

TRAVI IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO
AD ARMATURA PRETESA

Programma

CAP2

per persona 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. In particolare si possono fare le seguenti calcolazioni:

- il calcolo delle sollecitazioni;
- il calcolo delle tensioni normali e principali;
- il calcolo dei momenti resistenti ultimi;
- il calcolo dei momenti di fessurazione;
- il calcolo delle tensioni tangenziali e delle armature a taglio;
- il calcolo delle armature longitudinali;
- il calcolo degli spostamenti;

per i seguenti tipi di trave:

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

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

L'AUTORE DEL PROGRAMMA ATS
ing. Tiziano Gaddi

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

tel. 0341 731745

e-mail: gaddissoftware@tin.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 su 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.

SIMBOLOGIA

MODULI ELASTICI

E_c = modulo elastico calcestruzzo

E_p = modulo elastico armature di precompressione

E_s = modulo elastico acciaio per armature ordinarie

RESISTENZE CARATTERISTICHE

R_{ck} = resistenza caratteristica cubica calcestruzzo

f_{ck} = resistenza caratteristica cilindrica calcestruzzo

f_{pk} = resistenza caratteristica armature di precompressione

f_{ck} = resistenza caratteristica armature ordinarie

RESISTENZE DI CALCOLO A TRAZIONE

f_{cd} = resistenza di calcolo calcestruzzo

f_{pd} = resistenza di calcolo armature di precompressione

f_{sd} = resistenza di calcolo armature ordinarie

RESISTENZE DI CALCOLO A COMPRESSIONE

f_{cd-} = resistenza di calcolo calcestruzzo

f_{pd-} = resistenza di calcolo armature di precompressione

f_{sd-} = resistenza di calcolo armature ordinarie

f_{cc-} = resistenza di calcolo calcestruzzo ridotta (0.85 f_{cd-})

COEFFICIENTI DI SICUREZZA MATERIALI

C_{sc} = coefficiente di sicurezza calcestruzzo

C_{sp} = coefficiente di sicurezza armature di precompressione

C_{sa} = coefficiente di sicurezza armature ordinarie

RESISTENZE A TRAZIONE CALCESTRUZZO

f_{ctm} = resistenza media a trazione semplice

f_{ctm} = resistenza a trazione per flessione

GRANDEZZE CALCESTRUZZO A 28 GIORNI DI MATURAZIONE

E_{c28} = modulo elastico

R_{ck28} = resistenza caratteristica cubica

COEFFICIENTI MATERIALI

C_v = coefficiente di viscosità calcestruzzo

C_r = coefficiente di ritiro calcestruzzo (E_{cs0})

C_{ri} = coefficiente di rilassamento armature di precompressione

SOLLECITAZIONI

N = azione assiale

M = momento flettente

N_z = azione assiale in direzione z (positiva se di trazione)

M_x = momento flettente attorno all'asse y

M_y = momento flettente attorno all'asse x

T_{xs} = azione di taglio in direzione x , a sinistra (1)

T_{xd} = azione di taglio in direzione x , a destra (2)

T_{ys} = azione di taglio in direzione y , a sinistra (1)

T_{yd} = azione di taglio in direzione y , a destra (2)

(1) : a sinistra della sezione di calcolo

(2) : a destra della sezione di calcolo

DEFORMAZIONI

e = deformazione assiale

X = curvatura

e_z = deformazione assiale in direzione z

X_x = curvatura attorno all'asse y

X_y = curvatura attorno all'asse x

MOMENTI

M_q = momento prodotto dai carichi

M_{u+} = momento resistente ultimo positivo

M_{u-} = momento resistente ultimo negativo

M_f = momento di fessurazione

TENSIONI

σ_c = tensione calcestruzzo

σ_p = tensione armature di precompressione

σ_s = tensione acciaio in barre

TENSIONI CALCESTRUZZO

σ_{ym} = tensione normale fibra y_{min} sezione trave (superiore)

σ_B = tensione normale fibra baricentrica sezione trave

σ_{yM} = tensione normale fibra y_{max} sezione trave (inferiore)

σ_{BI} = tensione principale di compressione fibra baricentrica sezione trave

σ_{BII} = tensione principale di trazione fibra baricentrica sezione trave

σ_{1I} = tensione principale di compressione fibra 1 di verifica a taglio sezione trave

σ_{1II} = tensione principale di trazione fibra 1 di verifica a taglio sezione trave

σ_{2I} = tensione principale di compressione fibra 2 di verifica a taglio sezione trave

σ_{2II} = tensione principale di trazione fibra 2 di verifica a taglio sezione trave

σ_{ymG} = tensione normale fibra y_{min} sezione getto (superiore)

σ_{yMG} = tensione normale fibra y_{max} sezione getto (inferiore)

TENSIONI ARMATURE

$\sigma_s(y_{\min})$ = tensione acciaio in y_{\min} sezione getto (superiore)

$\sigma_s(y_{\max})$ = tensione acciaio in y_{\max} sezione getto (inferiore)

Capitolo 1

INTRODUZIONE ALLA VERSIONE 8.00

1.1) Premessa

Questo manuale introduce all'uso di CAP2.

1.2) Aggiornamento alla versione 7.00

Con la versione 7.00 sono state apportate le seguenti modifiche, aggiunte e miglioramenti.

- Il menu è stato completamente rivisto, adottando una filosofia diversa da quella delle versioni precedenti, si è abbandonata quasi completamente la tecnica di introduzione dati in “cascata”. Con questa nuova versione l'introduzione dati resta più libera e più indipendente, ovviamente si richiede da parte dell'utente più attenzione soprattutto nella modifica dei dati già assegnati. Ad esempio se si modifica la lunghezza della trave le estensioni dei cavi, delle armature lente e dei carichi restano aggiornate solo per quelle entità dichiarate “a tutta lunghezza”. In generale tutti i dati sono da rivisitare. Un'altra situazione da fare attenzione si ha quando si usa un documento (dati di un esempio) per impostare un altro documento, CAP2 mantiene tutti i dati del vecchio documento, compreso quelli disabilitati. E' bene in questi casi che l'utente rivisiti tutti i dati con accesso a tutti i menu dell'input (menu INSERISCI).
- Gli stili, per la visualizzazione grafica, possono essere salvati su di un file e richiamati dal file in qualunque momento durante l'elaborazione. I comandi permettono all'utente di crearsi uno o più file di stile ed applicarlo al documento in elaborazione a secondo dell'esigenza. I comandi di menu sono alle voci **Unità\Stili\Carica_stili...** e **Unità\Stili\Salva_stili....**
- Sono state aggiunte nuove opzioni per la visualizzazione grafica. In particolare è possibile visualizzare le sezioni di verifica in posizione a scalare onde evitarne la sovrapposizione.
- Sono state aggiunte nuove opzioni per la visualizzazione del testo, in modo da selezionare agevolmente le parti dei risultati da visualizzare.
- I dati ed i risultati possono visualizzarsi dentro un'unica finestra agevolando il copia/incolla su altri programmi.
- I cavi di precompressione, con la nuova versione, possono descriversi a gruppi, risparmiando tempo nell'assegnazione dei dati.
- E' stata introdotta la possibilità di una generazione “automatica” della geometria della trave sia per travi piane che per travi a doppia pendenza partendo da una geometria preassegnata, con notevole risparmio di tempo nell'introduzione dei dati. Per le travi a doppia pendenza si possono cambiare: la lunghezza, l'altezza in mezzzeria, la pendenza, la lunghezza dei ringrossi con l'immediato aggiornamento della geometria.
- E' possibile generare automaticamente le sezioni di calcolo. Il programma tiene conto della simmetria geometrica, di armatura e di carico (rispetto alla mezzzeria della trave). Tiene conto dei cambi di sezione, della posizione dei vincoli e dei carichi concentrati.
- E' stata aumentata la precisione nel calcolo del volume della trave (e peso proprio) nelle zone a forte variabilità della sezione.

- E' stata migliorata l'assegnazione dei dati per i nodi di verifica a taglio. Il calcolo delle grandezze μ , M_f , tensione di taglio ed armatura a taglio, non necessita più dell'assegnazione del consenso, grazie a controlli aggiuntivi inseriti nel codice per la calcolazione delle sezioni prive di armatura.

1.3) Aggiornamento alla versione 8.00

- Miglioramenti vari.

Capitolo 2

IL PROGRAMMA CAP2

2.1) Introduzione

Il programma CAP2 esegue il calcolo e verifica delle travi in c.a.p. ad armatura pretesa con il metodo delle tensioni ammissibili, 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).

2.2) Geometria trave

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.

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 (programma opzionale).

Quando si richiama un cassero predefinito, 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.

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 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:

$$\begin{aligned}x(i) &= x_k(i) + (z - z_k) \cdot (x_{k+1}(i) - x_k(i)) / (z_{k+1} - z_k) \\y(i) &= y_k(i) + (z - z_k) \cdot (y_{k+1}(i) - y_k(i)) / (z_{k+1} - z_k)\end{aligned}$$

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 (massimo Vedi Programma);
- limitato numero di vertici delle sezioni (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 é da considerare come un piano trapezoidale degenero;
- 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 é dispari o pari a secondo che una sezione S_k é rispettivamente sul piano di simmetria o meno.

Se non si hanno file di "casseri predefiniti", il programma abilita automaticamente la sessione di programma "Geometria generica". Conseguentemente si devono definire le sezioni S_k , assegnando le poligonali $(x_k(i), y_k(i))$. Cioé descrivere le varie sezioni atte ad individuare la geometria della trave. Questa parte, sotto descritta, é comunque agevolata da un input dati grafico.

2.3) 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, CAP2 prevede i seguenti tipi di sezione:

- sezione generica non simmetrica e simmetrica 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 ordinate;

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 moltiplicemente connesso) non é ammesso, allo scopo si deve rendere tale dominio semplicemente connesso. Si osserva che é sempre possibile ridurre un dominio moltiplicemente 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.

La scelta del "tipo di sezione" è 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 CAP2.

2.4) Fibre di verifica a taglio

Il programma prevede la verifica a taglio in tre posizioni (o fibre) della sezione. Nel baricentro (solo per flessione retta) e in due altre posizioni denominate fibra 1 e fibra 2.

La fibra baricentrica è definita da CAP2 come la fibra orizzontale passante per il baricentro geometrico della sezione corrente della trave.

Le fibre 1 e 2 si definiscono assegnando due vertici della sezione per ogni fibra. Questi due vertici sono gli estremi della fibra, o segmento. Il segmento non deve intersecare la frontiera della sezione (eccetto negli estremi del segmento). Tale assegnazione è relativa alla prima sezione di base e risulta valida per tutte le altre sezioni di base.

Non può essere usato il vertice di connessione (vedere vertice di connessione trave con getto integrativo).

2.5) Geometria sezione getto integrativo

Il getto integrativo è a sezione costante, le coordinate che ne descrivono la sezione sono riferite al sistema di assi x,y della sezione della trave, e per travi ad altezza variabile il riferimento è sulla sezione a $z=0$ (testata di sinistra), poi seguirà l'andamento della trave automaticamente.

Le grandezze geometriche relative alla descrizione della sezione del getto integrativo sono riferite al sistema di assi della trave. Per le opportune operazioni vedere il paragrafo "Geometria sezione".

2.6) Armature di precompressione

La sezione può essere armata con armature di precompressione disposte nella trave. Il massimo numero di gruppi di armature è indicato da CAP2.

Valgono i seguenti orientamenti per ogni singola armatura:

- cavi orizzontali paralleli all'asse z ;

- cavi inclinati rispetto all'asse z;
- cavi deviati composti da due segmenti non paralleli.
- cavi orizzontali a gruppi, paralleli all'asse z.

Per ogni armatura sono da assegnare, l'area del singolo "cavo", la tensione di precompressione (tiro al martinetto), nonché la posizione trasversale (x,y) di partenza (sezione testata di sinistra, $z=0$), la posizione trasversale (x,y) di arrivo (sezione testata di destra, $z=L$), e per le armature deviate la posizione di deviazione (x_d, y_d, z_d). La lunghezza di inguainamento a sinistra e a destra (o zero).

L'armatura perde l'efficienza per una lunghezza pari alla lunghezza di ancoraggio più la lunghezza di inguainamento. Per la lunghezza di ancoraggio vedere opzioni.

Se ci sono delle armature che fuoriescono dalla trave occorre opportunamente inguainarle, diversamente CAP2 fornisce una segnalazione di errore.

Per i gruppo di armature sono da assegnare il numero di "cavi" componenti il gruppo, l'area di ogni singolo "cavo", la tensione di precompressione (tiro al martinetto), nonché la posizione trasversale (x,y) di partenza (sezione testata di sinistra, $z=0$), la posizione trasversale (x,y) di arrivo (sezione testata di destra, $z=L$), e per le armature deviate la posizione di deviazione (x_d, y_d, z_d). La lunghezza di inguainamento a sinistra e a destra (o zero) valida per ogni cavo del gruppo.

L'armatura perde l'efficienza per una lunghezza pari alla lunghezza di ancoraggio più la lunghezza di inguainamento. Per la lunghezza di ancoraggio vedere opzioni.

Se ci sono delle armature che fuoriescono dalla trave occorre opportunamente inguainarle, diversamente CAP2 fornisce una segnalazione di errore.

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

2.7) Armature ordinarie

La sezione può essere armata con armature ordinarie disposte nella trave e/o nel getto collaborante. Il massimo numero di armature è indicato da CAP2.

Valgono i seguenti orientamenti per ogni singola armatura:

- armatura orizzontale, parallela all'asse z;
- armatura inclinata, rispetto all'asse z;
- armatura deviata, composta da due segmenti non paralleli.

Sono da assegnare le coordinate e l'area di ogni singola armatura, riferite al sistema di assi xyz della trave sia per le armature dichiarate appartenenti alla trave che per le armature dichiarate appartenenti al getto integrativo.

Occorre precisare, per ogni armatura, la posizione di partenza (x_1, y_1, z_1), la posizione di arrivo (x_2, y_2, z_2) e per le armature deviate la posizione di deviazione (x_D, y_D, z_D)

Ai fini del calcolo si considera nulla la lunghezza di ancoraggio.

2.8) Posizione dei vincoli

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 è assegnata tramite le distanze relative (d_1, d_2, d_3, d_4) il cui significato è chiaramente indicato in CAP2.

2.9) Carichi agenti

Sono considerati più gruppi di carico (vedere le fasi ed i tempi di calcolo), così distinti:

- carichi permanenti I gruppo, agenti sulla trave prima del getto integrativo collaborante;
- carichi permanenti II gruppo, agenti sulla trave dopo il getto integrativo collaborante;
- carichi accidentali (più condizioni di carico separate).

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 (vedere i tempi di calcolo).

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 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 z_1 di inizio e z_2 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 z_1 di inizio e z_2 di fine carico misurate a partire dall'estremo sinistro della trave;
- l'entità del carico lineare q_1 di inizio e q_2 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 z_1 e z_2 che sono assunte 0 e L rispettivamente).

Tutti i carichi imputati come paralleli all'asse x , in flessione retta sono trascurati (congelati). Fare attenzione, il passaggio dalla flessione retta alla flessione deviata può scongelare carichi agenti in direzione x , è quindi sempre opportuno rivedere la relativa sessione di assegnazione dati.

2.10) Sezioni di calcolo

Il programma CAP2 esegue i calcoli e le verifiche in prefissate sezioni da assegnare tramite la loro coordinata z , 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.

E' possibile generare automaticamente le sezioni di calcolo. Il programma tiene conto della simmetria geometrica, di armatura e di carico (rispetto alla mezzera della trave). Tiene conto dei cambi di sezione, della posizione dei vincoli e dei carichi concentrati.

2.11) Grandezze materiali

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

Per il materiale calcestruzzo, sono richiesti:

- R_{ck28} : resistenza caratteristica cubica a compressione, a 28 giorni di maturazione;
- Γ_c : coefficiente di sicurezza materiale;
- E_{c28} : modulo elastico normale, a 28 giorni di maturazione.

Per le armature di precompressione, sono richiesti:

- f_{pk} : tensione caratteristica di rottura;
- Γ_p : coefficiente di sicurezza materiale;
- E_p : modulo elastico normale.

Per le armature ordinarie, sono richiesti:

- f_{sk} : tensione caratteristica di snervamento;
 - Γ_s : coefficiente di sicurezza materiale;
- mentre il modulo elastico (E_s) è assunto pari a 2100000 kgf/cm^2 .

2.12) Parametri statici

Sono alcuni parametri che intervengono nelle calcolazioni.

Spessori fittizi h della trave e del getto. Il programma propone dei valori medi calcolati trascurando che c'è contatto trave-getto collaborante. I valori considerati nel calcolo devono essere assegnati;

- Coefficienti per il calcolo della resistenza caratteristica e del modulo elastico nel tempo per il calcestruzzo (vedi CEB bollettino n. 203);
- Coefficienti per il calcolo delle deformazioni viscosi (vedi CEB bollettino n. 203);
- Coefficienti per il calcolo delle deformazioni di ritiro (vedi CEB bollettino n. 203);
- Coefficienti per il calcolo del rilassamento delle armature di precompressione (vedi CEB bollettino n. 203) con la formula adattata come di seguito:

$$cpr(t) = cpro \cdot (t/10000)^k$$

con t espresso in giorni, mentre il valore consigliato per k risulta 0.12 o 0.19. Assegnando k=0 il rilassamento è scontato tutto all'inizio.

La caduta di tensione per rilassamento è poi modificata conformemente alla disposizione del regolamento italiano in base alla tensione di tiro iniziale.

Il coefficiente cpro è la caduta di tensione per rilassamento a tempo infinito a tensione costante a 20 °C e per un tiro iniziale di $0.75 \cdot f_{ptk}$.

2.13) Opzioni

Sono considerate le seguenti opzioni:

- Opzioni di calcolo
- Parametri di calcolo
- Coefficienti materiali
- Tempi di calcolo
- Opzioni di visualizzazione testo
- Opzioni di visualizzazione grafico

2.13.1) Opzioni di calcolo

Nelle opzioni di calcolo si hanno le seguenti scelte:

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.

b) Incremento resistenza armature di precompressione

Nel calcolo delle tensioni è possibile fissare il valore massimo della tensione nelle armature di precompressione al fine del calcolo degli effetti della precompressione stessa (si ricorda che CAP2 esegue questo controllo e la relativa ridistribuzione tensionale è fatta solo per le fasi di verifica finali con i carichi accidentali).

Tale limite può essere assunto pari a:

- $0.60 \cdot f_{ptk}$;
- $0.66 \cdot f_{ptk}$;
- $1.00 \cdot f_{ptk}$ (solo per calcoli dimostrativi).

Il modello elastoviscoso per il calcestruzzo è quello proposto dal CEB bollettino n. 203 (a cui si rimanda) a modulo elastico variabile.

Il modello di ritiro calcestruzzo per il calcestruzzo è quello proposto dal CEB bollettino n. 203 (a cui si rimanda).

Il modello di rilassamento armature di precompressione è quello proposto dal CEB bollettino n. 203 (a cui si rimanda) con formula modificato come sopra indicato.

2.13.2) Parametri di calcolo

E' possibile assegnare i seguenti coefficienti:

a) Coefficiente di amplificazione peso trave

Per le fasi transitorie di sollevamento e trasporto, é possibile tenere conto degli effetti dinamici attraverso un incremento del peso proprio della trave (nella sola direzione verticale). Il valore prefissato é 30%.

b) Coefficiente di ancoraggio armature di precompressione

Agli effetti dell'ancoraggio delle armature di precompressione il programma CAP2 assume una lunghezza pari a: $L_{anc} = c \cdot \phi_{eq}$, essendo c il coefficiente di ancoraggio da assegnare e ϕ_{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 $c=0$ la lunghezza di ancoraggio sar  assunta nulla. Il valore prefissato é $c=70$.

c) Numero sezioni per il calcolo degli spostamenti

Al fine del calcolo degli spostamenti é necessario fissare il numero di sezioni n compreso tra i valori di minimo e di massimo indicati in CAP2. Con n grande si ha un maggiore tempo di calcolo ma anche una maggiore precisione. Con n piccolo si ha un minore tempo di calcolo ma anche una minore precisione. Se n é troppo piccolo i risultati restano privi di significato.

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 é assunto per il valore della curvatura all'interno dei vari conci un andamento lineare. Il valore prefissato é $n=10$.

2.13.3) Coefficienti materiali

Umidit  relativa ambiente RH , da assegnare in percentuale.

Altri coefficienti.

2.13.4) Tempi di calcolo

Le travi precomprese hanno pi  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 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 CAP2, 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;

- applicazione carichi permanenti di II fase;
- applicazione carichi accidentali finali.

Inoltre intervengono i tempi di traslazione per la maturazione accelerata per la trave (Dt -trave) e per il getto (Dt -getto).

Tutti questi tempi hanno valori prefissati da CAP2, possono comunque essere opportunamente modificati.

2.13.6) Opzioni di visualizzazione testo

Con le opzioni di visualizzazione si possono selezionare i vari “argomenti” di visualizzazione dei risultati. Allo scopo vedere il programma CAP2.

2.13.5) 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 CAP2.

Capitolo 3

I RISULTATI DEL CALCOLO

3.1) Calcolo sollecitazioni

Sono calcolate e visualizzate le sollecitazioni nella trave in tutte le sezioni di calcolo dichiarate e per le varie fasi di "verifica". In particolare sono calcolati:

- T_{xs} , azione di taglio in direzione x, a sinistra (1);
- T_{xd} , azione di taglio in direzione x, a destra (2);
- M_x , momento flettente nel piano xz, positivo se tende le fibre a x positivo;
- T_{ys} , azione di taglio in direzione y, a sinistra (1);
- T_{yd} , azione di taglio in direzione y, a destra (2);
- M_y , momento flettente nel piano yz, positivo se tende le fibre a y positivo.

Le sollecitazioni T_{xs} , T_{xd} , M_x , sono calcolate solo nel caso di flessione deviata.

(1): a sinistra della sezione di calcolo.

(2): a destra della sezione di calcolo.

Occorre fare attenzione. In presenza di carico concentrato Q il calcolo di T_s e T_d 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 $T_s = T_d$.

3.2) Calcolo tensioni

Sono calcolate e visualizzate le tensioni nei materiali, in tutte le sezioni di calcolo dichiarate e per le varie fasi di "verifica". Le grandezze calcolate sono diverse per la flessione retta e la flessione deviata. E' ammessa l'ipotesi di sezione piana. Le tensioni tangenziali sono calcolate secondo la teoria elementare del taglio dovuta a D.J.Jourawski.

Per tutte le fasi dalla iniziale a quella a tempo infinito con i soli carichi permanenti (vedere fasi di verifica), quindi con esclusione delle fasi con i carichi accidentali, le tensioni sono quelle di calcolo.

Per le fasi con i carichi accidentali, se la tensione nelle armature di precompressione σ_p supera il limite ammissibile dichiarato (vedere opzioni incremento resistenza armature di precompressione), é allora assunto tale limite (ad esempio di valore $0.6 \cdot f_{ptk}$) con conseguente modifica delle tensioni nei materiali. Nei risultati e per le sole tensioni nelle armature di precompressione é fornito il valore di calcolo senza tenere conto della suddetta modifica.

Nella stampa delle tensioni, relativamente alle tensioni nel calcestruzzo, sono segnalate quelle che superano i limiti ammissibili, come sotto indicato:

a) Tensioni di esercizio fasi transitorie

a1) rilascio trefoli e sollevamento trave

$$\begin{aligned}\sigma_c(c) &= 0.48 \cdot R_{ckj} \text{ (compressione)} \\ \sigma_c(t) &= 0.08 \cdot R_{ckj} \text{ (trazione)} \\ \sigma_{cI} &= 0.24 \cdot R_{ckj} \text{ se } \sigma_{cII} > (2/3) \cdot 0.08 \cdot R_{ckj}\end{aligned}$$

a2) trasporto trave e messa in opera

$$\begin{aligned}\sigma_c(c) &= 0.48 \cdot R_{ckj} \text{ (compressione)} \\ \sigma_c(t) &= 0.08 \cdot R_{ckj} \text{ (trazione)} \\ \sigma_{cI} &= 0.24 \cdot R_{ckj} \text{ se } \sigma_{cII} > (2/3) \cdot 0.08 \cdot R_{ckj}\end{aligned}$$

b) Tensioni di esercizio fasi finali: trave con carichi permanenti e permanenti + accidentali

b1) Trave

$$\begin{aligned}\sigma_c(c) &= 0.38 \cdot R_{ckj} \text{ (compressione)} \\ \sigma_c(t) &= 0.06 \cdot R_{ckj} \text{ (trazione)} \\ \sigma_{cI} &= 0.24 \cdot R_{ckj} \text{ se } \sigma_{cII} > (2/3) \cdot 0.06 \cdot R_{ckj}\end{aligned}$$

b2) Getto integrativo

$$\sigma_c(c) = 60 + (R_{ckj} - 150) / 4 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (compressione)}$$

dove é assunto R_{ckj} come valore minimo tra la resistenza caratteristica $R_{ck}(t)$ funzione del tempo t e lo stesso a 28 giorni:

$$R_{ckj} = R_{ck}(t) \leq R_{ck28}$$

3.3) Tensioni per calcolo in flessione retta

In flessione retta sono calcolate e visualizzate le tensioni nei materiali come sotto riportato.

- materiale calcestruzzo

- σ_{ym} , tensione normale fibra y_{min} sezione trave (superiore);
- σ_B , tensione normale fibra baricentrica sezione trave (baricentro geometrico della trave);
- σ_{yM} , tensione normale fibra y_{max} sezione trave (inferiore);
- σ_{BI} , tensione principale di compressione fibra baricentrica sezione trave;
- σ_{BII} , tensione principale di trazione fibra baricentrica sezione trave;
- σ_{1I} , tensione principale di compressione fibra 1 di verifica a taglio sezione trave;
- σ_{1II} , tensione principale di trazione fibra 1 di verifica a taglio sezione trave;
- σ_{2I} , tensione principale di compressione fibra 2 di verifica a taglio sezione trave;
- σ_{2II} , tensione principale di trazione fibra 2 di verifica a taglio sezione trave;
- σ_{ymG} , tensione normale fibra y_{min} sezione getto (superiore);
- σ_{yMG} , tensione normale fibra y_{max} sezione getto (inferiore).

Le tensioni principali dipendono dalle tensioni tangenziali a cui si rimanda.

- armature di precompressione

Per ogni armatura di precompressione é calcolata e stampata la tensione effettivamente calcolata senza tenere conto della redistribuzione tensionale dovuta alle imposizioni regolamentari.

- armature ordinarie

Sono stampate le tensioni nelle armature disposte nella trave e nelle armature disposte nel getto integrativo.

3.4) Tensioni per calcolo in flessione deviata

Con l'opzione di flessione deviata sono calcolate e visualizzate le tensioni nei materiali come sotto riportato.

- materiale calcestruzzo e armature della trave e del getto

- $\sigma(0,0)$, tensione normale in posizione $x=0, y=0$ (origine degli assi);

- $\partial\sigma/\partial x$, variazione della tensione normale in direzione x;

- $\partial\sigma/\partial y$, variazione della tensione normale in direzione y;

- σ_{min} , tensione normale minima;

- σ_{max} , tensione normale massima.

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

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

- tensioni tangenziali nel materiale calcestruzzo

Sono calcolati e stampati, per ogni fibra di verifica a taglio:

- b , larghezza fibra di verifica;

- τ , tensione tangenziale;

- fsc, forza di scorrimento.

- armature di precompressione

Per ogni armatura di precompressione é calcolata e stampata la tensione effettivamente calcolata senza tenere conto della redistribuzione tensionale operata conseguentemente alle imposizioni regolamentari.

- armature ordinarie

Sono stampate le tensioni nelle armature disposte nella trave e nelle armature disposte nel getto integrativo.

3.5) Calcolo momenti resistenti e di fessurazione

Il calcolo dei momenti resistenti ultimi e di fessurazione è eseguito solo con l'opzione di flessione retta. Nel caso di flessione deviata si rimanda al programma AS "Analisi della sezione" dello stesso autore. Il valore assunto per la resistenza a trazione del calcestruzzo è: $f_{cm} = 1.2 \cdot 0.58 \cdot R_{ck}^{2/3}$.

Sono stampati (momenti positivi a tendere le fibre inferiori):

- M_q , momento prodotto dai carichi;
- M_{u+} , momento resistente ultimo positivo;
- M_{u-} , momento resistente ultimo negativo;
- M_u/M_q , coefficiente di sicurezza a rottura per flessione,
(rapporto: M_{u+}/M_q per $M_q > 0$, M_{u-}/M_q per $M_q < 0$),
(rapporto: M_{f+}/M_q per $M_q > 0$, M_{f-}/M_q per $M_q < 0$),
- M_f/M_q , coefficiente di sicurezza a fessurazione;

sono segnalati i valori del coefficiente di sicurezza a rottura minori di 1.50 con il carattere R e i coefficienti di sicurezza a fessurazione minori di 1.20 con il carattere F.

Accanto ai valori dei momenti resistenti (M_{u+} e M_{u-}) è stampato il carattere C se la rottura avviene per compressione del calcestruzzo o il carattere T se la rottura avviene per trazione nelle armature.

3.6) Calcolo tensioni tangenziali e armatura a taglio

Questa sessione di calcolo è eseguita solo con il calcolo in flessione retta.

Le tensioni tangenziali sono calcolate con riferimento al valore del taglio ivi agente senza tenere conto della storia di carico. Si considera il taglio di prima fase che agisce sulla sezione trave e taglio di seconda fase che agisce sulla sezione trave+getto. Si assume inoltre come condizione più gravosa quella con il valore massimo del taglio risultante (T_q) somma di quello di prima e seconda fase, di sinistra o di destra della sezione di calcolo.

Inoltre, se il valore della tensione principale di trazione (nella fibra baricentrica o in una delle fibre di verifica a taglio dichiarate) supera il limite ammissibile:

$$\sigma_c(t) = 0.02 \cdot R_{ckj} \quad \text{con} \quad R_{ckj} = R_{ck}(t) \leq R_{ck}(28)$$

viene calcolata l'armatura a taglio per la trave con la formula:

$$A_{st} = T_q \cdot \sigma_{ptB} / (\tau_B \cdot z_f \cdot \sigma_s) \quad \text{in cm}^2/\text{m}$$

essendo:

- T_q , valore massimo tra il taglio di sinistra (T_{qs}) e di destra (T_{qd});
- σ_{ptB} , la tensione principale di trazione nella fibra baricentrica, calcolata con la tensione normale o i 2/3 della tensione normale se questa è di compressione;
- τ_B , la tensione tangenziale nella fibra baricentrica;
- z_f , braccio della coppia interna della sezione fessurata, relativa alla sezione reagente al tempo di verifica, contando tutte le armature come ordinarie;
- σ_s , la tensione ammissibile dell'acciaio per cemento armato.

Ovviamente z_f assume il valore z_{f+} per momenti positivi ed assume il valore z_{f-} per momenti negativi. Bisogna fare attenzione nelle sezioni in cui l'armatura (c.a. o c.a.p.) è posta tutta ad un estremo della sezione ed il momento tende le fibre dell'altro estremo. In questo caso il braccio della coppia interna della sezione fessurata è molto piccolo (rispetto all'altezza della sezione) e di

conseguenza vengono fornite delle armature A_{st} grandi. Per ovviare a questo inconveniente descrivere correttamente le armature presenti.

Il valore dell'area staffe fornita dal programma é il massimo valore fra il precedente (se calcolato) e il valore:

$$A_{st} = 0.15 \cdot b_{min} \text{ in cm}^2/\text{m}$$

essendo b_{min} il valore minimo tra la larghezza nella fibra baricentrica e la larghezza nelle altre fibre di verifica a taglio considerate.

3.7) Calcolo armatura longitudinale

Indipendentemente dalle armature longitudinali dichiarate, il programma fornisce le aree delle armature longitudinali minime che sarebbero da disporre nella trave e nel getto integrativo, a norma di regolamento. Il calcolo delle armature longitudinali é eseguito solo con l'opzione di flessione retta.

Se il valore della trazione al lembo della trave, per la generica fase di verifica, supera i limiti indicati:

$$\sigma_c(t) = 0.04 \cdot R_{ckj} \text{ per le fasi transitorie}$$

$$\sigma_c(t) = 0.03 \cdot R_{ckj} \text{ per le fasi finali}$$

(con $R_{ckj} = R_{ck}(t) \leq R_{ck}(28)$); viene calcolata l'armatura sussidiaria per la trave, tale da assorbire le trazioni nel calcestruzzo al tasso convenzionale delle armature metalliche di:

$$\sigma_s = 2200 \text{ kgf/cm}^2 \text{ per le fasi transitorie}$$

$$\sigma_s = 1800 \text{ kgf/cm}^2 \text{ per le fasi finali.}$$

L'armatura superiore é calcolata in modo da assorbire le trazione nella semisezione superiore. L'armatura inferiore é calcolata in modo da assorbire le trazione nella semisezione inferiore.

Analogamente é calcolata l'armatura superiore ed inferiore nel getto collaborante.

Nei risultati queste armature sono indicate con a_s (armatura minima per c.a.p.), per distinguerla dall'armatura A_s dichiarata nei dati e considerata nei calcoli.

3.8) Calcolo spostamenti

Gli spostamenti della trave sono calcolati con riferimento alla posizione indeformata e relativamente ai vincoli della trave in opera. 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).

3.9) Grandezze statiche sezioni

Sono calcolate e stampate le grandezze statiche.

3.10) Simbologia

E' stampata la simbologia.

Capitolo 4

CRITERI DI CALCOLO

4.1) Le fasi di verifica

Le travi precomprese 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 calcolo (verifica) corrispondenti agli eventi significativi della trave; a tali eventi sono associati dei valori temporali.

Queste fasi, prefissate da CAP2, sono

le fasi transitorie:

- rilascio trefoli;
- sollevamento trave;
- trasporto trave;
- messa in opera trave;

e le fasi finali:

- trave coi soli carichi permanenti;
- trave con carichi permanenti ed accidentali.

I vincoli cambiano nelle fasi transitorie, mentre non si modificano più dopo la messa in opera. I carichi agenti nelle prime tre fasi 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 delle tensioni

Le tensioni nei materiali sono calcolate considerando i materiali elastici lineari (compressione e trazione), assumendo come area della sezione quella corrispondente al conglomerato teso e compresso e alle aree metalliche tese e compresse, 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.

4.2.1) Modello elastoviscoso per il calcestruzzo

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

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

ed essendo

- $\phi(t, t_0)$, coefficiente di creep;
- E_{c28} , modulo elastico a 28 giorni di maturazione;
- $E_c(t)$, modulo elastico variabile nel tempo;
- $\sigma_c(t)$, tensione nel calcestruzzo;
- $\varepsilon_c(t)$, deformazione elastoviscosa;
- t_0 , tempo di applicazione della tensione $\sigma_c(t_0)$;
- t , tempo di misura ($t \geq t_0$);

vale inoltre il principio di sovrapposizione degli effetti.

Il coefficiente di creep è dato dalla formula (CEB-FIP Model Code paragrafo 2.1.6.4.3)

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t-t_0) = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t-t_0) = \phi_v \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t-t_0)$$

avendo posto

$$\phi_v = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm})$$

che in CAP2 è denominato "coefficiente viscoso" 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.

4.2.2) Modello di ritiro per il calcestruzzo

Per il calcolo delle deformazioni di ritiro, si assume la seguente funzione:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \cdot \beta_s(t - t_s)$$

essendo

$\beta_s(t - t_s)$, la funzione che descrive lo sviluppo del ritiro nel tempo;

ε_{cso} , è il coefficiente di ritiro;

t_s , tempo di inizio dello svilupparsi del ritiro;

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

4.2.2) Rilassamento nelle armature di precompressione

La di caduta di tensione per rilassamento a tempo infinito, e per una tensione iniziale $\sigma_{pi} = 0.75 \cdot f_{ptk}$ è assunta pari a c_{pro} , essendo c_{pro} il coefficiente di rilassamento.

Al variare della tensione iniziale, la caduta di tensione per rilassamento è presa con legge parabolica; il relativo diagramma, tracciato in funzione di σ_{pi} ha ordinata nulla e tangente orizzontale in $\sigma_{pi} = 0.5 \cdot f_{ptk}$, si indica tale funzione con $f(\sigma_{pi})$.

Indicato con $c_{pr}(t) = c_{pro} \cdot cr(t)$ la di caduta di tensione per rilassamento nel tempo per una tensione iniziale $\sigma_{pi} = 0.75 \cdot f_{ptk}$; per una tensione iniziale σ_{pi} generica la tensione nel tempo risulta:

$$\sigma_p(t) = \sigma_{pi} - \sigma_{pi} \cdot f(\sigma_{pi}) \cdot c_{pr}(t).$$

Nello spirito del concetto di perdita per rilassamento (a deformazione totale costante), essendo la deformazione totale pari a σ_{pi}/E_p , la deformazione elastica nel tempo pari a $\sigma_p(t)/E_p$, ne consegue che la deformazione anelastica (differenza tra quella totale e quella elastica) risulta pari a $\sigma_{pi} \cdot f(\sigma_{pi}) \cdot c_{pr}(t)/E_p$. In CAP2 si assume come deformazione anelastica (approssimata) dovuta al rilassamento delle armature di precompressione la deformazione $f(\sigma_{pi}) \cdot (\sigma_{pi}/E_p) \cdot c_{pr}(t)$.

Tale espressione, essendo $c_{pr}(t)$ funzione di rilassamento, è sufficientemente corretta quanto più l'andamento $\sigma_p(t)$ reale approssima quello di rilassamento. Comunque nei due casi la variazione tensionale è contenuta.

4.3) Ipotesi di calcolo per il calcolo a rottura

Il calcolo dei momenti resistenti ultimi è fatto sommando allo stato di deformazione finale (di calcolo) per i soli carichi permanenti (coazione), uno stato di deformazione aggiuntivo di flessione retta (ε_z, χ_y), cioè deformazione assiale e curvatura nel piano 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 in compressione pari a -0.0035 nel caso di flessione con asse neutro reale, e variabile dal valore predetto a -0.0020 quando l'asse neutro esterno alla sezione tende all'infinito;
- deformazione massima dell'acciaio di +0.010 in trazione;
- deformazione massima dell'armatura di precompressione di +0.010 in trazione, contata a partire dalla decompressione del calcestruzzo.

4.3.1) Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni del calcestruzzo

Si adotta, in compressione, il diagramma parabola rettangolo, 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 -0.0020 , l'estremità del segmento ha ascissa -0.0035 . L'ordinata massima del diagramma è pari $f'_{cc} = 0.85 \cdot f'_{cd}$.

In trazione si assume resistenza nulla.

4.3.2) Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni dell'acciaio ordinario

Si adotta il diagramma elastoplastico, così definito:

- $\sigma = f'_{sd}$ per deformazioni comprese tra -0.010 e $-f_{sd}/E_s$;
 - $\sigma = \varepsilon \cdot E_s$ per deformazioni comprese tra $-f_{sd}/E_s$ e f_{sd}/E_s ;
 - $\sigma = f_{sd}$ per deformazioni comprese tra f_{sd}/E_s e $+0.010$;
- essendo σ la resistenza ed ε la deformazione.

4.3.3) Diagrammi di calcolo sforzi-deformazioni dell'acciaio di precompressione

Si adotta il legame σ - ε , approssimato, nel tratto non lineare, da una curva esponenziale con asintoto f_{pd} ; legame così definito:

- $\sigma = f'_{pd} \cdot (1 - \exp(-\alpha' \cdot \varepsilon))$ per deformazioni minori di ε'_p ;
- $\sigma = \varepsilon \cdot E_p$ per deform. comprese tra ε'_p ed ε_p ;
- $\sigma = f_{pd} \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot \varepsilon))$ per deformazioni maggiori di ε_p ;

essendo:

- σ , la tensione;
- ε , la deformazione dell'asse del cavo;
- $\varepsilon_p = 0.805 f_{pd}/E_p$;
- $\varepsilon'_p = 0.805 f'_{pd}/E_p$;
- $\alpha' = -\log(1-0.805)/\varepsilon'_p = 1.63476/\varepsilon'_p$;
- $\alpha = -\log(1-0.805)/\varepsilon_p = 1.63476/\varepsilon_p$.

4.4) Verifica a fessurazione

Il calcolo dei momenti di fessurazione, è fatto sommando allo stato di deformazione finale (di calcolo) per i soli carichi permanenti (coazione), uno stato di deformazione aggiuntivo di flessione retta (ε, χ), cioè deformazione assiale e curvatura nel piano di flessione, tale da raggiungere il valore della resistenza a trazione per flessione nel calcestruzzo. Considerando la sezione omogeneizzata interamente reagente ed il calcestruzzo resistente a trazione.

Nel programma sono calcolati i momenti di fessurazione positivi (M_f+) e negativi (M_f-); viene fornito nei risultati il coefficiente convenzionale di sicurezza alla fessurazione M_f/M_q ottenuto dal rapporto tra il momento di fessurazione (avente lo stesso segno di M_q) e il momento prodotto dai carichi (M_q).

APPENDICE

STILI IN USO IN CAP2

In CAP2 sono usati i seguenti stili:

	Col	Lin	Tes	Quo	Tra	Pun
Sezioni						
Assi	21	1	1			
Sezioni trave	22	2		1		
Sezioni getto integrativo	23	3		1		
Armatura ordinaria trave	24					1
Armatura ordinaria getto	25					2
Cavi di precompressione	26					3
Fibre verifica a taglio	27	4				
Vista laterale						
Assi	21	1	1			
Trave	22	5		2		
Getto integrativo	23	6		2		
Armatura ordinaria trave	24	7				
Armatura ordinaria getto	25	8				
Cavi di precompressione	26	9				
Ganci	28	10				
Vincoli al trasporto	29	11				
Vincoli in opera	(30)	(12)				

Col=Colori; Lin=Linee; Tes=Testi
Quo=Quote; Tra=Tratteggi; Pun=Punti

---000---