puntello di stabilità a sostegno del semiguscio.

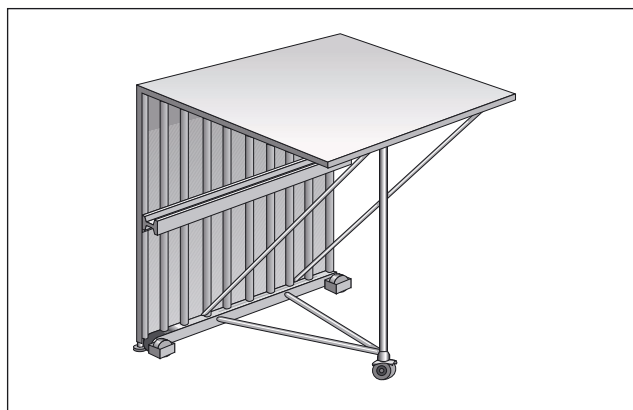


Figura 4.16 – Cassero a tunnel.

Il pannello verticale e i puntelli sono dotati di rotelle. Nella parte bassa del pannello verticale sono collocati dei martinetti che consentono di regolarlo in altezza.

I chiavistelli assicurano un perfetto allineamento dei pannelli orizzontali (Fig. 4.17).

È possibile assemblare e movimentare contemporaneamente diversi semigusci collegandoli con un bilanciino (Fig. 4.18).

● Modalità operativa

Il cantiere generalmente è dotato delle attrezzature necessarie per realizzare la gettata in opera, in una sola giornata di lavoro, di volumi di calcestruzzo (muri e solai) per un intero alloggio: questo viene armato e gettato in opera nella mattinata per poi essere disarmato la sera; la cassaforma viene poi recuperata su una passerella di servizio (Fig. 4.19). La cassaforma viene pulita, oliata e rimessa in opera il giorno successivo per la realizzazione dell'alloggio contiguo.

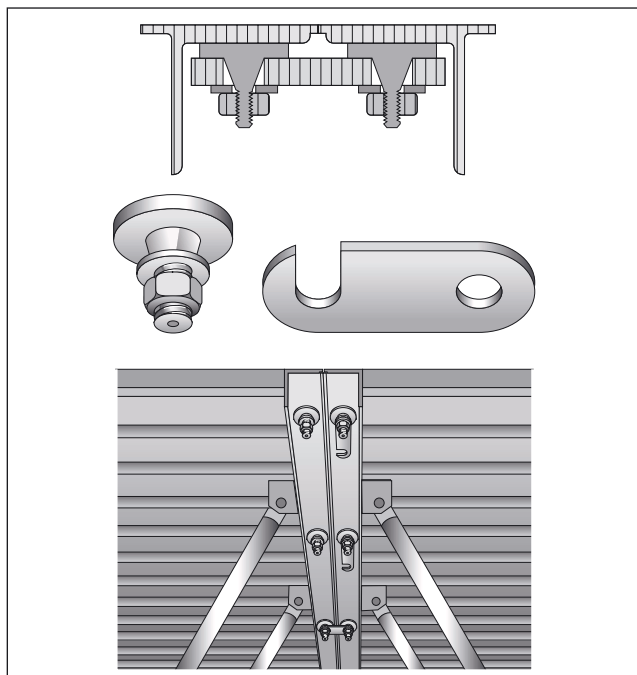


Figura 4.17 – Dispositivi di collegamento per il montaggio di casseri a tunnel.

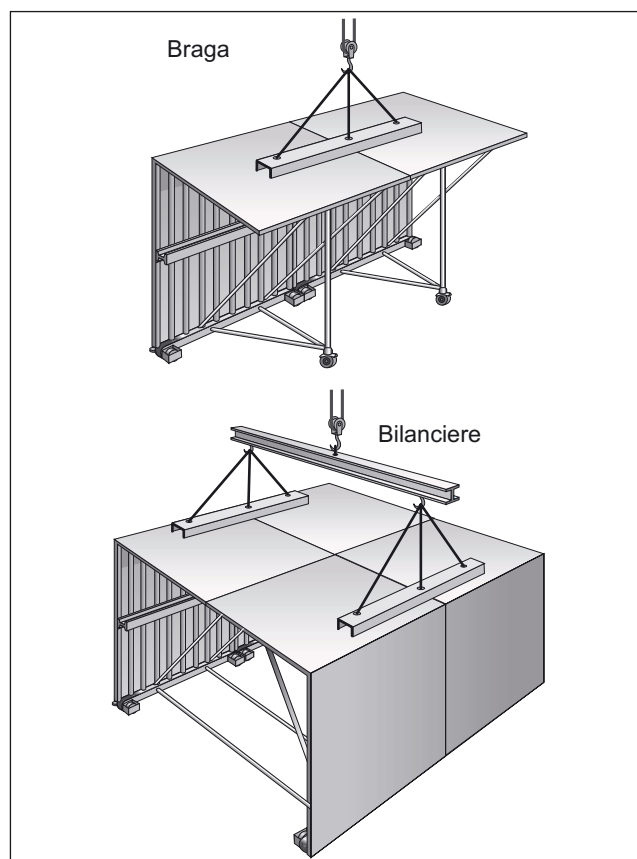


Figura 4.18 – Dispositivi di posa in opera per casseri a tunnel.

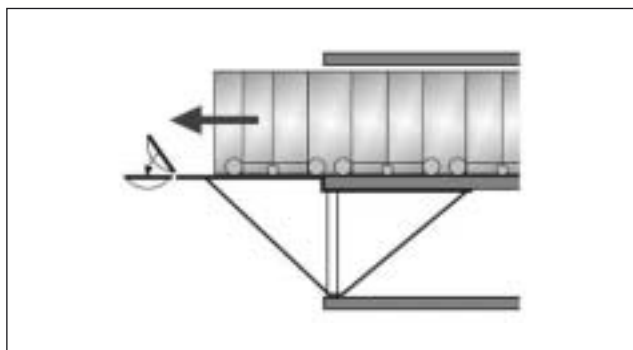


Figura 4.19 – Passerella di servizio per il recupero di casseri a tunnel.

Con il ritmo di un alloggio al giorno, volendo ottenere cadenze superiori, basta moltiplicare il numero di casseforme.

● Produttività

Questi procedimenti hanno permesso di migliorare notevolmente la produttività: la squadra deve lavorare a un ritmo ben scandito, senza tempi morti, senza distogliere l'attenzione per dedicarsi a compiti marginali.

Sono stati apportati dei miglioramenti (Fig. 4.20) sia alla realizzazione del cassero sia in termini di sicurezza degli operai (passerelle di servizio, di transito, di disarmo).

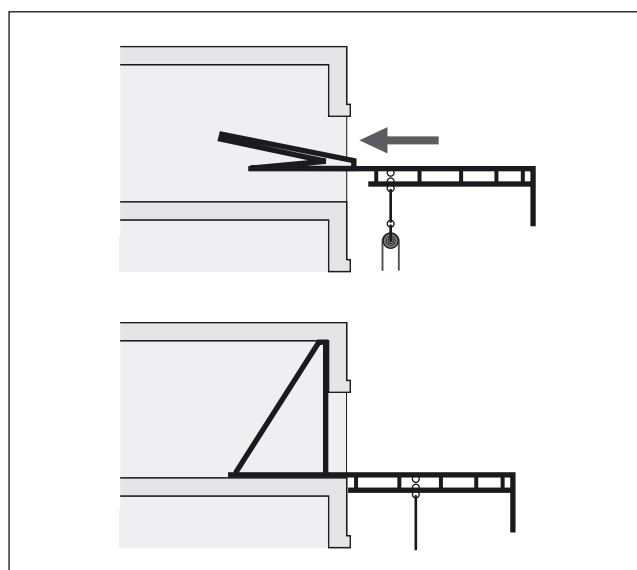


Figura 4.20 – Progetto e posa in opera delle passerelle di servizio.

● *Dispositivi di riscaldamento*

L'obbligo di attenersi a una ben precisa produzione giornaliera, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche, ha spinto i costruttori a prevedere dei dispositivi per riscaldare i getti.

Questo tipo di riscaldamento richiede particolare prudenza per evitare che la cassaforma si dilati prima che il calcestruzzo raggiunga una resistenza sufficiente, con il rischio di provocare fessure e condense nocive.

● *Miglioramento delle strutture finite*

Nell'ambito della qualità, gli sforzi si sono concentrati principalmente:

- sulla composizione del calcestruzzo, per evitare la formazione di bolle;
- sugli inserti, per realizzare asole e aperture nelle migliori condizioni possibili in termini di precisione e pulizia per quel che riguarda gli spigoli;
- sui giunti al traverso degli spigoli, per le casseforme a tunnel a tre *banches*, allo scopo di ottenere giunti netti pareti-solai⁹;
- sul giunto a metà campata, per le casseforme a tunnel con due semigusci, allo scopo di ottenere una superficie perfettamente piana.

Queste operazioni hanno comportato dei risparmi notevoli sulle finiture.

● *Adattamento della cassaforma a tunnel alle variazioni di trame*

La struttura alveolare offre una vasta gamma di trame diversificate, salvo la necessità di adottarle, in sede di progettazione, secondo un criterio di omogeneità.

In commercio esistono diversi pannelli prodotti in svariate dimensioni.

Per esempio, combinando tra di loro 7 pannelli orizzontali compresi tra 1,05 e 2,85 m (di 0,30 in 0,30 m), si ottengono 13 campate diverse, in una gamma di misure comprese tra i 2,10 e i 5,70 m (di 0,30 in 0,30 m).

Per luci intermedie, è possibile prevedere una serie di bande adattabili alla chiave centrale: banda ribaltabile, banda con stabilizzatori ecc.

4.7.3 Puntellature

La puntellatura è quel procedimento che permette di sostenere, in via provvisoria:

- le terre mobili di uno scavo;

- un edificio in rovina;
- una cassaforma.

Il nome dei puntelli impiegati allo scopo è diverso a seconda della forma, della funzione o della posizione. Possono essere in legno oppure metallici, regolabili o meno.

● *Candele*

Si tratta di puntelli metallici con martinetto centrale, regolabili grazie a un manicotto (o un dado) in ghisa malleabile.

● *Piloni*

Si tratta di puntelli formati da tralicci metallici (tubi o profilati), regolabili con martinetti a vite in testa o al piede.

● *Armatura di sostegno*

Si tratta di un assemblaggio di puntelli destinati a sostenere, nelle tre direzioni, un grande vano al pianterreno di un edificio.

● *Centina*

È un'armatura:

- di sostegno di un vano che rischia di cadere, la cui parte superiore è arrotondata;
- di sostegno di opere a forma di volta.

4.8 Giunti

Si chiama giunto la parte vuota tra due elementi della costruzione, otturata con un prodotto destinato ad assicurare un collegamento durevole tra questi due elementi.

La qualità di un prodotto per giunti riguarda:

- l'aderenza;
- l'impermeabilità;
- la plasticità più o meno permanente (che dipende dai giunti), per permettere il libero gioco tra gli elementi;
- facilità di utilizzo e di posa in opera.

4.8.1 Prodotti di riempimento

Per quanto possibile, i giunti sono trattati con gesso o con malta. In alcuni casi, tuttavia, quando, per esempio, le facce dei giunti devono interagire, è opportuno utilizzare dei prodotti speciali.

⁹ Spigoli interni, tra muri e soffitto.

Mastice: prodotto la cui consistenza, a freddo, è abbastanza molle da permettere la stuccatura (otturazione) dei giunti.

Attenzione a non confonderlo con il mastice per vetri. Questo mastice si vende in sacchi o in bastoncini.

Guarnizione di tenuta: cordone o banda di materiale plastico o elastico che serve ad assicurare l'impermeabilità del giunto all'aria o all'acqua.

Sigillante per giunti: prodotto pastoso, plastico, applicato con una speciale pistola a mano o meccanicamente.

4.8.2 Trattamento dei giunti nelle opere murarie

Stuccatura: otturazione di un vuoto tra due elementi costruttivi diversi, con gesso o malta.

Boiacca: gesso o malta impastata, liquida, in modo da poter penetrare nei piccoli giunti.

Svuotare i giunti: togliere la malta dai giunti in muratura per una certa profondità.

Rabboccare: azione di trattare un giunto (la rabboccatura ne è il risultato finale).

4.8.3 Tipi di giunti nelle opere murarie

4.8.3.1 Giunti di muratura

Questi giunti sono gli strati di leganti – in genere, malta – che uniscono tra di loro i blocchi della muratura (si veda il capitolo 5 "Murature").

4.8.3.2 Giunti di pannelli prefabbricati

Si veda il capitolo 9 "Tecniche di facciata".

4.8.3.3 Giunti di separazione e di dilatazione (Fig. 4.21)

I giunti di dilatazione vengono eseguiti di proposito nella struttura degli edifici di grandi dimensioni, per evitare, in questa maniera, i problemi derivanti dalle escursioni termiche (dilatazione e ritiro termico).

I giunti di separazione vengono eseguiti di proposito nella struttura, allo scopo di separare edifici con carichi disuguali o che poggiano su appoggi con resistenza disuguale.

La larghezza convenzionale dei giunti di dilatazione o di separazione è pari a 2 cm.

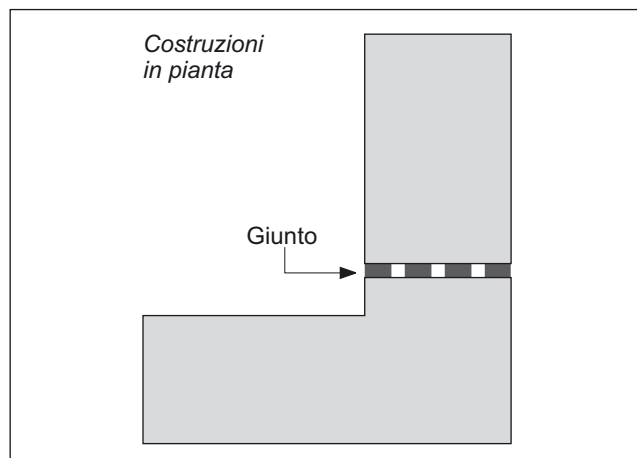


Figura 4.21 – Giunto di rottura o di dilatazione.

4.8.3.4 Giunti di ritiro

Questi giunti vengono praticati di proposito tra i giunti di dilatazione, allo scopo di evitare la fessurazione dovuta al ritiro del calcestruzzo durante la stagionatura. Sono particolarmente raccomandati per elementi strutturali di grandi dimensioni, soprattutto se devono essere gettati in opera in un'unica operazione.

4.8.3.5 Giunti antisismici

Questi giunti sono destinati a evitare che due costruzioni o blocchi di costruzioni vicine non si urtino nell'eventuale scossa. La loro larghezza deve essere almeno di 4 cm.

I giunti antisismici devono essere disposti in modo da ritagliare, in piano, le costruzioni in blocchi di forma il più possibile rettangolare (Fig. 4.22).

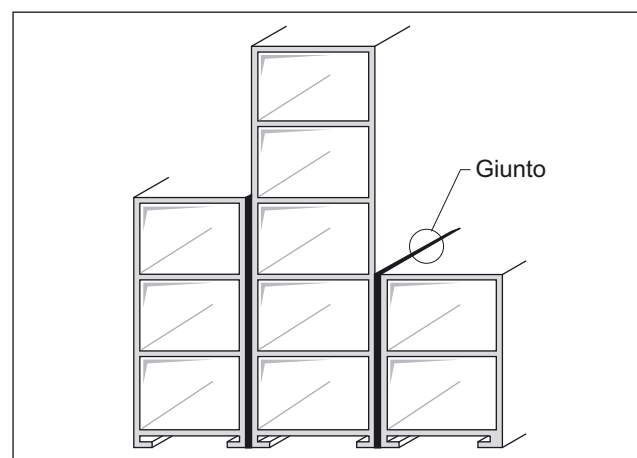


Figura 4.22 – Sezionamento a rettangoli.