

Teoria e pratica del calcestruzzo armato nell'architettura del Novecento

Theory and practice of reinforced concrete in twentieth-century architecture

Paolo Faccio | faccio@iuav.it

Dipartimento di Culture del Progetto, Università Iuav di Venezia

Abstract

The early twentieth century marked the development of reinforced concrete, which, from its pioneering phase in the nineteenth century to the 1960s, generated theories and techniques that still form the scientific and technical foundation of structural design today. This transformation involved both engineers and architects, in an interplay exemplified by figures such as Nervi and Danusso. Theoretical ambitions and bold realizations were not always supported by a consistent control of theory over practice. Many scientists have emphasized how the audacity and the theoretical and experimental challenges posed by this "new material" required a clear distinction between the work of the practitioner and that of the scholar. This circumstance led to the widespread adoption of tabular dimensioning methods, involving significant simplifications in both calculations and design manuals—an approach that is not considered in current safety assessments.

Keywords

Theory, Practice, Concrete, Conservation, Safety.

Teoria e pratica del calcestruzzo armato nell'architettura del Novecento

Il primo Novecento rappresenta il momento di transizione del mondo delle costruzioni in cui l'architettura storica si proietta nella contemporaneità, generando il sovvertimento di stili, forme e teorie strutturali. È la fase di sviluppo delle costruzioni in calcestruzzo armato che dall'epoca pionieristica affermatasi alla fine dell'Ottocento, approda agli anni Sessanta del Novecento, generando progressivamente teorie e tecniche che costituiscono tutt'oggi la base tecnico-scientifica delle strutture. Una trasformazione che coinvolge ingegneri ed architetti, in un intreccio che è ben rappresentato da figure come Nervi e Danusso,¹ e da una serie di professionisti che, anche mutuandone le esperienze, realizzano nuove strutture e interventi di consolidamento nel tessuto storico. Si assiste ad un proliferare di slanci teorici e di realizzazioni audaci e sperimentali, non sempre supportate da un controllo della teoria sulla pratica. In particolare, alcune problematiche percorrono il pensiero e l'operatività delle strutture, legate fondamentalmente al rapporto tra i due materiali costitutivi: il calcestruzzo e l'acciaio. Se, da una parte, le tecniche di fusione e i controlli in stabilimento dell'acciaio certificano la qualità delle sue caratteristiche meccaniche, dall'altra non si rivela così facilmente definibile il contenuto materico del calcestruzzo. Anche la componente fabbrile legata alla qualità delle maestranze sia per il confezionamento del calcestruzzo che per la parte di posa in opera comporta un ulteriore incremento dell'incertezza. La complessità di gestione del rapporto tra i due materiali, caratterizzati da una forte diversità delle rigidezze, provoca da un

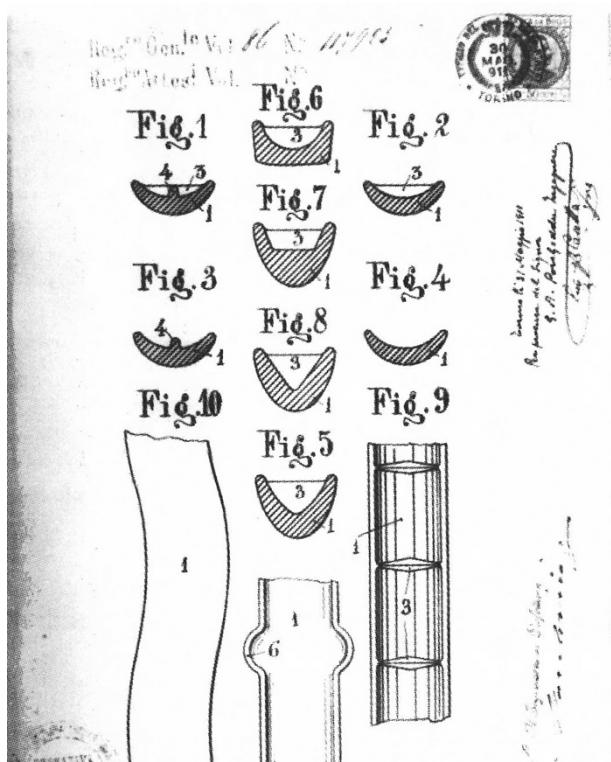


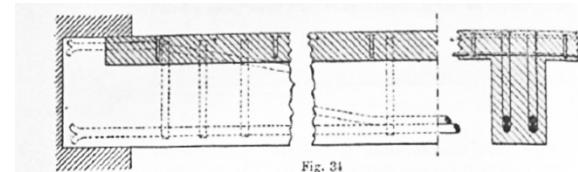
Fig. 1 Tipi e sezione di barre di armature (Ing. G.A. Porcheddu, brevetto n.117925, "Speciale tipo di perfezionato di ferri, e sua applicazione nelle costruzioni in calcestruzzo di cemento armato", (31-5-1911). In G. Muratore, *Cantieri romani del Novecento. Maestranze, materiali, imprese, architetti nei primi anni del cemento armato*, Roma, Archivio Izzi 1995, p. 187.

Fig. 2 Disposizione delle armature nei brevetti Coignet, Hennebique, Waiss. In N. de Tedesco, A. Maurel, *Traité théorique et pratique de la résistance des matériaux appliquée au béton et au ciment armé*, Paris, Lib Polytechnique Ch. Béranger 1904, p. 128.

lato delle difficoltà nella gestione del problema dell'aderenza tra i due componenti, dall'altro l'aleatorietà nel raggiungere il conseguente comportamento omogeneo, qualità più volte riportata nella tecnica come necessaria. Il problema dell'aderenza viene affrontato mediante lo studio di molteplici soluzioni della foggia delle barre e della disposizione delle armature per incrementare la superficie di contatto tra i due materiali (Fig. 1).

Il problema dell'omogeneità e dell'incertezza delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera, sono chiaramente espressi tecnicamente nell'aleatorietà della definizione del coefficiente n^2 , di difficile valutazione, che risulta un ostacolo per la progettazione. L'esito di questa difficoltà tecnica porta a considerare nulla la resistenza a trazione del calcestruzzo e una riduzione di quella a compressione dell'armatura. Un'altra problematica emersa e documentata da una serie di prove sperimentali condotte da vari autori, oggetto di discussioni e proposte tecniche, è sull'effetto dell'azione tagliante nelle travi inflesse (Figg. 2-3). Il dibattito rimane acceso sino alla definizione della teoria di Morsh³ che definisce una nuova modalità per affrontare il problema dell'effetto tagliante sulle travi inflesse.

A seguito di queste evidenti problematiche, molti scienziati sottolineano come l'arditezza e la difficoltà teorica e sperimentale nell'approcciare il 'nuovo materiale', obblighi a separare l'operato del professionista da quella dello studioso. L'ing. Canevazzi, uno dei docenti di Nervi, distingue l'attività di ricerca e sperimentazione da quella dell'ingegnere progettista che non può padroneggiare la materia in modo così dettagliato e certo (Fig. 4)⁴.



Dans le système Hennebique, la barre inflechie dans la partie centrale est certainement une des plus heureuses conceptions, puisqu'elle joue le rôle de barre tendue, par suite de l'encastrement (voir fig. 34). M. Hennebique admet naturellement aussi la barre comprimée (fig. 35), quand la résistance du houllis est insuffisante.

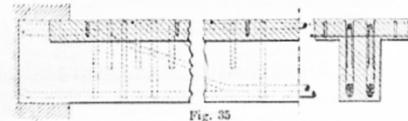


Fig. 35

ment (voir fig. 34). M. Hennebique admet naturellement aussi la barre comprimée (fig. 35), quand la résistance du houllis est insuffisante.

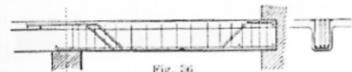


Fig. 34

Le système Wayss se rapproche beaucoup au point de vue théorique du système précédent (fig. 36).

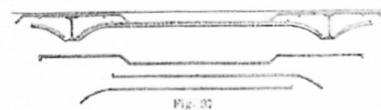


Fig. 36

Pour mémoire le mode de construction Wayss combine (fig. 37) avec des fers à plancher.

Fig. 37

ESSAIS DES POUTRES HENNEBIQUE
préparées en Août 1894 par M. l'ingénieur de Mollins
à l'Entrepôt de Lausanne
et détruites le 20 décembre 1894

Première Poutre (voir fig. 186 et 187)

Pression en atmosphères	Flèches observées	Observations
millimètres		
5	—	6 Vérins : diamètre 145 mm. $m = 103,86 \text{ mmq}$.
0	0	$S = 104 \text{ emq}$.
10	2,7	1 atm. = 104 kg.
0	0	pour chaque vérin.
15	5	Les vérins hydrauliques
0	1,5	sont communicants
$G^* 18$	rupture 13,3	

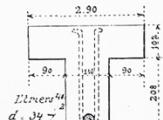


Fig. 186

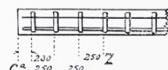


Fig. 187

Rupture à l'appui de gauche (voir fig. 188).

Rupture qualifiée d'anormale par M. de Mollins qui n'avait jusqu'ici vu que des ruptures au milieu de la poutre.

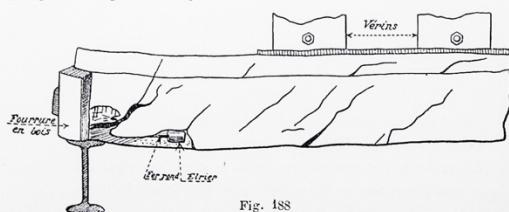


Fig. 188

Il n'y avait pas d'étrier à l'extrémité (voir fig. 188), malgré les indications de M. de Mollins.

Fig. 3 La crisi di resistenza a taglio evidenziata dalle sperimentazioni porta ad una serie riflessione sull'inadeguatezza delle modalità di armatura correnti nei confronti di questo problema. In N. de Tedesco, A. Maurel, *Traité théorique et pratique de la résistance des matériaux appliquée au béton et au ciment armé*, Paris, Lib Polytechnique Ch. Béranger 1904, pp. 385 e 386.

Scribe Canevazzi:

Il ferrocemento, in base alla sua definizione, è necessariamente un corpo eterogeneo; il modulo di elasticità del metallo è circa dieci volte più grande di quello che compete al calcestruzzo cementizio. La teoria quindi della sua resistenza non può essere che quella, che corrisponde all'equilibrio dei corpi eterogenei in generale, tenendo conto delle eventuali accidentalità, che uno dei materiali componenti potesse presentare nel suo modo di resistere... Queste condizioni imponevano di svolgere la teoria del ferrocemento considerandolo come un corpo eterogeneo composto di due materiali, uno dei quali, il calcestruzzo, incapace di resistere a sforzi di tensione e scorrimento... La teoria che verrà svolta è appunto informata a questo criterio, soltanto sono state aggiunte in via complementare le indicazioni delle modificazioni, che essa dovrebbe subire qualora si volesse tener conto della debole, e spesso incerta, resistenza a tensione dello smalto cementizio... Mentre per i problemi dell'arte dell'ingegnere... allo stato attuale delle cognizioni soltanto la teoria che trascura ogni eventuale resistenza a tensione del materiale cementizio può essere impiegata correntemente con sicurezza e completa confidenza.

Tutte queste considerazioni si muovono all'interno di un panorama normativo estremamente complesso e frammentato. A tal riguardo si fa notare che la prima normativa sulle opere in calcestruzzo armato risale al 1907 e riguardava esclusivamente oggetti di competenza del Ministero dei Lavori Pubblici⁵, mentre l'estensione a strutture di edifici privati è stata emanata nel 1927, realtà che ha condizionato ulteriormente la complessità delle azioni progettuali e conseguentemente operative.

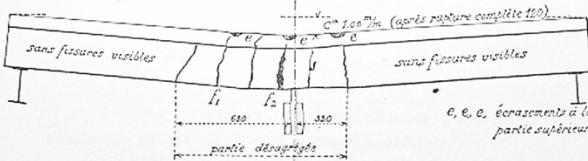
Deuxième poutre (voir fig. 189)

Pression en atmosphères	Flèches observées	Observations
5	—	millimètres
0	0	$C^* 2 \frac{1}{2}$
10	2,7	$\frac{1}{2}$
0	0	6 $\frac{1}{2}$
15	5	rupture $C^* 100$
0	1,5	
$G^* 18$	rupture 13,3	

Rupture subite au milieu et chute sur les cales.
Le fer n'est pas cassé, il est allongé au milieu.

L'largeur des fentes : f_1 environ 5 mm.
 f_2 , 10 mm.
après rupture complète 2 cm.

(voir fig. 190).



L'largeur des fentes : f_1 environ 5 $\frac{1}{2}$ mm

f_2 , 10 $\frac{1}{2}$ mm (après rupture complète 2 $\frac{1}{2}$ cm)

Fig. 190

Troisième poutre

La poutre est placée sens dessus-dessous.

Profil comme ci-dessus.

L'ouvrier ayant pompé trop vite, la pression s'est élevée presque tout d'un coup et la rupture a eu lieu immédiatement (le manomètre a indiqué jusqu'à 13 atmosphères) et on n'a pu mesurer aucune flèche.

On décide d'essayer la même poutre reposée à l'endroit.

Fig. 190

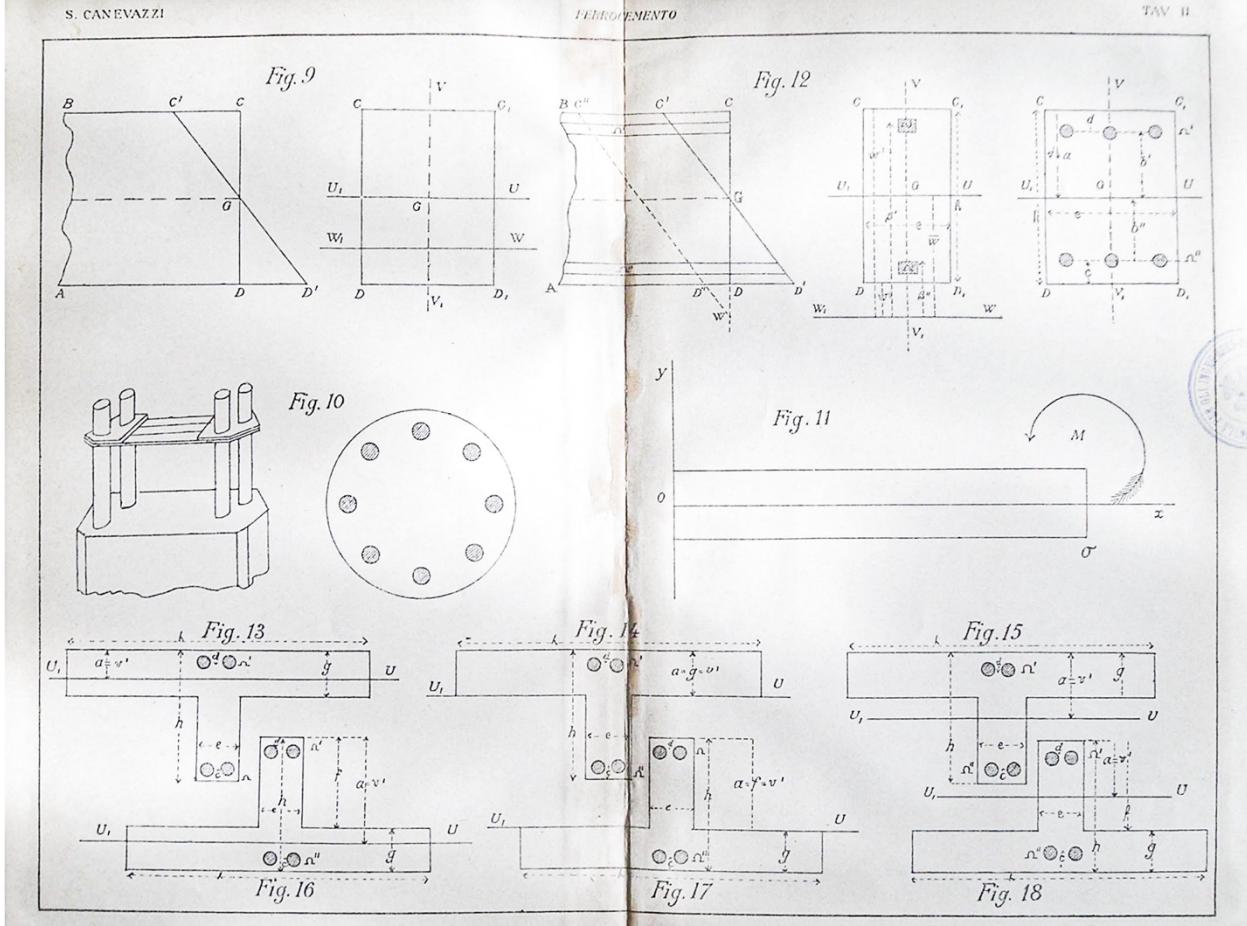


Fig. 4 Tavola rappresentativa delle tecniche di armatura in sezioni in calcestruzzo armato e distribuzione delle tensioni. In S. Canevazzi, *Ferro cemento, cemento armato, smalto cementizio armato: formule di elasticità e resistenza*, Torino, Soc. Editrice Successori A. F. Negro e C. 1904.

Queste circostanze portano, da un lato, al diffondersi della prassi di dimensionamenti tabellari e di manuali di pronto uso, caratterizzati da una significativa semplificazione dei calcoli, e dall'altro, a favorire attività in cui la componente sperimentale acquista il valore di prassi, possibilità resa possibile solo a fronte della fama, al prestigio e alla rilevanza intellettuale di poche figure di riferimento (Fig. 5).

Tali condizioni generano, nello sviluppo progettuale, sensibili modifiche e adattamenti delle forme strutturali, con particolare riferimento alla dimensione e alla foggia di sezioni e nodi costruttivi. Aspetti che, a fronte dell'attuale normativa di riferimento per le strutture in calcestruzzo armato esistenti⁶, pongono alcune problematiche nella definizione della sicurezza.

La normativa attuale stabilisce, per la valutazione della capacità residua, oltre ad indagini dirette e all'analisi degli elaborati di progetto, il necessario riferimento alla normativa vigente al momento della realizzazione. Si riscontra un'oggettiva difficoltà di comparazione, venendo a mancare un chiaro possibile confronto, complicato ulteriormente dalla numerosità delle soluzioni adottate in passato e dalla mancanza di uno studio sistematico sull'effettiva efficacia e sul livello della prestazione ottenibile, anche alla luce degli attuali avanzamenti nelle

a appris que l'axe des fibres neutres se trouvait à une faible distance au-dessus du sommet des poutrelles. Soit x cette distance.

Épaisseurs <i>e</i>	Hauteurs <i>h</i>	Section du métal <i>M</i> par mètre carré	Kilogrammètres <i>μ</i> par mètre carré
centimètres	centimètres	centimètres carrés	kilogrammètres
5	11,875	6,667	1 187
	20	9,074	2 722
	30	10,385	4 673
	40	11,078	6 617
	50	11,508	8 631
	100	12,400	18 600
6	14,25	8	1 710
	20	10	3 000
	30	11,818	5 318
	40	12,700	7 674
	50	13,396	10 047
	100	14,660	21 990
7	16,625	9,333	2 327
	20	10,674	3 202
	30	13,050	5 877
	40	14,348	8 600
	50	15,161	11 866
	100	16,852	25 278
8	19	10,667	3 040
	20	11,111	3 333
	30	14,117	6 353
	40	15,757	9 454
	50	16,700	12 503
	100	18,974	28 461
9	21,375	12	3 847
	30	15	6 750
	40	17,012	10 213
	50	18,303	13 727
	100	21,030	31 545
	23,75	13,333	4 750
10	30	15,714	7 070
	40	18,146	10 888
	50	19,697	14 772
	100	23,016	34 540

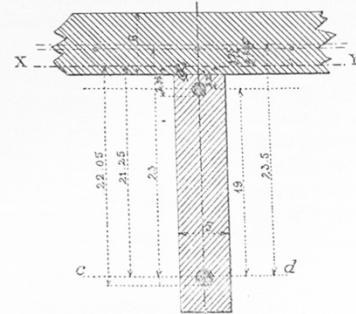


Fig. 54

« Si l'on prend (fig. 54) pour axe des moments la ligne *cd*, les diverses sections à considérer et leur distance à l'axe des moments sont, pour les 5 poutrelles réunies d'une largeur de plate-bande de 3°, 22.

Désignation	Sections en centimètres carrés	Distances à l'axe des moments en centimètres carrés
Plate bande C (Béton)	322 (6 - <i>x</i>)	13,5 + $\frac{x^2}{2}$
32 fils transversaux de 4 millimètres (<i>m</i>)	4	23
5 barres de 14 millimètres (<i>m</i>)	7,70	19
5 . . . 16 . . . (M)	10,05	0

La distance de l'axe des moments à la fibre neutre sera égale à la somme des moments de ces diverses sections, divisée par la somme des sections. Le rapport *a* étant supposé égal à 20, chaque section métallique sera multipliée dans cette équation par 20; on aura donc pour la distance *d* cherchée :

$$d = \frac{322 (6 - x) \left(23,5 + \frac{x^2}{2} \right) + (4 \times 23 \times 20) + (7,7 \times 19 \times 20)}{322 (6 - x) + (4 \times 20) + (7,7 \times 20) + 10,05 \times 20}$$

Fig. 5 Pre-dimensionamenti, dimensionamenti tabellari ed indicazioni. In E. Coignet, N. de Tédesco, *Du calcul des ouvrages en ciment avec ossature métallique*, Paris, Société des Ingénieurs Civils de France 1894, pp. 155 e 142.

conoscenze della tecnica delle costruzioni.

Di non secondaria importanza è la problematica relativa alla diffusione del calcestruzzo armato nel consolidamento degli edifici storici. L'inserzione occulta di rinforzi in calcestruzzo armato e non armato all'interno di compagini storiche, il ricorso a strutture ausiliarie o sostitutive degli organismi esistenti introduce ulteriori problematiche nell'affrontare la necessità, o meno, di intervenire per garantire la sicurezza delle strutture esistenti (Fig. 6).

La disattesa necessità di apprezzare in modo circostanziato l'effettiva capacità residua delle strutture del Novecento, in assenza di campagne di studio teorico e sperimentale, porta all'oblio, e spesso, alla demolizione di strutture realizzate da figure note prevalentemente agli studiosi del settore. Protagonisti che hanno consentito la diffusione del cemento armato, contribuendo a portare l'architettura delle nuove costruzioni nel Moderno e a definire una prassi nell'ambito del restauro in cui contemporaneità e Storia si fondono in un unico atto progettuale e costruttivo.



Fig. 6 Vercelli, Basilica di S. Andrea, consolidamento della copertura progettato dall'ingegnere Antonio Giberti nel 1927 (foto P. Faccio, 2019).

¹ PAOLO FACCIO, *Antonelli versus Danusso. Il consolidamento della cupola di San Gaudenzio a Novara*, Quaderni della ricerca. Dipartimento di Culture del progetto, in Marzia Marandola, Marko Pogacnik (a cura di), *Ingegneria italiana del Novecento. Scuole e protagonisti*, Milano- Udine, Mimesis 2022, pp. 90-101; ERICA LENTICCHIA, ROSARIO CERAVOLO, PAOLO FACCIO, *Understanding the structures of Pier Luigi Nervi: a multidisciplinary approach*, «VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability», n. 8, 2023, pp. 66-75.

² Il coefficiente di omogeneizzazione n consiste nel valore numerico che contraddistingue il rapporto tra i moduli elastici dei due materiali, conglomerato cementizio e acciaio.

³ EMIL MÖRSCH, *Le béton armé, étude théorique et pratique*, Parigi, Béranger 1909.

⁴ Silvio Canevazzi, docente di meccanica applicata alle costruzioni dal 1877 a Bologna, fonda il laboratorio. Tra i suoi allievi Pier Luigi Nervi.

⁵ Norme e condizioni per i materiali agglomerati idraulici e per le opere in cemento armato, R.D. 10 gennaio 1907.

⁶ Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 17 gennaio 2018.