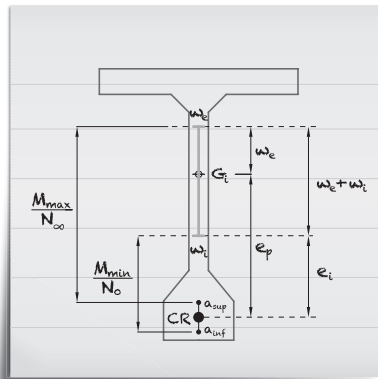


Carlo Sigmund

# CALCOLO DI ELEMENTI PREFABBRICATI IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

SECONDO NORME TECNICHE E EUROCODICI



CD-ROM INCLUSO

ESEMPI DI CALCOLO DI ELEMENTI PREFABBRICATI IN C.A.P.

  
GRAFILL

Carlo Sigmund

**CALCOLO DI ELEMENTI PREFABBRICATI  
IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO**

ISBN 13 978-88-8207-485-2

EAN 9 788882 074852

Manuali, 127

Prima edizione, settembre 2012

Sigmund, Carlo <1971->

Calcolo di elementi prefabbricati in cemento armato precompresso /

Carlo Sigmund. – Palermo : Grafill, 2012.

(Manuali ; 127)

ISBN 978-88-8207-485-2

1. Cemento armato precompresso.

624.183412 CDD-22

SBN Pal0246251

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di settembre 2012

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

*A Sara, Chiara, Barbara, Lillo e Bamby,  
con tutto il cuore...*

L'inno tra i più belli alla vita (sabato 12 febbraio 1944):

*“Splende il sole, il cielo è azzurro intenso, soffia un venticello  
meraviglioso e vorrei tanto...vorrei...tutto...Parlare, essere li-  
bera, avere amici, essere sola. Vorrei tanto...piangere!”*

*Het Achterhuis.*

ANNELIES MARIE FRANK



## INDICE

<b>NOTE GENERALI AL TESTO</b> .....	p.	13
› Unità di misura impiegate .....	"	13
› Normative utilizzate e consultate .....	"	13
› Struttura e articolazione del testo .....	"	14
› Note particolari al lettore .....	"	14
› Ringraziamenti .....	"	14
<b>UNO DEI PERCHÉ DI QUESTO LIBRO</b> .....	"	15
<b>1. CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO:</b>		
<b>CENNI STORICI</b> .....	"	17
<b>1.1.</b> Generalità sull'origine del concetto della precompressione .....	"	17
<b>1.2.</b> Breve rassegna storica sull'evoluzione del c.a.p. ....	"	18
<b>1.3.</b> Un particolare contributo italiano all'evoluzione della precompressione .....	"	24
<b>2. DEFINIZIONI E GENERALITÀ INTRODUTTIVE</b>		
<b>SULLA TEORIA DEL C.A.P.</b> .....	"	30
<b>2.1.</b> Definizione delle parti di studio di una sezione precompressa .....	"	30
<b>2.1.1.</b> Terminologia frequentemente utilizzata .....	"	30
<b>2.1.2.</b> Descrizioni qualitative delle sezioni resistenti nel c.a.p. ....	"	33
<b>2.2.</b> Modello matematico di sezione resistente .....	"	35
<b>2.2.1.</b> Caratterizzazione della forma .....	"	35
<b>2.2.2.</b> Calcolo delle grandezze geometriche di una sezione ideale interamente reagente .....	"	36
<b>2.2.3.</b> Calcolo delle grandezze geometriche di una sezione ideale mediante scomposizione in quadrilateri e triangoli equivalenti .....	"	42
<b>2.2.4.</b> Ellisse centrale d'inerzia di una sezione: significato meccanico .....	"	54
<b>2.2.5.</b> Asse neutro ed estremi del nocciolo centrale d'inerzia di una sezione .....	"	56
<b>2.2.6.</b> Schematizzazione tipica e caratterizzazione della sezione resistente .....	"	61

<b>3. PRINCIPALI FORMULE OPERATIVE IMPIEGATE</b>		
<b>PER LE VERIFICHE DI SEZIONI PRECOMPRESSE</b> .....	p.	65
<b>3.1.</b> Equazione di Navier: cenni introduttivi e ipotesi adottate .....	~	65
<b>3.2.</b> Convenzioni usate per il segno algebrico nelle formule di verifica delle tensioni .....	~	68
<b>3.3.</b> Premessa sulle implicazioni dei fenomeni istantanei e differiti nell'utilizzo delle formule di verifica con precompressione .....	~	68
<b>3.4.</b> Formule operative di verifica .....	~	69
<b>3.4.1.</b> Formule di pressoflessione retta per contributo della precompressione e del peso proprio (fase iniziale sistema post-teso) .....	~	69
<b>3.4.2.</b> Formule di pressoflessione retta per contributo della precompressione e del peso proprio (fase iniziale sistema pre-teso) .....	~	73
<b>3.4.3.</b> Formula di pressoflessione retta per perdite immediate di precompressione per accorciamento elastico nella post-tensione .....	~	79
<b>3.4.4.</b> Formule di pressoflessione retta per sola precompressione in termini di cadute di tensione al generico tempo "t" .....	~	83
<b>3.4.5.</b> Formule di pressoflessione retta per fase finale (a vuoto) ...	~	86
<b>3.4.6.</b> Formule di pressoflessione retta per fase finale (con carico variabile) .....	~	92
<b>4. RENDIMENTO GEOMETRICO</b>		
<b>E CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI UNA SEZIONE</b> .....	~	99
<b>4.1.</b> Premessa .....	~	99
<b>4.2.</b> Formule del rendimento geometrico .....	~	101
<b>4.3.</b> Principali osservazioni sul rendimento geometrico di una sezione ...	~	104
<b>4.4.</b> Caratterizzazione della forma di una sezione in funzione del rapporto tra carichi variabili e totali agenti .....	~	106
<b>4.5.</b> Concetto di rapporto meccanico di precompressione .....	~	109
<b>4.6.</b> Concetto di percentuale meccanica di armatura di precompressione .....	~	115
<b>5. PROBLEMATICHE DI PREDIMENSIONAMENTO,</b>		
<b>PROGETTO E VERIFICA DELLE SEZIONI RESISTENTI</b> .....	~	128
<b>5.1.</b> Premessa .....	~	128
<b>5.2.</b> Formule operative di predimensionamento spedito e verifica di travi isostatiche precomprese .....	~	131
<b>5.3.</b> Osservazioni sul tracciato dei cavi .....	~	185
<b>5.4.</b> Il sistema di carico equivalente della precompressione .....	~	193
<b>5.5.</b> Precompressione nei sistemi iperstatici .....	~	204
<b>5.6.</b> Il fuso limite di Guyon nei sistemi isostatici e iperstatici .....	~	230

5.7.	Principali problematiche connesse alle strutture post-tese e pre-tese .....	p.	239
5.8.	Tensioni nelle zone di ancoraggio dei cavi nel sistema post-teso: formule di progetto delle armature convenzionali .....	"	242
5.9.	Tensioni localizzate nel sistema pre-teso in zona di ancoraggio: procedure di verifica per il controllo delle massime tensioni di trazione .....	"	254
5.10.	Perdite di tensione nei cavi di precompressione: principali formulazioni di calcolo .....	"	264
5.10.1.	Premessa .....	"	264
5.10.2.	Calcolo delle perdite dovuto all'attrito dei cavi .....	"	264
5.10.3.	Rientro degli apparecchi di ancoraggio e scorrimento dei fili di bloccaggio: formule di calcolo .....	"	272
5.10.4.	Perdite di precompressione nella pre-tensione e nella post-tensione dipendenti dal tempo: formulazioni operative secondo UNI EN 1992-1-1:2005 ....	"	279
6.	<b>GRADI DI PRECOMPRESSIONE</b> .....	"	289
6.1.	Generalità.....	"	289
6.2.	Precompressione integrale.....	"	289
6.3.	Precompressione limitata.....	"	291
6.4.	Precompressione parziale .....	"	293
6.4.1.	Aspetti peculiari relativi alla parzializzazione delle sezioni .....	"	293
6.4.2.	Stato limite di deformazione: calcolo delle deformate mediante integrazione delle curvature.....	"	295
6.5.	Precompressione con cavi aderenti (pre-tensione) .....	"	302
6.6.	Precompressione con cavi scorrevoli (post-tensione) .....	"	304
6.7.	Precompressione con cavi esterni "unbonded" .....	"	305
6.7.1.	Peculiarità e differenze con la precompressione a cavi aderenti.....	"	305
6.7.2.	Teoria e modelli di calcolo per la precompressione esterna .....	"	312
6.7.3.	Formule di calcolo deducibili dal modello di Naaman-Alkhairi .....	"	314
6.8.	Precompressione per avvolgimento circonferenziale .....	"	335
6.9.	Precompressione termica e chimica .....	"	336
7.	<b>PECULIARITÀ E VANTAGGI DELLA PRECOMPRESSIONE: CONFRONTI CON IL C.A.</b> .....	"	337
7.1.	Premessa .....	"	337
7.2.	Messa in tensione e sviluppo dell'aderenza .....	"	338
7.3.	Vantaggi della precompressione .....	"	339
7.3.1.	Impiego di acciai ad alta resistenza.....	"	339
7.3.2.	Controllo dell'entità degli sforzi di trazione .....	"	339

7.3.3.	Contenimento delle dimensioni delle sezioni trasversali resistenti .....	p.	339
7.3.4.	Contenimento dell'entità delle inflessioni.....	~	340
7.3.5.	Assorbimento di stati di tensione fortemente variabili .....	~	340
7.4.	Principali differenze con il cemento armato ordinario.....	~	340
7.4.1.	Caratteristiche di resistenza in fase non fessurata e fessurata .....	~	340
7.4.2.	Diversa influenza delle tensioni in esercizio in travi in c.a. e in travi in c.a.p. ....	~	342
<b>8.</b>	<b>TECNOLOGIA DELLA PRECOMPRESSIONE</b>		
	<b>NEL POST-TESO</b> .....	~	343
8.1.	Premessa .....	~	343
8.2.	Armature in trefoli .....	~	344
8.3.	Guaine .....	~	347
8.4.	Raggi di curvatura minimi ammissibili per i cavi .....	~	350
8.5.	Principali tipi di ancoraggi (catalogo della DYWIDAG System International GmbH) .....	~	353
8.6.	Estratti da ETA-06/0022 .....	~	362
<b>9.</b>	<b>CARATTERISTICHE FONDAMENTALI DEL CALCESTRUZZO</b> .....	~	369
9.1.	Concetto di lavorabilità del calcestruzzo.....	~	369
9.2.	Prove di misurazione della lavorabilità .....	~	370
9.3.	Effetti sulla lavorabilità del conglomerato .....	~	376
9.4.	La segregazione .....	~	378
9.5.	Il "bleeding" .....	~	378
9.6.	Caratteristiche generali di resistenza del calcestruzzo .....	~	379
9.7.	Resistenza a trazione del conglomerato .....	~	383
9.8.	Resistenza a compressione del conglomerato .....	~	384
9.9.	Le microlesioni .....	~	387
9.10.	Influenza degli inerti di grossa pezzatura.....	~	387
9.11.	Influenza del tenore in cemento sulla resistenza .....	~	389
9.12.	La frattura del calcestruzzo in un sistema complesso di sollecitazioni .....	~	389
9.13.	La resistenza del calcestruzzo in funzione del tempo .....	~	392
9.14.	Correlazione tra resistenza a trazione e a compressione.....	~	393
9.15.	Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura .....	~	394
9.16.	Resistenza a fatica .....	~	396
9.17.	Resistenza all'urto .....	~	401
9.18.	Deformazioni differite nel conglomerato .....	~	402
9.19.	Entità delle deformazioni viscosse in campo lineare.....	~	409
9.20.	Deformazioni per ritiro nel conglomerato .....	~	420
9.21.	Cadute di tensione per deformazioni differite nel tempo.....	~	436



<b>9.22.</b> Cadute di tensione secondo il principio di sovrapposizione di Mc Henry .....	p.	441
<b>10. GLI ACCIAI DI PRECOMPRESSIONE</b> .....	"	452
<b>10.1.</b> Premessa .....	"	452
<b>10.2.</b> Requisiti e caratteristiche meccaniche.....	"	452
<b>10.3.</b> Tipi di acciaio .....	"	454
<b>10.4.</b> Fenomeni di rifluimento e rilassamento .....	"	456
<b>10.5.</b> Influenza della temperatura .....	"	457
<b>10.6.</b> Il fenomeno della corrosione e relative misure protettive.....	"	457
 APPENDICE		
<b>CARATTERISTICHE TECNOLOGICHE TREFOLI PER C.A.P.</b> .....	"	459
<b>GUIDA ALL'INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO</b> .....	"	469
<b>FONTI DELLE ILLUSTRAZIONI</b> .....	"	473
 <b>BIBLIOGRAFIA</b>		
› Testi scientifici .....	"	475
› Altri documenti consultati.....	"	478
› Normativa.....	"	478
 <b>INDICE DEGLI ESEMPI</b>		
<b>1.</b> Trave post-tesa (a guaine non iniettate): calcolo grandezze geometriche ideali .....	"	38
<b>2.</b> Trave post-tesa (a guaine iniettate): calcolo grandezze geometriche ideali .....	"	40
<b>3.</b> Trave da ponte post-tesa (sez. lorda in mezzeria): calcolo momento statico e d'inerzia .....	"	45
<b>4.</b> Trave da ponte post-tesa (sez. mezzeria a guaine non iniettate): calcolo area e baricentro sezione netta .....	"	48
<b>5.</b> Trave da ponte post-tesa (sez. mezzeria, a guaine non iniettate): calcolo momento d'inerzia sez. ideale interamente reagente .....	"	49
<b>6.</b> Trave da ponte post-tesa (sez. mezzeria, con soletta collaborante): calcolo area e baricentro sezione ideale omogeneizzata.....	"	49
<b>7.</b> Trave da ponte post-tesa (sez. mezzeria, con soletta collaborante): calcolo area e baricentro sezione ideale omogeneizzata.....	"	52
<b>8.</b> Trave da ponte post-tesa (sez. mezzeria, con soletta collaborante): calcolo momento d'inerzia sezione ideale omogeneizzata ("fase finale") con armatura lenta trascurata .....	"	53

9. Trave da ponte post-tesa: calcolo tensioni fibre di estremità per solo effetto della precompressione (guaine non iniettate con peso proprio non considerato) .....	p.	71
10. Trave da ponte post-tesa: calcolo tensioni fibre di estremità per effetto della precompressione e del peso proprio (guaine non iniettate) .....	~	72
11. Trave da ponte pre-tesa: calcolo cadute di tensione per solo accorciamento elastico all'atto della recisione dei trefoli.....	~	75
12. Trave post-tesa a guaine non iniettate: calcolo del recupero delle perdite attuando almeno due serie di tesature in presenza di 3 guaine.....	~	80
13. Trave da ponte pre-tesa con soletta collaborante: calcolo variazioni di tensione nel calcestruzzo e nel CR a tempo infinito .....	~	84
14. Trave da ponte pre-tesa con soletta collaborante: calcolo delle tensioni "a vuoto" (trave + soletta solidarizzata) .....	~	88
15. Trave da ponte (di riva) pre-tesa con soletta collaborante: calcolo sollecitazioni per "schema di carico 1" (NTC2008) su una luce di 30 m .....	~	93
16. Trave da ponte (di riva) pre-tesa con soletta collaborante su luce di 30 m: calcolo tensioni SLE in combinazione quasi-permanente .....	~	97
17. Lastra di solaio alveolare precompresso: calcolo grandezze geometriche e rendimento geometrico .....	~	105
18. Profilato in carpenteria metallica: calcolo rendimento geometrico rispetto all'asse d'inerzia "forte" .....	~	106
19. Trave post-tesa rettangolare: calcolo del momento ultimo a rottura prescindendo dalla classe di resistenza del calcestruzzo .....	~	110
20. Solaio civile post-teso (piastra sp. 25 cm) di dimensioni in pianta 7,90 m (in ambiente XC1): predimensionamento armature ordinarie e di precompressione .....	~	112
21. Solaio monolitico: dimensionamento spedito armatura ordinaria .....	~	116
22. Trave prefabbricata, a "T rovescia" pre-tesa, per parcheggio bus e auto, portante un solaio alveolare di sp. 80 cm su una maglia di pilastrate 7,50 m x 16,00 m: proposta di calcolo del momento ultimo a rottura sfruttando i risultati di rottura di un trefolo di prova $\varnothing$ 12.50 mm .....	~	118
23. Trave da ponte (di riva) pre-tesa: predimensionamento del tiro e stima delle armature di precompressione .....	~	138
24. Trave da ponte (di riva) pre-tesa: calcolo per l'intubettamento dei trefoli nelle sezioni prossime alle testate .....	~	140
25. Trave da ponte post-tesa in precompressione limitata: predimensionamento tiro e armature di precompressione .....	~	145

<b>26.</b> Trave da ponte post-tesa a cavi parabolici: calcolo delle tensioni a guaine non iniettate assumendo una tolleranza massima nella posa dei condotti delle guaine .....	p.	148
<b>27.</b> Trave da ponte post-tesa a cavi parabolici: calcolo delle tensioni “a vuoto” .....	“	151
<b>28.</b> Trave da ponte post-tesa a cavi parabolici: calcolo massime tensioni per “schema di carico 1” (NTC2008) con momento in mezzeria per soli carichi viaggianti di 5000 kNm.....	“	153
<b>29.</b> Trave da ponte post-tesa a cavi parabolici: calcolo e verifica massime tensioni in combinazioni caratteristica e quasi permanente (sez. mezzeria) .....	“	155
<b>30.</b> Trave da ponte post-tesa in precompressione limitata: verifica stato limite di fessurazione .....	“	156
<b>31.</b> Trave post-tesa a “T”, parzialmente precompressa ad armatura mista con cavi parabolici: dimensionamento per fissato grado di precompressione, verifica massime tensioni, verifiche fessurazione e fatica.....	“	159
<b>32.</b> Trave pre-tesa (luce max 21,90 m, interasse 4,15 m) di una copertura di un plesso scolastico esistente: calcolo stato tensionale utilizzando i dati di progetto dell’epoca.....	“	177
<b>33.</b> Trave iperstatica continua su due campate con cavi ad andamento parabolico: determinazione del tiro in condizione di precompressione limitata e verifica di idoneità del tracciato .....	“	222
<b>34.</b> Trave post-tesa a precompressione parziale: calcolo delle armature convenzionali per assorbire le tensioni di diffusione sulle aree di appoggio e nelle zone degli apparecchi di ancoraggio (rif. ETA-06/002 del 13 gennaio 2011).....	“	248
<b>35.</b> Solaio prefabbricato a lastre: calcolo massimo rientro accettabile dei trefoli dopo il trasferimento per recisione .....	“	256
<b>36.</b> Lastra alveolare vibrofinita armata con trefoli da 0.5”: calcolo dell’entità della tensione per “spalling” .....	“	262
<b>37.</b> Trave post-tesa a cavi parabolici continua su due campate: calcolo armatura di pretensione, calcolo perdite immediate per attrito, per rilassamento acciai e per rientro ancoraggi, scelta apparecchio ancoraggio (rif. ETA-06/0022) .....	“	275
<b>38.</b> Trave da ponte post-tesa a cavi parabolici con soletta di completamento: calcolo delle perdite di tensione a tempo infinito (sez. mezzeria, rif. par. 3.1.4 della UNI EN 1992-1-1) .....	“	284
<b>39.</b> Trave a precompressione parziale (di tipo civile, uffici): calcolo delle frecce in condizioni non fessurate e fessurate (metodo della curvatura con discretizzazione in conci) .....	“	297

<b>40.</b> Trave a “T” con armatura lenta e armature pretese esterne (“unbonded”) su luce di 18 m: calcolo tensioni in fase finale (metodo di Naaman-Alkhairi).....	p.	324
<b>41.</b> Trave a “T” con armatura di pretensione esterna (“unbonded”) su luce di 18 m: calcolo delle massime tensioni di esercizio per un carico viaggiante di 30 kN/m .....	~	327
<b>42.</b> Trave precompressa a cavi di pretensione esterni (“unbonded”): calcolo momento resistente a rottura secondo ACI e calcolo nativo Naaman-Alkhairi .....	~	332
<b>43.</b> Elemento in calcestruzzo armato: calcolo delle contrazioni dopo 6, 12 mesi dal getto e a tempo infinito .....	~	414
<b>44.</b> Elemento in calcestruzzo armato: stima delle deformazioni a tempo infinito in rapporto alla deformata elastica istantanea secondo NTC2008 .....	~	416
<b>45.</b> Elemento in cemento armato libero di contrarsi: stima dell’entità delle deformate secondo formulazione CEB76, NTC2008 e UNI EN 1992-1-1:2005.....	~	417
<b>46.</b> Calcolo deformazione unitaria per ritiro di una sezione a “T” secondo vecchia formulazione CEB .....	~	429
<b>47.</b> Trave in calcestruzzo armato: stima delle deformazioni per ritiro e viscosità secondo UNI EN 1992-1-1:2005 (schemi: isostatico e iperstatico) .....	~	430
<b>48.</b> Sezione di trave mista da ponte (acciaio + soletta): stima dello stato di coazione per sola deformazione unitaria per ritiro della soletta.....	~	434
<b>49.</b> Travi pre-tese a “V” (di riva e interna) per impalcato ferroviario: calcolo delle perdite totali per rilassamento degli acciai di pretensione, per ritiro e per sola viscosità del conglomerato .....	~	437
<b>50.</b> Impalcato ferroviario: calcolo effetto del ritiro differenziale della soletta collaborante sull’intera sezione mista con travi pre-tese a “V” .....	~	439
<b>51.</b> Calcolo di tutte le perdite di tensione (istantanee e differite per ritiro, rilassamento e viscosità) nelle armature di una trave pre-tesa, secondo il metodo algebrizzato A.A.E.M.M. ....	~	446

## NOTE GENERALI AL TESTO

### › Unità di misura impiegate

In questa pubblicazione sono state adottate le seguenti unità di misura del S.I.:

- peso specifico:  $\text{kN/m}^3$ ;
- forze e carichi unitari:  $\text{N}$ ;  $\text{kN}$ ;  $\text{kN/m}$ ;  $\text{kN/m}^2$ ;  $\text{MN/m}^2$ ;  $\text{daN/mm}^2$ ;  $\text{daN/cm}^2$ ;
- momenti di forze:  $\text{kNm}$ ;  $\text{Nmm}$ ;
- tensioni:  $\text{MPa} = \text{N/mm}^2$ ;
- aree (di sezioni):  $\text{mm}^2$ ;
- dimensioni di lunghezze:  $\text{mm}$ ;  $\text{m}$ .

In tutte le applicazioni numeriche proposte, i valori sono stati approssimati alla prima o alla seconda cifra decimale in relazione all'unità di misura adottata nel singolo esempio e come Separatore decimale è stata utilizzata la virgola.

Con segno positivo si sono espresse le trazioni e con segno negativo le compressioni. Nel presente testo vengono sviluppati e trattati argomenti presentati in differenti normative. Pertanto, per non voler appesantire inutilmente la trattazione – che si vuole il più semplice e lineare possibile – e anche per evidenti ragioni di spazio, si è deciso di semplificare il più possibile le notazioni e la simbologia: alcuni simboli utilizzati non risulteranno identici a quelli presenti all'interno delle varie norme qui menzionate.

### › Normative utilizzate e consultate

Questo volume affronta il calcolo degli elementi precompressi in calcestruzzo armato che più frequentemente si incontrano nell'edilizia e nella pratica tecnica. Le procedure di progetto e di verifica presentate rispettano quanto riportato nelle seguenti normative:

- Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2008) – ultimo aggiornamento;
- UNI EN 1991-1-1:2004 Parte 1-1: Azioni in generale – Pesi per unità di volume, pesi propri e sovraccarichi per gli edifici;
- UNI EN 1991-1-3:2004 Parte 1-3: Azioni in generale – Carichi da neve;
- UNI EN 1991-1-6:2005 Parte 1-6: Azioni in generale – Azioni durante la costruzione;
- UNI EN 1991-2:2005 Parte 2: Carichi da traffico su ponti;
- UNI EN 1992-1-1:2005 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici;
- UNI EN 1992-2:2006 Parte 2: Ponti di calcestruzzo – Progettazione e dettagli costruttivi;
- UNI EN 934-4:2009 Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Parte 4: Additivi per malta per iniezione per cavi di precompressione – Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed atichettatura;

- UNI EN 1168:2012 Prodotti prefabbricati di calcestruzzo – Lastre alveolari;
- ETA-06/0022 EN 110113-160113 Bonded Strand.

### › **Struttura e articolazione del testo**

Questa pubblicazione tratta della tecnologia e del calcolo del cemento armato precompresso, secondo le aggiornate disposizioni normative. Gli argomenti affrontati, in dieci capitoli e un'appendice, sono i classici metodi di precompressione di strutture isostatiche e iperstatiche, a cavi pre-tesi e post-tesi. Completa poi la trattazione la descrizione della tecnica di precompressione esterna mediante l'uso di cavi posti esternamente alle sezioni resistenti. Vengono, in particolare, presentate alcune formulazioni per il predimensionamento e la verifica in condizioni di precompressione integrale, limitata e parziale.

Non è stato possibile, per ovvi motivi, riportare tutto sulla precompressione: quanto presentato qui costituisce, credo, solo un invito ad approfondire questo interessante e stimolante argomento attraverso i numerosi testi, anche italiani, che delineano il precompresso in tutti i suoi aspetti. Per rendere più agevole e veloce la consultazione degli argomenti, personalmente ritenuti di maggiore interesse, si è deciso qui di suddividerli in sezioni il più possibile disgiunte tra loro, in modo così da non costringere necessariamente ad una lettura intera del manoscritto. Si spera tanto sia stata un'iniziativa utile.

### › **Note particolari al lettore**

Tutti gli esempi di calcolo in questa pubblicazione sono proposti, per ragioni di spazio, come caso-studio e rappresentativi delle situazioni progettuali che più frequentemente si verificano nella pratica tecnica.

In tutti gli esempi riportati nella presente pubblicazione, le indicazioni sulle analisi dei carichi e le ipotesi sull'entità delle sollecitazioni di progetto sono da intendersi come orientative e quindi devono essere controllate dall'utilizzatore.

L'Autore è cosciente che il testo e le illustrazioni possano presentare qualche imprecisione o qualche refuso, sebbene ogni sforzo sia stato fatto per ridurre al minimo tali inconvenienti. Sarà quindi cosa gradita poter ricevere correzioni e suggerimenti dai Lettori affinché si possa migliorare nel futuro questo lavoro.

### › **Ringraziamenti**

Per aver acconsentito gentilmente all'inserimento, nel capitolo 8 e nell'appendice del presente testo, di parte del loro materiale tecnico in forma di tabelle, testi e illustrazioni, si desidera ringraziare le seguenti Società (in ordine alfabetico):

- DYWIDAG Systems International (DSI) (<http://www.dywidag-systems.com>);
- DYWID S.p.a., (<http://www.dywit.it>) nella persona dell'Ing. Massimo Frumento;
- Siderurgica Latina Martin S.p.A., (<http://www.slmspa.com>) nella persona dell'Ing. Alessandro Giammasi.

Si ringrazia infine la Casa Editrice per la fiducia e per l'ottima veste editoriale che ha voluto dare all'opera.

## UNO DEI PERCHÉ DI QUESTO LIBRO

I diritti di autore di questa pubblicazione sono devoluti all'Associazione Allergie e Pneumopatie Infantili di Udine (ALPI).

Il fondatore è il Dott. Mario C. Canciani, allergo pneumologo pediatra, che si occupa da sempre di patologie dell'apparato respiratorio e dal 2000 è responsabile del Servizio di Allergo-Pneumologia della Clinica Pediatrica dell'Azienda Ospedaliero Universitaria di Udine.

ALPI è un'associazione senza fini di lucro (ONLUS) creata da genitori, pazienti e medici che si occupano di allergie e malattie respiratorie dei bambini. L'associazione è indipendente, apartitica, aconfessionale e persegue esclusivamente finalità di solidarietà sociale. In particolare, l'associazione orienta la propria attività al fine di:

- sensibilizzazione di persone, Enti pubblici e privati, Autorità, Associazioni mediche e sanitarie, sulle problematiche del bambino affetto da patologie allergiche e pneumologiche;
- promuovere servizi pubblici atti ad assicurare una completa assistenza agli ammalati e alle loro famiglie;
- curare la promozione di interventi pubblici e privati per lo sviluppo della ricerca scientifica e della prevenzione, cura e riabilitazione delle suddette malattie;
- prestare assistenza economica agli ammalati e ai parenti con le suddette patologie e assicurare tutti quei servizi atti a rendere più agibile il reperimento dei mezzi tecnici occorrenti per la cura delle malattie allergiche e pneumologiche del bambino;
- perseguire la cooperazione con altre Associazioni e istituzioni pubbliche e private allo scopo di maturare l'opinione dei genitori verso una concezione di salute intesa come bene comune, oltre che individuale;
- migliorare la cultura e favorire l'aggiornamento degli operatori sanitari nei riguardi delle patologie allergiche e pneumologiche congenite e acquisite dell'infanzia;
- migliorare la qualità della vita, lo sviluppo dell'autonomia e della dignità dei bambini affetti da patologie allergiche e pneumologiche, e dei loro genitori o comunque delle persone che vivono a stretto contatto con tali bambini, nonché delle persone a rischio di incorrere in detti problemi;
- fornire un'assistenza sociale, sociosanitaria e riabilitativa confacente alle loro necessità e predisporre altresì un'adeguata attività preventiva.

Per il perseguimento del proprio oggetto sociale, l'associazione potrà:

- promuovere ogni forma di azione diretta a sensibilizzare l'opinione pubblica sui problemi di disagio e sofferenza, nonché a richiamare l'attenzione degli organi legislativi ed amministrativi dello Stato e degli Enti Locali e le forze pubbliche, affinché vengano applicate e rispettate le leggi che tutelano le persone più deboli, con

- particolare riferimento al bambino affetto da patologie allergiche e pneumologiche, dal periodo prenatale all'adolescenza, fino al passaggio all'età adulta;
- collaborare con i predetti organismi per il conseguimento di un risultato migliore;
  - fornire prestazioni di assistenza socio-sanitaria, socio-riabilitativa, domiciliare, in comunità o presso enti e simili in favore di disabili o persone con necessità psico-fisiche;
  - gestire autonomamente o in regime di convenzione con enti pubblici, servizi di assistenza diretta alle persone con disagio sociale e/o personale, con handicap fisico, psichico e sensoriale, con sofferenza psichiatrica, nonché persone anziane, promuovendone anche la partecipazione alla vita della comunità circostante;
  - acquisire, in funzione del sostegno e della realizzazione di progetti socio-riabilitativi, strutture abitative da destinare a residenze o semi-residenze (appartamenti, comunità, centri diurni o altro) e strutture di altro tipo (laboratori con attività artistiche artigianali, espressive, corporee e musicali, attività legate all'ambiente e alla terra) per progetti riabilitativi centrati sul lavoro o sullo sviluppo di interessi personali;
  - mettere a disposizione le strutture di cui al punto precedente, per la valorizzazione di progetti realizzati dall'associazione o da altri organismi che abbiano le medesime finalità;
  - predisporre una serie di interventi di prevenzione, di sostegno e di assistenza a donne, a minori ed ai loro familiari in situazioni di difficoltà, ivi comprese le persone anziane, nonché a persone che vogliano affrontare e risolvere problematiche relative alla condizione di dipendenza da sostanze stupefacenti o altro;
  - gestire corsi di formazione professionale, attività integrative scolastiche e occupazionali sia nei confronti delle medesime persone in condizioni di obiettivo svantaggio che, residualmente, anche nei confronti di persone che non versino in tali condizioni o che siano comunque indispensabili per la buona riuscita del programma didattico-formativo reso nei confronti degli svantaggiati.

Nell'esercizio delle attività istituzionali e di quelle connesse, l'associazione potrà agire in parallelo con le organizzazioni similari esistenti e costituenti, al fine di meglio garantire la tutela dei diritti dei sofferenti e delle persone deboli. L'associazione potrà infine dirigere la propria attività anche a persone che non versino in condizioni di svantaggio, soprattutto quando ciò permetta o comunque favorisca il recupero, il reinserimento, la cura, l'apprendimento, la crescita culturale e sociale, nonché la tutela delle persone svantaggiate. Nell'esercizio delle proprie attività istituzionali e connesse, l'associazione potrà deliberare l'affiliazione ad organismi di secondo livello, con i quali ricercare momenti di confronto e di collaborazione, al fine di un più proficuo impegno nella realizzazione di attività e iniziative comuni, che permettano il miglior conseguimento dell'oggetto sociale.

Qualora lo vogliate, potete trovare maggiori informazioni sul sito:

[www.associazionalealpi.com](http://www.associazionalealpi.com)

Grazie.

L'Autore



## CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO: CENNI STORICI

### › 1.1. Generalità sull'origine del concetto della precompressione

Nella norma tedesca DIN 4227, nell'edizione del 1953 al par. 1.1, si riportava una delle prime definizioni di cemento armato precompresso (acronimo, c.a.p.):

*«Le strutture in cemento armato precompresso sono elementi nei quali il calcestruzzo è precompresso in misura tale, mediante l'introduzione di forze speciali, che sotto il carico di servizio esso non risulta sollecitato a trazione, oppure lo è solo limitatamente. Per precompressione si intende solo quello stato di autotensione, generato in questo modo, che rimane dopo detratte tutte le tensioni provocate da altri casi di carico».*

Più avanti, nella DIN 1080, si affermava con più precisione e dettaglio che:

*«Le tensioni dovute ai carichi sono la conseguenza dei carichi applicati su una struttura portante isostatica o iperstatica. Le autotensioni sono la conseguenza di una coazione che agisce all'interno di una sezione trasversale e che può risultare prodotta o involontariamente (ad esempio, per variazioni di temperatura, ritiro, deformazione plastica, saldatura) o volontariamente (per esempio, con la precompressione). In ogni sezione la somma delle autotensioni è uguale a zero. Ad esse non corrisponde quindi alcuna componente di sollecitazione. Le autotensioni possono prodursi nelle strutture portanti isostatiche o iperstatiche. Le tensioni coatte si formano solo nelle strutture portanti iperstatiche. Esse sono la conseguenza di una deformazione (coazione) imposta alla struttura, la quale può essere prodotta involontariamente (per esempio, a causa di variazioni della temperatura, di ritiro o cedimento degli appoggi) o volontariamente (per esempio, mediante la precompressione). Le tensioni coatte possono essere riunite per ogni sezione in componenti di sollecitazione».*

Il Prof. Dr. Ing. E.h. Hubert Rüschi, in una sua pubblicazione del 1972 (Stahlbeton – Spannbeton, Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren, Band I), definiva il concetto di precompressione nel seguente modo:

*«Con il termine di precompressione s'intende quello stato tensionale generato in un elemento strutturale mediante deformazioni imposte che viene sovrapposto alle tensioni di carico allo scopo di influenzare in un determinato senso il diagramma delle tensioni nelle singole sezioni trasversali, oppure il comportamento dell'intera costruzione».*

La precisa terminologia adottata, anche dalle succitate norme dell'epoca, per descrivere compiutamente il concetto di precompressione, stimola a ritornare indietro nel tempo già nel

regno degli antichi Egizi, quando i carpentieri navali usavano presollecitare parti dello scafo delle loro navi per mezzo di matasse di fibre vegetali che, orientate parallelamente alla chiglia e messe adeguatamente in tensione, tendevano a compensarne le deformazioni. Relativamente più recente, un altro esempio di coazione ci porta alle prime cerchiature metalliche delle ruote di legno. Si intuì, infatti, che era possibile migliorare la resistenza e la compattezza delle ruote lignee assicurando con forza la cerchiatura metallica esterna che, quando inserita a caldo, raffreddandosi riusciva ad imprimere uno stato di coazione persistente che aveva come effetto quello di mantenere saldamente in compressione le razze contro il mozzo.

In particolare, secondo il medesimo principio, s'intuisce immediatamente come la scarsa resistenza a trazione del calcestruzzo spinse ben presto tecnici e studiosi all'idea di forzare con opportune pressioni (precompressione, appunto) le zone tendenti alla trazione delle strutture portanti in calcestruzzo.

## › 1.2. Breve rassegna storica sull'evoluzione del c.a.p.

L'idea fondamentale è sempre stata quella di presollecitare una struttura in modo che le successive azioni agenti esterne, decomprimendo le sezioni resistenti, non lasciassero lembi in trazione. Si presentò quindi come logica conseguenza quella di applicare opportunamente delle sollecitazioni coatte al calcestruzzo, in modo da indurre (almeno in linea di principio) delle sollecitazioni indipendenti e permanenti di contrasto all'effetto di quelle esterne (sollecitazioni indotte dai carichi di servizio, ad esempio). Un primo tentativo in tal senso avvenne nel 1888, quando lo statunitense P.H. Jackson brevettò un sistema per confezionare pavimentazioni in lastre di calcestruzzo o pietra ai cui lembi tesi sporgevano delle barre di acciaio opportunamente da presollecitare tramite serraggio agli estremi con piastre e bulloni stringenti.

Sempre nel 1888, il tedesco C.W. Doehring depositò a Berlino un brevetto per la realizzazione di piastre e travi in calcestruzzo rinforzate da fili di acciai pretesi annegati nel getto. A differenza del brevetto statunitense, quello tedesco prevedeva prima del getto la messa in tensione preventiva dei fili metallici trattenuti da opportuni sistemi di contrasto. Dopo aver messo in tensione i cavi, infatti, si versava nelle forme l'impasto di

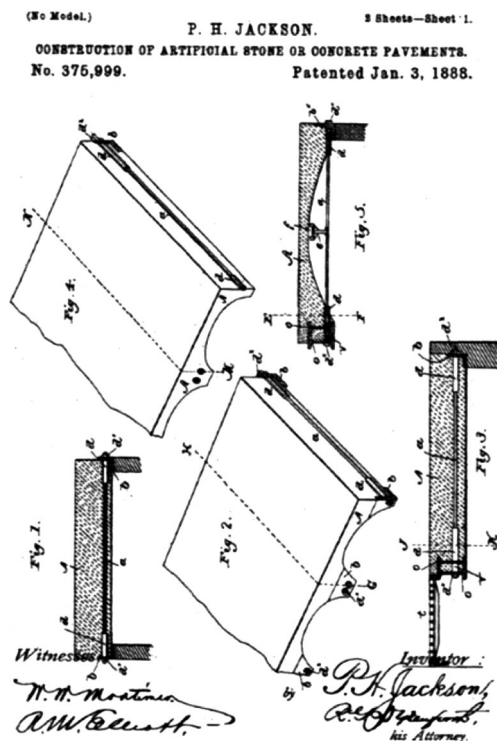
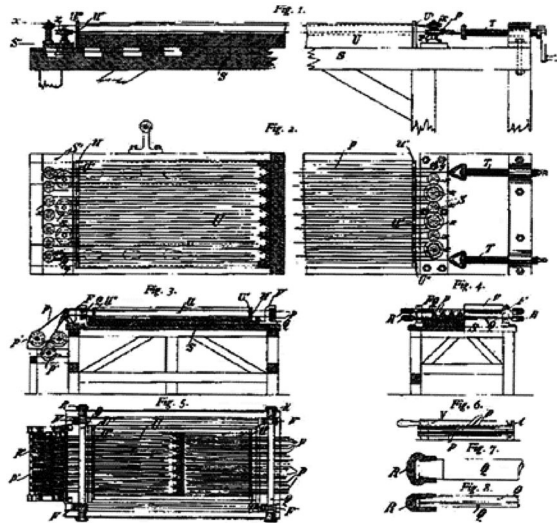


Figura 1. Brevetto depositato da P.H. Jackson il 3 gennaio 1888 [1].

calcestruzzo e quando il materiale si presentava sufficientemente indurito venivano rimosse le casseforme e i cavi sporgenti recisi.



**Figura 2.** C.F. Doehring, Patentschrift n. 53548, giugno 1888, brevetto per la produzione di elementi in calcestruzzo armato con fili di acciaio pretesi [2].

A questi due primi brevetti ne seguirono altri, tutti con il medesimo obiettivo di aumentare la resistenza del calcestruzzo armato inducendo, preventivamente, stati di compressione tali da contrastare le massime deformazioni attese in condizioni di esercizio. Nel 1896 a Vienna J. Mandl propose di contenere le sollecitazioni derivate dai carichi esterni utilizzando stati iniziali di precompressione; nel 1907 il norvegese J.G.E. Lund suggerì di annegare barre di acciaio nel getto ancorate all'esterno con dadi di serraggio; il tedesco M. Koenen, nel 1906, iniziò una serie di sperimentazioni su barre tese annegate nel calcestruzzo; il tedesco Zisseler e lo svizzero Siegwart, separatamente nel 1910, tentarono di avvolgere i tubi in calcestruzzo con cavi di acciaio teso; K. Wettstein, Boemia, nel 1919 fabbricò doghe sottili di calcestruzzo, le cosiddette assicelle di Wettstein, con fili armonici incorporati, fortemente tese (individuando senza piena consapevolezza i presupposti che stanno alla base del successo dell'attuale cemento armato precompresso); ancora W.H. Hewett nel 1922 realizza serbatoi rinforzati da cavi tesi; il viennese F. von Emperger, nel 1923, realizza tubi in calcestruzzo armati da cavi tesi, etc. Nel 1923 lo statunitense R.H. Dill è il primo a riconoscere la necessità di impiego di fili ad alta resistenza tesati ad elevata tensione. È solo con il francese Eugène Freyssinet che nel 1928 viene brevettato un sistema di precompressione con tensioni dell'acciaio superiori ai 400 MPa. Sino a questa data, infatti, a tutti i brevetti presentati non fu riservato alcun reale successo, poiché la precompressione impressa andava col tempo diminuendo e ad esaurirsi a causa di fenomeni fino ad allora non noti quali la viscosità e il ritiro del calcestruzzo. È appunto merito di Freyssinet di aver intuito per primo l'importanza di uno studio approfondito su tali particolari problematiche.

Non a caso, lo stesso Freyssinet fu in grado di progettare le prime importanti opere in pre-compresso. Nel 1941 progettò il primo di sei ponti sulla Marna. Il primo, nei pressi di Lucancy, un ponte a telaio a due cerniere, potè essere ultimato solo alla fine della guerra. Nel 1938, dopo il contributo del berlinese F. Dischinger che brevettò i cavi di sollecitazione disposti a cavalletto all'esterno della sezione di calcestruzzo, furono costruiti dai tedeschi i primi ponti precompressi come cavalcavia su autostrade. Seguirono lo studio e lo sviluppo dei primi sistemi di tesatura degli acciai: primi fra tutti il metodo Freyssinet con fasci di 5 fili da 5 mm; poi il procedimento della Dyckerhoff Widmann (Dywidag) con barre d'acciaio da 15 mm in acciaio St 600/900. Seguono poi i sistemi Leoba di Fritz Leonhardt e W. Baur con speciali ancoraggi dei fasci di fili e con i cosiddetti cavi concentrati per forze di tesatura molto elevate. Il belga Gustave Magnel attorno al 1941 sviluppò una teoria sul cemento armato a cavi non aderenti realizzando il primo ponte a travi continue sulla Maas nei pressi di Sclayn con due campate di 62 m ciascuna (scrivendo poi il primo libro sul cemento armato precompresso nel 1948). Con E. Hoyer di Amburgo vengono provati sui banchi di tensione sottili fili armonici da 0,5 a 2 mm con resistenza attorno a 1600-2800 MPa, constatando però che con fili troppo sottili l'aderenza tende a scemare col tempo.

Mentre i sistemi Freyssinet (armatura post-tesa con cavi scorrevoli iniettati dopo la tesatura) e Hoyer (armatura pre-tesa con cavi aderenti) presentavano le armature contenute nell'interno della trave, nei sistemi Finsterwalder e Dischinger le armature per la coazione, formate da grosse barre di acciaio filettate alle estremità, venivano disposte all'esterno. La caratteristica delle travi Finsterwalder era la velocità di esecuzione in quanto il sistema costruttivo consentiva di prefabbricare a piè d'opera le due metà di ciascuna trave e di congiungerle in opera. Tipico esempio del sistema Dischinger è il ponte autostradale a schema Gerber costruito presso Aue in Sassonia (1936) in cui la trave di accoppiamento ha l'aspetto della classica trave armata a due contraffissi. Questa tecnica di precompressione venne largamente usata per costruire i ponti sul fiume Reno, di cui oggi non rimane traccia in quanto vennero distrutti dalla Wehrmacht per rallentare l'avanzata delle truppe anglo/americane nel corso della ritirata finale del 1945.

Dal 1949, grazie agli ingegneri svizzeri Birkenmaier, Brandestini, Roß e Vogt, nascono i primi sistemi di precompressione a teste di ancoraggio ricalcate, secondo il tuttora noto procedimento BBRV. Attorno al 1950 F. Leonhardt e W. Baur resero possibile la fabbricazione delle prime travi continue con cavi a trefoli concentrati che trovarono il loro impiego per l'attraversamento del canale Neckar, nei pressi della città di Heilbronn in Germania, tramite un ponte con una luce principale di 96 m e un ponte ferroviario a cinque campate. Nel 1950 U. Finsterwalder realizza la prima struttura precompressa a sbalzo di un ponte a travata nel comune di Balduinstein in Germania, realizzata per conci successivi gettati in opera. Questa tecnica particolare consentirà di realizzare impalcati in c.a.p. senza la necessità di utilizzare centine poggianti a terra, evitando così tutti quegli impedimenti dovuti alla stabilità dei terreni e all'altezza dal suolo. Seguirono negli anni successivi ponti analoghi: sul Reno nella città di Bendorf e addirittura il ponte Hamana di luce di 240 m in Giappone. Negli anni a venire, accanto a nuovi e sempre più perfezionati sistemi di precompressione (sistema svizzero VSL e il sistema Freyssinet), venne dato un notevole impulso anche alla teoria. Con la pubblicazione "Béton Précontraint" del 1951, Yves Gujon contribuì in maniera decisiva ad una ormai necessaria diffusione del c.a.p.