

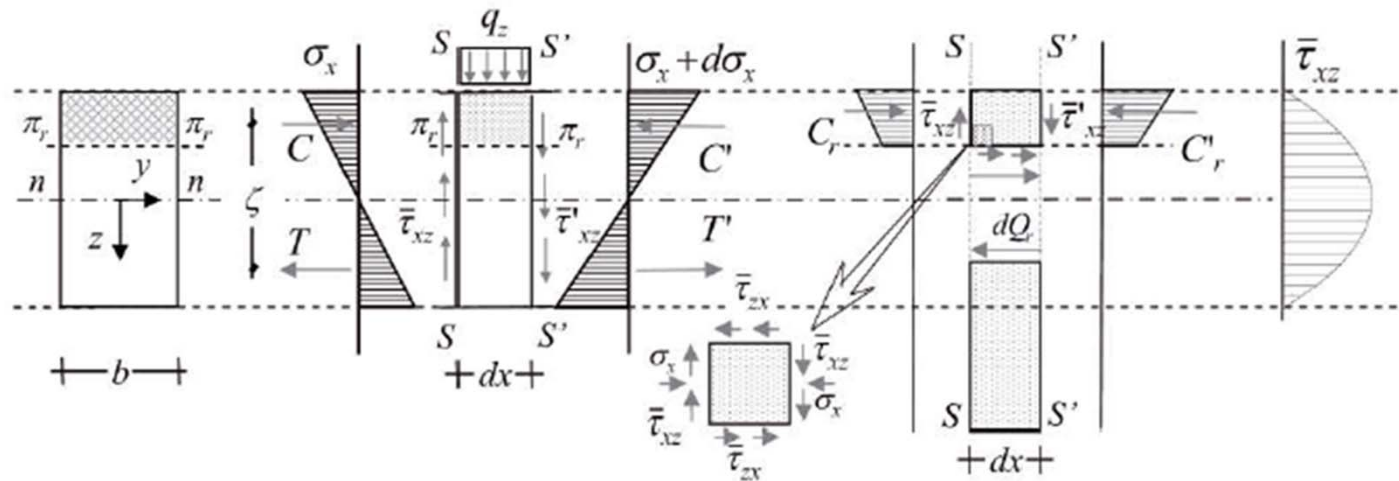
Lo Stato Limite Ultimo per Taglio

CAPITOLO 6

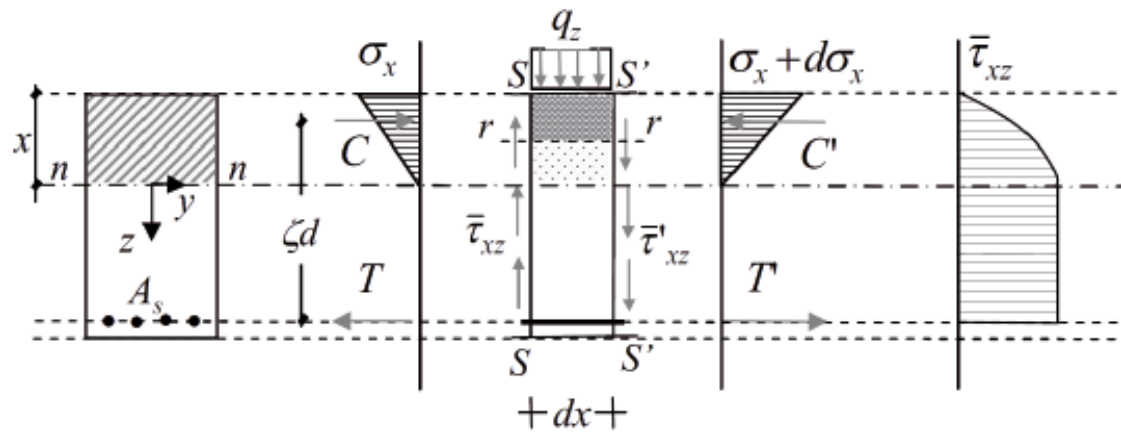
GENERALITÀ

La sollecitazione di taglio è presente nella maggior parte delle membrature di una struttura in c.a. ed è, in genere, concomitante alla sollecitazione di flessione. Se l'asse di sollecitazione coincide con uno degli assi principali d'inerzia della sezione, si è in presenza di **taglio retto**; in caso contrario il taglio si dice obliquo (o deviato).

Nei casi in cui, pur in presenza delle due sollecitazioni, la trave perviene a rottura senza che il momento flettente abbia raggiunto il suo valore ultimo per flessione pura, si dice usualmente che la trave ha raggiunto la «**rottura per taglio**», anche se il limite ultimo è in realtà governato dall'azione combinata di taglio e flessione.



Stato tensionale su di un elemento di trave omogenea isotropa ed elastica a sezione costante, in regime di flessione e taglio (trattazione di Jourawski).



Tensioni tangenziali medie in una trave in c.a. a sezione costante, in regime elastico.

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{dC \zeta}{dx} d \Rightarrow dC = \frac{V dx}{\zeta d} = C - C' = dQ_n = \bar{\tau}_{zx,n} b dx \quad \longrightarrow \quad V = \bar{\tau}_{zx,n} \zeta b d,$$

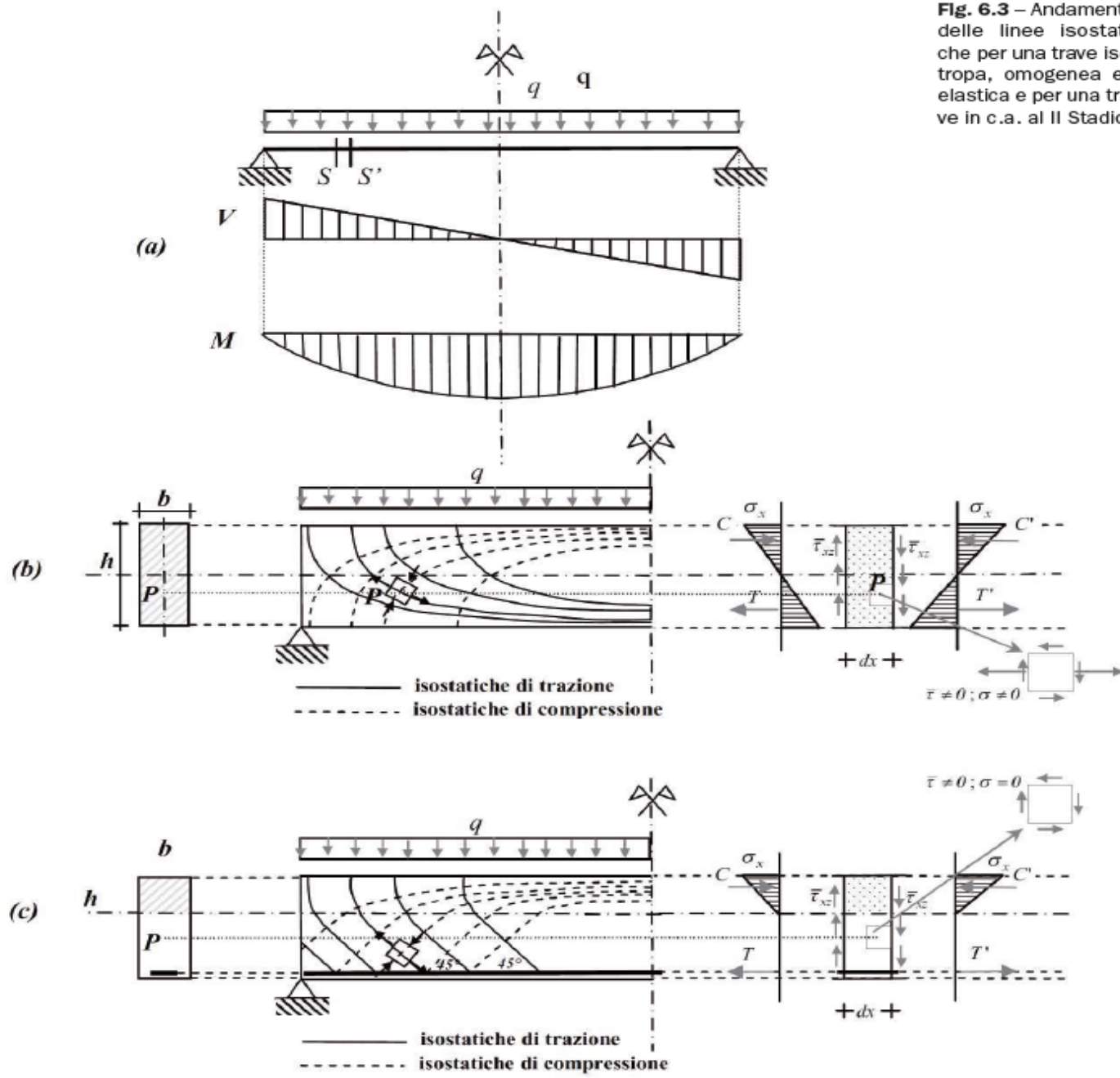
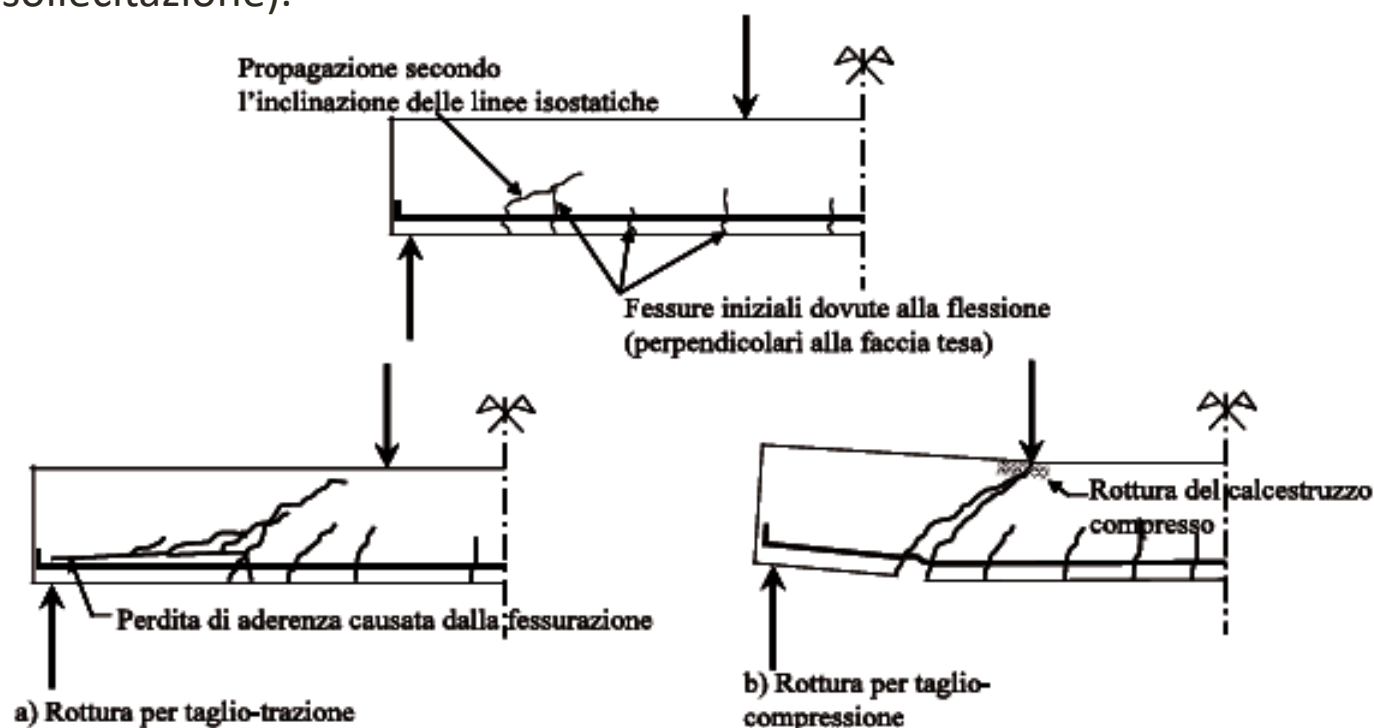


Fig. 6.3 – Andamento delle linee isostatiche per una trave isotropa, omogenea ed elastica e per una trave in c.a. al II Stadio.

Fino a che le sollecitazioni agenti non inducono tensioni di trazione superiori alla effettiva resistenza del conglomerato, lo stato tensionale nelle travi in calcestruzzo armato non risulta molto diverso da quello riscontrabile nelle travi omogenee ed isotrope.

Superata la resistenza a trazione del calcestruzzo, inizia a manifestarsi un caratteristico quadro fessurativo (che si estende e si intensifica all'aumentare della sollecitazione).



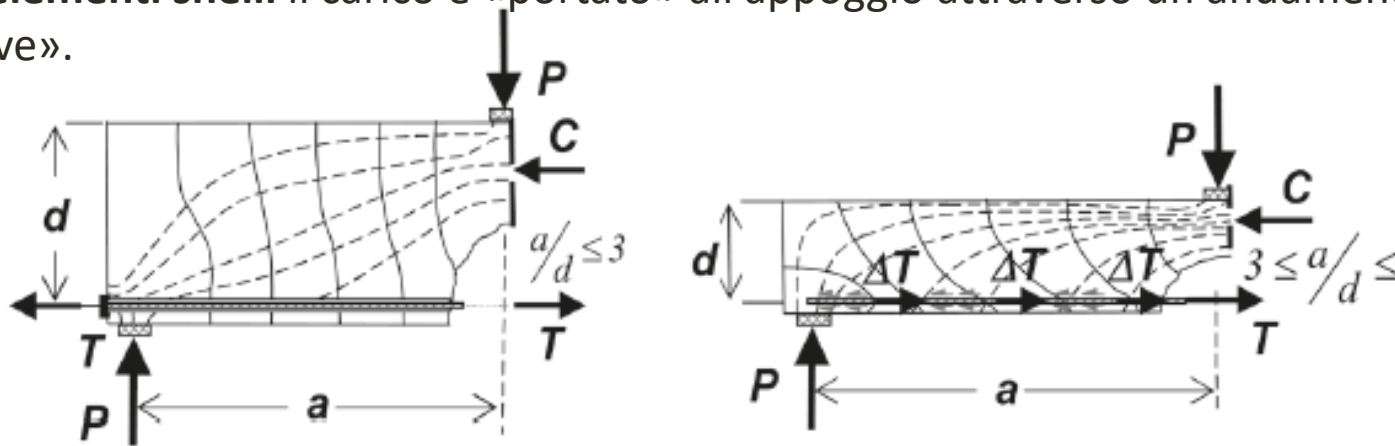
Quadro fessurativo in una trave in c.a. sino alla rottura a taglio.

Quando in un generico punto della trave viene superata la resistenza a trazione nel conglomerato, si genera la prima fessura che sarà ortogonale alla tensione principale di trazione nel punto.

All'aumentare del carico la fessura si estende anche ai punti più vicini all'asse neutro, seguendo un andamento che schematicamente segue quello delle isostatiche di compressione.

In funzione dei rapporti dimensionali della trave e delle condizioni di carico, tale andamento si modifica e, conseguentemente, si modifica anche il quadro fessurativo a rottura ed il conseguente meccanismo resistente.

Nel caso di **elementi tozzi** le linee isostatiche tendono a scaricare direttamente l'azione esterna sull'appoggio attraverso un unico puntone diagonale; nel caso di **elementi snelli** il carico è «portato» all'appoggio attraverso un andamento «a trave».



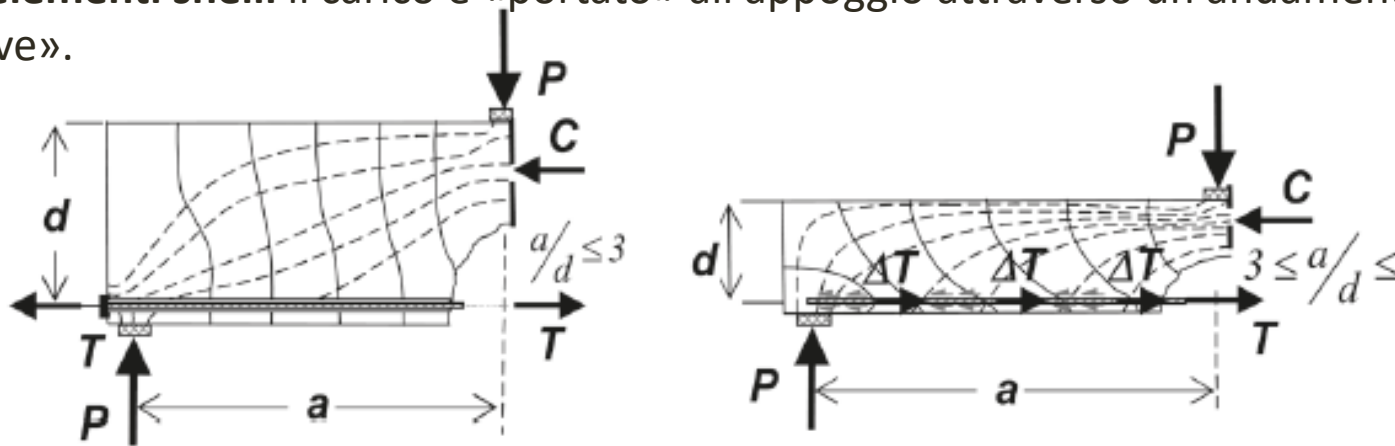
Andamento delle linee isostatiche per travi tozze e snelle

Quando in un generico punto della trave viene superata la resistenza a trazione nel conglomerato, si genera la prima fessura che sarà ortogonale alla tensione principale di trazione nel punto.

All'aumentare del carico la fessura si estende anche ai punti più vicini all'asse neutro, seguendo un andamento che schematicamente segue quello delle isostatiche di compressione.

In funzione dei rapporti dimensionali della trave e delle condizioni di carico, tale andamento si modifica e, conseguentemente, si modifica anche il quadro fessurativo a rottura ed il conseguente meccanismo resistente.

Nel caso di **elementi tozzi** le linee isostatiche tendono a scaricare direttamente l'azione esterna sull'appoggio attraverso un unico puntone diagonale; nel caso di **elementi snelli** il carico è «portato» all'appoggio attraverso un andamento «a trave».



Andamento delle linee isostatiche per travi tozze e snelle

MECCANISMI RESISTENTI PRIVI DI ARMATURA A TAGLIO

In assenza di specifiche armature a taglio, finché il carico è tale da non produrre fessurazioni (Stadio I), le sollecitazioni taglienti sono assorbite grazie alla resistenza del calcestruzzo a trazione.

Come è noto, ogni variazione del momento flettente lungo l'asse della trave, richiede la presenza di una forza di taglio, regolata dalla condizione di equilibrio (V è la sollecitazione tagliente; M è il momento flettente; x è l'ascissa misurata lungo l'asse della trave):

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{d(T\zeta d)}{dx} \quad \longrightarrow \quad V = \zeta d \frac{dT}{dx} + \frac{d\zeta}{dx} T d$$

All'equilibrio della forza di taglio V possono concorrere due termini:

- il primo dipendente esclusivamente dalla variazione dT della forza di trazione nell'acciaio;
- il secondo dipendente dalla variazione del braccio (ζd) delle forze interne.

MECCANISMI RESISTENTI PRIVI DI ARMATURA A TAGLIO

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{d(T\zeta d)}{dx} \quad \longrightarrow \quad V = \zeta d \frac{dT}{dx} + \frac{d\zeta}{dx} T d$$

Il primo termine esprime il comportamento di una trave snella a sezione costante nelle zone distanti dagli appoggi, zone in cui il braccio (ζd) delle forze interne è praticamente costante.

In questo caso trascurabile. $\frac{d\zeta}{dx} \approx 0$

Il solo meccanismo di equilibrio possibile è legato alla variazione di T (forza di scorrimento).

Perché questo si verifichi occorre che l'aderenza sia capace di trasferire la quantità necessaria di forza tra l'acciaio ed il calcestruzzo in grado di soddisfare l'equilibrio globale del concio. Il valore di T è proprio uguale allo sforzo dx trasferito dal calcestruzzo all'armatura per effetto dell'aderenza tra i due materiali.

Si dice in questo caso che la trave ha un **funzionamento a taglio-scorrimento** ed il meccanismo resistente è noto come **meccanismo a pettine**.

MECCANISMI RESISTENTI PRIVI DI ARMATURA A TAGLIO

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{d(T\zeta d)}{dx} \quad \longrightarrow \quad V = \zeta d \frac{dT}{dx} + \frac{d\zeta}{dx} T d$$

Quando, per una qualche ragione, viene meno l'aderenza tra le barre di armatura tesa ed il calcestruzzo circostante, la forza T non può variare lungo l'asse della trave.

In questo caso: $\left(\frac{dT}{dz} = 0\right)$

La sola possibilità di mantenere l'equilibrio è affidata, in questo caso, alla variazione del braccio (ζd) delle forze interne.

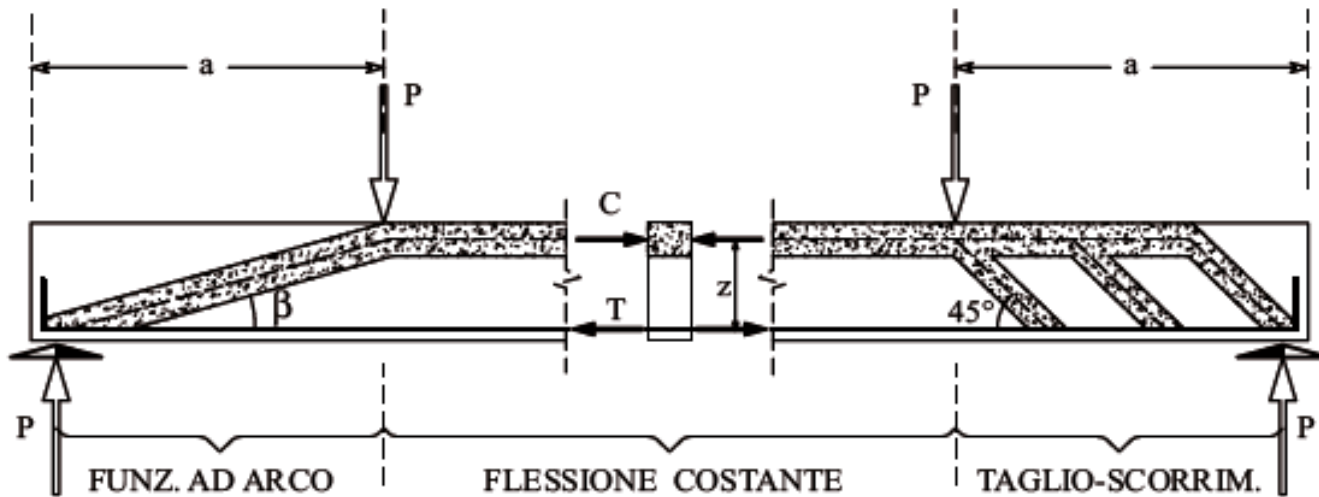
Questa circostanza richiede che la linea d'asse del corrente compresso risulti inclinata in modo tale che (ζd) vari con l'ascissa x secondo la stessa legge di variazione del momento flettente M ; ciò è possibile solo nelle zone prossime agli appoggi dove le isostatiche di compressione convergono verso la base dell'appoggio, disegnando all'interno della trave un arco per il quale l'armatura funge da catena.

Si dice in questo caso che la trave ha un **funzionamento ad arco** ed il meccanismo resistente che ne caratterizza il funzionamento è noto come **«effetto arco»**.

Esso può divenire significativo solo nelle travi tozze, caratterizzate cioè da un rapporto **a/d** relativamente piccolo, dopo che il meccanismo a pettine ha perso efficacia.

MECCANISMI RESISTENTI PRIVI DI ARMATURA A TAGLIO

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{d(T\zeta d)}{dx} \quad \longrightarrow \quad V = \zeta d \frac{dT}{dx} + \frac{d\zeta}{dx} T d$$



Diversi meccanismi resistenti di una trave soggetta a flessione e taglio.

IL MECCANISMO RESISTENTE «A PETTINE», L'EFFETTO «SPINOTTO» E L'EFFETTO «INGRANAMENTO»

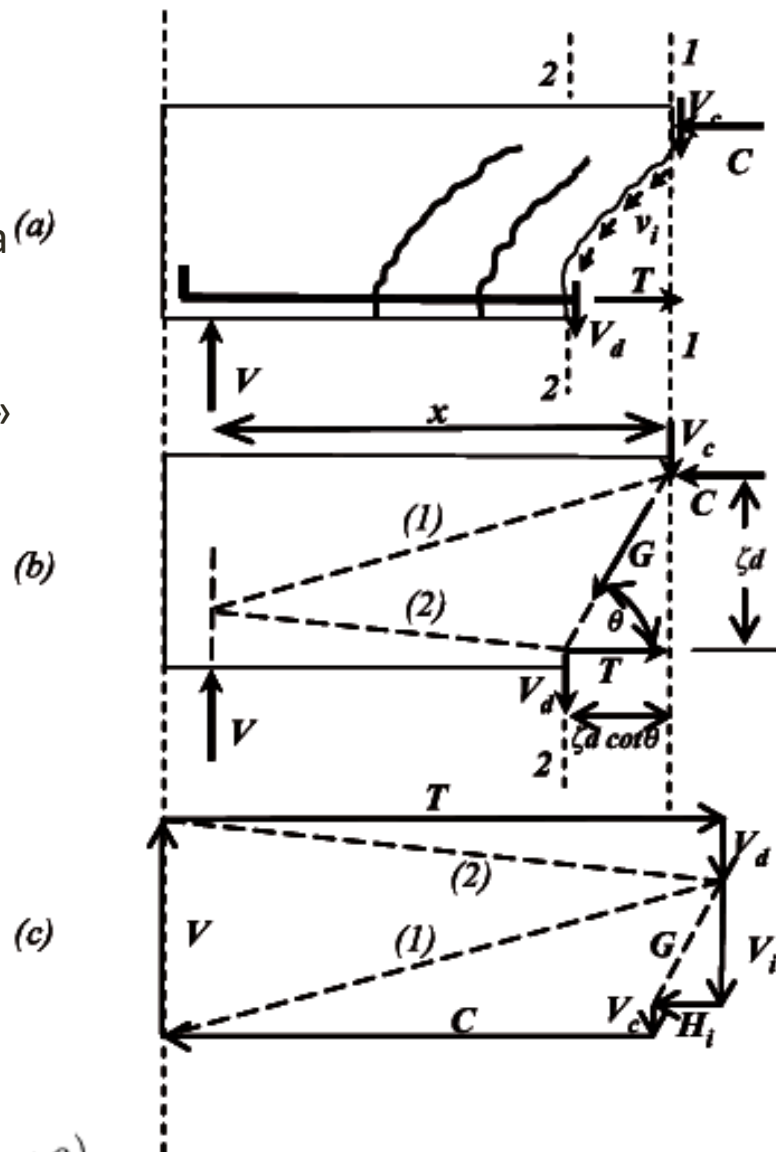
Il taglio V è equilibrato dalla combinazione di tre differenti azioni resistenti:

- un'aliquota V_c che agisce in corrispondenza della zona compressa;
- un'aliquota V_d dovuto all'effetto «spinotto» derivante dall'impegno «flessionale» delle armature poste in zona tesa;
- uno sforzo derivante dalla componente verticale dell'azione dovuta all'effetto di «ingranamento» tra le facce della fessura.

Equazioni di equilibrio del solido in esame, alla traslazione verticale ed alla rotazione:

$$V = V_d + V_i + V_c$$

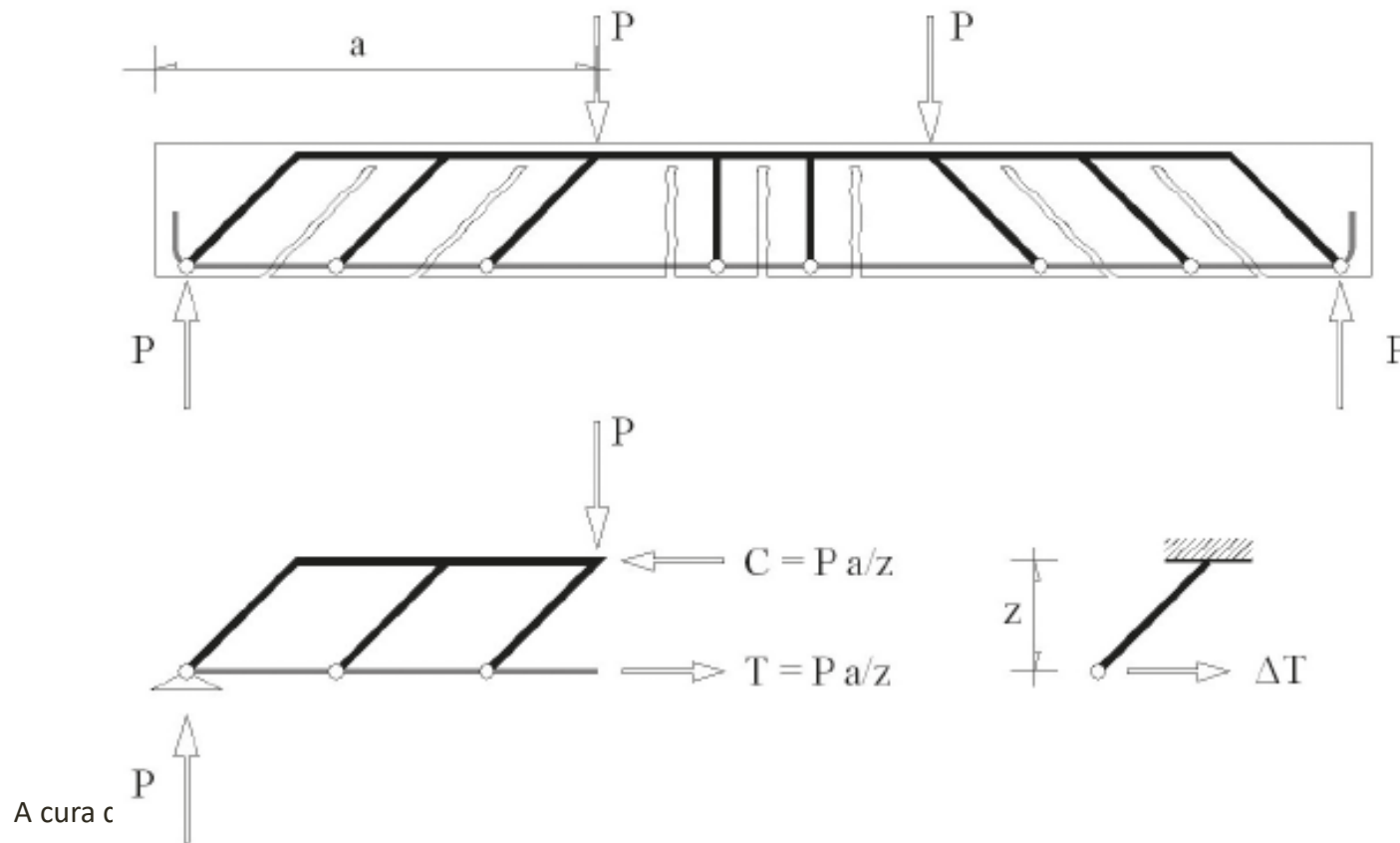
$$M = V \cdot x = T \zeta d + V_d \zeta d \cot \theta = \zeta d (T + V_d \cot \theta)$$

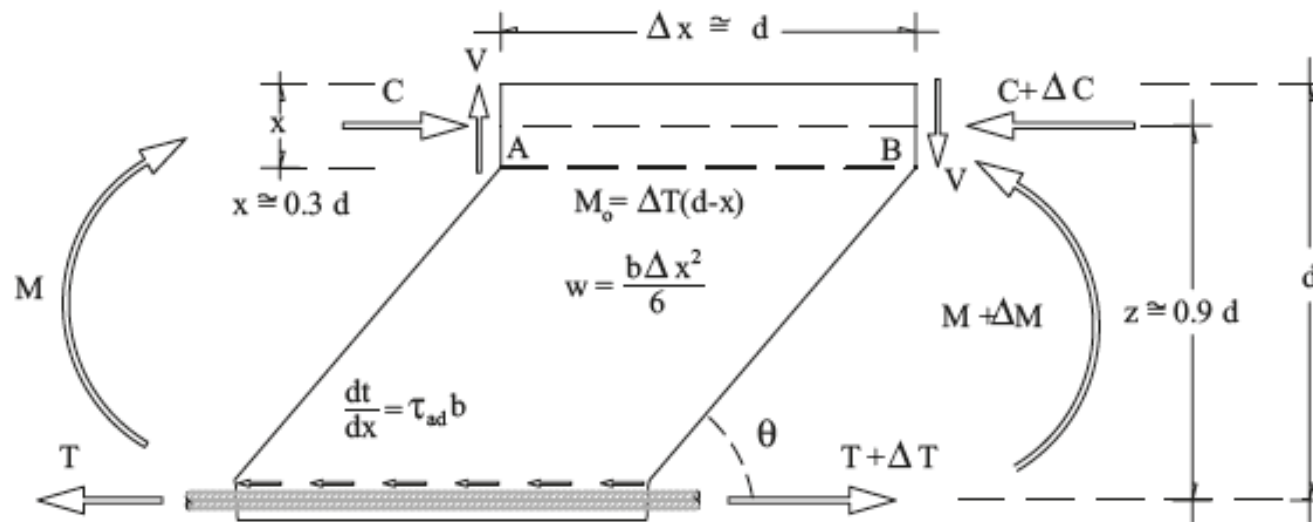


La fessurazione prodotta dal carico divide la zona tesa in conci compresi tra due fessure contigue; ognuno dei conci può essere assimilato ad una mensola vincolata al corrente compresso dell'elemento strutturale ed attraversata inferiormente dall'armatura longitudinale dell'elemento stesso.

Tale configurazione è nota come **meccanismo resistente a pettine** in cui i conci rappresentano i denti del pettine.

Dalla capacità di resistenza del generico dente dipende la possibilità di trasmissione dello sforzo di scorrimento dall'armatura tesa al corrente compresso.





Meccanismo resistente a pettine: equilibrio del singolo dente.

La resistenza a taglio (per trazione) offerta nel *meccanismo a pettine* in elementi senza armatura trasversale, può essere rappresentata da:

$$V_{Rd,c} = 0.25 f_{ctd} b d$$

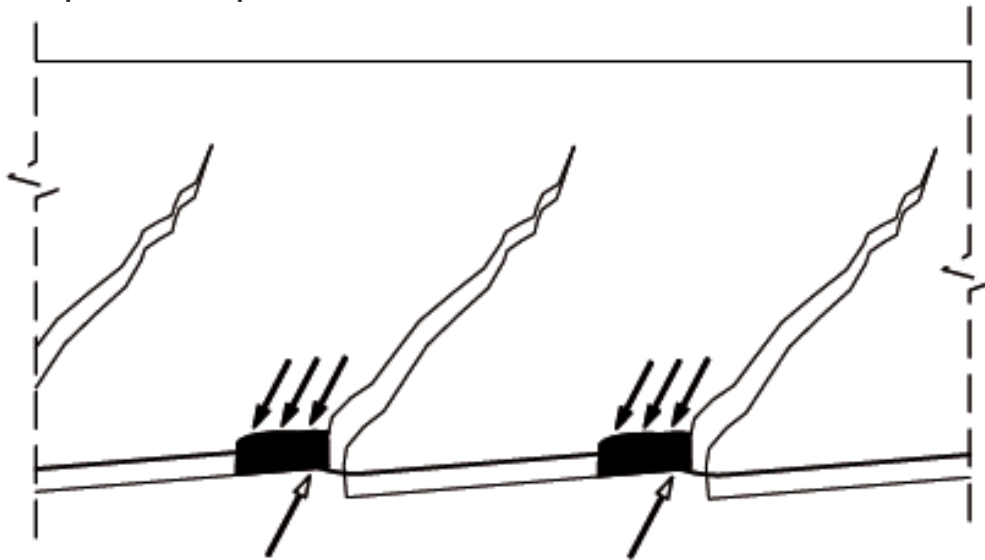
EFFETTO «SPINOTTO»

L'effetto spinotto è strettamente connesso alla rigidezza flessionale delle barre che costituiscono l'armatura longitudinale tesa della trave.

Queste, in virtù dello scorrimento tra le due facce della fessura prodotta dal taglio, sono impegnate in una deformazione flessionale e finiscono per assorbire un'aliquota della sollecitazione tagliante complessiva.

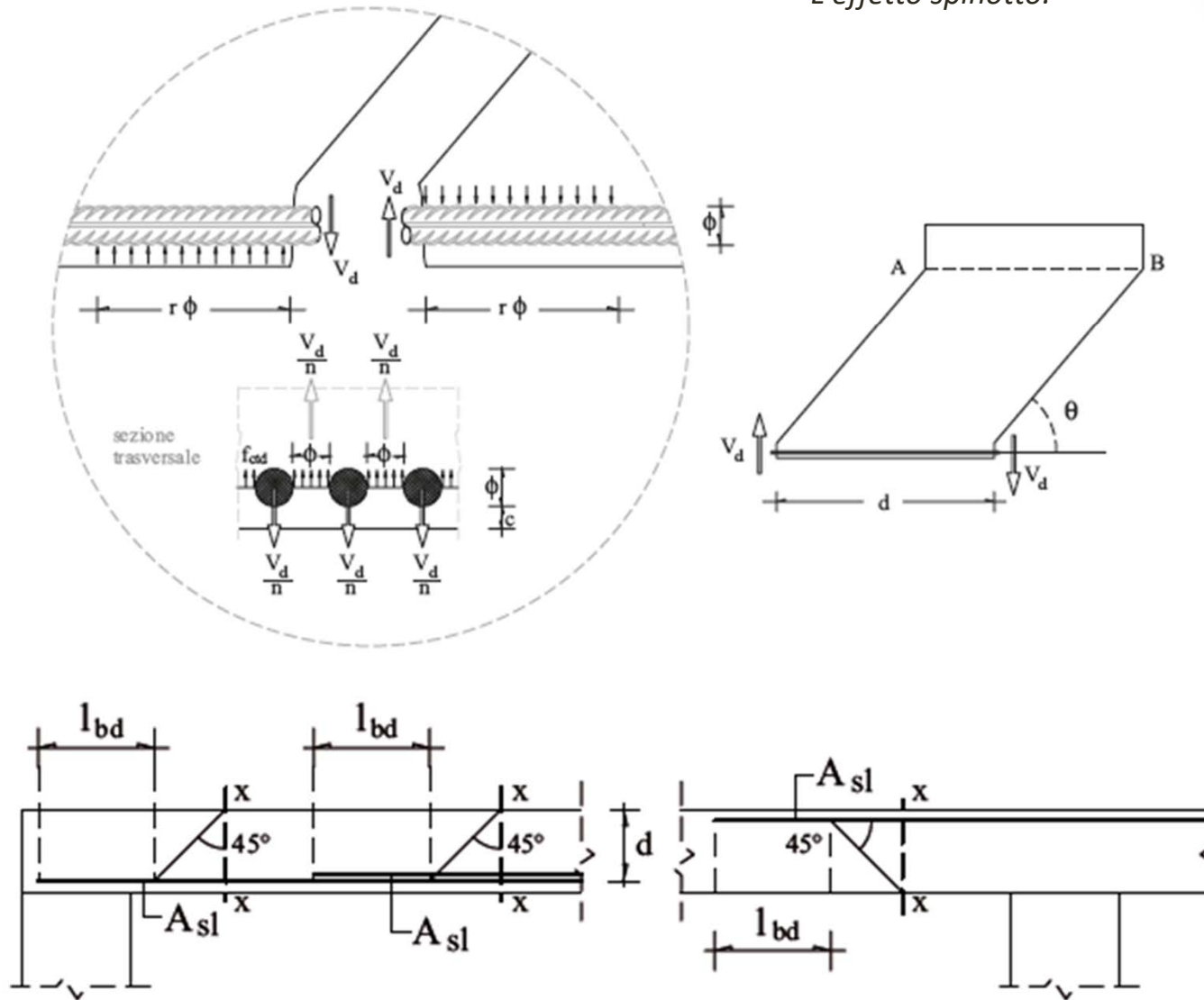
Tale contributo trova un limite nella capacità del ricoprimento di calcestruzzo di sostenere le barre longitudinali che, per effetto della suddetta azione tagliante, tendono ad essere espulse (sfondellamento).

L'esatta quantificazione di tale effetto non è agevole e dipende essenzialmente dal diametro e dalla distribuzione delle barre longitudinali. Il contributo si ricava per via empirica – sperimentale.



EFFETTO «SPINOTTO»

L'effetto spinotto.



Definizione di A_{sl} da considerare per la quantificazione dell'effetto spinotto

EFFETTO «SPINOTTO»

Resistenza a taglio allo S.L.U. di elementi privi di armatura d'anima, comprensiva dell'effetto spinotto:

$$V_{Rd,c} = 0.26(1 + 6.42 r \rho_l) f_{ctd} b d$$

Solitamente si assume:

$$V_{Rd,c} = 0.25(1 + 10 r \rho_l) f_{ctd} b d$$

che, con la posizione $\beta = (1 + 10 \cdot r \cdot \rho_l)$, assume la forma più generale:

$$V_{Rd,c} = 0.25 \beta f_{ctd} b d$$

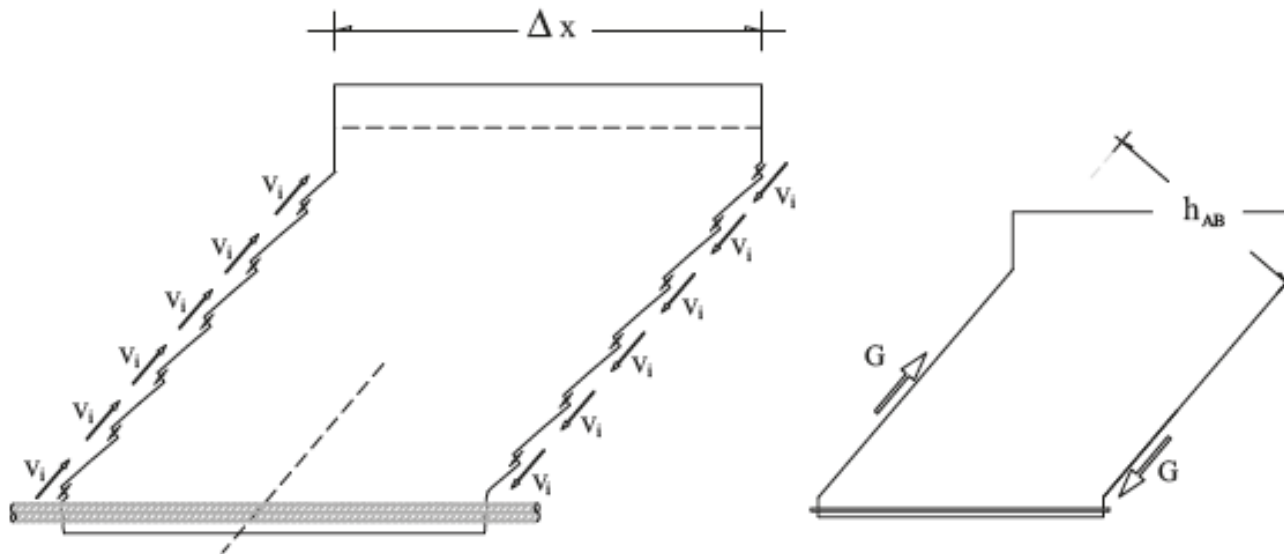
in cui $\rho_l = A_{sl} / (b d)$ è la percentuale geometrica dell'armatura longitudinale tesa, utile ai fini dell'effetto spinotto.

Il contributo dell'effetto spinotto è interamente sintetizzato nel parametro $\beta > 1$ che, per valori di $r=5$ e di $\rho_{l,max} = 0.04$ può teoricamente raggiungere valori massimi anche dell'ordine $\beta=3$.

«INGRANAMENTO DEGLI INERTI»

L'effetto ingranamento è particolarmente rilevante per travi basse, per le quali le fessure sono strette, mentre si riduce al crescere dell'altezza della trave in quanto aumenta l'ampiezza della lesione (effetto scala).

Per tener conto di tale meccanismo i codici normativi incrementano la resistenza a taglio tramite un coefficiente moltiplicativo k che dipende essenzialmente dal rapporto fra la massima pezzatura dell'inerte utilizzato e l'altezza utile della trave. Poiché, per calcestruzzi normali, detta pezzatura non varia in maniera sensibile ($\approx 20\text{mm}$), il coefficiente k può considerarsi sostanzialmente inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'altezza utile della trave.



In definitiva inserendo k e β , si perviene all' espressione della resistenza ultima a taglio di elementi privi di armatura d'anima, comprensiva sia dell'effetto spinotto sia dell'effetto ingranamento degli inerti:

$$V_{Rd,c} = 0.25 f_{ctd} \cdot k \cdot \beta \cdot b_w \cdot d$$

Effetto spinotto ed effetto ingranamento degli inerti sono sintetizzati rispettivamente nei parametri amplificativi $\beta > 1$ e $k > 1$.

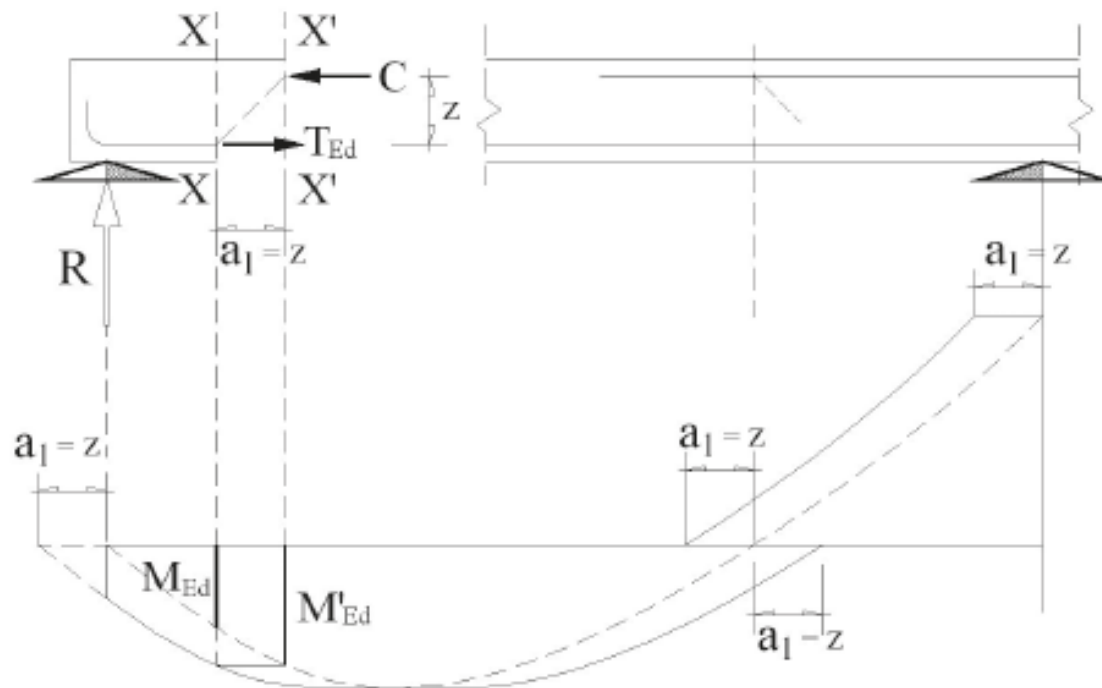
Come per β , anche per il parametro k è generalmente posta la limitazione $k \leq 2$.

Ricordando infine che $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c$, che è in generale esprimibile quale funzione di f_{ck} , che k è funzione di d che β è funzione di ρ_l , la resistenza di elementi non armati a taglio risulta funzione di tutte le suddette grandezze:

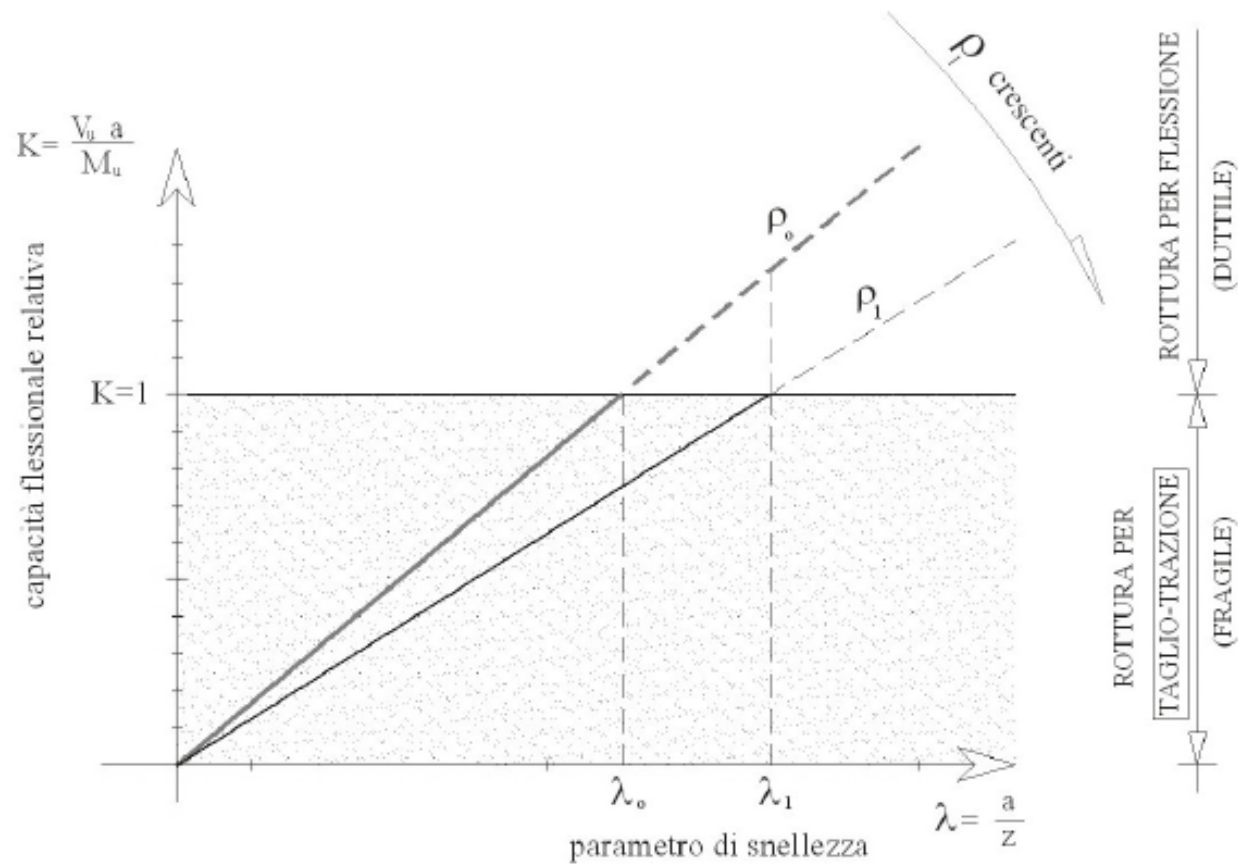
$$\frac{V_{Rd,c}}{b_w d} = \text{funzione} \left(\frac{1}{\gamma_c}, f_{ck}, d, \rho_l \right)$$

Traslazione del diagramma del momento flettente.

Come è già stato osservato in precedenza, il funzionamento a pettine, ovvero la presenza di fessure inclinate, finisce per modificare la distribuzione degli sforzi dovuti al momento flettente nominale.



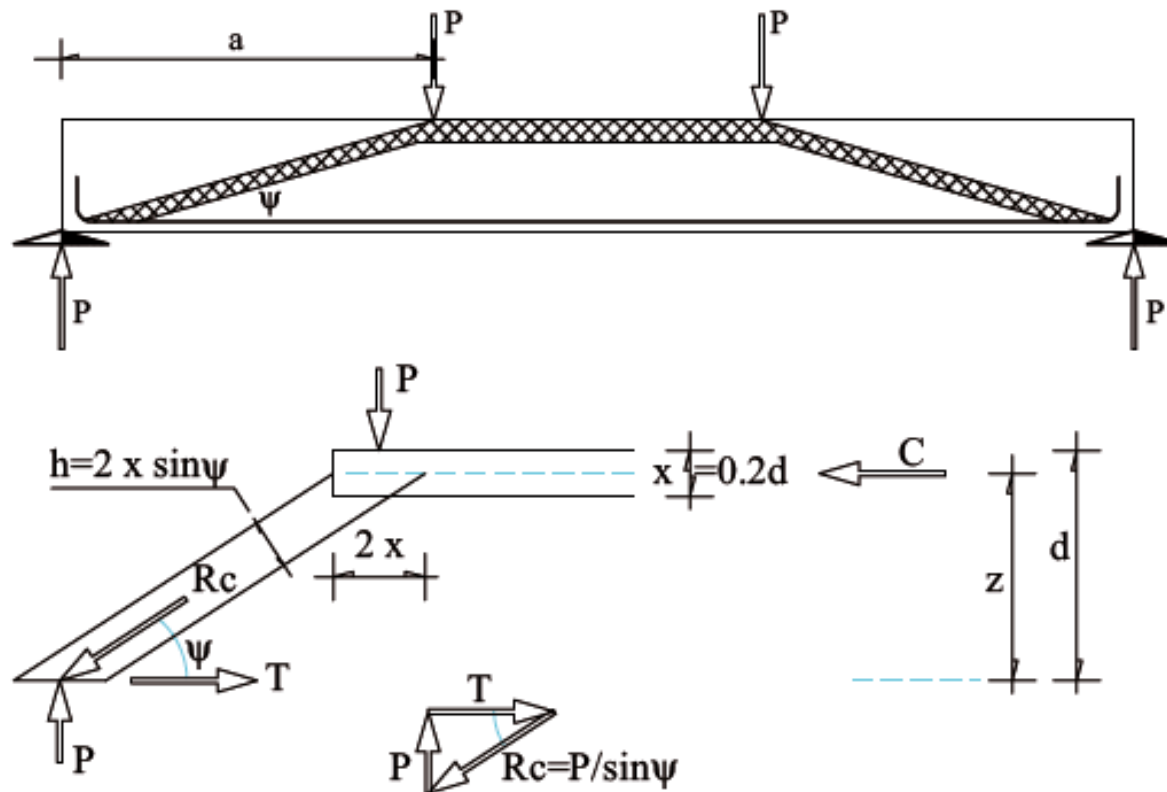
Capacità flessionale relativa



MECCANISMO RESISTENTE «AD ARCO»

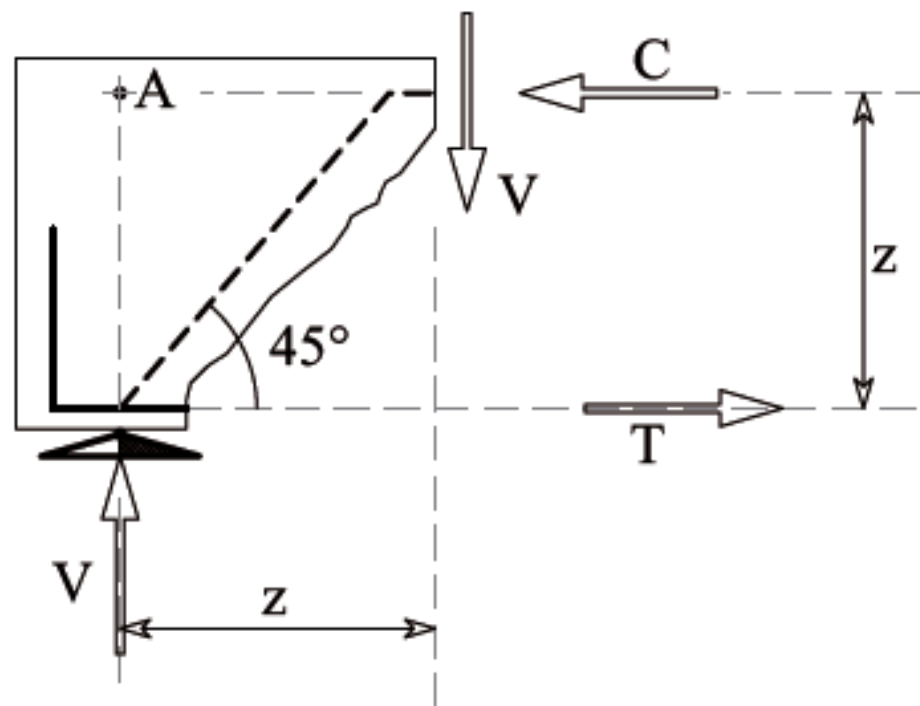
Le precedenti considerazioni in termini di «capacità flessionale relativa», portano a concludere che nel campo delle basse snellezze ($\lambda < \lambda_1$) il comportamento della trave allo S.L.U. è sempre governato da rotture per taglio-scorrimento.

In realtà, nel campo delle snellezze molto basse, può instaurarsi un meccanismo di rottura alternativo a quello a pettine: può succedere cioè che, nonostante i denti del meccanismo a pettine abbiano ceduto per trazione in corrispondenza della sezione di incastro al corrente superiore, la trave riesca a resistere per l'instaurarsi di un meccanismo del tipo «ad arco».



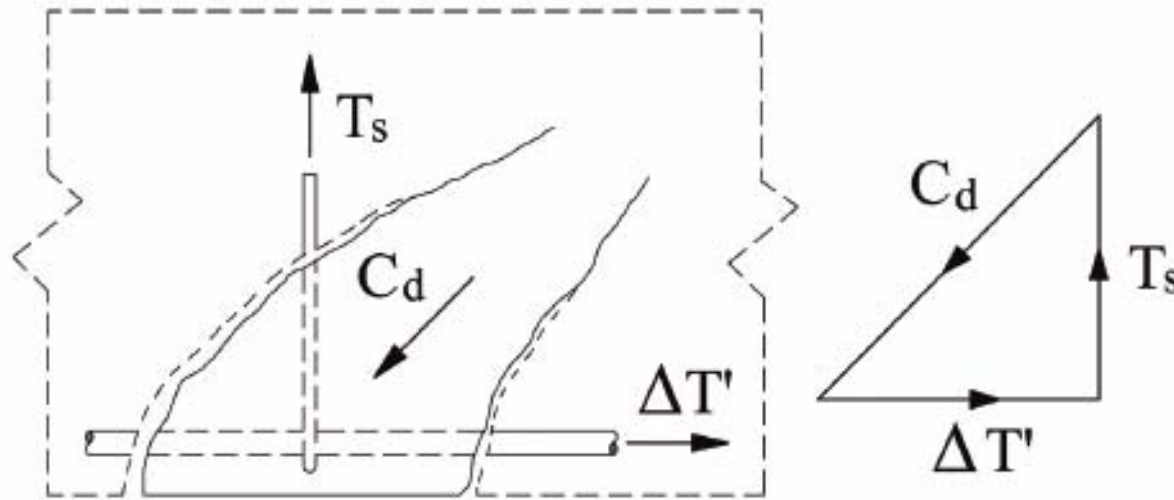
MECCANISMO RESISTENTE «AD ARCO»

Le NTC inoltre richiedono che, in corrispondenza degli appoggi, le armature longitudinali debbano essere dimensionate in maniera tale da essere in grado di assorbire uno sforzo di trazione pari al taglio sull'appoggio ($V z = T z$).



MECCANISMI RESISTENTI DI ELEMENTI CON ARMATURA A TAGLIO

La presenza di armatura a taglio (spesso denominata armatura d'anima) quale ad esempio la staffatura, non cambia sostanzialmente i meccanismi resistenti già analizzati al punto precedente per elementi privi di armatura a taglio.



MECCANISMI RESISTENTI DI ELEMENTI CON ARMATURA A TAGLIO

La presenza di staffe potenzia tutti i singoli contributi resistenti del meccanismo a scorrimento esaminati nel caso di elementi privi di armatura a taglio.

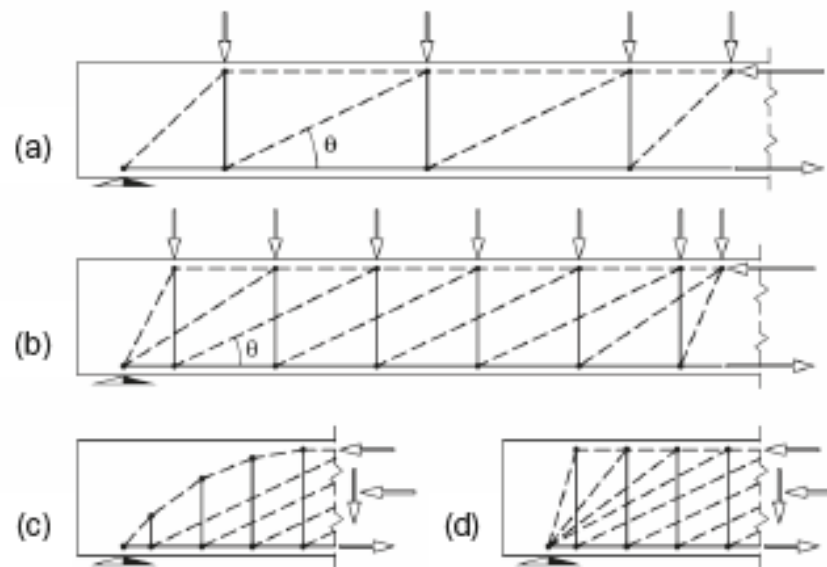
In particolare:

- migliora l'effetto spinotto grazie all'azione di sostegno del corrente teso inferiore;
- riduce le trazioni nella sezione di incastro del dente grazie alla presenza dello sforzo di compressione diagonale C_d ;
- aumenta l'effetto di ingranamento in quanto limita l'apertura delle fessure diagonali;
- aumenta la resistenza a compressione diagonale grazie all'azione di confinamento esaltata nei casi in cui le staffe siano sufficientemente ravvicinate;
- riduce il rischio di collasso per perdita di aderenza dell'armatura longitudinale tesa in quanto riduce le eventualità di sfondellamento.

Il «**traliccio di Morsch**», rappresenta il modello fondamentale per valutare la resistenza al taglio di un elemento dotato di armatura d'anima.

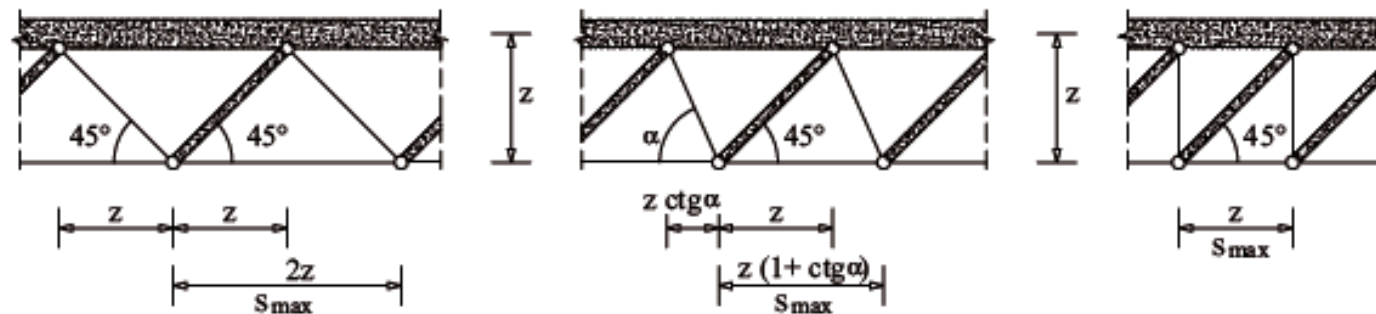
In esso tutte le aste si assumono incernierate alle estremità ed i carichi sono applicati esclusivamente in corrispondenza dei nodi; ne consegue che tutte le aste sono soggette esclusivamente a sforzo normale di compressione o di trazione.

Mentre il modello a traliccio di figura (a) è isostatico, quello, forse più realistico, di figura (b) è iperstatico benché l'isostaticità possa essere ripristinata assumendo, per esempio, noto lo sforzo nell'ultima staffa.

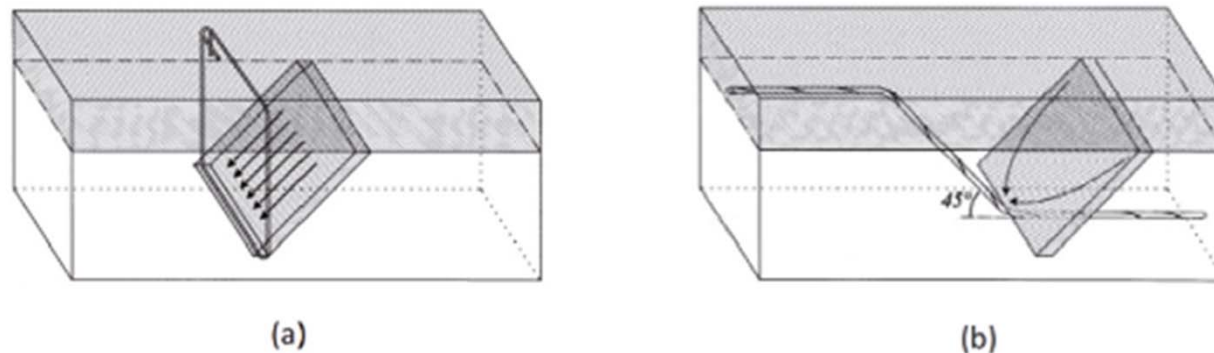


L'accuratezza del modello dipende dal maggiore o minore numero di aste in cui discretizza l'elemento strutturale.

Inoltre, per il corretto funzionamento del traliccio, è necessario che sia presente un'armatura d'anima avente ricorsi la cui distanza sia adeguatamente limitata al fine di raccogliere le compressioni provenienti dai puntoni diagonali.

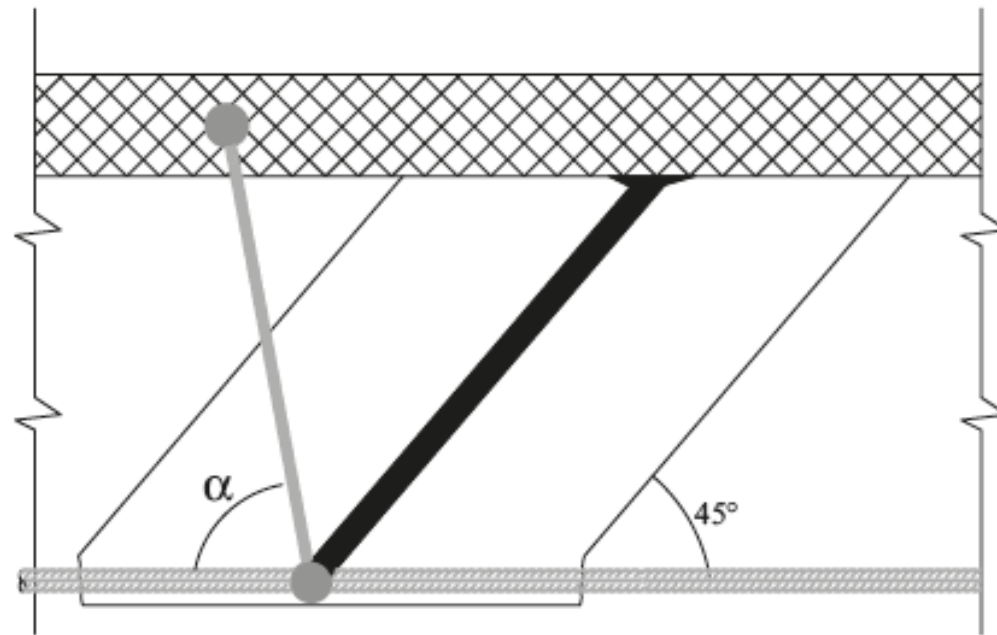


Interasse massimo dell'armatura d'anima.



Interazione spaziale della staffa e della barra piegata nello schema a traliccio di Morsch.

Ipotizzando l'elemento verificato per gli effetti della sola flessione sul corrente longitudinale compresso e su quello longitudinale teso, la condizione di collasso può verificarsi quando viene raggiunta o la condizione di crisi nel conglomerato compresso del concio inclinato (**taglio-compressione**), o quella delle bielle tese dell'armatura d'anima (**taglio-trazione**).

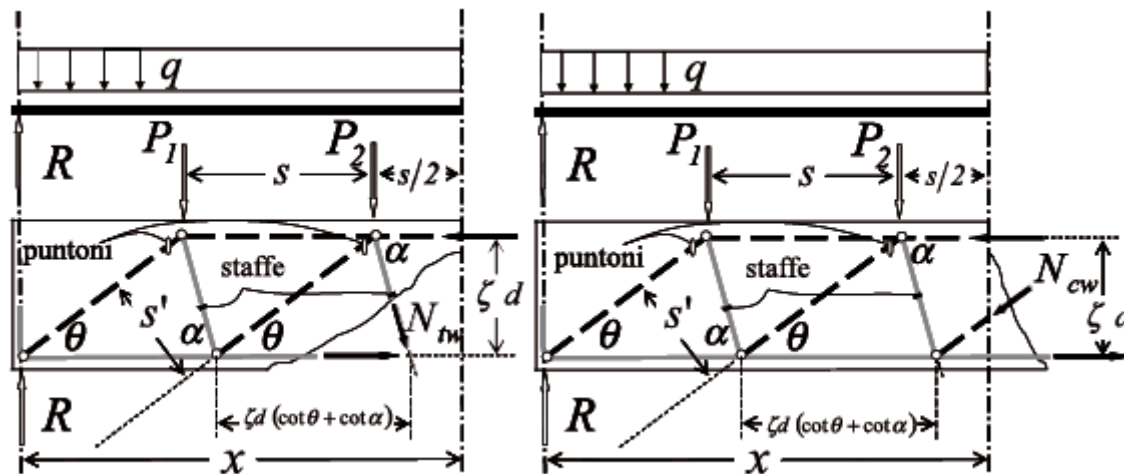


Singola maglia del traliccio iperstatico modificato

Il modello assunto nei calcoli è quello del traliccio con tutte le aste incernierate alle estremità, in cui la resistenza a **taglio-compressione** - V_{Rcd} - è fornita dalla resistenza a compressione semplice del puntone inclinato, mentre la resistenza a **taglio-trazione** - V_{Rsd} - è pari alla resistenza della sola armatura d'anima.

L'inclinazione dei puntoni di calcestruzzo risulta essere determinata sulla base di ipotesi circa il comportamento allo SLU dell'elemento.

La resistenza a taglio è poi fornita, ovviamente, dal minore dei due valori.



Resistenza a Taglio-Trazione.

La Fig. 6.32 riporta la generalizzazione della (6.38) al caso in cui le staffe sono disposte ad un interasse s inferiore a $\zeta d (\cot \theta + \cot \alpha)$. In questo caso il generico diagonale teso di parete di Fig. 6.31 rappresenta n_{sw} staffe (o ferri piegati), ciascuna di area A_{sw} , poste ad interasse s .

Si ha così (n_{br} è il numero di bracci della generica staffa di area A_{st}):

$$n_{sw} = \frac{\zeta d (\cot \theta + \cot \alpha)}{s}; \quad A_{sw} = n_{br} A_{st}$$

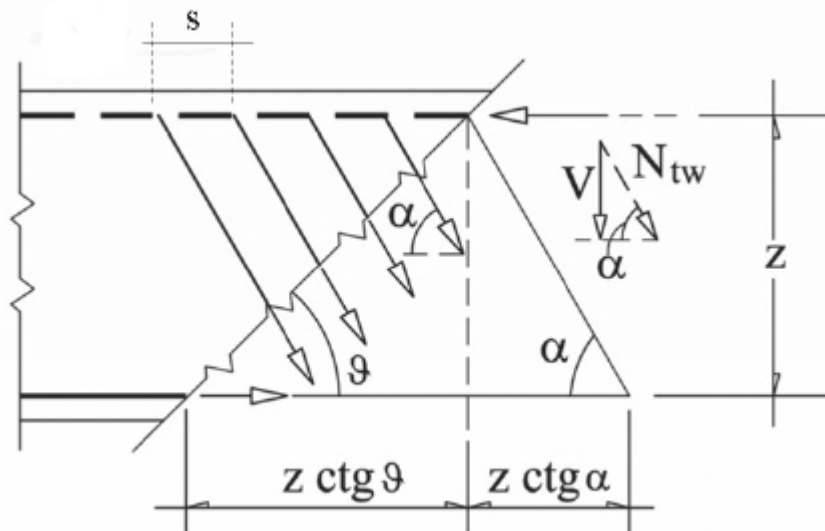


Fig. 6.32 – Sezione di Ritter per la determinazione dello sforzo nella generica staffa posta a distanza $s \leq \zeta (\cot \theta + \cot \alpha)$.

Resistenza a Taglio-Trazione.

Ed inoltre

$$N_{tw} = \sigma_{sw} n_{sw} A_{sw} = \sigma_{sw} \frac{\zeta d (\cot \theta + \cot \alpha)}{s} A_{sw} = \frac{V}{\sin \alpha};$$

$$V = \sigma_{sw} \frac{A_{sw}}{s} \zeta d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$$

Allo Stato limite ultimo per **Taglio-Trazione** la crisi del meccanismo resistente è raggiunta per snervamento dell'armatura d'anima e la tensione vale f_{ywd} :

$$V_{RSd} = f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} \zeta d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha = 0.9 f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (6.40)$$

La seconda delle (6.40) è ottenuta ipotizzando $\zeta \cong 0.9$. Inoltre, nel caso in cui $\alpha = 90^\circ$ (staffe verticali), si ha:

$$V_{RSd} = 0.9 f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} d \cot \theta \quad (6.41)$$

Infine, se si assume $\theta = 45^\circ$, si ottiene:

$$V_{RSd} = 0.9 f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} d \quad (6.42)$$

Resistenza a Taglio-Compressione.

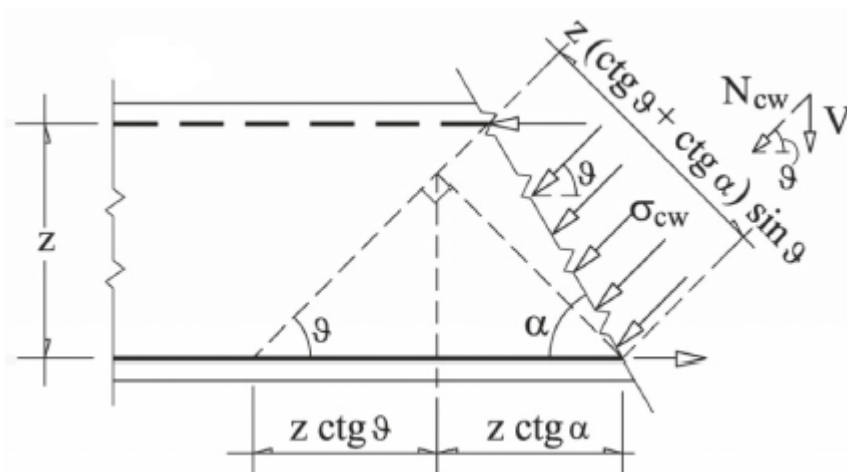


Fig. 6.33 – Sezione di Ritter per la determinazione dello sforzo nel generico puntone di parete di calcestruzzo compresso inclinato di un angolo θ .

Resistenza a Taglio-Compressione.

In questo caso la larghezza della sezione resistente del generico puntone compresso in calcestruzzo, di spessore b_w è pari a (Fig. 6.33):

$$\begin{aligned}s' &= \zeta d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \theta; \\ N_{cw} &= \sigma_{cw} b_w \zeta d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \theta = \frac{V}{\sin \theta}; \\ V &= \sigma_{cw} b_w \zeta d (\cot \theta + \cot \alpha) (\sin \theta)^2; \quad (\sin \theta)^2 = \frac{1}{1 + (\cot \theta)^2} \quad (6.43) \\ V &= \frac{\sigma_{cw} b_w \zeta d (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + (\cot \theta)^2}\end{aligned}$$

Allo SLU (ovvero quando la tensione σ_{cw} di compressione nel puntone diagonale raggiunge il valore limite di calcolo f_{cwd}), la resistenza per taglio-compressione V_{Rcd} di un elemento dotato di armatura trasversale è pari a:

$$V_{Rcd} = 0.9 \frac{f_{cwd} b_w d \cot \theta}{1 + (\cot \theta)^2} \quad (6.44)$$

Nella (6.44) si sono assunti i valori $\zeta = 0.9$, $\alpha = 90^\circ$ (staffe verticali).

VALUTAZIONE DELL'INCLINAZIONE DEL PUNTONE ALLO SLU.

Resistenza per **Taglio-Trazione**:

$$V_{RSd} = 0.9 f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} d \cot \theta$$

Resistenza per **Taglio-Compressione**:

$$V_{Rcd} = 0.9 \frac{f_{c wd} b_w d \cot \theta}{1 + (\cot \theta)^2} = 0.9 f_{c wd} b_w d \sin \theta \cos \theta$$

La resistenza ultima a taglio della trave è quindi definita dal più piccolo dei valori sopra espressi, entrambi correlati all'assetto dell'angolo delle compressioni ϑ assunto allo S.L.U.

$$V_{Rd} = \min(V_{RSd}, V_{Rcd})$$

PROGETTO E VERIFICA ARMATURA A TAGLIO

Ai fini operativi può essere utile adimensionalizzare le resistenze a *taglio-trazione* e *taglio-compressione*, dividendole entrambe per la quantità $(0,9b_w d f_{ywd})$.

Resistenza specifica taglio-compressione;

$$v_{rcd} = \frac{V_{Rcd}}{0,9b_w d f_{ywd}} = \kappa \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta$$

$$\kappa = \frac{f'_{cd}}{f_{ywd}}$$

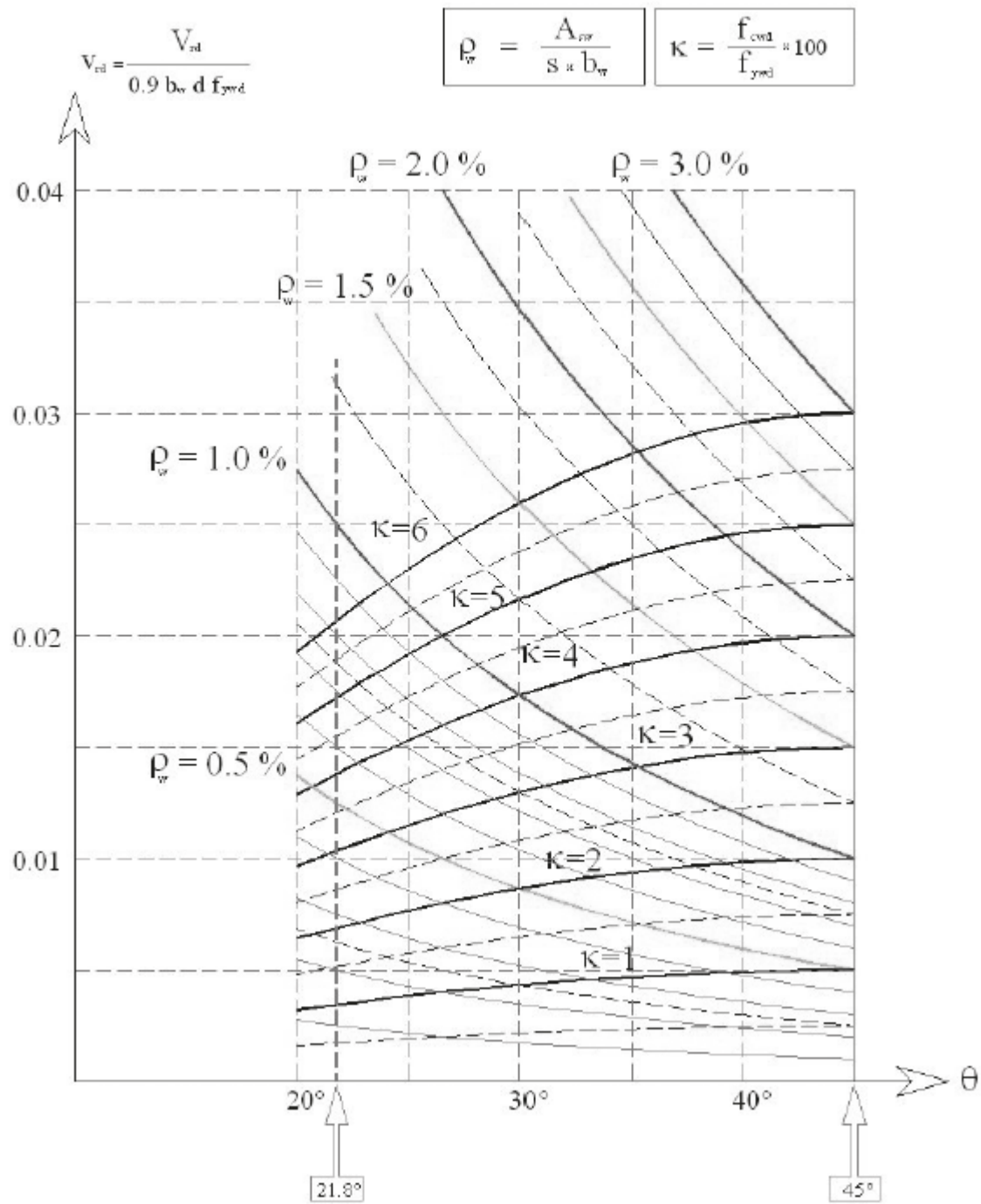
Rapporto meccanico fra resistenza di calcolo a compressione del conglomerato del puntone diagonale e la resistenza di calcolo dell'armatura d'anima.

Resistenza specifica a taglio-trazione:

$$v_{rsd} = \frac{V_{Rsd}}{0,9b_w d f_{ywd}} = \rho_w \cdot \cot\theta$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s}$$

Densità geometrica armatura trasversale



NORMATIVA D.M. 17.01.2018

4.1.2.3.5 Resistenza nei confronti di sollecitazioni taglianti

Senza escludere la possibilità di specifici studi, per la valutazione delle resistenze ultime di elementi monodimensionali nei confronti di sollecitazioni taglianti e delle resistenze ultime per punzonamento, si deve considerare quanto segue.

4.1.2.3.5.1 Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio

Se, sulla base del calcolo, non è richiesta armatura al taglio, è comunque necessario disporre un'armatura minima secondo quanto previsto al punto 4.1.6.1.1. E' consentito omettere tale armatura minima in elementi quali solai, piastre e membrature a comportamento analogo, purché sia garantita una ripartizione trasversale dei carichi.

La verifica di resistenza (SLU) si pone con

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad [4.1.22]$$

dove V_{Ed} è il valore di progetto dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza di progetto a taglio si valuta con

$$V_{Rd} = \max \left\{ \left[0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d; (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w d \right\} \quad [4.1.23]$$

con

f_{ck} espresso in MPa

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

e dove

d è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_1 = A_{sl} / (b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa ($\leq 0,02$) che si estende per non meno di $(l_{bd} + d)$ oltre la sezione considerata, dove l_{bd} è la lunghezza di ancoraggio;

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ [MPa] è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0,2 f_{ctd}$);

b_w è la larghezza minima della sezione (in mm).

Nel caso di elementi in calcestruzzo armato precompresso disposti in semplice appoggio, nelle zone non fessurate da momento flettente (con tensioni di trazione non superiori a f_{ctd}) la resistenza di progetto può valutarsi, in via semplificativa, con la formula:

$$V_{Rd} = 0,7 \cdot b_w \cdot d (f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} \cdot f_{ctd})^{1/2} \quad [4.1.24]$$

In presenza di significativi sforzi di trazione, la resistenza a taglio del calcestruzzo è da considerarsi nulla e, in tal caso, non è possibile adottare elementi sprovvisti di armatura trasversale.

Le armature longitudinali, oltre ad assorbire gli sforzi conseguenti alle sollecitazioni di flessione, devono assorbire quelli provocati dal taglio dovuti all'inclinazione delle fessure rispetto all'asse della trave, inclinazione assunta pari a 45° . In particolare, in corrispondenza degli appoggi, le armature longitudinali devono assorbire uno sforzo pari al taglio sull'appoggio.

NORMATIVA D.M. 17.01.2018

4.1.2.3.5.2 Elementi con armature trasversali resistenti al taglio

La resistenza di progetto a taglio V_{Rd} di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione θ dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 \leq \text{ctg } \theta \leq 2,5 \quad [4.1.25]$$

La verifica di resistenza (SLU) si pone con

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad [4.1.26]$$

dove V_{Ed} è il valore di progetto dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg } \alpha + \text{ctg } \theta) \cdot \sin \alpha \quad [4.1.27]$$

Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg } \alpha + \text{ctg } \theta) / (1 + \text{ctg}^2 \theta) \quad [4.1.28]$$

La resistenza di progetto a taglio della trave è la minore delle due sopra definite:

$$V_{Rd} = \min (V_{Rsd}, V_{Rcd}) \quad [4.1.29]$$

dove d , b_w e σ_{cp} hanno il significato indicato in § 4.1.2.3.5.1. e inoltre si è posto:

A_{sw} area dell'armatura trasversale;

s interasse tra due armature trasversali consecutive;

α angolo di inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave;

$v f_{cd}$ resistenza di progetto a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ($v = 0,5$);

α_c coefficiente maggiorativo pari a 1 per membrature non compresse

$$1 + \sigma_{cp} / f_{cd} \quad \text{per } 0 \leq \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd}$$

$$1,25 \quad \text{per } 0,25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$$

$$2,5 (1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{per } 0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$$

Le armature longitudinali devono essere dimensionate in base alle sollecitazioni flessionali ottenute traslando il diagramma dei momenti flettenti di

$$a_1 = (0,9 \cdot d \cdot \text{ctg } \theta) / 2 \quad [4.1.30]$$

lungo l'asse della trave, nel verso meno favorevole.