

TRAVI IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO  
AD ARMATURA PRETESA  
AGLI STATI LIMITE

Programma

## **CAP3**

per personal computer

Manuale introduttivo  
(Maggio 2016)

**Sono vietate le riproduzioni non autorizzate**

**Le eventuali riproduzioni di tutto o parte del presente documento dovranno riportarne ben evidenziato l'autore qui sotto riportato.**

## PRESENTAZIONE

Il programma esegue l'analisi delle travi in cemento armato precompresso ad armatura pretesa, di forma e dimensioni generiche a sezioni semplici e composte, in flessione retta e deviata agli stati limite anche in precompressione parziale. In particolare si possono fare le seguenti calcolazioni:

- verifica agli stati limite di esercizio;
- verifica agli stati limite ultimi a flessione;
- verifica agli stati limite ultimi a taglio;
- calcolo degli spostamenti;

per le fasi transitorie e le fasi finali, in sezione interamente reagente e/o fessurata, e per i seguenti tipi di trave:

- travi in c.a.p.;
- travi in c.a.p. + getto collaborante.

L'AUTORE DEL PROGRAMMA CAP3  
ing. Tiziano Gaddi

GADDI software  
via Era 15  
23826 Mandello del Lario (LC)  
ITALY

e-mail [gaddissoftware@tin.it](mailto:gaddissoftware@tin.it)  
web: [www.gaddissoftware.it](http://www.gaddissoftware.it)

## CARATTERISTICHE DEL PROGRAMMA E AVVERTIMENTI PER L'USO

Il programma non è garantito dagli autori ne loro rappresentanti. Gli autori non garantiscono che le funzioni contenute nel programma soddisfino le esigenze dell'utente o funzionino in tutte le loro combinazioni. L'utente dovrà inoltre controllare il programma ed ovviare a proprie spese ad eventuali errori o malfunzionamenti.

Il programma può funzionare solo con l'ausilio del supporto con cui viene fornito.

La perdita o l'alterazione del programma o di parte di esso, o del supporto, non dà diritto alla loro sostituzione. L'utente è responsabile della buona conservazione del programma e del supporto.

## Capitolo 1

### INTRODUZIONE ALLA VERSIONE 8.00

#### 1.1) Premessa

Questo manuale introduce all'uso di CAP3.

#### 1.2) Aggiornamenti

##### 1.2.1) Aggiornamento alla versione 2.00

Con la versione 2.00 sono state apportate le seguenti modifiche, aggiunte e miglioramenti.

- Sono disponibili i file di AutoLoad per l'inserimento automatico di:
  - geometria trave;
  - caratteristiche materiale calcestruzzo (**annullato**);
  - caratteristiche materiale acciaio (**annullato**);
  - caratteristiche materiale armature di precompressione (**annullato**).
- Con la nuova versione CAP3 può leggere i dati di input da un file di testo, il comando di menu è lo stesso utilizzato per caricare i dati da un normale file dati che si trova alla voce **File\Apri**. CAP3 può pure restituire i dati di input su un file di testo, il comando di menu è alla voce **File\Esporta il file di scambio**. Questo tipo di file è denominato **File di scambio** e ha come estensione preimpostata **.FdS** che è bene mantenere per un più facile riconoscimento di questi tipi di file. Il file di scambio non contiene né il file delle unità di misura né il file degli stili, quando si caricano i dati da un file di scambio sono mantenuti gli stili e le unità di misura correnti; se necessario bisogna ricaricarli appositamente. Le specifiche per l'uso del file di scambio sono riportate nel manuale **CAP3\_FileDiScambio.DOC**.
- Con la nuova versione il programma CAP3 può essere avviato da un altro programma passando il comando sulla CommandLine di Window.
- E' possibile specificare il tipo di curve, tensione-deformazione, di resistenza dei materiali da utilizzare nei calcoli. L'opzione è selezionabile nel menu **Inserisci\Opzioni\TipoCurveDiResistenzaMateriali**.

##### 1.2.2) Aggiornamento alla versione 5.00

La versione 5.00 ha apportato al programma CAP3 le seguenti modifiche, aggiunte e miglioramenti.

- Il programma è stato aggiornato con riferimento alle normative:
  - D.M. 14 gennaio 2008;
  - Eurocodici EN 2004.
- Non sono più disponibili i file di AutoLoad per l'inserimento automatico di:
  - caratteristiche materiale calcestruzzo;
  - caratteristiche materiale acciaio;

- caratteristiche materiale armature di precompressione.
- Il **File di scambio** è stato aggiornato in conseguenza degli aggiornamenti del programma.
- Sono stati introdotti i comandi di “**selezione**” per l’inizializzazione delle caratteristiche dei materiali. L’utente è tenuto a verificare i valori proposti dal programma.
- Sono potenziati i comandi di AutoSet per l’assegnazione dei dati. L’utente è tenuto a verificare i valori proposti dal programma.
- E’ stata introdotta la possibilità dell’ancoraggio lineare delle armature di precompressione.
- La verifica a taglio è fatta con riferimento al modello a traliccio per elementi che richiedono armatura a taglio.
- L’armatura a taglio viene assegnata con la campitura delle staffe.
- Sono state integrate le curve di resistenza dei materiali, in accordo alle nuove norme, per il calcolo dei domini resistenti e la conseguente verifica agli stati limite ultimi.

### 1.2.3) Aggiornamento alla versione 6.00

- Restano i file di AutoLoad:  
AutoLoad-CAP3.STI  
AutoLoad-CAP3.UDM  
e resta il file di AutoLoad, ora FileLoad:  
AutoLoad-CAP3.GEO (che può assumere nome generico)  
è aggiunto il file FileLoad:  
AutoLoad-CAP3.CAV (che può assumere nome generico)  
che consente di definire le geometria dei cavi (tipo maschere).
- E’ possibile creare un file grafico \*.GIF, per le varie finestre di CAP3, leggibile dal CadNostrum (proprietario) ed attraverso lo stesso CadNostrum gestire il disegno oppure creare un file DXF.

### 1.2.4) Aggiornamento alla versione 6.30

Con la versione 6.30 (compatibile con Windows 7):

- Nessuna modifica significativa.

### 1.2.5) Aggiornamento alla versione 6.40

Nella verifica a taglio l’utente può assegnare il valore della  $ctg\theta$  in modo distinto per ogni sezione di verifica, come valore fisso o come valore limite superiore.

### 1.2.6) Aggiornamento alla versione 6.50

E’ stata introdotta un’opzione (vedi **Inserisci\Opzioni\Parametri di calcolo**) che abilita\disabilita l’aggiornamento automatico delle grandezze di verifica a taglio modificabili dall’utente.

### 1.2.7) Aggiornamento alla versione 7.00

Con la versione 7.00 **CAP3** può scrivere in un file di scambio **.Fds** i dati di input per il programma **ATS**. Questo permette e facilita lo scambio automatico di dati con il programma **ATS** di analisi termica della sezione.

**Recupero dati da CAP2 (CAPII).** Il programma CAP3 è in grado di utilizzare i file dati di CAP2 (CAPII) della versione 700. Bisogna ovviamente tenere conto della diversa filosofia dei due

programmi. I dati così recuperati devono essere oggetto degli opportuni controlli da parte dell'utente, nonché integrati dei dati mancanti.

### 1.2.8) Aggiornamento alla versione 8.00

- La scelta per la flessione retta o deviata è stata spostata nelle opzioni.
- La tabella di assegnazione (finestra di dialogo) dei cavi orizzontali può essere usata come maschera cavi (vedi **Armature di precompressione (Cavi)**).
- La gestione dei data base della geometria della trave e dei cavi orizzontali è stata migliorata e semplificata. I dati della geometria (e analogamente dei cavi orizzontali) dell'esempio in corso si possono registrare in un file di data base.

### FARE ATTENZIONE

Caricando un file dati di versioni precedenti, alcuni dati (e/o impostazioni e/o delle opzioni) sono assegnati al valore di default mentre altri sono assegnati a zero o non assegnati. E' importante che caricando un file dati di versioni precedenti l'utente riassegni e riverifichi tutti i dati di input.

### 1.3) Preparazione all'uso di CAP3

Per un razionale e veloce uso di CAP3 è opportuno preparare i file dati di AutoLoad e FileLoad che permettono di assegnare rapidamente i dati richiesti dal programma. Questi file non sono necessari ma molto utili per l'uso di CAP3.

I file di AutoLoad da mettere a disposizione di CAP3 sono:

- AutoLoad- CAP3.STI per gli stili;
- AutoLoad- CAP3.UDM per le unità di misura.

I file di FileLoad da mettere a disposizione di CAP3 sono:

- DB-CAP3.GEO (o nome generico), per la geometria della trave;
- DB-CAP3.CAV (o nome generico), per la geometria dei cavi.

Brevi esempi sono presenti nei file installati. Per le spiegazioni vedere più avanti manuale.

I file AutoLoad degli stili e delle unità di misura, se presenti nella opportuna directory, sono caricati all'apertura di ogni documento.

### 1.4) L'uso dei menu

L'introduzione dei dati è agevolato dai menu e dalle finestre di dialogo. Questi permettono di eseguire le varie operazioni senza un ordine rigido. Basta mantenere una sequenza logica relativa ai dati strutturali.

Per la maggior parte delle finestre di dialogo è possibile avvalersi di ulteriori aiuti tramite i menu contesto attivabili con il tasto destro del mouse.

Per le finestre grafiche è possibile avvalersi di aiuti tramite i menu contesto attivabili con il tasto destro del mouse, generalmente l'operazione così selezionata è da completare con l'uso del mouse.

Nel menu Disegno sono presenti, tra l'altro, i comandi di modifica degli stili, necessari per una migliore visualizzazione grafica degli oggetti. In CAP3 sono usati più moduli grafici (o finestre), per ognuno di questi moduli gli stili sono indipendenti.

### 1.5) Avviamento di CAP3 da altro programma

Il processo CAP3 è creato dal programma chiamante mettendo sulla CommandLine:

- i codici che identificano i comandi: /CX:012 (obbligatorio almeno "/CX: ")
  - 0, per rendere corrente la directory specificata sulla Commandline;
  - 1, per leggere il file dati del file specificato;
  - 2, per scrivere i risultati (non usato);
- la directory Read/Write file (opzione);
- il nome del file da caricare direttamente (opzione).

Nel caso di assenza della directory e del nome del file l'operazioni di Read\_File è da fare manualmente dall'utente con le opportune finestre di dialogo.

Il controllo della chiusura o meno del processo è a carico del programma chiamante (ciclo di attesa, ecc.).

Il file dati da caricare deve essere necessariamente un File di Scambio.

Esempio di CommandLine:

```
C:\CAP3\SYSTEM\CAP3.EXE /CX:012 /C:\CAP3\Esempi /aaa.fds
```

## Capitolo 2

### IL PROGRAMMA CAP3

#### 2.1) Introduzione

Il programma CAP3 esegue il calcolo e la verifica delle travi in c.a.p. ad armatura pretesa con il metodo agli stati limite, per travi semplicemente appoggiate (con o senza sbalzi), in flessione retta e flessione deviata. Con o senza getto collaborante, con o senza le armature ordinarie poste nella trave e/o nel getto, con ovviamente le armature di precompressione; tenute in conto nella loro giusta posizione (x,y) assegnata.

Vengono considerate nel calcolo le perdite viscosi, di ritiro e di rilassamento. Nel calcolo delle tensioni, i materiali sono omogeneizzati con il loro modulo elastico effettivo (quello dichiarato).

Il calcolo delle perdite viscosi, di ritiro e di rilassamento è condotto con metodi esatti, con riferimento ai modelli proposti nell'Eurocodice e nel bollettino CEB numero 203.

Si fa riferimento alla normativa dell'Eurocodice EN 2004 e/o alla normativa italiana del D.M. 14 gennaio 2008.

#### Convenzioni

La trave è riferita ad un sistema destrorso di assi x,y,z ortogonali, gli assi x,y posti nel piano della sezione con y verticale diretto verso il basso, l'asse z parallelo all'asse longitudinale della trave con origine nell'estremo di sinistra e diretto verso il secondo estremo a destra.

I carichi agenti sono positivi se diretti nel verso del rispettivo asse, in particolare quelli verticali verso il basso.

L'azione assiale è positiva di trazione.

I momenti nel piano xz hanno verso positivo quando tendono le fibre a x positivo.

I momenti nel piano yz hanno verso positivo quando tendono le fibre a y positivo.

Le tensioni sono positive di trazione e negative di compressione.

Gli spostamenti sono positivi se diretti nel verso del rispettivo asse, in particolare quelli verticali verso il basso.

#### 2.2) Imposta calcolo trave

##### a) Tipo di calcolo

Si può scegliere il calcolo in flessione retta o il calcolo in flessione deviata (se abilitata). Nel calcolo in flessione retta è assunta uguale a zero la curvatura attorno all'asse y. Vedi Menu Opzioni.



### 2.3) Imposta elementi trave

Nella finestra di dialogo del comando **Inserisci\IMPOSTA TRAVE** si abilitano e/o disabilitano alcuni elementi componenti la trave:

- a) Getto integrativo;
- b) Cavi di precompressione (Orizzontali, Intermedi, Devianti, Gruppi);
- c) Armature ordinarie poste nella trave (Orizzontali, Intermedie, Deviate);
- d) Armature ordinarie poste nel getto integrativo (Orizzontali, Intermedie, Deviate).

### 2.4) Geometria trave

La descrizione geometrica della trave può essere fatta in due modi. Il primo modo, a "geometria generica", assegnando le diverse sezioni secondo regole sotto riportate, nel secondo richiamando dati di casseri predefiniti.

Alcuni particolari casseri per travi piane e a doppia pendenza possono predefinarsi nei file FileLoad \*.GEO opportunamente assegnati dall'utente (un semplice esempio è il file **DB-CAP3.GEO**).

Quando si richiama un cassero predefinito (forma geometrica della trave) i dati da assegnare sono limitati a quelle poche dimensioni che rappresentano i parametri del cassero. Si rimanda ai relativi paragrafi per ulteriori spiegazioni. La descrizione geometrica della trave rimane comunque la stessa come sotto riportato.

La trave è riferita ad un terna destrorsa di assi xyz, di cui gli assi xy nel piano della sezione e l'asse z normale alla sezione lungo l'asse della trave e ad esso parallelo. L'origine è posto nell'estremo sinistro della trave. L'asse y è verticale verso il basso.

Per descrivere la geometria della trave si definisce la sua superficie. Questa è discretizzata da superfici rigate (generalmente da piani). Si definiscono per questo delle opportune sezioni  $S_k$  (dette anche sezioni di base) poste alla coordinata  $z_k$  misurata dall'origine dell'asse z (estremo sinistro della trave). La frontiera di queste sezioni  $S_k$  è discretizzata, a sua volta, da una spezzata poligonale chiusa. La superficie della trave (frontiera) è definita da tutte le "rigate" colleganti gli spigoli corrispondenti di due sezioni vicine.

Precisamente, data la sezione  $S_k$  di coordinata  $z_k$  la cui frontiera è definita dalla poligonale  $(x_k(i), y_k(i), i=1, N)$  e data la sezione  $S_{k+1}$  di coordinata  $z_{k+1}$  la cui frontiera è definita dalla poligonale  $(x_{k+1}(i), y_{k+1}(i), i=1, N)$ ; dove ovviamente la sezione  $S_{k+1}$  segue la sezione  $S_k$ . Ogni sezione intermedia le due sezioni precedenti, di coordinata  $z_k \leq z \leq z_{k+1}$  ha la frontiera definita dalla poligonale così ottenuta:

$$x(i) = x_k(i) + (z - z_k) \cdot (x_{k+1}(i) - x_k(i)) / (z_{k+1} - z_k)$$

$$y(i) = y_k(i) + (z - z_k) \cdot (y_{k+1}(i) - y_k(i)) / (z_{k+1} - z_k)$$

Le sezioni  $S_k$  sono scelte nei punti più significativi lungo l'asse della trave, generalmente dove si presentano delle discontinuità. Nella scelta, bisogna rispettare alcune regole, che sono:

- limitato numero di sezioni (per valore massimo Vedi Programma);
- limitato numero di vertici delle sezioni (per valore massimo Vedi Programma);
- coordinate sezioni  $z_k$  progressive e diverse ( $z_k < z_{k+1}$ ), con la prima coordinata  $z_1 = 0$  e l'ultima uguale alla lunghezza della trave;
- numero dei vertici uguale per tutte le sezioni, indipendentemente dalla forma geometrica delle sezioni;
- ogni piano triangolare di frontiera è da considerare come un piano trapezoidale degenere;

- fare sempre riferimento alle formule di calcolo delle coordinate delle sezioni intermedie  $x(i),y(i)$  sopra riportate;
- sfruttare la simmetria della trave rispetto al piano parallelo a  $xy$ , se esiste, in quanto il programma facilita l'introduzione dei dati; in questo caso il numero di sezioni  $S_k$  è dispari o pari a secondo che una sezione  $S_k$  è rispettivamente sul piano di simmetria o meno.

I file di FileLoad \*.GEO sono implementati aggiungendo i dati del caso in corso (esempio che si sta esaminando). Un elemento può essere: Aggiunto, Sostituito, Cancellato. La modifica, invece, prevede di “caricare” dal data base l’elemento in CAP3, modificarlo e poi inserirlo nel data base con il comando “Sostituisci”.

La geometria della trave può inoltre essere modificata e aggiornata alle esigenze del caso con il comando **Inserisci\Geometria trave: AUTO** (questo comando agisce solo su alcuni tipi di trave (travi con sezione Rettangolare, a T, a L, a I, con 6,7,8 o 9 sezioni base).

Per la descrizione delle singole sezioni vedere il paragrafo “Geometria sezione”.

### 2.4.1) Geometria sezione

La frontiera di ogni singolo dominio, o sezione, deve essere discretizzata e descritta da un'unica poligonale chiusa; per questo sono da assegnare le coordinate dei vertici della poligonale o le dimensioni per le sezioni predefinite.

Per facilitare l'immissione dei dati relativi alla geometria dei domini, CAP3 prevede i seguenti tipi di sezione:

- sezione generica (senza o con simmetria rispetto agli assi);
- sezione rettangolare simmetrica rispetto all'asse  $y$ ;
- sezione rettangolare simmetrica rispetto agli assi  $xy$ ;
- sezione a T;
- sezione a T rovescio;
- sezione a L;
- sezione a I.

Le sezioni di tipo generico devono avere il contorno (frontiera) schematizzabile con un'unica poligonale chiusa (domini semplicemente connessi). Il dominio avente una frontiera formata da più linee chiuse (dominio molteplicemente connesso) non è ammesso, allo scopo si deve rendere tale dominio semplicemente connesso. Si osserva che è sempre possibile ridurre un dominio molteplicemente connesso composto da  $n$  domini semplicemente connessi e aventi linee di frontiera che non si intersecano, in un dominio semplicemente connesso mediante  $n-1$  tagli effettuati lungo linee convenienti (L.AMERIO, Analisi Infinitesimale, vol.II, pag.472). Tali segmenti si devono mantenere leggermente disuniti (ad esempio 0.01 cm) onde evitarne la sovrapposizione.

La numerazione dei vertici, da 1 a  $N$ , deve rispettare la convenzione che un osservatore il quale percorre la poligonale in direzione crescente della numerazione, vede il dominio (area della sezione) alla sua sinistra (tale numerazione si assume positiva).

Per la sezione generica non simmetrica si devono assegnare tutti i vertici con inizio arbitrario per la numerazione; per la sezione generica simmetrica rispetto all'asse  $x$  si devono assegnare i vertici del I e II quadrante, la numerazione inizia nel I quadrante; per la sezione generica simmetrica rispetto all'asse  $y$  si devono assegnare i vertici del IV e I quadrante, la numerazione inizia nel IV quadrante;

per la sezione generica simmetrica rispetto agli assi xy si devono assegnare i vertici del I quadrante, la numerazione inizia nel I quadrante.

Per le sezioni predefinite bisogna semplicemente assegnare le relative dimensioni come richiesto nell'input dati, ad esempio per la sezione rettangolare la base e l'altezza oltre alla posizione  $x_0, y_0$  relativa rispetto agli assi della trave.

La scelta del "tipo di sezione" é unica, limitata alla prima sezione di base ( $z=0$ ), e rimane comune a tutte le altre sezioni di base. Per le sezioni generiche ciò vale anche per il numero N dei vertici. Quindi ad esempio, se si ha una trave a T con ringrosso a sezione rettangolare, si deve scegliere la sezione a T come tipo, ed assegnare i parametri in modo tale che le sezioni di ringrosso risultino rettangolari e compatibili con quanto detto sulla descrizione geometrica della trave.

Fare attenzione. La "riduzione" di una sezione moltepliciamente connessa ad una sezione semplicemente connessa, può modificare lo stato tensionale. Mentre le tensioni normali non vengono influenzate da eventuali tagli, le tensioni di taglio possono essere fortemente modificate (e di conseguenza le tensioni principali). Così per una sezione anulare, le tensioni di taglio passerebbero da quelle di sezione chiusa a quelle di sezione aperta. Per sezioni di questo tipo ed in flessione retta sfruttare le posizioni di simmetria per operare i tagli. Nel caso di flessione deviata, solo in alcuni casi limitati si possono calcolare le tensioni di taglio, partendo dai risultati forniti da CAP3. Generalmente tali prescrizioni valgono per il metodo delle tensioni ammissibili che non fanno parte di CAP3.

## 2.5) Geometria trave: AUTO

Le geometrie di alcune travi (sezioni: rettangolari, a T, a L, e a I) possono agevolmente essere modificate cambiando solo alcune dimensioni. Per le travi piane riassegnando la lunghezza della trave e dei ringrossi, per le travi a doppia pendenza la lunghezza, l'altezza in mezzzeria, la pendenza ed altre dimensioni.

La geometria trave deve essere già assegnata, è possibile la sola modifica.

Allo scopo seguire le indicazioni del comando **Inserisci\Geometria\_Trave:\_AUTO**

## 2.6) Geometria sezione getto integrativo

Il getto integrativo é a sezione costante, le coordinate che ne descrivono la sezione sono riferite al sistema di assi x,y paralleli al sistema di riferimento degli assi della trave, con stessa origine delle x e con origine delle y posta sull'estradosso della trave. In questo modo la sezione del getto integrativo segue l'andamento della trave all'estradosso.

Per l'assegnazione della sezione vedere il paragrafo "Geometria sezione".

## 2.7) Vincoli trave

Relativamente alle varie fasi di vita della trave sono da assegnare la posizione dei vincoli o appoggi:

- al rilascio delle armature di precompressione (due vincoli);
- al sollevamento della trave (due o quattro vincoli);
- al trasporto della trave (due o quattro vincoli);
- per la trave in opera (due vincoli).

Questi vincoli sono considerati di semplice appoggio, validi sia per la direzione x che per la direzione y e forniscono reazioni normali all'asse della trave.

Nel caso di quattro vincoli, vengono assunte uguali (due a due) le reazioni dei primi due vincoli e le reazioni degli ultimi due vincoli.

La posizione dei vincoli e l'assegnazione é chiaramente indicato in CAP3.

## **2.8) Armature ordinarie**

La “trave” può essere armata con armature ordinarie disposte nella trave e/o nel getto collaborante. I tipi ed il numero massimo di armature é indicato da CAP3.

Valgono i seguenti orientamenti per ogni singola armatura:

- armatura orizzontale, parallela all'asse z, a tutta lunghezza della trave;
- armatura intermedia e/o inclinata, rispetto all'asse z;
- armatura deviata, composta da due segmenti non paralleli.

### **Armature orizzontali**

Per ogni armatura sono da assegnare la posizione trasversale ( $x_i, y_i$ ) di partenza e l'area.

### **Armature intermedie**

Per ogni armatura sono da assegnare la posizione trasversale ( $x_i, y_i, z_i$ ) di partenza, la posizione trasversale ( $x_f, y_f, z_f$ ) di arrivo e l'area.

### **Armature deviate**

Per ogni armatura sono da assegnare la posizione trasversale ( $x_i, y_i, z_i$ ) di partenza, la posizione trasversale ( $x_f, y_f, z_f$ ) di arrivo, la posizione di deviazione ( $x_d, y_d, z_d$ ) e l'area.

Le coordinate delle armature sono riferite al sistema di assi X,Y,Z della trave, sia per le armature dichiarate appartenenti alla trave che per le armature dichiarate appartenenti al getto integrativo.

Ai fini del calcolo si considera nulla la lunghezza di ancoraggio (l'utente deve tener conto di ciò).

Al fine del calcolo, per tutte le armature, comunque dichiarate, é trascurata l'eventuale inclinazione rispetto all'asse della trave (asse delle z). E' quindi opportuno che l'inclinazione sia modesta.

## **2.9) Armature di precompressione (Cavi)**

La sezione può essere armata con armature di precompressione disposte nella trave. Il massimo numero di gruppi e di armature é indicato da CAP3.

Valgono i seguenti orientamenti per ogni singola armatura:

- cavi orizzontali paralleli all'asse z, a tutta lunghezza della trave;
- cavi intermedi e/o inclinati rispetto all'asse z;
- cavi deviati composti da due segmenti non paralleli;
- cavi a gruppi, a tutta lunghezza della trave.

### **Cavi orizzontali (a tutta lunghezza)**

Per ogni armatura sono da assegnare il flag\_cavo, la posizione trasversale (x,y) di partenza (la sezione di testata di sinistra è in  $z=0$ ), l'area del cavo, la tensione di tesatura ad operazione di tiro completata, la lunghezza di inguainamento a sinistra e a destra (o zero).

Il flag\_cavo può assumere valore 0 o valore 1. Nel caso di valore zero in quella posizione (e rigo di input nella finestra di dialogo) è come se il cavo non ci fosse, nel caso di valore 1 in quella posizione è presente il cavo.

Questo permette l'uso di opportune “**maschere cavi**”. Si assegnano i dati dei cavi per tutte le posizioni della maschera (o delle possibili posizioni), ed assegnando flag\_cavo=0 per tutte le posizioni dove non si vuole il cavo e assegnando flag\_cavo=1 per tutte le posizioni dove si vuole avere il cavo. Per facilitare ed accelerare l'uso delle maschere cavi è opportuno inserirle in un file Data Base (file tipo **DataBase-Cap3.CAV** riportato nella directory ...**Cap3\** come esempio) per essere richiamate.

### **Cavi intermedi**

Per ogni armatura sono da assegnare la posizione trasversale ( $x_i, y_i, z_i$ ) di partenza (la sezione di testata di sinistra è in  $z=0$ ), la posizione trasversale ( $x_f, y_f, z_f$ ) di arrivo (la sezione di testata di destra è in  $z=L$ ), l'area del cavo, la tensione di tesatura ad operazione di tiro completata, la lunghezza di inguainamento a sinistra e a destra (o zero).

### **Cavi deviati**

Per ogni armatura sono da assegnare la posizione trasversale ( $x_i, y_i, z_i$ ) di partenza (la sezione di testata di sinistra è in  $z=0$ ), la posizione trasversale ( $x_f, y_f, z_f$ ) di arrivo (la sezione di testata di destra è in  $z=L$ ), la posizione di deviazione ( $x_d, y_d, z_d$ ), l'area del cavo, la tensione di tesatura ad operazione di tiro completata, la lunghezza di inguainamento a sinistra e a destra (o zero).

### **Cavi a gruppi**

Per i gruppi di armature sono da assegnare il numero dei cavi componenti il gruppo, la posizione trasversale ( $x_a, y_a$ ) di inizio e ( $x_b, y_b$ ) di fine della distribuzione lineare sulla sezione a passo costante, l'area del singolo cavo, la tensione di tesatura ad operazione di tiro completata, la lunghezza di inguainamento a sinistra e a destra (o zero) valida per tutti i cavi del gruppo.

L'ancoraggio delle armature di precompressione viene definito dalle due grandezze: la lunghezza di “inizio” ancoraggio e la lunghezza di “fine” ancoraggio, con la lunghezza di ancoraggio assegnata tramite il numero di diametri del diametro equivalente dell'armatura.

Se la lunghezza di inizio ancoraggio coincide con quella di fine ancoraggio l'armatura perde l'efficienza per una lunghezza pari alla lunghezza di ancoraggio più la lunghezza di inguainamento.

Se la lunghezza di inizio ancoraggio è minore della lunghezza di fine ancoraggio l'armatura perde l'efficienza per una lunghezza pari alla lunghezza di inizio ancoraggio più la lunghezza di inguainamento, mentre tra la lunghezza di inizio ancoraggio e la lunghezza di fine ancoraggio è preso in conto un ancoraggio di tipo lineare. L'ancoraggio di tipo lineare è ottenuto riducendo in modo lineare l'area dell'armatura (da 1 a 0) mantenendo il valore della tensione e il modo di calcolo delle perdite per rilassamento. Comunque in sezione piana.

Per la lunghezza di ancoraggio vedere il comando **Inserisci\Opzioni\Parametri di calcolo**.

Al fine del calcolo, per tutte le armature di precompressione, comunque dichiarate, è trascurata l'eventuale inclinazione del cavo rispetto all'asse della trave (asse delle  $z$ ). E' quindi opportuno che tale inclinazione sia modesta.

Le “**maschere cavi**” cioè le geometrie delle armature di precompressione assegnate nei file FileLoad \*.CAV sono caricati con il pulsante **Load Dati** presente nella finestra di dialogo per l'assegnazione delle armature orizzontali di precompressione poi occorre aprire il file che li contiene e selezionare il nome dell'elemento interessato.

I file di FileLoad \*.CAV sono implementati aggiungendo i dati del caso in corso (esempio che si sta esaminando). Un elemento può essere: Aggiunto, Sostituito, Cancellato. La modifica, invece, prevede di “caricare” dal data base l’elemento in CAP3, modificarlo e poi inserirlo nel data base con il comando “Sostituisci”.

## 2.10) Materiali

Per le grandezze dei materiali (calcestruzzo trave, calcestruzzo getto integrativo, armature ordinarie e di precompressione) risulta necessario definire le proprietà meccaniche.

Per il materiale calcestruzzo, sono richiesti:

- $R_{ck}$  : resistenza caratteristica cubica a compressione, a 28 giorni di maturazione;
- $f_{ck}$  : resistenza caratteristica cilindrica a compressione, a 28 giorni di maturazione;
- $E_{cm}$  : modulo elastico normale, a 28 giorni di maturazione.
- $\gamma_c$  : coefficiente di sicurezza materiale;
- $\epsilon_{c2}$  : deformazione del calcestruzzo alla tensione di picco per parabola-rettangolo;
- $\epsilon_{cu2}$  : deformazione ultima del calcestruzzo per parabola-rettangolo;
- $\epsilon_{c3}$  : deformazione del calcestruzzo alla tensione di picco per triangolo-rettangolo;
- $\epsilon_{cu3}$  : deformazione ultima del calcestruzzo per triangolo-rettangolo;

Per le armature ordinarie, sono richiesti:

- $f_{syk}$  : tensione caratteristica di snervamento;
- $f_{stk}$  : tensione caratteristica di rottura;
- $E$  : modulo elastico normale, tangente all’origine;
- $\gamma_s$  : coefficiente di sicurezza materiale;
- $\epsilon_{ud}$  : la deformazione di calcolo dell’armatura;
- $\epsilon_{uk}$  : la deformazione corrispondente alla resistenza  $f_{stk}$ .

Per le armature di precompressione, sono richiesti:

- $f_{ptk}$  : tensione caratteristica di rottura;
- $f_{pyk}$  : tensione caratteristica di snervamento;
- $E$  : modulo elastico normale, tangente all’origine;
- $\gamma_s$  : coefficiente di sicurezza materiale;
- $\epsilon_{ud}$  : la deformazione di calcolo dell’armatura;
- $\epsilon_{uk}$  : la deformazione corrispondente alla resistenza  $f_{ptk}$ .
- $f_{p(0.0)k}$ : tensione caratteristica al limite elastico lineare;
- $f_{p(0.1)k}$ : tensione caratteristica al 0.1% di deformazione residua;
- $f_{p(0.2)k}$ : tensione caratteristica al 0.2% di deformazione residua;
- $f_{p(1.0)k}$ : tensione caratteristica al 1% di deformazione residua;

La funzione di SELEZIONE CLASSE DI RESISTENZA inizializza i dati in base alla classe di resistenza selezionata per il materiale.

La funzione AUTO SET DATI propone alcuni dei valori di cui sopra in base al valore principale, se coerente, assegnato dall’utente. Tutti questi dati sono modificabili dall’utente.

Altre grandezze dei materiali da assegnare sono:

- Spessori fittizi della trave e del getto collaborante.
- Coefficienti parziali di viscosità del calcestruzzo (trave e getto collaborante);

- Coefficienti finali di ritiro del calcestruzzo per essiccamento ed autogeno (trave e getto collaborante);
- Coefficienti per il calcolo del rilassamento delle armature di precompressione da assegnare attraverso la perdita per rilassamento a 1000 ore e la dichiarazione di armatura ordinaria o armatura stabilizzata (vedi Rilassamento nelle armature di precompressione).

Il programma propone dei valori medi calcolati trascurando il fatto che c'è contatto trave-getto collaborante.

I valori proposti da Cap3 per i coefficienti parziali di viscosità e i coefficienti finali di ritiro fanno riferimento alla sola normativa dell'Eurocodice.

## 2.11) Carichi, casi di carico e combinazioni.

Sono previsti quattro casi di carico variabili separati oltre ai carichi permanenti di I fase agenti sulla trave senza l'eventuale getto integrativo ed ai carichi permanenti di II fase agenti sulla trave con l'eventuale getto integrativo già collaborante.

Ogni caso separato può essere formato da uno o più carichi concentrati più uno o più carichi distribuiti, agenti o in direzione X (solo per flessione deviata) o in direzione Y.

### 2.11.1) Casi di carico variabili

Ai quattro casi di carico variabili è possibile assegnare una descrizione.

### 2.11.2) Combinazioni di carico

Per la verifica agli stati limite di esercizio e agli stati limite ultimi, finali, i carichi assegnati permanenti e i quattro casi di carico variabili, sono combinati da Cap3 con gli opportuni coefficienti (fattori di sicurezza parziali) assegnati dall'utente ed adatti allo scopo.

CAP3 prevede tre tipi di combinazioni:

- la combinazione caratteristica (rara) per gli stati limite di esercizio;
- la combinazione frequente (non considerata);
- la combinazione quasi permanente per gli stati limite di esercizio;
- la combinazione per gli stati limite ultimi.

Per ogni combinazione occorre assegnare:

- il coefficiente che moltiplica i carichi permanenti;
- il coefficiente che moltiplica i carichi variabili caso 1;
- il coefficiente che moltiplica i carichi variabili caso 2;
- il coefficiente che moltiplica i carichi variabili caso 3;
- il coefficiente che moltiplica i carichi variabili caso 4;

questi coefficienti devono contenere:  $\gamma_G$ ,  $\gamma_Q$ ,  $\psi_0$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ .

E' obbligatorio assegnare almeno una combinazione rara, una combinazione quasi permanente ed una combinazione per gli stati limite ultimi.

Per la verifica nelle fasi transitorie i carichi sono combinati da CAP3, l'utente può impostare alcuni coefficienti con il comando **Inserisci\Opzioni\Parametri di Calcolo**.

### 2.11.3) Carichi agenti

#### **Sono considerati i seguenti carichi permanenti:**

- 1) il carico di peso proprio della trave, conteggiato automaticamente da CAP3 attraverso il peso specifico del calcestruzzo e la geometria della trave;
- 2) il carico di peso proprio del getto integrativo (se c'è), conteggiato automaticamente da CAP3 attraverso il peso specifico del calcestruzzo e la geometria del getto integrativo;
- 3) i carichi permanenti I gruppo (I fase), agenti sulla trave in opera prima del getto integrativo collaborante;
- 4) i carichi permanenti II gruppo (II fase), agenti sulla trave in opera dopo il getto integrativo già collaborante.

CAP3 considera questi carichi, con opportuni coefficienti moltiplicativi, a seconda delle varie fasi transitorie di verifica (compreso la fase finale con i soli carichi permanenti). Per le fasi finali valgono i coefficienti moltiplicativi delle varie combinazioni dichiarate dall'utente.

Per il peso specifico del calcestruzzo vedere il comando **Opzioni\Pesi specifici**.

#### **Sono considerati quattro casi di carico variabili:**

- 1) Variabili caso 1;
- 2) Variabili caso 2;
- 3) Variabili caso 3;
- 4) Variabili caso 4;

validi per le fasi finali, combinati con i coefficienti moltiplicativi delle varie combinazioni dichiarate dall'utente.

I carichi di I e II fase sono ammessi anche in assenza del getto collaborante. Sono applicati ai tempi di carico impostati e loro assegnati.

#### 2.11.3.1) Tipi di carico

Sono ammessi carichi quali forze concentrate e forze distribuite a tratti del tipo costante o lineare, sia in direzione x (solo per flessione deviata) che in direzione y. Il peso proprio della trave e del getto integrativo sono conteggiati automaticamente dal programma e considerati diretti come y (in direzione e verso).

I carichi concentrati (C) si descrivono assegnando:

- l'ascissa z misurata a partire dall'estremo sinistro della trave;
- l'entità del carico Q.

I carichi distribuiti costanti (DC) si descrivono assegnando:

- le ascisse z1 di inizio e z2 di fine carico misurate a partire dall'estremo sinistro della trave;
- l'entità del carico distribuito q.

I carichi distribuiti lineari (DL) si descrivono assegnando:

- le ascisse z1 di inizio e z2 di fine carico misurate a partire dall'estremo sinistro della trave;
- l'entità del carico lineare q1 di inizio e q2 di fine carico.

I carichi dichiarati a tutta lunghezza della trave (A) vengono aggiornati coerentemente con il valore della lunghezza della trave (non necessita dunque l'assegnazione di z1 e z2 che sono assunte 0 e L rispettivamente).



## 2.12) Sezioni di verifica

Il programma CAP3 esegue i calcoli e le verifiche in prefissate sezioni da assegnare tramite le loro coordinate  $z_k$ , sempre misurate a partire dall'estremo sinistro della trave. Si devono scegliere queste sezioni in posizioni opportune in modo tale che le verifiche in queste sezioni ne rappresenti la verifica di tutta la trave. Il comando è: **Inserisci\Sezioni\_di\_Verifica**.

Con lo stesso comando si assegna il valore di  $\text{ctg}\theta$  per le varie sezioni di verifica, essendo  $\theta$  l'angolo di inclinazione del puntone compresso rispetto all'asse della trave, nonché il modo di applicazione: valore fisso o valore limite superiore. Come valore fisso CAP3 usa il valore di  $\text{ctg}\theta$  assegnato, come valore limite superiore CAP3 ricalcola  $\text{ctg}\theta$ , come valore massimo minore o uguale al valore assegnato, nel limite della resistenza del corrente compresso. In flessione deviata  $\text{ctg}\theta$  assume comunque il valore fisso assegnato.

Modo di traslazione dei diagrammi dei momenti.

Nella verifica allo stato limite ultimo a flessione e taglio della generica sezione alla coordinata  $z_k$ , CAP3 assume i momenti più sfavorevoli tra quelli misurati nelle sezioni  $z_k - \Delta z_k$ ,  $z_k$ ,  $z_k + \Delta z_k$ . L'ampiezza di traslazione  $\Delta z_k$  è assunta di valore  $a_1 = z \cdot \text{ctg}\theta / 2$  se la normativa di riferimento è l'Eurocodice EN2004 o di valore  $a_1 = 0.9 \cdot d \cdot \text{ctg}\theta / 2$  se la normativa di riferimento è il D.M. 14 gennaio 2008; essendo:  $z = \text{MAX}(z-, z+)$ ,  $d = \text{MAX}(d-, d+)$  e  $\text{ctg}\theta$  misurati alla coordinata  $z_k$ .

Per il significato di  $z-$  e  $z+$  e di  $d-$  e  $d+$  vedere il paragrafo “**Grandezze di verifica a taglio**”. Per la modalità di assunzione di  $a_1$  vedere la normativa.

### 2.12.1) Sezioni di verifica: AUTO

E' possibile generare automaticamente le sezioni di verifica con il comando **Inserisci\Sezioni\_di\_Verifica: AUTO**. Il programma propone le sezioni di verifica tenendo conto della simmetria geometrica, di armatura e di carico (rispetto alla mezzeria della trave). Tiene conto dei cambi di sezione, della posizione dei vincoli e dei carichi concentrati.

## 2.13) Grandezze di verifica a taglio e flessione\_taglio

Per le varie sezioni di verifica occorre assegnare le grandezze necessarie per il calcolo delle resistenze a taglio nonché flessione e taglio.

Queste sono, per ogni sezione di verifica:

- $b_w$ , larghezza di calcolo della sezione;
- $d-$ , altezza utile sezione per momenti negativi;
- $d+$ , altezza utile sezione per momenti positivi;
- $z-$ , braccio coppia interna sezione per momenti negativi;
- $z+$ , braccio coppia interna sezione per momenti positivi;
- $A_{st}$ , area delle staffe a metro lineare.

Se la normativa di riferimento è l'Eurocodice EN 2004 allora Cap3 considera i valori di  $z-$  e  $z+$  e trascura i valori di  $d-$  e  $d+$ . Se la normativa di riferimento è il D.M. 14 gennaio 2008 allora Cap3 considera in valori di  $d-$  e  $d+$  (attraverso il coefficiente 0.9) e trascura i valori di  $z-$  e  $z+$ .

L'area delle staffe è assegnata con i dati delle campiture in cui è suddivisa l'armatura a taglio della trave, dati che sono:

- lunghezza campo;
- numero bracci staffa;
- diametro staffe;

- passo staffe.

In flessione deviata l'armatura a taglio è trascurata.

La distribuzione delle staffe nella trave e le grandezze di verifica a taglio sono assegnate con i comandi **Inserisci\Staffe trave** e **Inserisci\ Grandezze verifica taglio**.

A seguito di una qualsiasi verifica che possa influenzare le grandezze di verifica a taglio, l'opzione accessibile in **Inserisci\Opzioni\Parametri di calcolo** abilita o disabilita l'aggiornamento automatico da parte di CAP3 delle grandezze di verifica a taglio modificabili dall'utente.

## 2.14) Opzioni

Sono considerate le seguenti opzioni:

- Tipo calcolo trave
- Parametri di calcolo
- Classe cemento
- Umidità relativa
- Pesi specifici
- Tipo curve di resistenza materiali
- Normativa di riferimento
- Tempi di calcolo
- Opzioni di visualizzazione testo
- Opzioni di visualizzazione grafico

### 2.14.1) Parametri di calcolo

a) Coefficienti parziali di sicurezza dell'azione di precompressione, inferiore e superiore, sia per lo stato limite di esercizio che per lo stato limite ultimo.

b) Coefficienti parziali per le azioni dovute ai carichi permanenti ed ai carichi variabili nelle fasi transitorie.

c) Coefficienti incremento peso proprio trave, inferiore e superiore, per la fase di sollevamento e per la fase di trasporto della trave. Per le fasi transitorie di sollevamento e trasporto, é possibile tenere conto degli effetti dinamici attraverso un diminuzione e/o un aumento del peso proprio della trave e nella sola direzione verticale.

d) Verifica a taglio. E' da assegnare il coefficiente  $v_1$  di riduzione della resistenza a compressione del calcestruzzo d'anima.

Inoltre, se si seleziona l'opzione "Aggiorna sempre parametri di verifica a taglio" ad ogni modifica di dati che influenzano la verifica a taglio, Cap3 ne aggiorna i valori; diversamente l'utente può assegnare valori propri. Vedere la finestra di dialogo "Grandezze verifica a taglio".

e) Numero diametri  $nI$  per la lunghezza di inizio ancoraggio ed  $nF$  di fine ancoraggio per le armature di precompressione. Agli effetti dell'ancoraggio delle armature di precompressione il programma CAP3 assume una lunghezza pari a:  $L_{anc} = n \cdot \phi_{eq}$ , essendo  $n$  ( $nI$ ,  $nF$ ) il numero dei diametri da assumere per l'ancoraggio e  $\phi_{eq}$  il valore del diametro equivalente dell'armatura (fare attenzione in quanto il diametro equivalente é ottenuto dal valore dichiarato dell'area dell'armatura

stessa nell'input dati). Se si assegna  $nI=nF$  l'armatura di precompressione è considerata tutta assente lungo la lunghezza di ancoraggio e tutta presente oltre. Se si assegna  $nI<nF$  l'armatura di precompressione è considerata tutta assente lungo la lunghezza di inizio ancoraggio ed è considerato un ancoraggio di tipo lineare tra la lunghezza di inizio ancoraggio e fine ancoraggio. Vedere il paragrafo “**Armature di precompressione**”.

#### **2.14.2) Classi di cemento**

Sono considerate le seguenti classi di cemento, per il calcestruzzo della trave e del getto integrativo:

- Cemento classe S;
- Cemento classe N;
- Cemento classe R.

La classe di cemento influisce sulle resistenze e deformazioni del calcestruzzo nel tempo. Vedi normative.

#### **2.14.3) Umidità relativa**

L'umidità relativa ambiente RH, da assegnare in valore percentuale. RH influisce sui coefficienti di calcolo del modulo elastico nel tempo per il calcestruzzo nonché sui coefficienti per il calcolo delle deformazioni viscosi e di ritiro. Vedi normative. Il programma propone dei valori; i valori proposti devono essere verificati dall'utente e se del caso riassegnati.

#### **2.14.4) Pesi specifici**

Sono da assegnare i pesi specifici (masse) del calcestruzzo della trave e del getto integrativo.

#### **2.14.5) Tipo curve di resistenza dei materiali**

E' possibile specificare il tipo di curve, tensione-deformazione, di resistenza dei materiali da utilizzare nei calcoli. Allo scopo vedere la finestra di dialogo per l'assegnazione delle opzioni. Vedere anche i paragrafi “**Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni ...**”.

#### **2.14.6) Normativa di riferimento**

Cap3 fa riferimento ad una delle seguenti due normative, selezionabile dall'utente:

- Eurocodici – EN 2004;
- D.M. 14 gennaio 2008.

#### **2.14.7) Tempi di calcolo**

Le travi precomprese hanno più fasi di vita (tempi di calcolo o tempi della vita della trave) legate a diverse condizioni statiche. Queste condizioni statiche sono dovute ai vincoli e ai carichi che cambiano nel tempo. Assunta come origine dei tempi ( $t=0$ ) il momento di tesatura delle armature di

precompressione, sono individuate le fasi di calcolo, corrispondenti agli eventi significativi della trave, a cui sono associati dei valori temporali. Queste fasi, prefissate da CAP3, sono:

- tesatura armature di precompressione;
- maturazione calcestruzzo trave;
- rilascio armature di precompressione;
- sollevamento trave;
- trasporto trave;
- messa in opera trave;
- applicazione carichi permanenti di I fase;
- maturazione calcestruzzo getto integrativo;
- applicazione carichi permanenti di II fase;
- applicazione carichi variabili (verifiche finali per lo stato limite di esercizio e lo stato limite ultimo).

Inoltre intervengono i tempi di traslazione per la maturazione accelerata per il calcestruzzo della trave ( $Dt$ -trave) e il calcestruzzo del getto integrativo ( $Dt$ -getto) ed il rilassamento delle armature di precompressione ( $Dt$ -cavi), causa l'aumento di temperatura dovuto alla maturazione a vapore.

Tutti questi tempi hanno valori prefissati da CAP3, possono comunque essere opportunamente modificati.

#### **2.14.8) Opzioni di visualizzazione testo**

Con le opzioni di visualizzazione si possono selezionare i vari "argomenti" di visualizzazione dei risultati. Allo scopo vedere il programma CAP3.

#### **2.14.9) Opzioni di visualizzazione grafiche**

Con le opzioni di visualizzazione si possono operare alcune scelte che influiscono sulla visualizzazione grafica della trave. Allo scopo vedere il programma CAP3.

## Capitolo 3

### LE VERIFICHE

#### 3.1) Le fasi di verifica

Il programma CAP3 considera le seguenti fasi di verifica:

- tesatura armature di precompressione;
- rilascio armature di precompressione;
- sollevamento trave;
- trasporto trave;
- messa in opera trave (con getto integrativo ancora non collaborante);
- fase finale con soli carichi permanenti;
- fasi finali per le combinazioni dello stato limite di esercizio;
- fasi finali per le combinazioni dello stato limite ultimo.

La fase del rilascio delle armature di precompressione, del sollevamento della trave, del trasporto della trave e messa in opera trave sono considerate fasi transitorie.

Per tutte le fasi sono calcolate (dove necessita) lo stato limite tensionale e le grandezze resistenti per lo stato limite ultimo. Sono inoltre controllate e segnalate le grandezze che superano il limite ammesso. Vedi EN2004 [§5.10, §7.2] e DM14GEN08 [§4.1.8.1]

Nelle verifiche nelle fasi transitorie e allo stato limite di esercizio, se è superata o è stata precedentemente superata la resistenza a trazione  $f_{ctmj}$  del calcestruzzo a sezione interamente reagente, la sezione è considerata parzializzata nella parte dove tale resistenza è o è stata superata. La sezione del getto integrativo è sempre considerata parzializzata. Vedi EN2004 [§7.1(2)].

Per ogni fase di verifica sono visualizzate le grandezze del materiale calcestruzzo dipendenti dal tempo di calcolo. In particolare risulta al tempo  $t$  di calcolo:

$$f_{ckj} = \text{MIN}(f_{ck}(t), f_{ck28})$$

$$f_{cdj} = \alpha_{cc} f_{ckj} / \gamma_c$$

$$f_{ctmj} = \text{MIN}(f_{ctm}(t), f_{ctm28})$$

$$E_{cm} = E_{cm}(t)$$

##### 3.1.1) Tesatura armature di precompressione

Il valore di tensione nelle armature di precompressione all'atto della tesatura è stabilito dall'utente. CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\sigma_p \leq 0.90 \text{ MIN}(f_{pyk}, f_{p(0.1)k}, f_{p(1.0)k})$$

$$\sigma_p \leq 0.80 f_{ptk}$$

### 3.1.2) Rilascio delle armature di precompressione

Le sollecitazioni sono calcolate su schema di rilascio.

#### Stato limite tensionale

E' considerato il peso proprio della trave con  $\gamma_G=1,0$ . Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p=1,0$ . CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\begin{aligned}\sigma_c &\leq 0.70 f_{ckj} && \text{in compressione} \\ \sigma_p &\leq 0.85 \text{ MIN}(f_{pyk}, f_p(0.1)k, f_p(1.0)k) \\ \sigma_p &\leq 0.75 f_{ptk}\end{aligned}$$

inoltre se viene superato il limite di trazione la sezione è considerata parzializzata.

#### Stato limite ultimo a flessione e taglio

E' considerata la combinazione dello stato limite ultimo con  $\gamma_G$  del transitorio. La forza di precompressione nonché la resistenza a rottura per flessione è calcolata con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite (partenza dalla situazione di carico permanente su schema di rilascio) con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$ . CAP3 segnala se la resistenza di progetto risulta minore della sollecitazione di progetto.

### 3.1.3) Sollevamento della trave

Le sollecitazioni sono calcolate su schema di sollevamento. E' considerato il peso proprio della trave, con o senza effetto dinamico, sia verso l'alto ( $iPT_{inf}<0$ ) che verso il basso ( $iPT_{sup}>0$ ).

#### Stato limite tensionale

E' considerato il peso proprio della trave con  $\gamma_G=1,0$  e l'effetto dinamico con  $\gamma_Q=1,0$ . Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p=1,0$ . CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\sigma_c \leq 0.70 f_{ckj} \quad \text{in compressione}$$

inoltre se viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo in questa fase o è stata superata nelle fasi precedenti la sezione è considerata parzializzata.

#### Stato limite ultimo a flessione e taglio

E' considerata la combinazione dello stato limite ultimo con  $\gamma_G$  e  $\gamma_Q$  del transitorio ( $\gamma_Q$  solo sulla quota parte dell'effetto dinamico). La forza di precompressione nonché la resistenza a rottura per flessione è calcolata con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite (partenza dalla situazione di carico permanente su schema di sollevamento) con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$ . CAP3 segnala se la resistenza di progetto risulta minore della sollecitazione di progetto.

### 3.1.4) Trasporto della trave

Le sollecitazioni sono calcolate su schema di trasporto. E' considerato il peso proprio della trave, con o senza effetto dinamico, sia verso l'alto ( $iPT_{inf} < 0$ ) che verso il basso ( $iPT_{sup} > 0$ ).

#### Stato limite tensionale

E' considerato il peso proprio della trave con  $\gamma_G = 1,0$  e l'effetto dinamico con  $\gamma_Q = 1,0$ . Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p = 1,0$ . CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\sigma_c \leq 0.70 f_{ckj} \quad \text{in compressione}$$

inoltre se viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo in questa fase o è stata superata nelle fasi precedenti la sezione è considerata parzializzata.

#### Stato limite ultimo a flessione e taglio

E' considerata la combinazione dello stato limite ultimo con  $\gamma_G$  e  $\gamma_Q$  del transitorio ( $\gamma_Q$  solo sulla quota parte dell'effetto dinamico). La forza di precompressione nonché la resistenza a rottura per flessione è calcolata con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite (partenza dalla situazione di carico permanente su schema di trasporto) con  $\gamma_p = \gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p = \gamma_{p,Sup}$ . CAP3 segnala se la resistenza di progetto risulta minore della sollecitazione di progetto.

### 3.1.5) Messa in opera della trave

Le sollecitazioni sono calcolate su schema finale. E' considerando il peso proprio della trave ed il carico permanente.

#### Stato limite tensionale

E' considerato il peso proprio della trave ed il carico permanente con  $\gamma_G = 1,0$ . Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p = 1,0$ . CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\begin{aligned} \sigma_c &\leq 0.45 f_{ck}(t) && \text{in compressione} \\ \sigma_c &\leq 0.70 f_{ckj} && \text{in compressione} \end{aligned}$$

inoltre se viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo in questa fase o è stata superata nelle fasi precedenti la sezione è considerata parzializzata.

#### Stato limite ultimo a flessione e taglio

E' considerata la combinazione dello stato limite ultimo con  $\gamma_G$  del transitorio. La forza di precompressione nonché la resistenza a rottura per flessione è calcolata con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite (partenza dalla situazione di carico permanente su schema finale) con  $\gamma_p = \gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p = \gamma_{p,Sup}$ . CAP3 segnala se la resistenza di progetto risulta minore della sollecitazione di progetto.

### 3.1.6) Fasi finali con solo carico permanente

Le sollecitazioni sono calcolate su schema finale. E' considerando il peso proprio della trave ed il carico permanente.

#### Stato limite tensionale

E' considerato il peso proprio della trave ed il carico permanente con  $\gamma_G=1,0$ . Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p=1,0$ . CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\begin{array}{ll} \sigma_c \leq 0.45 f_{ck}(t) & \text{in compressione} \\ \sigma_c \leq 0.60 f_{ckj} & \text{in compressione} \end{array}$$

inoltre se viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo in questa fase o è stata superata nelle fasi precedenti la sezione è considerata parzializzata. La sezione del getto integrativo è sempre considerata parzializzata.

### 3.1.7) Fasi finali

Le sollecitazioni sono calcolate su schema finale. Sono considerate le combinazioni assegnate dall'utente secondo i coefficienti di combinazione.

#### Stato limite tensionale: stato limite di esercizio per combinazioni caratteristiche (rare)

Sono considerate le combinazioni caratteristiche (rare) definite dall'utente. Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$  assegnati dall'utente.  $\gamma_{p,Inf}$  ( $=r_{inf}$ ) e  $\gamma_{p,Sup}$  ( $=r_{sup}$ ) sono applicati alla forza di precompressione media nella trave soggetta ai soli carichi medi permanenti. CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\begin{array}{ll} \sigma_c \leq 0.60 f_{ckj} & \text{in compressione} \\ \sigma_s \leq 0.80 f_{syk} & \text{in trazione} \\ \sigma_p \leq 0.80 \text{MIN}(f_{pyk}, f_{p(0.1)k}, f_{p(1.0)k}) & \text{in trazione (controllo eseguito solo per } \gamma_p=1) \end{array}$$

inoltre se viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo per una qualsiasi combinazione dello stato limite di esercizio o è stata superata nelle fasi precedenti la sezione è considerata parzializzata. La sezione del getto integrativo è sempre considerata parzializzata.

#### Stato limite tensionale: stato limite di esercizio per combinazioni quasi permanenti

Sono considerate le combinazioni quasi permanenti definite dall'utente. Le tensioni sono calcolate con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$  assegnati dall'utente.  $\gamma_{p,Inf}$  ( $=r_{inf}$ ) e  $\gamma_{p,Sup}$  ( $=r_{sup}$ ) sono applicati alla forza di precompressione media nella trave soggetta ai soli carichi medi permanenti. CAP3 segnala l'eventuale superamento dei limiti imposti secondo quanto segue:

$$\sigma_c \leq 0.45 f_{ckj} \quad \text{in compressione}$$



$$\begin{array}{ll} \sigma_s \leq 0.80 f_{yk} & \text{in trazione} \\ \sigma_p \leq 0.80 \text{ MIN}(f_{pyk}, f_{p(0.1)k}, f_{p(1.0)k}) & \text{in trazione (controllo eseguito solo per } \gamma_p=1) \end{array}$$

inoltre se viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo per una qualsiasi combinazione dello stato limite di esercizio o è stata superata nelle fasi precedenti la sezione è considerata parzializzata. La sezione del getto integrativo è sempre considerata parzializzata.

### Stato limite ultimo a flessione e taglio

Sono considerate la combinazione dello stato limite ultimo definite dall'utente. La forza di precompressione nonché la resistenza a rottura per flessione è calcolata con riferimento al valore medio della precompressione e delle perdite (partenza dalla situazione di carico permanente su schema finale) con  $\gamma_p = \gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_p = \gamma_{p,Sup}$ . CAP3 segnala se la resistenza di progetto risulta minore della sollecitazione di progetto.

### 3.2) Stato limite tensionale

Sono calcolate e visualizzate le sollecitazioni di precompressione e quelle dovute ai carichi, in tutte le sezioni di verifica dichiarate e per le varie fasi di verifica. In particolare:

#### In flessione retta:

- Npd, azione assiale di precompressione;
- Mpd, momento di precompressione;
- Msd, momento flettente sollecitazione di progetto;
- Sc,Sup, tensione nel calcestruzzo nell'estremo superiore della sezione (yMin);
- Sc,Inf, tensione nel calcestruzzo nell'estremo inferiore della sezione (yMax);
- Ss,Min, tensione minima nelle armature ordinarie (con relativa posizione);
- Ss,Max, tensione massima nelle armature ordinarie (con relativa posizione);
- Sp,Min, tensione minima nelle armature di precompressione (con relativa posizione);
- Sp,Max, tensione massima nelle armature di precompressione (con relativa posizione);

#### In flessione deviata:

- Npd, azione assiale di precompressione;
- Mpd,x, momento di precompressione nel piano xz;
- Mpd,y, momento di precompressione nel piano yz;
- Msd,x momento flettente sollecitazione nel piano xz, di progetto;
- Msd,y momento flettente sollecitazione nel piano yz, di progetto;
- Sc(0,0), o  $\sigma(0,0)$ , tensione nel calcestruzzo nell'origine degli assi della sezione;
- dSc/dx, o  $\partial\sigma/\partial x$ , variazione di tensione nel calcestruzzo lungo l'asse x;
- dSc/dy, o  $\partial\sigma/\partial y$ , variazione di tensione nel calcestruzzo lungo l'asse y;
- Sc,Min, tensione minima nel calcestruzzo;
- Sc,Max, tensione massima nel calcestruzzo;
- Ss,Min, tensione minima nelle armature ordinarie (con relativa posizione);
- Ss,Max, tensione massima nelle armature ordinarie (con relativa posizione);
- Sp,Min, tensione minima nelle armature di precompressione (con relativa posizione);
- Sp,Max, tensione massima nelle armature di precompressione (con relativa posizione);

La tensione alle coordinate x,y della sezione si ottiene, ovviamente, con la formula:

$$\sigma(x,y) = \sigma(0,0) + x \cdot \partial\sigma/\partial x + y \cdot \partial\sigma/\partial y$$

L'azione di precompressione è riferita al baricentro geometrico della sezione della sola trave (getto collaborante escluso).

### 3.3) Stato limite ultimo a flessione e taglio

Sono calcolate e visualizzate le sollecitazioni di precompressione e quelle dovute ai carichi, in tutte le sezioni di verifica dichiarate e per le varie fasi di verifica. In particolare:

#### In flessione retta:

- Msd(min), momento flettente minimo, sollecitazione di progetto;
- Msd(z), momento flettente all'ascissa z, sollecitazione di progetto;
- Msd(max), momento flettente massimo, sollecitazione di progetto;
- MRd-(I), momento resistente per momenti negativi e  $\gamma_p = \gamma_{p,Inf}$ ;
- MRd+(I), momento resistente per momenti positivi e  $\gamma_p = \gamma_{p,Inf}$ ;
- MRd-(S), momento resistente per momenti negativi e  $\gamma_p = \gamma_{p,Sup}$ ;
- MRd+(S), momento resistente per momenti positivi e  $\gamma_p = \gamma_{p,Sup}$ ;
- MRd/Msd, coefficiente rapporto tra resistenza e sollecitazione di progetto, nel rispetto dei segni dei momenti,  
(MIN(-MRd-(I), -MRd-(S))/Msd per Msd<0, MIN(MRd+(I), MRd+(S))/Msd per Msd>0).

#### In flessione deviata:

- Msd,x(z-Δz), momento flettente minimo nel piano xz, sollecitazione di progetto;
- Msd,y(z-Δz), momento flettente minimo nel piano xy, sollecitazione di progetto;
- Msd,x(z), momento flettente massimo nel piano xz, sollecitazione di progetto;
- Msd,y(z), momento flettente massimo nel piano xy, sollecitazione di progetto;
- Msd,x(z+Δz), momento flettente minimo nel piano xz, sollecitazione di progetto;
- Msd,y(z+Δz), momento flettente minimo nel piano xy, sollecitazione di progetto;
- Ccoeff.Vett., coefficiente vettoriale, per valori >1 la sollecitazione è interna al dominio resistente, per valori <1 la sollecitazione è esterna al dominio resistente (e maggiore è la distanza da 1 quanto è maggiore la distanza dalla frontiera del dominio resistente).

I momenti, sollecitazioni di progetto, minimi e massimi, in flessione retta e in flessione deviata, sono calcolati nelle seguenti tre sezioni:

- sezione z-Δz, se Δz≠0;
- sezione z;
- sezione z+Δz, se Δz≠0;

essendo Δz la lunghezza di "traslazione" dei momenti, per tener conto della sollecitazione di taglio, che vale:

$$\Delta z = \text{MAX}(z-, z+) \text{ ctg}\theta/2.$$

Accanto ai valori dei momenti resistenti (MRd-(I), MRd+(I), MRd-(S), MRd+(S)) é stampato il carattere C se la rottura avviene per compressione del calcestruzzo o il carattere A se la rottura avviene per trazione nelle armature.

Il comando **Analisi\Dominio\_Mx,My** permette di calcolare e visualizzare il dominio resistente Mx,My nonché le sue sollecitazioni di progetto, per una generica sezione assegnata.

### 3.4) Stato limite ultimo a taglio

Sono calcolate e visualizzate l'azione di precompressione e le sollecitazioni di progetto, in tutte le sezioni di verifica dichiarate e per le varie fasi di verifica. In particolare:

#### In flessione retta:

- $N_{pd}$ , forza assiale di precompressione, se  $\gamma_p=1.0$ ;
- $N_{pd}(I)$ , forza assiale di precompressione con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$ ;
- $N_{pd}(S)$ , forza assiale di precompressione con  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$ ;
- $V_{sd}$ , azione di taglio di progetto;
- $V_{rdc}$ , resistenza a taglio in compressione;
- $V_{rds}$ , resistenza a taglio in trazione;
- $V_{rd}/V_{sd}$ , coefficiente rapporto tra resistenza di calcolo e sollecitazione di progetto;
- $z$  (o  $0.9d$ ), braccio coppia interna (o altezza utile sezione) con indicazione se usato il valore per momenti positivi o negativi;
- $\text{cog}\theta$ , con  $\theta$  angolo di inclinazione puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave;
- $\sigma_{cp}$ , tensione media di compressione nella sezione, se  $\gamma_p=1.0$ ;
- $\sigma_{cp}(I)$ , tensione media di compressione nella sezione con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$ ;
- $\sigma_{cp}(S)$ , tensione media di compressione nella sezione con  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$ ;
- $\alpha_c$ , [Alfac] coefficiente maggiorativo;

#### In flessione deviata:

- $N_{pd}$ , forza assiale di precompressione, se  $\gamma_p=1.0$ ;
- $N_{pd}(I)$ , forza assiale di precompressione con  $\gamma_p=\gamma_{p,Inf}$ ;
- $N_{pd}(S)$ , forza assiale di precompressione con  $\gamma_p=\gamma_{p,Sup}$ ;
- $M_{sd,x}$ , momento flettente nel piano xz, sollecitazione di progetto;
- $M_{sd,y}$ , momento flettente nel piano xy, sollecitazione di progetto;
- $V_{sd,x}$ , azione di taglio di progetto, componente lungo l'asse x;
- $V_{sd,y}$ , azione di taglio di progetto, componente lungo l'asse y;

Quando il momento flettente è negativo è usata l'altezza utile  $d^-$  o il braccio della coppia interna  $z^-$ , quando il momento flettente è positivo è usata l'altezza utile  $d^+$  o il braccio della coppia interna  $z^+$ . Il momento flettente  $M_{sd}$  è quello calcolato nella sezione in esame.

ATTENZIONE: Nelle sezioni di verifica agli estremi può verificarsi di avere momenti flettenti piccoli ma negativi: in queste sezioni le resistenze sono calcolate facendo uso di  $d^-$  e  $z^-$  essendo appunto  $M_{sd}<0$ .

L'azione di taglio è il massimo tra quella valutata a sinistra e a destra della sezione in esame (la differenza sussiste solo se sulla sezione agisce un carico concentrato).

Occorre fare attenzione. In presenza di carico concentrato  $Q$  il calcolo di  $T_s$  (taglio a sinistra) e  $T_d$  (taglio a destra) è significativo se il carico è in perfetta corrispondenza della sezione fornendo  $T_s=T_d \pm Q$ . Anche piccoli errori numerici di posizione può portare a  $T_s=T_d$ .

### 3.5) Reazione agli appoggi

Sono calcolati i valori massimi delle reazioni agli appoggi per le (sole) fasi finali di stati limite ultimi.

### 3.6) Armatura agli appoggi

Sono calcolate le aree di armatura necessarie per assorbire il taglio agli appoggi per le (sole) fasi finali di stato limite ultimo. L'armatura è calcolata con riferimento alle sezioni di verifica assegnate dall'utente che si trovano a minore distanza dall'appoggio considerato di una misura pari a 1.25 volte l'altezza  $H(z)$  della sezione stessa, cioè sono prese in conto le sezioni di verifica di coordinata  $z$  per cui risulta:

$$z_{vs} \leq z \leq z_{vs} + 2.5 H(z)/2, \text{ per l'appoggio di sinistra di coordinata } z_{vs},$$

$$z_{vd} - 2.5 H(z)/2 \leq z \leq z_{vd}, \text{ per l'appoggio di destra di coordinata } z_{vd},$$

con la formula, in modo distinto per ogni appoggio:

$$A_{s,app} = \text{MAX} [ (V(z) / f_{syd}) \cdot \text{ctg}\theta(z) ].$$

Nell'assegnare le sezioni di verifica occorre tenere presente che il valore massimo di  $A_{s,app}$  non necessariamente si ha sull'appoggio. Quando allontanandosi dall'appoggio il prodotto  $V \cdot \text{ctg}\theta$  aumenta la condizione più sfavorevole si ha oltre la sezione di appoggio.

Se nessuna sezione di verifica ricade nell'intervallo di cui sopra, l'armatura non è calcolata. E' a cura dell'utente assegnare le sezioni di verifica in prossimità degli appoggi.

### 3.7) Calcolo spostamenti

Sono calcolati gli spostamenti per le fasi transitorie e per le fasi finali per le combinazioni dello stato limite di esercizio. La forza di precompressione considerata è quella media ( $\gamma_p=1,0$ ).

Sono considerati positivi gli spostamenti concordi con l'asse  $x$  e con l'asse  $y$ . Gli spostamenti in direzione  $x$  sono calcolati solo con l'opzione di flessione deviata (ovviamente con deformazione nulla di torsione).

La trave viene suddivisa in  $n$  conci a lunghezza costante di valore  $L/n$  ( $L$ =lunghezza trave). Sono calcolate le curvature all'estremo di ogni concio ed è assunto per il valore della curvatura all'interno dei vari conci un andamento lineare. Il valore prefissato è  $n=20$ .

### 3.8) Sollecitazioni casi separati

Possono visualizzarsi le sollecitazioni riferite ad ogni singolo caso separato. Possono servire per eventuali calcoli manuali.

### 3.9) Grandezze geometriche e meccaniche

Sono calcolate e stampate le grandezze geometriche e meccaniche.

## Capitolo 4

### CRITERI DI CALCOLO

Se la normativa di riferimento selezionata è il D.M. 14GEN08, dove questa risulta omissiva si fa riferimento alla normativa dell'Eurocodice EN2004.

Ad esempio, per il modulo elastico  $E_{cm28}$  vedi:

- EN2004 [prospetto3.1]
- DM14GEN08 [§11.2.10.3],

mentre per il modulo elastico  $E_{cm}(t)$  vedi:

- EN2004[§3.1.3(3)]

e tale valore è assunto anche per la normativa di riferimento D.M. 14GEN08 in quanto tale normativa nel caso risulta omissiva.

#### 4.1) Introduzione

Le travi precomprese ad armatura pretesa hanno più fasi di vita legate a diverse condizioni statiche. Queste condizioni sono dovute ai vincoli e ai carichi che cambiano nel tempo.

Assunto il momento della tesatura delle armature di precompressione come origine dei tempi ( $t=0$ ), sono individuate le fasi di verifica corrispondenti agli eventi significativi della trave; a tali eventi sono associati dei valori temporali.

Queste fasi, prefissate da CAP3, sono:

le fasi transitorie,

- tesatura armature di precompressione;
- rilascio armature di precompressione;
- sollevamento trave;
- trasporto trave;
- messa in opera trave (eventuale getto integrativo solo come peso);

e le fasi finali,

- trave coi soli carichi permanenti;
- trave con carichi permanenti e i casi di carico variabili, opportunamente combinati tra loro.

I vincoli cambiano nelle fasi transitorie, mentre non si modificano più dopo la messa in opera. I carichi agenti al sollevamento e al trasporto sono dati dal solo peso proprio della trave eventualmente amplificato per tenere conto degli effetti dinamici.

Al fine del calcolo delle deformazioni differite si considera lo schema iniziale sino al sollevamento, dopo di che i carichi permanenti (peso proprio trave e carichi permanenti dichiarati) sono considerati agenti sullo schema di vincolo della trave in opera. Con questo si ipotizza che lo schema statico nei tempi successivi il sollevamento della trave dalla pista di precompressione, salvo brevissimi periodi, coincida con lo schema statico della trave posata in opera.

#### 4.2) Ipotesi di calcolo per il calcolo dello stato tensionale

Le tensioni nei materiali sono calcolate considerando i materiali elastici lineari, assumendo come area della sezione quella corrispondente al conglomerato e alle aree metalliche, di cui tutti i materiali affetti dal coefficiente di omogeneizzazione ottenuto come rapporto dei relativi moduli elastici. Le sezioni di calcestruzzo non sono depurate dei fori occupati dalle armature di precompressione e dalle armature di cemento armato. Per le armature di precompressione non si tiene conto della eventuale inclinazione (ipotesi di armature poco inclinate).

Sono considerate le normali ipotesi della scienza delle costruzioni:

- sezioni piane;
- assenza di scorrimento tra i materiali componenti la sezione;
- legame elastico lineare tra sforzi e deformazioni;
- sovrapposizione degli effetti.

La prima ipotesi si traduce nel fatto che lo stato di deformazione è uno stato di deformazione piano. Per sezioni composte, cioè con il getto integrativo, si ammette che lo stato di deformazione rimane piano per la trave. E rimane piano per la trave + getto l'incremento dello stato di deformazione successivo alla collaborazione del getto integrativo.

Generalmente la sezione della trave è considerata interamente reagente. Diversamente, nelle verifiche nelle fasi transitorie e allo stato limite di esercizio, se è superata o è stata precedentemente superata la resistenza a trazione  $f_{ctmj}$  del calcestruzzo a sezione interamente reagente, la sezione è considerata parzializzata nella parte dove tale resistenza è o è stata superata. La sezione del getto integrativo è sempre considerata parzializzata (in zona tesa).

In sezione interamente reagente il materiale calcestruzzo è considerato elastico lineare sia in compressione che in trazione. In sezione parzializzata il materiale calcestruzzo è considerato elastico lineare in compressione e non reagente in trazione.

#### 4.3) Azione di precompressione

L'azione di precompressione è quella media stimata sulla base dei valori medi delle proprietà di deformazione e delle perdite calcolate conformemente ai parametri assegnati dall'utente e secondo quanto riportato nei paragrafi più avanti.

Quando alla forza di precompressione sono da applicare coefficienti quali  $r_{inf}$  e  $r_{sup}$  per lo stato limite di esercizio o  $\gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_{p,Sup}$  per lo stato limite ultimo, i coefficienti vengono applicati alla risultante della forza di precompressione media calcolata in presenza dei soli carichi permanenti presi con  $\gamma_G=1,0$  ed in sezione interamente reagente.

La differenza dell'azione di precompressione così calcolata è applicata alla sezione di calcestruzzo con le armature ordinarie ma senza le armature di precompressione. I carichi aggiuntivi (cioè quelli rispetto ai permanenti presi con  $\gamma_G=1,0$ ) sono poi applicati alla sezione completa (compreso le armature di precompressione), così l'effetto dell'eventuale parzializzazione della sezione.

Quanto sopra corrisponde ad assumere come ipotesi che le armature di precompressione subiscano una deformazione anelastica "aggiuntiva" in conseguenza della variazione fittizia di precompressione di forza assiale  $\Delta N_p$  e di momento  $\Delta M_p$ . Viene così mantenuto l'equilibrio della sezione e la congruenza tra i vari materiali della sezione.

#### 4.4) Modello elastoviscoso per il calcestruzzo

Il modello elastoviscoso per il calcestruzzo è quello proposto dal CEB e ripreso dagli Eurocodici (a cui si rimanda) a modulo elastico variabile.

Nell'ipotesi di viscosità lineare, la deformazione elastoviscosa prodotta da una tensione applicata all'istante  $t_0$ , vale:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, \tau) \cdot \frac{\partial \sigma_c(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau + \varepsilon_{ca}(t)$$

con la funzione di viscosità

$$J(t, t_0) = \left[ \frac{1}{E_{cm}(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right]$$

ed essendo:

$\varphi(t, t_0)$ , coefficiente di viscosità;

$E_{c28} = 1,05 \cdot E_{cm28}$ , modulo elastico tangente a 28 giorni di maturazione;

$E_{cm}(t)$ , modulo elastico variabile nel tempo;

$\sigma_c(t)$ , tensione nel calcestruzzo;

$\varepsilon_c(t)$ , deformazione elastoviscosa;

$t$ , tempo di misura ( $t \geq t_0$ );

$t_0$ , tempo di applicazione della tensione  $\sigma_c(t_0)$ ;

vale inoltre il principio di sovrapposizione degli effetti.

Il coefficiente di viscosità è dato dalla formula:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t, t_0) = \varphi_v \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t, t_0)$$

avendo posto:

$$\varphi_v = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm})$$

che in CAP3 è denominato “coefficiente parziale di viscosità” ed indicato con il simbolo  $C_v$ . Si avrà  $C_v$ \_Trave per il materiale calcestruzzo della trave e  $C_v$ \_Getto per il materiale calcestruzzo del getto integrativo.

In  $\beta(t_0)$  il tempo  $t_0$  è corretto per l'effetto del tipo di cemento.

La correzione dell'età del calcestruzzo per effetto di temperature elevate è fatto con il valore  $D_t$  assegnato nei tempi di vita della trave.

Per le funzioni di base per determinare il coefficiente di viscosità vedere Eurocodice EN 1992-1-1, edizione dicembre 2004, Appendice B.

#### 4.5) Modello di ritiro per il calcestruzzo

La deformazione totale di ritiro  $\varepsilon_{cs}$  è formata da due componenti, la deformazione da ritiro per essiccamento  $\varepsilon_{cd}$  e la deformazione da ritiro autogeno  $\varepsilon_{ca}$ :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove, la deformazione di ritiro per essiccamento vale:

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \cdot \beta_{ds}(t, t_s) = \varepsilon_{cdo} \cdot \beta_{ds}(t, t_s)$$

e la deformazione di ritiro autogeno vale:

$$\varepsilon_{ca}(t, t_s) = \varepsilon_{cao} \cdot \beta_{as}(t, t_s)$$

essendo:

$\varepsilon_{cdo} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$ , è il coefficiente finale di ritiro per essiccamento (in Cap3 denominato Crd);

$\varepsilon_{cao}$ , è il coefficiente finale di ritiro autogeno (in Cap3 denominato Cra);

$\beta_{ds}(t, t_s)$ , la funzione che descrive lo sviluppo del ritiro per essiccamento nel tempo;

$\beta_{as}(t, t_s)$ , la funzione che descrive lo sviluppo del ritiro autogeno nel tempo;

$t_s$ , tempo di inizio dello svilupparsi del ritiro;

$t$ , tempo di misura ( $t \geq t_s$ ).

Per le funzioni di base per determinare i coefficienti di ritiro vedere Eurocodice EN 1992-1-1, edizione dicembre 2004, § 3.1.4 e Appendice B. Non si fa riferimento al D.M. 14 gennaio 2008 § 11.2.10.6.

#### 4.6) Resistenza e modulo elastico del calcestruzzo nel tempo

Il valore della resistenza del calcestruzzo nel tempo è valutato con la formula:

$$f_{ck}(\Delta t) = f_{cm}(\Delta t) - 8 \text{ (Mpa)} \leq f_{ck28}$$

con:

$$f_{cm}(\Delta t) = f_{cm28} \cdot \beta_{cc}(\Delta t)$$

ed il valore del modulo elastico nel tempo è valutato con la formula:

$$E_{cm}(\Delta t) = E_{cm28} \cdot [\beta_{cc}(\Delta t)]^{0.3}$$

mentre il valore della resistenza a trazione nel tempo è valutato con la formula:

$$f_{ctm}(\Delta t) = f_{ctm28} \cdot [\beta_{cc}(\Delta t)]^\alpha \quad \text{con } \alpha=1 \text{ per } \Delta t < 28 \text{ ed } \alpha=2/3 \text{ per } \Delta t \geq 28 \text{ giorni}$$

dove la funzione  $\beta_{cc}$  vale:

$$\beta_{cc}(\Delta t) = \exp\{s[1-(28/\Delta t)^{1/2}]\}$$



essendo

- $f_{ck28}$ , la resistenza caratteristica a 28 gg di maturazione del calcestruzzo;
- $f_{cm28}$ , la resistenza media a compressione a 28 gg di maturazione del calcestruzzo;
- $f_{ctm28}$ , la resistenza media a trazione a 28 gg di maturazione del calcestruzzo;
- $E_{cm28}$ , il modulo elastico a 28 gg di maturazione del calcestruzzo;
- $s$ , è un coefficiente che dipende dal tipo di cemento;
- $\Delta t$ , è l'età del calcestruzzo, in giorni, al tempo di misura ( $\Delta t = t - t_1 + Dt$ ).
- $t$ , tempo di misura;
- $t_1$ , tempo di maturazione del calcestruzzo;
- $Dt$ , correzione dell'età del calcestruzzo per effetto di temperature elevate.

Per le funzioni di base ed i vari coefficienti vedi Eurocodice EN 1992-1-1, edizione dicembre 2004, ed anche D.M. 14 gennaio 2008.

#### 4.7) Rilassamento nelle armature di precompressione

La perdita di tensione per rilassamento nel tempo è calcolata con le formula:

$$\Delta\sigma_{pr}(t) = \sigma_{pi} \cdot c_{pr}(t)$$

con la funzione di rilassamento che vale:

$$c_{pr}(t) = a \cdot \rho_{1000} \cdot e^{b \cdot \mu} \cdot (24 \cdot t / 1000)^{0,75 \cdot (1 - \mu)} \cdot 10^{-5}$$

essendo:

- $\Delta\sigma_{pr}$  valore assoluto delle perdite per rilassamento;
- $\sigma_{pi}$  tensione di tesatura iniziale a tesatura completata;
- $t$  tempo di misura dopo la messa in tensione, in giorni ( $t_0=0$  è il tempo di tesatura);
- $\mu = \sigma_{pi} / f_{ptk}$ , con  $f_{ptk}$  resistenza caratteristica dell'armatura da precompressione;
- $\rho_{1000}$  il valore della perdita per rilassamento, in percentuale, a 1000 ore dopo la messa in tensione e a una temperatura media di 20°C;
- $a = 5.39$  per fili e trefoli a rilassamento normale (Classe 1)  
 $= 0.66$  per fili e trefoli a basso rilassamento (Classe 2)
- $b = 6.70$  per fili e trefoli a rilassamento normale  
 $= 9.10$  per fili e trefoli a basso rilassamento

Nello spirito del concetto di perdita per rilassamento (a deformazione totale costante), essendo la deformazione totale pari a  $\sigma_{pi}/E_p$ , la deformazione elastica nel tempo pari a  $\sigma_{pi}(t)/E_p$ , ne consegue che la deformazione anelastica  $\varepsilon_{pa}$ , differenza tra quella totale e quella elastica, risulta:

$$\varepsilon_{pa}(t) = [\sigma_{pi} - \sigma_{pi}(t)] / E_p = \Delta\sigma_{pr}(t) / E_p = \sigma_{pi} / E_p \cdot c_{pr}(t)$$

che in CAP3 si assume come deformazione anelastica (approssimata) dovuta al rilassamento delle armature di precompressione.

Vedere Eurocodice EN 1992-1-1, edizione dicembre 2004, § 3.3.2.

#### 4.8) Ipotesi di calcolo per il calcolo a rottura

Il calcolo dei momenti resistenti allo stato limite ultimo é fatto sommando allo stato di deformazione finale per i soli carichi permanenti e la forza di precompressione modificata secondo i coefficienti  $\gamma_{p,Inf}$  e  $\gamma_{p,Sup}$  (vedi paragrafo 4.3 Azione di precompressione), uno stato di deformazione aggiuntivo di flessione retta ( $\varepsilon_z, \chi_y$ ) o flessione deviata ( $\varepsilon_z, \chi_x, \chi_y$ ), cioè deformazione assiale e curvature nei piani di flessione. Le deformazioni nei materiali sono calcolate prescindendo dal contributo a trazione del conglomerato.

Sono considerate le ipotesi:

- sezioni piane;
- assenza di scorrimento tra i materiali componenti la sezione;
- legame elastico non lineare tra sforzi e deformazioni;
- deformazione massima del calcestruzzo: vedi curve di resistenza;
- deformazione massima dell'acciaio: vedi curve di resistenza;
- deformazione massima dell'armatura di precompressione: vedi curve di resistenza.

##### 4.8.1) Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni del calcestruzzo

1) **Parabola rettangolo**: si adotta, in compressione, il diagramma parabola-rettangolo definito da un arco di parabola, di secondo grado o grado n, 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  $\varepsilon_{c2}$ , l'estremità del segmento ha ascissa  $\varepsilon_{cu2}$ , l'ordinata massima del diagramma è pari a  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$ . In compressione la deformazione massima ammessa è  $\varepsilon_{cu2}$ . In trazione si assume resistenza nulla e la deformazione è limitata, in Cap3, al valore  $\varepsilon = 0,05$  (5%).

2) **Triangolo rettangolo**: si adotta, in compressione, il diagramma triangolo-rettangolo, definito da un segmento di retta inclinata uscente dall'origine e da un segmento di retta parallelo all'asse delle deformazioni posta in sommità; la parte lineare termina all'ascissa  $\varepsilon_{c3}$ , l'estremità del segmento orizzontale ha ascissa  $\varepsilon_{cu3}$ , l'ordinata massima del diagramma è pari a  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$ . In compressione la deformazione massima ammessa è  $\varepsilon_{cu3}$ . In trazione si assume resistenza nulla e la deformazione è limitata, in Cap3, al valore  $\varepsilon = 0,05$  (5%).

##### 4.8.2) Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni dell'acciaio ordinario

1) **Elasto plastica**: si adotta il diagramma elasto plastico, così definito in trazione (analogamente in compressione):

- $\sigma = \varepsilon \cdot E$  per deformazioni comprese tra 0 e  $f_{syd}/E$ ;
- $\sigma = f_{syd}$  per deformazioni comprese tra  $f_{syd}/E$  e  $\varepsilon_{uk}$ ;

essendo  $\sigma$  la resistenza,  $\varepsilon$  la deformazione ed  $E$  il modulo elastico. La deformazione di calcolo, in CAP3, è limitata ad  $\varepsilon_{uk}$ .

2) **Bilineare con tratto finale inclinato**: si adotta il diagramma bilineare, così definito in trazione (analogamente in compressione):

- $\sigma = \varepsilon \cdot E$  per deformazioni comprese tra 0 e  $f_{syd}/E$ ;
- $\sigma = f_{syd} + (f_{std} - f_{syd}) \cdot (\varepsilon - f_{syd}/E) / (\varepsilon_{uk} - f_{syd}/E)$  per deformazioni comprese tra  $f_{syd}/E$  e  $\varepsilon_{ud}$ ;

essendo  $\sigma$  la resistenza,  $\varepsilon$  la deformazione,  $\varepsilon_{uk}$  la deformazione in corrispondenza alla massima resistenza  $f_{stk}$  ed  $\varepsilon_{ud}$  la massima deformazione di calcolo.

#### 4.8.3) Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni dell'acciaio di precompressione

1) **Elasto plastica:** si adotta il diagramma elasto plastico, così definito in trazione (analogamente in compressione):

- $\sigma = \varepsilon \cdot E$  per deformazioni comprese tra 0 e  $f_{pyd}/E$ ;
- $\sigma = f_{pyd}$  per deformazioni comprese tra  $f_{pyd}/E$  e  $\varepsilon_{uk}$ ;

essendo  $\sigma$  la resistenza,  $\varepsilon$  la deformazione ed  $E$  il modulo elastico. La deformazione di calcolo, in CAP3, è limitata ad  $\varepsilon_{uk}$ .

2) **Bilineare con tratto finale inclinato:** si adotta il diagramma bilineare, così definito in trazione (analogamente in compressione):

- $\sigma = \varepsilon \cdot E$  per deformazioni comprese tra 0 e  $f_{pyd}/E$ ;
- $\sigma = f_{pyd} + (f_{ptd} - f_{pyd}) \cdot (\varepsilon - f_{pyd}/E) / (\varepsilon_{uk} - f_{pyd}/E)$  per deformazioni comprese tra  $f_{pyd}/E$  e  $\varepsilon_{ud}$ ;

essendo  $\sigma$  la resistenza,  $\varepsilon$  la deformazione,  $\varepsilon_{uk}$  la deformazione in corrispondenza alla massima resistenza  $f_{ptk}$  ed  $\varepsilon_{ud}$  la massima deformazione di calcolo.

3) **Discretizzata a tratti:** si adotta il legame  $\sigma$ - $\varepsilon$ , approssimato da una spezzata, non ammesso dalle normative, così definito in trazione (analogamente in compressione):

- $\sigma = \varepsilon \cdot E$ , per deformazioni comprese tra 0 e  $\varepsilon_1$ ;
- $\sigma = f_1 + \varepsilon \cdot (f_2 - f_1) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ , per deformazioni comprese tra  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ ;
- $\sigma = f_2 + \varepsilon \cdot (f_3 - f_2) / (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)$ , per deformazioni comprese tra  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$ ;
- $\sigma = f_3 + \varepsilon \cdot (f_4 - f_3) / (\varepsilon_4 - \varepsilon_3)$ , per deformazioni comprese tra  $\varepsilon_3$  e  $\varepsilon_4$ ;
- $\sigma = f_4 + \varepsilon \cdot (f_5 - f_4) / (\varepsilon_5 - \varepsilon_4)$ , per deformazioni comprese tra  $\varepsilon_4$  e  $\varepsilon_5$ ;

essendo

- $f_1 = f_{p(0.0)d}$ , tensione di progetto al limite lineare;
- $f_2 = f_{p(0.1)d}$ , tensione di progetto allo 0,1 % di deformazione residua;
- $f_3 = f_{p(0.2)d}$ , tensione di progetto allo 0,2 % di deformazione residua;
- $f_4 = f_{p(1.0)d}$ , tensione di progetto allo 1,0 % di deformazione residua;
- $f_5 = f_{ptd}$ , tensione di progetto di rottura;

con le deformazioni

- $\varepsilon_1 = f_1/E$ , deformazione al limite lineare;
- $\varepsilon_2 = f_2/E + 0.001$ , deformazione corrispondente a  $f_{p(0.1)d}$ ;
- $\varepsilon_3 = f_3/E + 0.002$ , deformazione corrispondente a  $f_{p(0.2)d}$ ;
- $\varepsilon_4 = f_4/E + 0.010$ , deformazione corrispondente a  $f_{p(1.0)d}$ ;
- $\varepsilon_5 = \varepsilon_{uk}$ , la deformazione corrispondente alla resistenza  $f_{ptk}$ ;

per deformazioni comprese tra 0 e  $\varepsilon_{ud}$ ;

essendo  $\sigma$  la resistenza,  $\varepsilon$  la deformazione,  $E$  il modulo elastico,  $\varepsilon_{uk}$  la deformazione in corrispondenza alla massima resistenza  $f_{ptk}$  ed  $\varepsilon_{ud}$  la massima deformazione di calcolo.

#### 4.9) Verifica a taglio

Per elementi con armatura verticale (staffe) resistente a taglio, la resistenza a taglio  $V_{Rd}$  della sezione è la minore dei due valori:

$$V_{Rsd} = A_{st} \cdot z \cdot f_{syd} \cdot \cotg\theta$$

$$V_{Rcd} = \alpha_c \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \cotg\theta (1 + \cotg^2\theta)$$

quindi:

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

dove secondo il D.M. 14GEN2008  $z$  è sostituito con  $0.9 \cdot d$ ;

essendo:

- $A_{st}$  =  $A_{sw}/s$ , è l'area trasversale delle staffe verticali disposte su un metro lineare di trave;
- $b_w$  larghezza minima della sezione;
- $z$  braccio coppia interna della sezione (per EN2004);
- $d$  altezza utile della sezione (per D.M. 14GEN2008);
- $f_{cd}$  resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo;
- $f_{syd}$  tensione di snervamento di progetto dell'armatura a taglio (staffe);
- $\theta$  inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave;
- $\alpha_c$  coefficiente che tiene conto della compressione assiale;
- $v_1 = f'_{cd}/f_{cd}$ , coefficiente che tiene conto della riduzione della resistenza del calcestruzzo fessurato.

Per le funzioni di base ed i vari coefficienti vedi Eurocodice EN 1992-1-1, edizione dicembre 2004, ed D.M. 14 gennaio 2008.

## Capitolo 5

### I FILE AUTOLOAD E FILELOAD

#### 5.1) Introduzione

I file AutoLoad e/o FileLoad contengono informazioni che possono essere “caricate” dal programma in modo automatico o a seguito dell’opportuno ordine.

I file AutoLoad di CAP3 sono:

Autoload– CAP3.STI

Autoload– CAP3.UdM

che vengono caricati automaticamente all’avvio di CAP3 e ad ogni nuovo documento, e mentre i FileLoad di CAP3 sono:

DataBase–CAP3.GEO

DataBase–CAP3.CAV

contenenti i dati relativi rispettivamente a varie geometrie di travi e cavi. Per questi tipi di FileLoad è ammesso un nome generico, si suggerisce comunque l’estensione rispettivamente: GEO e CAV.

Tutti i file AutoLoad e FileLoad possono essere modificati e/o integrati dall’utente.

I file AutoLoad devono stare nella directory ...\**CAP3** e generalmente sono modificabili solo con l’autorizzazione dell’amministratore. I file FileLoad possono stare in qualunque directory.

#### 5.2) Il file AutoLoad–CAP3.STI

I file AutoLoad–CAP3.STI contiene le informazioni relative agli stili necessari per la rappresentazione grafica. E’ modificabile dall’utente, il comandi del menù sono **Unità\Stili\Carica Stili...** e **Unità\Stili\Salva Stili...** che permettono di caricare gli stili in un documento oppure di registrare gli stili del documento corrente su file.

#### 5.3) Il file AutoLoad–CAP3.UdM

I file AutoLoad–CAP3.UdM contiene le informazioni relative alle unità di misura utilizzate dal programma. E’ modificabile dall’utente, il comandi del menù sono **Unità\Unità di Misura\Carica Unità...** e **Unità\Unità di Misura\Salva Unità...** che permettono di caricare le unità di misura in un documento oppure di registrare le unità di misura del documento corrente su file.

#### 5.4) Il file FileLoad delle grandezze

I FileLoad (esempi sono riportati in DataBase–CAP3.GEO e DataBase–CAP3.CAV, contengono le informazioni relative alle grandezze, rispettivamente, della geometria delle travi e delle armature di precompressione orizzontali.

Per caricare i dati da un FileLoad \*.GEO occorre attivare il flag **Load Dati da File** nella finestra di assegnazione della geometria della trave poi aprire il file che la contiene e selezionare il nome della grandezza interessata.

Per caricare i dati da un FileLoad \*.CAV occorre premere il pulsante **Load Dati** nella finestra di dialogo di assegnazione della geometria delle armature orizzontali di precompressione poi aprire il file che la contiene e selezionare il nome della grandezza interessata.

Il contenuto di questi file sono implementabili con il comando di menù **Inserisci\Gestione data base\...** e relativi sottocomandi.

---000---