

Tra teoria strutturale e pratica costruttiva: il disegno nei solai nervati di Pier Luigi Nervi

Francesco Romeo

Introduzione

Tra le numerose soluzioni strutturali che hanno caratterizzato l'opera di Pier Luigi Nervi (1891-1979), massimo esponente italiano dell'ingegneria strutturale del Novecento, i solai nervati secondo le linee isostatiche di flessione costituiscono un esito emblematico della sintesi tra logica strutturale, efficienza costruttiva e qualità espressiva. In questa soluzione, più che in altre, il disegno assume un ruolo determinante nel tradurre il principio statico in architettura costruita, configurandosi come strumento critico di selezione: attraverso di esso, tra le molteplici soluzioni riconducibili a un medesimo principio, vengono individuate quelle capaci di coniugare correttezza costruttiva ed efficacia espressiva.

Per i solai nervati, come per la sua intera attività di progettista e costruttore, Nervi fa un uso estremamente consapevole del disegno e della fotografia, andando oltre l'impiego consueto di tali strumenti da parte degli ingegneri strutturalisti. Tale attenzione si inserisce coerentemente nel *modus operandi* di una figura che si presenta sempre nella duplice veste di ideatore ed esecutore.

Da un lato, il disegno manuale bidimensionale è cruciale non solo per il controllo geometrico e costruttivo delle soluzioni strutturali e architettoniche ma anche per la loro comunicazione alla committenza. A questo proposito Nervi stesso osserva: «la presentazione grafica di un'idea architettonica è una cosa difficile ed imperfetta. Il disegno

Articolo a invito per inquadramento del tema del focus, non sottoposto a revisione anonima, pubblicato con responsabilità della direzione.

è sempre un interprete molto infedele della realtà architettonica; solo il progettista è in grado di materializzarla con procedimenti mentali, raffronti o riferimenti assolutamente personali e non comunicabili. [...] si pensi quindi quale sia la difficoltà di una scelta architettonica per la quale, a tutte le deficienze della rappresentazione grafica, si aggiungono il fatto della dimensione [...] e la preoccupazione derivante dalla importanza morale e materiale che sono sempre unite ad una costruzione edilizia» [Nervi 1945].

Dall'altro lato, il mezzo fotografico assume un ruolo centrale per l'impatto comunicativo e per l'affermazione internazionale di Nervi come progettista, configurandosi sia come strumento di documentazione del processo costruttivo sia come archivio visivo per i lavori futuri. Come per molte innovazioni nerviane, anche i solai nervati secondo le linee isostatiche di flessione sono accompagnati da un apparato di disegni e fotografie che non si limita alla fase progettuale o all'opera compiuta, ma documenta l'intero processo realizzativo, restituendo una testimonianza grafica densa di significato.

Per comprendere l'emergere, alla fine degli anni Quaranta, dei solai nervati secondo le linee isostatiche di flessione all'interno del lessico nerviano, è necessario considerare sinteticamente i molteplici fattori che ne hanno determinato la genesi: la filosofia progettuale di Nervi, il contesto tecnico-scientifico, il contributo dell'ingegnere Aldo Arcangeli (1916-2000) e le possibilità costruttive offerte dal periodo storico [Iori 2012; Halpern, Billington, Adriaenssens 2013; Neri 2014; Gargiani, Bologna 2016; Lembo 2026].

Già nel 1945, in *Scienza o Arte del Costruire?*, riflettendo sul rapporto tra forma architettonica e potenzialità dei nuovi materiali, Nervi risponde al timore di un inaridimento spirituale della tecnica in questi termini: «L'avvicinarsi con animo modesto alle misteriose leggi della natura, lo sforzo di interpretarle e quel comandarle ubbidendo che è l'unico modo per portare la loro maestosa eternità a servizio dei nostri limitati e contingenti scopi, ha in sé una profonda poesia, che può tradursi in forme di una elevata espressività estetica e artistica» [Nervi 1945].

In questa prospettiva, la forma strutturale non è mai arbitraria, ma discende dalla comprensione dei meccanismi statici e dalla loro corretta interpretazione. Tale principio trova una formulazione più esplicitamente operativa nel 1951: «Ritengo di poter affermare che, per i solai in cemento armato con carichi uniformemente distribuiti, la soluzione-tipo sia già stata individuata. Essa è data dalla disposizione delle nervature lungo le isostatiche dei momenti principali:

una disposizione proposta e studiata teoricamente da un mio collaboratore, l'ingegnere Aldo Arcangeli, e resa concretamente attuabile da un particolare procedimento costruttivo, di mia ideazione, che permette di eseguire nervature di qualsiasi forma senza apprezzabili variazioni di costo. Le isostatiche sono infatti le linee preferenziali dei flussi di forza all'interno di un solido, e concentrare la materia resistente lungo di esse garantisce la massima efficienza statica. Queste linee dipendono unicamente dal gioco delle forze agenti nel sistema, e la nostra unica possibilità è scoprirle e sfruttarle, non certo modificarle» [Nervi 1951].

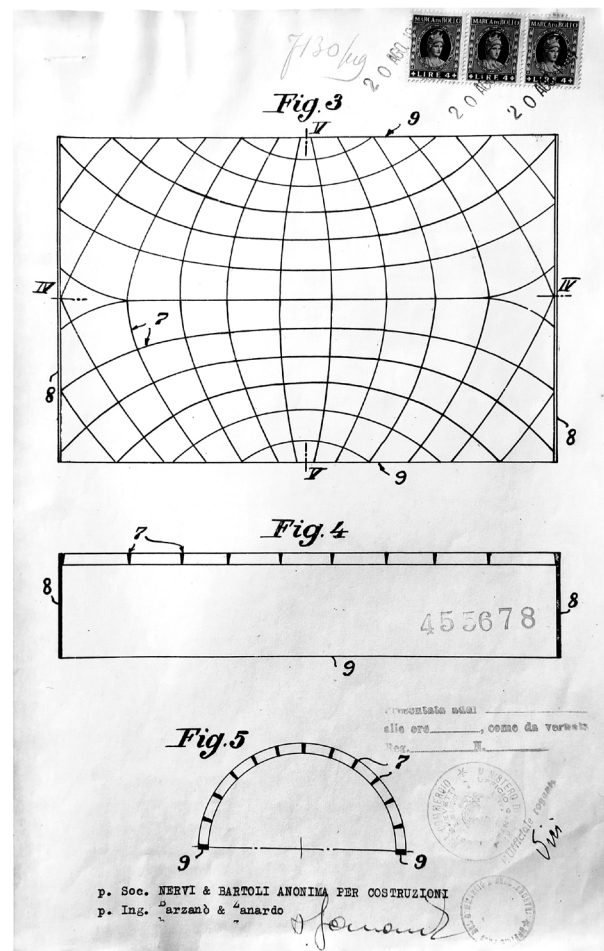
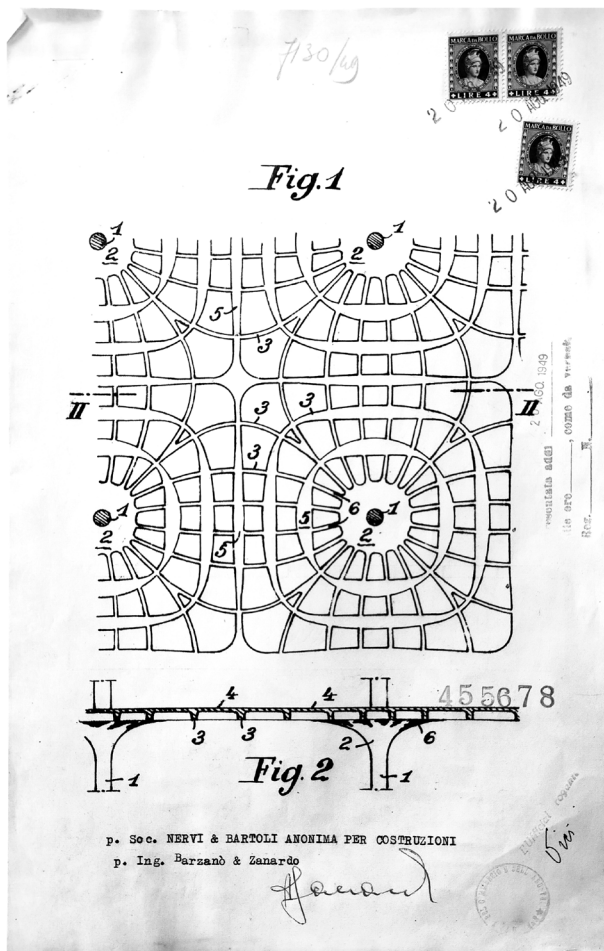
Tra l'enunciato teorico del 1945 e la formulazione applicativa del 1951 si collocano i brevetti depositati nel 1949, dai quali prende avvio la traduzione del principio delle linee isostatiche in un sistema costruttivo.

I brevetti del 1949

Il brevetto n. 455678, intitolato *Perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o tre dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali*, viene depositato il 23 luglio 1949 dalla Società Ing. Nervi & Bartoli a nome dell'ingegner Arcangeli. In quegli anni Arcangeli collabora con Pier Luigi Nervi sia come dipendente della società di costruzioni Nervi & Bartoli sia come assistente presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Roma La Sapienza. Il brevetto sintetizza la teoria delle linee isostatiche, ne individua i possibili campi di applicazione e ne evidenzia i vantaggi economici, derivanti dalla concentrazione della materia resistente lungo tali linee [Arcangeli 1949] (fig. 1).

Il 23 luglio 1949, lo stesso giorno del deposito del brevetto sulle linee isostatiche a nome di Arcangeli, Nervi deposita il brevetto n. 455750, terzo completivo al brevetto principale n. 406296 del 15 aprile 1943, intitolato *Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate*. Il completivo riguarda una specifica applicazione del procedimento descritto nel brevetto principale e nei due precedenti completivi, relativa alla preparazione di casseri e forme in ferrocemento per il getto di solai, pilastri e strutture in cemento armato, in sostituzione delle tradizionali casseforme lignee. Come esplicitato nel testo descrittivo, il sistema, pur illustrato con riferimento a solai e travetti incrociati, è indipendente dalla geometria delle nervature, che possono essere

Fig. 1. Brevetto n. 455678 del 23 luglio 1949, Società Nervi & Bartoli, inventore A. Arcangeli (Archivio Centrale dello Stato).



rettilinee o curve, disposte in uno o più sensi, in funzione delle esigenze statiche, senza modificare la sostanza concettuale ed esecutiva del procedimento [Nervi 1949] (fig. 2). In sintesi, mentre il brevetto depositato a nome di Arcangeli espone il fondamento teorico delle linee isostatiche, ne individua le possibili applicazioni e ne evidenzia i vantaggi economici, il completivo di Nervi fornisce un metodo costruttivo efficace per la realizzazione di tali strutture, rendendo praticabili la monoliticità dell'opera finita e la libertà formale.

Il contesto teorico

Per chiarire il fondamento scientifico dell'innovazione proposta, è opportuno richiamare sinteticamente alcuni principi della meccanica dei solidi che ne costituiscono il presupposto teorico.

Nella meccanica dei solidi, lo stato di tensione indotto da azioni meccaniche in un corpo è descritto dalla tensione, o sforzo, di Cauchy, che dipende dal punto considerato e dalla normale al piano su cui la tensione agisce. Riferendo la tensione a una terna intrinseca, a ogni giacitura sono associate una componente normale e due componenti tangenziali. Le giaciture su cui agiscono tensioni puramente normali sono dette "giaciture principali"; le normali mutuamente ortogonali che le individuano costituiscono le direzioni principali. L'involuppo delle direzioni principali in ogni punto del corpo definisce tre famiglie di curve mutuamente ortogonali, dette "linee isostatiche". Lungo tali linee agiscono esclusivamente tensioni assiali (di trazione o compressione), che assumono valori estremali rispetto alle tensioni normali agenti sulla stella dei piani passanti per il punto.

Quando una dimensione del corpo è molto minore delle altre due, il problema può essere riferito alla superficie media (lastre e gusci sottili), sulla quale le linee isostatiche si riducono a due famiglie di curve ortogonali. Analogamente, per corpi bidimensionali soggetti a flessione, quali piastre e gusci in regime flessionale, i concetti precedenti restano validi sostituendo alle tensioni normali e tangenziali i momenti flettenti e torcenti. Si introducono così i momenti principali e le traiettorie dei momenti principali, o linee isostatiche di flessione, lungo le quali agisce sola flessione, in assenza di torsione; la loro configurazione dipende dalla geometria del corpo, dalle condizioni di carico e dalla natura e disposizione dei vincoli.

Fig. 2. Brevetto n. 455750 del 23 luglio 1949, a nome Pier Luigi Nervi (Archivio Centrale dello Stato).

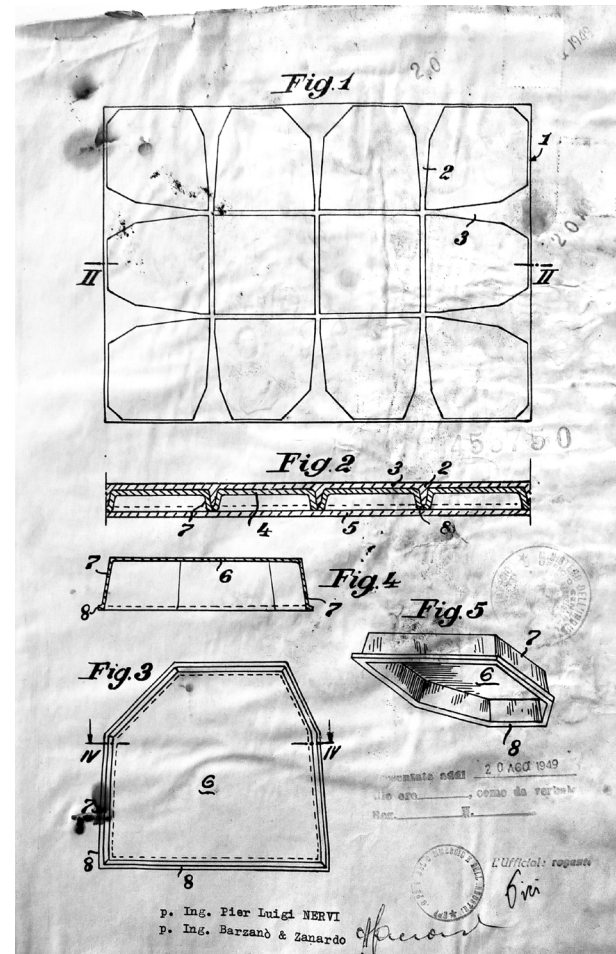
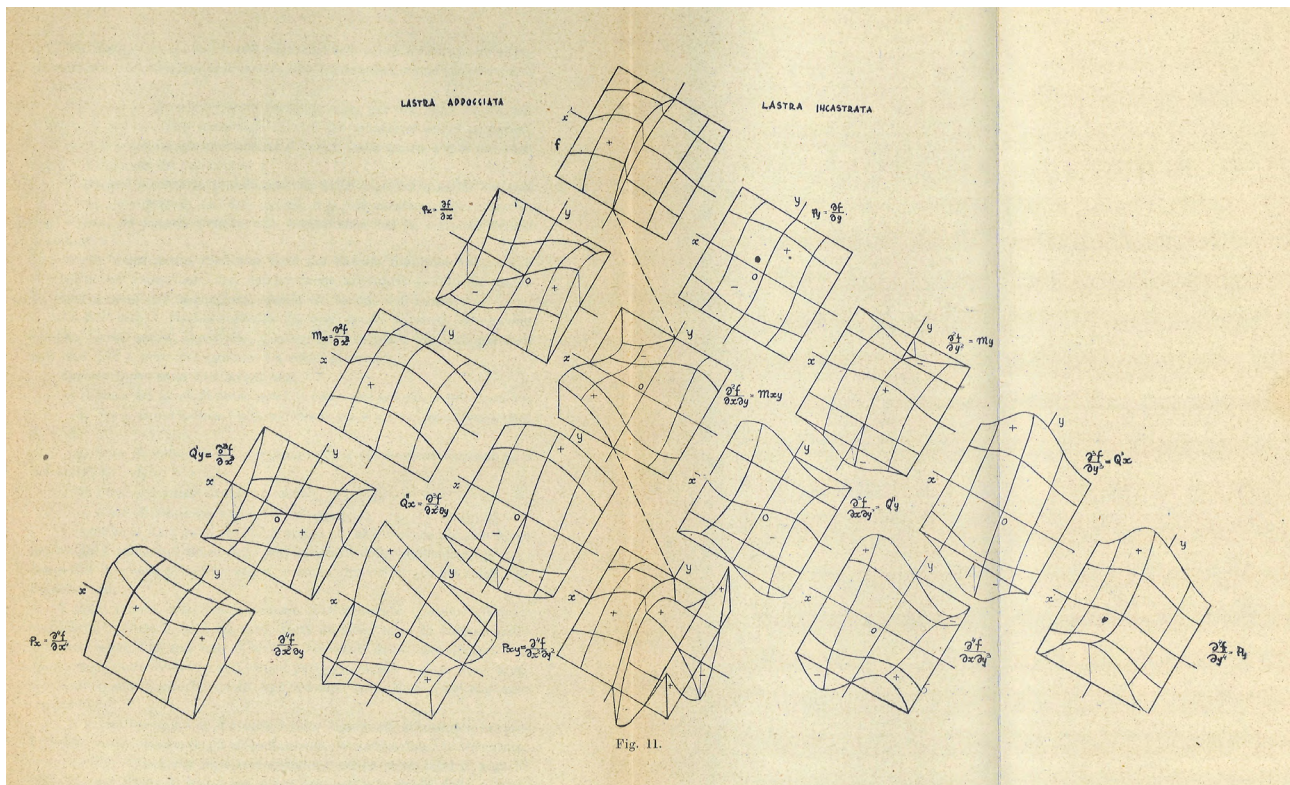


Fig. 3. Superfici delle derivate della funzione "f", spostamento verticale della lastra: Kambo 1944, p. 34.



Il tracciamento delle linee isostatiche di flessione è governato da un'equazione differenziale del primo ordine, funzione dei momenti flettenti e torcenti, che nella teoria classica delle piastre sottili si ricavano dall'integrazione dell'equazione biarmonica della superficie elastica. Le soluzioni esatte sono tuttavia limitate a pochi casi notevoli; i principali metodi disponibili nel secondo dopoguerra forniscono soluzioni solo per configurazioni semplici e ricorrenti nella pratica [Belluzzi 1947], espresse in serie trigonometriche doppie (Navier), serie iperboliche semplici (Lévy-Estanave) o mediante metodi alle differenze finite (Nielsen, Marcus). A questi si affiancano tentativi di semplificazione dell'onere analitico, quali il metodo dei solidi arbitrari di Kambo [Kambo 1944], secondo cui le isostatiche di flessione sono ottenibili dalle superfici della terza riga della figura 3, e il "circolo delle curvature" (circonferenza di Mohr).

Arcangeli può dunque contare su un numero ristretto di soluzioni analitiche e su risultati numerici tabellati per casi notevoli; dai suoi appunti manoscritti emerge, in particolare, la familiarità con la soluzione in serie iperboliche semplici riportata nel testo di Nadai [Nadai 1925] [1]. In figura 4 sono mostrati schizzi di Aldo Arcangeli riferiti al caso di piastra appoggiata su tutti i lati e sui quattro vertici [Lembo 2026].

Di fronte ai limiti dell'analisi teorica, messi in evidenza fin dall'inizio del Novecento dalle possibilità progettuali innovative offerte dal cemento armato, molti ingegneri ricorrono sistematicamente alla sperimentazione. Si tratta di un approccio che accomuna Nervi a figure centrali dell'architettura strutturale del XX secolo [Chiorino 2010] e che si concretizza, nel suo caso, nella collaborazione con il Laboratorio Prove Modelli e Costruzioni fondato da Arturo Danusso presso il Politecnico di Milano.

Nel settimo capitolo di *Costruire correttamente* [1955], Nervi sottolinea la superiorità del metodo sperimentale per la comprensione del reale funzionamento statico dei sistemi resistenti, soffermandosi in particolare sui metodi estensimetrici e fotoelastici. Il quadro teorico entro cui tali metodi si collocano è chiarito da Enrico Volterra, che già nel 1930 introduce il metodo fotoelastico come strumento capace di «vedere ciò che si manifesta nell'interno di un'opera sottoposta a forze esterne», paragonandolo ai raggi Roentgen della medicina [Volterra 1930]. È verosimile che Nervi si interessi a tali metodi anche in virtù delle applicazioni condotte da Danusso con il suo allievo Guido Oberti fin dai primi anni Trenta [Danusso 1932],

Fig. 4. Disegno di linee isostatiche di flessione di una piastra quadrata in relazione al vincolo: in alto, lati appoggiati; in basso: angoli appoggiati (Roma, Archivio Arcangeli, Fascicolo A 237).

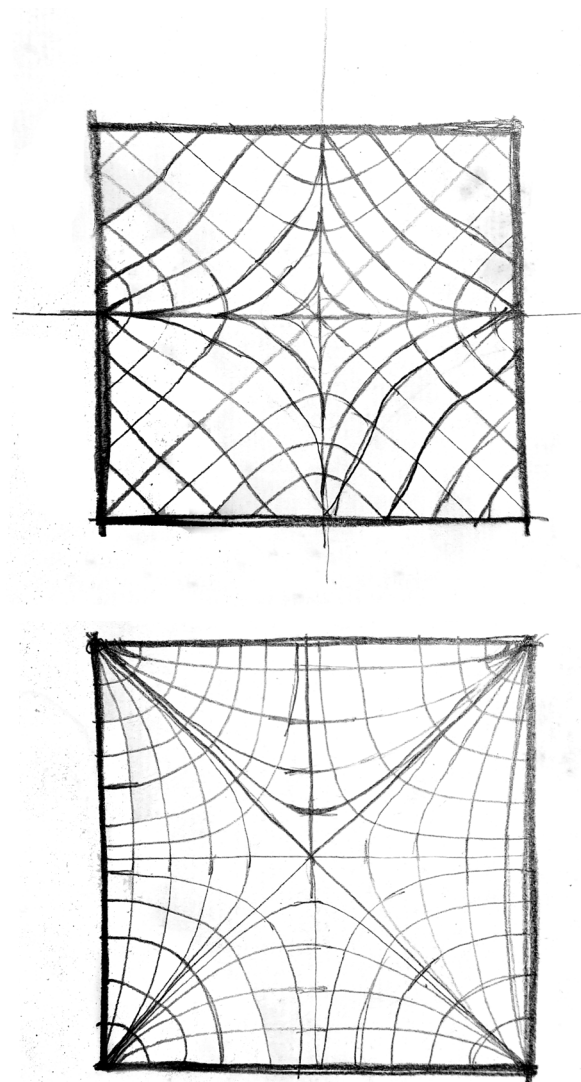


Fig. 5. Schemi illustrativi alternativi di costruzione delle linee isostatiche a partire dalle isocline: Frocht 1941, pp. 199, 200.

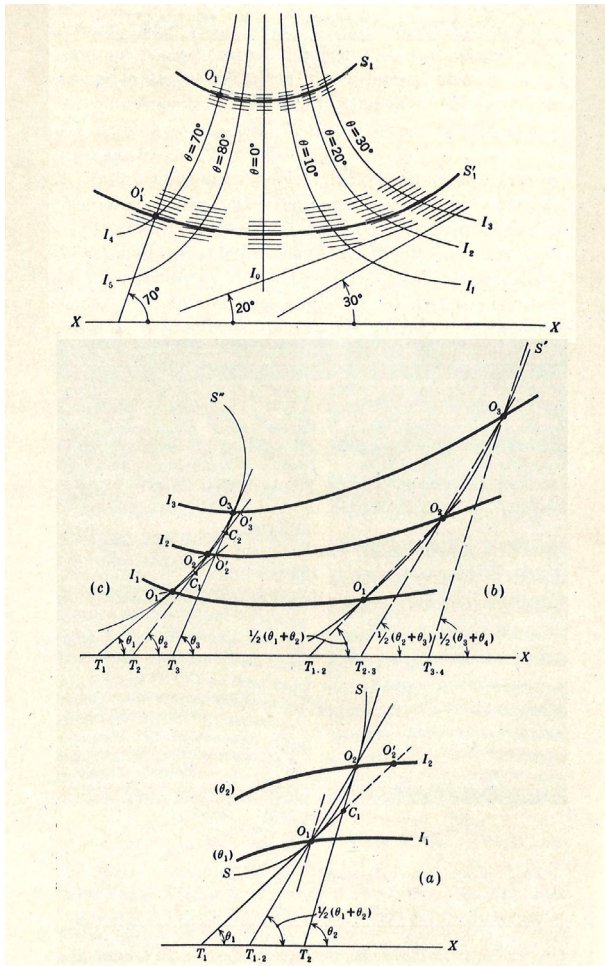
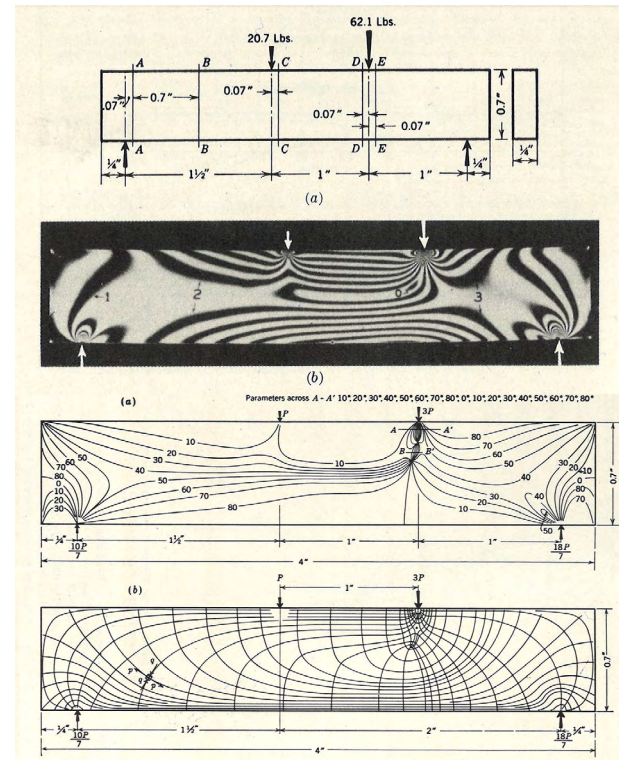


Fig. 6. Schema di prova sperimentale, esame fotoelastico, linee isocline e isostatiche: Frocht 1941, pp. 258, 259.



cogliendo, come egli stesso scrive, «la bellezza e poesia di questo tramutarsi degli stati di sollecitazione in giochi luminosi» [Nervi 1955]. L'interesse di Nervi per la fotoelasticità, testimoniato dalle immagini conservate negli archivi dello Studio e pubblicate in *Costruire correttamente*, si inserisce in questo contesto. Il metodo consente una rappresentazione visiva immediata dello stato tensionale interno di un corpo: il reticolo delle isocline restituisce l'orientamento delle tensioni principali, mentre quello delle isocromatiche ne fornisce l'intensità relativa. A partire dalle isocline fotografate è possibile ricostruire, mediante procedimenti grafici [2], il reticolo delle linee isostatiche (figg. 5, 6); la determinazione delle singole tensioni principali richiede invece metodi integrativi, quali il metodo di Mesnager o l'integrazione grafica basata sulle formule di Maxwell. In questo quadro, la sperimentazione non si configura tanto come uno strumento operativo diretto di progetto [3], quanto come un dispositivo conoscitivo capace di orientare la comprensione dei flussi di sollecitazione e di alimentare, sul piano grafico, la costruzione di schemi strutturali coerenti con il comportamento reale delle strutture.

Il contesto applicativo

La proposta dei solai nervati secondo le isostatiche di flessione si inserisce nel più ampio sviluppo dei solai in cemento armato, avviato già alla fine dell'Ottocento. Dalla lastra Monier (1869) ai solai Hennebique con nervature principali e secondarie (1898), fino ai sistemi a fungo di Turner (1907) e Maillart (1908), l'evoluzione dei solai in cemento armato è accompagnata da una fitta produzione brevettuale, volta a trasformare sperimentazioni pionieristiche in pratiche costruttive consolidate. Queste prime soluzioni, pur efficaci sotto il profilo statico, mostrano presto limiti legati al peso proprio, al consumo di materiale e alle prestazioni acustiche.

La ricerca si orienta inizialmente verso la riduzione dello spessore delle solette mediante l'infittimento delle nervature secondarie, e successivamente verso la sostituzione del calcestruzzo nelle zone tese con materiali più leggeri, come il laterizio. Si diffondono così sistemi con elementi alleggeriti disposti al di sotto dell'asse neutro, tra nervature parallele o incrociate ortogonalmente, che progressivamente soppiantano i solai in cemento armato con nervature a vista. Tra i sistemi a doppia orditura si segnalano, in particolare, quelli di Bollinger (1902) e Danusso (1911).

In questo contesto si colloca l'inizio dell'attività professionale di Nervi, che nel 1913 entra nella Società Anonima per Costruzioni Cementizie del professor Attilio Muggia (1861-1936), concessionaria del brevetto Hennebique per l'Emilia-Romagna e le Marche. L'innovazione tecnica diviene da subito un tratto distintivo della sua opera. Il perfezionamento costruttivo descritto nel completivo del 1949 rappresenta infatti l'esito di un lungo percorso di sperimentazioni [Greco 2008]. All'interno di questo quadro, il disegno strutturale assume il ruolo di strumento di controllo di un processo costruttivo avanzato, nel quale la prefabbricazione consente di raggiungere livelli di complessità tecnica e raffinatezza formale difficilmente ottenibili con il getto in opera e con le casseforme lignee tradizionali. Nel completivo del 1949, ad esempio, è descritto un sistema di casseri in ferrocemento disposti su un ponte abbassabile e traslabile, che permette il disarmo e il riutilizzo progressivo delle forme nella realizzazione di solai di grandi dimensioni a scomparti ripetitivi, ottimizzando tempi, costi e qualità esecutiva.

Fig. 7. Pianta e sezione del solaio del piano interrato del Lanificio Gatti: Lembo 2026, p. 138.

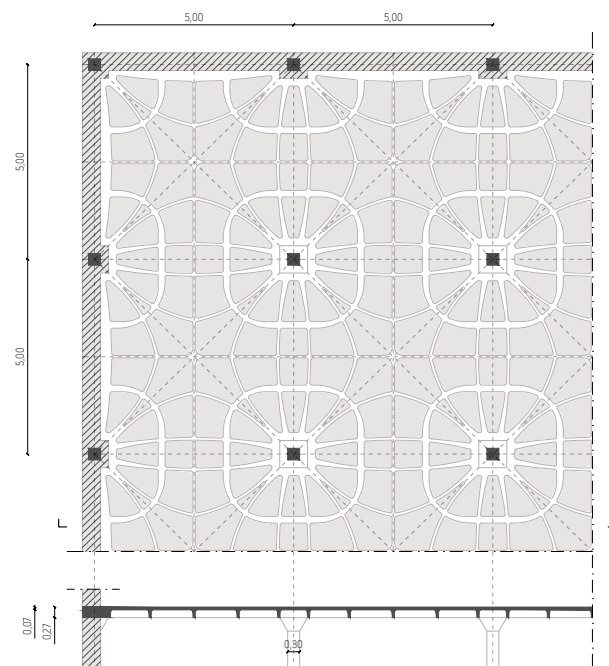
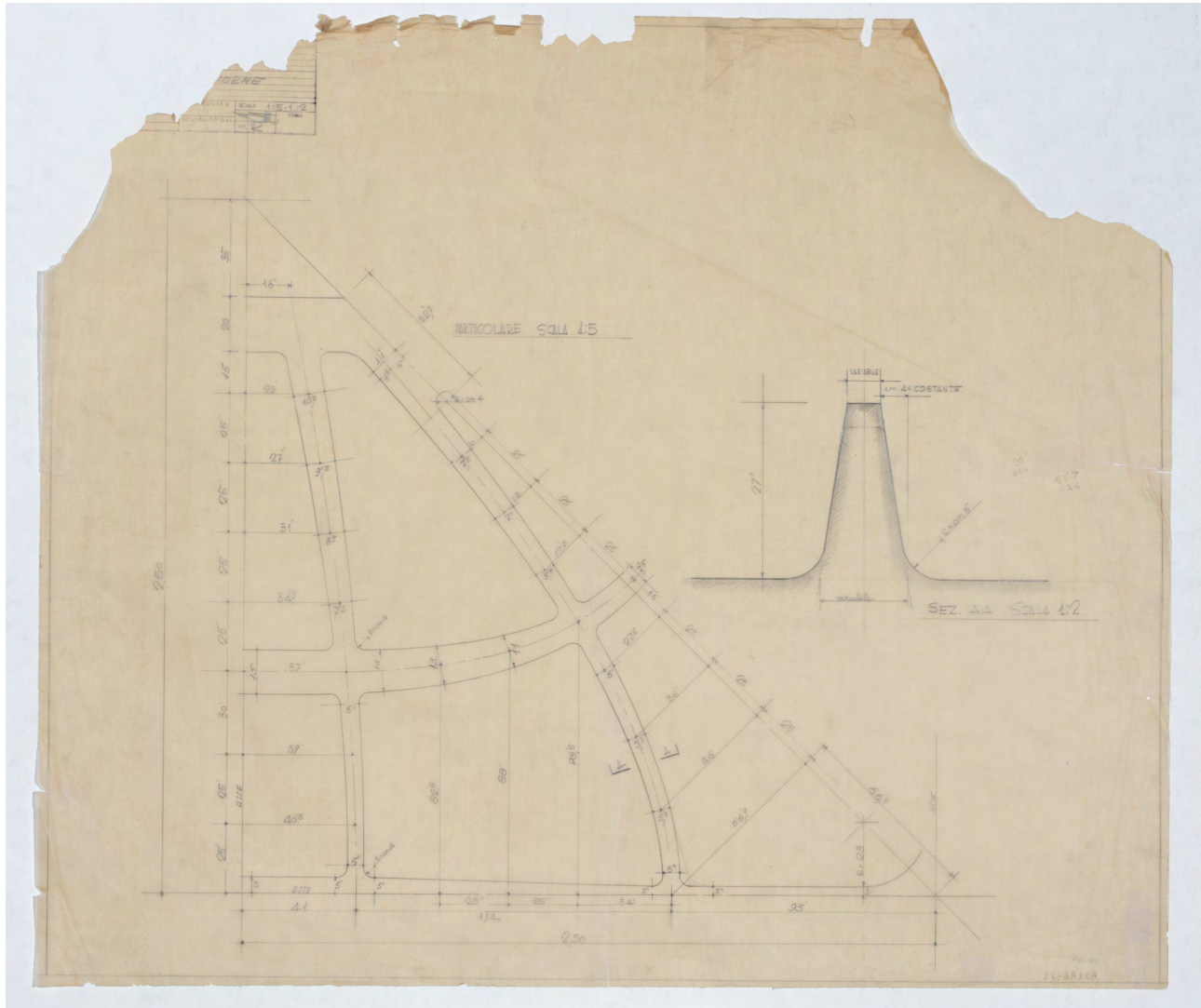


Fig. 8. Tracciamento degli assi e degli spessori delle nervature del solaio del Lanificio Gatti, scala 1:10 e 1:5 (Parma, CSAC).



Progetti e realizzazioni

Fin dalle prime applicazioni delle soluzioni brevettate nel 1949 emerge l'impossibilità di un rispetto rigoroso delle linee isostatiche di flessione. Nel passaggio dalla piastra continua al solaio costituito da soletta e nervature, la geometria della piastra originaria risulta infatti alterata e, con essa, la disposizione delle linee isostatiche. In aggiunta, le condizioni al contorno possono variare tra la fasi esecutive e la configurazione finale. Ne consegue che, come osservato da Mario Desideri, indipendentemente dall'accuratezza con cui tali traiettorie vengono determinate, si tratterà sempre di solai a nervature curvilinee "ispirate" alle linee isostatiche di flessione, piuttosto che di una loro trasposizione esatta [Castelli, Del Monaco 2011]. Tale consapevolezza non ostacola il ricorso a questa soluzione, inizialmente proposta come variante dell'orditura rettilinea ortogonale tradizionale e progressivamente affermata come scelta autonoma, fino a essere richiesta dalla committenza.

Nel corso di circa trent'anni, dalla fine degli anni Quaranta alla fine degli anni Settanta, Pier Luigi Nervi e lo Studio Nervi progettano e realizzano numerosi solai a nervature curvilinee riconducibili, a vario titolo, alle linee isostatiche di flessione. Si tratta di strutture riferibili a piastre di dimensioni, forme, vincoli e condizioni di carico molto differenti, per le quali le configurazioni isostatiche ideali assumono geometrie estremamente variabili. Prescindendo dalle intenzioni formali del progettista, l'individuazione esatta di tali linee risulta preclusa sia dai limiti delle conoscenze teoriche e degli strumenti di calcolo disponibili, sia da modalità esecutive non sempre praticabili. Le soluzioni proposte, realizzate o rimaste allo stadio progettuale, possono quindi essere interpretate come compromessi tra geometrie teoriche – potenzialmente infinite – e vincoli costruttivi, dando luogo a un ampio repertorio di variazioni sul tema, riflesso nella varietà degli elaborati grafici necessari alla loro definizione e realizzazione. Una misura della "distanza" tra le isostatiche ideali e le nervature effettivamente realizzate può essere efficacemente valutata attraverso l'entità dei momenti torcenti [Lembo, Bologna, Romeo 2024].

Una volta individuata la configurazione delle nervature, il calcolo delle armature a flessione e taglio viene condotto considerando ciascuna nervatura come rettilinea, con luce pari allo sviluppo della curva e vincolo di semincastro alle estremità, trascurando gli effetti torsionali, compensati dalle nervature intersecanti. I carichi, determinati in base alle aree di influenza, sono assunti in via cautelativa come concentrati nei punti di incrocio.

Fig. 9. Armatura dei riquadri laterali del solaio del Lanificio Gatti, scala 1:10 (Parma, CSAC).

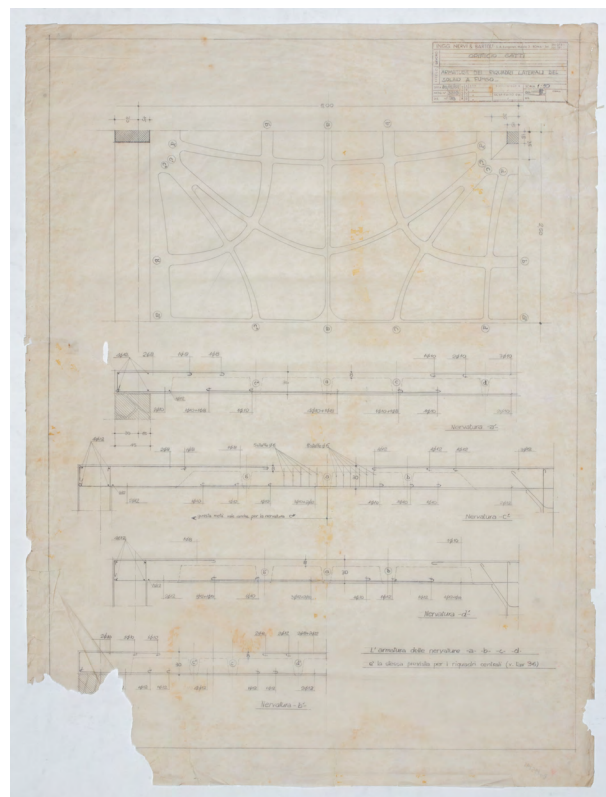


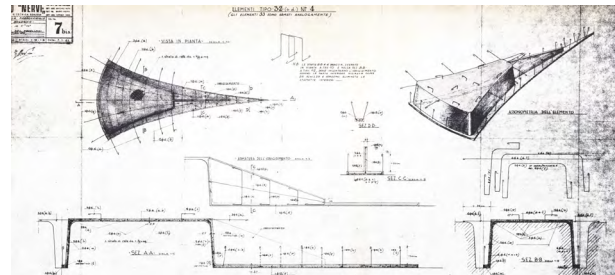
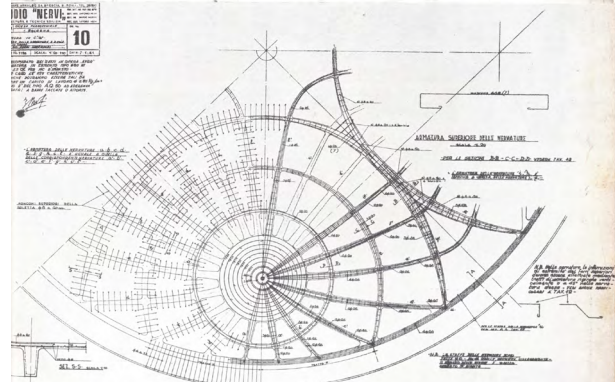
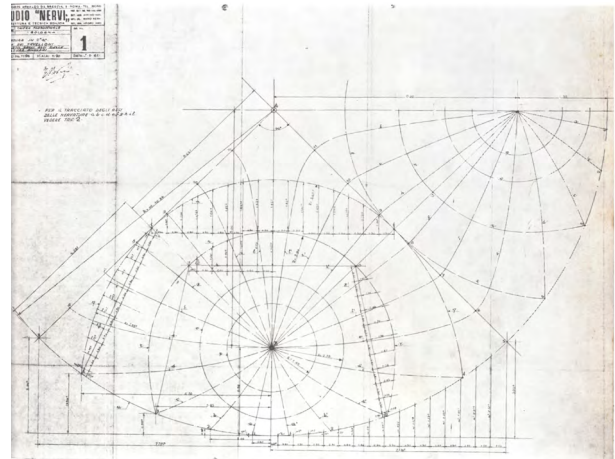
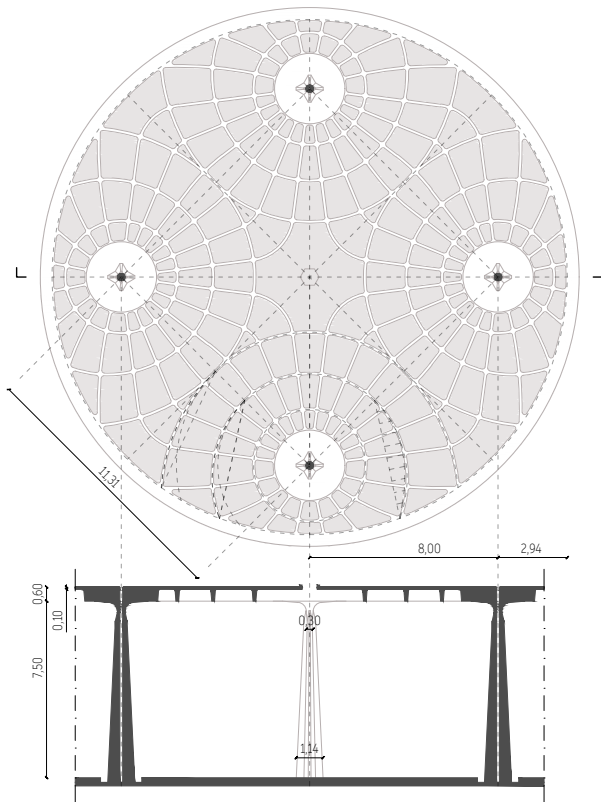
Fig. 10. Fotografia di dettaglio delle nervature del solaio del Lanificio Gatti (fotografia @ Matteo Cirenei).



Fig. 11. Pianta e sezione della copertura della Chiesa del Cuore Immacolato di Maria a Borgo Panigale: Lembo 2026, p. 155.

Fig. 12. Copertura della Chiesa del Cuore Immacolato di Maria a Borgo Panigale: in alto, tracciamento degli assi; in basso, armatura superiore delle nervature, scala 1:20: Nervi 1961.

Fig. 13. Copertura della Chiesa del Cuore Immacolato di Maria a Borgo Panigale, tavelloni in ferroceemento (tipo 32), scala 1:10 e 1:5: Nervi, Vaccaro 1961.



Ai primi anni Cinquanta risalgono le prime applicazioni con casseforme in ferrocemento: il solaio della Manifattura Tabacchi di Roma (1951), con una campata centrale quadrata e una laterale rettangolare, e la variante non realizzata del solaio su maglia rettangolare del Magazzino ballette della Manifattura Tabacchi di Bologna. Allo stesso periodo appartiene anche il Lanificio Gatti (1951-1953), progettato con Carlo Cestelli Guidi (1906-1995), caratterizzato dal solaio del piano interrato basato su una maglia quadrata di 5×5 m, ripetuta su 6×15 campate (fig. 7).

Il disegno delle casseforme in ferrocemento con la relativa dima, mostrato in figura 8, si riferisce al modulo minimo che, per effetto della doppia simmetria, si riduce a un triangolo isoscele pari a un ottavo del quadrato. I casseri relativi a una campata tra quattro pilastri sono montati su ponteggi mobili, secondo una tecnica già sperimentata per il solaio del Magazzino ballette. La disposizione planimetrica delle nervature è in parte riconducibile alla piastra quadrata vincolata al centro e in parte alla piastra su quattro appoggi

ai vertici, mentre la sezione variabile segue l'andamento delle sollecitazioni [Lembo 2026]. Come indicato in figura 9, le nervature sono armate per momenti flettenti positivi in campata e negativi in prossimità degli allineamenti tra i pilastri, dove ferri di attesa garantiscono la continuità tra campi adiacenti (fig. 10). A queste esperienze iniziali segue la pensilina trapezoidale per l'ingresso nord del Segretariato del Palazzo UNESCO (1952-1958), realizzata con casseforme in legno.

Tra le numerose realizzazioni successive si distingue per geometria la copertura circolare su quattro pilastri della Chiesa del Cuore Immacolato di Maria a Borgo Panigale (1957-1962) progettata con Giuseppe Vaccaro (1896-1970) (fig. 11). Per questa copertura, di 11 m di raggio, vengono realizzate a terra 59 forme al negativo tramite dei blocchi in muratura rifiniti esternamente di gesso (fig. 12); con queste forme, corrispondenti a un solo quadrante della copertura, vengono realizzati i relativi tavelloni in ferrocemento (fig. 13) la cui qualità esecutiva connota

Fig. 14. Intradosso della copertura della Chiesa del Cuore Immacolato di Maria a Borgo Panigale (fotografia @ Matteo Cirenei).



[illegible]

l'intradosso della copertura (fig. 14). Ulteriori opere significative vedono la luce negli anni Sessanta: il solaio perimetrale a campi trapezoidali del Palazzo dello Sport di Roma (1958-1960), il solaio su maglia quadrata del primo mezzanino del Palazzo del Lavoro di Torino (1959-1961) e il solaio della sede della Cassa di Risparmio di Venezia (1963-1972) (fig. 15). Per quest'ultimo, di particolare rilevanza strutturale per dimensioni e carichi, viene condotta un'indagine sperimentale presso l'Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) di Bergamo su un modello in scala 1:25 che conferma l'approccio conservativo utilizzato nel calcolo. Accanto a queste opere, si susseguono progetti nei quali le nervature, pur mantenendo un andamento curvilineo, perdono progressivamente il riferimento alle linee isostatiche di flessione e il ruolo genuino di "decorazione profonda" [Rappaport 2006]. Ciò avviene sia sul piano geometrico, con la violazione dell'ortogonalità tra le due famiglie di curve (progetti per il Centro culturale di Tripoli, il Centro sportivo in Kuwait, la torre del Centro MLC a Sydney e la

filiale della Banca d'Italia a Cosenza), sia sul piano statico, quando si ignorano le condizioni di vincolo o quando il solaio si riduce a mero controsoffitto, come nel caso dell'Aula delle Udienze Pontificie in Vaticano (1963-1971).

Conclusioni

I solai nervati secondo le linee isostatiche di flessione mostrano come il disegno possa tradurre principi teorici in soluzioni costruibili ed espressive. La geometria delle nervature nasce dall'incontro tra rigore scientifico e lettura visiva dei flussi di forze, che ispira la forma. Pur senza seguire rigidamente le traiettorie ideali, il disegno consente di rendere operative le intuizioni statiche e di controllare soluzioni complesse. Così, nell'opera di Nervi la forma strutturale si costruisce attraverso un processo conoscitivo in cui teoria, visione e costruzione si fondono, rendendo il disegno strumento centrale di progetto.

Note

[1] È interessante notare che tra gli appunti di Arcangeli, accanto alla soluzione analitica in serie per la determinazione dei momenti flettenti e torcenti della piastra quadrata in campata, appare l'indicazione per il calcolo approssimato dei momenti negativi per i solai a fungo nella zona adiacente ai pilastri che considera una piastra circolare appoggiata di raggio pari a 1/5 del lato caricata con il carico distribuito e una reazione al centro verso l'alto: Nadai 1925.

[2] Per la determinazione delle linee isostatiche si adottano procedimenti grafici basati sulle isocline che equivalgono alla soluzione per via grafica di equazioni differenziali a partire dai valori delle derivate.

[3] Al metodo fotoelastico Nervi ricorse nel 1965 per il progetto realizzato del Motta Grill di Limena per dedurre lo stato tensionale piano nelle grandi travi parete caratterizzate da 13 aperture ottagonali di dimensioni variabili: Neri 2014.

Autore

Francesco Romeo, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma, francesco.romeo@uniroma1.it

Riferimenti bibliografici

Arcangeli, A. (1949). «Perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o a tre dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali», Società Nervi & Bartoli, inventore: Aldo Arcangeli (Brevetto N. 455678 - Roma, 23 luglio 1949).

Belluzzi, O. (1947). *Scienza delle costruzioni*, vol. 3. Bologna: Zanichelli.

Castelli, F.R., Del Monaco, A.I. (a cura di). (2011). *Pier Luigi Nervi e l'architettura strutturale*. Roma: EdilStampa.

Chiorino, M.A. (2010). La sperimentazione nell'opera di Pier Luigi Nervi. In C. Olmo, C. Chiorino (a cura di). *Pier Luigi Nervi: architettura come sfida*. Cinisello Balsamo-Bruxelles: Silvana-Civa PLNProject.

Danusso, A. (1932). Indagini sperimentali sulle costruzioni. *La fotoelasticità*. In *Seminario Mat. e Fis. di Milano*, 6, pp. 203-215.

Frocht, M. (1941). *Photoelasticity*, vol. I. New York: John Wiley & Sons.

Gargiani, R., Bologna, A. (2016). *The rhetoric of Pier Luigi Nervi. Concrete and ferrocement forms*. Oxford: EPFL Press.

Greco, C. (2008). *Pier Luigi Nervi. Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948*. Lucerna: Quart Edizioni.

Halpern, A.B., Billington, D.P., Adriaenssens, S. (2013). The Ribbed Floor Slab Systems of Pier Luigi Nervi. In *Journal of the International Association for Shell and Spatial structures*, vol. 54, nn. 2, 3, pp. 127-136.

lori, T. (2012). Le plancher a nervures isostatiques de Nervi. In R. Gargiani (a cura di). *L'architrave le plancher la plate-forme: Nouvelle histoire de la construction*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, pp. 755-760.

Kambo, L. (1944). *Le lastre piane*. Roma: Bardi Editore.

Lembo, M. (2026). *I solai a linee isostatiche di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli. Diagrammi di sforzi e forme costruite*. Tesi di dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio. Relatore prof. G.P. Consoli, correlatore prof. A. Bologna, prof. F. Romeo. Politecnico di Bari.

Lembo, M., Bologna, A., Romeo, F. (2024). Nervi's Isostatic Lines' Inspired Floor Slabs. Beyond the Archetypal Gatti Woolen Mill in Rome. In S. Gabriele, A. Manuella Bertetto, F. Marmo, A. Micheletti (Eds.). *Shell and Spatial Structures*. Proceedings of IWSS 2023, pp. 51-61. Cham: Springer.

Nadai, A., (1925). *Die elastischen Platten*. Berlin: Springer Verlag.

Neri, G. (2014). *Capolavori in miniatura. Pier Luigi Nervi e la modellazione strutturale*. Mendrisio: Mendrisio Academy Press.

Nervi, P.L. (1945). *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*. Roma: Edizioni della Bussola (ristampe Milano: Città Studi Edizioni, 1997, 2014).

Nervi, P.L. (1949). 3° *Completivo al brevetto principale n. 406296 del 15 aprile 1943, avente per titolo «Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate»* (Brevetto N. 455750 - Roma, 23 luglio 1949).

Nervi, P.L. (1951). Le proporzioni nella tecnica. In *Domus*, n. 264-265, pp. 45-48.

Nervi, P.L. (1955). *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*. Milano: Hoepli (II ed. aggiornata e rivista, Milano 1965).

Nervi, P.L., Vaccaro, G. (1961). Chiesa e complesso parrocchiale del Cuore Immacolato di Maria nel quartiere INA-Casa a Borgo Panigale 1952-1962. In *Chiesa e Quartiere. Quaderni di Architettura Sacra*, n. 20, pp. 74-98.

Rappaport, N. (2006). Deep Decoration. In *Decoration. 30/60/90. Architectural Journal*, n. 10, pp. 95-105. New York: Princeton Architectural Press.

Volterra, E. (1930). La fotoelasticità e le sue applicazioni nell'interno dei corpi elastici. In *L'ingegnere rivista tecnica del Sindacato nazionale fascista ingegneri*, vol. IV, n. 8, pp. 516-530.