



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 751

DATA: 30/10/2013

A P P U N T I

STUDENTE: Piccione

MATERIA: Progetto Strutture Calcestruzzo Armato

Prof. Taliano

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

I CONCETTI DI BASE DELLA PRECOMPRESSIONE

Precompressione:

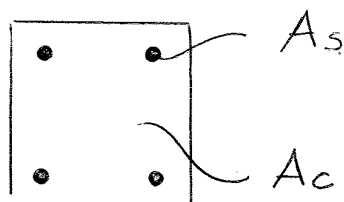
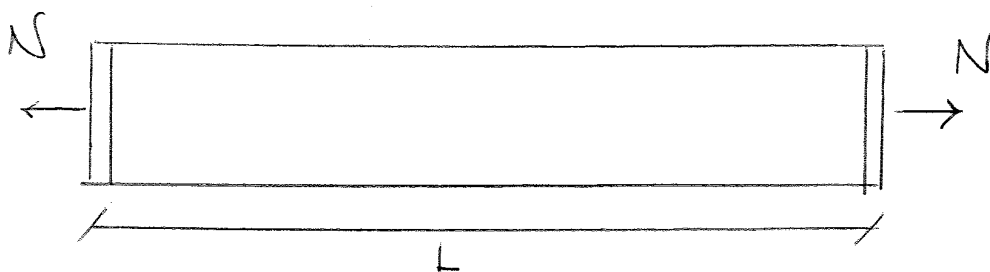
- ridurre o evitare la fessurazione in esercizio, che porta alla parzializzazione della sezione
- limitare le deformazioni
- sfruttare gli acciai ad alta resistenza meccanica

Occorre dunque usare:

- acciai ad alta resistenza
- calcestruzzo di buona qualità

• TIRANTE IN C.A.

Prisma di cls con armatura ordinaria sottoposto a trazione crescente fino a rottura



comportamento elastico

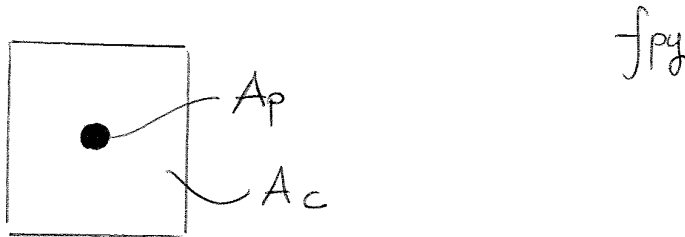
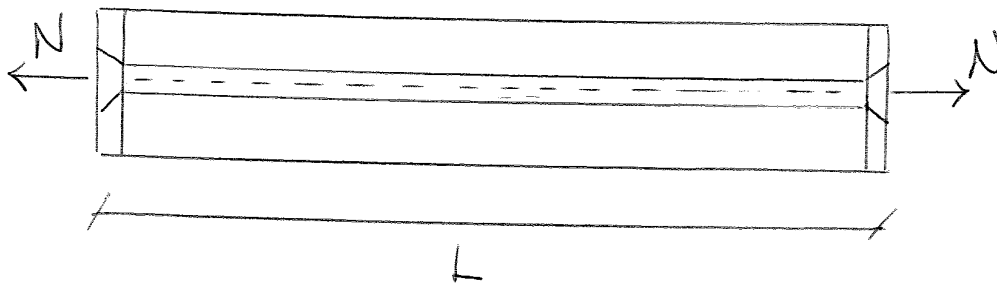
E_c	E_s
f_{ct}	f_y
f_c	

1

mentre in campo fessurato vale:

$$\Delta k = \frac{Nk}{E_s A_s} - \underbrace{\Delta L_c}_{\substack{\text{riduzione per} \\ \text{"tension stiffening"} \\ \text{(cls fra le fessure)}}$$

• TIRANTE IN C.A.P.



Quando $N = \phi$ lo stato di coa=
zione è caratterizzato da una tensione
nel cls:

$$\sigma_{cp} = \frac{-\sigma_{py} \cdot A_p}{A_c}$$

con σ_{py} tensione di trazione nel
cavo.

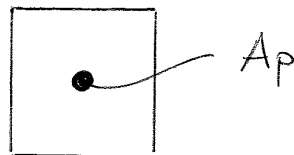
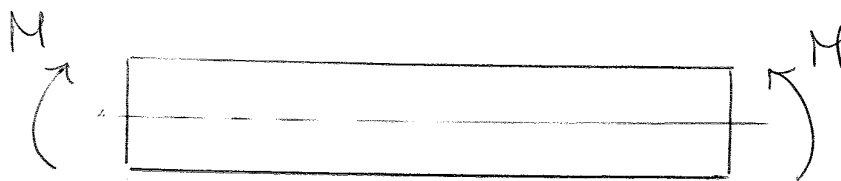
ed è uno sforzo maggiore di quello ottenuto per il prisma in c.a.

$$\sigma_p = \frac{N}{A_p}$$

$$\Delta l = \frac{\sigma_p - \sigma_{p\phi}}{E_s} \cdot L - \Delta l_c$$

→ le deformazioni di elementi in c.a.p. in esercizio sono minori.

COMPORTAMENTO DI UN ELEMENTO INFLESSO



Il cavo è baricentrico: lo sforzo di precompressione è centrato e dà luogo ad uno stato tensionale uni-

forme $\sigma_{c\phi} = -\frac{P}{A}$ che si somma

al quello "a farfalla" dato dal momento flettente

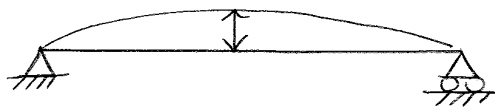
M_f flessione si ottiene uguagliando σ_c e f_{ct}

$$\sigma_c = -\frac{P}{A} - \frac{P \cdot e}{J} \cdot y_{inf} + \frac{M_f}{J} y_{inf} = f_{ct}$$

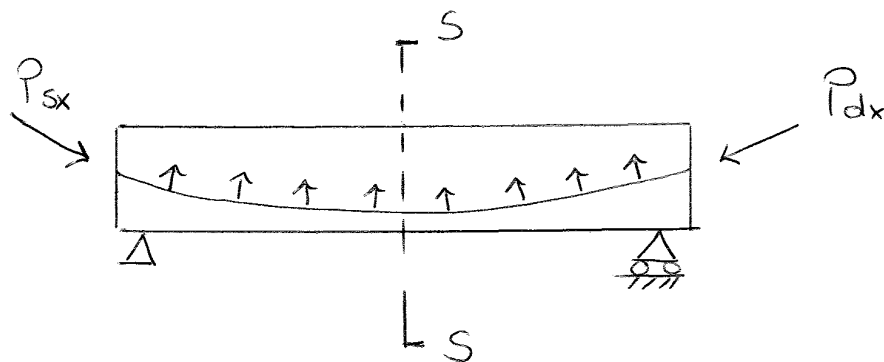
$$\rightarrow M_f = \dots$$

La flessione in esercizio è minore, poiché:

- la sezione non è parzializzata $\rightarrow J$? MAI? maggiore
- è presente una controflessione dovuta alla precompressione



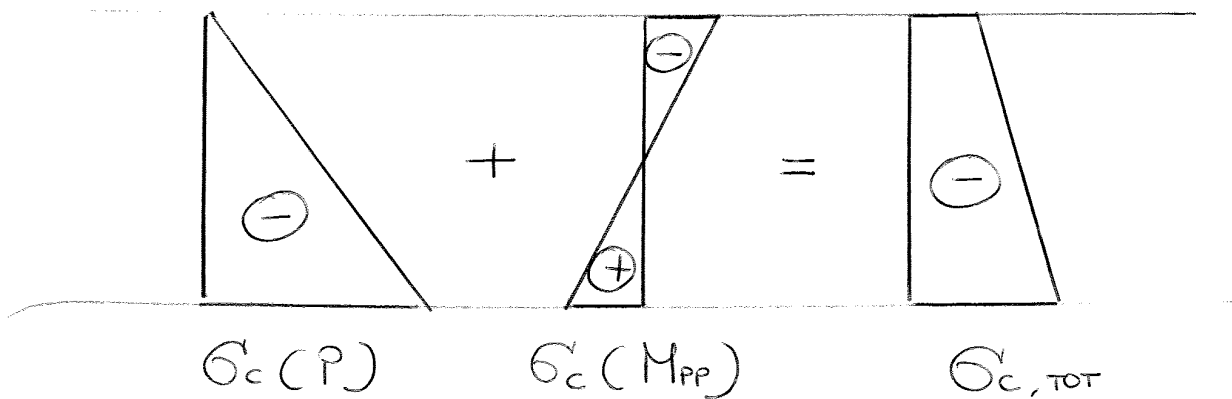
EFFETTI DELLA PRECOMPRESSIONE (STRUTTURE ISOSTATICHE)



MOMENTO UTILE AGGIUNTO

Al momento della precompressione si ha una curvatura \rightarrow innalzamento della trave che si stacca dai casseri.

Il peso proprio P.P. produce una tensione aggiuntiva che si somma a quella data dalla precompressione.

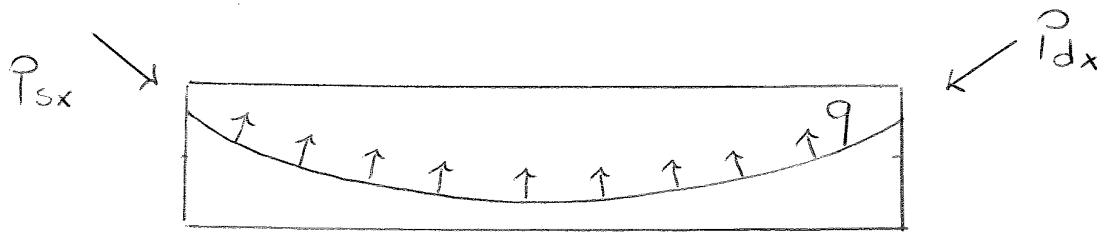


Si abbassa il punto di passaggio del cavo di una quantità M_{pp}/P per eliminare la tensione di compressione all'estremo superiore ed avere un diagramma triangolare, in modo che la risultante di P ed M passi per l'estremo inferiore del nocciolo.

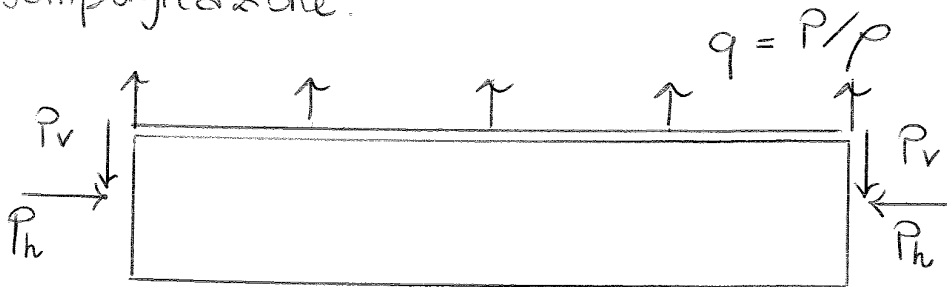
2) Carichi equivalenti = forze che il cavo trasmette al c/s

$$q = \frac{P}{p}$$

Tale metodo si applica bene ai cavi post-tesi



Semplificazione:



$$q = \frac{8Pf}{L^2} \quad \text{per cavo con tracciato parabolico}$$

con f = freccia del cavo rispetto alla retta che congiunge i due punti estremi dello stesso

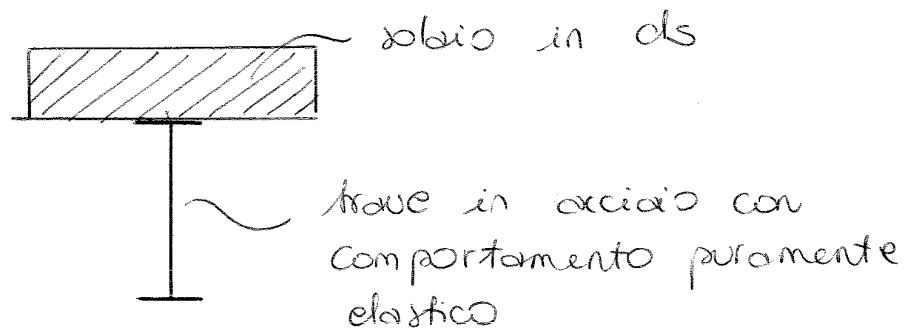
$$\downarrow V_A = \frac{16Pe}{L^2} \cdot \frac{L}{2} - P_v \quad V_A = V_B$$

$$\downarrow V_B = \frac{16Pe}{L^2} \cdot \frac{L}{2} - P_v$$

$$\curvearrowright M(s-s) = + P \cdot e - \frac{16Pe}{L^2} \cdot \frac{L^2}{8} = -Pe$$

$$\left. \begin{array}{l} N = -P \\ M = -Pe \end{array} \right\} \text{sollecitazioni in mezzano}$$

3) Tiene conto delle deformazioni impresse



Deformazione di ritiro (accorciamento) $\bar{\epsilon}$ = deformazione impressa, impedita poiché il soffitto è rigidamente collegato alla trave in acciaio e le sue sezioni devono mantenersi piane.

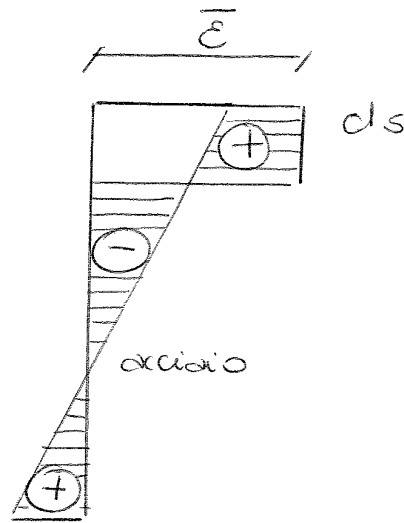
$$\epsilon_{TOT} = \lambda + \mu y \quad \text{deformazione piano}$$

$$\epsilon_{TOT} = \epsilon_{el} + \bar{\epsilon}$$

↳ deformazione impressa nella soletta di cls

$$(2) \rightarrow \mu = \frac{1}{E_c J_{om}} \int E_c \bar{\epsilon} y dA$$

Si può individuare la retta di deformazione



Il metodo si può applicare anche in caso di precompressione



σ_{pz}
cavi pre-tesi

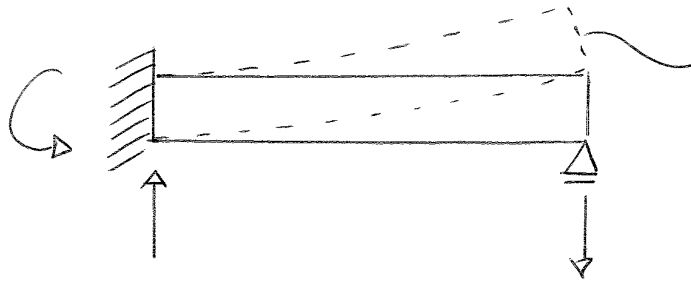
Dopo il taglio i cavi tendono ad accorciarsi provocando una deformazione impressa per tornare allo stato indeformato

$$\bar{\epsilon} = - \frac{\sigma_{pz}}{E_p}$$

$$\lambda = \frac{1}{A_{om}} \int \left(\frac{E_p}{E_c} \bar{\epsilon} \right) dA$$

$$\mu = \frac{1}{J_{om}} \int \frac{E_p}{E_c} \bar{\epsilon} y dA$$

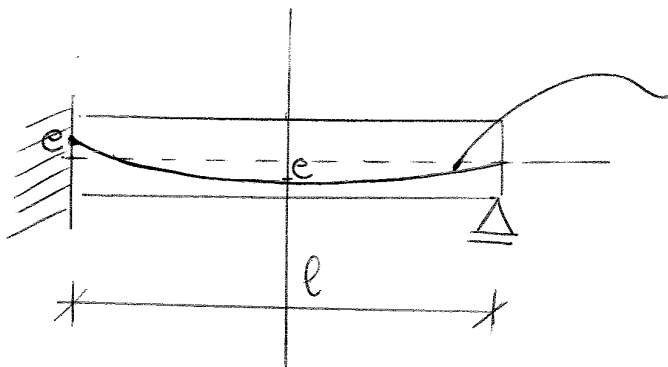
STRUTTURE IPERSTATICHE



deformazione dovuta al cavo - impedita dal vincolo → nasce una reazione vincolare

In ogni sezione si hanno sollecitazioni $M, N, T \neq \emptyset$ anche in assenza di forze esterne (\neq ISOSTATICA)

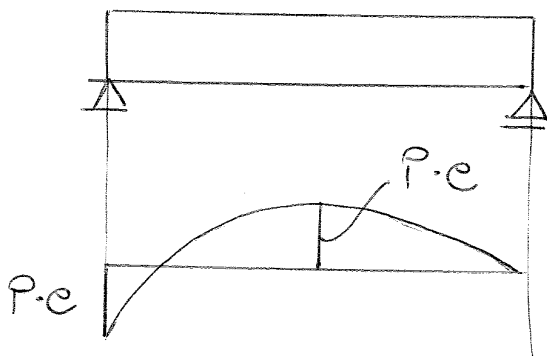
Si può utilizzare un calcolo elastico



cavo che produce M che si oppone a quello che si avrebbe senza cavo:



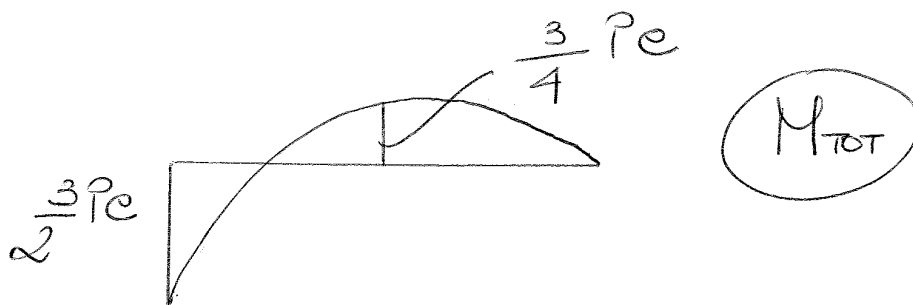
Isostatica associata:



MOMENTO ISOSTATICO DI PRECOMPRESSIONE dovuto al cavo

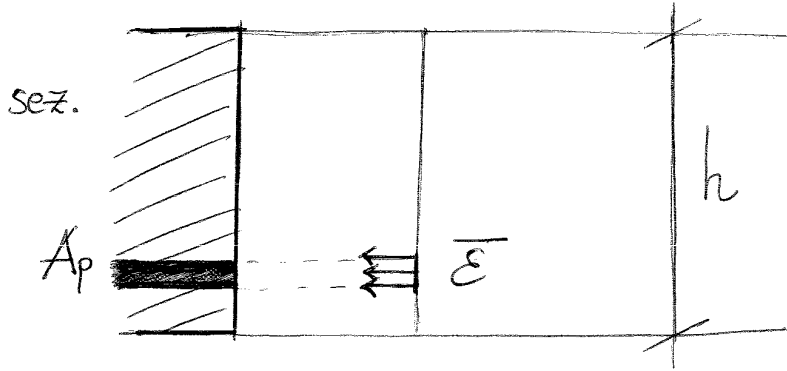
X momento d'incastro = incognita iperstatica

$$M_{TOT} = M_0 + M_1 \cdot X$$

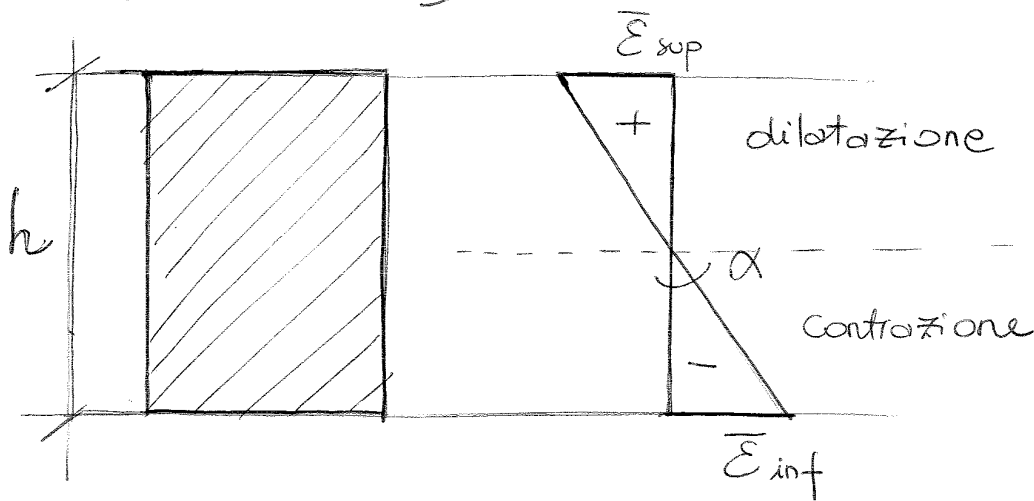


20

Consideriamo una struttura a cavi pretesi:
 sull' acciaio nascono $\bar{\epsilon}$, deformazioni impresse
 non congruenti (puntuali, non lineari su
 h sezione)

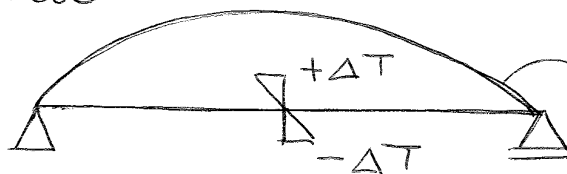


Se $\bar{\epsilon}$ è congruente, dunque, nascono sulla
 struttura delle deformazioni (no nascita di
 def. elastiche)

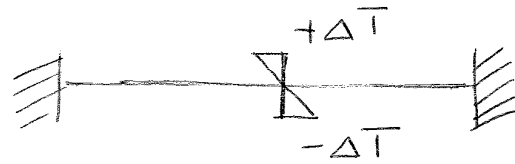


curvatura della sezione $\frac{1}{r} = \frac{\epsilon_{inf} - \epsilon_{sup}}{h} = \text{tga}$

def. trave

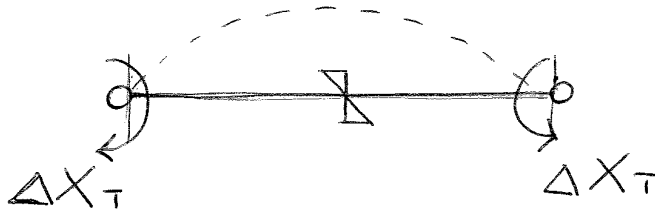


curvatura verso l'alto (negativa)



non compatibile

struttura principale:



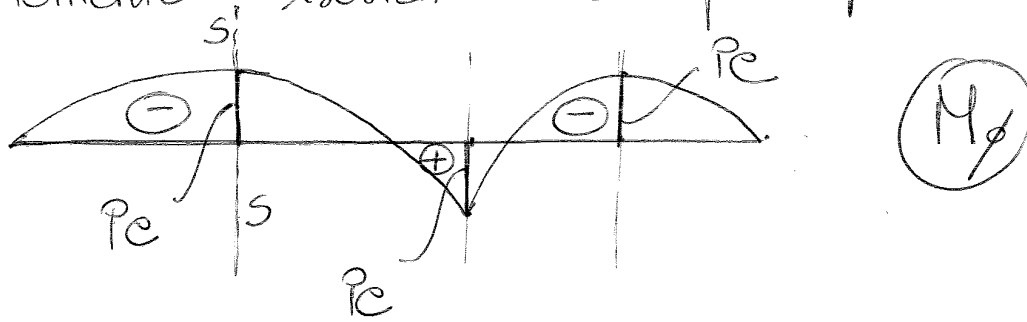
Alle estremità nella realtà ci sono incastri (non è consentita la rotazione) → nascita di reazioni vincolari iperstatiche ΔX_T che consentono la compatibilità → nascita di momenti e tagli aggiuntivi $\Delta M_T, \Delta V_T$

Ciò vale anche per le $\bar{\epsilon}$ date dalla precompressione.

Ricapitolando: ($\Delta S =$ sollecitazioni aggiuntive)

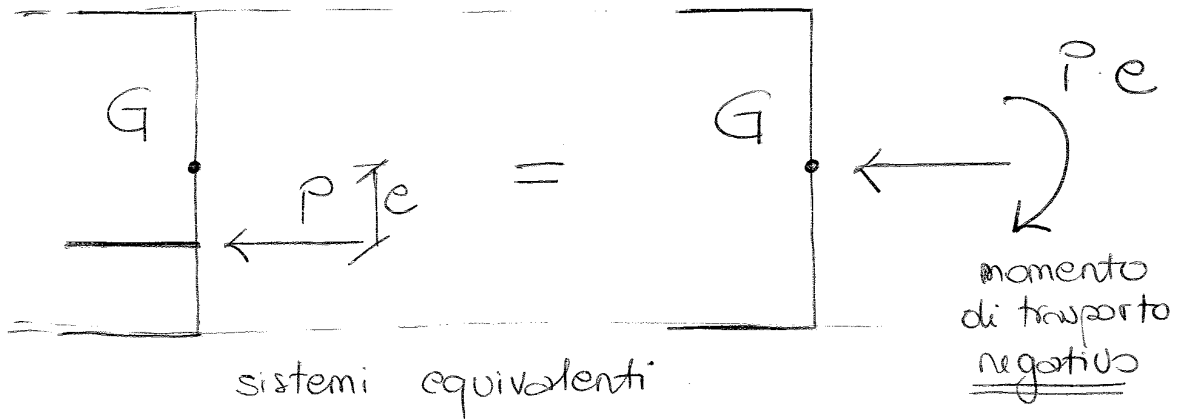
- $\bar{\epsilon}$
- congruenti e compatibili → $\bar{\sigma}_d = \phi, \Delta R = \phi, \Delta S = \phi, \delta \neq \phi$
 - non congruenti e compatibili → $\bar{\sigma}_d \neq \phi, \delta \neq \phi, \Delta R = \phi, \Delta S = \phi$
($\bar{\sigma}_d$ è $\neq \phi$ punto per punto, ma la loro risultante è nulla → stato tens. autoequil.)
 - congruenti e non compatibili → $\Delta R \neq \phi, \Delta S \neq \phi$ → stato tens. $\bar{\sigma}_d$ indotto però solo dalle reazioni iper
 - non congruenti e non compatibili → $\bar{\sigma}_d \neq \phi, \Delta S \neq \phi$ → effetti separati, poi si sommano

Momento isostatico di precompressione:

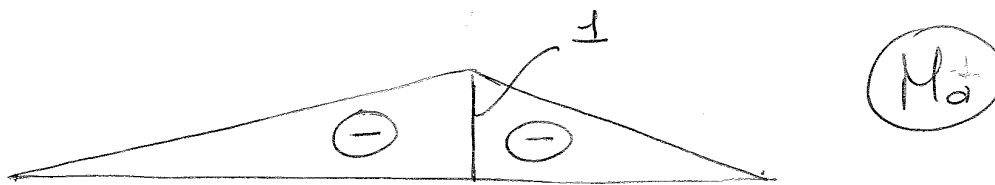


(N.B.) I segni dei momenti nelle varie sez. si determinano facilmente:

sez. S-S



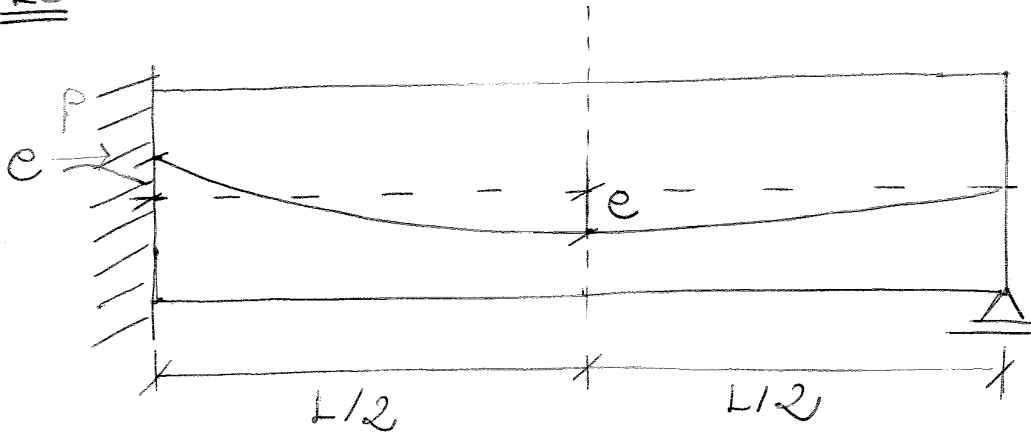
Si osserva che M_0 è opposto al momento flettente che si avrebbe per effetto dei carichi esterni.



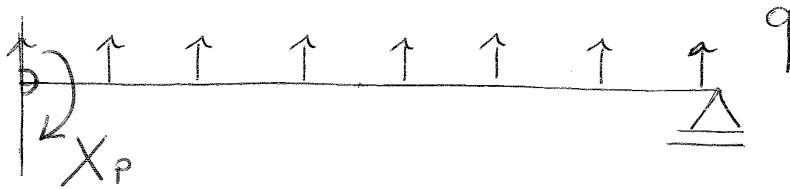
$$\rightarrow X_p = - \frac{\int M_0 \cdot M_a dz}{\int M_a^2 dz}$$

$$\int M_0 M_a dz = \frac{3}{2} L \cdot \frac{1}{6} L \left[4 \cdot \frac{Pe}{2} \cdot \frac{1}{2} + Pe(-1) \right] + \frac{L}{6} \cdot \left[Pe(-1) + 4(-Pe) \left(-\frac{1}{2}\right) \right] = \frac{5}{12} Pe L$$

ES.



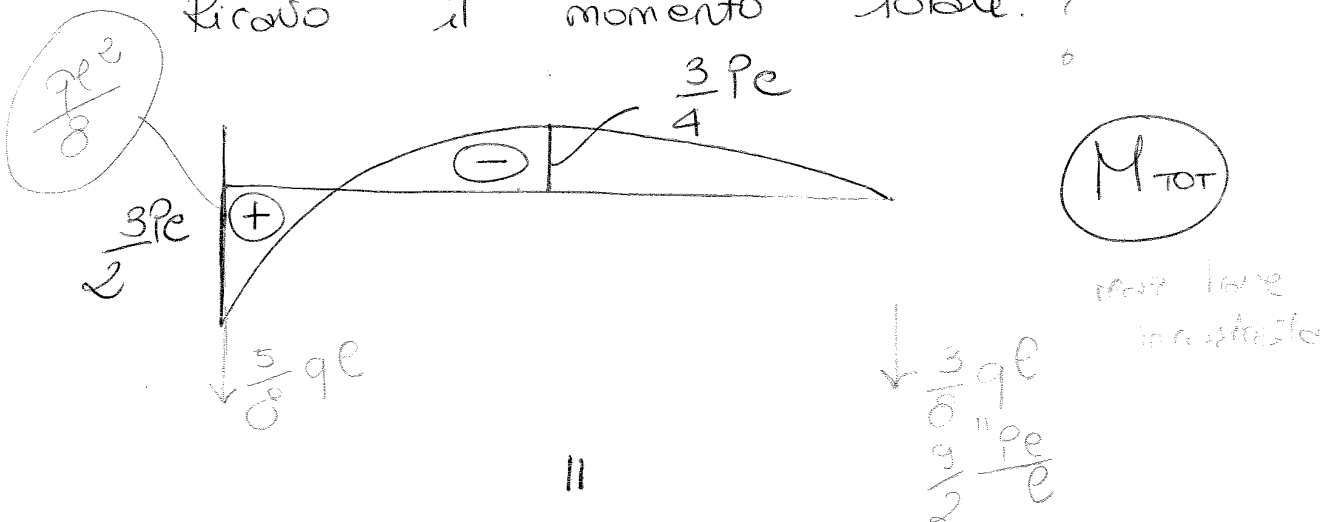
Metodo dei carichi equivalenti



$$q = \frac{8Pf}{L^2} \quad f = \frac{3}{2}e$$

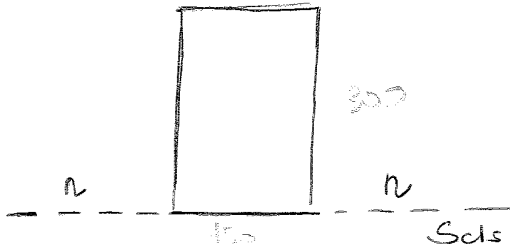
$$\rightarrow q = \frac{12Pe}{L^2}$$

Ricavo il momento totale: ?



Le forze vanno riportate nel baricentro della sezione omogeneizzata

1. Proprietà geometriche sez. om.

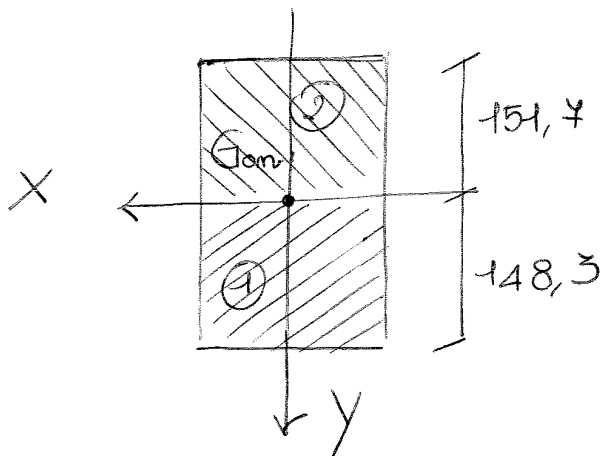


$$S_{om, n-n} = 150 \cdot \frac{300^2}{2} + (\alpha_e - 1) [S_{s, up} + S_{s, inf}] =$$

$$= 6.905.250 \text{ mm}^3$$

$$A_{om} = (150 \cdot 300) + (\alpha_e - 1) (225 + 90) = 46.575 \text{ mm}^2$$

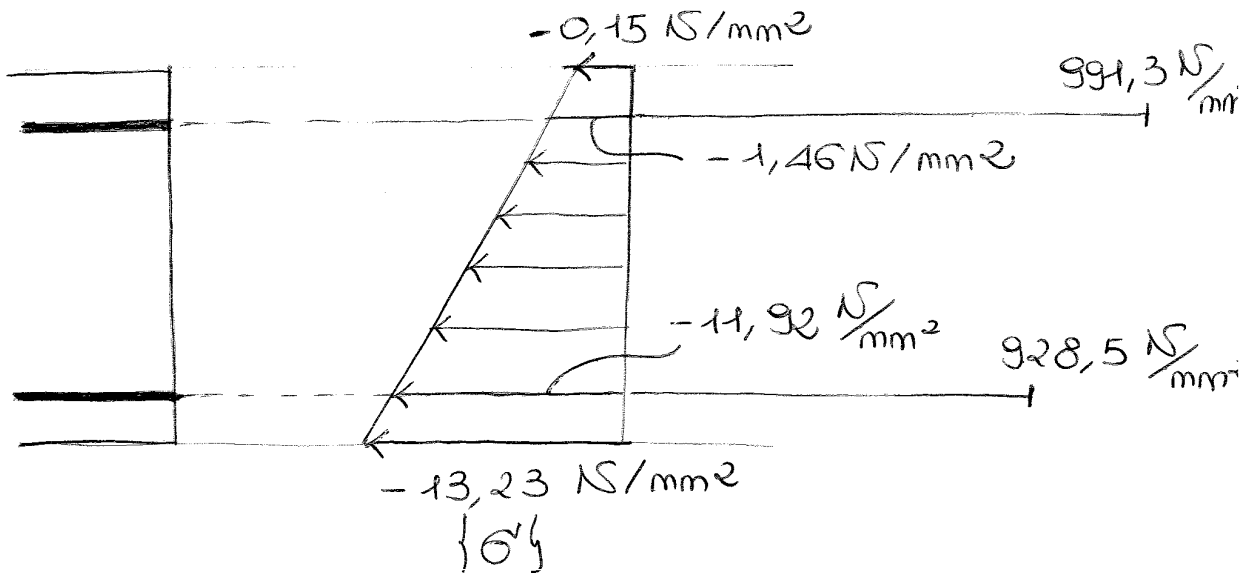
$$g_{G, om} = \frac{S_{om}}{A_{om}} = 148,3 \text{ mm}$$



$$I_{om, x} = \frac{150 \cdot (148,3)^3}{3} + \frac{150 \cdot (151,7)^3}{3} +$$

$$+ (\alpha_e - 1) \cdot [225 \cdot (148,3 - 30)^2 + 90 \cdot (121,7)^2] =$$

$$= 360,04 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$



Lo stato tensionale è autoequilibrato se la sezione è inserita in una struttura ipostatica

$$\left. \begin{aligned} \sum N_i &= \phi \\ \sum M_i &= \phi \end{aligned} \right\} \text{risultanti}$$

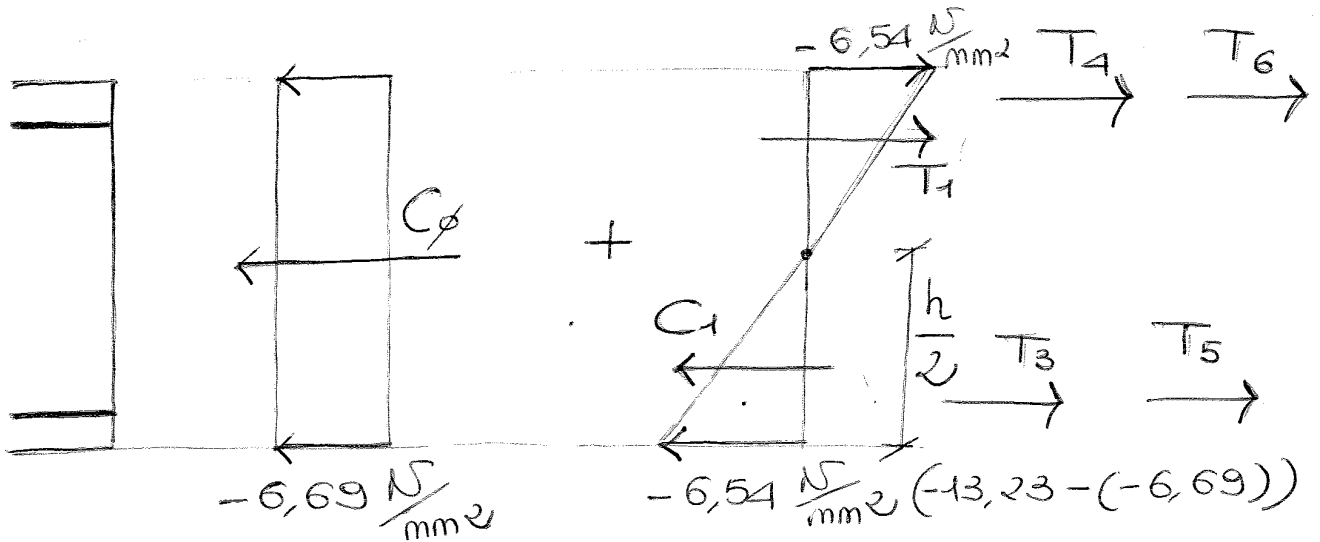
• Metodo stati di coazione

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_{p, sup} &= \sigma_{p\phi} / E_p \\ \bar{\epsilon}_{p, inf} &= \sigma_{p\phi} / E_p \end{aligned} \right\} \text{distribuzione costante}$$

$$\epsilon_{TOT} = \epsilon_{el} + \bar{\epsilon} = \bar{\lambda} + \bar{\mu}_x y$$

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\lambda} &= \frac{\int_A \bar{\epsilon} \cdot \bar{\epsilon} dA}{E_c \cdot A_{c,om}} = \frac{E_p \cdot \bar{\epsilon}_p \cdot \sum_i A_{p,i}}{E_c \cdot A_{c,om}} \\ \bar{\mu} &= \frac{\int_A \bar{\epsilon} \cdot y dA}{E_c \cdot I_{x,com}} = \frac{E_p \cdot \bar{\epsilon}_p \cdot \sum_i \overbrace{A_i y_{p,i}}^{\text{mom. statici}}}{E_c \cdot I_{x,com}} \end{aligned} \right.$$

1. Geometria della sezione



$$\sigma_{c, \text{medio}} = (\sigma_{\text{inf}} + \sigma_{\text{sup}}) / 2$$

$$C_\phi = |6,69| \cdot 150 \cdot 300 = 304'050 \text{ N}$$

$$C_1 = T_1 = \frac{|6,54| \cdot 150 \cdot (h/2)}{2} \cdot 150 = 73'575 \text{ N}$$

$$T_3 = 11,92 \cdot 225 = 2'682 \text{ N}$$

$$T_4 = 1,46 \cdot 90 = 131 \text{ N}$$

$$T_5 = 928,5 \cdot 225 = 208'913 \text{ N}$$

$$T_6 = 991,3 \cdot 90 = 89'217 \text{ N}$$

quote da togliere alla risultante di compressione poiché parte di A_c è ora = parte del cavo

Bisogna considerare anche la dipendenza dal tempo della resistenza ω compressione:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad \text{crescente}$$

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - k \cdot s_{qm}$$

assunto = 8 N/mm^2 in assenza di risultati sperimentali

All' aumentare del carico nel tempo (carichi di lunga durata) decresce la resistenza ω causa della microfessurazione, ma bisogna anche considerare la maturazione del cls nel tempo con relativo incremento della resistenza \rightarrow i 2 effetti si compensano

$$\left. \begin{array}{l} \text{EUROCODICE) } \alpha_{cc} = 1 \\ \text{NT) } \alpha_{cc} = 0,85 \end{array} \right\} \text{coefficiente per carichi di lunga durata}$$

Ⓟ coefficiente di Poisson = $0,20$ per cls fessurato e $\nu = \emptyset$ per cls fessurato.

VERIFICHE SW: si adotta una legge parabola rettangolo con ramo plastico via via più piccolo man mano che cresce la classe di resistenza

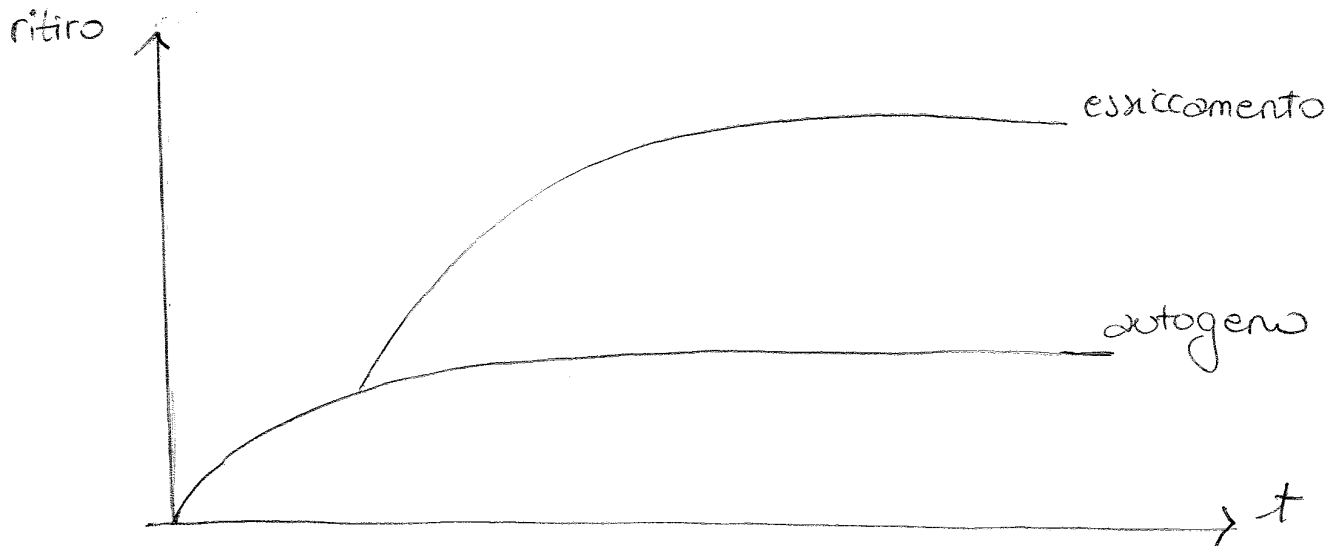
RITIRO E VISCOSITÀ

Comportamento del cls in funzione del tempo

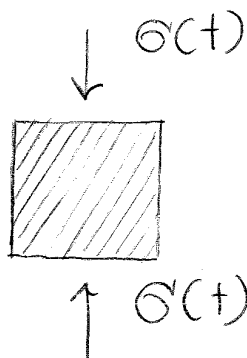
→ REOLOGIA

RITIRO = deformazione legata a variazione di volume dovuta a:

- idratazione dei grani di cemento (nei primi giorni) → ritiro autogeno
- evaporazione H₂O d'impasto (da ~ 30 giorni di vita della struttura) → ritiro d'essicca-mento



FWAGE



$\sigma'(t) = \text{cost. nel tempo } (\neq \text{uniforme})$

Il coefficiente di flange è dato in base alla def. elastica a 28 giorni.

$$\underbrace{\varepsilon(t, t_0)}_{\text{def. totale all'istante } t} = \underbrace{\frac{\sigma_c}{E_c(t_0)}}_{\text{def. elastica}} + \varphi(t, t_0) \cdot \varepsilon_{el, 28}$$

$$\text{con } \varepsilon_{el, 28} = \frac{\sigma_c}{E_{c, 28}}$$

$$\rightarrow \boxed{\varepsilon(t, t_0) = J(t, t_0) \cdot \sigma_c}$$

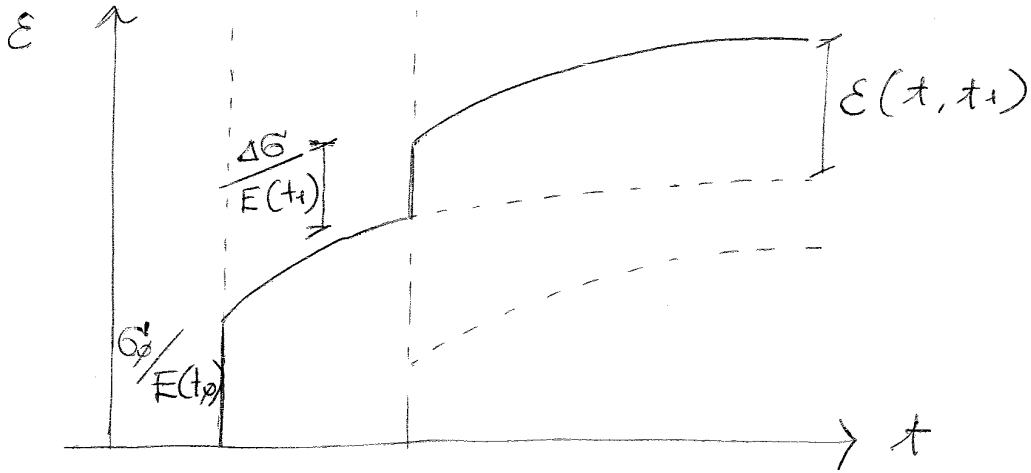
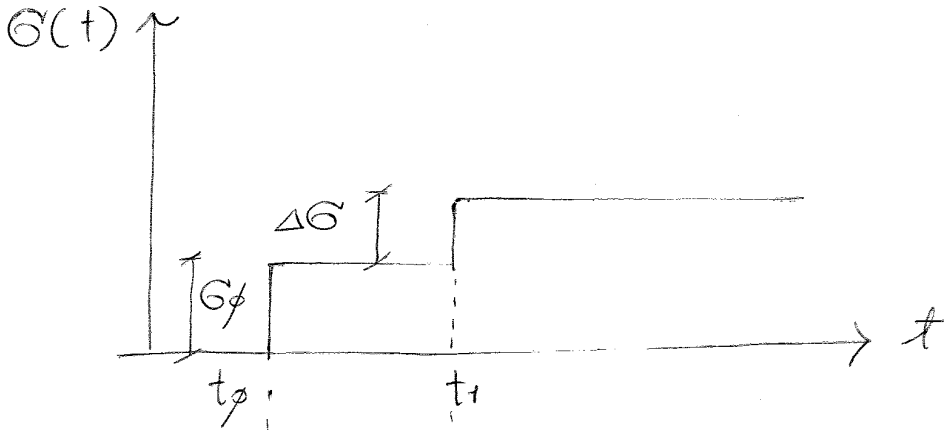
$$\underbrace{J(t, t_0)}_{\text{funzione di flange}} = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c, 28}}$$

Ci sono due modi per esprimere la viscosità: tramite def. di flange ($\varphi(t, t_0)$) o tramite def. totale somma di comportamento elastico e comportamento viscoso ($J(t, t_0)$)

Le deformazioni di ritiro e flange sono deformazioni impresse, entrambe negative poiché producono accorciamenti.

livelli di studio delle deformazioni impresse:

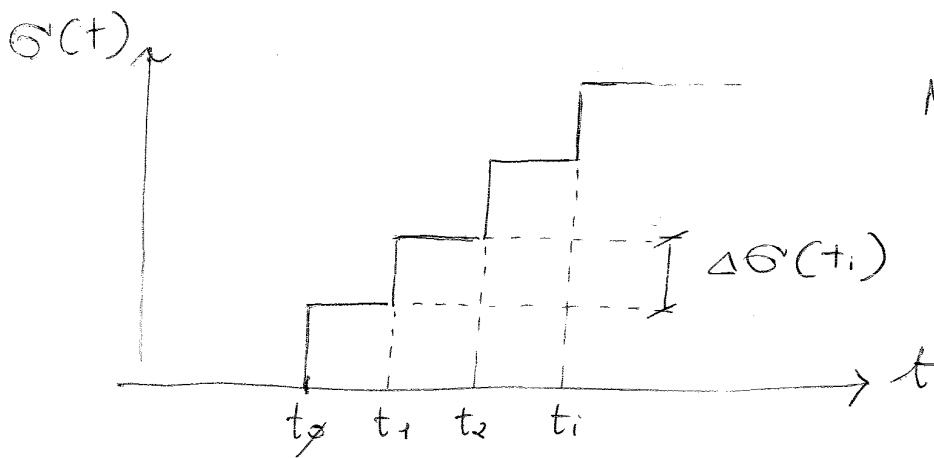
- materiale
- sezione
- contesto strutturale (iso, iper)



$$\epsilon(t, t_\phi/t_1) = J(t, t_\phi) G_\phi + J(t, t_1) \cdot \Delta G$$

Cio' vale anche per le diminuzioni di tensione

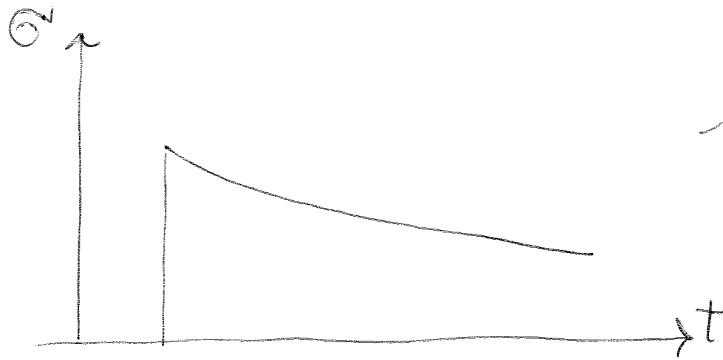
Applicando:



N incrementi di carico

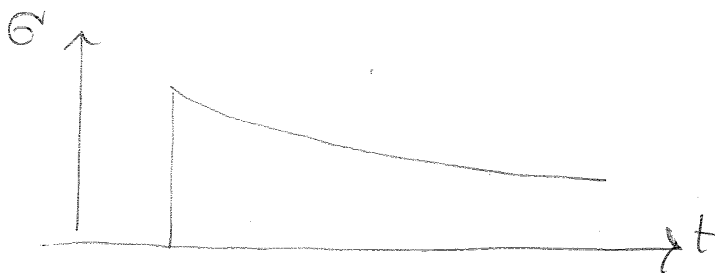
$$\epsilon(t, t_\phi) = \underbrace{J(t, t_\phi) \cdot G_\phi}_{\text{primo incremento di carico}} + \sum_1^N J(t, t_i) \Delta \sigma(t_i)$$

42

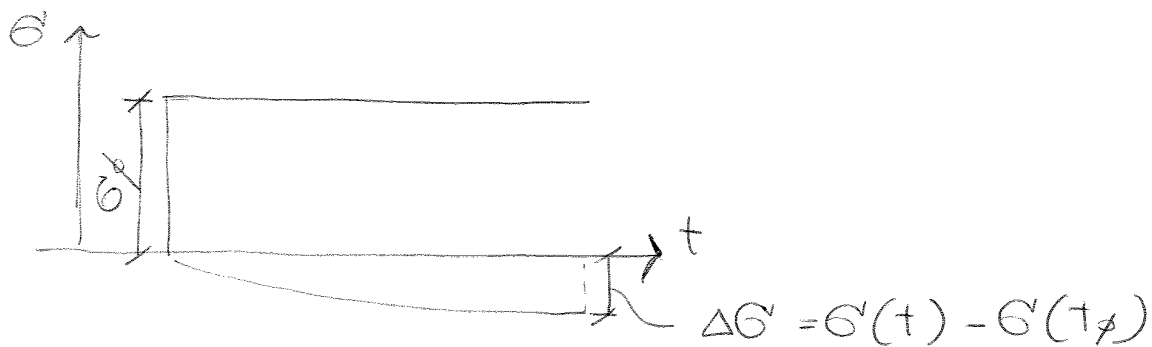


la tensione nel cls
diminuisce

In tali casi si usa il metodo dell'Age
Adjusted Effective Modulus: si ammette che
 $\Delta\sigma$ produce deformazione elastica + flange,
ma che il secondo sia corretto da un opportu-
no coefficiente di invecchiamento = 0,8



↳ è visto come:



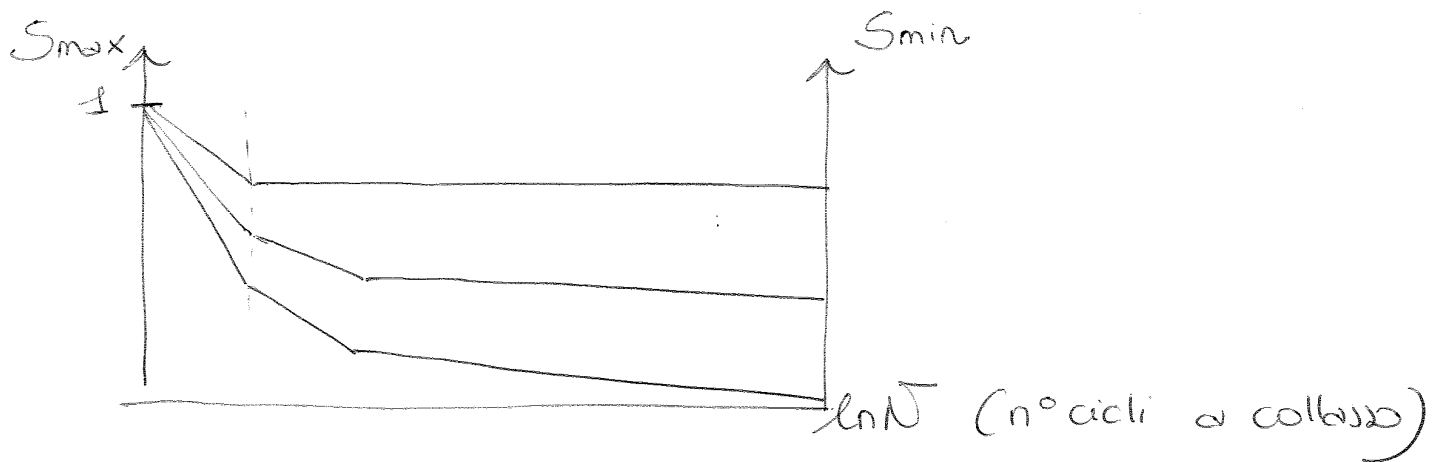
Si prende solo l'80% della funzione di
flange per tener conto che $\Delta\sigma$ non è
costante nel tempo, ma parte da ϕ
e cresce

perciò le tensioni sul cls devono diminuire → RIDISTRIBUZIONE TENSIONI

Dunque Ce,eff permette di tener conto della ridistribuzione delle tensioni dal cls all'armatura compressa.

FATICA

Azioni di tipo ciclico (sinusoidale) → resistenza a compressione minore rispetto a quella che si ha per carichi statici → S_W indotto non dalle azioni max ma da quelle agenti in esercizio che però possono portare a collasso di tipo fragile

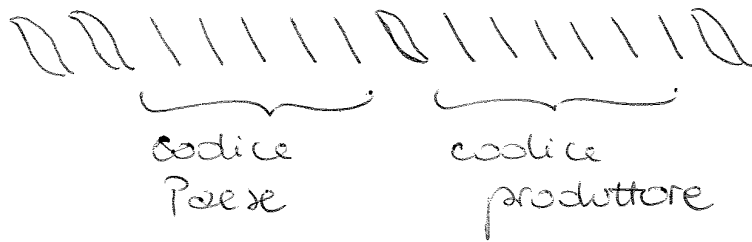


$$S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{f_{cr, fat}}$$

Valore max di tensione di compressione normalizzato al valore max di resistenza a fatica

$$S_{min} = \frac{\sigma_{min}}{f_{cr, fat}}$$

Marcatura barre: ingrossamento nervature trasversali che indicano il Paese e lo stabilimento produttore



Tralicci e reti: bisogna controllare anche tramite una prova di distacco al nodo che i nodi siano rigidi

↳ resistenza al distacco $\geq 30\%$ resistenza a trazione del materiale

Barre e rotoli: controlli di accettazione in cantiere \rightarrow su ogni lotto il DL deve ricavare 3 sezioni di lunghezza ≈ 1 m e consegnarle in laboratorio per controllare f_y , A_{gt} , rottura / snervamento, piegamento / raddrizzamento

VERIFICHE SLD

$$E_{sd} = 90\% E_{ik} \quad (\text{bilatero})$$

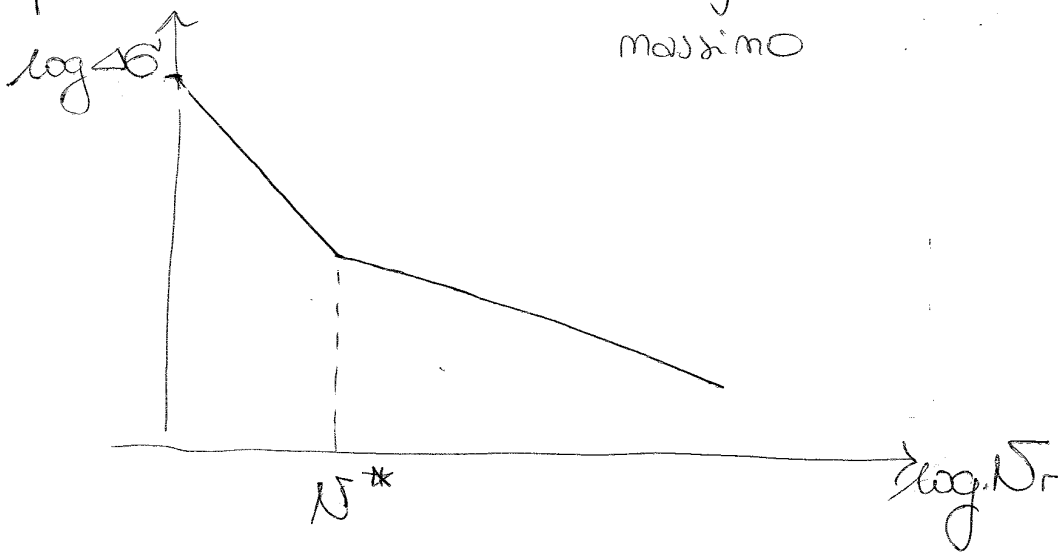
$$R = (f_t / f_y)_k$$

VERIFICHE SLE

Si assume un diagramma elastico lineare

FATICA

Azioni di tipo ciclico (sinusoidale) → resistenza a rottura: minore di quella che si avrebbe per carichi statici → innesco in corrispondenza di intagli, difetti, corrosioni o zone di nervature (rapida variazione delle geometrie). Il materiale deve resistere ad un numero di $2 \cdot 10^6$ cicli per tensioni oscillanti fra valori minimo e massimo



Resistenza a fatica di barre nervate < barre lisce; la resistenza diminuisce al crescere del diametro delle barre.

Regola di Miner → valutazione danno cumulato di cicli di sollecitazioni variabili

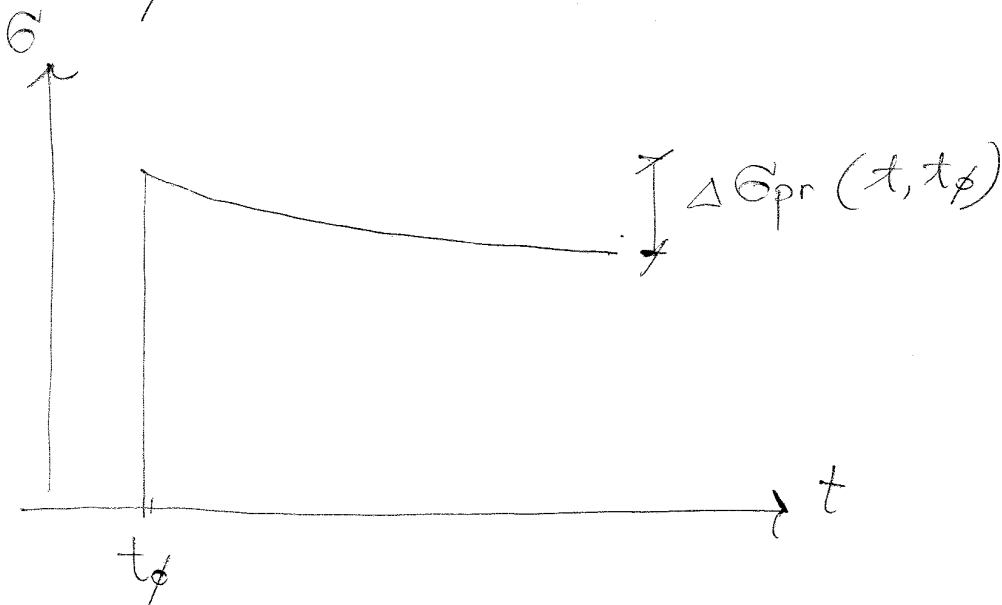
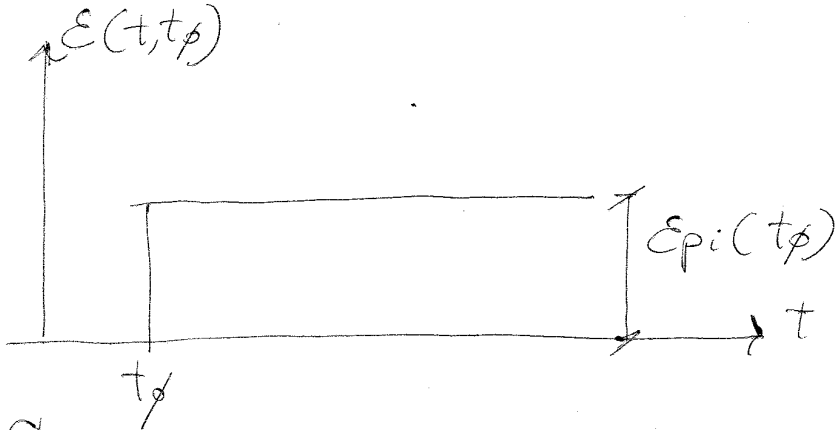
$$D_i = \frac{n_{s_i}}{N_{R_i}} \rightarrow D_{TOT} = \sum D_i = 1$$

con: $n_{s_i} = n^{\circ}$ cicli della sollecitazione S_i
 $N_{R_i} = n^{\circ}$ cicli a rottura dato da S_i

RILASSAMENTO

Proprietà meccaniche funzione del tempo t .

Deformazione costante \rightarrow si valuta la perdita di tensione.



$$\sigma'(t_\phi) = F_p(t_\phi) \cdot \epsilon_{pi}(t_\phi)$$

(FC2) \rightarrow 3 classi di rilassamento

P_{1000} = perdita di tensione per rilassamento a 1000 ore

Perdita per rilassamento f-ne di:

- valore della tensione iniziale
- temperatura

RESISTENZA A CORROSIONE

Prove normative che valutano la resistenza a trazione del materiale posto in soluzione corrosiva → deve essere almeno l'80% della resistenza a trazione classica

CONTRASSEGNI

EN 10138 - 2/3/4 Y resistenza a trazione C/S/H diametro / n° fili

2 → fili

3 → trefoli

4 → barre

C → trafilato a freddo

S → strand

H → hot rolled bar

SA

Si ha dunque che:

$$P_{m\phi}(x) = P_{max}(x) - \Delta P_i(x)$$

$$P_{m,t}(x) = P_{m\phi}(x) - \Delta P_{c+s+r}(x)$$

$P_{max} \rightarrow$ solo sull'armatura

$P_{m\phi}, P_{m,t} \rightarrow$ anche sulla sezione di cls

Limitazioni delle tensioni nel cavo:

- Si è già detto che

$$\sigma_{p,max} = \min(0,8 f_{pk}; 0,9 f_{p(0,1)k})$$

ma è ammessa una sovratensione fino a

$0,95 \cdot f_{p(0,1)k}$ purché la forza sia misurata con manometri con un'accuratezza del $\pm 5\%$

- Una volta rilasciati (pre-tesi) o bloccati (post-tesi) i cavi, occorre verificare che:

$$\sigma_{p\phi}(x) \leq \min(0,75 f_{pk}; 0,85 f_{p(0,1)k})$$

- Per limitare la fessurazione nella combinazione di carico rara occorre che:

$$\sigma_{p,m,t}(x) \leq 0,75 f_{pk}$$

In tal caso:

$$\Delta \varepsilon = \frac{5}{100 \cdot 10^3} = 0,05 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$$

$$\Delta \sigma_{p,sl} = 0,05 \cdot 200'000 = 10 \text{ N/mm}^2$$

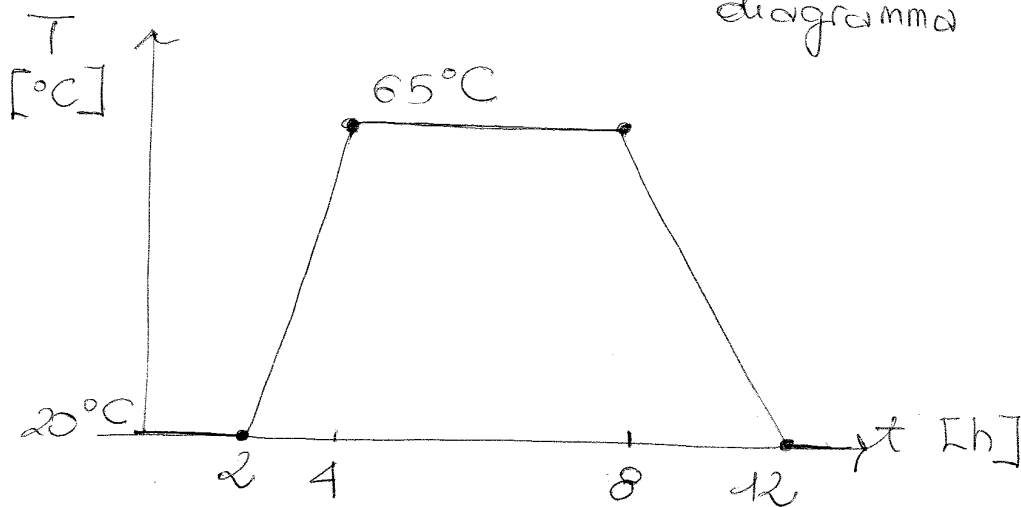
3. Rilassamento dell'acciaio $\rightarrow \Delta P_r$

Effetto della temperatura (maturazione a vapore)

Si definisce un tempo equivalente in aggiunta al tempo compreso fra la saturazione e la distensione:

$$t_{eq} = \frac{1,14 (T_{max} - 20)}{T_{max} - 20} \underbrace{\sum_{i=1}^n (T(\Delta t_i) - 20) \cdot \Delta t_i}_{\int_{t_1}^{t_2} (T - 20) \cdot dt}$$

↓
area sottesa al
diagramma



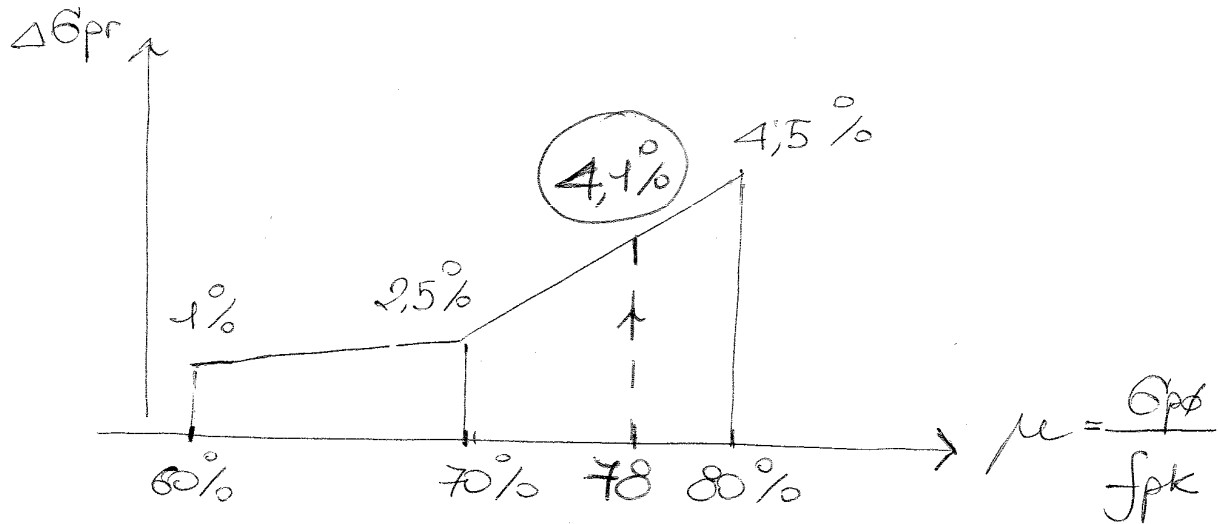
$$t = (t_f - t_p) + t_{eq}$$

Ci si riferisce così a 20°C avendo appunto =
namente dilatato i tempi

• Rilassamento dell'acciaio

$$t_{eq} = \frac{1,14 \cdot (65-20)}{65-20} \cdot \frac{14 \cdot 45}{2} = 2545,8 \text{ h}$$

area trapezio



$$f_t = f_{1000} \cdot \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)}$$

$$f_t = 4,1\% \cdot \left(\frac{2545,8}{1000} \right)^{0,75(1-0,78)} = 4,78\%$$

$$\Delta \sigma_{pr} = f_t \cdot \sigma_{ps} = 4,78\% \cdot 1442 = 68,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ps} = 1373,1 \text{ MPa}$$

• Deformazione elastica

Metodo delle forze concentrate

Proprietà geometriche della sezione omogeneizzata:

$$A_{om} = 30 \cdot 120 \text{ mm}^2$$

$$S_x = 29 \cdot 000 \cdot 125 + (186 \cdot 40) \cdot 5 + (38 \cdot 210) \cdot 5 = 3 \cdot 402 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

60

$$\sigma_{c,inf} = -19,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp,sup} = -3,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp,inf} = -16,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p,sup} = \sigma_{p\phi} + \alpha \cdot \sigma_{cp,sup} = 1349,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p,inf} = \sigma_{p\phi} + \alpha \cdot \sigma_{cp,inf} = 1275,8 \text{ MPa}$$

Perdite elastiche:

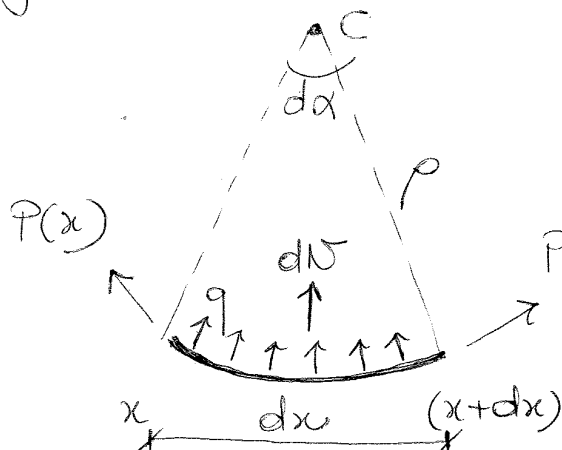
$$\Delta P_{i,sup} = \alpha \Delta \sigma_{p,sup} \cdot 38 \cdot 10^{-3} = -0,89 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{i,inf} = \alpha \Delta \sigma_{p,inf} \cdot 186 \cdot 10^{-3} = -18,4 \text{ kN}$$

● CAVI POST-TESI

1. Perdite per attrito nella fase di tessitura dei cavi $\Delta P_f(x)$. R_a : tessitura causa spostamenti mutui fra cavo e guaina sull'intero tracciato.

Prendiamo un concio infinitesimo di trave fra le asisse x e $x+dx$



p = distanza dal centro del cerchio osculatore C = raggio di curvatura

Tenendo conto dell'attrito cavo-guaina, le tensioni sono direttamente proporzionali alla forza trasversale alla superficie su cui agisce l'attrito a meno di un fattore di proporzionalità μ (coefficiente di attrito)

$$dP(x) = -\mu dN = -\mu P da = -\mu \frac{P ds}{\rho}$$

sostituisco la variabile

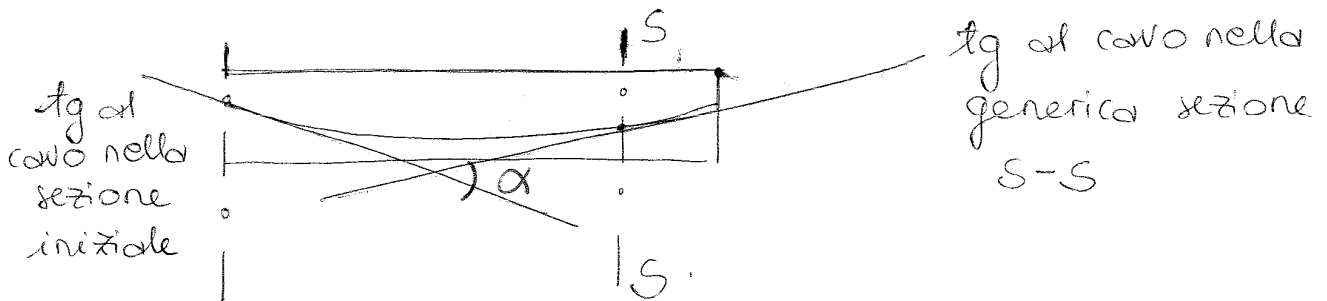
$$\frac{dP(\alpha)}{P} = -\mu d\alpha$$

eq- differenziale

\hookrightarrow cost. lungo lo sviluppo del cavo

$$\int_{P_{max}}^{P(\alpha)} \frac{dP(\alpha)}{P} = -\mu \int_0^\alpha d\alpha$$

$\phi \rightarrow$ sez. in cui si mette in trazione il cavo
 \hookrightarrow fra il martinetto nella sezione di tesatura ($\alpha = \phi$)



$$\ln \frac{P}{P_{max}} = -\mu \frac{\alpha}{\phi}$$

$$\ln \frac{P}{P_{max}} = -\mu \alpha$$

$$\frac{P}{P_{max}} = e^{-\mu \alpha}$$

$$\rightarrow \boxed{P(x) = P_{max} \cdot e^{-\mu \alpha}}$$

GA

Equazione del tracciato del cavo:

$$y = ax^2 + bx$$

$$\begin{cases} x=L & : & r = aL^2 + bL \\ x=\frac{L}{2} & : & \frac{r+f}{2} = a\frac{L^2}{4} + b\frac{L}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} b = \frac{r}{L} - aL \\ \frac{r+f}{2} = \frac{aL^2}{4} + \left(\frac{r}{L} - aL\right) \cdot \frac{L}{2} \end{cases}$$

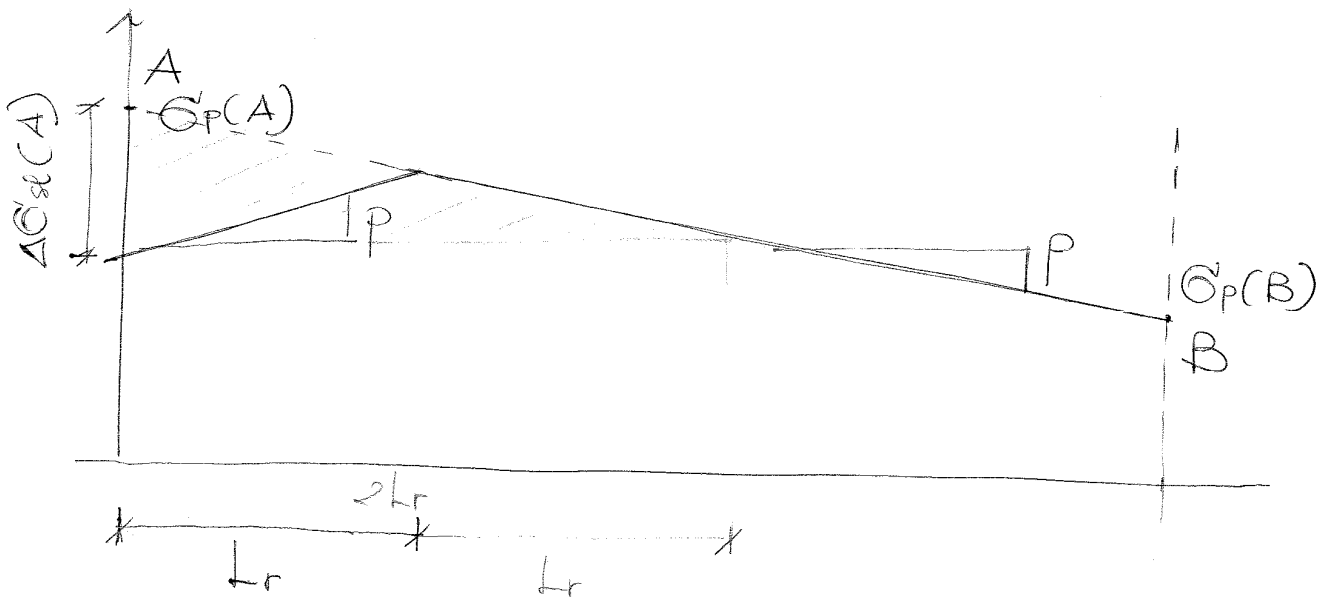
dalla seconda equazione si ricava a , che poi si sostituisce nella prima:

$$\begin{cases} b = \frac{r+4f}{L} \\ a = -\frac{4f}{L^2} \end{cases}$$

$$y = -\frac{4f}{L^2} x^2 + \frac{4f+r}{L} x$$

$$\dot{y} = 2ax + b = -\frac{8f}{L^2} x + \frac{4f+r}{L}$$

Le rientro totale influenza le tensioni per una lunghezza L_r .

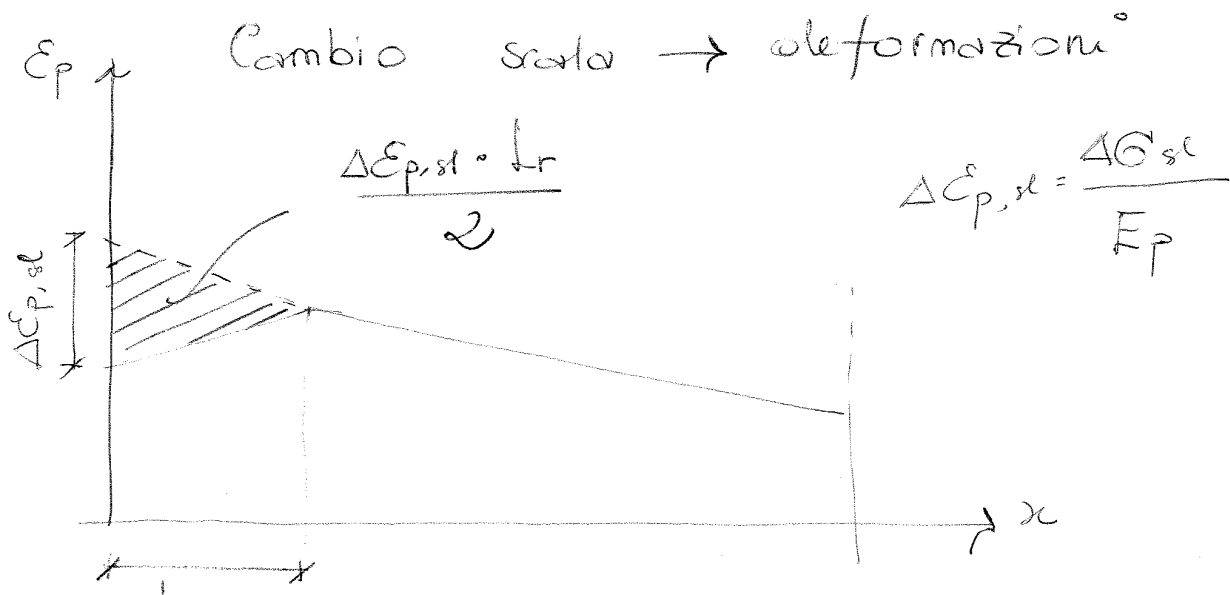


$$p = \frac{\sigma_p(A) - \sigma_p(B)}{2L_r}$$

perdita per unità di lunghezza per attrito

La perdita per rientro ha la stessa pendenza p , ma di segno opposto

$$p = \frac{\Delta \sigma_{sl}(A)}{2L_r}$$



$$\Delta L_e = \int_c \Delta \varepsilon_c d\bar{x} = \int_c \frac{\Delta \sigma_c}{E_c} d\bar{x} = \Delta \sigma_{c,m} \frac{L_c}{E_c}$$

\downarrow
 var. di tensione
 media nel c/s o livello
 del cavo

$$\Delta \sigma_{p,el} = \Delta \varepsilon_{p,el} E_p = \Delta \sigma_{c,m} \cdot \frac{L_c}{E_c} \cdot \frac{E_p}{L_c} = \frac{E_p}{E_c} \Delta \sigma_{c,m}$$

$$\Delta \varepsilon_{p,el} = \frac{\Delta L_e}{L_c}$$

Se invece i cavi sono iniettati (perfetta adesione) si hanno deformazioni uguali per cavi posti allo stesso livello \rightarrow le variazioni di tensione si calcolano con le formule della pressoflessione nell'ipotesi di $\Delta \varepsilon$ piano

$$\Delta \sigma_{p,el} = E_p \cdot \Delta \varepsilon_{p,el}$$

$$\Delta \sigma_c = \frac{P}{A_c} = \frac{\sigma_p \cdot A_p}{A_c}$$

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{\sigma_p \cdot A_p}{A_c E_c} = \Delta \varepsilon_{p,el}$$

$$\rightarrow \Delta \sigma_{p,el} = E_p \cdot \frac{\sigma_p \cdot A_p}{E_c \cdot A_c}$$

$$\Delta P_{el} = \Delta \sigma_{p,el} \cdot A_p = E_p \cdot \frac{\sigma_p A_p^2}{E_c A_c}$$

$$\mu = 0,24$$

$$R = 0,01 \text{ rad/m}$$

$$\delta = 5 \text{ mm}$$

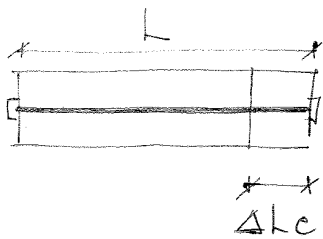
Attrito cavo 1 > attrito cavo 2

Rientro cavo 1 < rientro cavo 2

Tessitura 2° cavo → sforzo normale → def. elastica

Δk_e della trave ; anche il 1° cavo per la compatibilità degli spostamenti si accorcia della stessa quantità → nasce una deforma-

zione media $\epsilon_{p,m} = \frac{\Delta k_e}{L}$



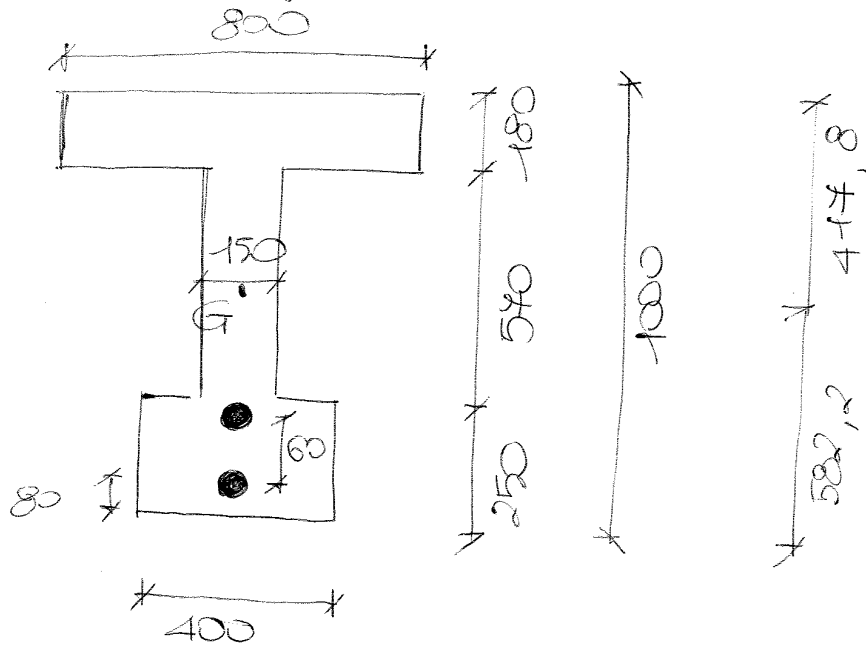
Si ha una caduta di tensione

$$\Delta \sigma_{p,m} = E_p \cdot \epsilon_{p,m} = E_p \cdot \frac{\Delta k_e}{L} \text{ da calcolare}$$

$$\Delta k_e = \int \epsilon dx = \int \frac{\Delta \sigma_{c,2}}{E_c} dx \text{ variaz. di } \sigma \text{ sul cls indotta dal 2° cavo}$$

ma la variazione di tensione sul cls è variabile sezione per sezione

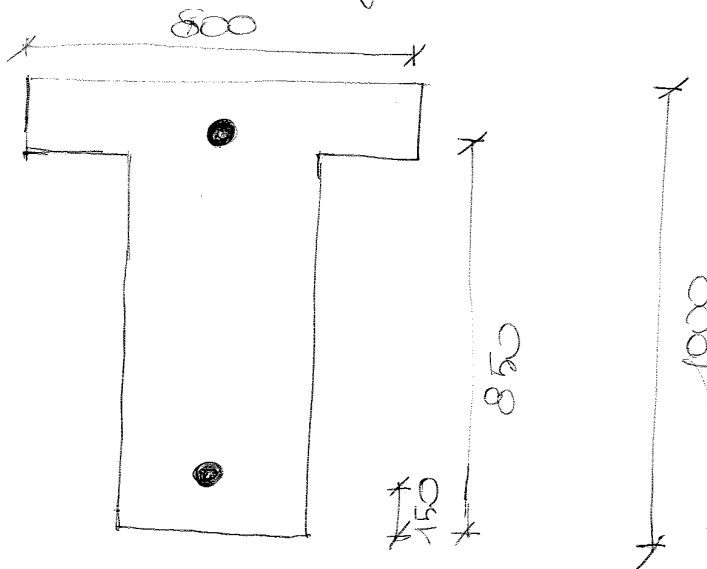
3. Proprietà geometriche sezione di mezzateria



$$A_c = 328 \cdot 848 \text{ mm}^2$$

$$I_{x,c} = 3,8624 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

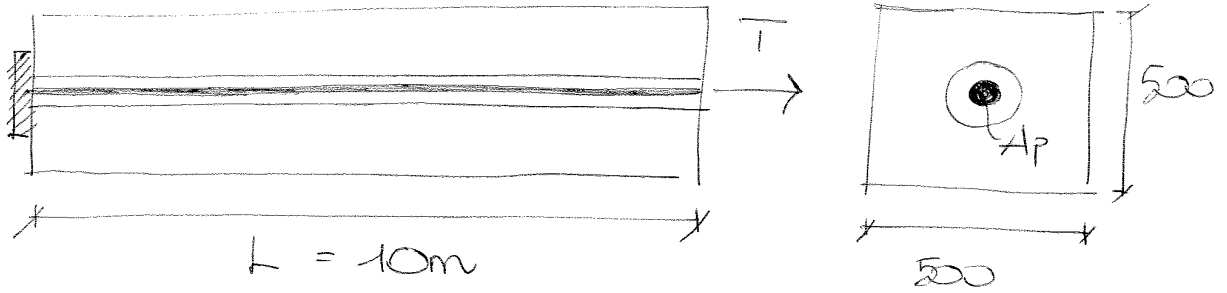
4. Proprietà geometriche sezione di testata



5. Calcolo $\Delta\sigma_c$ sul cls posto a livello del cavo \perp

$$\Delta\sigma_c = \frac{N}{A_c} + \frac{M}{I_c} y_c$$

FS.



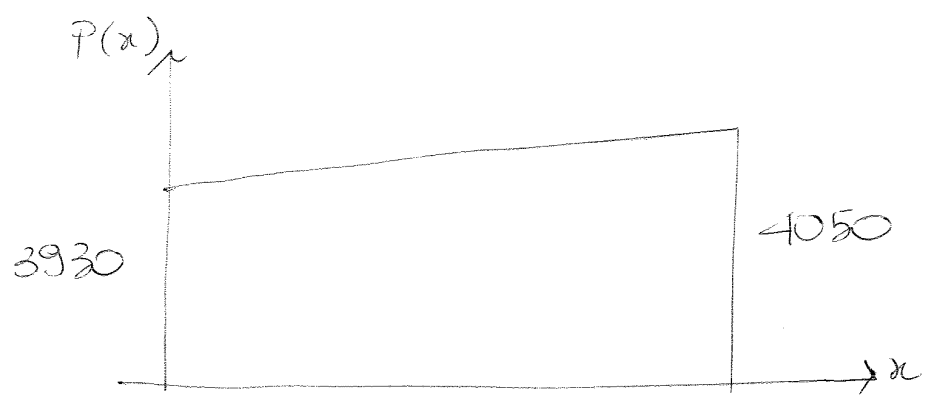
$E_{p,i} = 1350 \text{ N/mm}^2$ $A_p = 3000 \text{ mm}^2$

Di quanto fuoriesce il cavo?

1) Effetto di P sul cavo (allungamento)

Attrito:
 $P(x) = P_{max} \cdot (-e^{\mu(\theta + kx)}) = 1350 \cdot 3000 \cdot (-e^{0,3(0,01x)})$

$P(-10\text{m}) = 3930,3 \text{ kN}$

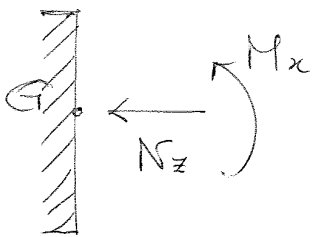


$$\Delta L_p = \int_L E_p dx = \int_L \frac{\sigma}{E_p} dx = \int_L \frac{P(x)}{E_p \cdot A_p} dx = \frac{1}{E_p \cdot A_p} \int_L P(x) dx = 66,5 \text{ mm}$$

LE TENSIONI IN ESERCIZIO

Ipotesi di calcolo:

- conservazione delle sezioni piane (congruenza) nei rami pre-flessi; in quelli post-flessi non è del tutto vero
- perfetta aderenza acciaio-^{ordinario} cls
- = = = da precompressione-cls solo per rami pre flessi sempre; per rami post flessi solo dopo l'iniezione della guaina
- comportamento elastico lineare dei materiali



$$\sigma_z = \frac{N_z}{A} + \frac{M_x}{I_x} \cdot y$$

• Sezione semplicemente inflessa

$$N_z = \emptyset, \quad M_x \neq \emptyset$$

1. $M_x \leq M_{fess} \rightarrow$ sezione interamente reagente

$$\begin{aligned} & A_{c,om} \\ & S_{om} \quad \rightarrow \quad y_G \\ & I_{om} \\ & \sigma'_z = \frac{M_x}{I_{om}} \cdot y \end{aligned}$$

B' altezza della zona compressa dipende solo dalla geometria e non dal momento flettente agente

$$\sigma_c = \frac{M_x}{I_x} \cdot y_c$$

quando $y = x_c \rightarrow \sigma_{c, \max}$

A livello dell'acciaio l'angolo α ha perfetta aderenza ds - acciaio:

$$\epsilon_s = \epsilon_c = \frac{M_x}{E_c \cdot I_x} \cdot y_s$$

$$\rightarrow \sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s = \alpha_e \frac{M_x}{I_x} y_s$$

• Sezione pressoinflessa

$$N_z \neq \emptyset, \quad M_x \neq \emptyset$$

1. $M_x \leq M_{fess}$

$$\sigma_c = \frac{N_z}{A_{om}} + \frac{M_x}{I_{om}} \cdot y_c$$

2. $M_x > M_{fess}$

$$x_c \text{ tale che } N_z = \int \sigma_c dA + \int \sigma_{sd} dA + \int \sigma'_s dA$$

C.A.P.

29/4/13

SLE DI DEFORMAZIONE

verifiche

$$\left\{ \begin{aligned} f_{tot} &\leq \frac{l}{250} \quad \hookrightarrow \text{lucce della composta} \\ f_{differita} &= f_{tot} - f_{per. pr.} \leq \frac{1}{500} L \quad \text{per elementi portati (con compor. tom. fragile)} \end{aligned} \right.$$

presso in esame

all'istante iniziale e a $t = \infty$

Calcolo della freccia: \swarrow per c.c. QP

1. Metodo generale \rightarrow integrazione curvature medie

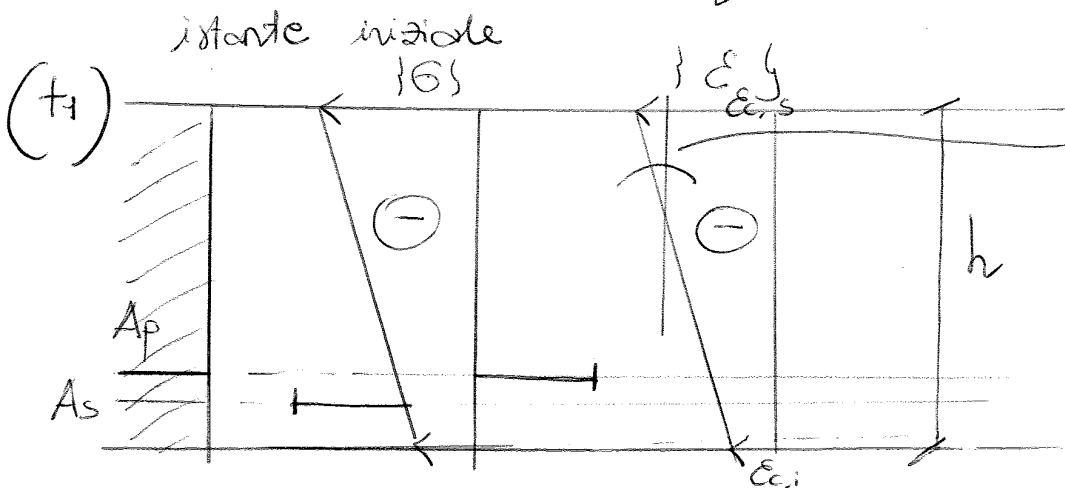
CAP \rightarrow n. non fessurate, spesso strutture ipostatiche

\hookrightarrow stato di sollecitazione lungo la struttura noto

\rightarrow determinazione curvatura

$$\frac{1}{r}(t_1) = \frac{\epsilon_{c,i}(t_1) - \epsilon_{c,s}(t_1)}{h}$$

curvatura \downarrow tg all'andamento delle def.



A $\lambda = \infty = k$ il ragionamento è analogo
 ma le def si calcolano secondo il
 AAEM.

In caso di sezioni fessurate si fa
 riferimento alle def. medie

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{cm} \approx \epsilon_{c, sup} \\ \epsilon_{sm} \approx \frac{\sigma_{s, max} - K_t \Delta \sigma_s}{E_s} \end{array} \right. \sim \text{effetto del tension stiffening}$$

Strutture iperstatiche:

Le reazioni vincolari dipendono dalla
 rigidezza \rightarrow calcolo iterativo

2. Metodo bilineare

$$f = \xi f_{II} + (1-\xi) f_I$$

combinazione lineare

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

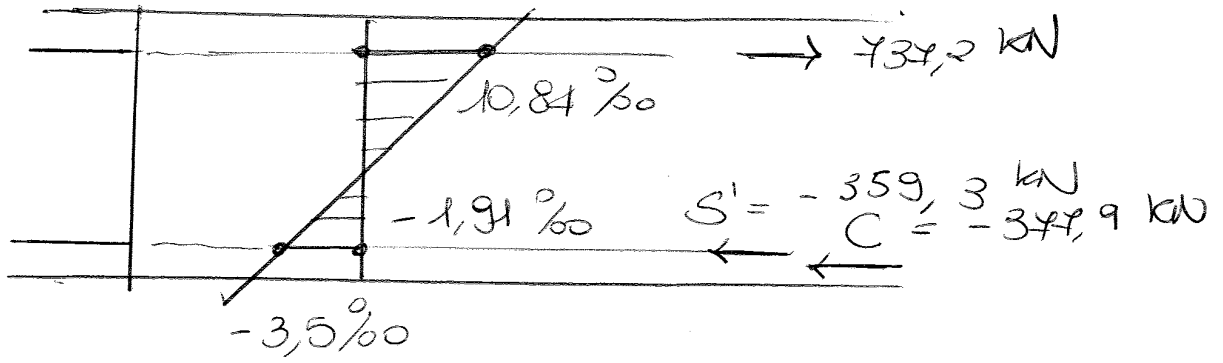
coeff. di distribuzione

stadio II: con $M = M_{cr}$

$$\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \approx \frac{M_{cr}}{M_{ap}}$$

tens. primo stadio della fessura \rightarrow reaz. interom. reag. con $M = M_{fe}$

1.

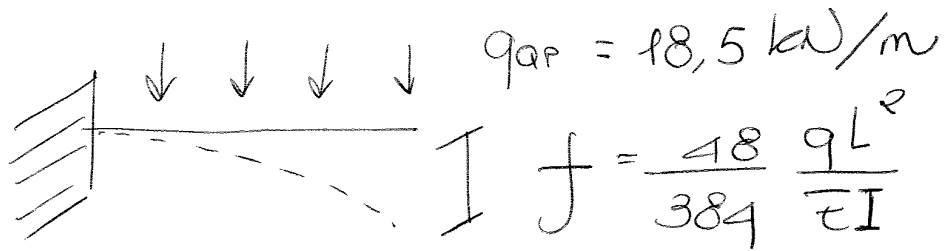


→ $M_{ed} = 296,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$

2.

$$\frac{296,5}{4^2} = 18,5 \text{ kN/m} = q_{op}$$

3.



ds creep

$$f_{cc} = \xi f_{II} + (1 - \xi) f_I$$

$$f_I = \frac{48}{384} \frac{q_{op} \cdot L^4}{E_{ct} \cdot I_{om,I}} = 11 \text{ mm}$$

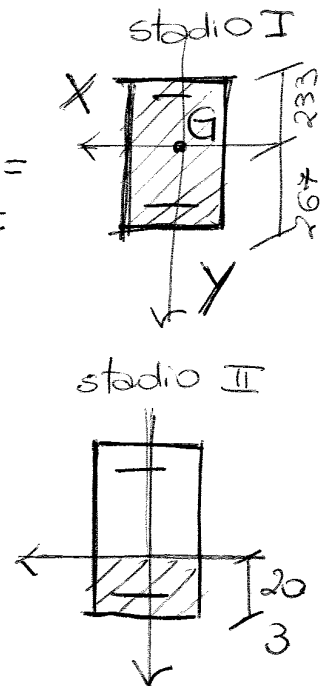
$$f_{II} = 16,5 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = 39,7 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{cr} / M_{op} = 0,27$$

$$\xi = 1 - 0,5 \cdot (0,27)^2 = 0,96$$

→ $f_{cc} =$



VERIFICHE ALLO SLU

SLU PER FLESSIONE

hp) - conservaz. sez. piane

- perfetta aderenza acciaio - ds
- res. trazz. ds nulla
- leggi costitutive ds e acciaio
- la sez. è in condiz. di SLU quando almeno uno dei 2 materiali aggiunge la def. ultima

ds) $\epsilon_{cu} = 3,5\%$, meno per class' > C 50/60

acciaio ordinario	}	$\epsilon_{sd} = \infty$	(la rottura avviene sempre lato ds)
		$\epsilon_{sd} = 0,9 \epsilon_{yk}$	modello elastico plastico incrudente

4,5% B450C
(75%)

$\epsilon_{sd} = 0,9 \epsilon_{yk}$ acciaio da prec.
" 3,5%

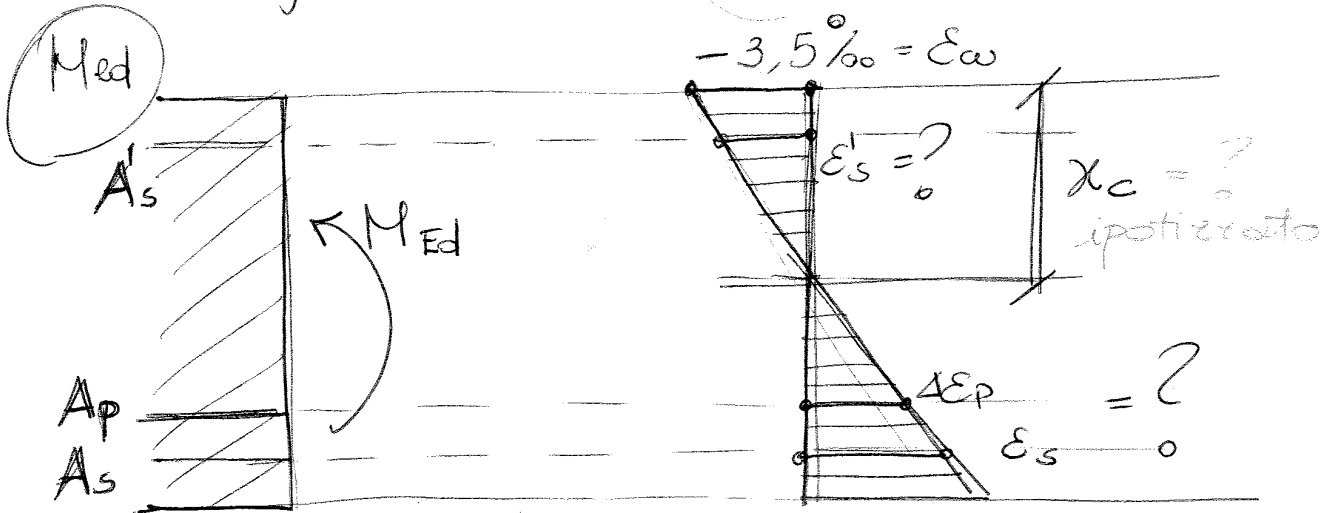
Tipi di rottura:

- rottura fragile (quanti' di armatura < di quella minima) } duttilità
- rottura per strappo dell' armatura fesa (rottura lato acciaio) } fessurazione

2 situazioni:

Progetto → definizione A_s, A'_s, A_p

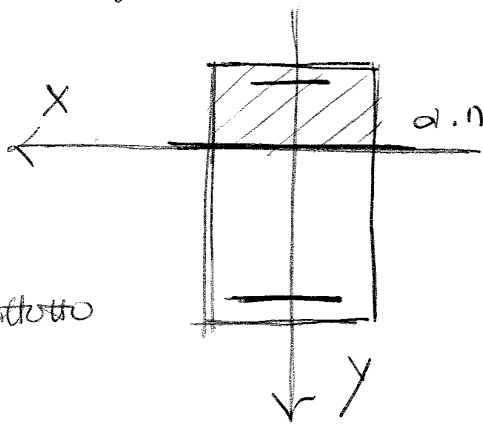
Verifica → calcolo M_{ed} della sezione



hp) comp. elastico-perfettam. plastico
acciaio → rottura solo lato ds

Fissato x_c per ipotesi si ha anche $(\frac{1}{r})_u = \frac{1-3,5‰}{x_c}$

Nota la curvatura si possono determinare le deformazioni



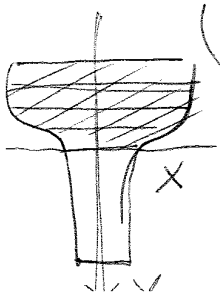
curvatura

$$\epsilon_z = \left(\frac{1}{r}\right)_u \cdot y$$

iterativo

La dist. della generica fibra da a.n.

orbito soprattutto per sezioni variabili



Calcolo

risultanti R_i

metodo hp x_c e x_i

generale → suddivisione in strisce e le tens. calcolo la curvatura, le def. ΔR_c per ogni striscia

$$f_{pyd} = \frac{0,9 f_{ptk} \sim 1800}{\gamma_s = 1,15} \text{ MPa}$$

$$A_p \cdot f_{yd} = \text{risultante } F_p$$

Analogamente per l'acciaio ordinario

$$N_{Ed} = \cancel{\phi} \rightarrow R_c^{\ominus} + R_p^{\oplus} + R_s^{\oplus} + R_s'^{\ominus} = \cancel{\phi}$$

equilibrio alla traslazione orizzontale

Tramite equilibrio intorno a qualsiasi ϕ si ottiene Med

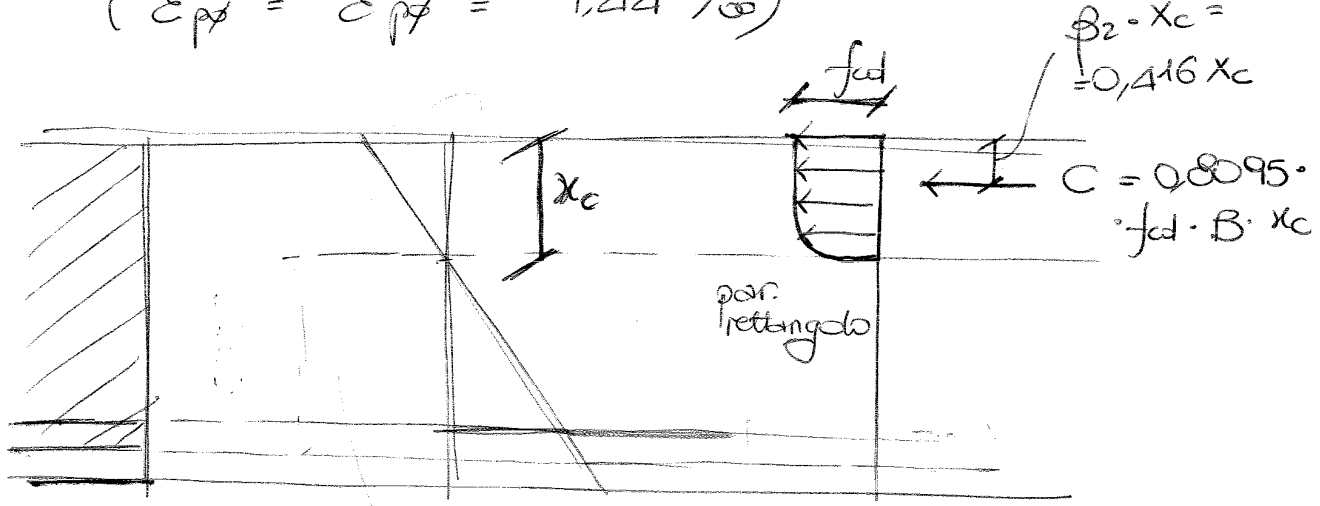
possibile in flex semplice e problemi linear, non quando c'è anche N e armature lavorano in campo elastico (sez. parzialmente trattenute)

hp) soluzione in forma chiusa: (*)
entrambe le armature lavorano e $\int p_{ygd}$ ^{armatura snervata}

→ bisogna poi controllare $\left\{ \begin{aligned} \epsilon_{p,tot} &\geq \epsilon_{pyd} \\ \epsilon'_{p,tot} &\geq \text{"} \end{aligned} \right.$

$$\epsilon_{pyd} = \frac{0,9 \cdot 1860}{1,15 \cdot 200 \cdot 1000} = 7,28 \text{ ‰}$$

Cmq l'arcedo è già snervato fin dall'inizio
($\epsilon_{px} = \epsilon'_{px} = 7,44 \text{ ‰}$)



Eq. della trazione
 $C = T = f_{pyd} \cdot (A_p + A'_p)$

$$0,8095 \cdot 14,17 \cdot 500 \cdot x_c = 1455,4 \cdot \left(\frac{A_p + A'_p}{120 + 40} \right)$$

$$\rightarrow \boxed{x_c = 40,61 \text{ mm}}$$

di cui corrisponde $\left(\frac{1}{r} \right)_u = 8,619 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$
dist A_p da asse neutro

$$\Delta \epsilon_p = 8,619 \cdot 10^{-5} \cdot 234,9 = 20,25 \text{ ‰}$$

$$\rightarrow \epsilon_{p,tot} = \epsilon_{pyd} + \Delta \epsilon_p = 27,69 \text{ ‰}$$

$$\Delta \epsilon'_p = 8,619 \cdot 10^{-5} \cdot 154,4 = 13,31 \text{ ‰}$$

$$\rightarrow \epsilon'_{p,tot} = \epsilon'_{px} + \Delta \epsilon'_p = 20,75 \text{ ‰}$$

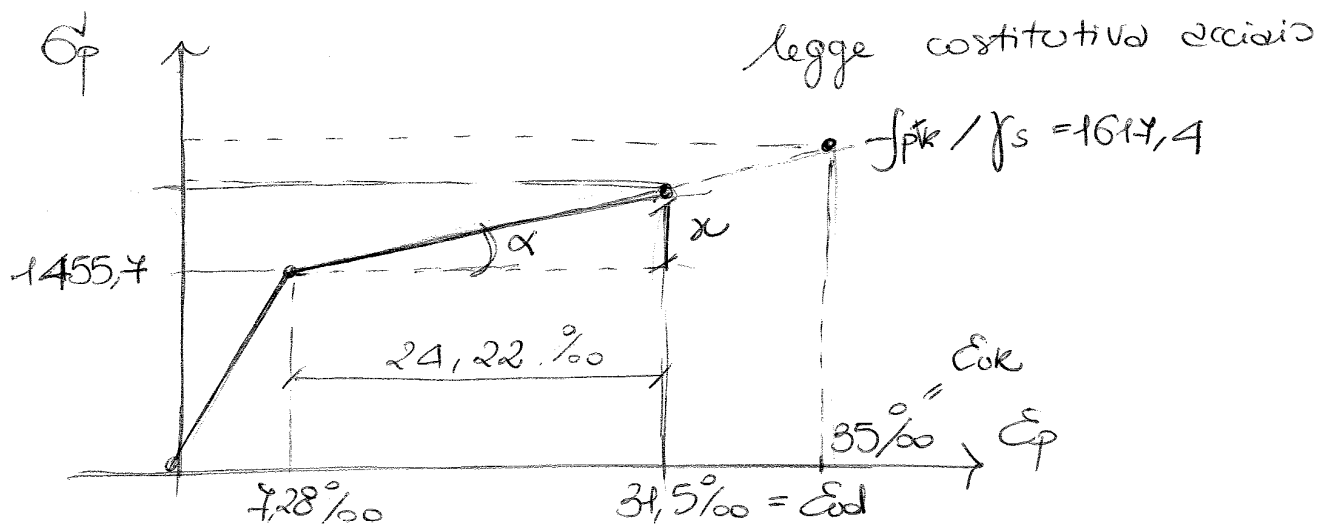
P. meccaniche materiali :

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{40}{1,5} = 22,67 \text{ MPa}$$

$$f_{pyd} = 0,9 \cdot \frac{1860}{1,15} = 1455,7 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{pd} = \frac{1300}{200'000} = 6,50 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{pyd} = \frac{1455,7}{200'000} = 7,28 \text{ ‰}$$



$$f_{ptd} = ?$$

pendenza retta

$$\text{tg} \alpha = \frac{1617,4 - 1455,7}{35 - 7,28} = 5,83 \frac{\text{MPa}}{\text{‰} \cdot 1000}$$

determinato

tramite interpolazione

lineare

$$x = 5,83 \cdot 24,22 = 141,2 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow f_{ptd} = f_{pyd} + x = 1596,9 \text{ MPa}$$

$$f_p(\epsilon_{p,tot}) = 1455,7 + 5,83(\epsilon_{p,tot} - 7,28)$$

valore di tens. per
un certo valore di $\epsilon_{p,tot}$