

## D.M.LL.PP. del 14/02/1992

Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.

### 3. NORME DI CALCOLO: METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI.

#### 3.0

Le azioni sulla costruzione devono essere cumulate secondo condizioni di carico tali da risultare più sfavorevoli ai fini delle singole verifiche, tenendo conto della probabilità ridotta di intervento simultaneo di tutte le azioni con i rispettivi valori più sfavorevoli, come consentito dalle norme vigenti.

#### 3.1. Cemento armato normale

##### 3.1.1. Metodo delle tensioni ammissibili.

Le tensioni del conglomerato compresso e dell'armatura sono calcolate prescindendo dal contributo a trazione del conglomerato, assumendo come area della sezione resistente quella corrispondente al conglomerato compresso ed alle aree metalliche tese e compresse affette dal coefficiente convenzionale di omogeneizzazione  $n = 15$ .

Il calcolo delle sezioni resistenti deve essere eseguito con i metodi della scienza delle costruzioni basati sull'ipotesi dell'elasticità lineare dei materiali.

##### 3.1.2. Variazioni termiche e ritiro.

Ove necessario si considererà l'influenza della variazione termica più sfavorevole in relazione alla temperatura ambiente durante l'esecuzione dell'opera tenendo anche conto dell'influenza della viscosità del conglomerato cementizio; nei casi ordinari in mancanza di dati più precisi, l'influenza degli scarti termici e della viscosità sul regime di sollecitazione potrà essere valutata convenzionalmente considerando, in regime elastico, l'influenza di scarti stagionali rispetto alla temperatura media locale, di  $\pm 15$  °C per le opere direttamente esposte alle azioni atmosferiche, e di  $\pm 10$  °C per le opere non direttamente esposte.

In generale la variazione di temperatura potrà essere considerata uniforme per tutte le membrature di una costruzione, tranne quando siano prevedibili differenze sensibili di temperatura tra i singoli elementi.

Quando per una stessa membratura esistano variazioni di temperatura diverse in corrispondenza dell'intradosso e dell'estradosso, si ammetterà in generale una distribuzione della variazione di temperatura di tipo lineare.

##### 3.1.3. Tensioni normali di compressione ammissibili nel conglomerato.

Tenute presenti le prescrizioni contenute nel punto 5.2.1, le tensioni ammissibili  $\sigma_c$ , vengono definite in base alla formula sotto indicata, con riferimento alla resistenza caratteristica a 28 giorni  $R_{ck}$ , tenuto anche presente quanto disposto nel punto 1 dell'Allegato 2.

$$\bar{s}_c = 6 + \frac{R_{ck} - 15}{4} \quad (\text{N} / \text{mm}^2) \quad \left[ \bar{s}_c = 60 + \frac{R_{ck} - 150}{4} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \right]$$

I valori di  $\sigma_c$  sopraindicati valgono per travi, solette e pilastri soggetti a flessione o pressoflessione.

Nelle solette di spessore minore di 5 cm le tensioni ammissibili sono ridotte del 30 %.

Nelle travi a T con soletta collaborante la tensione ammissibile è ridotta:

— del 30 % per soletta di spessore  $s < 5$  cm;

— del 10 % per soletta di spessore  $s \geq 5$  cm.

Per pilastri calcolati a compressione semplice la tensione ammissibile assume il valore ridotto:

$$\bar{s}_c = 0,7[1 - 0,03(25 - s)]\overline{s}_c \quad \text{per } s < 25 \text{ cm;} \\ \bar{s}_c = 0,7\overline{s}_c \quad \text{per } s \geq 25 \text{ cm;}$$

con  $s$  dimensione trasversale minima della sezione.

Nella sollecitazione di pressoflessione la tensione media dell'intera sezione non deve superare la tensione ammissibile per compressione semplice.

### 3.1.4. Tensioni tangenziali ammissibili nel conglomerato.

Non è richiesta la verifica delle armature al taglio ed alla torsione quando le tensioni tangenziali massime del conglomerato, prodotte da tali caratteristiche di sollecitazione, non superano i valori di  $t_{c0}$  ottenuti con l'espressione:

$$\bar{t}_{c0} = 0,4 + \frac{R_{ck} - 15}{75} \quad (\text{N} / \text{mm}^2) \quad \left[ \bar{t}_{c0} = 4 + \frac{R_{ck} - 150}{4} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \right]$$

Nella zona ove le tensioni tangenziali superano  $t_{c0}$  gli sforzi tangenziali devono essere integralmente assorbiti da armature metalliche, affidando alle staffe non meno del 40 % dello sforzo globale di scorrimento.

La massima tensione tangenziale per solo taglio non deve superare il valore:

$$\bar{t}_{c1} = 1,4 + \frac{R_{ck} - 15}{35} \quad (\text{N} / \text{mm}^2) \quad \left[ \bar{t}_{c1} = 14 + \frac{R_{ck} - 150}{35} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \right]$$

Gli stessi valori sono ammessi nelle sezioni di attacco delle ali all'anima di travi a T o a cassone.

Nel caso di sollecitazione combinata di taglio e torsione  $t_{c1}$  può essere aumentato del 10%.

Le tensioni tangenziali di aderenza delle barre, nell'ipotesi di ripartizione uniforme, non devono superare i valori sottoindicati.

— Barre tonde lisce:

$$\bar{t}_b = 1,5\bar{t}_{c0}$$

— Barre ad aderenza migliorata:

$$\bar{t}_b = 3,0\bar{t}_{c0}$$

### 3.1.5. Tensioni ammissibili negli acciai in barre tonde lisce

La tensione ammissibile non deve superare i valori indicati nel successivo prospetto 6.

Tensioni ammissibili negli acciai in barre tonde lisce

## Prospetto 6

| Tipo di acciaio | Fe B 22 k | Fe B 32 k |
|-----------------|-----------|-----------|
|                 |           |           |

|       |                        |      |       |
|-------|------------------------|------|-------|
| ----- | N/mm <sup>2</sup>      | 115  | 155   |
| $s_s$ | [kgf/cm <sup>2</sup> ] | 1200 | 1600] |

**3.1.6. Tensioni ammissibili negli acciai in barre ad aderenza migliorata.**

Per le barre ad aderenza migliorata si devono adottare le tensioni ammissibili indicate nel prospetto 7.

Tensioni ammissibili negli acciai in barre ad aderenza migliorata

**Prospetto 7**

| Tipo di acciaio |                        | Fe B 38 k | Fe B 44 k |
|-----------------|------------------------|-----------|-----------|
| -----           | N/mm <sup>2</sup>      | 215       | 255       |
| $s_s$           | [kgf/cm <sup>2</sup> ] | 2200      | 2600]     |

Per strutture in ambiente aggressivo, si dovrà effettuare la verifica di fessurazione. Al fine di garantire la durata delle opere si dovrà controllare lo stato di fessurazione (ad esempio secondo metodi paragonabili a quelli previsti al punto 4.2.4.).

**3.1.7. Tensioni ammissibili nei fili di acciaio trafilato, nelle reti e nei tralicci.**

La tensione ammissibile deve soddisfare le limitazioni:

$$\bar{s} \leq 0,60 f_{(0,2)k}$$

$$\bar{s} \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right. \leq 0,55 f_{tk}$$

con un massimo di 255 N/mm<sup>2</sup> [2600 kgf/cm<sup>2</sup>].

Per reti con fili lisci il superamento del tasso ammissibile di 215 N/mm<sup>2</sup> [2200 kgf/cm<sup>2</sup>] è consentito per fili elementari aventi diametro  $\varnothing \leq 8$  mm e con distanza assiale fra i fili elementari non superiore a 20 cm.

Per strutture in ambiente aggressivo si dovrà effettuare la verifica di fessurazione. Al fine di garantire la durata delle opere si dovrà controllare lo stato di fessurazione (ad esempio con metodi paragonabili a quelli previsti al punto 4.2.4.).

**3.1.8. Fenomeni di fatica.**

In presenza di sollecitazioni che possano indurre fenomeni di fatica, se

$$s_{\min} < \frac{2}{3} s_{\max}$$

le tensioni ammissibili vengono ridotte secondo l'espressione:

$$\bar{s}_s = 0,75 \bar{s}_s \left[ 1 + 0,5 \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \right]$$

### 3.1.9. Deformazioni.

Nel calcolo elastico delle incognite statisticamente indeterminate gli elementi geometrici delle sezioni rette devono essere valutati considerando reagente l'intera sezione, di conglomerato con l'eventuale contributo dell'armatura omogeneizzata.

Occorre verificare che le deformazioni istantanee e differite delle membrature siano compatibili con il corretto esercizio.

### 3.1.10. Pilastri.

Se la posizione del centro di sollecitazione nei pilastri soggetti a compressione eccentrica è tale che, pur essendo esterno al nocciolo centrale di inerzia della sezione di conglomerato interamente reagente, la forza normale dia luogo a trazioni minori di 1/5 della tensione al lembo compresso, la sezione può essere verificata come interamente reagente, fermo restando le limitazioni di cui al primo e secondo comma del punto 5.3.4. e purché la sezione d'armatura in zona tesa sia idonea ad assorbire la risultante delle trazioni alla tensione convenzionale di 115 N/mm<sup>2</sup> [1200 kgf/cm<sup>2</sup>] per barre lisce e di 175 N/mm<sup>2</sup> [1800 kgf/cm<sup>2</sup>] per barre ad aderenza migliorata.

Nell'altro caso le sezioni devono essere verificate nella ipotesi di parzializzazione ed armate in conseguenza, ferme restando però le limitazioni di cui sopra.

### 3.1.11. Pilastri cerchiati.

Nelle strutture semplicemente compresse, armate con ferri longitudinali, disposti lungo una circonferenza e racchiusi da una spirale di passo non maggiore di 1/5 del diametro del nucleo cerchiato, si può assumere come area ideale resistente quella del nucleo, aumentata di 15 volte quella della sezione delle barre longitudinali e di 30 volte quella della sezione di una armatura fittizia longitudinale di peso uguale a quello della spirale.

L'area ideale così valutata non deve superare il doppio dell'area del nucleo.

La sezione dell'armatura longitudinale non deve risultare inferiore alla metà di quella dell'armatura fittizia corrispondente alla spirale.

### 3.1.12. Instabilità flessionale dei pilastri.

I fenomeni di instabilità devono essere presi in considerazione per snellezza  $\lambda = l_0 / i$  maggiori di 50, essendo  $l_0$  la lunghezza libera di inflessione ed  $i$  il corrispondente raggio d'inerzia.

I pilastri cerchiati devono essere considerati alla stregua di quelli ordinari, ossia prescindendo dalla presenza della spirale.

#### 3.1.12.1. Carico centrato.

Il coefficiente  $\omega$  di amplificazione dei carichi, che tiene conto dei fenomeni di instabilità, varia come indicato nel prospetto 8.

Prospetto 8

| Snellezza<br>$\lambda$ | Coefficiente di amplificazione<br>$\omega$ |
|------------------------|--|
| 50                     | 1,00                                       |
| 70                     | 1,08                                       |
| 85                     | 1,32                                       |
| 100                    | 1,62                                       |

La verifica deve essere condotta nel piano di massima snellezza.

Snellezze  $\lambda$  maggiori di 100 sono da considerare con particolari cautele di progettazione e di calcolo.

### 3.1.12.2. Carico eccentrico.

La verifica, salvo più accurate valutazioni deve essere seguita tenendo conto dello sforzo normale  $N \cdot \omega$ , con  $\omega$  valutato per la massima snellezza, o del momento flettente  $M^* = cM$ , con  $M$  momento effettivo massimo; allo sfondo normale  $N \omega$  si deve sostituire  $N$  se più sfavorevole.

Valutazioni particolarmente accurate sono richieste quando si prevedano forti deformazioni differite.

La tensione massima a compressione, così determinata non deve superare quella ammissibile per la sollecitazione di pressoflessione (vedi punto 3.1.3.).

Il coefficiente  $c$  è dato da:

$$\frac{1}{1 - \frac{N}{N_E}}$$

dove  $N_E$  è il carico critico euleriano per la snellezza relativa al piano di flessione, valutato per un modulo di elasticità convenzionale

$$E_c^* = 0,4 E_c$$

In ogni caso deve essere eseguita la verifica di cui al punto 3.1.12.1. per l'inflessione nel piano di massima snellezza.

## 3.2. CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO.

### 3.2.1. Generalità.

Il calcolo delle tensioni va effettuato considerando le combinazioni più sfavorevoli della precompressione, nei suoi diversi stadi, e delle diverse condizioni di carico corrispondenti alle successive fasi di costruzione e di esercizio.

Deve inoltre essere effettuata la verifica a rottura e, nei casi richiesti, quella a fessurazione.

Di norma sono ammesse limitate tensioni di trazione di origine flessionale per le combinazioni più sfavorevoli, con le limitazioni di cui al punto 3.2.5.1.

E' ammessa anche la precompressione parziale, con conseguente parzializzazione della sezione di conglomerato, con la esclusione dell'apporto delle tensioni di trazione nel conglomerato e con le limitazioni di cui ai punti successivi.

Nel computo delle caratteristiche geometriche delle sezioni vanno detratti gli eventuali vuoti per il passaggio dei cavi, quando complessivamente superino il 2% della sezione del conglomerato.

Nelle strutture a cavi non ancora iniettati si considera come resistente la sezione di conglomerato depurata dei fori; nelle strutture a cavi iniettati si può considerare collaborante l'armatura di precompressione con coefficiente di omogeneizzazione uguale a 6.

I procedimenti di calcolo relativi alle condizioni di esercizio devono essere condotti nell'ipotesi di elasticità dei materiali, valutando peraltro gli effetti delle cadute di tensione per deformazioni lente.

Quando si eserciti la precompressione su una struttura vincolata in modo che ne risulti ostacolata la libera deformazione va tenuto conto dello stato di sollecitazione derivante dalle reazioni di iperstaticità.

Nel calcolo delle reazioni iperstatiche si dovrà generalmente tener conto della variazione che lo

sforzo di pre-tensione subisce lungo l'asse geometrico per effetto dell'attrito.

Nelle strutture ad armatura post-tesa la tensione iniziale nella sezione generica viene calcolata deducendo dalla tensione al martinetto le perdite per attrito lungo il cavo e per l'eventuale rientro degli apparecchi di ancoraggio e scorrimento dei fili bloccati (da non considerarsi nel computo di  $\sigma_{spi}$ , di cui al punto 2.3.6.). Si dovrà tener conto altresì dell'effetto mutuo fra i cavi tesi successivamente indotto dalla deformazione elastica della struttura. Nelle strutture ad armatura pre-tesa va considerata la caduta di tensione per deformazione elastica.

Successivamente si valuteranno gli effetti delle deformazioni lente:

- ritiro;
- "fluage" del conglomerato;
- rilassamento dell'acciaio.

Le cadute legate alle condizioni di sollecitazione del conglomerato e dell'acciaio vanno valutate suddividendo idealmente la struttura in tronchi e considerando lo stato di tensione ivi agente nei due materiali.

Nelle strutture eseguite e precomprese in più fasi le cadute per deformazione lenta vanno valutate in ciascuna fase, con riguardo alle caratteristiche geometriche, ai carichi esterni ed alla precompressione presenti in tali fasi.

Nelle strutture miste, quando si eseguono getti successivi, va tenuto conto, almeno in via approssimata, degli sforzi prodotti dalla differenza delle deformazioni lente del conglomerato delle parti solidarizzate.

Nel caso della precompressione parziale, per la presenza di notevoli quantitativi di armatura ordinaria si potrà tenere conto dell'effetto dovuto alla migrazione delle tensioni di compressione dal conglomerato cementizio alle armature ordinarie.

Per le strutture staticamente indeterminate, quando vengono operate variazioni dello schema strutturale (es. cerniere provvisorie) va tenuto conto delle variazioni delle reazioni vincolari conseguenti alle deformazioni lente, con particolare riferimento all'età dei getti.

La documentazione tecnica relativa ai tipi degli ancoraggi per armature da c.a.p., dovrà essere depositata presso il Ministero dei lavori pubblici, Servizio tecnico centrale, a cura delle Ditte Produttrici e dovrà comprovare la efficienza degli ancoraggi stessi.

### **3.2.2. Effetti dell'attrito.**

Il calcolo degli effetti dell'attrito si può effettuare come segue:

la tensione  $\sigma_{p0}$  applicata all'estremità del cavo, a causa dell'attrito, risulta, alla distanza  $x$ , ridotta al valore  $\sigma_{px}$  dato dalla relazione:

$$s_{px} = s_{p0} e^{-f(a+\beta x)}$$

nella quale

$f$  è il coefficiente di attrito dipendente dalle caratteristiche delle superfici del cavo e dell'alloggiamento che si trovano a contatto;

$\alpha$  è la somma dei valori assoluti delle deviazioni angolari di progetto del cavo comprese nel tratto di lunghezza  $x$ , espresse in radianti; nel caso di deviazioni altimetriche e planimetriche concomitanti, i relativi angoli saranno composti geometricamente;

$\beta$  rappresenta la deviazione angolare convenzionale del cavo, espressa in rad/m, che tiene conto degli inevitabili contatti accidentali che, anche nel caso di cavo rettilineo correttamente realizzato, si verificano fra i vari elementi del cavo, l'alloggiamento e gli eventuali dispositivi distanziatori.

Salvo il caso di determinazione sperimentale, si adotteranno per  $f$  e  $\beta$  i valori seguenti, validi nell'ipotesi che le armature siano prive di ossidazione:

cavo su calcestruzzo liscio:  $f = 0,5$ ;

cavo in guaina metallica:  $f = 0,3$ ;

$\beta = 0,01$  rad/m.

Quando  $f(\alpha + \beta x)$  risulta minore di 0,25, per il calcolo di  $\sigma_{px}$  si potrà adottare lo sviluppo in serie della formula esponenziale limitato al secondo termine:

$$s_{px} = s_{po} [1 - f(a + b x)]$$

Nel caso illustrato in figura si ha, nell'ambito dell'approssimazione predetta, supponendo di applicare in A la tensione  $\sigma_{pA}$ :

$$s_{pB} = s_{pA} [1 - f(a_1 + b l_1)]$$

$$s_{pC} = s_{pB} (1 - f b l_2)$$

$$s_{pD} = s_{pC} (1 - f b l_3)$$

$$s_{pE} = s_{pD} [1 - f(a_2 + b l_4)]$$

Stabilita così la legge di variazione della tensione lungo il cavo, se ne può dedurre l'allungamento da ottenere in A suddividendo il cavo in tronchi, calcolando in ciascun tronco la tensione media e deducendo il corrispondente allungamento unitario del diagramma sforzi-allungamenti dell'acciaio.

L'assestamento iniziale del cavo deve essere valutato sperimentalmente. In taluni casi, quando il cavo non venga preventivamente confezionato, questo effetto può assumere particolare importanza: la sua valutazione può essere eseguita iniziando la misura degli allungamenti a partire da una tensione sufficientemente elevata ed estrapolando fino all'asse delle deformazioni la legge sforzi-allungamenti rilevata a partire da tale prima lettura.

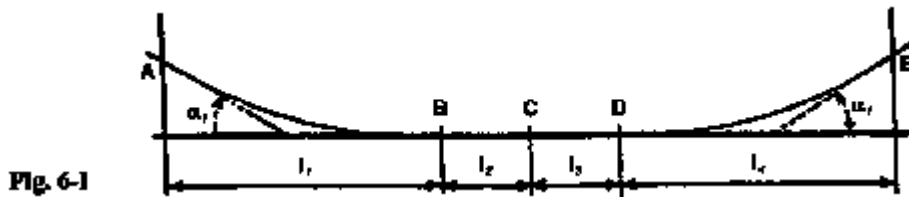


Fig. 1

### 3.2.3. Interdipendenza fra ritiro, viscosità e rilassamento.

Per tener conto dell'influenza reciproca fra le cadute di tensione per ritiro "fluage" del calcestruzzo, indicate globalmente con la notazione  $\Delta\sigma_{sf}$  e la caduta per rilassamento  $\Delta\sigma_{r\infty}$  valutata secondo le prescrizioni di cui al punto 2.3.6., quest'ultima può essere ridotta al valore  $\Delta'\sigma_{r\infty}$  desunto dalla espressione:

$$\Delta' s_{r\infty} = \Delta s_{r\infty} \left( 1 - \frac{2,5\Delta s_{ssf}}{s_{spi}} \right)$$

La riduzione si applica alla sola frazione del rilassamento che avviene dopo l'applicazione dello stato di coazione al conglomerato. Tale avvertenza assume particolare importanza nel caso di maturazione a vapore.

In nessun caso la caduta per rilassamento a tempo infinito  $\Delta\sigma_{r\infty}$  corrispondente ad una tensione iniziale pari a 0,75 *fptk* e ad una temperatura di 20 °C potrà essere assunta inferiore a 0,04  $\sigma_{spi}$ . Per altri valori della tensione iniziale vale la legge di variazione parabolica indicata al punto 2.3.6.

#### 3.2.4. Ritaratura.

Tenuto presente quanto stabilito al punto 6.2.4.2. circa la protezione delle armature, quando si procede alla ritaratura delle tensioni, le cadute per ritiro e viscosità del conglomerato e rilassamento dell'acciaio possono essere ridotte fino ai seguenti valori:

a) effetto del ritiro e della viscosità del conglomerato:

$$\Delta r = 15\% \quad \text{per } \Delta t \geq 60 \text{ giorni}$$

b) effetto del rilassamento dell'acciaio:

$$\Delta r = 30\% \quad \text{per } \Delta t \geq 28 \text{ giorni}$$

essendo

$\Delta r$  = coefficiente di riduzione;

$\Delta t$  = intervallo di ritaratura.

In ogni caso vale la limitazione di cui al punto 3.2.3.

#### 3.2.5. Tensioni normali ammissibili nel conglomerato.

Tenute presenti le prescrizioni contenute nel punto 5.2.2., le tensioni ammissibili devono rispettare le limitazioni contenute nei successivi punti.

##### 3.2.5.1. Tensioni di esercizio.

Le tensioni normali di esercizio non devono superare a compressione il valore di  $\sigma_c = 0,38 R_{ck}$

Sono ammesse tensioni di trazione al massimo uguali a  $\sigma_t = 0,06 R_{ck}$ , a condizione che nella zona tesa siano disposte armature sussidiarie di acciaio ad aderenza migliorata, opportunamente diffuse, in misura tale che il prodotto della loro sezione complessiva, per il tasso convenzionale di 175 N/mm<sup>2</sup> [1800 kgf/cm<sup>2</sup>], corrisponda all'intero sforzo di trazione calcolato a sezione interamente reagente.

Per le travi ad armatura pre-tesa sono ammesse tensioni di trazione fino a 0,03  $R_{ck}$  senza aggiunta di armatura sussidiaria, purché l'armatura pre-tesa sia ben diffusa nelle zone soggette a trazione.

Per spessori minori di 5 cm le tensioni normali di esercizio sono ridotte del 30%.

Non sono ammesse tensioni di trazione ai lembi nei seguenti casi:

- quando la fessurazione compromette la funzionalità della struttura;
- in tutte le strutture sotto l'azione del solo carico permanente (peso proprio e sovraccarico permanente), ove il sovraccarico variabile possa incrementare le trazioni;
- nelle strutture site in ambiente aggressivo;
- nelle strutture costruite per conci prefabbricati, nelle quali non si possa sperimentalmente dimostrare che il giunto dispone di una resistenza a trazione almeno equivalente a quella della zona corrente.

Nel caso della precompressione parziale le tensioni del conglomerato compresso e delle armature ordinarie sono calcolate prescindendo dal contributo a trazione del conglomerato, come nelle sezioni



pressoinflesse di conglomerato cementizio armato normale.

Non è ammessa precompressione parziale nei casi a), c) e d) sopra elencati.

### 3.2.5.2. Tensioni iniziali.

All'atto della precompressione le tensioni non debbono superare a compressione il valore di  $\sigma_c = 0,48 R_{ckj}$  essendo  $R_{ckj}$  la resistenza caratteristica a compressione del conglomerato a  $j$  giorni di stagionatura, calcolata con le stesse modalità di cui al punto 2.1.1. per  $R_{ck}$ .

Sono ammesse tensioni di trazione  $\sigma_c = 0,08 R_{chj}$  fermo restando l'obbligo specificato al punto 3.2.5.1. di disporre armature metalliche come ivi indicato, ma proporzionate al tasso convenzionale massimo di 215 N/mm<sup>2</sup> [2200 kgf/cm<sup>2</sup>]. Nelle travi ad armature pre-tese sono ammesse tensioni di trazione iniziali pari a 0,04  $R_{chj}$  senza aggiunta di armatura sussidiaria purché l'armatura pre-tesa sia ben diffusa nella zona soggetta a trazione. Per spessori minori di 5 cm le tensioni normali iniziali sono ridotte del 30%. Qualora si ammettano tensioni iniziali elevate si dovrà considerare il rischio che le contro-frecce assumano nel tempo valori eccessivi.

In fasi intermedie e transitorie della costruzione è consentito superare nel conglomerato il limite a trazione innanzi stabilito purché le fasi successive provochino l'annullamento dello stato di trazione.

In tali condizioni dovrà considerarsi la parzializzazione della sezione durante la predetta fase transitoria e le armature, disposte come precisato al punto 3.2.5.1., dovranno verificarsi in conformità alle norme e prescrizioni valide per le sezioni pressoinflesse di conglomerato cementizio armato normale. La resistenza a trazione del conglomerato nelle zone virtualmente fessurate non potrà tenersi in conto nelle verifiche a taglio e nella eventuale verifica a fessurazione.

Nella zona di ancoraggio delle armature si possono tollerare compressioni locali prodotte dagli apparecchi di ancoraggio pari a:

$$\frac{R_{ckj}}{1,3}$$

Quando la testata della trave sia prefabbricata in conglomerato,  $R_{ckj}$  rappresenta la resistenza caratteristica a compressione del conglomerato della testata medesima. In tal caso si controllerà inoltre che la pressione di contatto sotto la testata prefabbricata, valutata nell'ipotesi di distribuzione uniforme con diffusione a 45° attraverso la testata, rispetti la limitazione precedente.

Qualora gli apparecchi di ancoraggio non siano applicati sulla superficie del conglomerato, ma incassati nel corpo della trave, nella valutazione della pressione trasmessa si può tener conto anche della diffusione della forza per attrito laterale lungo le superfici dell'apparecchio: tale contributo, tanto maggiore quanto maggiore è l'aderenza assicurata dalla scabrosità delle superfici laterali dell'apparecchio, non dovrà, sotto le migliori condizioni, superare il limite massimo del 50% dello sforzo totale.

Qualora le zone di influenza di apparecchi vicini si sovrappongano, le pressioni vanno sommate.

Verifiche locali dovranno eseguirsi per gli ancoraggi fissi annegati.

### **3.2.6. Verifiche a taglio e tensioni ammissibili.**

La verifica della sollecitazione di taglio comporta:

- a) la determinazione delle massime tensioni principali;
- b) il calcolo eventuale delle armature (vedi punto 3.2.9.).

#### 3.2.6.1. Tensioni principali.

Di regola la determinazione delle massime tensioni principali si effettua convenzionalmente in corrispondenza della fibra baricentrica della sezione trasversale.

Le tensioni principali di trazione e compressione non debbono superare i limiti fissati al punto 3.2.5. Quando la tensione principale di trazione supera i 2/3 dei limiti sopraindicati le tensioni principali di compressione non devono superare 0,24  $R_{ck}$ .

Per sezioni di forma particolare potrà essere necessario accertare che la verifica suddetta sia effettivamente significativa per tutte le fibre della sezione.

Per valori della tensione principale di trazione minori od uguali a  $0,02 R_{ck}$  non è richiesto il calcolo delle armature resistenti a taglio.

Nella valutazione delle tensioni tangenziali occorrerà considerare la sezione trasversale depurata dei fori di passaggio dei cavi.

Nel caso di sollecitazione combinata di taglio e torsione, il valore ammissibile della tensione principale di trazione potrà essere aumentato del 10%, fermi restando i limiti stabiliti per tale tensione nella verifica riferita al solo taglio. Se del caso, si dovrà verificare la fibra di attacco all'anima della soola delle travi a T o a cassone.

### 3.2.6.2. Travi a conci.

Nelle travi a conci con giunti lisci riempiti con malta cementizia il rapporto fra lo sforzo di taglio e lo sforzo normale non deve superare, in corrispondenza dei giunti, il valore 0,35. Qualora tale rapporto risulti maggiore di 0,35 le superfici dei conci contigui debbono essere munite di apposite dentellature o rese solidali con l'impiego di adesivi adeguatamente sperimentati e controllati.

#### **3.2.7. Deformazioni lente**

##### 3.2.7.1. Ritiro

Per il calcolo delle cadute di tensione, salvo più precise valutazioni (vedi punto 2.1.6.) si possono adottare i seguenti valori:

— 0,0003 se la struttura viene precompressa prima di 14 giorni di stagionatura

— 0,00025 se la struttura viene precompressa dopo 14 giorni di stagionatura.

Per strutture particolarmente sottili ed ambiente particolarmente secco dovranno adottarsi valori superiori.

##### 3.2.7.2. Viscosità.

La deformazione lenta sotto carico, depurata del ritiro, può, salvo più precise valutazioni (vedi punto 2.1.7.), essere assunta pari ad almeno 2 volte la deformazione elastica, sempre che la struttura venga sollecitata non prima di 14 giorni di stagionatura.

Se la struttura viene invece sollecitata entro un tempo minore, la deformazione lenta sotto carico si assumerà non inferiore a 2,3 volte la deformazione elastica.

Se la maturazione del conglomerato avviene con procedimenti particolari, è ammessa l'adozione di un minor valore della deformazione lenta purché sperimentalmente giustificato.

Il calcolo della caduta di tensione per viscosità dovrà essere effettuato, con riferimento alla tensione che, nella sezione considerata, agisce sulla fibra di conglomerato posta al livello della armatura.

Nelle travi ad armatura pre-tesa, nella esecuzione delle quali intercorre sempre un intervallo di tempo tra la tesatura e l'applicazione dello sforzo di precompressione al conglomerato, il calcolo della deformazione elastica del calcestruzzo, necessario per la successiva valutazione di quella differita nel tempo, dovrà basarsi sul valore assunto dalla tensione nell'acciaio al momento della applicazione dello stato di coazione al conglomerato, desunto dalla curva sperimentale di rilassamento determinata in condizioni simili a quelle presenti in fase esecutiva, ponendo particolare attenzione all'influenza sul rilassamento dell'acciaio dell'eventuale riscaldamento utilizzato per accelerare l'indurimento del conglomerato.

#### **3.2.8. Tensioni ammissibili per gli acciai da precompressi.**

##### 3.2.8.1. Tensioni ammissibili.

Le tensioni devono essere limitate ai seguenti valori riferiti a quelli caratteristici garantiti dal produttore:

— strutture ad armatura post-tesa:

|               |   |  |
|---------------|---|--|
| fili o trecce | { | $\mathbf{s}_{spi} \leq 0,85 f_{p(0,2)k}$ |
|               |   | $\mathbf{s}_{sp} \leq 0,60 f_{ptk}$      |
| trefoli       | { | $\mathbf{s}_{spi} \leq 0,85 f_{p(1)k}$   |
|               |   | $\mathbf{s}_{sp} \leq 0,60 f_{ptk}$      |
| barre         | { | $\mathbf{s}_{spi} \leq 0,85 f_{pyk}$     |
|               |   | $\mathbf{s}_{sp} \leq 0,60 f_{ptk}$      |

Sono ammesse sovratensioni ai lembi del 10%, indotte dalla curvatura delle barre. Volendo conseguire raggi minori di quelli consentiti dai limiti suddetti si dovranno preformare le barre mediante piegatura a freddo.

— strutture ad armatura pre-tesa:

|               |  |
|---------------|--|
| fili o trecce | $\mathbf{s}_{spi} \leq 0,90 f_{p(0,2)k}$ |
|               | $\mathbf{s}_{sp} \leq 0,60 f_{ptk}$      |
| trefoli       | $\mathbf{s}_{spi} \leq 0,90 f_{p(1)k}$   |
|               | $\mathbf{s}_{sp} \leq 0,60 f_{ptk}$      |

Il limite ammissibile indicato per  $\sigma_{sp}$  è il massimo di cui è consentita la presa in conto per valutare gli effetti favorevoli della precompressione.

A causa dell'attrito, le tensioni possono tuttavia superare localmente tale limite; di ciò si dovrà tenere conto là dove gli effetti della precompressione possano indurre condizioni di lavoro più severo. Comunque non può superarsi il valore limite della tensione iniziale  $\sigma_{spi}$ .

Ciò può valere, fra l'altro, per la verifica al taglio in assenza del sovraccarico e per il comportamento a fatica degli acciai in prossimità degli ancoraggi.

### 3.2.8.2. Tensioni dovute ai sovraccarichi.

Negli acciai di pre-tensione possono ammettersi, per effetto dei sovraccarichi, incrementi dei limiti massimi di tensione di cui al punto 3.2.8.1. non superiori a  $0,06 f_{ptk}$ .

Nel caso della precompressione parziale gli incrementi di tensione determinati in corrispondenza dello strato di armatura presollecitata più lontano dell'asse neutro devono rispettare le limitazioni che derivano dalla verifica dell'ampiezza delle fessure e dalla verifica a fatica.

Sotto l'effetto di quei sovraccarichi che possono dar luogo ad effetti di fatica per il grande numero di ripetizioni probabili, deve sempre sussistere un rapporto di sicurezza 2, fra l'intervallo di tensione cui l'acciaio è capace di resistere a fatica e l'intervallo fra la massima e la minima tensione cui è soggetto l'acciaio nella struttura (ivi compresi gli eventuali effetti di curvatura). Il confronto va riferito ai risultati di prove effettuate assumendo come tensione media la semisomma di questi ultimi valori.

Nel caso della precompressione parziale la verifica a fatica è obbligatoria.

### **3.2.9. Calcolo delle armature al taglio.**

Ferme restando le prescrizioni di cui al punto 3.2.6.1., le armature al taglio dovranno essere proporzionate in ciascuna fase di costruzione e di esercizio al corrispondente valore del taglio, tenendo conto della componente di precompressione nel piano della sezione.

Lo sforzo di precompressione sarà assunto intero o ridotto a 2/3, in modo da individuare la condizione più gravosa.

Nella verifica a taglio delle travi la cui armatura sia ancorata per aderenza non si dovrà tener conto della precompressione nel tratto terminale compreso fra la testata ed una sezione posta a distanza della testata stessa pari a settanta volte il maggior diametro (effettivo od equivalente) sia per i fili ad aderenza migliorata sia per trecce o trefoli.

In questo tratto, nei riguardi delle sollecitazioni tangenziali e del calcolo delle staffe e delle eventuali armature longitudinali aggiunte, valgono i criteri adottati per le opere in conglomerato cementizio armato normale di cui al punto 3.1.

Qualora in prossimità delle estremità delle travi si abbiano elevati momenti che possano dar luogo a lesioni del conglomerato nella zona di ancoraggio, le lunghezze indicate devono essere adeguatamente maggiorate.

### **3.2.10. Verifica della fessurazione per flessione.**

Nel caso di precompressione totale o di precompressione limitata, per le strutture collocate in ambiente aggressivo, zone marine o in presenza di agenti chimici, deve essere effettuata la verifica della sicurezza alla fessurazione.

Il coefficiente convenzionale di sicurezza alla fessurazione è il più piccolo moltiplicatore dei carichi di esercizio che induce tensioni di rottura a flessione del conglomerato, e per le strutture inflesse è dato dalla formula;

$$h_f = \frac{M_f}{M_e}$$

dove:

$M_f$  momento che provoca la fessurazione, calcolato in base alla sezione omogeneizzata interamente reagente ed alla resistenza a trazione per flessione (vedi 2.1.2.);

$M_e$  momento massimo di esercizio.

Il coefficiente convenzionale di sicurezza alla fessurazione non deve essere inferiore ad 1,2.

Nel caso di precompressione parziale si deve sempre effettuare la verifica delle aperture delle fessure secondo quanto indicato al punto 4.2.4.

### **3.2.11. Verifica a rottura delle sezioni per tensioni normali.**

Per il calcolo della resistenza delle sezioni si assumono le seguenti ipotesi:

— conservazione delle sezioni piane con assenza di scorrimento relativo tra acciaio e calcestruzzo;

— deformazione limite del calcestruzzo pari a  $-0,0035$  nel caso di flessione semplice o composta con asse neutro reale, e variabile dal valore predetto a  $-0,0020$  quando l'asse neutro, esterno alla

sezione, tende all'infinito:

— deformazione limite dell'acciaio da precompressione: +0,010 al di là della decompressione della fibra di conglomerato posta allo stesso livello dell'armatura;

— deformazione limite dell'acciaio ordinario: +0,010.

### 1) Acciai

Per gli acciai da precompressione e per gli acciai ordinari si assumono diagrammi convenzionali ottenuti da quelli caratteristici effettuando un'affinità, parallelamente alla tangente alla origine, nel rapporto  $1/\gamma_s$  con  $\gamma_s$  pari a 1,15.

### 2) Calcestruzzo

Si prende in considerazione solo la porzione di calcestruzzo compresso. In tal caso la distribuzione delle tensioni è data, di norma, dal diagramma parabola rettangolo rappresentato in figura 2, definito da un arco di parabola di secondo grado passante per l'origine, avente asse parallelo a quello delle tensioni, e da un segmento di retta parallelo all'asse delle deformazioni tangente alla parabola nel punto di sommità. Il vertice della parabola ha ascissa  $-0,002$ , l'estremità del segmento ha ascissa  $-0,0035$ . L'ordinata massima del diagramma è pari a:

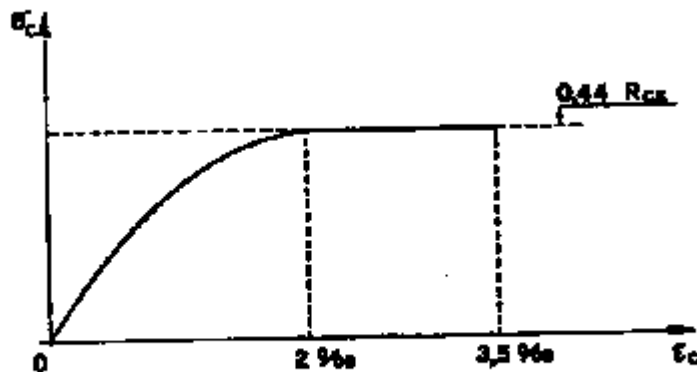
$$0,85 f_{cd} = 0,85 \quad \frac{0,83 R_{ck}}{1,6} = 0,44 R_{ck}$$

In alternativa si può adottare il diagramma rettangolare di ordinata  $0,44 R_{ck}$  esteso alla profondità  $y$ , contata a partire dal lembo più compresso, così definita:

$$y = 0,8x, \quad \text{nel caso in cui sia } x \leq h$$

$$y = \frac{x - 0,8h}{x - 0,75h} h \quad \text{nel caso in cui sia } x > h$$

essendo  $x$  la profondità dell'asse neutro.



**Fig. 2**

Nel caso in cui sia  $x > h$ , la tensione normale di calcolo risulterà pari a  $0,35 R_{ck}$ .

Il coefficiente di sicurezza a rottura deve risultare non minore di 1,50.

Se le armature di precompressione non sono aderenti al calcestruzzo, si deve tener conto dello scorrimento