Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

I solai a linee isostatiche di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli. Diagrammi di sforzi e forme costruite.

This is a PhD Thesis

Original Citation:
I solai a linee isostatiche di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli. Diagrammi di sforzi e forme costruite / Lembo, Marta. - ELETTRONICO. - (2026).

Availability:
This version is available at http://hdl.handle.net/11589/296280 since: 2026-01-25

Published version
DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)

23 April 2026



I solai a linee *isostatiche* di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli

Diagrammi di sforzi e forme costruite

Dottoranda: Marta Iembo
Tutor: Gian Paolo Consoli
Co-tutor: Alberto Bologna
Co-tutor: Francesco Romeo

MO. 144.53

Politecnico di Bari

dipartimento Architettura Costruzione Design

DEPARTMENT OF ARCHITECTURE, CONSTRUCTION AND DESIGN

DESIGN FOR HERITAGE: KNOWLEDGE AND INNOVATION PH.D. PROGRAM

CONOSCENZA E INNOVAZIONE NEL PROGETTO PER IL PATRIMONIO

SSD CEAR-11/A - 08/CEAR-06

Course n°37, 01/11/2021-30/04/2025

Marta lembo

I solai a linee *isostatiche* di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli.

Diagrammi di sforzi e forme costruite.

The *isostatic* line floor slabs of Pier Luigi Nervi and Aldo Arcangeli.

Stress diagrams and constructed forms.

Supervisors

Tutor: Prof. Gian Paolo Consoli
Co-tutor: Prof. Alberto Bologna
Co-tutor: Prof. Francesco Romeo

Coordinator of Ph.D Program

Prof. Carlo Moccia

Referees

Prof. Marco di Prisco
Prof. Roberto Gargiani

Abstract

La ricerca indaga il rapporto tra forma architettonica ed efficienza strutturale, con particolare attenzione ai solai a linee isostatiche sviluppati dallo studio Nervi alla fine degli anni Quaranta. Queste strutture si fondano sulla teoria statica delle piastre, secondo cui l'eliminazione dei momenti torcenti lungo specifiche direttrici - le linee isostatiche - porta ad un'ottimizzazione del comportamento strutturale. L'osservazione della forte espressività formale di tali solai, in cui le nervature curvilinee sembrano rendere visibile l'andamento degli sforzi interni, costituisce il punto di partenza dell'indagine. La tesi si propone di valutare in che misura tale espressività corrisponda a principi strutturali razionali e se, nel tempo, si sia prodotto uno scostamento tra i presupposti teorici e le realizzazioni concrete.

L'obiettivo è chiarire l'approccio progettuale di Pier Luigi Nervi, nel quale convergono rigore tecnico, competenza costruttiva e sensibilità estetica. Dopo aver ricostruito e organizzato le conoscenze attuali sulla genesi e lo sviluppo di questa particolare tipologia strutturale, la ricerca esplora la relazione tra struttura, costruzione e forma, assumendo la natura transdisciplinare del progetto come fondamento metodologico. In quest'ottica, lo studio, ripercorrendo le modalità del processo progettuale, adotta un approccio integrato, che pone sullo stesso piano fonti, strumenti e documenti di diversa provenienza e natura.

Il lavoro si articola in due sezioni complementari. La prima parte, di natura storico-architettonica, ricostruisce lo sviluppo concettuale e costruttivo dei solai a linee isostatiche, a partire dalle fonti teoriche e progettuali. Viene delineato il contesto culturale e tecnico entro cui matura questa tipologia strutturale, con attenzione ai principi dell'"architettura strutturale" sostenuti da Pier Luigi Nervi. Un ruolo centrale è attribuito alla figura di Aldo Arcangeli, autore di uno dei due brevetti depositati nel 1949, che introduce il principio del tracciamento delle nervature secondo le linee isostatiche, intese come strumento di ottimizzazione di tutti i modelli strutturali. In questa fase viene analizzata anche l'evoluzione formale dei solai, evidenziandone la varietà espressiva e costruttiva. Le fonti archivistiche esaminate, tra cui disegni, appunti, schizzi e corrispondenze, rivelano un processo di sviluppo progettuale ricco e articolato, in cui la componente sperimentale ha un ruolo centrale.

La seconda sezione, di natura tecnico-analitica, si propone di verificare la coerenza tra i solai realizzati e i principi teorici da cui derivano, analizzando il rapporto tra forma, comportamento statico e modalità costruttive. L'indagine si concentra su un insieme selezionato di casi studio, per i quali è stata condotta un'analisi comparativa che integra valutazioni qualitative e misurazioni quantitative, finalizzata a determinare la distanza tra il tracciato delle nervature realizzate e le linee isostatiche teoriche. Lo studio considera inoltre le risorse progettuali e di calcolo disponibili nel periodo di riferimento, distinguendo tra approcci empirici, fondati su prove sperimentali condotte su modelli in scala, e strumenti analitici allora impiegati. Questo confronto consente di delineare i limiti e le potenzialità operative delle tecniche di modellazione adottate e di valutare in che modo esse abbiano influenzato la forma architettonica e le soluzioni costruttive effettivamente adottate.

In sintesi, la ricerca propone una lettura della "sincerità statica" di Nervi non come applicazione dogmatica di un principio unico, ma come pratica progettuale artigianale fondata su un equilibrio consapevole tra conoscenza strutturale, abilità costruttiva e intenzione formale, adattato di volta in volta al singolo progetto.

I solai a linee *isostatiche* di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli.

Diagrammi di sforzi e forme costruite.

Dottoranda: Marta Lembo

Tutor: Gian Paolo Consoli

Co-tutor: Alberto Bologna

Co-tutor: Francesco Romeo

Indice

Introduzione 11

PARTE PRIMA 13

1 Note introduttive 14

2 Premesse 18

2.1 Il contesto 19

2.1.1 Uso del cemento armato e brevetti precedenti 20

2.1.2 L'architettura strutturale 27

2.1.3 Sperimentazioni precedenti 29

2.1.4 La ricerca sperimentale 33

2.2 Pier Luigi Nervi 44

2.2.1 L'ingegnere: sensibilità statica 49

2.2.2 L'imprenditore: la prefabbricazione, ferrocemento e il sistema Nervi 52

2.2.3 L'*artista*: l'architettura di forme e caratteri immutabili 61

2.2.4 Gli scritti di Pier Luigi Nervi. Dichiarazioni di intenti 67

3 Genesi dei solai a linee isostatiche 71

3.1 Le linee isostatiche 73

3.1.1 Determinazione delle linee isostatiche di tensione per via fotoelastica 75

3.1.2 Le linee isostatiche al di là del funzionamento a lastra 79

3.1.3 Riflessioni sulle linee isostatiche 81

3.2 Aldo Arcangeli **83**
3.2.1 Formazione, studi, professione 83
3.2.2 Rapporti con lo studio Nervi 88

3.3 Due brevetti depositati da Arcangeli e Nervi **91**
3.3.1 Brevetto 455678 Roma, 23 luglio 1949 93
3.3.2 Brevetto 455750 Roma, 23 luglio 1949 98
3.3.3 Altre applicazioni delle linee isostatiche 101

4 Sviluppo dei solai a linee isostatiche **102**

4.1 Progetti dello Studio Nervi. Una tipologia e le sue diverse declinazioni **108**
4.1.1 Linee isostatiche a fungo su maglia quadrata 109
4.1.2 Linee isostatiche su altre forme 113
4.1.3 Linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie 117
4.1.4 Linee su altre superfici piane orizzontali e verticali 121

5 Alcune conclusioni **125**

PARTE SECONDA **133**

1 Analisi del rapporto tra forma, costruzione e struttura. **134**

1.1 Parametri e ipotesi **136**

1.2 Metodo **136**

1.3 Casi studio **137**
1.3.1 Lanificio Gatti, Roma 138
1.3.2 Palazzo Unesco, Parigi 149
1.3.3 Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Borgo Panigale (BO) 155

1.3.4 Sede della Cassa di risparmio, Venezia 160

1.4 Conclusioni dell'analisi 166

2 Analisi delle possibilità di calcolo 167

2.1 Relazioni di Calcolo per il progetto della Sede della Cassa di Risparmio 168

2.1.1 Relazione ISMES. Esperienza su modello elastico. 169

2.1.2 Relazione di Calcolo dello Studio Nervi 170

2.1.3 Conclusione dell'analisi delle relazioni 177

2.2 Metodo analitico 178

2.2.1 Soluzioni analitiche delle piastre 180

CONCLUSIONI 187

Post scriptum: le possibilità attuali 191

APPENDICI 199

Cronologia delle opere 200

Schede delle opere 192

BIBLIOGRAFIA 244

Introduzione

La presente ricerca di dottorato si propone di approfondire le tematiche connesse a uno specifico archetipo che attraversa l'intera produzione dello Studio Nervi dal 1951 fino alla sua chiusura nel 1979: i solai a linee isostatiche.

Il caso di questo tipo di solai rappresenta un unicum nella carriera di Pier Luigi Nervi, poiché costituisce l'unico modello per il quale l'ingegnere riconosce esplicitamente una parte della paternità a un collaboratore. All'interno di questa vicenda emerge infatti con particolare evidenza la figura di Aldo Arcangeli (1916-2000), giovane ingegnere che collabora con Nervi dapprima nell'impresa Nervi e Bartoli e successivamente nello Studio Nervi, affiancando l'attività professionale a quella accademica come assistente al corso di "Tecnologia dei materiali e tecnica delle costruzioni" nella Facoltà di Architettura. Ad Arcangeli spettano gli approfondimenti teorici sulle linee isostatiche applicate ai diversi modelli strutturali, mentre a Nervi va attribuita l'intuizione decisiva: l'applicazione delle linee isostatiche dei momenti flettenti ai solai piani orizzontali.

L'aspetto più interessante dei solai a linee isostatiche non risiede tanto nella loro funzione strutturale, che nella maggior parte dei casi è di modesta entità. Le luci libere tra pilastri, comprese generalmente tra i cinque e i dodici metri, non pongono infatti sfide paragonabili a quelle delle grandi coperture o delle sale monumentali. Ciò che rende questi modelli un caso di studio unico è piuttosto il processo che ne governa la progettazione e la realizzazione. Essi nascono dall'intento di ricondurre in un'unica sintesi la logica strutturale del solaio, la qualità estetica della forma e l'efficienza costruttiva (ed economica). Una sintesi resa possibile anche grazie alle invenzioni tecniche di Nervi e ai brevetti sul ferrocemento, che aprono nuove possibilità espressive e produttive.

In particolare, i solai a linee isostatiche si fondano su un principio che li distingue radicalmente: la loro configurazione deriva da leggi matematiche precise, che descrivono l'andamento dei flussi di forza all'interno delle superfici. Proprio da questa apparente rigidità prende forma la sfida progettuale più interessante: comprendere come le diverse istanze del progetto - esigenze statiche, istanze estetiche, vincoli costruttivi - possano convergere in una soluzione coerente, capace di trasformare un tracciato di calcolo in architettura.

Per tutti questi motivi, questa ricerca si concentra sullo studio della modalità progettuale che caratterizza questi solai; una modalità che non si limita a risolvere un singolo problema tecnico, ma che si configura come un approccio trasversale e, per molti aspetti, transdisciplinare. Per restituire questa complessità, il nostro lavoro si è avvalso di strumenti e metodi capaci di oltrepassare i confini di un singolo ambito disciplinare, così da abbracciare le stesse aree che i progettisti si trovano ad attraversare nel loro processo ideativo.

L'elemento innovativo con cui è stato condotto questo studio consiste nel tentativo di mettere a sistema l'intero spettro di conoscenze e capacità progettuali impiegate da Nervi, adottando strumenti il più possibile affini a quelli utilizzati nel progetto stesso. È il tema della ricerca, in questo senso, a suggerire le modalità di indagine, con l'obiettivo di individuare il metodo progettuale sotteso e di valutarne l'aderenza tra principi teorici e risultati concreti.

L'indagine integra così la ricerca storico-archivistica, finalizzata a ricostruire la genesi e lo sviluppo dei progetti, con l'analisi strutturale, che consente di valutare quanto i solai realizzati si avvicinino o si discostino dai presupposti teorici originari. Tra gli obiettivi specifici figura la raccolta e l'analisi sistematica dei progetti e delle realizzazioni, al fine di costruire una visione d'insieme capace di mettere in luce lo sviluppo progressivo di questo archetipo, le questioni approfondite di volta in volta, quelle successivamente trascurate, nonché analogie e differenze emerse negli aspetti strutturali, formali e costruttivi.

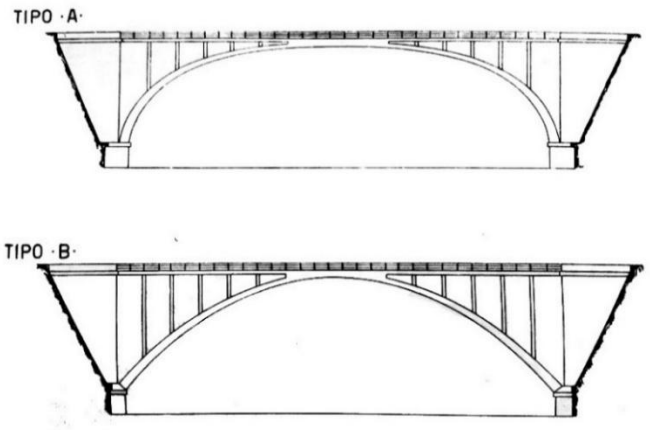
In questa prospettiva, il titolo di questo lavoro pone in evidenza la parola "isostatiche", a indicare che l'obiettivo della ricerca è quello di chiarire l'identità stessa di questi solai e di seguirne il percorso evolutivo, tra ipotesi teorica e concreta realizzazione.

Con uno sguardo più ampio, questi stessi solai vengono assunti inoltre come caso emblematico per indagare l'approccio di Nervi non soltanto a questa specifica soluzione-tipo, ma come chiave di lettura estensibile ad altre tipologie e, più in generale, all'intera produzione dell'ingegnere. Tale prospettiva consente di mettere in evidenza il rapporto tra invenzione tecnica, sperimentazione formale e pratica professionale, che costituisce il nucleo distintivo dell'opera di Pier Luigi Nervi.

Si ringraziano il Professor Gian Paolo Consoli del Politecnico di Bari e i Professori Alberto Bologna e Francesco Romeo della Sapienza-Università degli studi di Roma per il sostegno, la fiducia e le conoscenze.

PARTE PRIMA

1 Note introduttive



Tav.IV La semplice osservazione di questi due schemi di ponti dimostra quanto la spontanea ubbidienza alle leggi statiche sia condizione di buona estetica. Il tipo A, staticamente infelice, lo è anche esteticamente.

Forme e caratteri immutabili. La Soluzione-tipo dei solai a linee isostatiche

Il testo di Nervi[1] che illustra la tavola a fianco assume particolare rilevanza poiché, in poche righe, mette in discussione le pratiche tradizionali dell'architettura e i principi fondamentali della progettazione architettonica, affermando che l'unico modo per ottenere una struttura esteticamente soddisfacente consiste nel sottoporla rigorosamente alle leggi della statica. L'uso della parola "condizione" nella descrizione della tavola è particolarmente significativo, in quanto stabilisce una relazione di dipendenza imprescindibile tra la buona estetica e la correttezza statica.

Resta tuttavia incerto se la correttezza statica[2] rappresenti una condizione necessaria, ma anche sufficiente affinché una struttura sia percepita come bella. La tavola, infatti, non risponde alla questione se il rapporto tra estetica e statica sia biunivoco: ossia, se da un lato una struttura bella debba essere necessariamente

[1] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo quarto: L'architettura verso forme e caratteri immutabili.
Esiste in tutti una istintiva, se pure inconscia, sensibilità che non è, e non può essere, soddisfatta se l'opera di notevole importanza statica non risponde in modo evidente alle fondamentali leggi dell'equilibrio dei pesi e delle masse murarie.
Ho provato a disegnare due schemi di ponte (vedi Tav. IV), uno con arco portante a profilo approssimativamente ellittico, e l'altro con profilo che corrisponde alla funicolare dei carichi e si avvicina alla parabola.
La curva del primo, presa in sé come puro fatto geometrico, è senza dubbio altrettanto armoniosa e soddisfacente quanto la seconda, ma, appena le si conferisce il carattere di organo statico sostenente il carico dell'impalcato, la sua non naturalezza viene messa in evidenza.
L'architetto, che violando le più elementari leggi di economia costruttiva, realizzasse una struttura del genere, sperperando acciaio e conglomerato per vincere le sollecitazioni dovute all'illogico profilo dell'arco, farebbe in definitiva, oltreché un errore tecnico, un altrettanto grave errore estetico.
Si aggiunga infine, che, qualora il tema costruttivo superi certe dimensioni, qualunque ingegnosità di progettista non riesce a distaccarlo dal binario della più rigorosa ubbidienza alle leggi statiche; un arco di ponte di cento o più metri di luce avrà oggi, domani e sempre un uguale profilo determinato dalla funicolare dei carichi, né alcuna volontà umana potrà da esso allontanarlo.
L'edilizia cittadina rimane evidentemente più libera.
Nessuna legge statica si oppone alla costruzione di un fabbricato che risponda a uno qualsiasi dei caratteri stilistici del passato, o a quelli che la fantasia potrebbe, nel futuro, ideare.

[2] Una precisazione a riguardo è riscontrabile in Nervi, *Tecnica costruttiva ed espressività architettonica*, in P. Nardi (a cura di), Arte e cultura contemporanee, «Quaderni di San Giorgio», n. 23, Atti del IV Corso Internazionale di Alta Cultura (Venezia, Fondazione Cini, 1962), Sansoni, Firenze 1964, pp. 593-604.
Ciò che mi sembra opportuno mettere in evidenza è la constatazione che nella quasi totalità dei casi la correttezza tecnica è condizione necessaria, raramente insufficiente, di soddisfazione estetica.

staticamente corretta, dall'altro lato una struttura corretta dal punto di vista statico sarà necessariamente essere percepita come bella?

Nella sua audacia e nella presenza di interrogativi aperti[3], l'insieme di immagine e testo stimola una profonda riflessione sull'identità tra forma, struttura e costruzione[4], considerata di Nervi come l'unica strada percorribile dall'umanità che si sta avviando verso uno stile fatto di *forme e caratteri immutabili*. Se infatti la forma delle cose è sempre più determinata dalle necessità legate all'uso e al rendimento e alle possibilità costruttive legate ai nuovi materiali e alle nuove conoscenze, secondo Nervi allora è inevitabile pensare che l'indirizzo della produzione umana sia rivolto a soluzioni che via via perdono la libertà espressiva per avvicinarsi sempre più a *forme e soluzioni-tipo.*

Tra le *soluzioni-tipo* che Nervi propone come esempio vi è, come scrive egli stesso, il 'complesso' dei veicoli veloci di terra, mare e aria, dalle carrozze e dai carri a cavalli, alle navi a vela e a remi, fino ai primi aerei e dirigibili, cioè soluzioni-tipo interamente dominate dalle leggi della resistenza del mezzo e degli equilibri dinamici. A questi casi Nervi associa il caso strutturale del ponte di grande luce in cui l'inventiva del progettista è strettamente limitata dalle leggi della statica e la soluzione raggiunta sarà tanto migliore quanto più, in modesta rinuncia a personalismi inventivi, egli cercherà di ubbidire loro.

Nonostante questi casi eclatanti in cui è chiaramente condizione imprescindibile che la forma si adatti alle esigenze funzionali, Nervi aggiunge[5]:

> *Anche in campi costruttivi di minore importanza statica, la ricerca della massima economia conduce rapidamente a definire soluzioni-tipo. A questo riguardo porto, a titolo di esempio, i risultati di miei recenti studi su tipologie di solai in cemento armato, realizzati con minimo impiego di ferro e conglomerato.*
>
> *È evidente che la disposizione delle nervature di un solaio, quando la luce e il sovraccarico non sono eccessivi, gode - dal punto di vista strettamente statico - di una notevole libertà risolutiva. Ma se introduciamo nel problema il fattore del consumo dei materiali, e ci poniamo alla ricerca della soluzione che impieghi il minimo indispensabile di ferro e conglomerato, vediamo rapidamente restringersi la libertà creativa. Ci troviamo così spinti verso una soluzione-tipo, il cui raggiungimento rappresenta la "scoperta" finale che conclude una serie di "invenzioni" via via più limitate nella loro libertà.*
>
> *Ritengo di poter affermare che, per i solai in cemento armato con carichi uniformemente distribuiti, la soluzione-tipo sia già stata individuata. Essa*

[3] Questo testo riceve aspre critiche da A. Pica.
Pica A., *Senso dell'architettura*, in «Domus», n. 241, dicembre 1949, p. 26.

[4] La triade esplicitamente proposta da Nervi è: statica, funzionalità ed economia. Tuttavia è chiaro che non prenda in considerazione una categoria fondamentale, esplicitata anche nella didascalia della tavola IV di *scienza o arte del costruire?*: l'estetica. Inoltre le categorie "funzionalità" e "economia" possono essere sintetizzate nel tema della "costruzione". Per questo motivo le categorie che vengono prese in esame sono: forma, struttura e costruzione.
A questo proposito si riporta quanto scritto da A. Pica
Il Nervi, nell'opera già citata, crede di poter raggruppare nelle tre grandi categorie della statica, funzionalità ed economia quei vincoli e quei requisiti a cui l'opera architettonica deve corrispondere. Ma se così veramente fosse allora non si tratterebbe di opera architettonica ma di un qualsiasi e anonimo manufatto industriale. Questa formula non è nuova, né potrebbe esserlo perché in astratto il problema architettonico non ha nulla di nuovo, è invece l'antica e illustre formula vitruviana falsamente mutilata e inflazionata. Qui la firmitas si è tradotta molto esattamente nella statica, ma l'utilitas è stata inutilmente sdoppiata in funzionalità ed economia, la venustas e cioè la bellezza è sparita. Forse che questa, secondo l'Autore, debba essere un requisito da ignorare e trascurare? No, perché il Nervi stesso in più di un passo, discutendo di strutture e di corrispondenza di queste alla forma e viceversa, giudica, in ultima istanza, in rapporto appunto a questa bellezza, a questo prestigio formale, di cui pare vergognarsi per timore, forse, di non apparire bastevolmente spregiudicato e moderno.

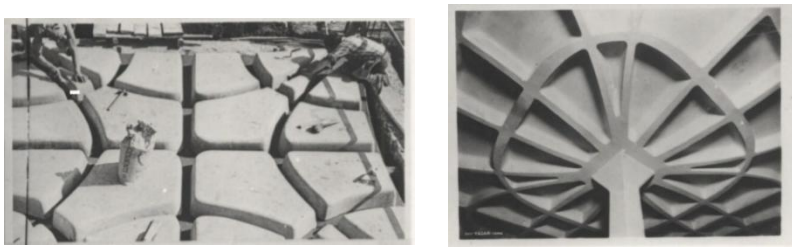
[5] Nervi P.L., *Le proporzioni nella tecnica*, in «Domus», n. 264-265, dicembre 1951, pp. 45-48. Testo della relazione presentata al convegno *De Divina Proportione*, tenutosi alla Triennale di Milano nel settembre 1951.

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.

La libertà creativa, in questo caso, è quasi totalmente scomparsa, riducendosi alla sola scelta delle isostatiche più adatte. È evidente che il passo da compiere per arrivare alla vera soluzione-tipo per determinate dimensioni e carichi è molto piccolo e facilmente superabile con pochi tentativi. Una volta raggiunta tale soluzione, e ferme restando le proprietà organiche del ferro e del conglomerato, nonché la nostra volontà di impiegarne la minore quantità possibile, la progettazione di un solaio diventa univocamente determinata.

C'è da sottolineare che, secondo la logica delle forme immutabili qui espressa, questi solai sono prodotto principalmente dell'analisi matematica e dell'invenzione costruttiva, cioè dell'innovazione prodotta dalla scienza delle costruzioni e dai nuovi materiali nei cento anni che hanno preceduto lo sviluppo di questi solai. La forma artistica delle nervature non rappresenta un artificio formale, ma scaturisce in maniera naturale da una raffinata intuizione statica.



Lanificio Gatti

Il caso delle linee isostatiche è solamente uno dei modelli in cui Nervi -accompagnato dal lavoro dello Studio Nervi e dalla Nervi e Bartoli - si cimenta, sviluppando soluzioni sempre diverse. Oltre a questo tipo di solaio sono stati proposti altri modelli che, di fatto, nel tempo, si sono costituiti come degli archetipi della produzione dello Studio Nervi. Tra questi il pilastro a sezione variabile, la superficie plissettata, le volte cassettonate, ecc.[6]

[6] Sartoris A., *Le style de Nervi* in *Architecture, formes + fonctions 1961-62,* p. 14. *Inventeur génial de formes multiples et multipliables, bâtisseur d'énormes ensembles architecturaux de caractère utilitaire, industriel, sportif, commercial, naval, aéronautique, ferroviaire, religieux, routier, militaire, public, culturel, représentatif et monumental, Nervi a créé des procédés de préfabrication d'éléments structuraux, des coffrages fixes, en coussins ou mobiles, d'une grande portée pratique, ainsi qu'une matière neuve : le fer-ciment. Il a élevé la colonne portante la plus haute de l'histoire, affronté et résolu une quantité de problèmes inédits. Dans ses constructions, Nervi applique, entre autres, la poutre radiale, la porte roulante en béton armé, l'escalier hélicoïdal en porte-à-faux à plans semi-circulaires, l'ossature portante de gratte-ciel à piliers centraux, l'élément préfabriqué en fer-ciment, le châssis porteur, l'armature de poutraison isostatique, la coque de navire en béton armé, la galerie circulaire préfabriquée, l'élément réticulaire léger, le gradin de tribune en porte-à-faux, la structure formée de murs-pignons en voile ondulé de béton armé.*
Ses poutraisons mettent en œuvre le plancher-champignon à structure nervurée isostatique, le plancher caissonné en damier, les nervures entrecroisées à angle droit, en faisceaux concentriques ou rayonnants autour de colonnes-champignons. Les caractéristiques de ses toitures sont symbolisées par la couverture plissée en béton armé, la dalle à courbure convexe, la couverture plane formée d'éléments en acier soutenus par des poteaux à plan cruciforme en béton armé de section variable.
L'essentiel de ses dômes présente la structure géodésique à éléments préfabriqués ou non, la coupole conçue comme un voile de béton à longues ondulations rayonnantes, la coupole elliptique composée d'éléments structuraux préfabriqués en fer-ciment, la couverture circulaire ondulée, la

Il presente lavoro si propone di assumere i solai a linee isostatiche come paradigma rappresentativo di altre soluzioni-tipo sviluppate da Nervi, ossia di strutture caratterizzate da un progressivo avvicinamento a una forma di perfezione che si manifesta simultaneamente sul piano statico, formale e costruttivo. In queste strutture, tali dimensioni trovano una coincidenza quasi ideale. I solai a linee isostatiche, oltre a essere presentati da Nervi stesso come soluzione-tipo, possiedono tutte le caratteristiche che ne giustificano l'inquadramento in tale categoria: derivano da formule matematiche che ne determinano con precisione la geometria, esprimono un valore estetico significativo e, infine, risultano ottimizzati dal punto di vista costruttivo grazie all'impiego dei casseri in ferrocemento, che ne facilitano l'esecuzione e ne accelerano il processo realizzativo.

structure résistante à éléments préfabriqués reposant sur piliers inclinés dans le sens des forces, la couverture ondulée en éléments préfabriqués de fer-ciment, la voûte portée par des piliers en béton armé concentrant ses poussées, la coupole de grande envergure en éléments préfabriqués. La nomenclature des conceptions de Nervi est quasiment interminable.

2 Premesse

Per ricostruire le premesse all'origine e allo sviluppo dei solai a linee isostatiche, è necessario individuare preliminarmente i fattori che ne hanno determinato la nascita.

L'obiettivo è descrivere il contesto entro il quale questi solai prendono forma, ossia delineare i fattori che ne hanno stimolato l'invenzione.

Si possono distinguere fattori esterni e l'apporto delle azioni individuali. Tra i fattori esterni rientra il contesto storico, culturale e scientifico in cui si sviluppa il pensiero strutturale moderno, fondato sul rapporto tra architettura e struttura. In questo ambito si collocano l'introduzione del cemento armato, le nuove sperimentazioni costruttive, i brevetti e, più in generale, il nuovo approccio progettuale che si definisce progressivamente a partire dalla metà dell'Ottocento, sostenuto da una crescente ricerca sperimentale.

L'azione individuale di Pier Luigi Nervi è analizzata con l'intento di comprendere la sua formazione di ingegnere e imprenditore e il suo pensiero legato al progetto e alla sensibilità statica ed estetica.

2.1 Il contesto

Si premette che non è possibile - né è utile in questo contesto - ricostruire l'intera storia del cemento armato. L'obiettivo è invece fissare alcuni punti-chiave di tale storia per delineare il quadro delle sperimentazioni che precedono l'approccio di Pier Luigi Nervi alla progettazione strutturale, con particolare riferimento ai solai a linee isostatiche.

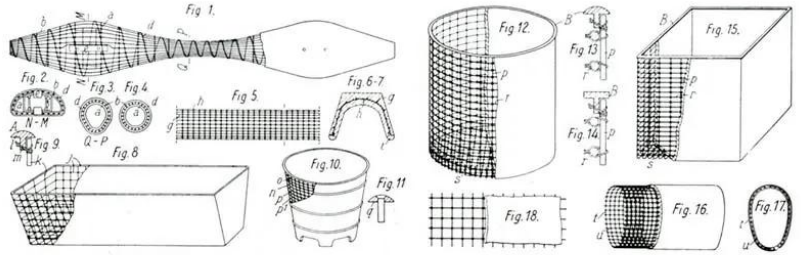
All'inizio del XX secolo l'ingegneria strutturale si afferma come disciplina autonoma, al crocevia tra scienza applicata, tecnologia e architettura. L'eredità dell'Ottocento - segnata dalla rivoluzione industriale, dalle infrastrutture ferroviarie, dai ponti metallici e dalle grandi esposizioni universali - lascia spazio a una nuova stagione in cui la costruzione diventa campo di ricerca teorica e sperimentale. Le conoscenze di meccanica dei solidi, di teoria dell'elasticità e di resistenza dei materiali, maturate nel secolo precedente, si traducono ora in una grammatica progettuale capace di generare forme.

A partire dagli anni Dieci e Venti, questa unità trova applicazione concreta nei nuovi materiali e nelle tipologie emergenti. Il ferro e il calcestruzzo armato, con la loro duttilità e resistenza, permettono una libertà compositiva sconosciuta alle tecniche tradizionali. L'architettura si emancipa dalle masse murarie e diventa spazio continuo, attraversato da grandi luci e superfici sottili. In questo senso, la logica ingegneristica delle forze diventa il fondamento di una nuova estetica della leggerezza.

2.1.1 Uso del cemento armato e brevetti precedenti

In questo clima di rinnovamento tecnico e culturale, il cemento armato si afferma come vero emblema della modernità. Il suo principio costitutivo - l'integrazione della resistenza a compressione del calcestruzzo con la capacità del ferro/acciaio di assorbire gli sforzi di trazione-prende forma nella seconda metà dell'Ottocento, trovando un primo riconoscimento giuridico nei brevetti di Joseph Monier (1867). La dimensione dei brevetti, in questa fase, risulta decisiva non soltanto per la tutela della novità, ma anche per l'istituzione di procedure ripetibili, per la diffusione di prassi costruttive standardizzate e per l'introduzione di forme di controllo qualitativo. I brevetti diventano così non solo documenti giuridici, ma dispositivi culturali che veicolano conoscenza tecnica.

Il brevetto n. 77.167 di Monier, intitolato "Système de caisses, bassins, réservoirs en ciment armé de fer", nasce da esigenze pratiche legate alla sua attività di giardiniere presso i Giardini delle Tuileries: occorrevano contenitori e vasche durevoli, non soggetti a rotture o degradi rapidi. La soluzione consiste nel rinforzare una matrice cementizia con reti e fili metallici disposti secondo la geometria dell'oggetto, in modo che il ferro assorba le trazioni e il cemento resista alle compressioni. Le prime realizzazioni-vasi, casse, bacini-hanno tuttavia un carattere più prossimo a un "ferro cementato" che non a un calcestruzzo armato in senso strutturale: l'impasto cementizio funge primariamente da protezione contro l'ossidazione e da matrice di ripartizione, mentre il contributo statico della massa è ancora limitato[7]. L'intuizione, però, è chiara: riconoscendo la scarsa resistenza a trazione del cemento (di ordine molto inferiore a quella a compressione), Monier propone di collocare l'armatura nel piano di azione delle tensioni di trazione, così da impiegare razionalmente entrambi i materiali e ridurre le sezioni necessarie degli elementi resistenti[8].



Brevetto di Monier

Nel volgere di pochi decenni, l'idea viene estesa e sistematizzata. Tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento si susseguono sperimentazioni e ulteriori brevetti che consolidano il passaggio da oggetti isolati a veri e propri sistemi costruttivi.

Alla fine dell'Ottocento il francese Paul Cottancin (1865-1928) brevetta un sistema costruttivo (nel 1891) fondato su un'armatura di tondini in ferro intrecciati a formare una maglia molto fitta, immersa nel calcestruzzo. Applicate ai solai, queste strutture venivano collegate a travi in cemento con scheletro metallico (*épines*

[7] Iori T., *Il cemento armato in Italia: Dalle origini alla seconda guerra mondiale*, Roma 2001.

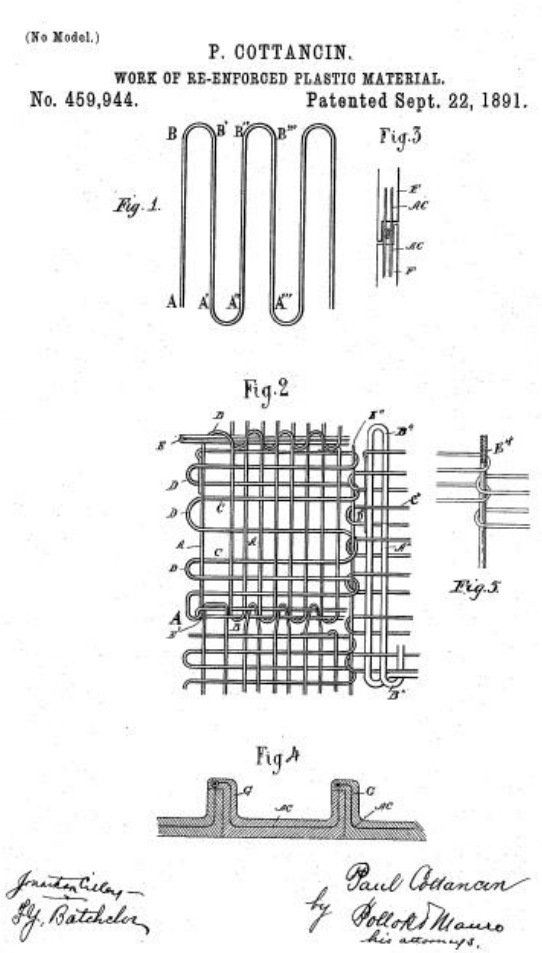
[8] Una combinazione simile di ferro e cemento viene ripresa durante il periodo dell'autarchia in Italia, nel 1943, da Nervi con il fortunato brevetto sul ferrocemento.

contreforts), configurandosi come travi reticolari in cui la massa del calcestruzzo sostituiva i puntoni tradizionali. [9]

Cottancin sviluppa così un approccio concettualmente innovativo al problema del rinforzo delle strutture in calcestruzzo, proponendo un'alternativa alla consueta distinzione tra azioni di trazione e compressione affidate rispettivamente al ferro e al cemento. Nei suoi edifici, solai e pareti sono concepiti come superfici isotrope, in cui sforzi e deformazioni si distribuiscono in modo uniforme. Il materiale viene interpretato come un corpo monolitico e continuo, non come l'assemblaggio di elementi diversi, ma come un'unità strutturale organica. Cottancin sperimentò anche murature cave riempite di calcestruzzo e rinforzate con fili metallici.[10].

Questo sistema trova applicazione anche in edifici di rilievo: la chiesa di Saint-Jean-Baptiste de Montmartre a Parigi (1894-1904), progettata da Anatole de Baudot, impiega il brevetto Cottancin con piastre nervate e gusci sottili (voûtes minces), prefigurando sensibilità che verranno riprese e sviluppate, in chiave diversa, da figure come Eugène Freyssinet e, più tardi, Pier Luigi Nervi.

La linea di sviluppo più fortunata sul piano della diffusione internazionale è però quella associata al nome di François Hennebique. Con il brevetto del 1892 (Brevet n. 254.527), Hennebique codifica un sistema monolitico di travi, pilastri e solai gettati in continuità (Système Hennebique), definendo regole di disposizione e proporzionamento delle armature e, soprattutto,


(No Model.)

P. COTTANCIN.

WORK OF RE-ENFORCED PLASTIC MATERIAL.

No. 459,944. Patented Sept. 22, 1891.

Fig. 1.

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

Brevetto di Cottancin

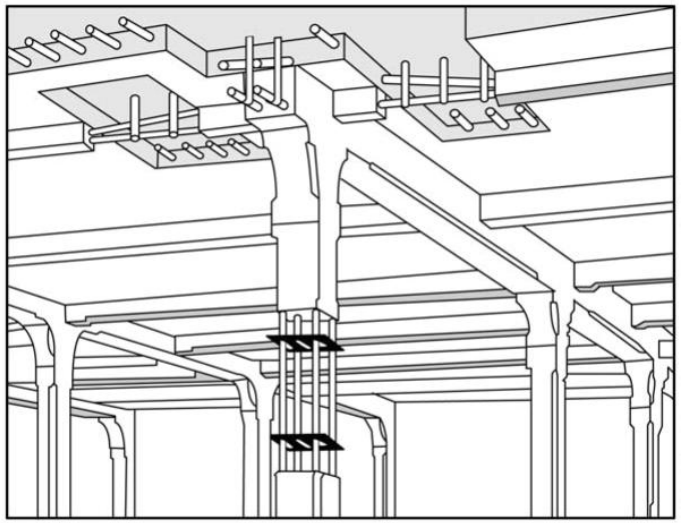
[9] Iori T., *Il cemento armato in Italia: Dalle origini alla seconda guerra mondiale*, Roma 2001

[10] Wells M., *Engineers, A History of Engineering and Structural Design*, Oxfordshire 2010.

organizzando un'efficace rete di imprese concessionarie capace di trasferire know-how, dettagli esecutivi e controlli[11]. Il passaggio dall'invenzione alla "tecnologia"-intesa come insieme di pratiche, strumenti, manuali e procedure condivise-si compie proprio grazie a questa infrastruttura commerciale-tecnica. Tra la fine dell'Ottocento e i primi del Novecento operano come agenti e concessionari figure quali Giovanni Antonio Porcheddu (Torino), Attilio Muggia (Bologna)- con il quale Nervi inizia la professione - , Giovanni Narici (Napoli) e Italo Chiera (Roma). La costruzione del ponte del Risorgimento a Roma (1911) da parte della ditta Porcheddu, con una luce superiore ai 100 metri in un'unica campata in cemento armato, testimonia sia l'ambizione tecnica raggiunta sia la fiducia - non priva di scetticismi iniziali - riposta nella durabilità del nuovo materiale e nella solidità del sistema costruttivo.

Parallelamente alla pratica professionale, si assiste alla nascita di una cultura tecnico-scientifica del cemento armato: compaiono i primi manuali di calcolo destinati alla formazione degli ingegneri; i corsi universitari di Scienza e Meccanica delle Costruzioni iniziano a integrare lezioni specifiche sul nuovo materiale; le amministrazioni prima locali, e nazionali poi, promuovono le prime proposte regolamentari per inquadrare le costruzioni in cemento armato. Si configura così un ecosistema fatto di norme, didattica, prassi di cantiere e reti imprenditoriali, all'interno del quale le sperimentazioni sul cemento armato passano dall'essere attività pionieristiche, alla costante nelle costruzioni.

[11] Giedion S., *Spazio, tempo ed architettura*, Milano 1954.

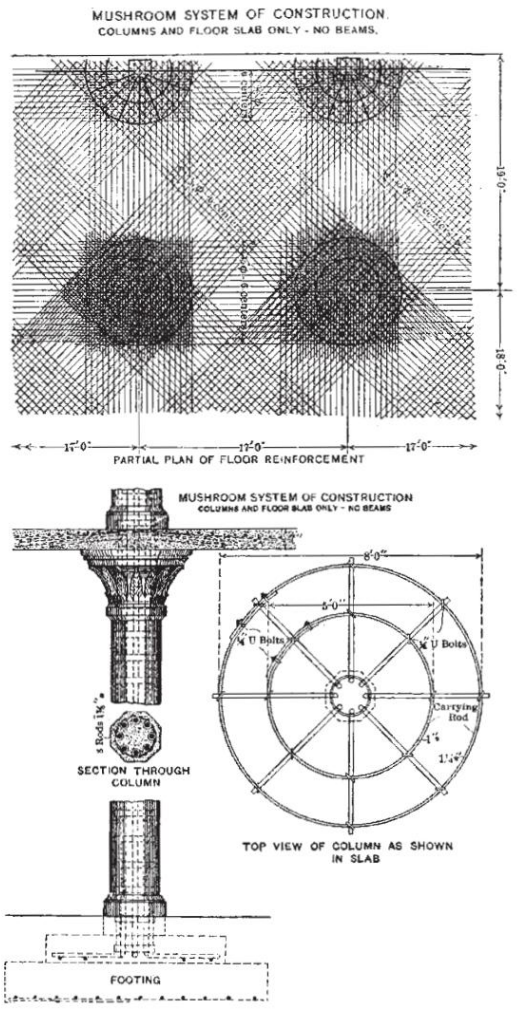


Logo della maison Hennebique

Brevetti sui solai

La prima svolta nella concezione strutturale dei solai in cemento armato si deve all'ingegnere americano Claude Allen Porter Turner, che nel 1907 introduce un nuovo sistema poi perfezionato, quasi contemporaneamente, da Robert Maillart in un brevetto del 1908.

Già nel 1905, la rivista *Engineering News* pubblica un articolo di Turner in cui viene descritto un nuovo tipo di solaio in cemento armato che, a differenza del sistema di Hennebique, non richiede né travi ribassate né travi secondarie. Turner ottiene il brevetto statunitense per questo sistema l'11 giugno 1907.



Brevetto di Turner

L'armatura si estende in quattro direzioni sopra la sommità dei pilastri, integrandosi con la soletta mediante un insieme di piatti d'acciaio fissati all'armatura dei pilastri stessi. Questa soluzione consente non solo di assorbire parte dei momenti flettenti della soletta, ma anche di prevenire il fenomeno di punzonamento, ossia la perforazione della lastra da parte del pilastro. Questa protezione, in una forma concettualmente moderna, si rivela tuttora utile sia nelle strutture in cemento armato sia in quelle miste acciaio-calcestruzzo[12].

Quasi in parallelo, Robert Maillart perfeziona l'idea con un brevetto del 1908 e, attraverso prove su modelli in scala reale, formalizza una strategia di concentrazione degli sforzi sui pilastri. La sommità dei fusti viene allargata a capitello per accogliere meglio gli sforzi e rendere superflue le travi secondarie.

Le prime applicazioni mostrano un percorso di progressiva radicalizzazione: dall'eliminazione delle travi secondarie nella fabbrica Pfenninger (1905) alla piena realizzazione del sistema nel magazzino di Giesshübel, Zurigo (1910). Diversamente da Turner, Maillart dispone l'armatura a raggiera sopra i capitelli, evitando la continuità integrale delle barre attraverso tutta la piastra[13].

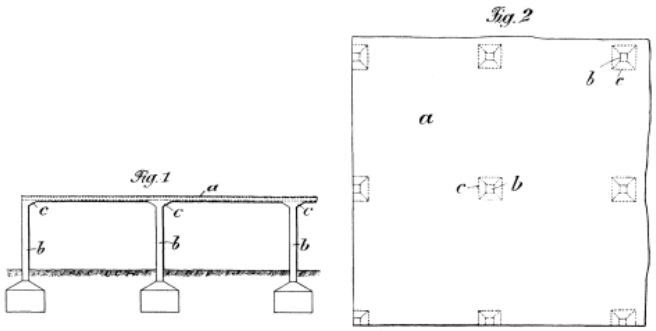
Questa la descrizione che può leggersi nel testo del brevetto:

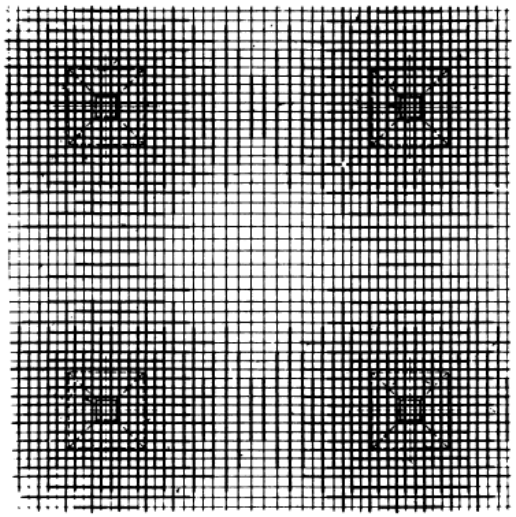
> *Una struttura di solaio a copertura spaziale deve essere caratterizzata come una piastra armata incrociata, appoggiata direttamente su pilastri, senza l'impiego di elementi portanti sporgenti speciali che corrano da pilastro a pilastro.*

[12] Kurrer K.E., The history of the theory of structures: From Arch analysis to computational mechanics, Berlin, 2008
Billington D.P., Robert Maillart's Bridges: The art of engineering, Princeton 1989.
Mivelaz P., Mushroom head, Pilzdecke, pilier-champignon: métamorphoses de la dalle sans sommiers, In Gargiani R. (a cura di), La colonne. Nouvelle histoire de la construction, Lausanne 2008.

[13] Ibidem

Una struttura di solaio a copertura spaziale conforme a questo brevetto deve essere caratterizzata dal fatto che i pilastri, sui quali la piastra si appoggia, sono ispessiti nella parte superiore in modo simile a mensole.





Brevetto Maillart

Si apre in questo modo la storia dei solai a fungo, modello precursore del solaio a linee isostatiche utilizzato poi da Nervi nel *Lanificio Gatti*.





Magazzini. Giesshubel, Zurigo, 1910 e San Pietroburgo, 1912

Brevetti sulla costruzione dei solai

I brevetti di Turner e Maillart illustrano il funzionamento del solaio a fungo e in particolare il rapporto tra pilastro e soletta, e gli accorgimenti tecnici necessari affinché la struttura risulti realizzabile, stabile e resistente al punzonamento. È altrettanto significativo osservare le sperimentazioni condotte in Italia nello stesso periodo, per comprendere cosa avviene tra un pilastro e l'altro. Qui l'attenzione si concentra sui solai bidirezionali, in cui il solaio è concepito come una vera e propria piastra e non come un sistema di travi.

In Italia, un ambito di ricerca particolarmente attivo riguarda i solai laterocementizi. I laterizi forati, di cui il paese è grande produttore, già ampiamente utilizzati in abbinamento alle travi metalliche, vengono progressivamente adattati alle nuove strutture nervate in cemento armato. Queste solette, più leggere ed economiche delle originarie piastre massicce, presentano tuttavia alcune criticità: le

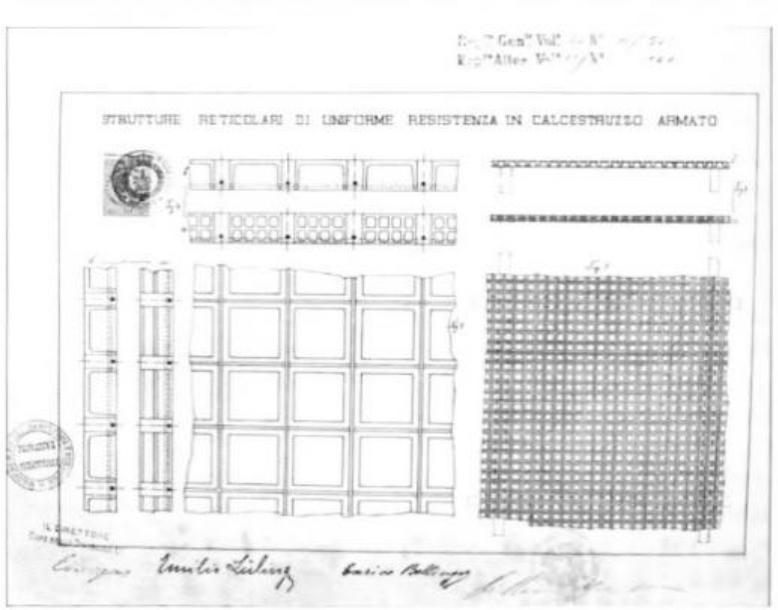
sagome lignee necessarie al getto sono complesse da realizzare, costose e raramente precise[14]. È a partire da queste che Nervi più tardi troverà nuove soluzioni.

Tra le sperimentazioni più interessanti si distingue quella della ditta Böllinger (1902), che propone un solaio a doppia orditura concepito come un graticcio di travi, le cui maglie vengono riempite, prima del getto, con materiale leggero - mattoni forati o elementi cavi in calcestruzzo capovolti. L'invenzione nasce dalla convinzione che una struttura resistente in due direzioni sia più efficace e, di conseguenza, più economica rispetto a una tessitura semplice. Tuttavia, il sistema presenta alcuni limiti pratici: i blocchi laterizi aperti tendono a riempirsi di calcestruzzo durante il getto, riducendo il vantaggio di leggerezza. Per ovviare a ciò si adottano soluzioni artigianali, come la chiusura manuale dei fori con malta o l'impiego di mattoni speciali già chiusi in fase di produzione[15].

Pochi anni più tardi, nel 1911, Arturo Danusso interviene a perfezionare il sistema con il suo solaio Duplex a doppia orditura. L'idea consiste nel realizzare le pignatte assemblando pezzi di forma variabile - trapezoidali, triangolari, parallelepipedi - in modo da ottenere una combinazione modulare capace di offrire al getto sempre un lato chiuso. Questi elementi, facilmente producibili con le comuni mattoniere, consentono una grande flessibilità geometrica e costruttiva, riducendo gli sprechi e i tempi di posa. Danusso, oltre a migliorare l'aspetto pratico, affronta il tema anche dal punto di vista teorico, elaborando un metodo di calcolo per piastre appoggiate sul contorno, che dimostra i vantaggi statici ed economici del sistema in termini di minori deformazioni e migliore distribuzione delle tensioni[16].

[14] Iori T., *Il cemento armato in Italia: Dalle origini alla seconda guerra mondiale*, Roma 2001.

Il solaio Duplex rappresenta così un passo importante nella storia della progettazione dei solai italiani: un sistema capace di conciliare sperimentazione materiale, razionalizzazione produttiva e formalizzazione scientifica. La sua diffusione su larga scala avverrà tuttavia solo intorno alla metà degli anni Venti, quando le condizioni tecniche e industriali renderanno finalmente possibile la produzione seriale di componenti modulari in laterizio e calcestruzzo.



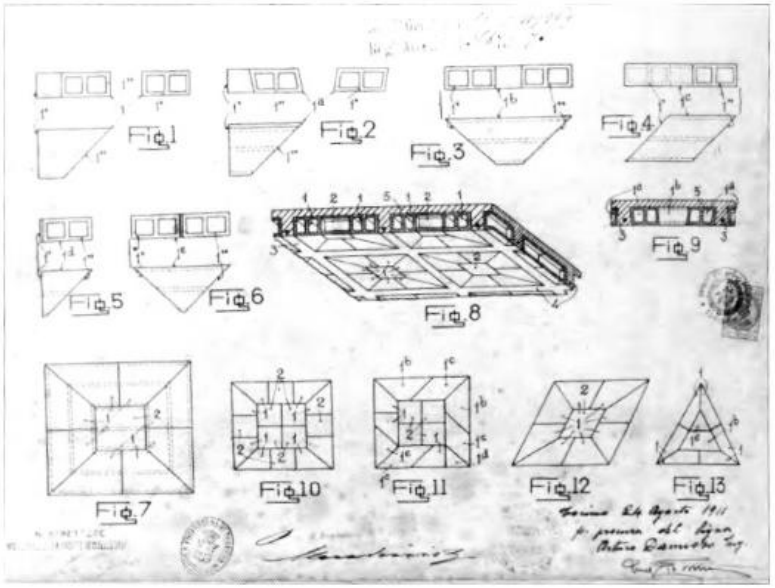
Brevetto di Bollinger

Questi episodi sono soltanto esemplificativi all'interno del vasto panorama delle sperimentazioni di cantiere. In questo sistema dinamico, fatto di ricerche costruttive che si rincorrono e

[15] Ibidem.
[16] Ibidem.

convergono verso soluzioni sempre più efficaci, si intrecciano diversi mondi: quello dei nuovi materiali e dell'industria, quello dell'accademia, che tenta di fornire modelli matematici sempre più precisi, e quello dell'imprenditoria, impegnato nella ricerca di soluzioni più economiche e razionali.

In questo clima di entusiasmo e di continuo perfezionamento tecnico si forma Pier Luigi Nervi, tra il 1913 e il 1923, lavorando alle dipendenze di Attilio Muggia, concessionario del brevetto Hennebique e professore presso la Regia Scuola di Applicazione per Ingegneri e Architetti.



Brevetto di Danusso



Il solaio duplex di Danusso in opera nella Casa del fascio di Como (1933)

2.1.2 L'architettura strutturale

L'idea di architettura strutturale prende forma tra la fine dell'Ottocento e la prima metà del Novecento, in un momento in cui la scienza delle costruzioni si rinnova profondamente e l'introduzione di nuovi materiali - ferro, acciaio e soprattutto cemento armato - trasforma il modo di concepire l'edificio. La possibilità di realizzare strutture più snelle e ardite spinge architetti e ingegneri a interrogarsi sul rapporto tra tecnica e forma, inaugurando un terreno di sperimentazione comune.

In questo contesto, la struttura non è più solo un dispositivo tecnico nascosto all'interno dell'architettura, ma ne diventa il linguaggio stesso. Travi, archi, gusci e pilastri non sono elementi subordinati alla composizione, bensì le tracce visibili delle forze che percorrono l'edificio, la manifestazione concreta del suo equilibrio statico.

L'architettura strutturale nasce dunque come una riconciliazione tra ingegneria e architettura, tra calcolo e forma. La forma non è più un rivestimento, ma l'esito diretto di un processo costruttivo e delle tensioni interne che lo governano. In questa prospettiva, la resistenza dei materiali e la logica delle geometrie diventano strumenti di espressione estetica e spaziale, dove la chiarezza strutturale coincide con la bellezza dell'opera.

Questo pensiero, già latente in alcuni protagonisti della modernità europea, trova una definizione compiuta nella figura di Pier Luigi Nervi, che riesce a trasformare la struttura in linguaggio architettonico e a fondere ragione costruttiva e invenzione formale.

L'architettura strutturale per Nervi

Alla domanda su che cosa intenda per "architettura strutturale" Pier Luigi Nervi nel 1961 risponde[17]:

> *Io penso che si possa definire architettura strutturale, quella particolare struttura (scusi la ripetizione) che resta evidente e parlante, starei per dire, all'esterno o all'interno dell'opera costruita, una condizione; seconda condizione che parte da uno schema statico corretto, uno schema statico intuitivamente pensato e intuitivamente comprensibile anche dal profano; terzo che denunci chiaramente il materiale con cui è eseguito.*
>
> *Ora queste tre condizioni, se si riguarda nel passato si trovano unite molto raramente, anzi starei per dire che i trovano unite e riunite e soddisfatte solo nel periodo gotico. E non sembri strano quello che le voglio dire, che i Romani che hanno fatto delle cose fenomenali non hanno mai fatto, da questo punto di vista, l'architettura strutturale[18].*[…]
>
> *Quindi il primo esempio di vera architettura strutturale, a mio modo di vedere, si hanno esclusivamente con le strutture gotiche, le costruzioni gotiche sono di una bellezza tecnica che starei per dire insuperabile; hanno avuto quei costruttori, quei predecessori, hanno avuto un intuito, una capacità, una*

[17] La trascrizione dell'intervista è tratta dalla trasmissione televisiva "Arti e scienze. Cronache di attualità" Archivio Teche Rai, data trasmissione 12.04.1961

[18] Nervi fa riferimento spesso all'architettura gotica, elogiandone le caratteristiche estetiche e statiche. Oltre al testo qui riportato, si veda:
Nervi P.L., *Struttura e forma in architettura*, in «Domus», n. 374, gennaio 1961, pp. 1 -6
Nervi P.L., *Aesthetics and Technology in Building*, Cambridge (Mass.) 1965. Prima lezione. *In particolare, in un passaggio descrive l'immagine qui presentata: Anche nell'architettura gotica si può cogliere l'evoluzione degli elementi strutturali: dalle prime realizzazioni di ispirazione puramente tecnica, a quelle di maggior ricchezza, fino a forme quasi esclusivamente decorative. Questa evoluzione trova la sua massima e più significativa espressione nella volta della Chapel del King's College a Cambridge, dove i costoloni, ridotti a pura decorazione, formano un disegno che richiama le linee isostatiche degli sforzi principali, realtà fisiche invisibili che l'analisi strutturale moderna e le esperienze di fotoelasticità ci hanno rivelato negli ultimi decenni. È certo azzardato immaginare che i costruttori gotici avessero un'intuizione profetica, ma il fenomeno resta profondamente significativo.*

comprensione, un coraggio che non si finirà mai di valutare abbastanza. Ma soprattutto hanno lasciato in vista la struttura; entrando in una chiesa gotica la si legge completamente all'interno, la si legge completamente dall'esterno, si ha anche la sensazione degli spessori, si vede che le masse fondamentali statiche sono portate addirittura all'esterno, sono quei grandi piloni all'esterno contro i quali vanno a finire gli archi rampanti che sostengono poi le volte; quindi sono esempi di una chiarezza, di una eloquenza straordinaria, e, anche da un punto di vista estetico, di una tale bellezza da potersi veramente chiamare architettura con la A maiuscola, autentiche architetture.



King's College Chapel, Cambridge (1441)
[imagine pubblicata nel testo *Aesthetics and Technology in Building*]

2.1.3 Sperimentazioni precedenti

Un precedente importante, nell'architettura del Novecento e nel percorso che conduce all'elaborazione dei solai a linee isostatiche, è rappresentato dalla Proposta A del Gruppo Milanese-Comasco guidato da Giuseppe Terragni, presentata al concorso per il Palazzo Littorio a Roma nel 1934[19]. Questo progetto segna un passaggio cruciale verso un'architettura strutturale, in cui la forma architettonica diviene espressione diretta della logica statica e del flusso delle forze interne[20].

Il concorso del 1934 per la sede del Partito Nazionale Fascista - il cosiddetto Palazzo del Littorio - porta con sé implicazioni politiche di grande rilievo. L'ipotesi di collocare un nuovo edificio nel cuore dei Fori Romani, esattamente di fronte alla Basilica di Massenzio e nel tratto compreso tra il Colosseo e i fori di Augusto e di Traiano, rimette in gioco l'equilibrio simbolico della città antica. Il bando fissa alcuni vincoli: l'altezza non può superare quella della vicina Basilica di Massenzio; cromie e materiali devono armonizzarsi con i monumenti antichi; la pianta deve essere funzionale; la struttura è chiamata ad adottare soluzioni tecnicamente moderne, coerenti con l'immagine di progresso che il regime intende rappresentare.

La comunità degli architetti coglie il concorso come un banco di prova eccezionale: l'occasione per ridisegnare l'assetto dei Fori e misurarsi con la doppia tensione posta dal luogo, denso di storia e simbologia, e dall'ideologia, del regime che richiede un'architettura capace di conciliare tradizione e modernità, radicamento romano e aspirazione monumentale.

In questo quadro si distinguono i due progetti presentati dal gruppo di: Antonio Carminati, Piero Lingeri, Ernesto Saliva, Giuseppe Terragni, Luigi Vietti, con la collaborazione dei pittori Marcello Nizzoli e Mario Sironi.

È inoltre nota la partecipazione in questo gruppo di Italo Bartolini. La sua figura, a lungo rimasta in secondo piano, merita tuttavia una valutazione più attenta: considerata da molti colleghi come quella di "un vero genio", la sua presenza induce a ipotizzare, specie per il progetto A, un ruolo ben più incisivo di una semplice consulenza

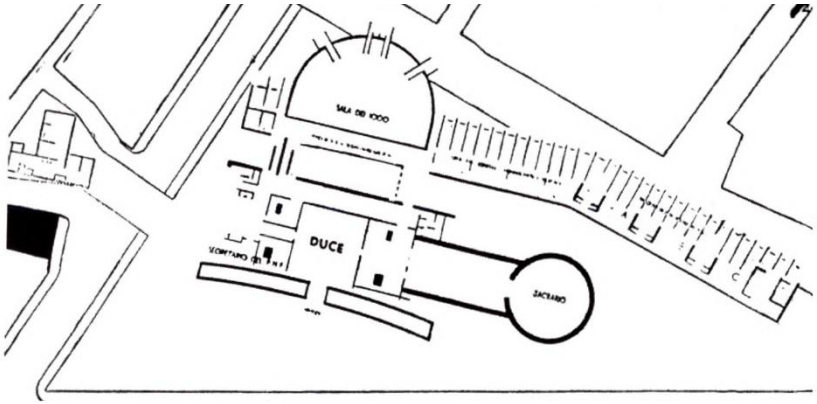
---

19 Ciucci G. (a cura di), *Giuseppe Terragni. Opera completa*, Milano 1996.
Per una bibliografia più generale:
Mangione F., Ribichini L., Terragni A. (a cura di), *Giuseppe Terragni a Roma con Antonio Carminati, Cesare Cattaneo, Pietro Lingeri, Ernesto Saliva, Luigi Vietti e la collaborazione di Marcello Nizzoli, Mario Radice e Mario Sironi*, Roma 2015.
Mantero E., *Giuseppe Terragni e la città del razionalismo italiano*, Bari 1983
Dell'Aira P.V., *Luigi Vietti. Progetti realizzazioni degli anni '30*, Firenze 1997.
Dell'Aira P.V., Prandi E., *Luigi Vietti. Scritti di architettura e di urbanistica 1932-1935*, Firenze 2022.
Gramigni M., *L'arte del costruire in Luigi Vietti*, Novara 2000.
Pagano G., *Il concorso per il Palazzo del Littorio e della mostra della Rivoluzione*, in «Casabella», n. 82, ottobre 1934, pp. 4-9.
Tedesco Rocca A., *Il concorso per il Palazzo del Littorio in via dell'Impero a Roma*, in «L'architettura Italiana», novembre 1934, pp. 364-365
Posener J., *Concours du Palais du Licteur a Rome*, in «L'architecture d'Aujourd'hui», ottobre-novembre 1934, pp.73-74

20 Pica A., *Pier Luigi Nervi*, Roma 1969. Nell'introduzione fa un parallelo tra l'architettura strutturale, l'architettura gotica, il progetto per il Palazzo del Littorio e i solai a linee isostatiche: "*Infine, dallo studio della tecnica gotica e dalla puntuale determinazione, anche plastica, delle linee di resistenza, Nervi trae la sua tipica soluzione del solaio con nervature isostatiche. L'idea era già emersa in un celebre progetto: quello per il Palazzo del Littorio a Roma, di Terragni, Lingeri e Vietti. Tuttavia, mentre in quel progetto le linee fotostatiche, secondo il cui andamento si proponeva di disporre il rivestimento lapideo, si limitavano a dichiarare un lavoro effettivamente compiuto dalla struttura rivestita, Nervi, con maggiore coerenza costruttiva, più pregnante significato ed effettivo vantaggio statico, applica il principio alle nervature portanti.*
Egli dispone il materiale in ogni punto in esatta corrispondenza alle sollecitazioni da assorbire: sostituisce, cioè, a una brillante rappresentazione un'azione reale.
Il dramma delle tensioni interne - che là era soltanto indicato - qui è agito con immediatezza.
Pica coglie certamente il nesso tra il progetto per il Palazzo del Littorio e i solai a linee isostatiche di Nervi; tuttavia, commette alcune inesattezze nella teoria statica e non sviluppa una lettura in parallelo delle due opere.

di statica. Nato a Milano il 28 agosto 1899, Bartolini diverrà nel 1952 ordinario di Costruzioni di macchine al Politecnico di Milano: un profilo tecnico-scientifico di alto livello, coerente con l'audacia strutturale del progetto.

Per il progetto del Palazzo del Littorio si delineano fin dall'inizio due correnti progettuali, che trovano espressione nelle due proposte finali, A e B. Giuseppe Terragni propende per una concezione più funzionale, orientata alla definizione di un palazzo per uffici, mentre Luigi Vietti si indirizza verso la ricerca di una nuova monumentalità, fondata su una interpretazione razionalista dell'architettura.



Planimetria

Tra i due, il cosiddetto "progetto A" non rappresenta soltanto un linguaggio diverso: si presenta come uno degli esiti più singolari dell'architettura italiana del Novecento, soprattutto sotto il profilo costruttivo e morfologico.

La relazione di progetto insiste - oltre che sugli aspetti compositivi e funzionali - in modo particolare su quelli costruttivi, strutturali e formali, intesi come portatori di valori coerenti con l'estetica e l'ideologia del regime, oltre che con l'ambiente antico.

Più che dai rapporti formali, il progetto è definito dalla tettonica della facciata, che rende leggibili le scelte operate "in presenza dell'antico". Il grande muro incurvato, rivestito in porfido rosso a conci squadrati, non è concepito come un basamento pieno, ma come una superficie sospesa dal suolo mediante due travature d'acciaio, impostate internamente su quattro pilastri di granito. Il porfido rosso, materiale pregiato che evoca la romanità, assume così un valore duplice: da un lato richiama la tradizione monumentale, dall'altro manifesta una vocazione moderna, poiché è impiegato in forma sospesa grazie a un dispositivo strutturale verificato attraverso sperimentazioni fotoelastiche.

La relazione dice:

> [Il palazzo] *É una grande massa sospesa di porfido, di ottanta metri di lunghezza con una sola apertura in alto. La monumentalità è ottenuta, oltre che con la superficie verticale, anche con la superficie orizzontale che si protenderà, maestosa, sulla Via dell'Impero.* […]
>
> *Sarà un magnifico e raro esempio di costruzione dovuto alla intima collaborazione della scienza statica e della virtù architettonica: scienza che mostra al popolo le sue possibilità di realizzazione, con un esempio che continua la antica tradizione storica dei Romani.* […]
>
> *Il concetto fondamentale che ha informato la costruzione è stato il concetto di universalità, di unità, di potenza, di sapienza, in diretto collegamento colle tradizioni imperiali del Foro Romano.* […]
>
> *L'universalità è determinata dalla cristallizzazione di forme assolute; l'unità dalla concezione del Palazzo della Rivoluzione come tempio; la potenza scaturisce dall'organismo della costruzione, dal materiale impiegato, dalla semplicità lineare dell'architettura e dal senso di energia e di grandezza*

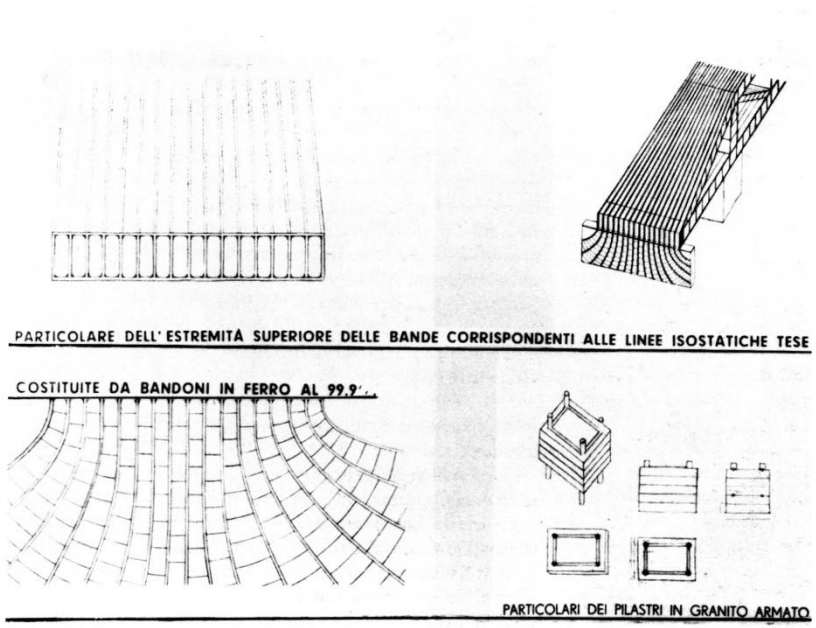
che ne emerge; la sapienza risulta sia dallo studio del perfetto funzionamento quanto dai concetti statici coi quali si realizza l'opera. […]

Il Palazzo della Rivoluzione è sostenuto da quattro pilastri in granito armato con tondi di acciaio, sulla estremità superiore dei quali poggia una struttura portante in ferro che sostiene le facciate ed i vari piani. Le facciate sono in porfido, collegate con bandoni di tensione in ferro purissimo disposti secondo le linee isostatiche, in modo che i conci di porfido lavorino a compressione. […]

Sistema di costruzione. Per la parte monumentale - Palazzo della Rivoluzione - si è adottato il granito armato con tondi di acciaio per la formazione dei pilastri di sostegno. La facciata invece è formata da un' 'opus' costituita da blocchi di porfido in spessore totale disposti a conci contrastantisi a pressione secondo le linee isostatiche compresse, opportunamente armate con bandoni di ferro purissimo (99,9% di Fe) disposti secondo le linee isostatiche di tensione. […]

Della facciata principale del Palazzo della Rivoluzione è stato eseguito un modellino in fenolite, sul quale si è sperimentato il comportamento ai carichi colla luce polarizzata piana bianca, e circolare monocromatica, allo scopo di determinare dapprima l'andamento delle isostatiche e poi gli sforzi interni.

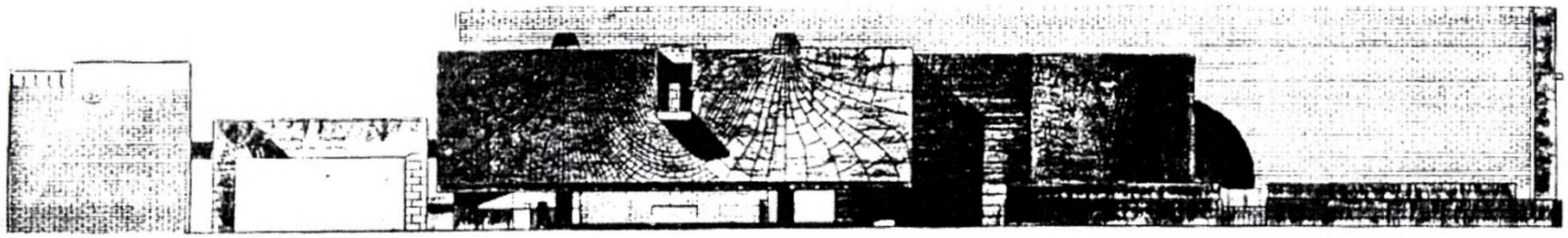
Si chiarisce, in definitiva, la singolare audacia statica del progetto. L'intero settore monumentale della costruzione è infatti sostenuto da soli quattro piloni di granito, armati con tondi di acciaio. Alle due enormi strutture in ferro a sbalzo, impostate su questi pilastri, è appeso un curioso "tessuto" inarcato, che forma la facciata e che i progettisti definiscono *opus*. Questo elemento misura settantacinque metri di lunghezza per venticinque di altezza: proporzioni che permettono di classificare l'intero edificio più come una macchina statica che come un edificio tradizionale.



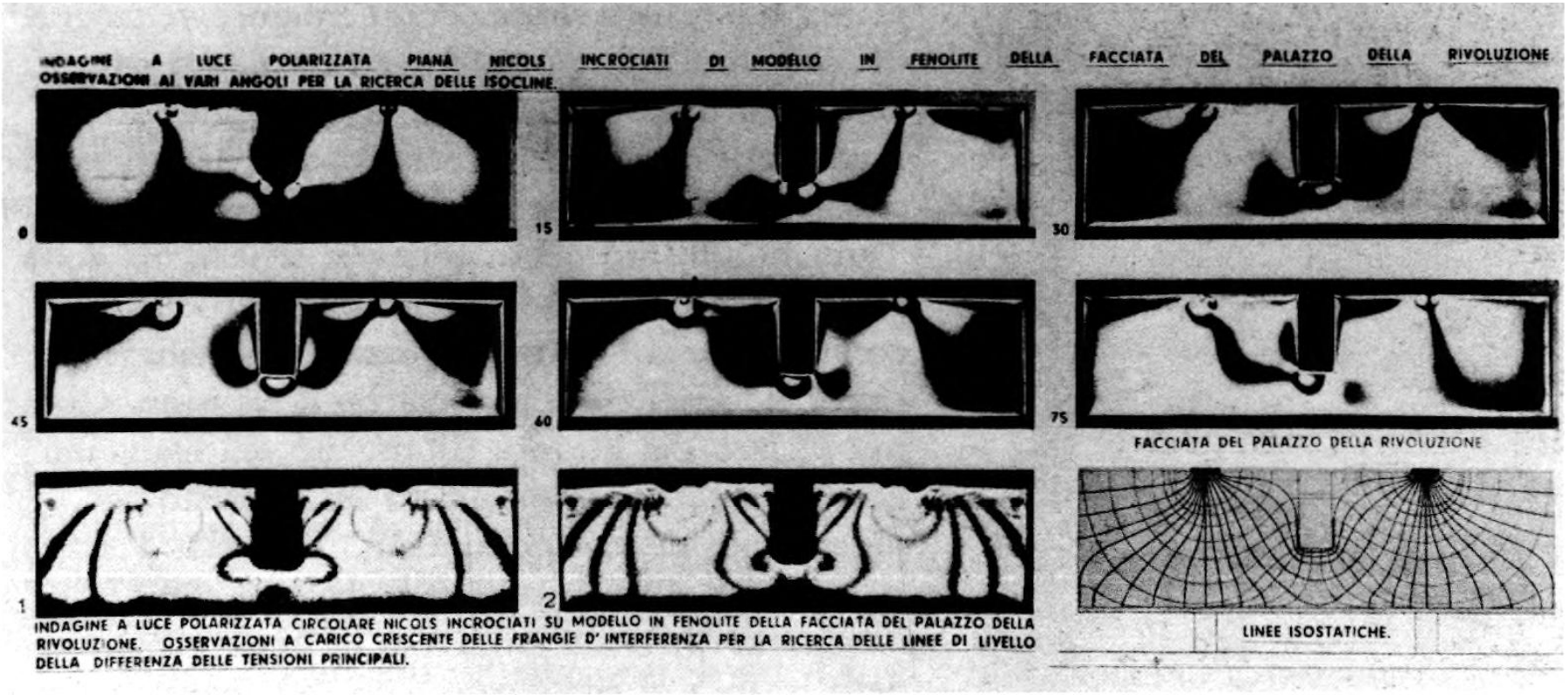
Dettagli costruttivi

In questo ambito, Italo Bartolini emerge come il vero artefice del complesso sistema strutturale, con il contributo degli altri membri del gruppo. La facciata infatti, progettata secondo le linee isostatiche delle tensioni principali, è stata studiata grazie alle sperimentazioni fotoelastiche, una novità per l'epoca.

L'aspetto più interessante è che il tema dell'universalità è espresso attraverso un concetto statico "cristallizzato in forme assolute". L'edificio, capace di autodichiarare la propria essenza strutturale, raggiunge così una dimensione universale, in cui forma e struttura coincidono.



Prospetto principale



Sperimentazione fotoelastica su modello in fenolite e ricerca delle linee ddelle tensioni principali

2.1.4 La ricerca sperimentale

All'inizio del Novecento[21], la rapida diffusione del cemento armato comporta crescenti difficoltà teoriche e normative nella progettazione strutturale. Il problema principale risiede nell'impossibilità di analizzare il comportamento reale di una struttura attraverso un approccio puramente teorico. Numerosi fattori rendono il calcolo, al più, approssimativo e mai completamente esatto: la limitata conoscenza dei valori reali delle forze interne, gli effetti determinati dai vincoli, dalle proprietà dei materiali e dalle variazioni termiche, i cedimenti imprevisti del terreno e altri elementi difficilmente prevedibili.

Nel settore dell'edilizia, e in particolare nell'edilizia residenziale pubblica, la rapida diffusione del cemento armato porta già nei primi decenni nel secolo all'introduzione di manuali pratici, abachi, tabelle, prontuari, nuovi regoli logaritmici e, verso la fine degli anni Venti, anche delle prime "calcolatrici" meccaniche. Tuttavia, per le grandi strutture e per le strutture complesse, questi strumenti risultano del tutto insufficienti, rendendo necessari approcci completamente diversi.

All'interno di questo dibattito emergono anche posizioni di carattere più radicale. In tale contesto, Pier Luigi Nervi scrive nel 1945[22]:

> *Si può anzi affermare che l'invenzione architettonico-costruttiva non solo non è favorita dai più elevati procedimenti matematici della scienza delle costruzioni, ma anzi, oltre alle insufficienze pratiche sopra accennate, ne risulta spesso ostacolata, poiché le difficoltà del problema teorico o il fascino di un'elegante soluzione matematica possono distogliere il progettista da quella visione sintetica e libera del problema che è indispensabile per raggiungere il miglior compromesso tra i molti e contrastanti vincoli di ogni progetto architettonico.*

In questo contesto scientifico-culturale nasce l'idea di ricorrere ai modelli sperimentali.

Nei casi di strutture complesse, infatti, la soluzione matematica del problema risulta sconosciuta o estremamente complessa da applicare a causa della difficoltà nel definire le condizioni al contorno necessarie a ottenere risultati numerici affidabili. La sperimentazione[23] dunque assume un particolare ruolo strategico, consentendo infatti di controllare con precisione le variabili in gioco e di operare in un ambiente laboratoristico controllato, riducendo tempi e costi rispetto a prove su strutture a grandezza reale, che pur rappresentando la soluzione ideale, comportano difficoltà operative significative.

In Italia, una delle figure più rilevanti di questo approccio è stato Arturo Danusso, che si distingue come erede della metodologia operativa di Hennebique. Danusso entra molto presto in contatto con la teoria e la pratica del cemento armato: prima durante gli studi a Torino presso la scuola di Camillo Guidi (1853-1941) - tra i primi a tenere corsi universitari sul cemento armato già nel 1900 - e successivamente, tra il 1903 e il 1915, lavorando nell'impresa di Antonio Porcheddu, che come abbiamo già visto è stato uno dei primi concessionari del sistema Hennebique in Italia. Queste

[21] Per lo sviluppo di questo capitolo si guardi Neri G., *Capolavori in miniatura. Pier Luigi Nervi e la modellazione strutturale*, Mendrisio 2014.

[22] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo primo: Scienza o arte del costruire?

[23] Oberti G., *I modelli* in Colonnetti G. (a cura di), *Scienza delle costruzioni*, *Vol. III, La tecnica delle costruzioni: le pareti sottili. Realizzazioni di P. L. Nervi, E, Torroja e G. Oberti*, Torino 1957

esperienze gli consentono di acquisire una conoscenza diretta del modus operandi dell'impresa francese. Questo orientamento lo conduce sul piano teorico verso l'indagine delle deformazioni plastiche, tuttavia è nell'ambito empirico-sperimentale che Danusso ottiene i maggiori successi.

Nel 1930 Arturo Danusso fonda in Italia il Laboratorio "Prove modelli e costruzioni", annesso all'Istituto di Scienza delle Costruzioni del Regio Politecnico di Milano, con l'esplicito fine di sviluppare ricerche sperimentali su modelli in scala ridotta. Dopo circa due anni di preparazione, durante i quali vengono sistemati i locali, installati i primi macchinari e strumenti di misurazione e istruito il personale, nel 1933 entra ufficialmente in funzione la sezione dedicata alla fotoelasticità e, successivamente, nel 1935, la sezione destinata alle prove su grandi modelli.

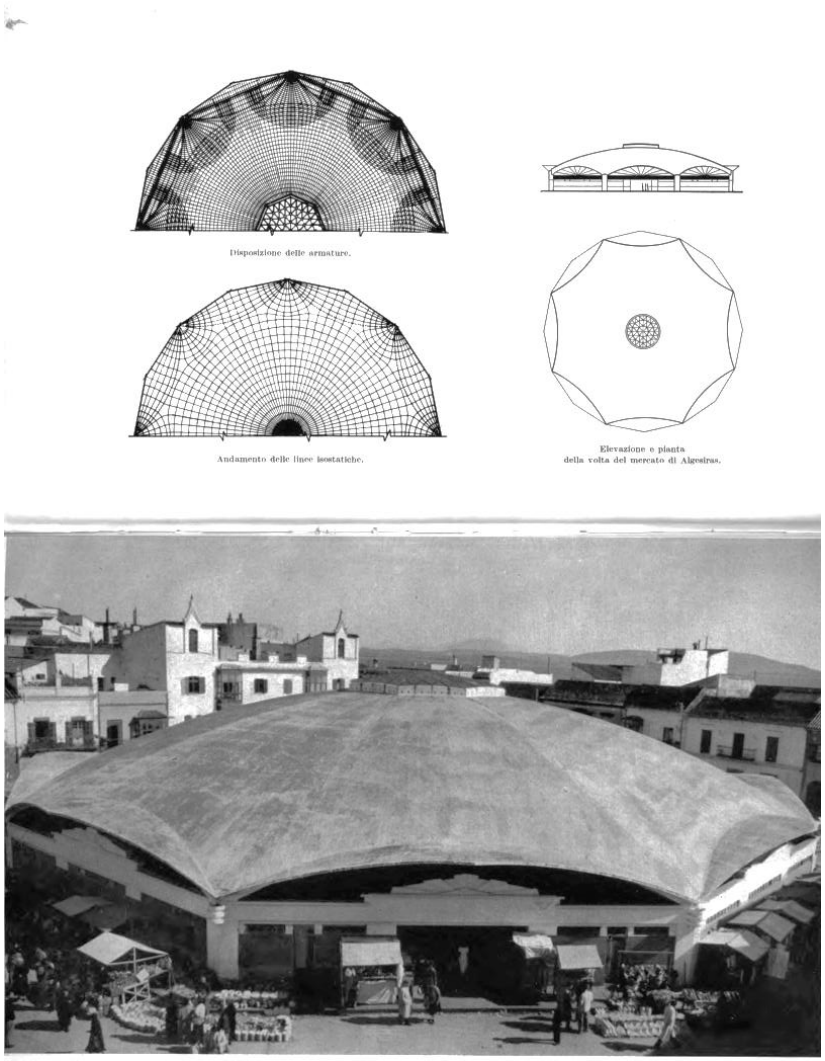
In un piccolo volume sulla fotoelasticità, pubblicato nel 1932[24] e volto a presentare questo laboratorio, Danusso scrive:

> *La presente comunicazione si propone due fini: uno generale e l'altro particolare.*
>
> *In primo luogo vuol dar notizia di un nuovo focolare di studio che il nostro Politecnico ha acceso accanto alla cattedra di Meccanica delle Costruzioni, col proposito di perseguire, nell'esperimento e nella teoria, i problemi che nascono quando si tenti di ridurre la distanza ancor grande che separa le schematiche deduzioni del calcolo dalla visione concreta della realtà costruttiva.*
>
> *In secondo luogo vuole intrattenersi sopra la possibilità ed i fini di un moderno mezzo sperimentale d'indagine, altrove già noto e praticato da tempo, che è venuto a costituire una delle prime faville di quel focolare. Il quale, iniziato con un dono munifico dell'Italcementi, e rafforzato da un contributo della Soc. Montandon, è ancora tuttavia modesto e povero in accordo colla pochezza di chi lo dirige e colla tirannia economica dei tempi che corrono, ma è ricco di ardore per l'entusiasmo ed il buon volere con cui vi operano i miei assistenti: l'ing. Bertolini, l'ing. Oberti, che oggi vi parlerà, e gli altri collaboratori.*

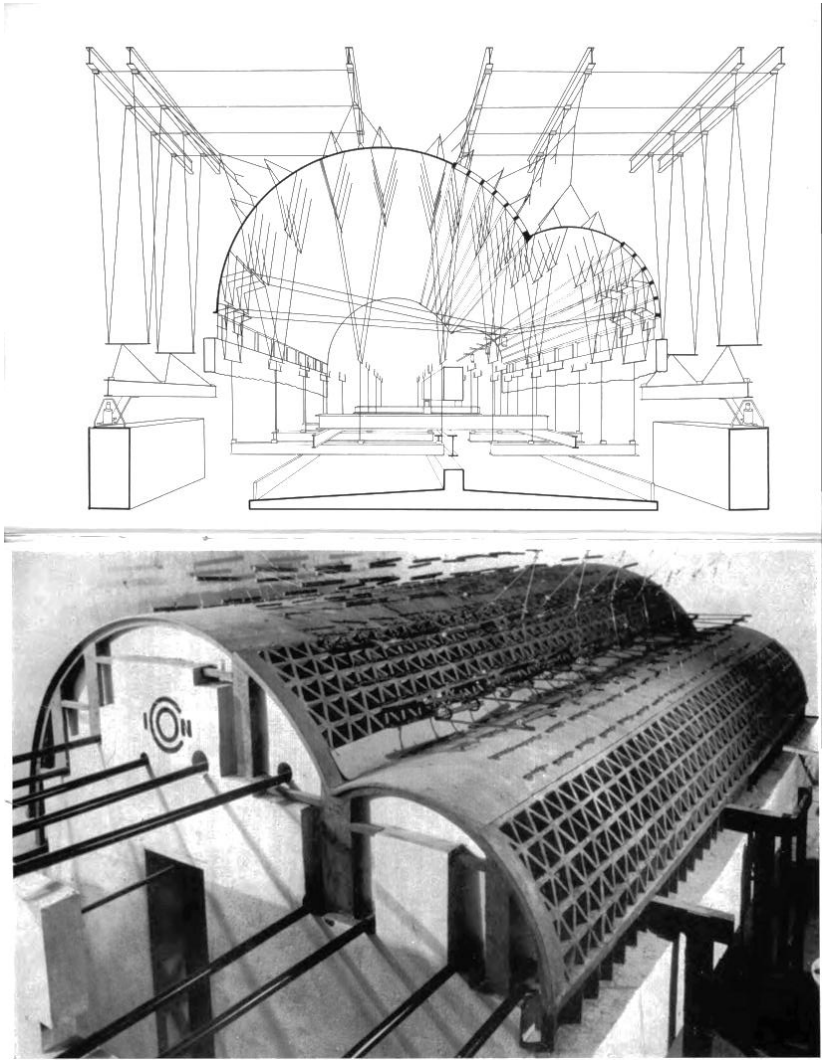
Parallelamente all'esperienza italiana, si sviluppa quella spagnola di Eduardo Torroja y Miret che nel 1933 fonda a Madrid l'ICON (Investigaciones de la Construcción S.A.), un'impresa privata dedicata a ricerche sperimentali nel campo delle costruzioni, e nel 1934 fonda l'Instituto Técnico de la Construcción y de la Edificación (ITCE), la prima organizzazione spagnola dedicata a questo settore. L'esigenza di ricorrere a sperimentazioni su modelli si manifesta nel 1933 durante la progettazione della copertura del mercato di Algesiras a firma dell'architetto Manuel Sánchez Arcas. La struttura del mercato[25], caratterizzata da una calotta sferica di 47,6 metri di luce, appoggiata su otto supporti collegati da un anello poligonale post-teso, viene progettata accompagnando il calcolo teorico con lo studio di un modello in scala 1:10. Tale approccio fornisce un impulso decisivo allo sviluppo delle successive ricerche sperimentali condotte da Torroja. Un ulteriore esempio significativo di questa metodologia è rappresentato dal Frontón Recoletos, progettato nel 1934, dove l'impiego dei modelli sperimentali consente di indagare con maggiore precisione il comportamento statico delle volte cilindriche multiple, confermando la validità di un metodo fondato sulla stretta interazione tra teoria e verifica empirica.

[24] Danusso A., Oberti G., *Indagini sperimentali sulle costruzioni. "La fotoelasticità"*, Milano 1932.

[25] Torroja E., *Le forme a guscio* in Colonnetti G. (a cura di), *Scienza delle costruzioni, Vol. III, La tecnica delle costruzioni: le pareti sottili. Realizzazioni di P. L. Nervi, E, Torroja e G. Oberti*, Torino 1957



Mercato di Algesiras



Frontón Recoletos

Le esperienze su modelli si estendono progressivamente negli anni e, seguendo l'evoluzione cronologica, si possono distinguere tre gruppi di metodi sostanzialmente distinti.

I metodi[26] del primo gruppo affrontano problemi elastici piani; fra questi, prevalgono il metodo fotoelastico e quello che utilizza l'influenzografo.

I metodi del secondo gruppo affrontano problemi strutturali tridimensionali mediante misure estensimetriche dirette, applicando estensimetri meccanici, ottici o elettrici al modello. In questo ambito vengono studiate numerose costruzioni, adottando per i modelli materiali anche profondamente diversi da quelli del prototipo, purché elasticamente affidabili e conformi alla legge di Hooke, e conservando la continuità della struttura, la fissità o la deformabilità elastica dei vincoli. In tal modo, il modello funziona come una sapiente «macchina calcolatrice» degli sforzi, fornendo risultati confrontabili con quelli dei calcoli eseguiti per lo studio del comportamento elastico della struttura.

Il terzo gruppo, infine, nasce dalla constatazione che alcune strutture, in particolare quelle in calcestruzzo semplice o armato, non obbediscono pienamente ai postulati teorici e che questa disobbedienza può produrre risultati talora migliori di quelli previsti. Questo gruppo riunisce quindi i metodi sperimentali con i quali si privilegia la ricerca della somiglianza tra modello e prototipo, piuttosto che la mera conferma dei calcoli, anche a costo di modificare le proprietà elastiche dei materiali. Tale approccio rappresenta un passo deciso verso un rispetto più rigoroso della natura e del comportamento reale delle costruzioni.

Metodi estensimetrici

La sperimentazione sui modelli fisici[27] rappresenta un passaggio fondamentale nello studio e nella verifica del comportamento delle strutture. Essa consente di osservare in modo diretto la risposta di un sistema ridotto in scala rispetto al prototipo reale, permettendo così di confrontare i risultati sperimentali con le previsioni teoriche. A seconda dell'obiettivo della ricerca, la sperimentazione può assumere forme diverse: talvolta si mira a confermare i calcoli analitici, altre volte si cerca invece di cogliere fenomeni che la teoria non è in grado di descrivere con precisione.

Le prove sperimentali vengono solitamente eseguite in due fasi. La prima, detta a carico normale, consiste nell'applicare forze equivalenti a quelle di esercizio e nel misurare le deformazioni in condizioni di similitudine tra modello e prototipo. Durante questa fase possono verificarsi piccoli assestamenti anelastici, come cedimenti o adattamenti locali, che vengono eliminati mediante cicli di carico ripetuti fino a raggiungere un comportamento stabile ed elastico del modello. Una volta raggiunto questo equilibrio, è

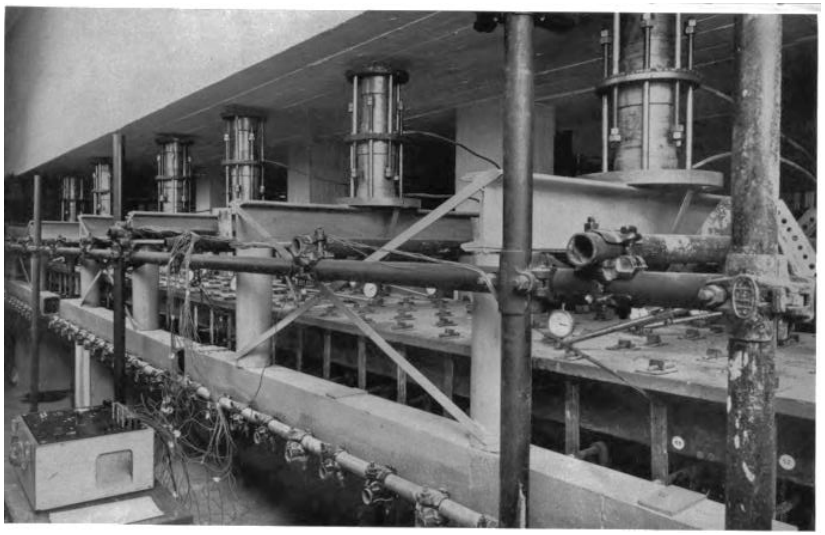
---

[26] Oberti G., *I modelli* in Colonnetti G. (a cura di), *Scienza delle costruzioni*, *Vol. III, La tecnica delle costruzioni: le pareti sottili. Realizzazioni di P. L. Nervi, E, Torroja e G. Oberti*, Torino 1957.
Nonostante Guido Oberti fornisca una descrizione particolarmente dettagliata dei metodi di sperimentazione su modelli, Pier Luigi Nervi, nel testo *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, propone una sintesi più essenziale, distinguendo unicamente due principali categorie di indagine sperimentale "*gli estensimetrici e i fotoelastici. Gli estensimetrici si basano sulla lettura diretta ottenuta con delicati strumenti (estensimetri) meccanici o elettrici, delle deformazioni di allungamento o contrazione della sezione resistente della quale si vuole conoscere lo stato di sollecitazione* […] *I metodi fotoelastici si basano sulla anisotropia birifrangente occasionale che si produce nell'interno di un corpo isotropo trasparente per effetto di stati di sollecitazione."* Per tale ragione, nei paragrafi successivi vengono approfonditi solo questi due metodi che possono essere ricondotti rispettivamente al secondo e al primo gruppo descritto da Oberti.

[27] Ibidem

possibile risalire alle deformazioni, agli sforzi e alle inflessioni previste nella struttura reale, valutando così il suo comportamento statico.

Eseguite queste prove e le relative misure, si passa gradualmente alle prove a oltranza in cui il carico viene progressivamente aumentato fino al limite di rottura del modello. Il rapporto tra il carico massimo effettivamente sopportato e quello di esercizio fornisce il coefficiente globale di sicurezza della struttura. In questo modo, la sperimentazione offre non solo una verifica dei calcoli teorici, ma anche una misura concreta della capacità di resistenza e dell'effettivo margine di sicurezza del progetto.



Modello di solaio con tutta l'attrezzatura necessaria per le prove statiche

Metodi fotoelastici.

I metodi fotoelastici[28] sfruttano il fenomeno della birifrangenza accidentale che si manifesta in corpi isotropi soggetti a sforzi. Grazie a questo metodo si riesce a misurare il valore delle tensioni principali in ogni punto. La fotoelasticità dunque è una tecnica sperimentale che consente di determinare in modo completo lo stato di tensione elastica all'interno di una struttura, utilizzando modelli realizzati con materiali trasparenti e birifrangenti. Essa trova applicazione soprattutto nello studio dei problemi di equilibrio piano, dove permette di visualizzare direttamente la distribuzione degli sforzi interni causati da carichi esterni.

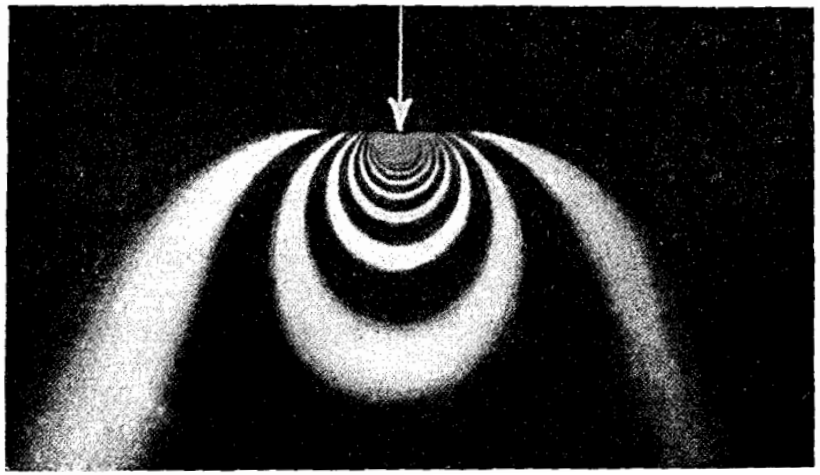
La fotoelasticità si basa su un principio ottico: un materiale trasparente, se non sottoposto a sollecitazioni, è otticamente isotropo, cioè le sue proprietà ottiche sono le stesse in tutte le direzioni. Quando invece viene sottoposto a tensioni meccaniche, il materiale diventa anisotropo e assume un comportamento birifrangente. Ciò significa che la luce che lo attraversa si divide in due raggi, ciascuno con velocità di propagazione diversa, in funzione dell'entità e della direzione degli sforzi interni.

Per analizzare questo fenomeno si utilizzano due elementi ottici fondamentali: il polarizzatore e l'analizzatore. Il primo trasforma la luce naturale in luce polarizzata rettilinea, mentre il secondo, posto in asse con il primo, consente di osservare le modifiche della luce dopo il passaggio nel modello. Quando polarizzatore e analizzatore sono incrociati, la luce viene bloccata; quando invece sono paralleli, essa passa liberamente.

Sottoponendo un modello fotoelastico a carico e osservandolo attraverso il fascio luminoso birifratto, si possono vedere apparire

[28] Danusso A., Oberti G., *Indagini sperimentali sulle costruzioni. "La fotoelasticità"*, Milano 1932.

delle frange chiare e scure, dette frange isocromatiche, che rappresentano linee lungo le quali la differenza tra le tensioni principali è costante. Analizzando il loro andamento e la loro densità è possibile dedurre non solo la distribuzione delle tensioni, ma anche le direzioni principali degli sforzi. In questo modo la fotoelasticità offre una rappresentazione visiva immediata dello stato tensionale interno di un corpo, consentendo di verificare sperimentalmente le previsioni teoriche o di ottimizzare la forma di componenti meccanici.



Sperimentazioni fotoelastiche. Linee isocromatiche

Nervi e la ricerca sperimentale

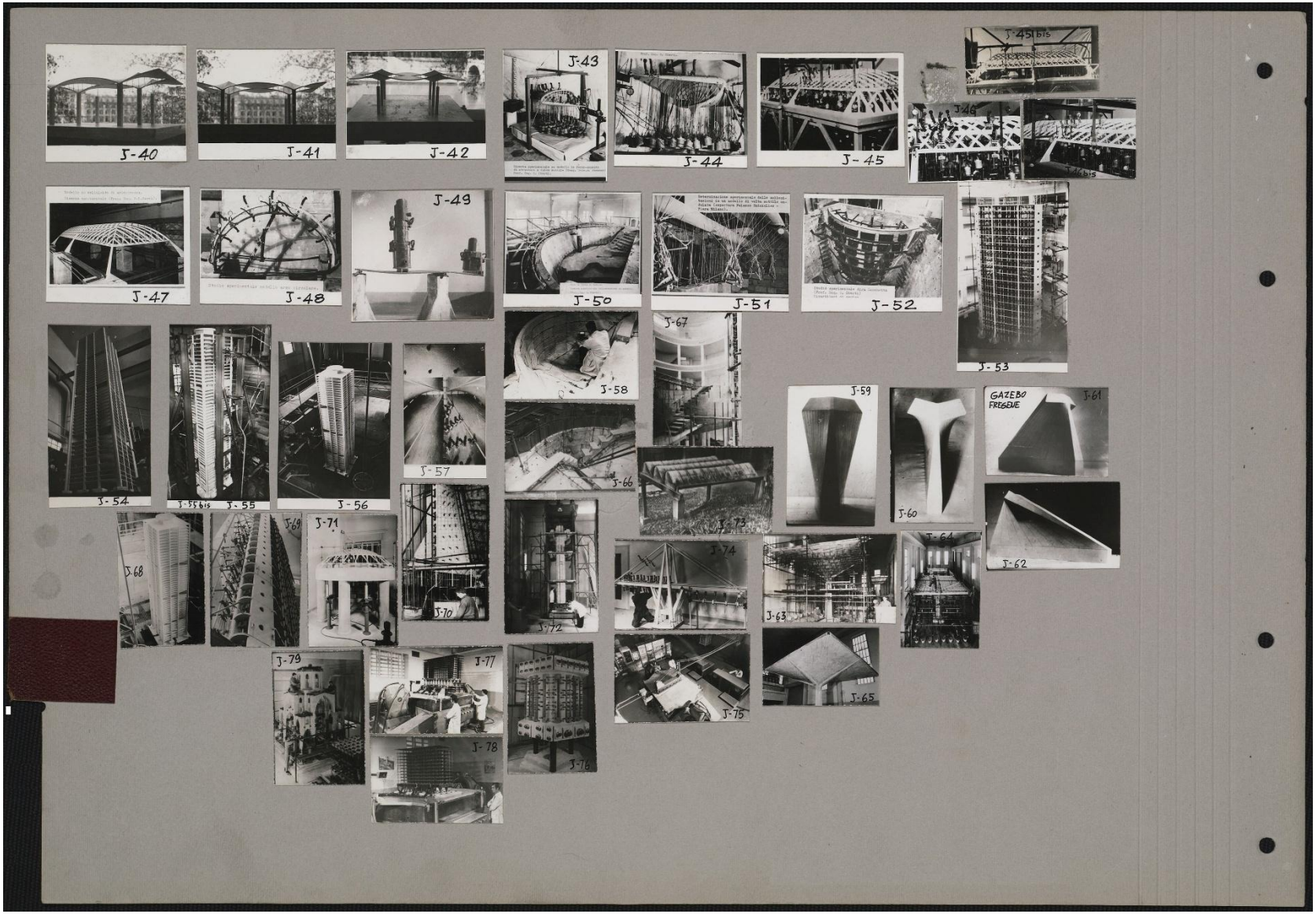
L'incontro di Pier Luigi Nervi con la sperimentazione su modelli fisici, e in particolare con l'attività del laboratorio di Arturo Danusso, risale al 1935, in concomitanza con la progettazione delle aviorimesse di Orvieto. In tale occasione viene inaugurata a Milano la nuova sezione del laboratorio denominata "Prove modelli e costruzioni", specificamente dedicata allo studio e alla sperimentazione su modelli di grandi dimensioni.

Nervi ricorda[29]:

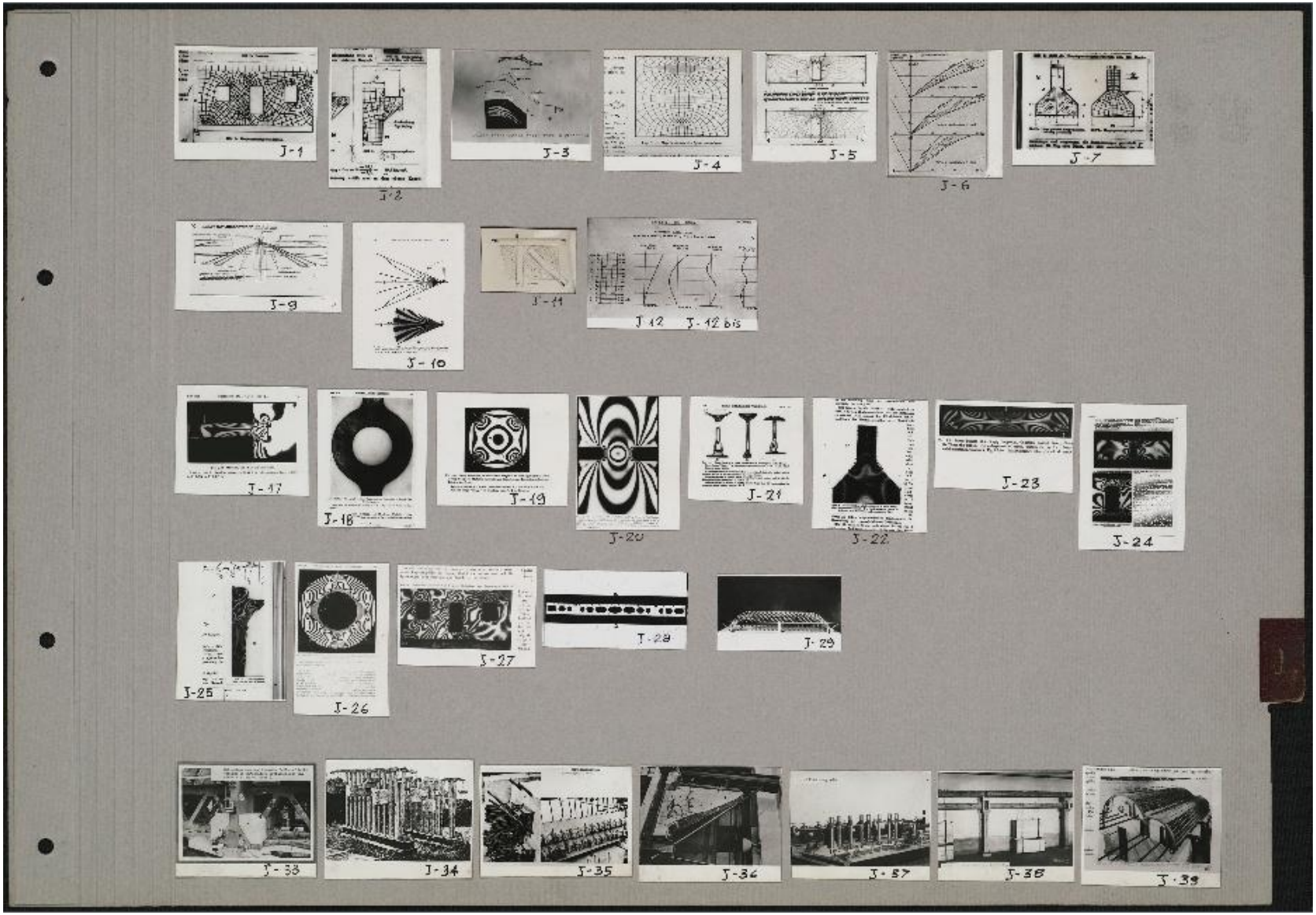
> *Nel 1935 a Milano ebbi occasione di esporre al Prof. Arturo Danusso, che da qualche anno mi onorava della sua illuminante amicizia, le difficoltà in cui mi trovavo nel tradurre in calcoli particolareggiati uno schema largamente iperstatico di grandi aviorimesse a struttura geodetica.*
>
> *Il Prof. Danusso mi parlò allora di alcune ricerche che stava facendo nel laboratorio del suo Istituto di Scienza delle Costruzioni, dirette a definire le sollecitazioni interne di qualsiasi struttura mediante la misurazione delle deformazioni a mezzo di microestensimetri di alta sensibilità applicati a un modello che riproducesse in scala opportuna la struttura stessa.*

In tale occasione viene realizzato un modello in scala 1:37,5 interamente costruito in celluloide, materiale sintetico caratterizzato da un modulo di elasticità noto e costante entro un ampio intervallo di deformazioni. Il modello riproduce con elevata precisione le dimensioni e le proporzioni dei vari elementi strutturali previste dal progetto, consentendo di analizzare sperimentalmente il comportamento statico della struttura in regime elastico, sotto l'azione combinata del peso proprio e dei sovraccarichi accidentali.

[29] Nervi P.L., *Contributo italiano nel campo della sperimentazione su modelli, in L'ingegneria italiana nel mondo*, atti del XV Convegno Nazionale degli Ingegneri Italiani (Politecnico di Milano, 15-17 novembre 1968), Milano 1968, pp. 3-6



Diapositive sulla sperimentazione sui modelli



Diapositive sulla sperimentazione fotoelastiche

Questo episodio segna l'avvio di un sodalizio scientifico e professionale tra Pier Luigi Nervi e il laboratorio "Prove modelli e costruzioni" del Politecnico di Torino, rappresentato dalle figure di Arturo Danusso e Guido Oberti. Da quel momento in poi, e per l'intera durata della sua attività professionale, Nervi farà ricorso alle potenzialità sperimentali e di calcolo del laboratorio per la verifica delle strutture da lui progettate.

Se nelle prime esperienze - come le aviorimesse di Orvieto, l'Arco dell'Impero all'E42 (1939), il Padiglione a emiciclo della Fiera di Milano (1947) o il Centro Civico di Tucumán, Argentina (1949) - l'uso dei modelli rappresenta ancora un approccio pionieristico e sperimentale, a partire dal progetto per il Grattacielo Pirelli del 1955 tale pratica diviene un passaggio imprescindibile del processo progettuale nerviano, assumendo il ruolo di strumento metodologico stabile e integrato nella definizione delle soluzioni strutturali.

Oltre alle motivazioni strettamente legate alle esigenze professionali, nelle riflessioni di Pier Luigi Nervi si riconoscono considerazioni di carattere più profondo, che introducono il tema della ricerca empirica come fondamento dell'indagine progettuale. Nervi rivendica infatti il valore dell'intuizione e della sperimentazione diretta come strumenti essenziali per affrontare e risolvere i problemi strutturali, contrapponendoli alla sterilità di una ricerca esclusivamente teorico-matematica[30].

> *Il costruire è arte anche in quei suoi aspetti più tecnici che si riferiscono alla stabilità strutturale, in quanto che la enorme complessità dei fattori che determinano la vita statica di un edificio rende puramente illusoria, almeno allo stato attuale, l'esattezza di indagine di qualunque procedimento matematico e formulistico, la cui limitata acutezza può solamente essere aumentata e completata mediante un lavorio di intuizione e comprensione dei fenomeni statici, di natura personale e non traducibile in leggi di carattere assoluto e numerico.*
>
> *Si può anzi affermare che l'applicazione della ricerca teorica a base matematica allo studio dell'equilibrio interno dei sistemi resistenti, iniziata nel secolo scorso e via via ampliata fino a raggiungere l'attuale notevole sviluppo, se ha portato un formidabile aiuto alla soluzione dei problemi statici, ha inevitabilmente contribuito ad inaridire le fonti della intuizione e della sensibilità statica, favorendo quel distacco tra mentalità matematico-tecnica e mentalità intuitivo-artistica che, consacrato nella divisione scolastica e professionale tra ingegneri e architetti, va considerato come una delle cause non ultime della crisi in cui da diversi decenni si dibatte l'architettura.*
>
> *Si può al riguardo osservare che se pure per molti e molti secoli l'empirismo intuitivo è stato l'unica guida di progettisti e costruttori, la grandiosità e perfezione tecnica di molte realizzazioni del passato dimostrano che, partendo dalla sola intuizione e dalla interpretazione di esperienze statiche offerte dalla quotidiana realtà costruttiva, questi nostri predecessori avevano potuto formarsi una sensibilità statica, la cui efficacia ed acutezza sono misurate dalla eccellenza delle opere costruite.*

Questo atteggiamento - su cui torneremo nelle pagine seguenti - risulta significativo non solo perché consente di individuare una soluzione al problema strutturale, ma soprattutto perché gli attribuisce una nuova dimensione concettuale. Con il progressivo affinamento dei metodi di calcolo, infatti, la struttura tende a essere ridotta a un problema matematico di crescente complessità, in cui l'aspetto formale e quello costruttivo vengono progressivamente

[30] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo primo: Scienza o arte del costruire?

subordinati alla logica numerica. Nervi si oppone a questa deriva, proponendo di recuperare un atteggiamento tradizionale fondato sulla comprensione diretta dei fenomeni statici e naturali e sull'intuizione dei comportamenti strutturali. In questa prospettiva, la conoscenza tecnica non è mai separata dall'esperienza empirica, ma trova in essa ispirazione e verifica.

In secondo luogo, ma non per questo di minore rilievo, Nervi pone l'accento sull'importanza del metodo empirico di sperimentazione sui modelli anche in ambito didattico, riconoscendone il valore formativo per ingegneri e architetti. Tale approccio consente infatti di sviluppare una comprensione diretta e intuitiva del comportamento delle strutture, superando la mera astrazione del calcolo teorico e favorendo un dialogo più stretto tra conoscenza tecnica, sensibilità strutturale.

> *Prima di iniziare qualsiasi valutazione quantitativa l'allievo architetto dovrebbe aver raggiunto una buona comprensione del mondo statico, essersi avvicinato ai materiali, averne esaminato sperimentalmente i modi di resistere e di rompersi, essersi appassionato al misterioso comportamento degli organismi costruttivi, avere intuito ed ammirato la meravigliosa saggezza con cui le varie parti di una struttura iperstatica si suddividono l'incarico di sopportare le azioni esterne, in una parola avere creato spontanei e fecondi collegamenti tra il proprio spirito e le divine leggi della natura. Fatta quest'opera preparatoria, che non sarà mai abbastanza vasta e profonda, il giovane dovrebbe essere portato alle valutazioni quantitative sia attraverso il metodo matematico (scienza delle costruzioni), che attraverso quello sperimentale. Nell'insegnare i procedimenti matematici dovrebbe aversi di mira il loro fine eminentemente applicativo; i teoremi fondamentali dei sistemi elastici dovrebbero essere, oltreché dimostrati matematicamente, illustrati e spiegati nel loro significato fisico - più accessibile alla mentalità artistica ed intuitiva degli allievi architetti - tenendo sempre presente che mentre la formula è, il più delle volte, appresa quale fatto mnemonico affidato al labile ancoraggio della memoria, la comprensione dei concetti fisici diventa sostanza spirituale ed inalienabile forma mentis. Altrettanto, se non più importante di quella matematica, è la via sperimentale. Oggi, come è noto, mediante strumenti sensibilissimi capaci di misurare allungamenti od accorciamenti locali dell'ordine del millesimo di millimetro, è possibile indagare e valutare con errori inferiori al 10 per cento il valore effettivo delle sollecitazioni che si sviluppano in una struttura modello che, in opportuna scala e in un adatto materiale (di solito celluloide), riproduca l'organismo statico da studiare.*

Le parole e le riflessioni di Nervi sono rivolti implicitamente, nella maggior parte dei casi, ai metodi estensimetrici, che egli conosce in modo approfondito grazie alla lunga esperienza diretta maturata nell'ambito della sperimentazione. Tali metodi, per la loro materialità e tridimensionalità, consentono un approccio tangibile e fisico al modello. Il modello, infatti, riproducendo con precisione la geometria e la consistenza dell'opera da costruire, dà la possibilità di un controllo diretto e istantaneo.

Diverso, invece, è il rapporto che istaura con i metodi fotoelastici di cui dichiaratamente Nervi non entra mai nei dettagli tecnici[31], che sembrano rimanere ai margini del suo interesse sperimentale. La fotoelasticità, infatti, si limita generalmente allo studio di sistemi piani ed è particolarmente efficace per lo studio di azioni locali in solidi di limitate dimensioni. Per queste ragioni, essa non trova spazio significativo nell'ambito delle indagini sperimentali di Nervi. Sebbene nel tempo si sia tentato di estendere tale metodo allo studio di corpi tridimensionali, la complessità dei procedimenti e la

[31] Nervi P.L., *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementi zie armate*, Milano 1955 (II ed. aggiornata e rivista, Milano 1965).

limitata efficacia dei risultati hanno probabilmente contribuito al suo mancato impiego da parte dell'ingegnere.

Tuttavia è importante riconoscere il valore di questa categoria di metodi sperimentali perché consente di valutare con immediatezza diretta le concentrazioni locali di sollecitazioni che si vengono a determinare.

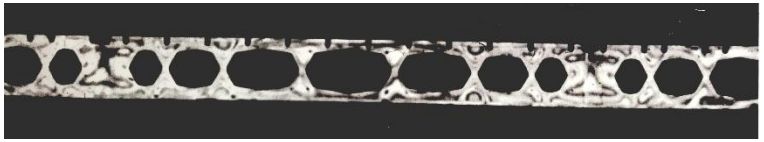
È chiaro che Nervi, superando l'aspetto scientifico strutturale del metodo, coglie tuttavia negli esperimenti fotoelastici l'espressività degli andamenti curvilinei che si addensano e si diradano in maniera fluida:

> *la bellezza e poesia di questo tramutarsi degli stati di sollecitazione in giuochi luminosi attraverso i quali possiamo vedere il propagarsi delle azioni esterne nell'interno di un solido.*

Nella raccolta delle immagini presente nei suoi famosi album, per esempio, come nelle immagini proposte in *Costruire correttamente*, egli presenta pagine e immagini tratte da articoli[32] di cui non è l'autore, né fanno parte della sua esperienza. Per questo si può pensare che Nervi, più che interessato al loro significato scientifico matematico, sia stato affascinato dalle configurazioni complesse che mostrano i fasci luminosi. A questo proposito scrive:

> *Uno degli aspetti più utili della fotoelasticità è quello di farci valutare, con visioni dirette, quanto mai espressive, quali concentramenti locali di sollecitazioni si vengano a determinare nei bruschi cambiamenti di sezione, negli angoli e in genere in tutti i punti singolari di una struttura.*
>
> *Queste constatazioni hanno un grande valore da un punto di vista più generale e di comprensione del comportamento statico dei materiali e mettono in evidenza la non naturalezza di quelle singolarità di forme che quasi sempre sono, contemporaneamente, discordanze estetiche e architettoniche.*
>
> *Ancora una volta forma e statica sono in perfetto accordo anche alla più profonda e meno appariscente radice dei fenomeni statici.*

L'unico caso che può essere riscontrato nelle sperimentazioni di carattere fotoelastico dello studio Nervi riguarda l'analisi di una trave associata al progetto per il corpo principale dell'*Autogrill Motta* (1961), una struttura sopraelevata sull'autostrada Limena-Padova.



Sperimentazione fotoelastica per l'Autogrill Motta



Autogrill Motta

[32] Molte pagine sono prese dagli articoli di Max M. Frocht. Per esempio la figura 1 della tavola XXXVIII di *Costruire correttamente* proviene Frocht M.M., *Isopachic stress patterns* in «Journal of Applied Physics» Vol. 10, No. 4, April 1939, pubblicato in Leven M.M. (a cura di), *Photoelasticity. The Selected Scientific of M.M. Frocht*, Oxford 1969.

2.2 Pier Luigi Nervi

Dopo avere ricostruito il quadro scientifico in cui maturano le sperimentazioni sui solai a linee isostatiche, questo capitolo assume come oggetto d'indagine i fattori specificamente riconducibili alla figura di Pier Luigi Nervi che hanno favorito l'elaborazione e l'affermazione di tale modello.

L'assunto di partenza è che la comprensione dei solai isostatici non possa essere ridotta a un episodio tecnico isolato, ma vada collocata entro un sistema integrato che connette la logica strutturale, l'efficienza costruttiva e la qualità estetica della forma. L'obiettivo non è, infatti, ricostruire un ritratto univoco di un autore per definizione complesso, ma, al contrario, articolare un dispositivo interpretativo capace di restituire l'unità di una pratica progettuale in cui le dimensioni del progetto, del cantiere e della forma si co-determinano.

L'ing. Mario Desideri, che ha collaborato per anni con Nervi, nel volume pubblicato nel 1979, descrive a posteriori questo approccio integrato di diversi fattori[33]:

> *Si capisce quindi come, nell'azione di saldatura da lui operata, Nervi abbia avuto la necessità di intervenire decisamente nella fase realizzativa, oltre che in quella progettuale dell'opera, al di fuori della quale è impossibile ricostituire l'unità degli aspetti artistici, tecnici ed esecutivi. Tuttavia, nel valutare la sintesi compiuta da Nervi, è necessario tenere ben presente che la dinamica di tale sintesi si arricchisce di un movimento dal basso, dal cantiere al tavolo da disegno, che inserisce ruoli tradizionalmente negletti del processo realizzativo nel flusso di pensiero e considerazioni che si presentano al progettista nel momento in cui concepisce l'opera. Si tratta di un processo di scambio estremamente attivo e producente. Nervi, nell'impresa, trasmette ai suoi collaboratori ed operai le istruzioni per eseguire il lavoro, ma è estremamente attento e ricettivo di ogni stimolo derivante dalle esperte operazioni manuali eseguite dagli artigiani in cantiere. Il suo plasmare le sagome delle membrature strutturali in forme fluide ed eleganti riflette quella sua attenzione, ma anche il grande rispetto, più propriamente umano, per un lavoro considerato a torto umile e stereotipato.*

In questa prospettiva, il contributo di Nervi viene analizzato secondo tre assi principali: la logica strutturale, l'efficienza costruttiva e la qualità estetica. Questa griglia non pretende di esaurire la ricchezza dell'opera, ma consente di isolare gli elementi propulsori che alimentano - in modo sinergico - l'intera produzione nerviana e, in particolare, la messa a punto dei solai a linee isostatiche.

La logica strutturale insita nella figura dell'ingegnere, così come è vissuta da Nervi, è significativamente distante da ogni riduzione del progetto a mero rigido calcolo delle strutture . Pur facendo leva sugli strumenti analitici, egli rivendica la priorità di una sensibilità statica[34] formata attraverso l'interpretazione di esperienze statiche e la comprensione profonda delle leggi dell'equilibrio e della resistenza dei materiali. Tale sensibilità si affianca bene, per una specie di omogeneità, alla sensibilità artistica, cosicché le esigenze costruttive e quelle estetiche, potevano spontaneamente fondersi nella mente del progettista, e materializzarsi in insuperati capolavori edilizi.

Nel pensiero di Nervi, la qualità estetica non è programma autonomo, né decorazione, ma è l'esito ovvio e indiscusso della

[33] Desideri P., Nervi jr P.L., Positano G. (a cura di), *Pier Luigi Nervi*, Zanichelli, Bologna 1979. Introduzione

[34] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo primo: Scienza o arte del costruire?

correttezza tecnica e statica. Proprio perché introdotta come conseguenza involontaria della giustezza strutturale, la dimensione estetica appare - a un primo sguardo - difficile da tematizzare. Tuttavia, è impossibile ignorarne il peso descrittivo e critico nell'interpretazione delle sue opere. La precisione geometrica che presiede tanto al progetto quanto alla realizzazione, la chiarezza degli schemi e la 'pulizia' delle superfici non costituiscono un valore aggiunto extratecnico, ma rendono visibili le ragioni statiche e costruttive. L'espressività della forma nerviana - nervature che seguono i campi di tensione, curvature che assecondano i diagrammi degli sforzi - è dunque la traccia leggibile di un ordine strutturale. In tal senso, l'estetica non si oppone alla tecnica: ne è l'effetto. Nonostante ciò è interessante sviluppare questo tema per indagare il rapporto che ha Nervi con l'espressività del proprio prodotto.

Se la logica strutturale fornisce il quadro di coerenza, è l'efficienza costruttiva a garantire la traducibilità dell'idea in opera. La biografia professionale di Nervi, che si forma anzitutto come imprenditore - con le società Nervi e Nebbiosi e Nervi e Bartoli - e solo successivamente istituisce lo Studio Nervi negli anni Cinquanta, imprime alla sua pratica un orientamento concreto e performativo. L'aggancio con il mondo reale del cantiere, fatto di tempi, costi e materiali, è la condizione che seleziona le soluzioni, indirizza le scelte tipologiche e ispira la stessa capacità inventiva. Le invenzioni costruttive traghettano l'intuizione della teoria delle forme naturali alla materialità delle forme costruite, convertendo leggi astratte in procedure eseguibili.

A queste tre prospettive se ne aggiunge una quarta, relativa alla figura di divulgatore. Nervi conduce un lavoro di sintesi teorica in qualità di professore del corso "Tecnologia dei materiali e tecnica delle costruzioni" presso la Facoltà di Architettura di Roma dal 1945 al 1962 e, quando è stato invitato negli Stati Uniti, quale docente delle "Charles Eliot Norton Lectures" nel 1961 dell'università di Harvard. Tuttavia è soprattutto grazie al ruolo di scrittore tecnico-critico - tra articoli, saggi e libri - che noi oggi possediamo una testimonianza diretta del suo pensiero, complesso e non privo di tensioni interne, capace di spaziare da contesti istituzionali di presentazione a analisi più propriamente scientifiche e a giudizi critici su strutture e architetture del suo tempo. La meta-riflessione di Nervi istituisce il ponte tra prassi e teoria, consolidando quell'orizzonte integrato che costituisce la chiave di lettura dei solai isostatici e, più in generale, della sua opera.

La lezione politecnica

Essendo stato Nervi, allo stesso tempo, un professionista, un tecnico e costruttore, è interessante guardare il suo punto di vista sulla formazione degli ingegneri e degli architetti, tema al quale dedica moltissimi scritti[35].

Il tema della formazione dell'architetto, e prima ancora dell'ingegnere, rappresenta infatti uno dei nuclei centrali del pensiero di Pier Luigi Nervi, fin dagli esordi. Il suo lungo impegno nell'insegnamento universitario, unito all'attività di conferenziere, testimonia una convinzione profonda: la necessità di divulgare un sapere unitario capace di integrare teoria, esperienza e intuizione.

[35] Neri G., (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, Novara 2014. Parte VI: la formazione dell'architetto e dell'ingegnere.

La chiarezza del suo linguaggio e l'attenzione alla dimensione didattica trovano un precedente nel maestro Attilio Muggia (1861-1936), che aveva saputo coniugare l'insegnamento con la pratica professionale. Da lui Nervi eredita l'idea che la formazione debba restare sempre ancorata alla realtà costruttiva, evitando sia l'astrazione accademica, sia la libertà formale priva di fondamento tecnico.

Alla base del suo pensiero vi è la critica alla storica separazione tra Scuole di ingegneria e di architettura, da cui derivano due atteggiamenti opposti: da un lato la rigidità analitica dell'ingegnere, dall'altro l'arbitrarietà formale dell'architetto. Questa frattura, nata nell'università, si riflette nella professione, dove la scienza e l'arte del costruire raramente dialogano, estremizzando il contrasto tra mentalità matematico-tecnica e intuitivo-artistica.

Aldo Rossi, nell'introduzione pubblicata nel 1997 alla riedizione del testo di Nervi, *Scienza o arte del costruire?* Introduce il tema della lezione politecnica[36]:

> *Si potrebbe dire che questo libro è una grande lezione politecnica e uso la definizione di "politecnica" perché credo che solo le diverse tecniche possano creare la figura del costruttore.* […]
>
> *Direi che nel suo esporre egli trova un'unità, un linguaggio che direi "politecnico". Lo dico nel modo migliore, nel senso che la struttura politecnica è quella che più si avvicina alla figura del costruttore.* […]
>
> *Il libro di Nervi mi ha sempre dato la speranza non tanto di una concordatio oppositorum quanto di una nuova scuola, o di un meditato ritorno alle scuole tecniche.*

A proposito della preparazione Nervi scrive[37]:

> *La sostanza del problema si può dividere in due parti[38]: quella della preparazione tecnico-scientifica dei futuri architetti, destinata a dar loro la padronanza del linguaggio realizzativo, e quella della preparazione artistica, intesa come formazione di una sensibilità alle forme, rapporti di volumi, giuochi di colori, che dovrà rendere espressiva la realizzazione tecnica.*

Si può quindi assumere, sulla scorta di Rossi, che tanto sul versante della preparazione tecnico-scientifica quanto su quello della preparazione artistica, Pier Luigi Nervi affronta pienamente il problema semantico e metodologico del termine *arte* nel testo *Scienza o arte del costruire?*

Per la preparazione tecnico-scientifica, egli indica "con la parola arte non gli aspetti estetici dell'edilizia, ma il contrapposto dell'impersonale formulismo a base matematica, derivato dagli sviluppi della scienza delle costruzioni, e che può sembrare, a prima vista, sufficiente alla soluzione di qualsiasi problema statico-costruttivo".

Il complesso di teoremi, formule e sviluppi analitici è certamente indispensabile, ma i risultati ottenuti in sede di indagine teorica

[36] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). *Introduzione a Pier Luigi Nervi* di Aldo Rossi pubblicata in apertura della seconda edizione.

[37] Nervi P.L., *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementi zie armate*, Milano 1955 (II ed. aggiornata e rivista, Milano 1965). Capitolo primo: Costruire correttamente - La preparazione universitaria dei progettisti

[38] Nervi propone una preparazione tecnico-scientifica e una artistica, cioè non fa una distinzione tra il progetto e la tecnica, al contrario ne denuncia l'unicità. In questa lavoro, nei capitoli successivi, si prova a scindere l'aspetto progettuale-strutturale da quello costruttivo per sottolineare - oltre alle capacità progettuali - l'attività di costruttore esperto, legato all'economia e al cantiere, e abile inventore di brevetti.

rappresentano soltanto una proiezione semplificata e approssimata della realtà fisica. L'avvicinamento a tale realtà può avvenire solo integrando l'analisi matematica con l'indagine sperimentale, l'osservazione diretta delle opere, la rielaborazione concettuale dei fatti e, soprattutto, la comprensione intuitiva della "vita statica" delle opere edilizie. La fase scientifico-matematica deve quindi essere completata e superata da una dimensione di carattere intuitivo.

I modelli teorici assumono materiali isotropi ed elastici, vincoli perfetti e condizioni stazionarie, ma la realtà del costruire è radicalmente diversa. Le opere architettoniche sono composte di murature e conglomerati non ideali, poggiano su terreni che cedono in modo irregolare, subiscono deformazioni viscose e dilatazioni termiche disuniformi, attraversano processi di indurimento e trasformazioni chimico-fisiche che si sviluppano nel corso di decenni. La costruzione è un organismo vivo, non un modello astratto. Questo scarto tra astrazione teorica e comportamento reale spiega perché, non di rado, i risultati previsti e quelli verificati divergano in modo significativo.

Da tale consapevolezza discende una presa di posizione didattica netta: l'impostazione puramente analitica dell'insegnamento tecnico ha alimentato l'illusione di un'onnipotenza del calcolo, mortificando invece le capacità più elevate del progettista, quali l'intuizione, la visione fisica e la comprensione qualitativa dei percorsi di carico. La meccanica dei sistemi elastici, per sua natura, possiede carattere di verifica e non di generazione: consente di controllare numericamente strutture già concepite, ma non di determinarne gli schemi né le proporzioni essenziali. La fase embrionale del progetto, nella quale si definiscono lo schema statico, le condizioni di vincolo, i rapporti tra materiali, l'efficienza economica e le modalità costruttive, richiede strumenti di prima approssimazione: metodi di statica grafica, analisi di sistemi staticamente determinati, scomposizione di strutture iperstatiche in sottosistemi più semplici e stime orientative delle incognite. Quando però l'analisi teorica non è sufficiente, è necessario ricorrere a modelli sperimentali in scala ridotta, così come - egli nota - è avvenuto per opere complesse come le aviorimesse, in cui si è passati dall'invenzione concettuale alla definizione esecutiva attraverso prove e tarature progressive.

In questa prospettiva, Nervi propone una revisione dell'insegnamento che attenui il formalismo matematico e gli affianchi, fin dall'inizio, corsi descrittivi-intuitivi che insegnino con parole, modelli e casi storici il comportamento dei materiali e l'evoluzione degli schemi statici. Tale approccio dovrebbe poi proseguire con l'approfondimento dei sistemi staticamente determinati (anche con la statica grafica), e solo dopo affrontare le strutture iperstatiche, includendo metodi di risoluzione intuitiva e di calcolo orientativo.

In conclusione, la tecnica costruttiva è per Nervi il linguaggio stesso dell'architettura. Senza una padronanza reale dei fenomeni statico-costruttivi - che nasce dall'integrazione tra teoria, esperienza e intuizione - l'architettura si riduce a formalismo privo di sostanza e le istituzioni formative tradiscono la propria missione.

Per la preparazione artistica, Nervi si interroga sul significato e sui limiti del concetto di *arte* nel costruire. Egli rifiuta l'idea che l'arte coincida con una libertà formale arbitraria, sottolineando come anche le forme determinate rigidamente da leggi fisiche - il profilo parabolico di un ponte, la catenaria delle funi, la geometria aerodinamica di un velivolo - possano risultare esteticamente soddisfacenti.

Se si intende per fatto artistico la capacità di un'opera di trasmettere nel tempo e nello spazio un'emozione creativa, questa dimensione - egli rimarca - non può essere tuttavia insegnata: la formazione può fornire la grammatica e la sintassi del costruire, ma non lo stato di grazia poetico che rende un'opera d'arte. Ogni didattica che pretenda di produrre arte scivola in retorica e imitazione. La conclusione di Nervi è chiara: le scuole di architettura dovrebbero orientarsi alla correttezza costruttiva, intesa come verità funzionale, tecnica ed economica. Questa verità è condizione necessaria e spesso sufficiente di buon esito estetico. La storia recente offriva allora ai suoi occhi, per contro, gli effetti della falsità: stazioni con frontoni alla greca, centrali elettriche travestite da gotico, aeroporti come palazzi d'epoca, abitazioni popolari camuffate con ornati eterogenei.

Dietro tali maschere si celano strutture incoerenti, cattiva funzionalità, spreco di materiali e inefficienza economica. Le opere "non vere", che conservano forme di epoche e tecniche estranee rispetto ai materiali e agli usi contemporanei, risultano inevitabilmente prive di valore estetico autentico. Al contrario, ogni progresso in termini di efficienza, funzionalità e coerenza costruttiva tende a produrre un miglioramento estetico spontaneo: come dimostrano navi, aeromobili e macchine (come aveva già notato Le Corbusier), la piena aderenza alle leggi statiche e dinamiche genera forme percepite come giuste, necessarie e armoniche.

Sul piano didattico, Nervi suggerisce un percorso formativo fondato sullo sviluppo indiretto della sensibilità estetica, ottenuto attraverso l'approfondimento della cultura generale, della critica artistica e letteraria e dello studio della storia delle forme, piuttosto che mediante la ripetizione di stilemi. Invita inoltre a sciogliere l'equivoco tra disegno e architettura: il disegno non è un fine estetico autonomo, ma uno strumento per concepire e comunicare l'idea tecnico-architettonica. Molte architetture fallimentari, osserva, nascono da disegni graficamente seducenti ma strutturalmente inconsistenti. Infine, l'apprendimento deve abituare lo studente a individuare, in ogni problema progettuale, gli elementi essenziali - distribuzione, struttura, costi, uso - dimostrando, attraverso lo studio dei capolavori, che la forma autentica discende sempre dalla sostanza costruttiva e non viceversa.

2.2.1 L'ingegnere: sensibilità statica

> *"Nella fase più importante e decisiva per ogni realizzazione edilizia, ossia quella che porta attraverso la progettazione di massima a definire le caratteristiche dell'organismo architettonico anche nella sua sostanza strutturale e statica, i calcoli molto complicati non servono e debbono essere sostituiti da valutazioni approssimate fondate su semplici verifiche e sopratutto sulla sensibilità statica, che è la vera base della invenzione costruttiva"*[39].

Se le risposte fin qui date al quesito espresso fin nel titolo in *Scienza o arte del costruire?* possono apparire ambigue o sfuggenti, per Pier Luigi Nervi trovano invece una sintesi limpida e concreta. Nonostante la Scienza delle costruzioni offra al progettista strumenti matematici precisi - e in apparenza perfettamente razionali - la vera soluzione del problema architettonico e strutturale non risiede in questi strumenti, bensì nella *sensibilità statica*. È attraverso questa nozione, difficilmente definibile ma essenziale, che Nervi elabora un approccio al progetto capace di conciliare rigore tecnico e intuizione creativa.

Egli invita dunque a completare e superare la fase puramente scientifico-matematica per approdare a una dimensione più intuitiva e sintetica, in cui la razionalità del calcolo cede il passo a una comprensione diretta dell'equilibrio statico[40]. Questa sensibilità consente di traghettare il progetto fuori dal vincolo del calcolo matematico, restituendolo all'idea dell'ideazione dell'opera intesa come organismo architettonico, in cui forma, funzione e struttura coincidono.

Nervi riconosce i limiti intrinseci della Scienza delle costruzioni: non solo perché rende i calcoli eccessivamente complessi, ma anche perché non è neppure infallibile. Egli evidenzia le discrepanze tra le premesse teoriche e la realtà fisica del costruito, dovute all'impossibilità di tradurre integralmente in termini matematici le infinite variabili che intervengono nei materiali, nelle condizioni ambientali, nei processi di invecchiamento e nel comportamento complessivo delle strutture. In altre parole, la scienza - pur indispensabile - resta uno strumento parziale e approssimato, che necessita di essere completato da un elemento umano e interpretativo: quella sensibilità statica, cioè, che Nervi eleva a principio fondativo della progettazione strutturale[41].

In questo senso, la sensibilità statica assume un ruolo decisivo nella concezione nerviana della costruzione. Essa deve consentire una definizione sufficientemente precisa e coerente dell'organismo resistente, anche prescindendo dall'uso sistematico dei calcoli di stabilità, servendosi invece di semplici verifiche orientative e di formule ampiamente approssimate. La logica del progetto non nasce dunque dall'esattezza numerica, ma da un atto di *comprensione strutturale* che è al tempo stesso tecnico e poetico.

L'ideazione di un sistema resistente è, per Nervi, un atto autenticamente creativo, che solo in parte può fondarsi su dati scientifici. La sensibilità statica che lo guida è sì una conseguenza dello studio dell'equilibrio e della resistenza dei materiali, ma resta, come la sensibilità estetica, una facoltà profondamente personale,

[39] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo primo: Scienza o arte del costruire?

[40] Nervi P.L., *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementi zie armate*, Milano 1955 (II ed. aggiornata e rivista, Milano 1965). Capitolo primo: Costruire correttamente.

[41] Ibidem.

maturata nell'animo del progettista attraverso un processo di assimilazione delle leggi fisiche e delle loro implicazioni formali.

Da quanto emerge dalle riflessioni precedenti, risulta chiaro che il modo in cui Pier Luigi Nervi concepisce le strutture in cemento armato si fonda sull'idea di una fondamentale unicità dell'organismo portante. La struttura non è più intesa come una semplice "ossatura" separata dall'edificio, ma diventa l'edificio stesso, la sua essenza costruttiva e formale. Tale concezione rappresenta un principio fortemente innovativo, poiché supera la tradizionale distinzione tra forma architettonica e struttura resistente, riconoscendo in quest'ultima la matrice stessa dell'espressione architettonica. Nervi propone al progettista di conferire valore estetico all'organismo strutturale, sfruttando le possibilità offerte dalle nuove tecnologie costruttive tese a concentrare gli sforzi, ridurre le sezioni resistenti e diradare la materia, fino a rendere visibile ciò che prima era nascosto. [42]

In questo modo, l'opera di Nervi non si limita a rappresentare una sintesi tra arte e scienza del costruire: essa ne riformula radicalmente i termini. La sensibilità statica diventa l'elemento mediatore attraverso cui il progettista, muovendosi tra rigore e intuizione, riesce a trasformare la struttura in architettura, e l'atto costruttivo in espressione culturale.

Il ruolo del cemento armato

> *Il cemento armato è il più bel sistema costruttivo che l'umanità abbia saputo trovare fino ad oggi.*
>
> *Il fatto di poter creare pietre fuse, di qualunque forma, superiori alle naturali poiché capaci di resistere a tensione, ha in sé qualche cosa di magico.* [...]
>
> *La proprietà più caratteristica delle strutture in cemento armato è la monoliticità ed è anche quella dalla quale possono nascere le sue più brillanti e specifiche soluzioni statiche.* [...]
>
> *Analogamente ogni trave diventa solidale con i pilastri su cui appoggia, ogni intelaiatura di fabbricato una struttura unica nella quale le sollecitazioni di un singolo elemento si ripercuotono nei rimanenti e quasi si diluiscono in tutto l'organismo resistente.*
>
> *Se si aggiungono l'alta capacità di resistenza a carichi di compressione, la indeteriorabilità agli agenti atmosferici, la facilità esecutiva ed infine il relativo basso costo, si vede che il cemento armato è veramente il più interessante e fecondo materiale costruttivo di cui l'umanità oggi disponga.* [43]

Se da una parte Nervi si libera dal vincolo del calcolo matematico, dall'altro riesce ad affrancarsi dal vincolo formale dei meccanismi strutturali, grazie all'uso del cemento armato. Il materiale possiede, nelle parole di Nervi, "qualcosa di magico", poiché rende possibile tradurre l'intuizione statica del progetto in forma concreta, senza sottostare a preordinate logiche costruttive.

Nervi inoltre, attribuisce al cemento armato una visione quasi sociale dell'organismo architettonico: come in una comunità solidale, ogni elemento concorre al funzionamento dell'insieme, e le sollecitazioni del singolo si diffondono e si compensano nell'intero sistema resistente. L'edificio diventa così un organismo unitario e cooperante, in cui la bellezza nasce dall'armonia interna tra le parti.

[42] Desideri P., Nervi jr P.L., Positano G. (a cura di), *Pier Luigi Nervi*, Zanichelli, Bologna 1979.

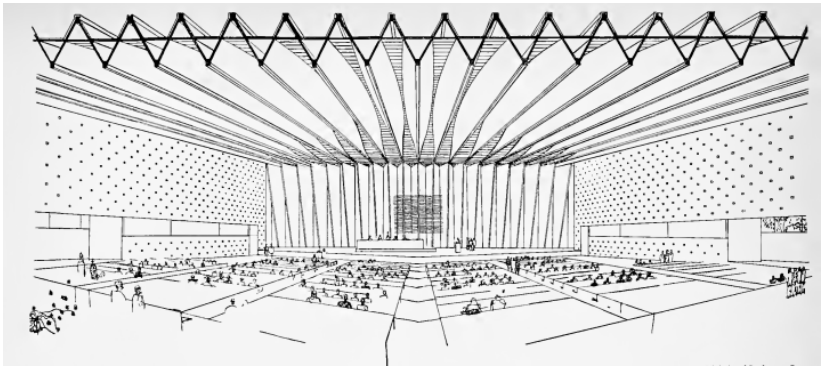
[43] Nervi P.L., *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Milano 1955

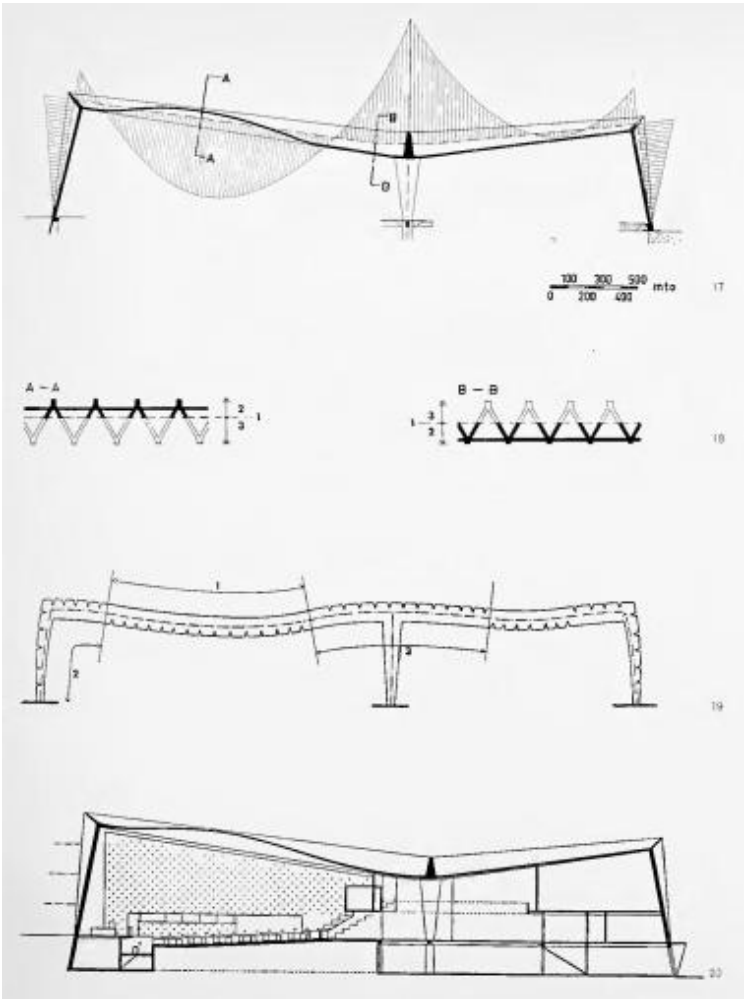
Nel corso della sua carriera, questa concezione raggiunge il suo culmine con l'invenzione del ferrocemento, che porta il cemento armato a un livello di raffinatezza tecnica e libertà formale senza precedenti. Grazie a questo materiale, infatti, Nervi riesce a svincolare la costruzione dalla dipendenza dai casseri lignei.

Un caso emblematico per comprendere il tema della sensibilità statica si può riscontrare nel progetto della sala per le conferenze delle assemblee generali dell'UNESCO di Parigi (1952-1958)in cui la copertura è modellata secondo i diagrammi dei momenti flettenti.

Nella descrizione del progetto si specifica [44]:

> *Il tetto dell'edificio conferenze è costituito da una struttura a lastra piegata in cemento armato, irrigidita da una trave centrale sostenuta da sei supporti. Nella sala conferenze si ottiene una soluzione estremamente spaziosa sollevando la lastra tra le pieghe. La lastra di copertura viene sfruttata al massimo seguendo la direzione delle forze di compressione.*





17 Diagramma dei momenti flettenti; 18 Sezioni trasversali della struttura in AA e B8 (vedi diagramma dei momenti); 19 Diagramma di deflessione della struttura sotto carico verticale, che indica le zone di compressione e tensione; 20 Sezione longitudinale

[44] J. Joedicke, Pier Luigi Nervi, Edizioni di Comunità, Milano 1957

2.2.2 L'imprenditore: la prefabbricazione, ferrocemento e il sistema Nervi

La figura di Pier Luigi Nervi come costruttore è forse quella che meglio definisce la sua opera, poiché si colloca al di fuori delle teorie astratte e privilegia invece la sperimentazione pratica e l'osservazione diretta della realtà. L'attività costruttiva rappresenta inoltre il primo ambito in cui Nervi si afferma e rimane, nel tempo, la dimensione più autentica del suo lavoro. Assumendo esplicitamente nella sua persona pubblica la veste di inventore e sperimentatore, egli non si arresta di fronte ai cambiamenti storici, ma li accoglie come motore di innovazione e occasione di crescita.

Linee cronologiche

Dopo[45] la laurea nel 1913, alla Regia Scuola di Applicazione per Ingegneri e Architetti, sotto la guida di Attilio Muggia, Nervi entra nello studio del suo professore: un vero laboratorio sperimentale e, allo stesso tempo, un'impresa all'avanguardia nell'uso del cemento armato.

Attilio Muggia assume un ruolo decisivo nello sviluppo del cemento armato in Italia a partire dal 1895, anno in cui ottiene la concessione per l'Italia centrale del brevetto Hennebique. In seguito, in collaborazione con l'ingegnere Giovanni Antonio Porcheddu di Torino - titolare della rappresentanza per l'Italia settentrionale - Muggia diviene uno dei pochi professionisti autorizzati dalla maison Hennebique a gestire un proprio *ufficio tecnico*, tra i soli due presenti nel Paese, abilitato a eseguire autonomamente i calcoli strutturali delle opere da realizzare. Progetta così opere di ogni genere e tipologia nei campi dell'ingegneria civile, idraulica e marittima, utilizzando il cemento armato in tutte le sue possibili applicazioni. Nell'attività accademica trasmette ai suoi allievi - e a Nervi in particolare - un'idea esigente del mestiere: l'ingegnere deve tenere insieme scienza e arte.

Quando Nervi, appena laureato, viene chiamato a lavorare nella sua società, trova cantieri grandi e piccoli, una filiera di produzione edilizia attiva e un lessico operativo in rapida evoluzione. È qui che si forma la sua sensibilità concreta, quell'abitudine a misurare le soluzioni sulla fattibilità, sui tempi e sui costi, prima ancora che sullo splendore delle immagini.

La Grande Guerra dà inoltre a Nervi la possibilità di seguire da vicino l'intera attività di ingegneria del Genio militare italiano che, proprio in questi anni, è impegnato nella realizzazione delle sue più celebri opere belliche

All'indomani del conflitto, i mutamenti del mercato spingono Nervi verso una autonomia professionale. Nel 1923 lascia la Società Anonima per Costruzioni Cementizie di Muggia e fonda, a Roma, con l'imprenditore Rodolfo Nebbiosi la Ing. Nervi & Nebbiosi.

È il passaggio cruciale: il giovane ingegnere ha ora 32 anni e si distacca con fermezza e decisione dal suo «padre» professionale, iniziando così una nuova strada con le incognite ma anche le infinite possibilità della propria indipendenza. Non più soltanto progettista o calcolatore per altri, ma imprenditore-costruttore, responsabile del ciclo completo, dall'idea alla messa in opera.

Nei cantieri romani Nervi affina la visione integrata del processo: esplora soluzioni di getto, semplifica le casseforme, standardizza

[45] Greco C., *Pier Luigi Nervi. Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948*, Lucerna 2008.

dettagli, introduce accorgimenti per ridurre gli appoggi provvisori e velocizzare i tempi. In questi anni deposita brevetti che sintetizzano le ricerche di questo periodo.

Durante il periodo della società Ingg. Nervi & Nebbiosi, Pier Luigi Nervi si confronta con numerosi cantieri distribuiti in tutta Italia. Tra i più significativi si ricordano il *Politeama* di Prato e il *Cinema-teatro Augusteo* di Napoli. Tuttavia, è con la realizzazione dello *Stadio Berta* di Firenze che egli ottiene un riconoscimento pieno e duraturo, anche a livello internazionale. Completato nel febbraio del 1933, lo stadio suscita immediatamente l'attenzione della critica tecnica e architettonica: ne parlano riviste italiane come *Il Cemento Armato* e *Casabella*, ma anche la francese *La Technique des Travaux*.

La vicenda dello stadio Berta segna, dunque, un passaggio decisivo nella carriera di Nervi: è il momento in cui l'"ingegnere" entra a pieno titolo nel mondo degli architetti. Da un universo prevalentemente tecnico - popolato da costruttori, studiosi e uomini di cantiere, impegnati nelle problematiche concrete dello sviluppo e dell'economia nazionale - Nervi approda a un contesto più ampio e articolato, quello degli artisti, dei critici e degli storici dell'architettura, un ambiente, certo, più mondano ma anche profondamente stimolante sul piano intellettuale e simbolico. Da quel momento, la sua figura viene osservata con crescente interesse dagli architetti, che riconoscono nella chiarezza strutturale delle sue opere non solo un principio tecnico, ma anche un valore espressivo e formale.

Parallelamente, nel 1932, Nervi costituisce con il cugino Giovanni Bartoli una nuova impresa, la Ing. Nervi & Bartoli, per la seconda fase dello stadio e per una serie di commesse sempre più complesse.

L'attività di Pier Luigi Nervi si svolge prevalentemente a Roma, tra lo studio tecnico situato al piano terra della palazzina sul lungotevere Arnaldo da Brescia - la stessa in cui, dal 1930, abita con la moglie e i quattro figli nell'appartamento all'attico - e un terreno in via della Magliana, nella periferia della città. In quest'area, progressivamente attrezzata con laboratori, magazzini e spazi di lavoro, prendono forma le prime e sempre più intense sperimentazioni costruttive.

Se nella precedente società Ingg. Nervi & Nebbiosi egli ricopriva un ruolo di socio di minoranza, partecipando per lo più a progetti concepiti da altri, nella nuova associazione con il cugino Giovanni Bartoli, Nervi assume una posizione di piena responsabilità operativa. Pur rimanendo sollevato, grazie alle competenze imprenditoriali di Bartoli, da molte delle incombenze amministrative e gestionali, è ora direttamente coinvolto nella direzione tecnica e progettuale dell'impresa.

La nuova società, Ingg. Nervi & Bartoli, prosegue inizialmente i rapporti con gli stessi committenti della precedente esperienza con Nebbiosi: tra questi i Monopoli di Stato, la Croce Rossa Italiana, l'Esercito, la Marina e l'Aviazione, che continuano ad affidarle numerosi incarichi. A tali committenze pubbliche si affiancano, nel tempo, le grandi industrie private - come Montecatini, Solvay ed Eridania - che si rivolgono a Nervi per la progettazione e la realizzazione di depositi e magazzini industriali. Per queste opere, la società può offrire un'esperienza tecnica consolidata, unita alla capacità di rispettare tempi di esecuzione rapidi e affidabili.

Tra le opere realizzate in questo periodo, le aviorimesse occupano un posto di particolare rilievo. Esse rappresentano per lui un campo di sperimentazione privilegiato, sia come progettista sia come ricercatore, in virtù della complessità delle sfide strutturali e

costruttive che pongono. Rispetto ai magazzini e agli arsenali, le aviorimesse si presentano infatti come edifici di ben maggiore difficoltà tecnica: devono coprire luci libere di 35-40 metri e garantire ampie aperture per l'accesso dei velivoli, richiedendo quindi di ridurre al minimo gli appoggi verticali lungo il perimetro, almeno su uno dei lati principali.

Nervi si dedica alla progettazione e sperimentazione di numerose strutture di questo tipo, ma la vera svolta nella sua ricerca avviene nel 1936, in seguito all'introduzione delle sanzioni economiche imposte dalla Società delle Nazioni a Ginevra. L'Italia entra allora in una fase di regime autarchico, durante la quale diventa imprescindibile affrontare il tema del risparmio dei materiali, con particolare attenzione al ferro, ormai destinato in via prioritaria alle esigenze belliche. In tale contesto, il cemento armato - materiale che richiede acciaio per l'armatura - viene paradossalmente percepito come anti-autarchico e dunque non coerente con la politica nazionale del momento.

Spinto da queste limitazioni, Nervi avvia una serie di sperimentazioni innovative, con l'obiettivo non solo di rispondere alle nuove direttive impresse dalla politica, ma anche di ottimizzare la gestione economica della propria impresa. Le sue riflessioni si concentrano in particolare sul problema dello spreco di materiali e di manodopera legato alla costruzione delle strutture provvisorie di cantiere, spesso realizzate in condizioni precarie e rischiose per gli operai.

La ricerca di soluzioni più efficienti conduce Nervi alla riscoperta della prefabbricazione, una tecnica costruttiva allora poco diffusa in Italia ma che egli reinterpreta in modo personale e originale.

[46] Nervi P.L., *Le strutture in cemento armato*, «Il Cemento», n. 59, settembre 1962 (memoria presentata al XIII Convegno Nazionale degli Ingegneri Italiani), p. 15.

Questo procedimento, che prevede la realizzazione degli elementi strutturali fuori opera, era già stato ampiamente sperimentato alcuni decenni prima nel laboratorio di strutture dell'Università di Bologna, dove il suo maestro Attilio Muggia aveva condotto le prime prove di prefabbricazione agli inizi del Novecento. Nervi riprende dunque quell'intuizione pionieristica, trasformandola in uno strumento di innovazione tecnica e di efficienza produttiva, capace di conciliare le nuove esigenze del progetto.

Nervi, in un articolo degli anni sessanta[46] scrive:

> *La prefabbricazione doveva trovare sempre più vaste applicazioni nel campo del cemento armato ed in particolare doveva consentire lo sviluppo di una tecnica particolarmente adatta per la realizzazione di grandi coperture. È la tecnica di prefabbricazione, più specificatamente indicata come «prefabbricazione strutturale», che consiste nel preparare fuori opera le singole parti in cui sia stata preventivamente decomposta una struttura lavorante staticamente solo nel suo complesso. Queste singole parti non hanno di per sé una precisa funzionalità statica (come si avrebbe invece per delle travi che venissero prefabbricate nelle loro definitive lunghezze e armatura metallica). Soltanto dopo che tutti gli elementi prefabbricati siano stati posti in opera viene a ricomporsi una struttura d'assieme la cui monoliticità è assicurata dalla saldatura tra le diverse parti prefabbricate. A quanto mi risulta la prima applicazione di questo procedimento per grandi strutture si è avuta nella costruzione di sei grandi aviorimesse per l'aeronautica Italiana nel 1939.*



Prefabbricazione di elementi per le Aviorimesse

La prefabbricazione[47] apre per Pier Luigi Nervi nuovi e vasti orizzonti progettuali. La conversione delle sue maestranze a un modello di cantiere moderno e razionalizzato si rivela sorprendentemente agevole e produttiva. Grazie alla possibilità di sovrapporre le fasi costruttive, i tempi di realizzazione si riducono sensibilmente, permettendo di proseguire i lavori anche durante i mesi invernali, all'interno delle parti già completate. L'esecuzione a terra degli elementi strutturali, in condizioni più controllate e sicure, consente di raggiungere una maggiore precisione e un livello qualitativo superiore rispetto al cantiere tradizionale. Il progetto diviene così la guida di un processo sempre più sofisticato, vicino per logica a una catena di montaggio.

L' attitudine inventiva di Nervi - testimoniata da numerosi brevetti legati a dispositivi meccanici e procedimenti costruttivi - gli permette non solo di adattarsi con facilità a questa nuova impostazione, ma anche di intuirne le potenzialità espressive e produttive. I singoli elementi prefabbricati possono ora raggiungere un grado di complessità tecnica e raffinatezza formale impensabile nelle condizioni precarie del cantiere tradizionale, limitato dagli ingombri delle strutture provvisorie e dalle sequenze obbligate dei getti.

A questa nuova modalità operativa corrisponde anche una libertà creativa inedita. Il disegno strutturale non è più vincolato dalle rigidità imposte dalle casseforme lignee, il cui uso - costoso e penalizzante in un contesto autarchico - condizionava fino ad allora le geometrie e le proporzioni delle strutture in cemento armato.
A seguito di queste esperienze, Nervi formula due osservazioni fondamentali che orientano la sua ricerca in questa direzione. La prima è che, per risparmiare acciaio, è necessario ridurre la quantità complessiva di calcestruzzo: strati sottili di calcestruzzo fortemente armato risultano infatti più efficienti e più economici di sezioni più ampie e debolmente armate. La seconda considerazione riguarda il risparmio delle casseforme: ridurne l'impiego comporta un duplice vantaggio, economico e progettuale. Da un lato diminuiscono i costi di costruzione; dall'altro si libera il potenziale plastico del

[47] Brevetto N. 377969 - Roma, 9 novembre 1939
Sistema costruttivo per la realizzazione delle ossature resistenti di volte, cupole e in genere sistemi statici, mediante elementi costruiti fuori opera ed uniti con giunti in conglomerato cementizio armato.

cemento armato, che può così esprimere appieno le sue qualità modellanti e strutturali[48].

Nervi mette dunque, a punto le sperimentazioni sul ferrocemento[49]:

> *La sua base concettuale si appoggia sulla constatazione, quanto mai elementare e di dominio comune, della maggior allungabilità dei conglomerati delle opere in cemento armato, in relazione alla maggior suddivisione e distribuzione delle armature metalliche nella massa cementizia.*
>
> *Partendo da questa considerazione mi sono chiesto quale sarebbe stato il comportamento di solette ottenute conglobando con malta cementizia un pacchetto di reti metalliche sovrapposte, e tra loro collegate con punti e legature di filo di ferro. Le reti erano formate da filo di ferro dolce del diametro da 0,5 a 1,5 mm con maglia da 1 cm di lato e peso variabile da 0,600 a 1,5 kg a m³, dei tipi comunemente usati per la costruzione di soffitti o di manufatti di cemento.*
>
> *La malta era formata da sabbia di buona qualità e dosature variabili da 8 a 10 quintali di cemento per m³ di sabbia.*
>
> *Si venivano così a formare solettine molto sottili, ma di eccezionale flessibilità ed elasticità ed ottime capacità resistenti.*[…]
>
> *Da notare che, in tutti i casi, lo spessore della soletta finita risultava di pochissimo superiore a quello del pacchetto metallico e precisamente di quel tanto necessario a che, sulle due facce, l'orditura in ferro restasse completamente rivestita dal cemento.*
>
> *Il materiale così ottenuto aveva ben poco in comune con il consueto cemento armato, mostrando invece tutte le caratteristiche meccaniche di un materiale omogeneo.*

Con l'introduzione del ferrocemento, Nervi individua una soluzione capace di coniugare efficienza strutturale e libertà formale. Questo materiale permette infatti di realizzare superfici curve, continue e resistenti per forma. Al tempo stesso, il ferrocemento consente - come s'è detto - di eliminare l'uso delle casseforme lignee, riducendo così in modo significativo lo spreco di materiale e il costo della manodopera.

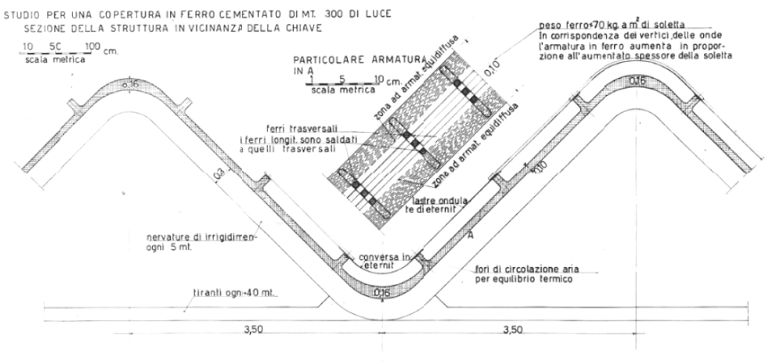
Nervi svolge le prime sperimentazioni in ambito navale. A queste prove segue la realizzazione di un magazzino-prototipo presso il cantiere-laboratorio della Magliana. Tuttavia La migliore occasione per sperimentare in modo congiunto le potenzialità del ferrocemento e della prefabbricazione strutturale si presenta con la costruzione di due padiglioni di Torino-Esposizioni. Durante la rapidissima esecuzione di questi edifici - il Padiglione B, avviato nel giugno 1947 e inaugurato nel settembre 1948, e il Padiglione C, iniziato nel novembre 1949 e completato entro il 15 aprile 1950 - Nervi riesce a sistematizzare e perfezionare una serie di procedure

---

[48] Iori T., Poretti S., *Pier Luigi Nervi: His construction system for Shell and Spatial Structures* in «Journal of the International Association for Shell and Spatial structures», 2013, pp.117-126

[49] Nervi P.L., *Il ferro-cemento: sue caratteristiche e possibilità*, «L'Ingegnere», n. 1, gennaio 1951, p. 17.
Brevetto N. 406296 - Roma, 15 aprile 1943
Perfezionamento nella costruzione delle solette, lastre e altre strutture cementizie armate.
Al primo brevetto sul ferrocemento seguono due completivi:
Brevetto N. 429331 - Roma, 29 settembre 1944
2° Completivo al brevetto principale n. 406296 del 15 Aprile 1943, avente per titolo: «Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre e altre strutture cementizie armate».
Brevetto N. 455750 - Roma, 23 luglio 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

costruttive innovative, dando vita a quello che verrà definito: *Sistema Nervi*.



Studio per elementi in ferrocemento

Brevetti

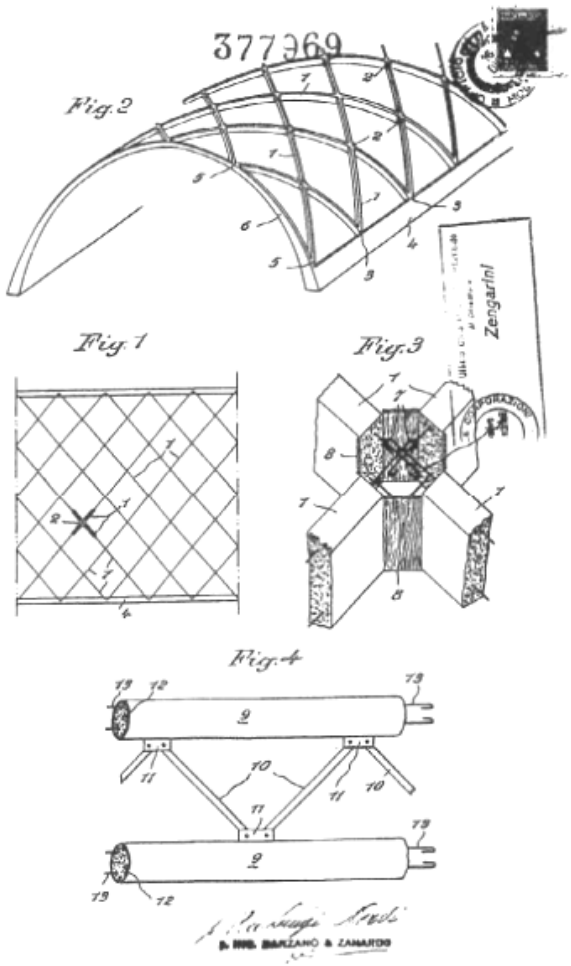
Tra tutti i brevetti depositati da Pier Luigi Nervi, si segnalano qui quelli relativi al cemento armato.[50]

N. 163733 - Roma, 18 dicembre 1917
Conglomerato cementizio rinforzato da elementi metallici uniformemente distribuiti nell'impasto, con speciale riguardo alla utilizzazione dei trucioli o altri cascami della lavorazione del ferro, e sua applicazione alle costruzioni in cemento armato.

[50] Greco C., *Pier Luigi Nervi. Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948*, Lucerna 2008.

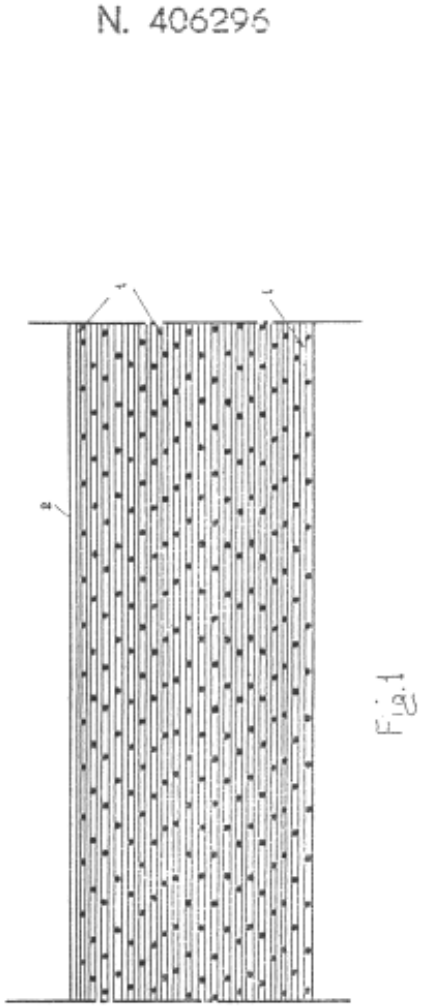
N. 377969 - Roma, 9 novembre 1939

Sistema costruttivo per la realizzazione delle ossature resistenti di volte, cupole e in genere sistemi statici, mediante elementi costruiti fuori opera ed uniti con giunti in conglomerato cementizio armato.



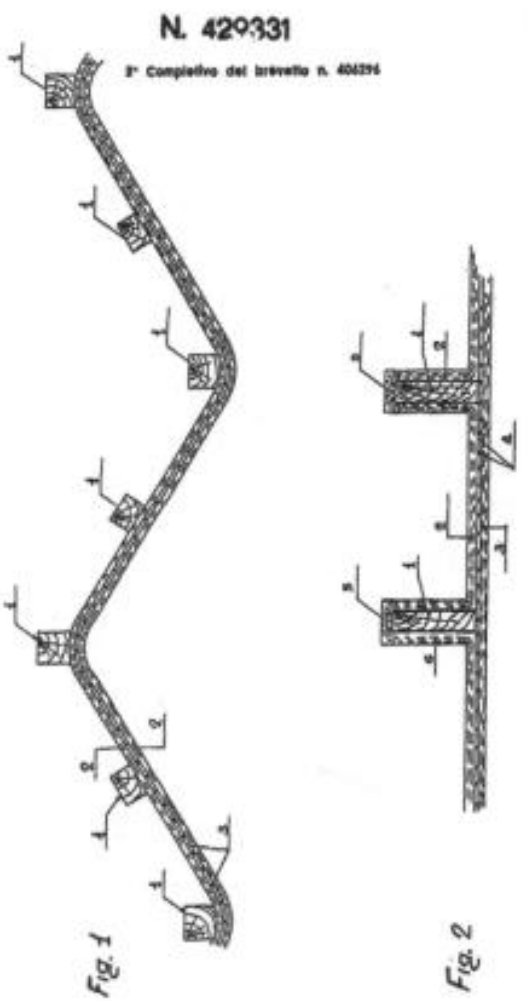
N. 406296 - Roma, 15 aprile 1943

Perfezionamento nella costruzione delle solette, lastre e altre strutture cementizie armate.



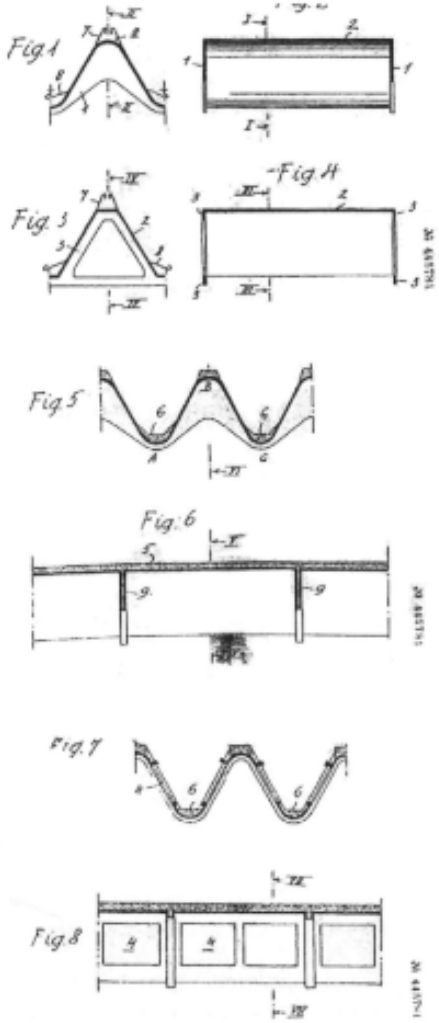
N. 429331 - Roma, 29 settembre 1944

2° Completivo al brevetto principale n. 406296 del 15 Aprile 1943, avente per titolo: «Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre e altre strutture cementizie armate».



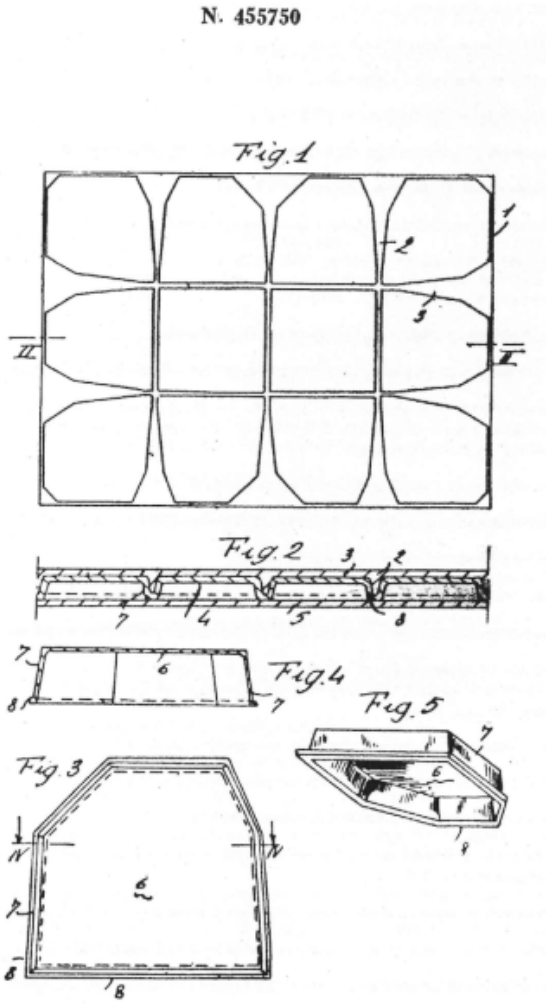
N. 445781 - Roma, 26 agosto 1948

Procedimento costruttivo per la realizzazione di strutture cementizie ondulate o curve con o senza tensioni preventive.



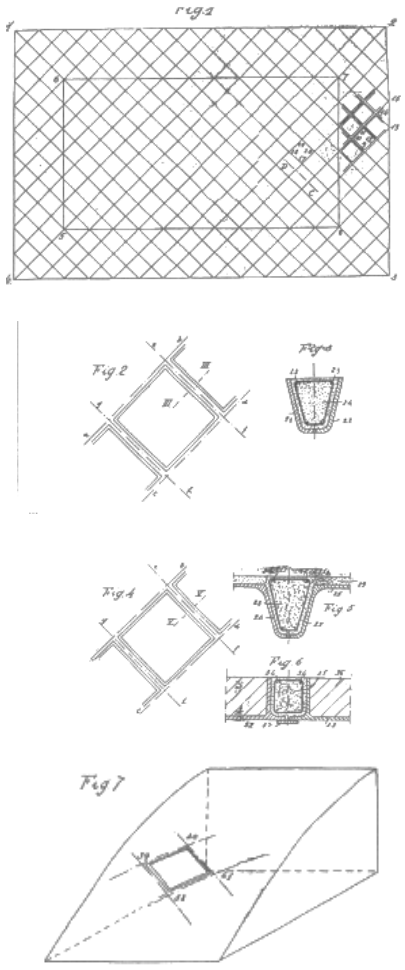
N. 455750 - Roma, 23 luglio 1949

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».



N. 465636 - Roma, 19 maggio 1950

Procedimento di costruzione per la realizzazione di superfici resistenti piane o curve costituite da reticolati di nervature in cemento armato, completate o meno da solette di collegamento tra le nervature.



2.2.3 L'*artista*: l'architettura di forme e caratteri immutabili

Coerentemente all'impostazione data alla sua figura professionale, Pier Luigi Nervi interviene con frequenza anche sul tema dell'estetica, adottando una posizione al tempo stesso rigorosa nelle definizioni e inflessibile nel confronto con opinioni divergenti.

Nervi descrive[51]:

> *L'opera architettonica dovrà quindi corrispondere a molteplici vincoli e requisiti che si possono raggruppare nelle tre grandi categorie della statica, funzionalità ed economia.*
>
> *Il soddisfare questi vincoli, l'armonizzarli con l'idea estetica fondamentale o, per meglio dire, il farli diventare termini di linguaggio e mezzi espressivi di essa, costituisce la vera essenza del problema architettonico e una delle principali cause della incomparabile elevatezza e difficoltà dell'architettura.*

Si riscontra in quanto scrive un accomunamento tra la *verità* degli esemplari e la loro *buona estetica,* mentre le opere "*non vere* sono, senza eccezione, *esteticamente insoddisfacenti*"[52].

> *Nell'architettura, campo in cui più che in ogni altro si mescolano esigenze funzionali, statiche ed economiche, la verità resta, altrettanto decisamente, la indispensabile condizione di buon risultato estetico*[53].

Da tale assunto Nervi fa discendere una riflessione più specifica sul tema dello *Stile* e dei *Caratteri immutabili*: l'aderenza crescente del mondo delle forme alle necessità tecniche - alimentata dall'introduzione di nuovi materiali e dal progresso scientifico - orienta la produzione verso soluzioni altamente performative e tra loro convergenti dal punto di vista estetico[54].

> *Direi anzi, che l'umanità si sta avviando verso forme e direi quasi verso uno «stile» che, una volta raggiunti, resteranno immutati ed immutabili nel tempo.*

Una tesi di questo tipo solleva - come vedremo - questioni di rilievo: non tanto sulla dimensione artistica in senso tradizionale, quanto sul margine espressivo del singolo progettista nel campo della produzione architettonica e industriale, quindi legata a manufatti di ogni tipo. In questa ottica le forme sarebbero determinate a priori nello sviluppo umano. Questa lettura, in sostanza, potrebbe ridurre a mere funzioni della tecnica il tema dell'architettura, della ricerca estetica e delle riflessioni sull'espressione formali non solo attuali, ma di tutte le espressioni formali che si sono determinate nella storia e ne hanno caratterizzato l'immagine.

La posizione di Nervi va tuttavia compresa in rapporto alla cultura del suo tempo: da un lato, la delusione per la produzione contemporanea, spesso giudicata banale, pretenziosa o superficiale[55]; dall'altro, la consapevolezza che il perfezionamento

[51] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo quarto: L'architettura verso forme e caratteri immutabili?

[52] Nervi P.L., *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementi zie armate*, Milano 1955 (II ed. aggiornata e rivista, Milano 1965). Capitolo primo: Costruire correttamente.

[53] Ibidem.

[54] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo quarto: L'architettura verso forme e caratteri immutabili?

[55] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo secondo: della progettazione.
Si possono infatti osservare, nelle nostre città, innumerevoli fabbricati rifiniti con tutto il formulario decorativo del Novecento, che, tuttavia, hanno la stessa pesantezza, la stessa piatta

della Scienza delle costruzioni ha reso, ai suoi occhi, gli strumenti matematici più spersonalizzati, contribuendo, almeno in parte, alla separazione tra tecnica e arte e all'immiserimento della produzione architettonica[56].

Tuttavia egli non fornisce ulteriori soluzioni, se non le attente considerazioni sulla didattica nelle scuole di ingegneria e architettura. Sotto questa lente di ingrandimento Nervi mette anche le sue opere le cui foto nel 1945 avevano già fatto il giro del mondo[57].

> *Debbo anche dire di essermi accorto di correre il rischio di perdere tale serenità* [di giudizio nell'esame degli schemi o dei particolari strutturali che via via mi si presentavano alla mente e nella scelta e definizione di quelli tecnicamente migliori] *il giorno in cui, di fronte ai lusinghieri commenti suscitati dallo Stadio Comunale di Firenze, cercai per qualche tempo, di introdurre tra i vari fattori di valutazione di un problema costruttivo, anche quello estetico, sotto forma di premesse teoriche o di preconcetti indirizzi formali.*
>
> *In breve tempo mi persuasi che l'espressività architettonica è un qualcosa tanto più difficile ad ottenere quanto più volontariamente lo si persegue, per cui abbandonato qualsiasi precostituito indirizzo estetico, mi sono sforzato di ritornare alla semplice mentalità del costruttore che studia con amore i problemi che gli vengono posti, che mi aveva guidato nei primi anni.*
>
> *Né questa mia fiducia nella naturale espressività estetica di una buona soluzione costruttiva mi ha mai tradito, né ho trovato ad essa eccezioni esaminando opere architettoniche recenti o del passato.*
>
> *Per cui ritengo di poter affermare che un buon organismo strutturale, studiato con amore nell'Insieme e nei particolari, è la condizione necessaria, se non del tutto sufficiente, di una buona architettura.*

La critica

Queste sue posizioni hanno ricevuto critiche autorevoli.

Nel 1949 Agnoldomenico Pica osserva[58]:

> *Forse che questa* [la bellezza]*, secondo l'Autore* [Nervi]*, debba essere un requisito da ignorare e trascurare? No, perché il Nervi stesso in più di un passo, discutendo di strutture e di corrispondenza di queste alla forma e viceversa, giudica, in ultima istanza, in rapporto appunto a questa bellezza, a questo prestigio formale, di cui pare vergognarsi per timore, forse, di non apparire bastevolmente spregiudicato e moderno.*

A partire da tale rilievo, si potrebbe ipotizzare - sia pure con cautela - che il discorso di Nervi, da tecnico, tenda a svincolare la responsabilità della riuscita estetica dal suo stesso operare,

banalità, la stessa pretenziosità di alcuni loro confratelli costruiti con il formulario "umbertino" o con quello "liberty".

[56] Nervi P.L., *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Roma 1945 (rist. Milano 1997, 2014). Capitolo primo: Scienza o arte del costruire?
Conseguenza di questa separazione [di tecnica e arte] *sono state, in un primo tempo l'immiserimento della ideazione architettonica, ridotta a pura manifestazione decorativa espressa negli stucchi e modanature di pretensiose facciate, quasi sempre contrastanti con la sostanza strutturale dell'edificio, e, più recentemente, l'esaltazione della tecnica costruttiva, artificiosamente elevata a pura espressione architettonica. Concezioni entrambe incomplete di un problema che investe ed impegna le più complesse capacità della nostra mente.*

[57] Introduzione a J. Joedicke, Pier Luigi Nervi, Edizioni di Comunità, Milano 1957, pp. V-VIII (trad. ingl. The Works of Pier Luigi Nervi, The Architectural Press, London 1957 e Frederick A. Prager, New York 1957; trad, franc. Pier Luigi Nervi. Constructions et project, Editions Vincent Fréal et Cie, Paris 1957; trad. ted. Pier Luigi Nervi. Bauten und Projecte, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1957).

[58] Pica A., *Senso dell'architettura*, in «Domus», n. 241, dicembre 1949, p. 26

sottraendo le opere al vaglio della critica architettonica in nome di una presunta oggettività tecnica[59].

Nervi tuttavia, questo proposito, chiarisce nel 1950[60]:

> *La meta che volevo raggiungere con le mie considerazioni era decisamente ottimistica nel senso che ritenevo, come ritengo tutt'ora, e mi sforzavo di dimostrare, che stabilità, funzionalità, ed economia non sono ostacoli insormontabili e che l'architetto, degno di questo nome, doveva e poteva arrivare ad una tale padronanza dei mezzi e dei vincoli tecnici da renderli linguaggio espressivo di una superiore emozione artistica.*

Quale è dunque il principio, il carattere o l'elemento determinante che conferisce espressività a un'opera architettonica? In altri termini, ci si interroga qui su come, secondo Nervi, sia possibile realizzare un'opera bella e originale, capace di distinguersi dalle altre, pur a parità di correttezza statica e costruttiva. La domanda sottesa è se tale qualità espressiva derivi da una scelta consapevole e individuale del progettista o se, al contrario, essa sia inevitabilmente condizionata dal progresso tecnico e scientifico, destinato a produrre strutture sempre più perfette, con il rischio però che queste possano però diventare anche sempre più uniformi e impersonali.

Il peso della sensibilità estetica

Così come è esplicitato in *Costruire Correttamente:*

> *L'opera che soddisfa a queste condizioni* [soddisfacimento di esigenze funzionali, statiche, costruttive ed economiche]*, ossia l'opera corretta, potrà passare dalla più insignificante modestia estetica, alla più espressiva bellezza, in relazione alle sostanziali ed inconsce capacità e sensibilità del suo progettista, ma in ogni caso non sarà mai aggressivamente fastidiosa.*
>
> *Per quanto riguarda la sensibilità estetica penso che dovrebbe essere curata e sviluppata più per via indiretta che attraverso lo studio degli aspetti formali di architetture del passato e contemporanee: riterrei inoltre molto utile un più largo sviluppo di studi critici letterari e di cultura generale. Bisognerebbe poi eliminare l'equivoco che via via si è venuto formando tra fatto disegnativo e fatto architettonico. Equivoco paragonabile a quello che nell'ingegneria porta a confondere matematica e tecnica.*

La sensibilità estetica, pur essendo considerata un aspetto accessorio nel processo progettuale - in quanto interviene solo a posteriori rispetto al soddisfacimento delle esigenze funzionali, statiche, costruttive ed economiche - riveste un ruolo decisivo. Essa determina infatti il risultato finale dell'organismo architettonico, ne plasma l'immagine complessiva e restituisce visivamente la qualità del rapporto instaurato tra struttura, materia e forma. Ma, come è esplicitamente ribadito, il risultato finale (l'ottenimento de "la più espressiva bellezza") non è garantito.

Nervi: "Artista suo malgrado"

Una sintesi efficace del rapporto tra Pier Luigi Nervi e l'estetica delle forme la scrive Ernesto N. Rogers nel 1957, in un testo destinato a un pubblico internazionale[61]:

[59] La scarsa fortuna storico-critica di Pier Luigi Nervi in Italia inizia probabilmente con la pubblicazione, nel 1950, nella prima edizione della *Storia dell'architettura moderna* di Bruno Zevi, nella quale l'autore manifesta una certa perplessità sul valore artistico delle opere dei grandi strutturisti.

[60] Nervi P.L., *Ancora sul «senso dell'architettura»,* in «Domus», n. 244, marzo 1950.

[61] Introduzione a J. Joedicke, Pier Luigi Nervi, Edizioni di Comunità, Milano 1957, pp. V-VIII (trad. ingl. The Works of Pier Luigi Nervi, The Architectural Press, London 1957 e Frederick A. Prager, New York 1957; trad, franc. Pier

Nervi is an artist against his will, sometimes even against his own theoretical conviction; he is an artist because in spite of his astounding knowledge he does not confuse the ends with the means, because he is not satisfied with the means alone but makes them subservient to his aim through proper use.

It is characteristic of Nervi's approach to design that he starts with a basis of scientific certainty, but transcends it through his intuition. Nevertheless, he submits his intuitive powers to rational laws. Cocteau's saying «Find first, then look for it», could well apply to the methods of this poet among engineers.

When one considers Nervi's work in all its manifestations, it is clear that his solution of technical problems tends to define and crystallize their sculptural quality. The stylistic character of Nervi's three-dimensional language is based on a yearning for original expression, whereby form and content are identified so that they become a single spatial diagram, a harmonious balance between opposing realms of thought. His special gift is an expression, through mathematical severity, of a perfect structure which, although the result of complicated formulae, appears so simple that it could have been observed from the laws of nature rather than arrived at through human thought.

"Nervi è un artista suo malgrado, perfino a dispetto delle sue convinzioni teoriche"[62] è un'affermazione forte, che ribalta radicalmente la prospettiva con cui fino allora era stata interpretata la sua opera. Mettendo in evidenza la distanza tra queste le sue posizioni teoriche, coglie con estrema lucidità l'effettivo rapporto tra Nervi e l'estetica delle forme: un rapporto impossibile da eludere, anche quando egli stesso tenta di ridurlo a semplice conseguenza della buona tecnica.

In una sola frase Rogers esplicita l'insieme delle contraddizioni compresenti nella sua persona: Nervi sostiene costantemente che la riuscita estetica è il risultato naturale di una corretta concezione tecnica e costruttiva, negando qualsiasi intenzionalità artistica autonoma. Eppure, dietro questa dichiarata razionalità, si intravede una consapevolezza profonda del valore espressivo delle sue forme. Il suo modo di dissimulare l'interesse per la dimensione estetica - quasi a volerla subordinare a una giustificazione scientifica che sola ne legittimi l'esistenza - rivela in realtà quanto questa dimensione gli sia intimamente necessaria.

L'espressione *suo malgrado* assume dunque un tono ironico e smaschera, in qualche misura, la strategia retorica con cui Nervi tende a minimizzare il ruolo dell'estetica nel proprio lavoro. Egli sa perfettamente di produrre opere che, oltre alla correttezza strutturale, possiedono una forza visiva e poetica difficilmente riducibile a meri principi ingegneristici e costruttivi. La cura con cui egli documenta fotograficamente le sue architetture - affidandosi ai migliori professionisti del tempo - e la scelta di riempire le proprie pubblicazioni di immagini evocative, spesso più suggestive che esplicative, dimostrano la sua piena coscienza della potenza comunicativa delle sue opere.

Nervi non costruisce, quindi, soltanto edifici funzionali e staticamente corretti: egli crea (e intende creare) forme che

Luigi Nervi. Constructions et project, Editions Vincent Fréal et Cie, Paris 1957; trad. ted. Pier Luigi Nervi. Bauten und Projecte, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1957).

[62] Sergio Pace nella prefazione di Neri G., (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, Novara 2014

Nervi, ingegnere e scrittore, «artista suo malgrado» (secondo un'imbarazzante definizione di Ernesto N. Rogers), evoca e talvolta invoca una presenza quasi mistica di bellezza e poesia, fatta di geometrie assolute e giochi di luce la cui necessità difficilmente potrebbe essere ricondotta a un discorso razionale.

emozionano, che parlano al pubblico attraverso la chiarezza strutturale e la forza plastica della materia. Anche chi non ne comprende i principi tecnici, è in grado di percepire - secondo lui - l'armonia e la tensione estetica che esse emanano. In questo senso, Nervi è davvero "artista suo malgrado": non perché ignori la dimensione artistica, ma perché la riconosce e la pratica senza mai ammetterla apertamente, come se la bellezza delle sue opere dovesse giustificarsi solo attraverso la scienza.

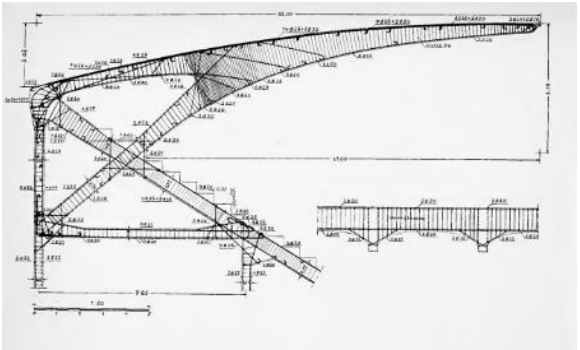
Il disegno delle armature

È particolarmente interessante osservare nel dettaglio il caso dei disegni delle armature che compaiono con frequenza nelle pubblicazioni di Pier Luigi Nervi[63].

Queste rappresentazioni, apparentemente tecniche e neutre, offrono, in realtà, una chiave di lettura preziosa del suo pensiero: esse rendono visibile l'estetica come esito della tecnica, ma, più ancora, rivelano un'estetica della tecnica stessa.

Nervi eleva la tecnica a linguaggio figurativo, restituendole una dimensione estetica autonoma. Il disegno dell'armatura diventa così una forma di rivelazione, in cui la bellezza deriva dalla purezza del principio costruttivo.

L'armatura metallica deve essere sempre estetica, deve dare l'impressione di un fascio di nervi destinato a dar vita alla più inerte massa del conglomerato[64].

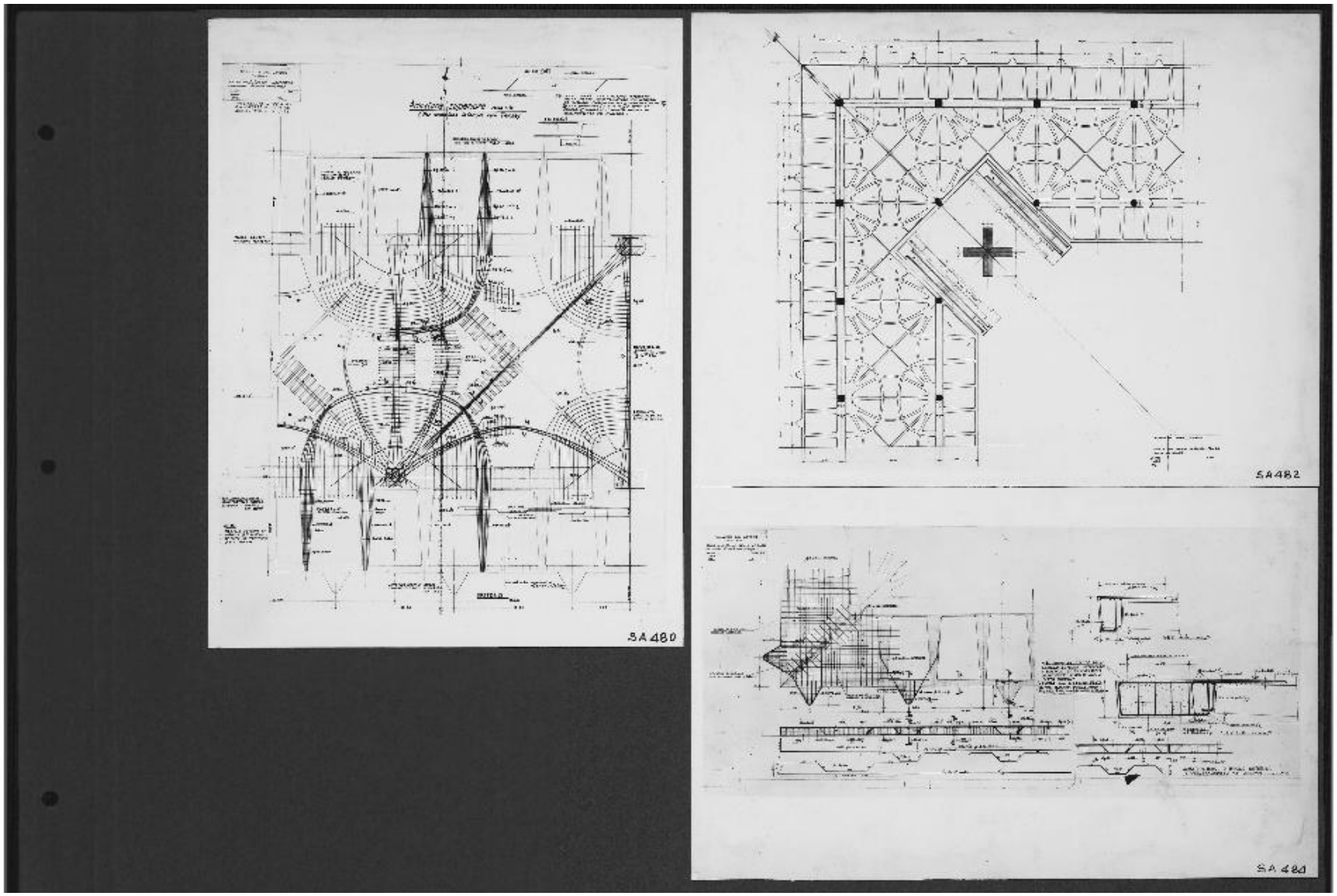




Tribuna dello Stadio Berta

[63] Gargiani R., Bologna A., *The rhetoric of Pier Luigi Nervi. Concrete and ferrocement forms*, Oxford 2016.
Nella descrizione della tavola delle armature del cavalletto dello stadio Berta, Gargiani e Bologna scrivono: *For an intimate understanding of the significance and aesthetics of those lines, it is crucial to compare the design of the metal reinforcement of the shelter's structure with the photograph of that same part - a comparison which Nervi repeated several times. Only by looking at the metal bars, and at the way they are folded and intertwined, is it possible to grasp the invisible mechanical soul that made it possible for inert matter to hover in the air.*

[64] Nervi P.L., *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Milano 1955 Capitolo secondo: Di alcune caratteristiche costruttive del cemento armato



Disegni di dettaglio del solaio del mezzanino del Palazzo del lavoro, Torino

2.2.4 Gli scritti di Pier Luigi Nervi. Dichiarazioni di intenti

La funzione di divulgatore assume per Nervi un rilievo decisivo perché gli consente di attribuire valore e di inquadrare criticamente anche quelle opere che non hanno raggiunto una piena realizzazione, rimanendo allo stadio di progetto o persino di idea. L'elaborazione teorica, infatti, arricchisce il significato della documentazione presentata e ne amplia la portata interpretativa.

Nervi stesso, infatti, teme che il proprio lavoro, frutto di un metodo in continuo perfezionamento, possa non essere compreso e di conseguenza non diventi - come lui si augura - la base per un autentico progresso tecnico e culturale. Questa preoccupazione lo spinge a sistematizzare le sue concezioni in libri, saggi e articoli, orientando la valutazione dell'opera architettonica verso criteri oggettivi e una visione positiva della critica architettonica. Con lo stesso rigore egli svolge per diciassette anni, dal 1945 al 1962, l'insegnamento di *Tecnica delle costruzioni* e *Tecnologie dei materiali* presso la Facoltà di Architettura di Roma, consolidando una prassi didattica coerente con le proprie posizioni[65].

Alla produzione scritta- affiancata da una intensa attività di conferenziere -si collega l'impegno costante nel rivendicare un ruolo pubblico adeguato per l'ingegnere all'interno della società. Tale impegno si manifesta sin dagli esordi nell'attivismo nelle associazioni professionali e prosegue con la partecipazione ai dibattiti sull'autarchia prima e sulla ricostruzione. Nel secondo dopoguerra si consolida attraverso la sua autorevole presenza nel confronto scientifico e culturale del momento, nonché nel contributo operativo da lui offerto a numerosi enti e istituti di ricerca, pubblici e privati. In questa prospettiva, la partecipazione alla vita pubblica avviene sempre dal punto di vista specifico del mondo delle costruzioni, con una chiara coscienza del proprio ruolo e delle proprie responsabilità.

Pur orientando la maggior parte degli sforzi alla dimensione concreta del costruire, Nervi interpreta quindi l'ingegneria come professione eminentemente intellettuale, al servizio della collettività. Di qui deriva l'idea che temi, risultati e procedimenti debbano essere condivisi oltre il ristretto perimetro disciplinare e resi accessibili a un pubblico più ampio. Tre, quindi, sono gli assi concettuali per comprendere la sua opera: la congiunzione tra sensibilità creativa e competenza tecnica, la necessità di educare l'ambiente culturale al riconoscimento dei valori generati da tale integrazione e, non ultima, la responsabilità formativa verso le nuove generazioni di ingegneri e architetti. Non sorprende, in questo quadro, l'adozione di una prosa volutamente lineare, contenuta nei tecnicismi e priva di compiacimenti lessicali, pensata per mantenere un'alta densità concettuale senza sacrificare la chiarezza espositiva[66].

E' una strategia comunicativa che funziona: le sue convinzioni sull'arte del costruire, accompagnando e potenziando il significato dell'opera realizzata, contribuiscono alla formazione di una reputazione straordinaria e diffusamente riconosciuta anche oltre i confini strettamente disciplinari[67]. In questo quadro, inoltre,

[65] Desideri P., Nervi jr P.L., Positano G. (a cura di), *Pier Luigi Nervi*, Zanichelli, Bologna 1979. Introduzione

[66] Neri G., (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, Novara 2014. Introduzione.

[67] Ibidem

bisogna ricordare che, attraverso gli scritti, Nervi ha instaurato un dialogo alla pari con figure centrali della cultura architettonica e ingegneristica italiana del Novecento, suscitando reazioni talvolta convergenti, talvolta divergenti, comunque sempre di ampio rilievo.

L'elenco dei periodici in cui compaiono i contributi di Nervi, anche solo limitandosi al contesto italiano, è la prova della sua volontà di dialogare con pubblici differenti e di rivolgersi a interlocutori sempre nuovi, adattando il proprio linguaggio e i propri contenuti ai diversi contesti. Oltre che nelle più autorevoli riviste dell'architettura e del design, suoi testi possono leggersi in organi di associazioni professionali, quotidiani di orientamento politico definito, pubblicazioni promosse dalle istituzioni scientifiche rinnovate nel secondo dopoguerra, o altre sedi editoriali legate a orientamenti teorici specifici. Questa distribuzione non è casuale: come afferma Sergio Pace, essa riflette la volontà di incidere simultaneamente sul dibattito tecnico, su quello culturale e su quello civile, confermando come la scrittura, l'insegnamento e la partecipazione pubblica costituiscono, nel loro insieme, un dispositivo unitario di costruzione e trasmissione del sapere progettuale[68].

In base al registro comunicativo scelto, nella bibliografia di Pier Luigi Nervi, è possibile individuare due principali categorie di scritti.

La prima comprende testi dedicati alla descrizione di specifiche tematiche tecnico-costruttive - come il ferrocemento, la resistenza per forma, la prefabbricazione strutturale o le costruzioni navali - e alla documentazione delle sue opere più celebri: lo *Stadio Berta*, le *aviorimesse in cemento armato*, i *saloni di Torino Esposizioni*, il *Palazzo del Lavoro* e il *Palazzetto dello Sport*. In questi scritti, con poche eccezioni, la scrittura di Nervi assume la forma di una relazione tecnica, calibrata di volta in volta sul pubblico di riferimento, che può variare dal lettore non specialista delle riviste divulgative, al pubblico più esperto dei convegni di ingegneria. In ciascuno di questi testi, Nervi ha la finalità di illustrare in modo chiaro le caratteristiche del proprio operato: gli assunti di partenza, il processo costruttivo e i risultati attesi.

Un secondo gruppo di scritti amplia invece lo sguardo a temi di più ampio respiro, che nel loro insieme delineano la sostanza del pensiero teorico di Pier Luigi Nervi. Si tratta di testi che nascono dall'esperienza diretta della pratica progettuale e si articolano in riflessioni di carattere critico e metodologico: questioni relative al processo di progettazione, al rapporto tra tecnica ed estetica, alla formazione dei nuovi tecnici, al divario tra architettura e ingegneria, al valore dei procedimenti empirici e al ruolo dell'economia del costruire. In questi scritti trovano spazio anche considerazioni più ampie sui problemi concreti della professione, dal disegno alla gestione del cantiere[69].

Se il primo gruppo di scritti trova la sua collocazione prevalente in articoli e saggi, forme brevi di comunicazione che ben si adattano alla presentazione di un singolo progetto o di un tema specifico - spesso legato a un evento, una mostra o un convegno tecnico -, il

[68] Sergio Pace nella prefazione di Neri G., (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, Novara 2014

[69] Queste ripartizione è proposta da G. Neri nel testo Neri G., (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, Novara 2014

secondo gruppo si manifesta invece anche in contesti più ampi e articolati. Oltre alla pubblicazione su riviste e atti accademici, queste riflessioni trovano infatti la loro espressione più compiuta nei libri monografici in cui egli stesso presenta la sua opera, che assumono così un valore didattico e dichiarativo.

L'evoluzione delle monografie

All'interno della produzione monografica di Nervi si possono individuare tre opere fondamentali che, scritte a distanza di circa un decennio l'una dall'altra, rivelano con chiarezza questo carattere didattico di questo filone della sua attività teorica.

La prima, *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato* (1945), presenta una raccolta organica di riflessioni che Nervi elabora in un momento di piena maturità professionale e tecnica, a cinquantaquattro anni, dopo oltre trent'anni di attività. In questo volume, l'autore è in grado di offrire una sintesi coerente di un percorso di scrittura avviato fin dagli anni Dieci e portato avanti fino a quel momento, in parallelo alla pratica di progettista e costruttore. I dieci capitoli del volume trovano corrispondenze dirette in testi precedenti pubblicati su riviste di ingegneria e architettura, segno di una continuità di pensiero che attraversa tutta la produzione nerviana. L'opera nel suo complesso costituisce una profonda riflessione sull'approccio progettuale, sviluppata attraverso una dialettica costante tra scienza e arte, che diventa la chiave interpretativa del suo intero percorso teorico e professionale. Il carattere interrogativo del testo è già dichiarato nel titolo, formulato come una domanda, che introduce il lettore all'interno di un dibattito aperto sul rapporto tra la formazione scientifico-matematica dell'ingegnere e la tecnica del costruire come sapere pratico, storicamente fondato sull'esperienza, sulla conoscenza diretta dei materiali e sull'intuito.

Nel volume *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate* (1955), Nervi riprende e sviluppa i temi già affrontati in *Scienza o arte del costruire?*, ripubblicando interi capitoli e proponendo una versione rielaborata del sottotitolo, a conferma della continuità tra le due opere. Pur muovendosi nel solco del volume precedente, questo testo introduce però una novità sostanziale: l'integrazione tra discorso teorico e apparato visivo. Nervi arricchisce infatti il testo con numerose immagini, tratte dai propri progetti, che includono disegni, fotografie di opere realizzate e documentazioni di esperimenti condotti nei cantieri o nei laboratori. L'aspetto innovativo risiede nella relazione diretta tra concetto e rappresentazione: le immagini non svolgono un ruolo illustrativo accessorio, ma diventano parte integrante del discorso didattico, capaci di tradurre in forma visiva i principi teorici esposti nel testo.

Infine, *Aesthetics and Technology in Building* (1965) raccoglie la trascrizione delle lezioni che Pier Luigi Nervi tiene all'Università di Harvard tra il 1961 e il 1962, invitato a dare in quell'anno didattico le Charles Eliot Norton Lectures. Questa prestigiosa cattedra, istituita con l'obiettivo di riconoscere e celebrare l'espressione poetica delle arti e delle discipline umanistiche, rende la presenza di Nervi particolarmente significativa e, al tempo stesso, sorprendente. Egli non è infatti solo un accademico in senso stretto, bensì un professionista e un costruttore.

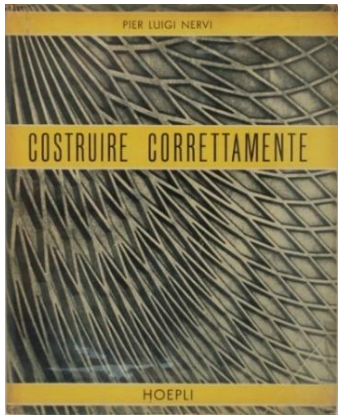
Il volume, articolato in quattro sezioni, riprende in parte i temi trattati nelle monografie precedenti, ma introduce anche motivi nuovi, alcuni dei quali già accennati in *Costruire correttamente*. Tra questi, assumono particolare rilievo la riflessione sul rapporto tra passato e presente nelle forme dell'architettura e la presentazione dei propri progetti attraverso un ricco apparato iconografico composto da fotografie, disegni, immagini di cantiere, schemi

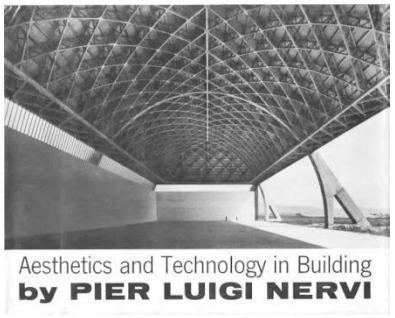
statici e dettagli costruttivi. Tali materiali assumono la stessa dignità del testo scritto, costituendo una forma parallela di comunicazione.

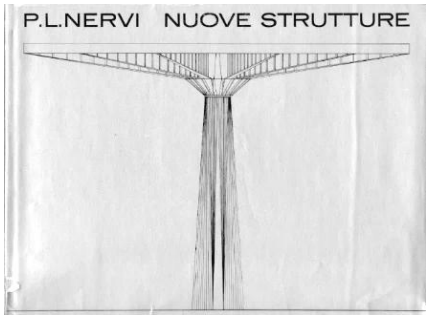
A completamento di questo percorso va infine considerato il caso di *Nuove strutture* (1963), in cui Nervi compie un passaggio ulteriore e decisivo nella sua evoluzione espressiva. Fatta eccezione per una breve introduzione iniziale, l'autore elimina completamente il testo, affidando alle immagini e alle loro relazioni il compito di veicolare significato. Il libro si configura così come una narrazione visiva autonoma, in cui la sequenza delle tavole diventa strumento di riflessione e al tempo stesso testimonianza duratura dell'attività di Nervi come progettista e costruttore. La varietà dei materiali iconografici offre un quadro complessivo e articolato della sua opera: dagli schizzi di progetto, che rivelano una raffinata sensibilità statica, ai disegni esecutivi, che illustrano i progetti a tutte le scale; dai cronoprogrammi, che evidenziano la logica organizzativa e l'efficienza del cantiere, alle fotografie di cantiere, che documentano le modalità operative - spesso innovative - adottate durante la costruzione; fino alle immagini delle opere completate, frequentemente affiancate alle tavole delle armature, particolarmente evocative nel mostrare il passaggio dal momento ideativo a quello realizzativo, ovvero dalla forma dell'arte alla forma costruita[70].

In conclusione, può affermarsi che Nervi, lungo il suo percorso teorico e in particolare nelle pubblicazioni monografiche, ha modificato progressivamente i propri strumenti di comunicazione: dal rigore argomentativo della parola scritta alla potenza evocativa dell'immagine. Egli passa così dalle logiche chiare, controllabili e dimostrative del testo tecnico a una comunicazione visiva e formale, più aperta e interpretativa, in cui il significato non è più stabilito una volta per tutte, ma - al pari delle opere d'arte - si genera nella relazione tra immagine, costruzione e sguardo.









[70] L'esperienza comunicativa di Nuove Stutture era stata già sperimentata nel volume J. Joedicke, Pier Luigi Nervi, Edizioni di Comunità, Milano 1957

3 Genesi dei solai a linee isostatiche

I solai a linee isostatiche nascono in un momento di piena maturità professionale di Pier Luigi Nervi, quando egli è ormai una figura affermata nel panorama nazionale e internazionale. In questi anni si prepara infatti al suo primo incarico internazionale, il *Palazzo UNESCO* a Parigi (1952-1958), ed è già riconosciuto come imprenditore abile, docente stimato e divulgatore colto, autore di saggi e della sua prima monografia, *Scienza o arte del costruire?*.

Nel secondo dopoguerra, in un periodo che per Nervi è caratterizzato da grande entusiasmo e vigore, emerge con forza la volontà di tradurre in pratica le sperimentazioni sul cemento armato condotte negli anni precedenti. Le condizioni economiche e produttive del tempo, unite alla scala contenuta dei primi progetti, favoriscono un atteggiamento pionieristico e sperimentale.

I primi esempi significativi sono quelli del *Lanificio Gatti* e della *Manifattura tabacchi* di Bologna: due edifici destinati a funzioni produttive e di deposito. Proprio la natura di questi interventi - privi di un'esposizione pubblica rilevante e mirati principalmente a un obiettivo economico - offre a Nervi la libertà di testare nuove modalità di progettazione e costruzione.

In questo contesto si inserisce la figura di Aldo Arcangeli, ingegnere interessato alle volte sottili e alle piastre elastiche. Arcangeli apporta un contributo fondamentale: è lui a fornire la base teorica e matematica che permette di interpretare e applicare i principi delle linee isostatiche alla costruzione in cemento armato, intuendone le potenzialità a livello strutturale e nella razionalizzazione del materiale.



Pagina dell'album delle diapositive. Costruzioni in ferrocemento

3.1 Le linee isostatiche

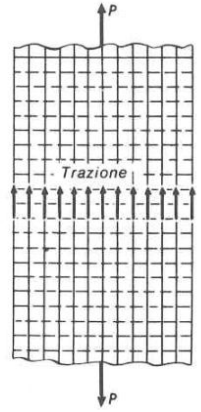
Quando un elemento strutturale è sottoposto all'azione di forze esterne, al suo interno si genera un flusso di forze interne che definisce lo stato complessivo di sollecitazione.

Nel caso piano, l'andamento degli stati interni di tensione - di trazione e di compressione - può essere rappresentato mediante le *direzioni principali delle tensioni*. In ogni punto del corpo queste direzioni variano, delineando due famiglie di curve che si intersecano ovunque ad angolo retto: esse prendono il nome di *linee delle tensioni principali, o linee isostatiche*.

L'andamento delle isostatiche rappresenta il flusso delle tensioni all'interno dell'elemento strutturale. Lungo le due direzioni ortogonali si manifestano rispettivamente la tensione principale massima e la tensione principale minima, corrispondenti alle direzioni principali. I valori associati a tali tensioni sono detti valori principali.

La combinazione delle tensioni di trazione e compressione genera uno stato di taglio puro, che si orienta a 45° rispetto alle direzioni principali. Ne consegue che lungo tali direzioni le tensioni tangenziali risultano nulle, mentre raggiungono il loro massimo valore nelle direzioni intermedie.[71].

Un caso noto della distribuzione delle linee isostatiche si osserva in un'*asta piatta* soggetta a trazione semplice. In tal caso, il campo di tensioni si organizza in un reticolo regolare, costituito da linee verticali di trazione e linee orizzontali di compressione. Se, tuttavia, l'asta presenta una discontinuità geometrica, come un foro, le linee di trazione non possono attraversarla e, di conseguenza, si incurvano. Questo fenomeno provoca un addensamento delle isostatiche di trazione in prossimità del foro, mentre le isostatiche di compressione si deformano in modo da restare ortogonali alle prime.

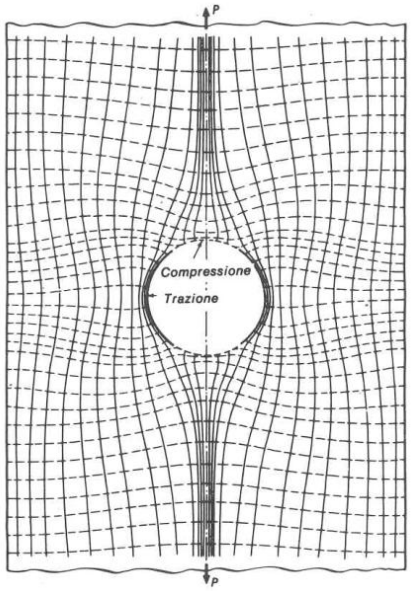


Isostatiche in un'asta piatta

L'andamento del flusso delle tensioni può essere efficacemente interpretato attraverso un'analogia idrodinamica: esso si comporta come il flusso di un fiume. Quando le sponde sono parallele e prive di ostacoli, le linee di corrente risultano regolari e parallele; se invece un corpo di sezione circolare, come una pila, è immerso nel flusso, le linee si incurvano per aggirarlo, generando un'accelerazione del moto nella zona di strozzatura. In modo del tutto analogo, in un elemento strutturale forato la presenza della discontinuità geometrica costringe le linee di flusso delle tensioni a deviare, determinando un addensamento e un conseguente incremento locale delle tensioni di trazione. Ne deriva che la distribuzione tensionale nelle sezioni prossime al foro non risulta

[71] Salvadori M., Heller R. (a cura di), *Structure in Architecture*, Englewood Cliffs New Yersey 1963, (trad.it., *Le strutture in architettura*, Milano 1992).

uniforme, ma presenta valori più elevati in corrispondenza dei bordi; questo fenomeno è noto come concentrazione delle tensioni[72].

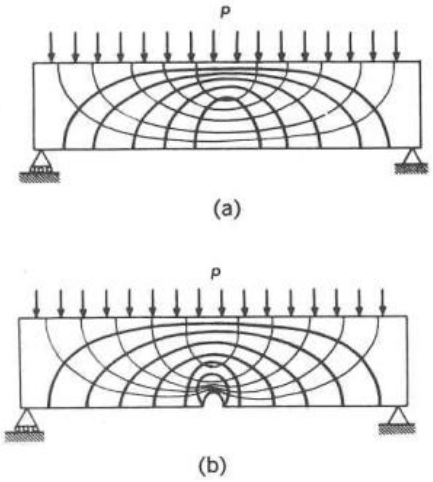


Isostatiche in una barra tesa forata

Un comportamento analogo può essere osservato anche in elementi soggetti a flessione. La figura seguente illustra le isostatiche relative a una trave semplicemente appoggiata e soggetta a carico uniformemente distribuito.

Le isostatiche mostrano come la distribuzione delle tensioni di trazione e di compressione, descritte nei paragrafi precedenti, può essere interpretata come la sovrapposizione di due campi di tensione: uno di tipo "arco", rappresentato dalle linee di compressione a tratto marcato, e uno di tipo "fune", rappresentato dalle linee di trazione a tratto sottile. Le due famiglie di linee risultano ortogonali tra loro.

La fibra inferiore della trave è soggetta a trazione; pertanto, se la trave viene intaccata inferiormente, in corrispondenza della mezzeria, si verifica un aumento della concentrazione delle tensioni, poiché le isostatiche di trazione devono aggirare la tacca, addensandosi al di sopra di essa[73].



Isostatiche in travi semplicemente appoggiate

Quando ci si limiti a studiare problemi piani, è possibile determinare, sia pure con qualche difficoltà, il tracciato delle isostatiche ed i valori delle tensioni principali per via analitica o per via fotoelastica; e tale rappresentazione dello stato tensionale aiuta ad individuare le forme resistenti più convenienti[74].

[72] Ibidem
[73] Ibidem
[74] Ibidem

3.1.1 Determinazione delle linee isostatiche di tensione per via fotoelastica

Prima di passare al modo con cui si determinano le linee isostatiche, è necessario riepilogare quanto si è detto per chiarire quali sono i *reticoli caratteristici*[75].

Le isostatiche. O traiettorie di tensioni principali sono le linee che danno in ogni punto del piano la direzione delle tensioni principali σ_1 e σ_2. Esse costituiscono un reticolo ortogonale in tutto il campo del provino.

Le linee di taglio massimo. Si ottengono tracciando, in ogni punto del piano, le direzioni orientate a 45° rispetto alle tensioni principali. L'insieme di queste linee forma un reticolo ortogonale, che individua le direzioni delle facce - o faccette - sulle quali agiscono le tensioni tangenziali massime.

Le isocline. Rappresentano il luogo geometrico dei punti del piano nei quali le tensioni principali mantengono una direzione costante, coincidente, in un'analisi fotoelastica, con quella dei piani di polarizzazione. Ogni isoclina deve essere accompagnata da un dato angolo *n*° che ne determina l'orientamento.

La grande facilità con la quale si possono ottenere le isocline in fotoelasticità, fa di queste un reticolo essenzialmente sperimentale. È a partire dalle isocline sperimentali che si tracciano le isostatiche e le linee di taglio massimo.

[75] Guarneri L., *Teoria e applicazioni sulla fotoelasticità. Sistemi di ricerca e di indagine capaci di portarci ad uno sfruttamento del materiale sempre più vicino alle leggi perfette della natura*, Milano 1950.

Le isocromatiche. Rappresentano il luogo di uguale differenza delle tensioni principali, $\sigma_1 - \sigma_2$ = costante. Dunque, lungo una isocromatica anche il taglio massimo è una costante.

A differenza delle linee isostatiche e isocline, le linee isocromatiche sono un reticolo quantitativo.

Determinazione delle linee isocline e isocromatiche

Le linee isocline corrispondono ai punti in cui una delle tensioni principali forma un angolo costante con la direzione del polarizzatore. Per visualizzarle in modo chiaro è necessario eliminare le isocromatiche, il che si ottiene scegliendo materiali con bassa costante ottica C, tali che la differenza tra le tensioni principali, $\sigma_1 - \sigma_2$, produca un ritardo ottico δ inferiore all'unità. In queste condizioni, le frange di colore (isocromatiche) non si formano e risultano visibili soltanto le linee isocline, che appaiono con notevole nitidezza. Esse permettono di individuare la direzione delle tensioni principali in ogni punto del modello.

Per ottenere un reticolo di *linee isocromatiche* ben definito, è necessario sopprimere le isocline. Ciò si realizza utilizzando polarizzatori e analizzatori circolari (posti nello stesso senso di rotazione), i quali eliminano l'effetto direzionale delle isocline e lasciano visibili soltanto le frange isocromatiche. In questo caso il modello deve essere costruito con materiali ad alta costante ottica C, così da generare un reticolo denso e ben visibile anche per piccole variazioni di tensione. Le osservazioni vengono eseguite in luce monocromatica, condizione che consente di distinguere

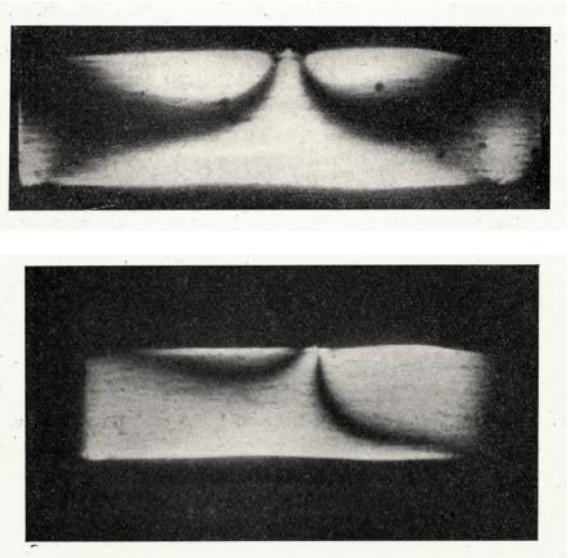
chiaramente gli ordini di frangia e di correlare ogni frangia a un determinato valore della differenza di tensione principale[76].

Determinazione delle linee isostatiche

Per determinare graficamente le linee isostatiche è necessario visualizzare le linee isocline a varie angolazioni. Esse si ottengono ruotando la croce delle direzioni principali dell'apparecchio e potranno facilmente distinguersi da eventuali punti o linee neutre perché queste ultime restano fisse durante la rotazione suddetta.

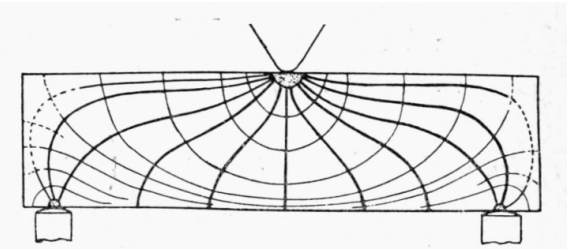
Nello specifico, si disegna o si fotografa la posizione che successivamente assumono sullo schermo le isocline facendo ruotare, con progressivi spostamenti di piccola ampiezza angolare, la croce delle direzioni principali dell'apparecchio fino a compiere complessivamente un angolo di 90°. Si otterrà un insieme di linee isocline ciascuna delle quali è luogo dei punti del modello ove la direzione delle tensioni principali coincide con quella che la croce dei nicol ha quando tale isoclina appare sullo schermo.

Da questo diagramma si passa poi a quello delle curve isostatiche mediante facili procedimenti grafici. Le figure seguenti forniscono le isocline relative a una inclinazione della croce delle tensioni principali rispettivamente di 45° e 25° sulla verticale in una trave corta e alta, inflessa per effetto di un carico concentrato agente circa a metà della luce.



Linee isocline relative a prove a 45° e a 25°

Nella figura seguente sono visibili le linee isostatiche corrispondenti al caso illustrato dalle fotografie stesse[77].



Linee isostatiche relative al caso precedente

[76] Ibidem.

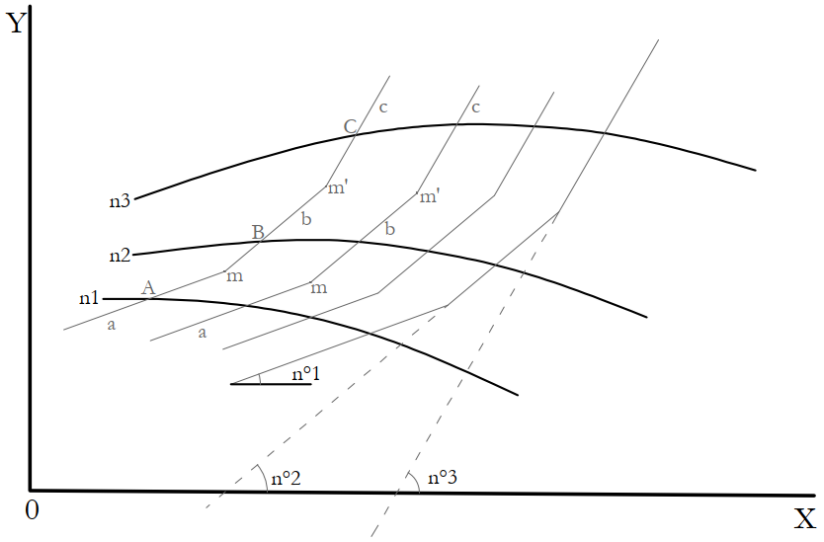
[77] Danusso A., Oberti G., *Indagini sperimentali sulle costruzioni. "La fotoelasticità"*, Milano 1932

Esistono vari metodi di rappresentazione delle linee isostatiche, partendo dalle linee isocline. Consideriamone uno, facendo riferimento alla figura seguente[78].

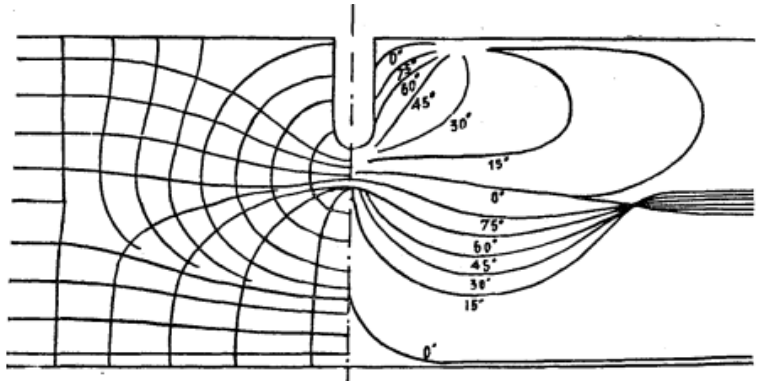
Siano le tre isocline date contrassegnate con n1, n2, n3. In ogni punto della isoclina n1 una delle tensioni principali fa con l'asse OX l'angolo costante n°1, noto. È quindi possibile, in punti opportunamente distanziati lungo l'isoclina n_1, tracciare dei piccoli segmenti, indicati con a, inclinati rispetto all'asse OX di un angolo n°1. Ciascuno di questi segmenti può essere prolungato con altri tratti, detti b, che attraversano l'isoclina n2 e formano con l'asse 0X di riferimento l'angolo n°2.

La difficoltà risiede nella indeterminazione dei punti analoghi a m. Se l'arco di isostatica tra n1 e n2 è assimilato ad un arco di cerchio, le due tangenti a questo, uscite da m devono essere uguali.

Un metodo semplice e ordinariamente sufficiente è quello di prolungare i tratti « a » verso l'isoclina n2 fino ad una linea che non si traccia, ma che si immagina e che segna il luogo dei punti m. Si pone questa linea tra n1 e n2: questa rappresenta la posizione dell'isoclina di lato (n1+n2)/2.



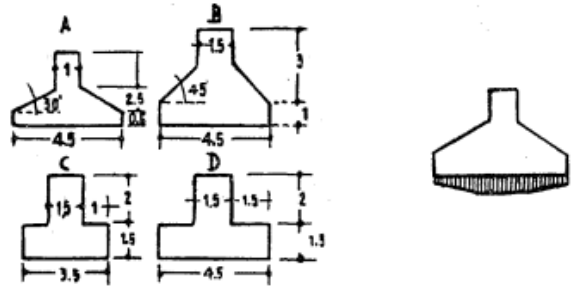
Costruzione del reticolo delle isostatiche



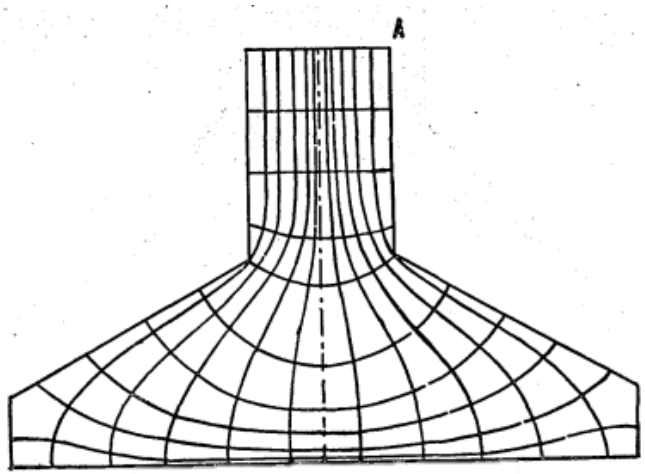
Curve isostatiche e curve isocline

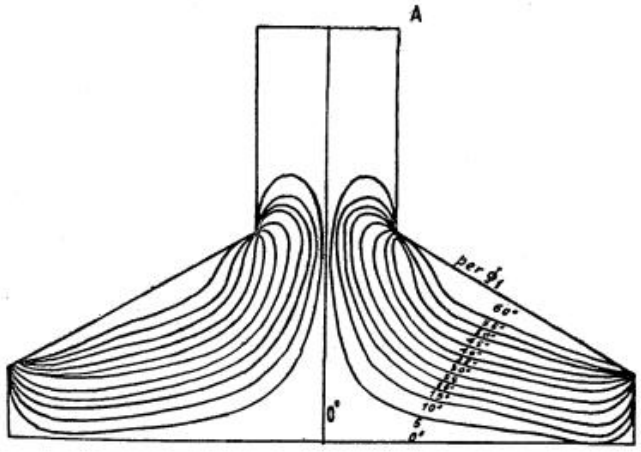
[78] Guarneri L., *Teoria e applicazioni sulla fotoelasticità. Sistemi di ricerca e di indagine capaci di portarci ad uno sfruttamento del materiale sempre più vicino alle leggi perfette della natura*, Milano 1950.

Vediamo ora l'andamento delle curve isostatiche, isocline e isocromatiche di un plinto, sottoposto a una distribuzione parabolica del carico al piede[79].

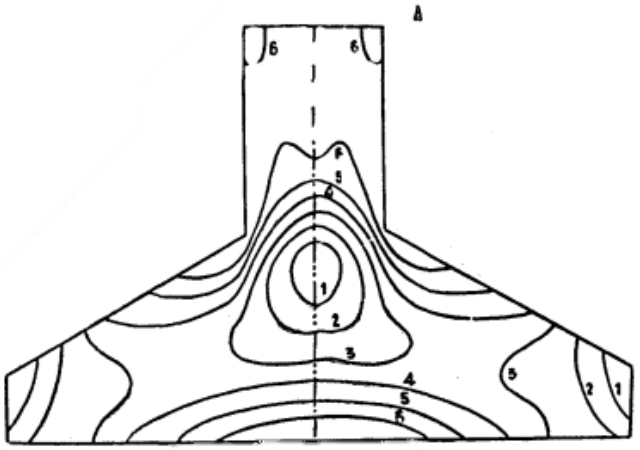


Schemi di plinti di fondazione





Curve isocline



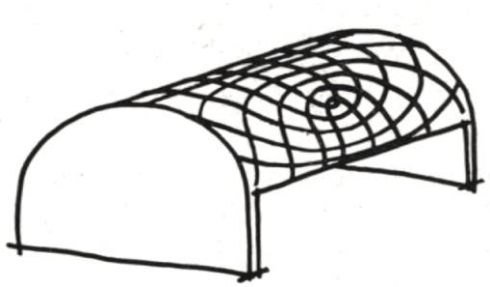
Linee isostatiche delle tensioni principali e Curve isocromatiche

[79] Ibidem.

3.1.2 Le linee isostatiche al di là del funzionamento a lastra

Il *plesso tensionale* caratteristico del funzionamento di una lastra piana soggetta a forze applicate sul suo piano presenta un interesse notevole, e si può utilizzare anche nel caso di elementi laminari curvi, quali volte, cupole o simili, sulla cui superficie si producono stati tensionali analoghi; stati che si possono considerare in ogni punto contenuti nel piano tangente alla superficie media della lamina curva[80].

Nel caso di comportamento a membrana, infatti le sollecitazioni che sono contenute nel piano tangente danno luogo a due tensioni principali. Se applichiamo questo ragionamento al caso di una volta sottile, otteniamo due famiglie di linee isostatiche le quali, su ciascuna delle due falde, ricordano quelle di una trave piana[81].



Linee isostatiche su una volta sottile.

Se le tensioni principali sono afferenti agli sforzi normali di trazione e compressione nelle lastre piane caricate nel piano, esiste una controparte relativa ai momenti flettenti che si sviluppano nelle piastre caricate fuori dal piano: i momenti principali.

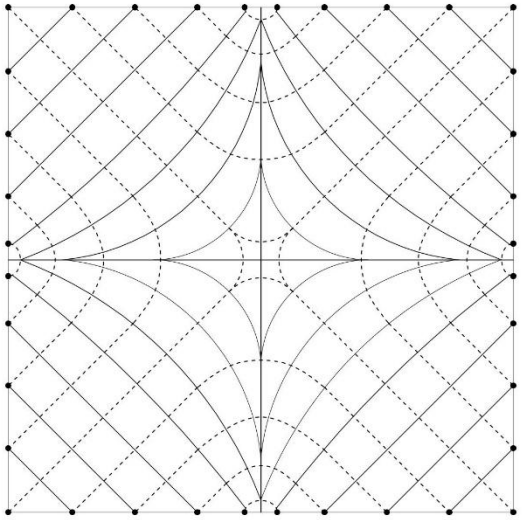
Dunque, in ogni punto di una piastra è possibile individuare delle direzioni ortogonali tra loro m e n - oltre alle direzioni x e y -, tali che sulle sezioni ad esse normali i momenti flettenti sono rispettivamente il momento massimo m_m e il minimo m_n. Inoltre, nelle stesse sezioni il momento torcente m_{mn} è nullo. L'inviluppo di queste direzioni restituisce le traiettorie delle linee isostatiche dei momenti principali[82].

È interessante vedere il cambiamento delle linee isostatiche su una piastra regolare caricata uniformemente. Il reticolo delle due famiglie di linee ortogonali tra loro cambia profondamente, per esempio, al cambiare del vincolo. Le linee, infatti, seguendo i momenti flettenti massimi e minimi, si modificano al variare della configurazione. Vediamo nella figura seguente quattro esempi: lati appoggiati, angoli appoggiati, lati incastrati in una piastra quadrata, lati appoggiati su una piastra rettangolare.

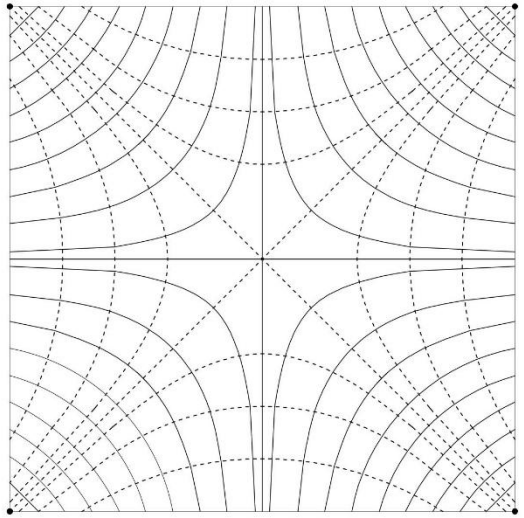
Le linee, per esempio, si distribuiscono a 45°, se si è in presenza di un appoggio nel caso della piastra quadrata, perché i momenti sono identici in entrambe le direzioni. Al contrario, nel caso dell'incastro, una famiglia di linee - quella momenti massimi - interseca il bordo in direzione perpendicolare, mentre l'altra gli è parallela, mantenendo il vincolo di ortogonalità reciproca.

Nel caso del vincolo sull'angolo c'è una maggiore concentrazione di linee in quel punto, data dalla presenza maggiore di sforzo a flessione.

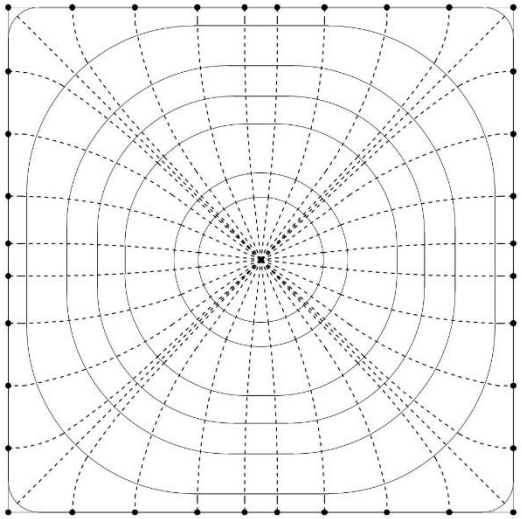
[80] Torroja E., *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid 1957 (trad. it., *La concezione strutturale. Logica ed intuito nella ideazione delle forme*, Torino 1995).
[81] Arcangeli A., *Nozioni sulle volte sottili*, Roma 1951.
[82] Pizzetti G., Zorgno Trisciuoglio A.M., *Principi statici e forme strutturali*, Torino1980



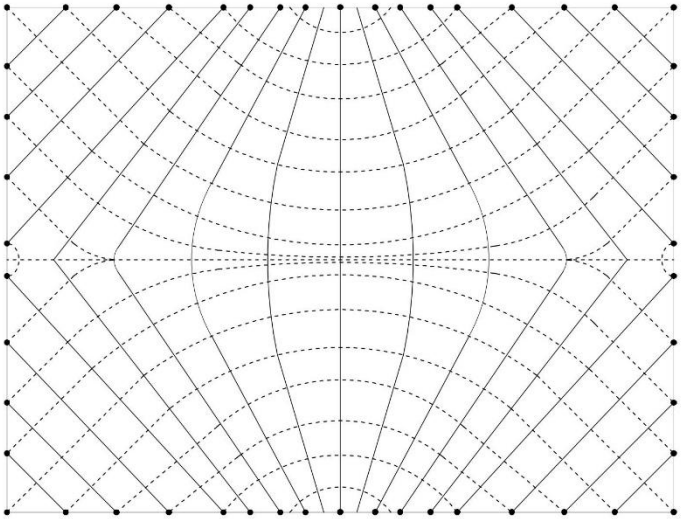
lati appoggiati



angoli appoggiati



lati incastrati



lati appoggiati

Esempi di linee isostatiche applicate alle piastre

3.1.3 Riflessioni sulle linee isostatiche

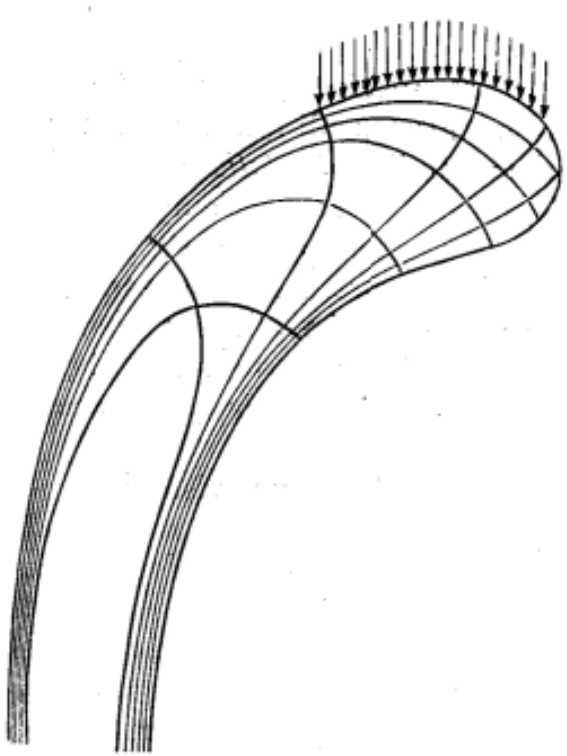
L'ambito di applicazione delle linee isostatiche delle tensioni principali o dei momenti principali è pressoché illimitato[83]. Per questo motivo risulta particolarmente interessante la disamina proposta da Gustavo Colonnetti (1928) a riguardo[84]:

> *Immaginiamo di poter mettere in evidenza in ogni punto del corpo quei certi tre elementi superficiali (tra loro ortogonali) che sono sollecitati solo da sforzi normali.*
>
> *Per ragione di continuità le tre direzioni principali (normali a tali elementi) inviluppano tre congruenze di linee, mutuamente ortogonali, che prendono il nome di linee isostatiche.*
>
> *Sta il fatto che le singole linee di ciascuna congruenza si potrebbero immaginare isolate le une dalle altre senza che il regime degli sforzi interni ne restasse alterato: il materiale resistente concentrato lungo di esse verrebbe allora a costituire una specie di tessuto alveolare il cui comportamento rispetto alla data sollecitazione non differirebbe affatto da quello proprio del solido dato.*
>
> *Né questa è, come potrebbe credersi a prima vista, una concezione puramente astratta, e priva di riscontro nella realtà fisica: essa si trova per contro praticamente realizzata in quei corpi elastici naturali che sono le nostre ossa.*
>
> *In verità la sostanza ossea è sempre disposta secondo lamine o trabecole più o meno sottili separate da numerosissime cavità: ed era noto da tempo come a questa particolare struttura si dovesse attribuire la grande resistenza agli sforzi esterni che le ossa presentano in relazione coll'esiguo peso di materiale resistente che esse contengono.*
>
> *In tempi relativamente recenti è stato poi osservato che la disposizione delle trabecole ossee non è affatto casuale, ma in modo ammirevole connessa cogli sforzi a cui esse debbono resistere.*
>
> *Ciò è confermato non soltanto dal modo con cui tali trabecole si formano e si sviluppano nel bambino, ma sopratutto dal modo con cui, nell'uomo già adulto, esse si modificano spontaneamente in quelle ossa che, per avere per qualsiasi ragione assunte stabilmente posizioni anormali, vengono ad essere abitualmente sollecitate in modo diverso dal solito.*
>
> *Nei casi in cui la sollecitazione prevalente è più facilmente individuabile si è potuto riconoscere che l'andamento delle trabecole ossee segue sensibilmente quello delle linee isostatiche.*
>
> *Tra gli esempi più caratteristici si cita quello dell'epifisi superiore del femore.*
>
> *In questo, come del resto in tutte le ossa lunghe, il tessuto compatto si limita ad una guaina che lo riveste completamente: essa ha il massimo spessore nella parte media, o diafisi, il cui interno è occupato da una vasta cavità, il canale midollare.*
>
> *Verso la estremità, dalla guaina compatta si dipartono le trabecole, disposte in gettate ad arco, le quali intersecandosi mutuamente fra loro formano il tessuto spugnoso che occupa le epifisi dell'osso, su cui, attraverso le varie articolazioni, si trasmettono le principali forze esterne.*
>
> *Nel caso che ci occupa la predominante di queste forze è il peso del corpo che, in posizione normale, grava sulla testa del femore. Per facilitare lo studio teorico della ripartizione delle tensioni interne, il Culmann ha immaginato*

[83] Thompson D'A.W., *Crescita e forma*, Torino 1969.

[84] Colonnetti G., *La statica delle costruzioni. Volume I*, Torino 1928. Si può ipotizzare, inoltre, che Arcangeli abbia letto questo testo per via delle citazioni all'interno del testo del brevetto.

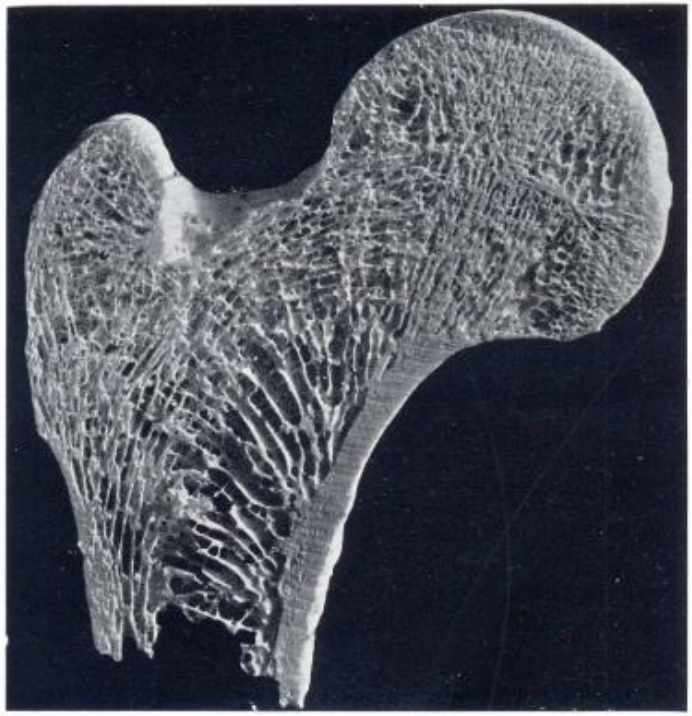
che l'estremità superiore del femore si potesse, dal punto di vista statico, paragonare ad un solido elastico omogeneo avente il profilo disegnato nella fig. 3 [figura seguente].



Ridotta la condizione di carico normale a quella schematica mente ivi indicata, egli ha potuto tracciare le linee isostatiche che si vedono riprodotte nella figura, e constatare la notevole affinità tra il loro andamento e quello delle trabecole ossee.

Non occorre dire che il problema reale è incomparabilmente più complesso non solo per la forma irregolare dell'osso, ma per la continua variabilità della legge di ripartizione con cui lo stesso carico si trasmette attraverso l'articolazione coxo-femorale, e sopratutto per l'intervento di altre forze, esse pure variabilissime, come son quelle sviluppate dai vari muscoli, e specialmente dai muscoli rotatori i quali, come è noto, hanno le loro inserzioni in corrispondenza del margine superiore e della faccia interna del grande trocantere.

Malgrado tutto ciò, ripetiamo, l'affinità sopra accennata sussiste evidentissima. E chi osservi con qualche attenzione la sezione di femore fotograficamente riprodotta nella nostra tav. I [figura seguente] non *potrà che rilevare come in certe regioni, e sopratutto in corrispondenza del collo del femore, l'andamento delle trabecole ossee concordi perfettamente con quello delle linee isostatiche trovate dal Culmann.*



3.2 Aldo Arcangeli

3.2.1 Formazione, studi, professione[85]

Aldo Arcangeli (10.06.1916 - 28.7.2000) nasce a Roma il 10 giugno del 1916; suo padre, Attilio Arcangeli è stato professore nelle università di Roma e Firenze, preside della facoltà di architettura di Firenze dal 1950 al 1956, autore di libri di scienza e tecnica delle costruzioni ed ha progettato e costruito numerose opere in cemento armato in Italia e in Libia.

Frequenta il corso di laurea in ingegneria civile all'università La Sapienza di Roma, dove si laurea il 3 novembre 1939, con una tesi su uno stadio olimpico e il relativo villaggio. Un aneddoto su questo tema riguarda il primo colloquio che ebbe con Pierluigi Nervi dove, nell'illustrare la sua tesi di laurea, si trovò a criticare alcuni aspetti funzionali di uno stadio, non sapendo che era stato progettato proprio da Nervi; quest'ultimo, lungi dal ritenersi offeso dalla critica, rimase ben impressionato dal modo di ragionare di questo giovane ingegnere.

Durante l'università fa il servizio militare in un'organizzazione allora in vigore per gli studenti: per due anni con incontri nel finesettimana, poi 3 mesi d'estate a Pavia alla Scuola di allievi ufficiali del Genio e per 7 mesi come sottotenente nel Genio Aerostieri, nell'estate successiva da luglio a dicembre.

Una volta laureato fa quindi il colloquio con Pierluigi Nervi e nel maggio del 1940 viene assunto. Come primo incarico viene mandato in un cantiere a Rosignano Solvay in Toscana e dal mese successivo viene integrato nell'organico dell'ufficio tecnico di Roma per eseguire i calcoli delle strutture in c.a.

Dopo scoppio della seconda guerra mondiale, nel 1940, parte come ufficiale del genio di complemento, lasciando lo studio Nervi dopo solo due mesi dall'assunzione.

Nel gennaio del 1941 viene fatto prigioniero degli inglesi a Tobruk, in Libia, e tenuto in prigionia in India fino al novembre 1946. Durante quegli gli anni tiene dei corsi di Scienza delle Costruzioni ad alcuni suoi colleghi di prigionia, sulla base di appunti scritti di suo pugno su carta di fortuna. Questi appunti, presi dai libri che aveva allora a disposizione, sono stati successivamente da lui trascritti e riordinati in due manoscritti ("W. Flugge, Statica e dinamica delle volte sottili, Springer 1934" e "note da A. Nàdai, Piastre elastiche")[86].

Tornato a Roma, la prima cosa che fa è ricontattare lo studio Nervi, che in questo periodo - come molti altri - attraversa una fase di difficoltà economica e dispone di pochi incarichi. Gli viene quindi proposto di organizzarsi in modo autonomo, in attesa di nuove occasioni di collaborazione. Per alcuni mesi svolge attività di libero professionista, finché non si presenta l'opportunità di riprendere il rapporto con Pier Luigi Nervi in occasione dell'incarico per il Palazzo delle Esposizioni di Torino (1947), di cui segue in

[85] In questo lavoro di ricostruzione della figura di Aldo Arcangeli è stata indispensabile la generosità della figlia Adriana Arcangeli che conserva parte del materiale d'archivio del padre. Tra i vari documenti vi sono dei curriculum redatti in varie date da Aldo Arcangeli ed uno redatto dalla figlia, dopo la morte del padre.

[86] Archivio ARCANGELI, Roma
Fascicolo A (documenti sparsi)
Libretti scritti a mano

particolare i calcoli della copertura voltata. Da quel momento la collaborazione con lo studio Nervi prosegue in modo intenso e continuativo per quattro anni. Dopo un periodo di pausa, la collaborazione riprende alla fine degli anni Settanta, con i progetti in Africa e in Medio Oriente.

Negli anni dal '47 al '60 è assistente alla cattedra di Tecnica delle Costruzioni della facoltà di architettura di Roma.

Attività didattica

Nell'ambito dell'attività didattica in primo luogo bisogna ricordare l'attività come assistente alla cattedra di Tecnologia dei Materiali e Tecnica delle costruzioni presso la Facoltà di Architettura, tenuta da Nervi.

La descrizione del corso[87]:

> *Il corso si può schematicamente considerare diviso in due parti: una, informativa, diretta alla illustrazione delle caratteristiche tecnologiche e di impiego dei materiali e degli elementi costruttivi fondamentali; l'altra formativa, rivolta a sviluppare la sensibilità statico-costruttiva e basata sull'esame critico (statico, costruttivo ed economico) di strutture resistenti complesse, con particolare riguardo alle costruzioni in cemento armato.*

L'ingegnere strutturista Antonio Michetti (1927-2010) così ricorda questo corso[88]:

> *[…]l'ultima materia di carattere tecnico era quella svolta dal professor Nervi. Vi dico questo per fare il quadro generale del corso di studi nel quale si inseriva l'esame di Nervi. Lo studente doveva svolgere un progetto esecutivo, disegnato e completo in tutti i suoi aspetti. Non ci si occupava solo delle strutture. Bisognava considerare gli infissi, le impermeabilizzazioni, le fognature fino ad accennare all'organizzazione del cantiere per poter eseguire l'opera.*
>
> *Lo scopo dell'esame era far comprendere come utilizzare tutte le nozioni acquisite nei 4-5 anni precedenti. Lo studente era libero di scegliere e di sviluppare un progetto che aveva già affrontato a livello compositivo oppure un tema completamente nuovo, il più delle volte la scelta era quella di considerare un progetto già affrontato nelle materie compositive e di trasformarlo in un progetto realizzabile. Inevitabilmente avvenivano delle modifiche sostanziali e mi ricordo che il professore diceva sempre che un progetto da 30, doveva essere almeno da 18 su tutti gli aspetti. Non può esserci un progetto con un magnifico lavoro sulla struttura senza che si sappia dove scarica l'acqua, dove sono collocati gli impianti, etc.*

Nel 1951, Aldo Arcangeli ha raccolto i suoi studi sulle volte sottili, presentati dell'ambito dell'attività didattica, in una pubblicazione[89].

[87] Vagnetti L. (a cura di.), *La Facoltà di architettura di Roma nel suo trentacinquesimo anno di vita. Anno accademico 1954-55*, Roma 1955.

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

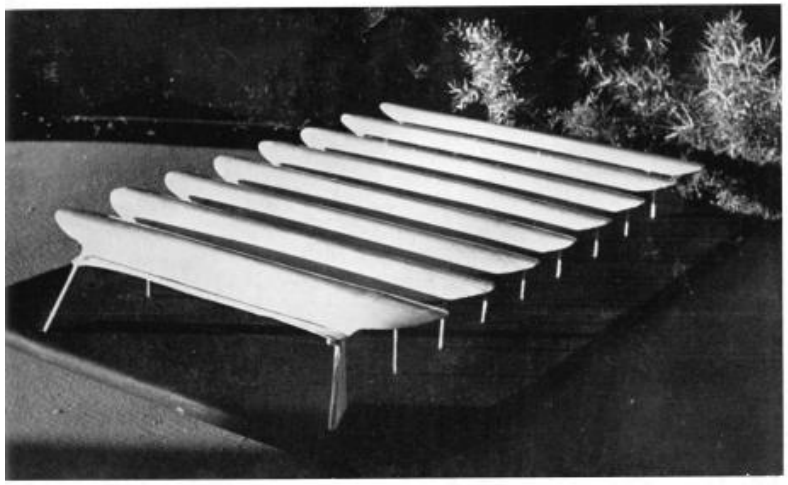
[89] Arcangeli A., *Nozioni sulle volte sottili*, Roma 1951.

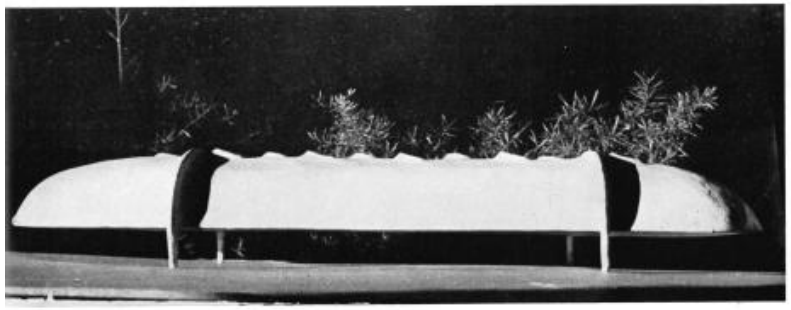
V° CORSO **TECNOLOGIA DEI MATERIALI E TECNICA DELLE COSTRUZIONI**

TITOLARE: Prof. Ing. PIER LUIGI NERVI

ASSISTENTI: Dott. Arch. ANTONIO MORRONI
Dott. Arch. MARCELLO RUTELLI
Dott. Arch. G. M. CLAUDI
Dott. Ing. ALDO ARCANGELI
Dott. Arch. GIUSEPPE POSITANO

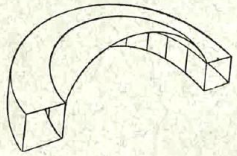
ISTITUTO DI TECNICA DELLE COSTRUZIONI





Dott. Ing. ALDO ARCANGELI
Assistente di Tecnica delle Costruzioni presso la Facoltà di Architettura
UNIVERSITÀ DI ROMA

NOZIONI
SULLE
VOLTE SOTTILI



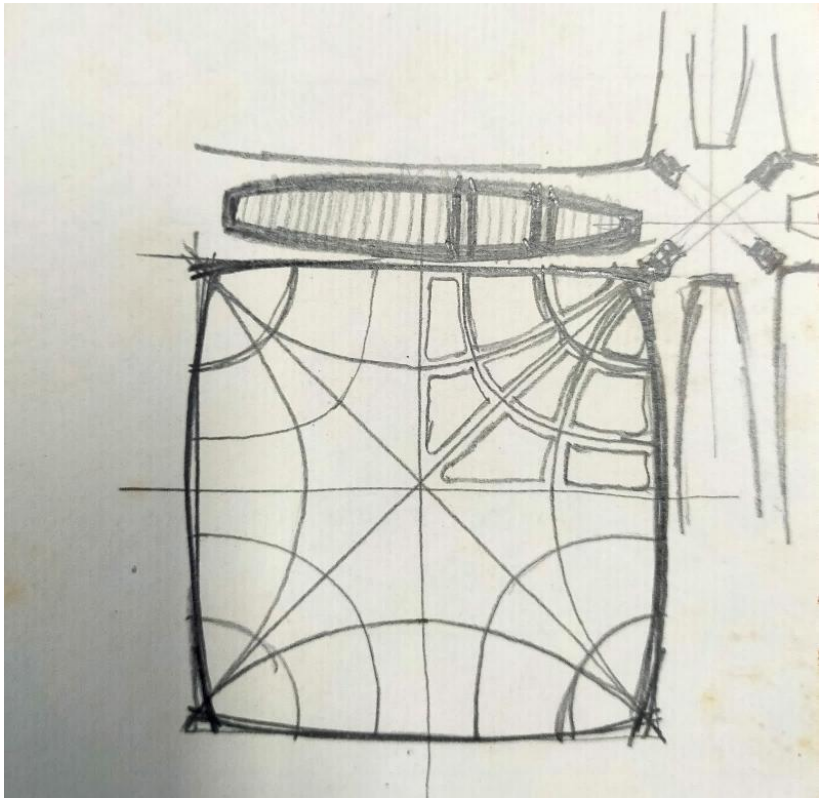
RISTAMPA CON AGGIUNTE

1951

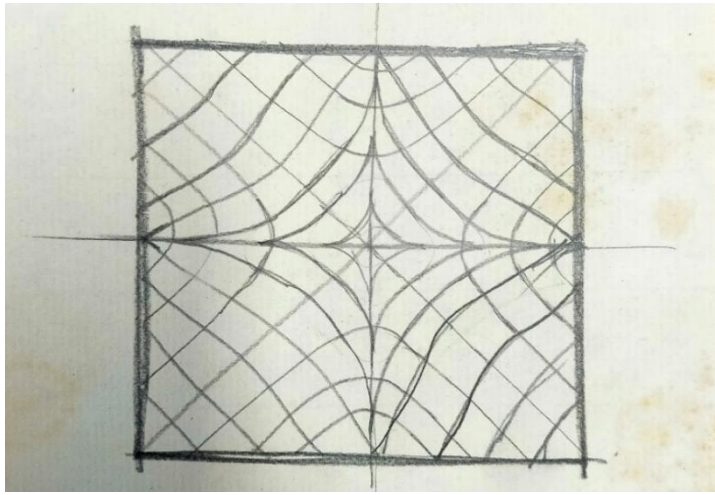
I disegni di Aldo Arcangeli sulle linee isostatiche

All'interno dell'archivio Arcangeli vi sono alcuni elaborati che riguardano le linee isostatiche: calcoli e disegni[90].

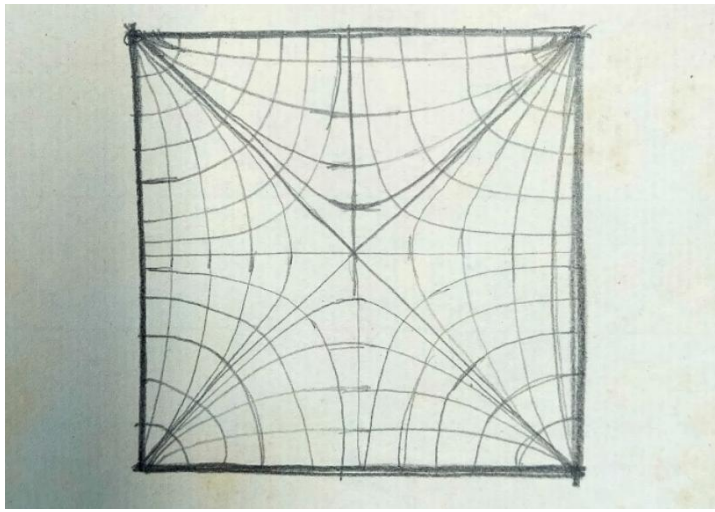
Non è possibile associare i calcoli - che sono solo degli appunti - a progetti. Al contrario invece è possibile fare delle considerazioni sui disegni.



Disegno 2a

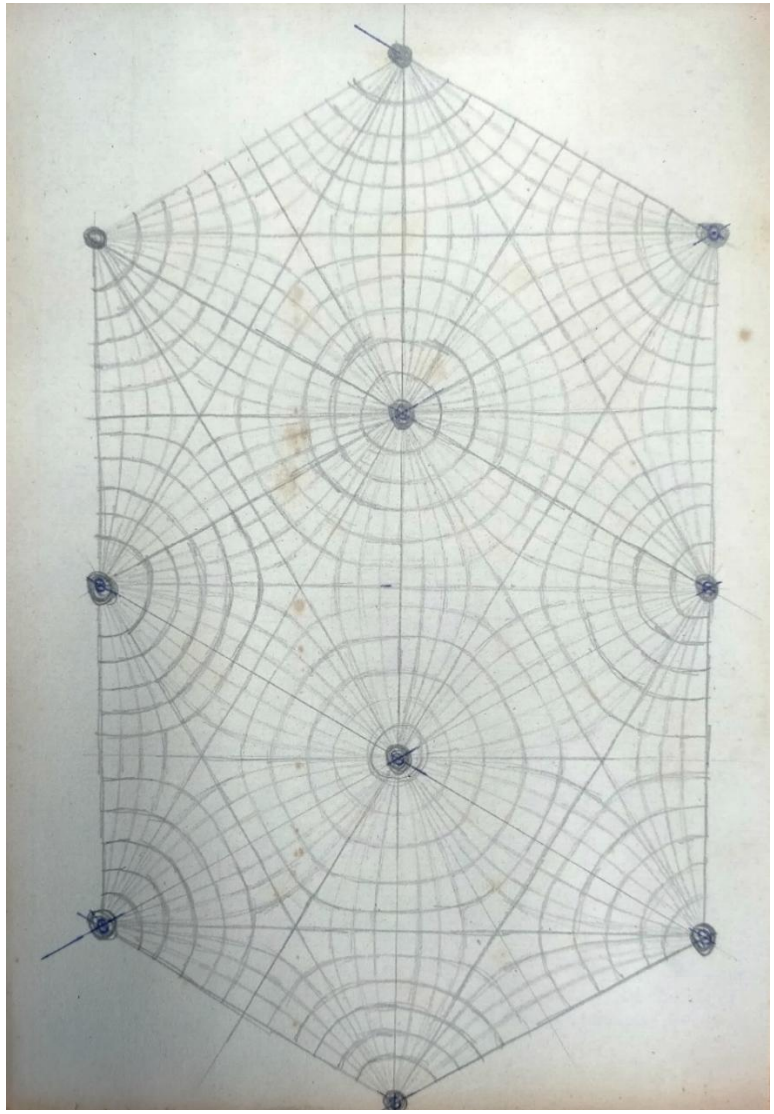


Disegno 2b

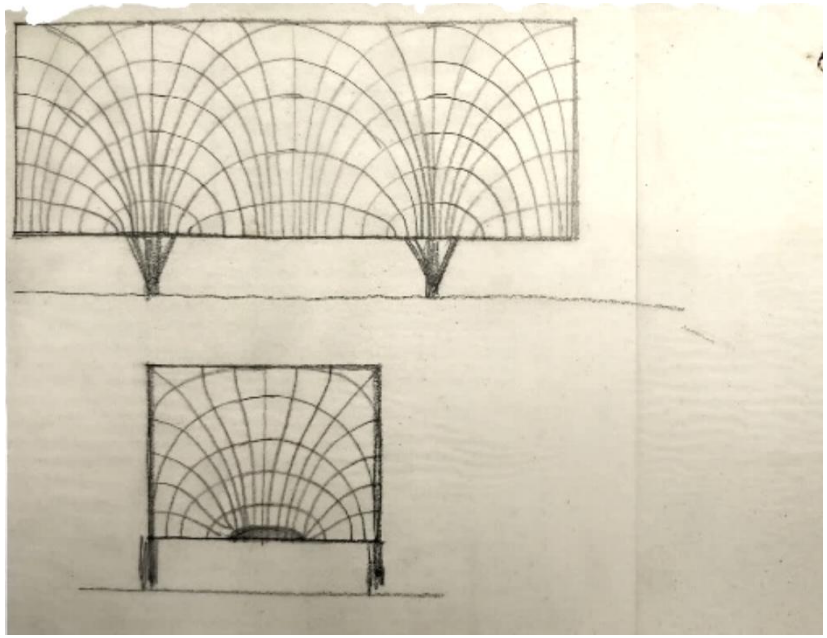


Disegno 2c

[90] Archivio ARCANGELI, Roma
Fascicolo A 237.
Esposizione Parigi. Solai a nervature isostatiche e varie. Dicembre 1953 - luglio 1954.



Disegno 1



Disegno 3

Possono essere considerati tutti di studio.

Il disegno 1 non può essere associato a nessun progetto realizzato.

I disegni della serie 2 possono essere associati al progetto per il *Lanificio Gatti* per via dell'impianto quadrato, dello studio degli elementi in ferrocemento nel 2a, ma soprattutto per lo studio del diverso andamento delle nervature all'interno di un solaio a linee isostatiche, in relazione al vincolo: lati appoggiati nel caso 2b e angoli incastrati nel caso 2c.

Infine, il disegno 3 può essere associato al progetto per la *Chiesa del quartiere ANIC* a Ravenna[91].

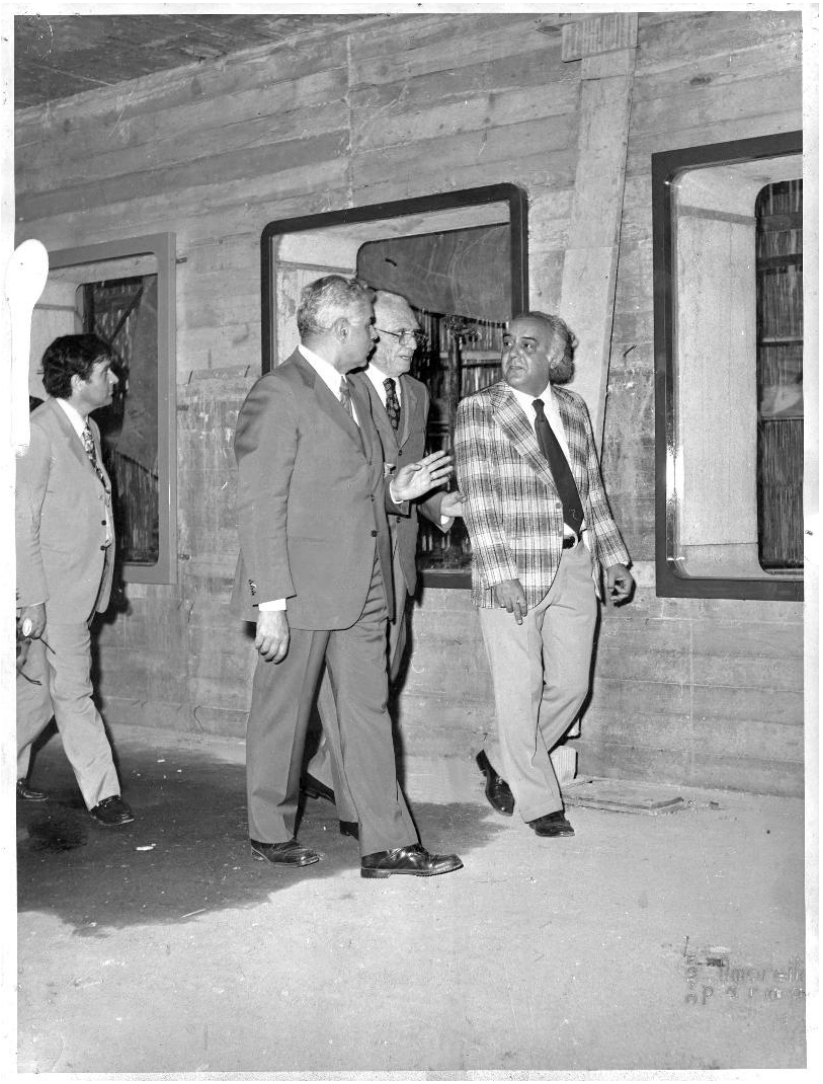
[91] I disegni 2a e 3 sono stati riprodotti nelle schede delle opere.

3.2.2 Rapporti con lo studio Nervi

Arcangeli si inserisce nello studio di Pier Luigi Nervi come una figura atipica, grazie anche ai contatti già avviati dal padre, Attilio Arcangeli, che era stato - come s'è ricordato - professore alle Università di Roma e Firenze e preside della Facoltà di Architettura di Firenze tra il 1950 e il 1956. All'interno dello studio, Arcangeli trova un vero e proprio laboratorio di invenzione, un ambiente in cui ogni nuova struttura rappresenta al tempo stesso esperimento scientifico, oggetto estetico e macchina produttiva[92].

È in questo clima di continua sperimentazione che matura l'idea del solaio a linee isostatiche, il cui brevetto del 1949 segna una svolta concettuale decisiva nella storia della ricerca strutturale. Nervi riconosce immediatamente la portata dell'invenzione, vedendovi la possibilità di dare forma concreta al proprio ideale di "resistenza attraverso la forma"; al tempo stesso, lascia ad Arcangeli la piena paternità della scoperta, consapevole della distinzione tra l'intuizione teorica e la sua traduzione costruttiva.

Arcangeli, entrato, come si è detto, nella società sin dal 1940, è uno dei collaboratori di più lungo corso. Agli inizi degli anni '50, agli albori dello Studio Nervi, quando iniziano ad arrivare le grandi commesse per le Esposizioni di Torino, i figli di Nervi - che diventeranno in seguito suoi collaboratori abituali - non sono ancora laureati, mentre Arcangeli ricopre già il ruolo di assistente universitario alla cattedra di Scienza delle Costruzioni.



Le due persone al centro dell'immagine sono, da destra a sinistra, Nervi e Arcangeli

92 Gargiani R., Bologna A., *The rhetoric of Pier Luigi Nervi. Concrete and ferrocement forms*, Oxford 2016.

La coppia di brevetti del 23 luglio 1949 - il solaio isostatico di Arcangeli e la cassaforma in ferrocemento di Nervi - testimonia la perfetta complementarità di ruoli. L'uno disegna un sistema logico di forze che si traduce in geometria; l'altro inventa il dispositivo tecnico che permette di realizzarla. Insieme, definiscono un nuovo paradigma costruttivo in cui la forma non è più il risultato di un calcolo, ma la sua rappresentazione visibile.

Nel rapporto con Pier Luigi Nervi e con i suoi uffici, Aldo Arcangeli mantiene sempre una certa autonomia professionale. Come accade per la questione della paternità del brevetto, egli, pur collaborando stabilmente con lo Studio Nervi, conserva un proprio spazio di indipendenza attraverso il proprio studio tecnico, dove si dedica principalmente ai calcoli strutturali, ma anche a progetti completi di sua concezione. Il rapporto con lo Studio Nervi si intensifica negli anni Settanta, quando aumentano le commesse internazionali di grande rilievo e si rende disponibile una maggiore quantità di lavoro. Arcangeli, infine accompagna lo Studio fino alla chiusura nel 1981, dopo la morte di Pier Luigi e Antonio Nervi.

Il rapporto tra Arcangeli e Nervi non va quindi letto come quello fra maestro e discepolo, ma come l'incontro tra due autonomie complementari: l'uno portatore di una scienza della forma, l'altro di un'arte del costruire. Dalla loro interazione nasce un nuovo modo di concepire la struttura, non più come somma di parti ma come organismo coerente, dove calcolo, estetica e tecnica convergono in un'unica idea costruttiva.

Lavori svolti in collaborazione con la soc. Nervi e Bartoli o con lo Studio Nervi

- *Palazzo delle esposizioni,* Torino 1947
- *Ponte in C.A.*, Gubbio
- *Autorimessa STEFER*, Marino
- *Aviorimessa*, Buenos Aires
- *La Tebaide* su progetto di Luigi Carlo Daneri, San Michele di Pagana, 1947-1948
- Solai a linee isostatiche
  Tra questi si segnalano due opere chiave: il *Lanificio Gatti*, Roma 1951-53, progetto elaborato da Pier Luigi Nervi con la collaborazione di Carlo Cestelli Guidi, e la *Filiale di Banca d'Italia*, Cosenza 1977-1980, seguita da Arcangeli come progettista con la soc. Nervi e Bartoli
- Struttura della copertura per *il Centre des Nouvelles Industries et Technologies* (*CNIT*), Parigi, 1953
- Progetto per un *Centro culturale*, Tripoli, 1966-1968
- *Viadotto de l'Opera* sul boulevard Ataturk, Ankara, 1968-1963
- *Residenza Prefetto Yamoussoukro*, Costa d'avorio, 1975-1977
- *Complesso residenziale* della Petroleum Investments Corporation, King Faisal Road, Al-Khobar, Dhahran (Arabia Saudita), 1977-81
- *Stadio,* Riyadh, 1979

Alcuni degli incarichi personali:

- *Palazzo della Provincia* su progetto di Saul Greco, Catanzaro 1949-1958
- Ristrutturazione antisismica del *Grande Albergo* di Potenza. Tale albergo era stato realizzato tra il 1952 1953 su progetto dell'

arch. potentino Antonio Costabile, divenendo subito il punto di riferimento dell'ospitalità alberghiera della città. Dopo il terremoto del 1980, l'Albergo viene ristrutturato nel 1982 con un progetto dell'Archstudio di Potenza (costituito da Antonio Costabile e dall'Ing. Maurizio Leggeri) e con il progetto strutturale dell'Ing. Aldo Arcangeli. Questo rappresenterà un caso di studi internazionale dell'ingegneria antisismica. Il progetto è pubblicato nella rivista "Industria italiana del Cemento", n. 4 del 1987 (p. 276, "Adeguamento sismico dell'edificio del 'Grande Albergo' a Potenza, autor: Ing. Aldo Arcangeli, arch. Antonio Costabile, ing. Maurizio Leggeri)

- *Palazzo delle Assicurazioni Generali* su progetto di Rosario Marletta, Catania, 1954-1958
- *Ospedale Maggiore*, Bologna, 1955-1956
- *Complesso Mancuso* su progetto di Saul Greco, Catanzaro 1955-1962
- Concorso per la *Biblioteca Nazionale*, Roma Giugno 1959.
- *Istituto del Commercio Estero*, in via Liszt, Roma, 1960
- Concorso appalto per il *Mercato ortofrutticolo ed ittico* all'ingrosso sulla via Prenestina, località Quarticciolo, a Roma, 1960. Copertura dei padiglioni Ortofrutta sostenuta da una pilastrata piuttosto rada (su maglia quadrata di 16 m di lato) e formata da piramidi rovesce a pianta ottagonale regolare con il vertice alla sommità di ciascun pilastro.
- Pontificia Facoltà teologica San Bonaventura. Complesso del S*eraficum* (aula magna con solalo nervato), su progetto dello studio Passarelli, Roma 1960-1964
- *Progetto* per i Chierici di S. Viatore su progetto di Lenti, 1961
- *Banca del Monte* su progetto di Conti, Parma, 1962
- *Cavalcavia Belvedere* su via Fontesca, L'Aquila, 1962
- *Hilton Hotel* su progetto di J.A. Ritchie, Kuwait 1963-1964
- *Edificio per appartamenti* su progetto di J.A. Ritchie, Kuwait 1963-1964
- *Casa generalizia dei fratelli Maristi*, Roma 1965
- *Fabbricato uffici finanziari*, L'Aquila, 1965
- *Collegio S. Lorenzo*, Brindisi, 1966
- *Chiesa di S. Marco* al quartiere Giuliano e Dalmata all'EUR. Roma, 1970

3.3 Due brevetti depositati da Arcangeli e Nervi

È possibile affermare che i solai a linee isostatiche nascono il 23 luglio 1949, attraverso il deposito di due brevetti:

- *455678* della Società Ing. Nervi & Bartoli anonima per costruzioni. Inventore: Ing. Aldo Arcangeli;
- *455750* del Signor: Dr. Ing. Pier Luigi Nervi

Il primo introduce un perfezionamento per la costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti a due o tre dimensioni, fondato su un'idea al tempo stesso semplice e radicale: disporre le nervature resistenti lungo le linee isostatiche, ossia lungo le traiettorie delle tensioni o dei momenti principali che attraversano effettivamente la struttura. In questo modo, ogni elemento lavora nella direzione degli sforzi, realizzando una condizione di equivalenza statica rispetto a un corpo continuo, ma con un impiego sensibilmente ridotto di materiale.

Il testo brevettuale dichiara esplicitamente la parentela teorica con l'"osso trabecolare" studiato da Karl Culmann, assumendone i principi come modello di ottimizzazione strutturale e generalizzandone le applicazioni a un'ampia gamma di configurazioni: volte, cupole, strutture spaziali, ponti e fondazioni. L'assunto di fondo è che qualunque organismo sottile può essere razionalizzato facendo coincidere resistenza e disegno delle tensioni.

Il secondo brevetto è il terzo completivo del brevetto precedente n. 406296 del 1943 "Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate" - il brevetto sul ferrocemento. Con questo documento, Nervi estende la propria ricerca sulla tecnologia del ferrocemento all'ambito della costruzione delle casseforme, proponendo un sistema radicalmente nuovo per la realizzazione di getti in cemento armato. L'idea centrale consiste nella sostituzione delle tradizionali tavole lignee utilizzate per le casserature con solettine in ferrocemento, costituite da sottili strati di malta cementizia armata con reti metalliche sovrapposte, secondo il procedimento già sperimentato e codificato nei brevetti precedenti. Queste leggere lamine rigide e flessibili allo stesso tempo permettono di creare casseri modellabili su qualsiasi forma geometrica, anche su superfici curve, sghembe o a doppia curvatura. Il ferrocemento, materiale compatto e impermeabile, consente inoltre di ottenere una perfetta continuità delle superfici e, di conseguenza, una finitura impeccabile del calcestruzzo a vista, tanto da rendere superflui gli intonaci di regolarizzazione.

Il primo brevetto istituisce un collegamento diretto tra teoria e pratica: tradurre le linee isostatiche del campo di tensioni in un sistema discontinuo di nervature "filamentose", capaci di convogliare materia solo dove le sollecitazioni lo richiedono, con conseguente economia di materiale e incremento di efficienza.

Il secondo brevetto istituisce la tecnica operativa, fornendo il dispositivo costruttivo in grado di rendere praticabile quella regola alla scala del cantiere. Tre sono i vantaggi dichiarati: l'*economia*, legata alla possibilità di applicare cicli ripetitivi di produzione, particolarmente adatti ai grandi solai industriali; la *perfezione esecutiva*, ottenuta attraverso la qualità delle superfici a vista; la *libertà progettuale*, garantita dall'assenza di vincoli prismatici imposti dai tradizionali sistemi di casseratura. È significativo che nel testo brevettuale non compaia ancora il termine *"isostatiche"*: Nervi distingue con rigore la paternità dell'invenzione strutturale, attribuita ad Aldo Arcangeli, dal dominio della realizzazione costruttiva, che rivendica come proprio.

La coppia di brevetti rende così esplicita la sinergia fra tre livelli: il livello statico, dove la forma è legge statica; il livello costruttivo, dove la forma è matrice; il livello estetico, dove la forma è manifestazione leggibile dell'energia interna della struttura.

In definitiva, l'applicazione delle linee isostatiche di Arcangeli e la cassaforma in ferrocemento di Nervi non sono solo due invenzioni coeve: sono le due facce di un'unica trasformazione. La prima rende visibili le linee di forza; la seconda offre al cantiere lo strumento per tradurle in superfici regolari e ripetibili. Le linee di forza smettono di essere diagrammi invisibili e diventano architettura.

Nervi descrive così l'invenzione dei solai a linee isostatiche[93]:

> *Per quanto non strettamente rientranti in questa categoria* [delle strutture resistenti per forma]*, ritengo opportuno accennare qui a un tipo di strutture portanti, anche queste tipicamente cementizie, nelle quali il fatto statico e quello formale si uniscono in una sintesi del tutto nuova e senza precedenti nelle costruzioni del passato.*
>
> *Queste strutture, proposte e studiate teoricamente dall'ing. Aldo Arcangeli dell'Ufficio Tecnico della Soc. Ingg. Nervi e Bartoli, e da questa realizzate attraverso procedimenti costruttivi studiati dallo scrivente, si basano sul principio di disporre le nervature di sistemi superficiali resistenti curvi o piani, lungo le isostatiche delle tensioni o dei momenti principali o, in altre parole, lungo le curve preferenziali di flussi di forze o di distribuzione dei momenti che si formano nell'interno di un sistema sollecitato da forze.*
>
> *Tali linee sono qualcosa di assoluto dipendente esclusivamente dal giuoco di forze e resistenze in atto.*
>
> *Il meraviglioso del fatto è che così facendo e limitando il nostro compito a quello di modesti interpreti di verità e realtà fisiche, veniamo a scoprire armonie di forme, impreviste e quanto mai espressive.*
>
> *Penso che molte deduzioni di carattere generale sull'estetica e sulle sue misteriose radici, si potrebbero ricavare da queste constatazioni.*
>
> *Le nervature di un solaio disposte lungo le isostatiche dei momenti acquistano un andamento curvilineo di grande efficacia estetica, più espressive ancora sono quelle di un solaio di tipo a fungo ossia portato da pilastri senza travi principali.*
>
> *Le nervature di una grande tubazione funzionante da ponte-canale disposte lungo le isostatiche delle tensioni principali dànno un giuoco di curve che potrebbero sembrare il frutto di una raffinata sensibilità decorativa.*
>
> *Applicando sistemi costruttivi ad elementi prefabbricati studiati dallo scrivente è anche agevole passare a strutture resistenti «per forma» rinforzate con nervature lungo le isostatiche; si apre in tal modo un campo di illimitate possibilità statico-architettoniche.*
>
> *Non bisogna tuttavia dimenticare che alla base di tutti questi così promettenti sviluppi sta il semplice fatto esecutivo di aver indirizzato il cemento armato verso una progressiva liberazione dai vincoli di forma delle casseforme in legname.*
>
> *Fino a che questi vincoli non saranno completamente eliminati la architettura del cemento armato sarà sempre ostacolata dalla necessità di essere anche, sia pure per un solo momento, un'architettura di tavolame.*

[93] Nervi P.L., La «resistenza per forma». Caratteristica statico-architettonica del cemento armato, in «Pirelli - Rivista d'informazione e di tecnica», anno IV, n. 4, agosto 1951, PP- 11-12.

3.3.1 Brevetto 455678 Roma, 23 luglio 1949

DESCRIZIONE
dell'invenzione avente per titolo: "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".

della Società Ing. NERVI & BARTOLI ANONIMA PER COSTRUZIONI.

Inventore: Ing. Aldo Arcangeli

La presente invenzione ha per oggetto un perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete, e strutture portanti in genere a due o tre dimensioni, nei quali la disposizione delle nervature resistenti ha luogo lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali.

Per meglio chiarire la sostanza dell'invenzione, si premettono alcune considerazioni di carattere generale:

1) Considerato un punto generico P di un corpo soggetto all'azione di un dato sistema di forze, ad ogni elemento superficiale infinitesimo di area dA, giacente in uno dei piani della stella di centro P, corrisponde una forza interna unitaria p= dF/dA, in generale obliqua rispetto al piano corrispondente.

2) Fra tutti i piani della stella di centro P ne esistono tre (piani principali) mutuamente ortogonali, le cui forze p (tensioni principali), sono orientate perpendicolarmente al piano corrispondente.

3) Gli inviluppi delle direzioni delle tensioni principali in ogni punto del corpo (direzioni principali), costituiscono tre famiglie di curve intersecantisi fra loro ad angolo retto (linee isostatiche o traiettorie delle tensioni principali), secondo le quali il materiale di cui il corpo è formato viene sollecitato solo a sforzo normale, essendo esclusa ogni azione tangenziale tra le fibre del corpo aventi l'andamento di tali linee.

4) Se ad un corpo continuo se ne sostituisce uno avente struttura filamentosa, con le fibre disposte secondo le linee isostatiche, essendo ogni fibra collegata con quelle ad essa ortogonali, ma non con le sue parallele, il comportamento di un tale corpo, per le date forze esterne, è identico a quello del corpo continuo, dato che, per la mancanza di forze tangenziali, non si ha alcuna tendenza ad una deformazione angolare del reticolo costituente il nuovo corpo. Esempi di tal genere si trovano numerosi in natura, e classico tra essi è quelle delle trabecole ossee, osservato per primo dal Culmann.

5) Se in luogo di un corpo a tre dimensioni, se ne considera uno avente una dimensione così piccola rispetto alle altre due che il corpo stesso possa essere rappresentato schematicamente mediante la sua superficie media, piana o curva e su tale superficie giacciono tutte le forze interne (travi-parete e volte sottili in teoria di membrana), una delle tre dimensioni principali, quella normale alla superficie media risulta nulla od assolutamente trascurabile, per cui le linee isostatiche possono ridursi a due famiglie di curve, mutuamente ortogonali, giacenti sulla superficie media. In ogni altre superficie tracciata nell'interno del corpo parallelamente alla superficie media si hanno in ogni punto tensioni di valore uguale a quello del punto corrispondente della superficie media, ed identico andamento delle linee isostatiche.

6) Se si considera un corpo a due dimensioni soggetto a forze qualsiasi (piastre propriamente dette e volte sottili in teoria di flessione) rimangono validi per la sollecitazione di flessione, i concetti sovraesposti purché si sostituiscano i momenti flettenti alle tensioni normali, i momenti torcenti alle tensioni tangenziali, i momenti principali alle tensioni principali, le traiettorie dei momenti

principali (o linee isostatiche di flessione, come sembrerebbe logico chiamarle in analogia alle linee isostatiche principali o linee isostatiche di sforzo normale) alle linee isostatiche. Anche qui perciò riducendo schematicamente il corpo alla sua superficie media, le linee isostatiche di flessione costituiscono su di essa due famiglie di curve mutuamente ortogonali.

Il corpo continuo dato può allora essere sostituito da un insieme di nervature, disposte secondo le linee isostatiche suddette, che vengono sollecitate a flessione e taglio in piani normali alla superficie media e tangenti alle isostatiche, ma che in nessun caso sopportano sollecitazioni di torsione.

Da quanto sopra esposto è facile dedurre che, qualora un corpo continuo assoggettato a forze esterne, venga, secondo l'invenzione, sostituito da un sistema discontinuo di nervature disposte lungo le linee isostatiche, si può ottenere una notevole economia di materiali senza modificare il giuoco delle forze interne.

Qualora ciò risulti opportuno, in special modo se le maglie formate dalle nervature sono piuttosto larghe, si possono sostituire le nervature ad andamento curvilineo con altre aventi l'andamento di una poligonale iscritta nella linea isostatica, senza che ne risulti alterato sostanzialmente il funzionamento statico della struttura.

In particolare, una struttura a piastra che debba sopportare forze ad essa normali, può essere sostituita, secondo l'invenzione, da un sistema di nervature lavoranti a flessione, disposte lungo le traiettorie dei momenti principali.

Sempre secondo l'invenzione, anche una struttura superficiale lavorante a membrana (volta sottile, cupola, struttura scatolare, trave-parete, ecc.), può essere sostituita da un doppio sistema di nervature, disposto secondo le linee isostatiche e quindi lavoranti a semplice sforzo normale, il cui funzionamento statico è del tutto equivalente a quello del sistema superficiale continuo.

Infine, una struttura spaziale soggetta a forze qualsiasi (ad esempio torri, antenne per sostegno di cavi e condutture, ecc.) può essere sostituita da un sistema triplo di nervature lavoranti a sforzo normale, aventi l'andamento delle linee isostatiche degli sforzi che la struttura è chiamata a sopportare, ottenendo un sistema staticamente equivalente ad un corpo continuo a tre dimensioni.

È evidente che in ognuno di questi casi la disposizione delle nervature lungo le linee isostatiche degli sforzi normali o dei momenti flettenti, rappresenta la massima economia di materiale rispetto a qualsiasi altra disposizione possibile.

Tra i moltissimi casi in cui il sistema a nervature isostatiche può convenientemente applicarsi, si può a titolo esemplificativo indicare come particolarmente interessanti:

a) solai a travi principali in una o due direzioni, o senza travi principali (a fungo);
b) coperture piane come sopra;
c) platee di fondazione piane (come sopra) od a volte rovesce;
d) impalcati di ponte (come sopra);
e) travi parete;
f) coperture a volta di qualsiasi forma;
g) serbatoi e silos a pareti piane o curve;
h) strutture scatolari per coperture, ponti, ponti-canali, passerelle, ecc.

La realizzazione pratica di queste strutture è particolarmente agevole con il cemento armato e viene effettuata disponendo delle casseforme a forma di scatola che possono rimanere o no conglobate nella struttura, con o senza fondo, costruite in materiale qualsiasi, come ad esempio legno, lamiera metallica, cemento, od altro, ad esempio il getto di conglomerato tra le forme stesse per

formare le nervature ed eventualmente sopra o sotto di esse per formare la soletta continua. La costruzione può essere anche eseguita mediante la prefabbricazione di elementi di nervature, da collegare in opera mediante getto di conglomerato nei nodi ed eventuale saldatura della armatura metallica.

Alcune preferite forme di esecuzione dell'invenzione sono illustrate, a titolo d'esempio, nelle accluse tavole di disegno, in cui:

la fig. 1 rappresenta il disegno di un solaio a fungo con nervature disposte lungo le linee isostatiche dei momenti;
la fig. 2 rappresenta la sezione della fig. 1 condotta lungo la linea II-II;
la fig. 3 rappresenta lo sviluppo in piano delle nervature di una volta cilindrica autoportante;
la fig. 4 rappresenta la sezione della volta della fig. 3 condotta lungo la linea IV-IV, e
la fig. 5 rappresenta la sezione della volta della fig. 3 condotta lungo la line V-V.

Con riferimento al disegno:

Le figg. 1 e 2 illustrano un solaio a fungo le cui nervature sono disposte lungo le linee isostatiche dei momenti. Nelle figure si è indicato con 1 il pilastro di sostegno del solaio, con 2 la testa svasata del pilastro, con 3 le nervature disposte lungo le linee isostatiche della piastra continua su appoggi puntiformi con carico uniformemente ripartito, con 4 la soletta superiore, con 5 l'allargamento delle nervature perimetrali nelle zone dove esse sopportano momenti negativi, e con 6 la maggiore altezza delle nervature radiali, nelle zone dove esse sopportano momenti negativi.

Le figg. da 3 a 5 rappresentano invece l'applicazione della struttura secondo l'invenzione, ad una volta cilindrica autoportante.

La fig. 3 rappresenta lo schema nelle nervature disposte secondo le linee isostatiche della volta, sviluppate in piano, mentre le figg. 4 e 5 rappresentano due sezioni caratteristiche della volta.

Si sono indicati con 7 le nervature isostatiche della volta, con 8 i timpani di sostegno, realizzati con una struttura di qualsiasi tipo, eventualmente anch'essi con nervature disposte secondo le linee isostatiche, e con 9 i bordi rettilinei non appoggiati, con relativa trave di bordo per l'assorbimento degli sforzi di trazione.

Nell'esempio di esecuzione descritto per ultimo manca la soletta continua al di sopra delle nervature, che viene sostituita da un manto di copertura qualsiasi (eternit, perret, od altro).

La presente invenzione è stata illustrata e descritta in alcune preferite forme di esecuzione, ma s'intende che varianti esecutive potranno esservi in pratica apportate senza uscire dall'ambito di protezione della presente privativa industriale.

RIVENDICAZIONI:

1. Perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o tre dimensioni, caratterizzato dal fatto che si dispongono le nervature resistenti lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali.

2. Perfezionamento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che ad un corpo continuo, a due od a tre dimensioni, se ne sostituisce uno discontinuo, con grande risparmio di materiali, a ciò senza alterare sostanzialmente lo stato generale di sollecitazione corrispondente al corpo continuo.

3. Perfezionamento secondo le rivendicazioni 1 e 2, caratterizzato dal fatto che qualora le maglie formate dalle nervature siano piuttosto larghe si sostituiscono le nervature ad andamento curvilineo con altre aventi l'andamento di una poligonale iscritta nella linea isostatica.

4. perfezionamento secondo le rivendicazioni da 1 a 3, caratterizzato dal fatto che nel caso di una struttura a piastra che debba sopportare forze ad essa normali, la struttura resistente è costituita da un sistema di nervature, disposte secondo le traiettorie dei momenti principali che vengono sollecitate a flessione e taglio in piani normali alla superficie media e tangenti alle isostatiche ed in nessun caso sopportano sollecitazioni di torsione.

5. Perfezionamento secondo le rivendicazioni da 1 a 3, caratterizzato dal fatto che una struttura superficiale lavorante a membrana è sostituita da un doppio sistema di nervature disposte secondo le linee isostatiche lavoranti a semplice sforzo normale, il cui funzionamento è equivalente a quello del sistema superficiale continuo.

6. Perfezionamento secondo le rivendicazioni da 1 a 3, caratterizzato dal fatto che una struttura spaziale soggetta a sforzi qualsiasi è sostituita da un sistema triplo di nervature lavoranti a sforzo normale con l'andamento delle linee isostatiche degli sforzi che la struttura è chiamata a sopportare, ottenendo un sistema staticamente equivalente ad un corpo continuo a tre dimensioni.

7. 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, secondo le rivendicazioni da 1 a 6 e sostanzialmente come illustrato e descritto.

Roma, 23 luglio 1949

p. Società: Ing. NERVI & BARTOLI ANONIMA PER COSTRUZIONI

p. Ing. Barzanò & Zanardo

7130/lug

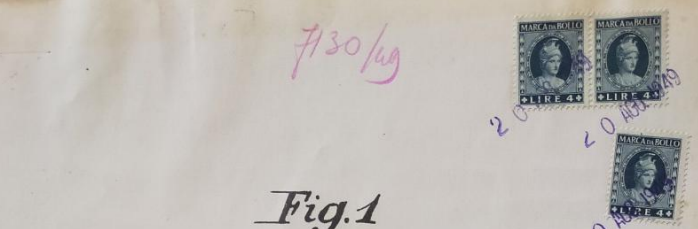
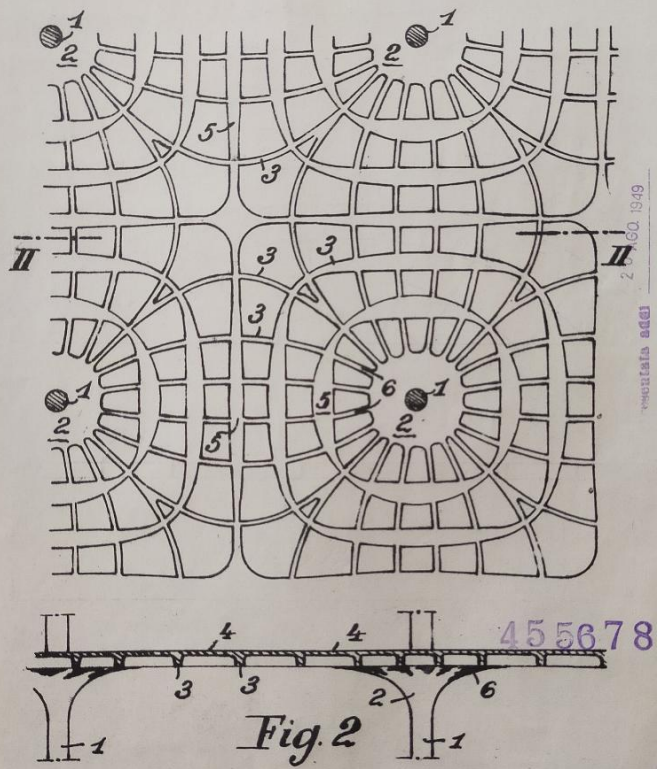


Fig. 1



455678

Fig. 2

p. Soc. NERVI & BARTOLI ANONIMA PER COSTRUZIONI
p. Ing. Barzanò & Zanardo

7130/lug



Fig. 3

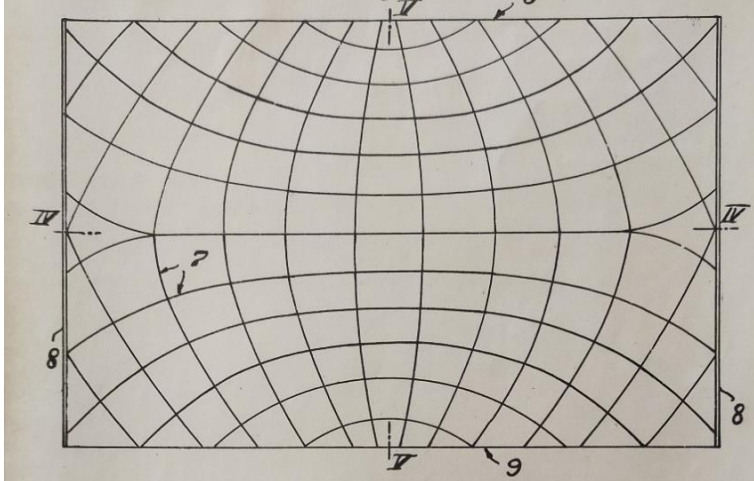
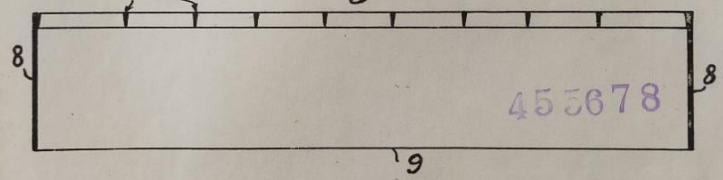
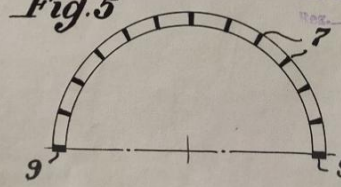


Fig. 4



455678

Fig. 5



p. Soc. NERVI & BARTOLI ANONIMA PER COSTRUZIONI
p. Ing. Barzanò & Zanardo

3.3.2 Brevetto 455750 Roma, 23 luglio 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".

DESCRIZIONE

A corredo di una domanda di III° ATTESTATO COMPLETIVO al brevetto principale n.406296 depositato il 15 aprile 1943 avente per titolo: "Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate".

del Signor: Dr. Ing. Pier Luigi NERVI

Il presente III° Attestato Completivo al brevetto principale n.406296 del15 aprile 1943 ha per oggetto una particolare applicazione del procedimento illustrato nel detto brevetto e nel suoi due completivi, alla preparazione di casseri e forme per il getto di solai, pilastri e strutture in genere in cemento armato, in sostituzione delle usuali casseforme in legno.

Il presente completivo si riferisce quindi alla costruzione dei casseri, per il getto di strutture in cemento armato, preparati anziché con le usuali tavole, con solettine armate con multipli strati di rete, secondo il sistema descritto nel brevetto principale e che nella pratica attuazione ha preso le denominazioni di "ferrocemento" o "ferro-cementato", denominazioni che saranno usate anche nel seguito della presente descrizione.

I risultati principali che il sistema, secondo l'invenzione, consegue, sono seguenti:

1. Completa libertà di forma della costruenda struttura in cemento armato, in conseguenza della adattabilità dei casseri in ferrocemento a qualsiasi superficie curva, sghemba o comunque sagomata, libertà che è in netto contrasto alla stretta limitazione, a forma prismatiche e a superfici sviluppabili, caratteristica dei casseri in tavole.

2. Continuità e perfezione delle superfici dei casseri e quindi perfetta regolarità delle facce viste dei conglomerati in esse gettate. In conseguenza di quanto sopra diventano inutili gli intonaci di regolarizzazione e si risolve nel modo migliore il problema, insoluto fino ad oggi, della buona rifinitura delle superfici delle strutture in cemento armato.

3. Perfetta recuperabilità e reimpiego, per un numero praticamente illimitato di volte, dei casseri stessi, dato che le superfici di contatto tra cassero e conglomerato non si consumano né si deteriorano purché siano spalmate prima dei getti con opportune sostanze, quali grassi, olii o preparati speciali tipo Bormeol.

Si può osservare che la impermeabilità dei casseri in ferro cementato elimina la fuoriuscita di cemento e di malta grassa che avviene inevitabilmente tra le connessure delle tavole delle casseforme in legno, con conseguente non trascurabile perdita di cemento.

I casseri in ferro cementato sono applicabili ai più svariati tipi di strutture in cemento armato che presentino un sufficiente numero di elementi uguali ripetuti e diventano di particolare convenienza economica e costruttiva per la realizzazione di grandi solai per uso industriale o di magazzini.

In questo caso oltre ai vantaggi di carattere generale sopra indicati, i casseri in ferrocemento permettono di sagomare le travi principali e secondarie secondo le esigenze statiche proporzionando in ogni punto la sezione resistente alle relative sollecitazioni con un vantaggio economico che è superfluo mettere in rilievo.

È anche evidente che la costruzione di cassettonati con nervature disposte ortogonalmente alle travi principali, o comunque inclinate rimane particolarmente facilitata dall'applicazione del

perfezionamento secondo l'invenzione.

Nel caso di costruzioni di solai di grandi dimensioni, a numerosi scomparti uguali, i casseri in ferrocemento sono disposti su un ponte abbassabile atto ad essere spostato in senso orizzontale.

Il disarmo avviene per l'abbassamento del ponte e sovrastanti casseri in ferrocemento e successivo spostamento in avanti di tutto il complesso, fino a raggiungere successivi scomparti da eseguire.

E facile constatare che con questo sistema si raggiunge una economia costruttiva, una perfezione esecutiva e una libertà di progetto che non hanno precedenti nel campo della costruzione in cemento armato.

Una preferita forma di esecuzione dell'invenzione è illustrata nell'acclusa tavola di disegni, in cui:

La fig. 1 rappresenta una vista dal basso di un riquadro di un solaio a nervature incrociate;
la fig. 2 rappresenta la sezione della fig. 1 condotta lungo la linea II-II;
la fig. 3 rappresenta la vista in pianta di una cassaforma secondo l'invenzione;
La fig. 4 rappresenta la sezione della fig. 3 condotta lungo la linea IV-IV;
la fig. 5 rappresenta una vista assonometrica della cassaforma delle figure precedenti.

L'applicazione illustrata dalle figure anzidette è riferita alla costruzione di solai e travetti incrociati, ma è ben chiaro che la caratteristica del sistema è del tutto indipendente dal tipo delle nervature, che possono essere rettilinee o curve in un senso o in due o in più sensi tra loro incrociantisi a seconda delle necessità statiche, senza che nel passare dall'una all'altra applicazione sia in alcun modo modificata la sostanza concettuale ed esecutiva del sistema.

Ciò premesso, la fig. 1 illustra la vista dal basso di un riquadro 1 di solaio, le cui nervature 2 e 3 sono incrociate ortogonalmente.

La sezione della fig. 2, illustra come avvenga il getto del solaio.

Si sono indicate con 4 le varie casseforme sostenute dal ponte 5 ed è chiaro come il getto della struttura in cemento sia facilitata dalla presenza delle varie casseforme sostenute dal ponteggio anzidetto.

A getto avvenuto ed a materiale consolidato, il ponte viene abbassato e traslato verso la nuova posizione d'impiego.

Le figg, da 3 a 5 illustrano uno degli elementi a cassaforma che possono essere impiegati secondo l'invenzione.

Si è indicato con 6 il fondo della cassaforma che costituisce il sostegno per il getto della soletta; con 7 le pareti laterali e con 8 i risalti che costituiscono il contenimento rispettivamente del fianchi e del fondo delle nervature, essendo in opera le casseforme disposte con i risalti 8 affacciati e combacianti come illustrato dalla fig. 2.

La costruzione delle casseforme avviene come già illustrato nel brevetto principale e non necessita quindi di ulteriore descrizione.

La presente invenzione è stata illustrata e descritta in una preferita forma di esecuzione, ma s'intende che varianti costruttive potranno esservi in pratica apportate senza uscire dall'ambito di protezione della presente privativa industriale.

RIVENDICAZIONI

1. perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate, secondo il brevetto principale n. 406296 del 15 aprile 1943 e i suoi completivi, caratterizzato dal fatto che s'impiegano per il getto di strutture in cemento armato casseri preparati con solettine armate con multipli strati di rete.

2. perfezionamento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che i casseri in ferrocemento sono disposti su un ponteggio abbassabile e spostabile in senso orizzontale.

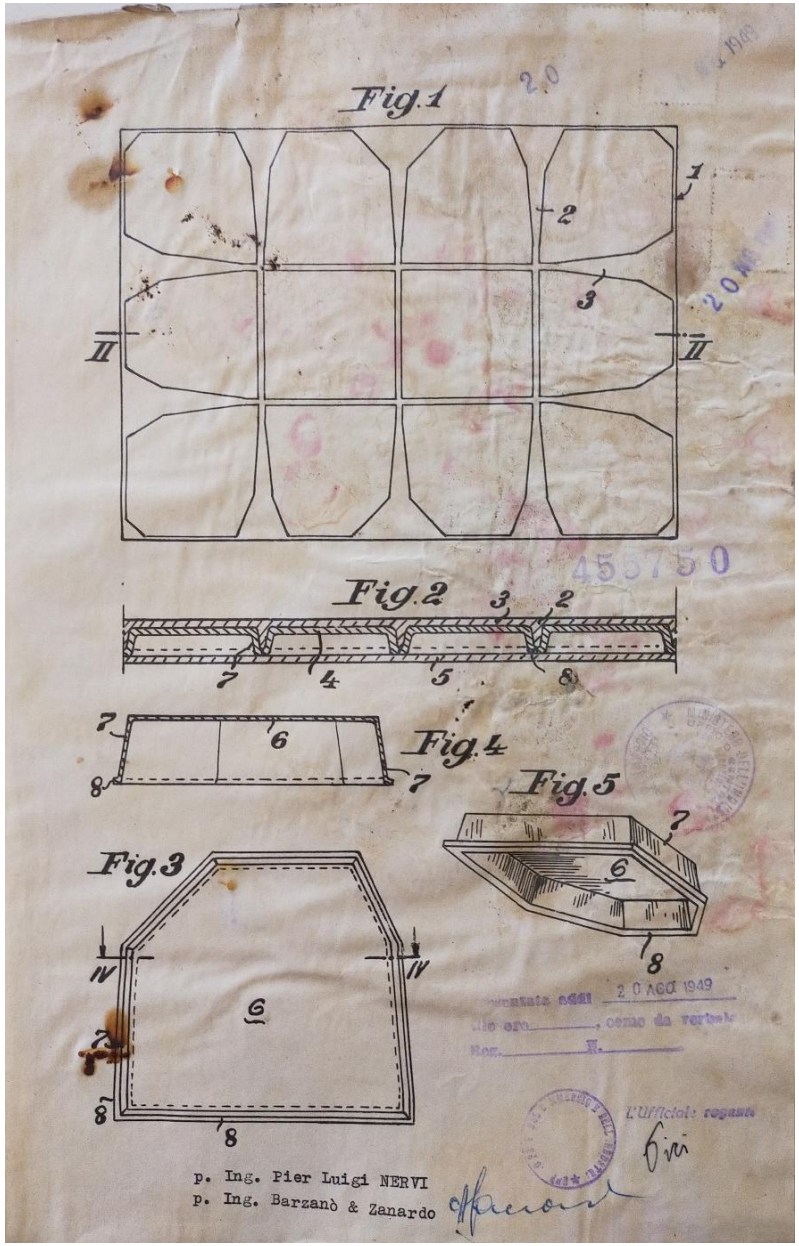
3. Perfezionamento secondo le rivendicazioni 1 e 2, caratterizzato dal fatto che i detti casseri sono costituiti da elementi il cui fondo serve di sostegno per il getto della soletta, mentre le pareti laterali sono inferiormente munite di risalti che cooperano con le pareti stesse per il contenimento dei fianchi e del fondo delle nervature.

4. Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate, secondo le rivendicazioni da 1 a 3 e sostanzialmente come illustrato e descritto.

Roma, 23 luglio 1949

p. Dr. Ing. Pier Luigi NERVI

p. Ing. Barzanò & Zanardo



3.3.3 Altre applicazioni delle linee isostatiche

Il caso delle condotte e ponti-canale

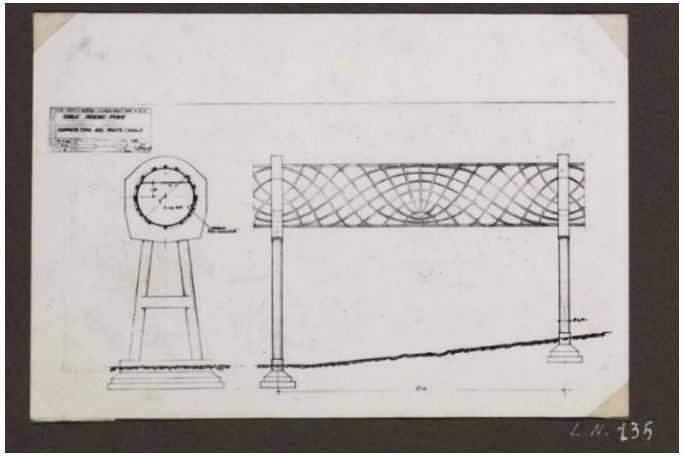
Nell'ambito delle molteplici attività della società Nervi e Bartoli, e in particolare di quelle legate alle sperimentazioni sulle linee isostatiche, merita attenzione il lavoro condotto sulle condotte. Nel 1949, infatti, la società progetta e realizza una struttura nervata in ferrocemento destinata a una grande condotta per il ponte-canale tra i fiumi Meschio e Piave, nei pressi di Treviso.

Questa opera risulta significativa perché documenta una fase di sperimentazione diretta sui principi del ferrocemento e sulla distribuzione isostatica delle tensioni, antecedente all'applicazione di tali principi nella progettazione dei solai. La condotta rappresenta, da un punto di vista statico, una struttura più semplice, poiché è sollecitata prevalentemente da sforzi nel piano. Tale condizione trova riscontro anche nell'immagine delle nervature, che richiamano visivamente quelle di una trave ripetuta[94].

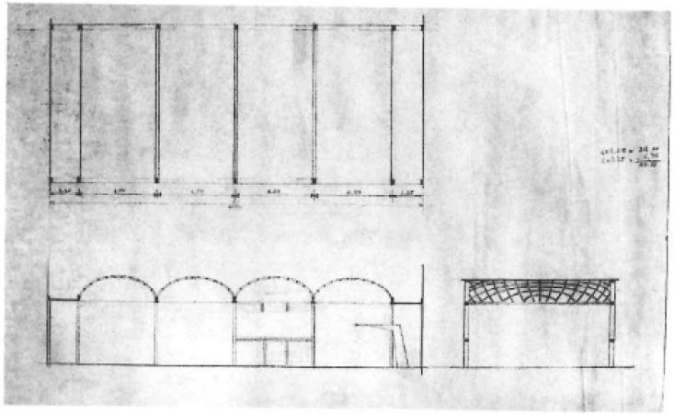
Il caso della piscina dell'Accademia Navale di Livorno (1948-1950)

Studi e sperimentazioni sulle linee isostatiche compaiono anche in progetti che, nella loro realizzazione definitiva, non ne presentano un'applicazione diretta.

Un caso significativo è quello della piscina dell'Accademia Navale di Livorno, in cui, tra gli studi preliminari, figura una soluzione con voltine sottili che evidenziano chiaramente le linee isostatiche delle tensioni principali.[95]



Ponte-canale

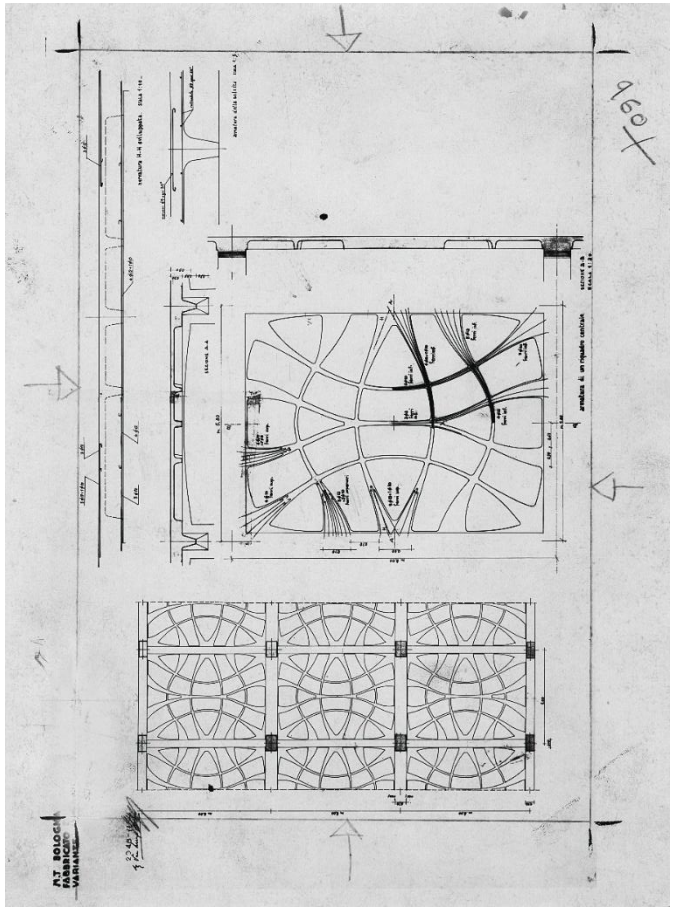


Studio di copertura a voltine

[94] Gargiani R., Bologna A., *The rhetoric of Pier Luigi Nervi. Concrete and ferrocement forms*, Oxford 2016.

[95] Greco C., *Pier Luigi Nervi. Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948*, Lucerna 2008.

4 Sviluppo dei solai a linee isostatiche



Studi per la "M.T. Bologna. Fabbricato ballette. Variante-solai a nervature isostatiche"

Già dopo la presentazione dei brevetti, avvenuta il 23 luglio 1949, lo sviluppo del modello dei solai a linee isostatiche è stato sin da subito oggetto di ulteriori specificazioni.

Interpretazione del problema analitico. Le "cosiddette" linee isostatiche

I primi passi della storia di questi solai sono raccontati da Mario Desideri, che è stato per molti anni un membro attivo dello Studio, in occasione del convegno "Pier Luigi Nervi", tenutosi a Roma nel 1999 presso la Facoltà di architettura della Sapienza.[96]

Nella prima parte dell'intervento, Desideri descrive in maniera semplice il tema delle piastre, mettendo in evidenza gli aspetti relativi alle linee isostatiche.

> *Il primo studio che affrontai per Nervi* [dall'estate del 1949[97]] *fu quello sulle curve isostatiche di una piastra incastrata. Parliamo delle curve isostatiche, quindi dei momenti di una piastra. Il ragionamento da applicare è il seguente. Considerando una piastra di spessore costante incastrata solo su due lati e immaginando di suddividerla in tante strisce, quale sarebbe il comportamento delle stesse sotto un carico uniforme applicato perpendicolarmente alla piastra? Di fatto, risulterebbe assolutamente analogo al comportamento tante travi isolate.*
>
> *C'è solo una sottilissima differenza rispetto al caso delle travi isolate: nel caso della piastra incastrata siamo in presenza di una contrazione impedita. Perciò la rigidezza della piastra rispetto a quella delle travi è leggermente superiore. Se invece la soletta data è incastrata su tutti e quattro i lati, ci si renderebbe subito conto di essere in una situazione differente. Oltre alle travi ideali collocate secondo un verso, intervengono anche quelle nell'altro verso. Quindi analizzando la medesima sezione nel primo e nel secondo caso*

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

[97] Il periodo descritto da Mario Desideri è coerente con il periodo di studio di questi solai e con la deposizione dei brevetti.

> *(incastro su due lati e incastro su quattro lati), la prima soletta tende a flettersi in una direzione, l'altra in entrambe, perché parzialmente impedita dall'incastro che si oppone alla sezione. Perciò oltre alla sollecitazione di flessione presente nel primo caso, nel secondo interviene una sollecitazione di torsione. Se nella piastra si studiano punto per punto le generiche sollecitazioni rispetto ad una generica sezione si scopre che esistono due direzioni o giaciture nelle quali non c'è momento torcente, ma c'è solo momento flettente. Sono giaciture sempre perpendicolari fra loro. Dunque, l'inviluppo dei punti in cui questo si verifica, cioè punti in cui c'è solo momento flettente in assenza del momento torcente, costituisce l'insieme delle linee isostatiche dei momenti, cioè due famiglie di curve evidentemente perpendicolari tra loro.*

Questa introduzione - secondo noi - non è significativa tanto per la descrizione dei tratti distintivi delle piastre, quanto piuttosto per l'illustrazione dell'orientamento metodologico adottato nello studio di Nervi riguardo a questi progetti. Desideri accenna al probabile motivo per cui sono stati presi in considerazione i solai a piastra, ossia la maggiore rigidezza di questo modello rispetto a quello a trave, in relazione alla contrazione laterale impedita e all'effetto benefico delle sollecitazioni di torsione. Inoltre, vengono da lui delineati i principali tratti delle linee isostatiche, ossia gli elementi considerati nei progetti: la perpendicolarità delle giaciture di due famiglie di linee.

È fondamentale sottolineare che il modello preso in esame è quello di una soletta incastrata su quattro lati. Per la nostra ricerca questa informazione risulta cruciale, poiché fornisce un'indicazione precisa sul modello analitico da cui sono partiti gli studi per i solai a linee isostatiche.

In sintesi, in poche battute, si ha un quadro chiaro del motivo per cui viene preso in considerazione questo modello, delle informazioni a disposizione riguardanti la statica dei solai e l'andamento delle curve, mentre non si fa riferimento in nessun modo alle possibilità costruttive e al riflesso formale di questi solai.

Il primo momento

L'intervento di Desideri continua, col raccontare in maniera sommaria il primo momento fondamentale della nascita di questi solai: l'oratore si sofferma sul progetto per il *Magazzino Ballette* della *Manifattura tabacchi* di Bologna (1949) e sulla relazione tra "una soluzione con solai a nervature disposte secondo le linee isostatiche", "una soluzione economica con questa variante" e la "soluzione base, cioè solai a nervature rettilinee nelle due direzioni ortogonali".

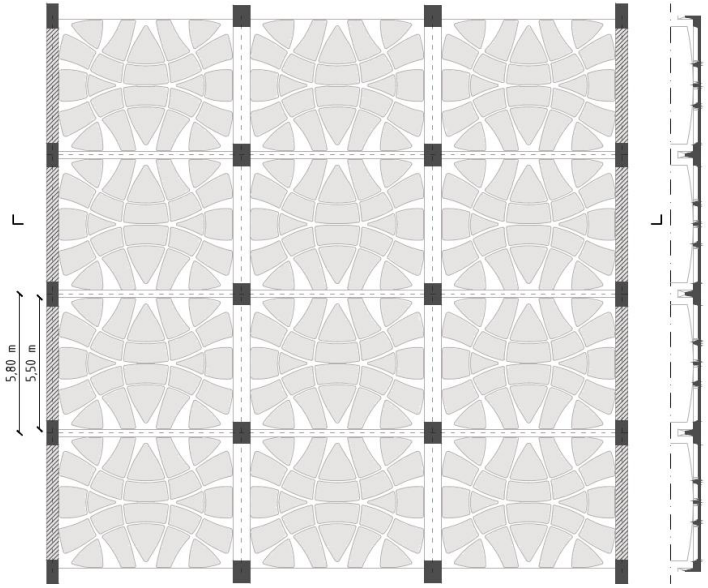
> *Nervi partecipò con la sua impresa di costruzioni ad un importante appalto concorso per un edificio industriale a Bologna ed ebbe l'idea di presentare, sia pure come variante, una soluzione con solai a nervature disposte secondo le linee isostatiche. Intendeva presentare anche la soluzione economica con questa variante, ma aveva bisogno di uno studio più approfondito e per questo si rivolse a me. In quel caso l'appalto concorso fu vinto dallo studio Nervi ma con la soluzione base, cioè solai a nervature rettilinee nelle due direzioni ortogonali, ma quegli studi furono utili a molti altri progetti elaborati successivamente e con diverse varianti.*

Da questo passaggio si evince, innanzitutto, il successo di questa invenzione, da cui poi sono stati sviluppati numerosi progetti. Si intuisce, soprattutto, il carattere sperimentale di questo brevetto e la possibilità di realizzare diverse varianti dello stesso progetto: una variante a linee isostatiche, una variante economica e una variante base a linee ortogonali. Varianti dello stesso progetto in relazione tra di loro.

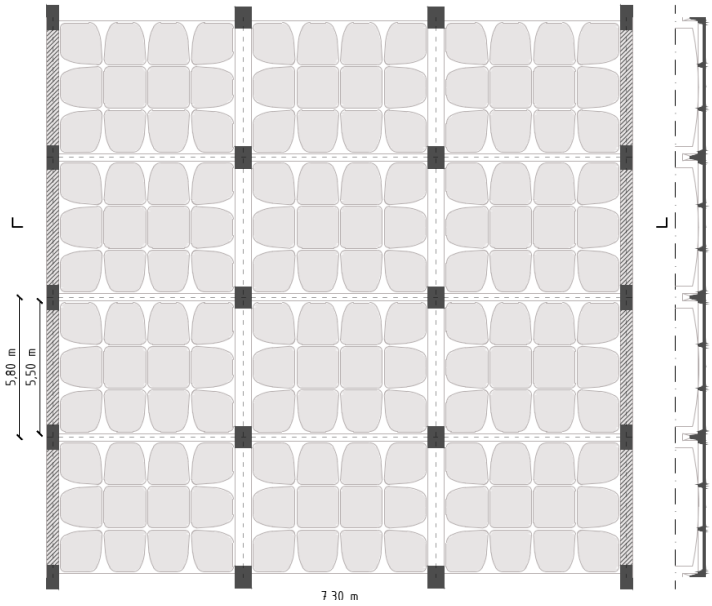
A partire dal testo di questa conferenza, abbiamo costruito un modello di ricerca. Se mettiamo a confronto la variante a linee

isostatiche presentata e la variante realizzata, è possibile riconoscere che la seconda è una naturale evoluzione semplificativa della prima. Nonostante l'andamento delle geometrie sia effettivamente difforme, è possibile riconoscere dei caratteri comuni:

- l'ispessimento dei travetti nell'intersezione con le travi principali;
- l'interasse dei travetti all'intersezione con le travi principali;
- l'andamento curvo di ogni intersezione (sia quella tra travetti sia quelle con le travi principali).



Variante a linee isostatiche per la manifattura tabacchi di Bologna

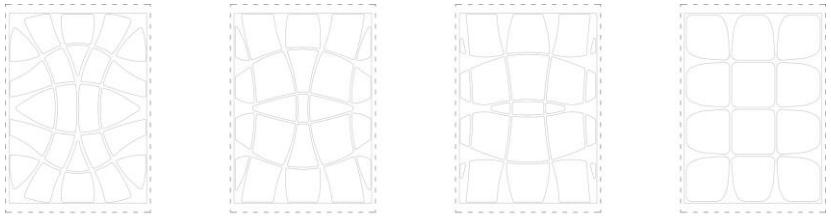


Variante realizzata per la manifattura tabacchi di Bologna

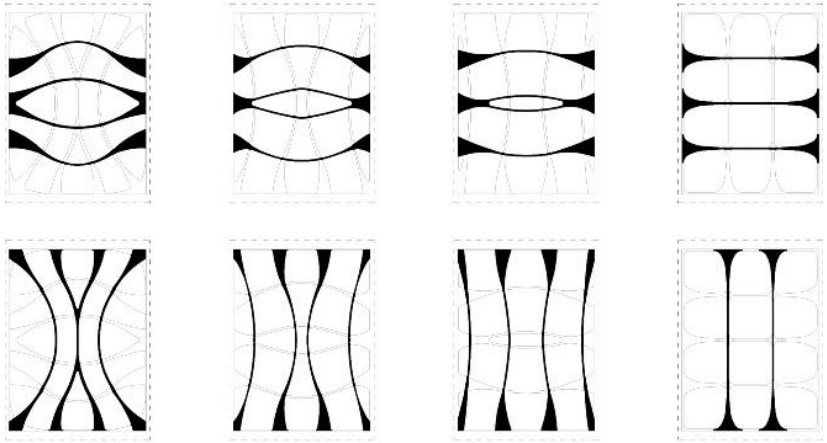
Certamente è possibile giustificare queste caratteristiche con altri elementi. L'ispessimento dei travetti è dovuto, per esempio, ai maggiori sforzi di taglio presenti nell'incastro tra la trave principale e il travetto; allo stesso modo l'andamento curvo delle intersezioni è dovuto all'uso di casseformi in ferrocemento e alla possibilità di non avere spigoli vivi. Dunque, queste caratteristiche sono paragonabili perché nascono da fattori legati ai medesimi metodi progettuali e realizzativi e non derivano da un legame intrinseco al progetto stesso. Tuttavia, è impossibile non riconoscere che ci siano dei legami tra queste due soluzioni.

Nell'ipotesi che la seconda sia una naturale evoluzione della prima, si immaginano delle soluzioni intermedie nel dettaglio della singola campata. I disegni di dettaglio mostrano che la condizione sul bordo resta pressoché invariata, mentre l'andamento dei travetti

subisce una modificazione: tutte le linee tendono a regolarizzarsi, le linee verticali si schiacciano verso l'esterno dando spazio ad una campata centrale, le linee orizzontali si schiacciano verso l'interno eliminando la capata centrale. La soluzione *base a nervature rettilinee ortogonali* presenta lo stesso numero di campi ad ogni sezione del solaio.



Ipotesi di varianti intermedie tra la variante a linee isostatiche e la variante base a linee ortogonali



Nervature orizzontali e nervature verticali

Lo studio dei passaggi intermedi serve, ad oggi, a ipotizzare il passaggio progettuale tra un variante e l'altra. Questo studio non vuole descrivere i passaggi intermedi, perché se le prime sono linee isostatiche di questo solaio e le ultime sono linee rettilinee, quelle dei passaggi centrali non sono né le une, né le altre. Questo studio si limita al momento all'aspetto formale e tenta di descrivere in maniera precisa il momento del passaggio da una soluzione all'altra, cioè del progetto del solaio a nervature rettilinee, successivamente a quello a nervature isostatiche. Nelle immagini si vedono chiaramente i caratteri comuni relativi all'inspessimento, all'interasse e alle intersezioni dei travetti, mentre cambia l'andamento delle curve principali. La curvatura delle linee isostatiche si razionalizza in linee rette, come se fossero dei fili morbidi che vengono tesi sul bordo delle campate, fino ad ottenere un reticolato rigido.

Qualora si consideri questo solaio a nervature rettilinee come un'evoluzione della variante a linee isostatiche, allora si amplia il panorama delle opere da prendere in considerazione. Secondo questo ragionamento, è possibile tenere in considerazione un panorama di solai molto più ampio rispetto a quello strettamente legato alle linee isostatiche. Ovviamente non si possono confondere i modelli strutturali o semplificare un modello analitico che è stringente, ma è necessario avere uno sguardo più ampio per analizzare le relazioni tra progetti diversi e comprendere che, nonostante le diversità, provengono da una matrice comune, da una stessa modalità progettuale, addirittura dallo stesso momento ideativo. Nel capitolo successivo verranno indagati i diversi modi in cui si sono sviluppati questi progetti, cioè le varianti e le evoluzioni prodotte dallo studio Nervi.

Il secondo momento

L'intervento di Desideri continua descrivendo il secondo momento fondamentale della nascita di questi solai

Con solai a nervature rettilinee per la Manifattura tabacchi di Bologna, Nervi vinse l'appalto concorso. I casseri di questo solaio sono realizzati in ferro-cemento, solai da costruire erano migliaia di metri quadrati e le casseforme in legno, anche se realizzate alla perfezione, avrebbero determinato uno sfrido enorme. La cassaforma di ferro-cemento era resistentissima e riproduceva al negativo la forma dei moduli, veniva montata su un ponteggio tubolare mobile con dei martinetti idraulici che prevedevano la possibilità di un abbassamento e di uno spostamento in avanti. In questo modo si acceleravano tempi di produzione. Ed ecco il risultato del solaio a piastra incastrata su quattro lati a nervature "cosiddette" isostatiche - dirò meglio perché uso il termine cosiddette. La forma della pianta non proprio rettangolare, c'è un piccolo adattamento. Lo studio che avevo fatto per le nervature isostatiche non era servito subito nel '49 ma servì a breve per il Lanificio Gatti, in cui dovendo costruire per notevoli dimensioni una piastra a fungo incastrata nei vertici di una maglia incrociata, Nervi pensa di nuovo alle nervature isostatiche. Lo studio che io feci fu condotto senza ausilio di calcolo automatico. Chi oggi ripetesse quel calcolo al computer troverebbe che in realtà le sollecitazioni lungo ognuno di quelle nervature non sono del tutto esenti da momenti torcenti. La ragione è che le isostatiche sono una famiglia infinita di curve in una piastra di spessore costante, e quando vengono trasformate in nervature che fuoriescono dalla piastra danno luogo ad un solaio nervato non ad un solaio a sezione costante. Feci notare tutto ciò a Nervi: gli dissi "Ingegnere - non lo chiamavo professore perché qualcuno cominciava a chiamare professore me, forse lo avrei dovuto chiamare Maestro -tutto questo andrebbe bene se il carico fosse uniforme e ripartito su tutta la piastra". Nel caso del Lanificio Gatti era probabile. Se ci fosse stato un carico concentrato in un punto qualsiasi della piastra le condizioni diventavano diverse. Egli mi disse scherzando: vada al diavolo". Da quel momento anche Nervi iniziò a parlare di solai a nervature curvilinee, anche per solai della Sala delle udienze del Vaticano. In ogni caso il solaio del Lanificio Gatti è bellissimo.

[98] Sullo stesso tema si guardi Cresciani M., Forth J., Three Resilient Megastructures by Pier Luigi Nervi, in «International Journal of Architectural Heritage. Conservation, Analysis, and Restoration», n. 8, 2014, pp. 49-73.

In questo passaggio Desideri racconta in poche battute tutto ciò che c'è da sapere sui solai a linee isostatiche prodotti dallo studio Nervi: non sono dei solai a linee isostatiche - Nervi ne è consapevole sin da subito - ma, nonostante ciò, il suo Studio continua la produzione di queste specifiche strutture. Nel momento[98] in cui i solai a linee isostatiche diventano dei solai a nervature curvilinee si passa da un modello legato al metodo analitico e volto all'ottimizzazione strutturale a un nuovo archetipo legato alla forma e alla capacità costruttiva. Si può pensare che sia proprio l'imprecisione strutturale ad averne determinato il successo, concedendo ad altri aspetti del progetto, quali le esigenze costruttive o le necessità estetiche.

Da questa testimonianza di Desideri, da noi commentata, è chiaro che dal momento in cui viene depositato il brevetto di Arcangeli e iniziano gli studi analitici su queste linee e sulla possibilità di trarne nuove opere da realizzarsi, i solai a nervature disposte lungo le linee isostatiche dei momenti principali si discostano dalle stringenti regole matematiche e acquistano un valore che è portatore di istanze diverse. Del *Lanificio Gatti* non viene lodata la perfetta corrispondenza tra statica e forma, né la perfetta realizzazione: "Il solaio del *lanificio Gatti* è bellissimo".

Le parole di Desideri sono quanto mai oneste e chiudono il quadro sull'atteggiamento di carattere fortemente sperimentale che c'è nella realizzazione di questi solai nello specifico e in tutte le realizzazioni dello studio Nervi.

Di fronte a questa importante testimonianza sul passaggio dallo studio di solai a linee isostatiche al progetto di nervature curvilinee

Le considerazioni possono essere applicate a tutti i solai, come per esempio al caso del mezzanino del Palazzo del lavoro di Torino.

o “cosiddette” isostatiche, viene il dubbio su quale sia, riprendendo le parole dello stesso Nervi, la 'onestà dei progettisti': vale a dire quale sia il nesso tra le nervature curvilinee e la capacità statica e se effettivamente ci sia una vera ottimizzazione strutturale legata all’assenza di momenti torcenti lungo questi travetti curvi. Desideri racconta:

> *Un altro progetto interessante per il quale ho realizzato degli studi statici è quello in cui Nervi collaborò con Harry Saidler, il grattacielo costruito nella Australia Square a Sidney, non lontano dall'Opera House e l'MLC Center. Si nota il bel solaio con le nervature, non sono né curvilinee né radiali; comunque furono disegnate personalmente da Nervi, che aveva una mano straordinaria ed era solito svolgere uno studio accuratissimo della forma. Egli affermava: "se una struttura è staticamente corretta, sicuramente è anche bella" Questa è una affermazione con cui Nervi tendeva ad estremizzare il discorso, altrimenti saremmo costretti a rinnegarla, perché il fatto che una struttura è staticamente corretta è solo condizione necessaria ma, ahimè, non sufficiente perché essa risulti bella. Oltre alla struttura staticamente corretta, che è condizione indispensabile, occorre una sensibilità per la forma che Nervi aveva acquisito come il famoso "intuito statico", che secondo molti è un dono di natura, ma secondo me era anche un patrimonio che Nervi si era costruito con uno studio accuratissimo della natura e dei suoi aspetti che potevano avere riferimento con la funzione statica.*

Desideri parla di *intuito statico* come la capacità che permette di trovare la concordanza perfetta tra correttezza statica e la forma, ma che di fatto prescinde dalla perfezione statica e dalla perfetta corrispondenza delle leggi matematiche. L’*intuito statico* è la capacità che - con ogni probabilità - non può essere sganciata dalla *mano straordinaria*, cioè da una sensibilità estetica notevole necessaria per delineare andamenti precisi che siano al contempo proventi dalla conoscenza profonda delle leggi fisiche e da una certa sensibilità formale.

Seguendo questo ragionamento in cui il confine tra la statica e la forma, cioè tra l’arte e la scienza, è labile, allora è necessario allontanarsi dagli andamenti stringenti delle equazioni delle linee isostiche e riconoscere che il risvolto di questi solai è ben più ampio con evoluzioni complesse e articolate.

4.1 Progetti dello Studio Nervi. Una tipologia e le sue diverse declinazioni

Nella storia dei solai a linee isostatiche o a nervature curvilinee sviluppati dallo studio Nervi, sin dalla deposizione dei brevetti, risulta complesso orientarsi tra i vari progetti, comprenderne i nessi e, soprattutto, determinare i criteri di selezione degli stessi, al fine di stabilire quali solai possano essere effettivamente ricondotti a questa categoria.

In relazione a quanto precedentemente esposto, emergono due aspetti: in primo luogo, non esistono solai propriamente a nervature isostatiche, ma solo a *cosiddette* isostatiche; in secondo luogo, è possibile includere nella selezione anche disegni che non presentano neanche nervature curvilinee, ma che a queste sono familiari, come nel caso del progetto realizzato del *Magazzino Ballette* della *Manifattura tabacchi* di Bologna.

Lo studio in esame prende in considerazione sia strutture realizzate, sia strutture solamente progettate. L'obiettivo di questa analisi è esplorare esclusivamente l'aspetto formale derivante dall'approccio sperimentale legato alla progettazione di questi solai, cioè indagare quale sia stata la variabilità nei profili di queste curve, generati da ragionamenti progettuali analoghi. L'intento non è quello di descrivere nel dettaglio i singoli progetti, ma di fornire gli strumenti necessari per orientarsi tra le numerose variabili in cui questi solai sono stati concepiti.

Per condurre tale studio, sono state individuate quattro categorie che sintetizzano, in modo adeguato, l'approccio formale relativo a queste strutture. L'obiettivo non è quello di classificare rigidamente ciascun progetto in una serie predeterminata, ma di farsi strada tra i diversi casi, accomunandoli attraverso caratteri condivisi che prescindono da altri aspetti, quali la realizzazione, le modalità costruttive, la scala, la capacità statica richiesta o il periodo di ideazione.

Le categorie considerate sono:

- Linee isostatiche a fungo su maglia quadrata;
- Linee isostatiche su altre forme;
- Linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie;
- Linee su altre superfici piane orizzontali e verticali;

4.1.1 Linee isostatiche a fungo su maglia quadrata

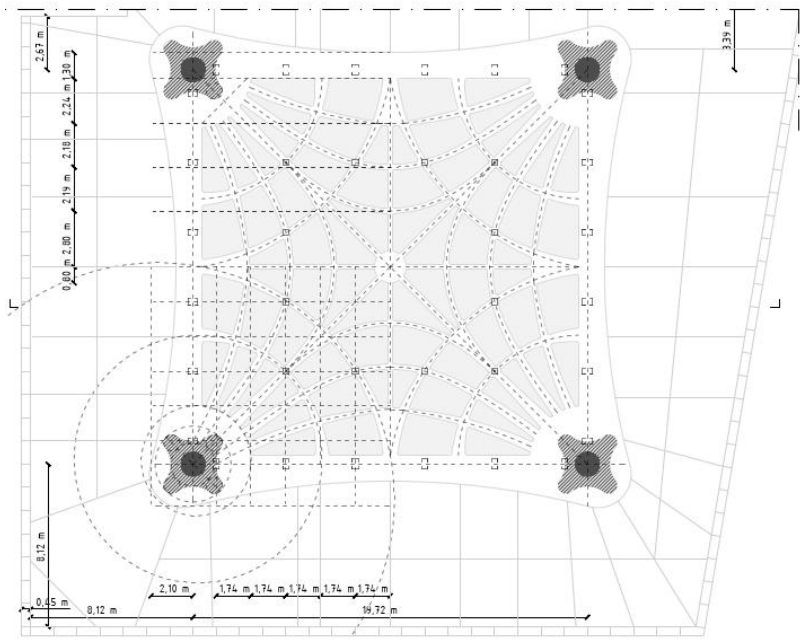
La categoria dei *Solai a linee isostatiche a fungo su maglia quadrata* è quella che meglio rappresenta il mondo dei solai a linee isostatiche poiché i solai presentano nervature sull'intradosso, le quali possono essere effettivamente associate, per forma, a linee isostatiche ideali relative alla piastra di riferimento.

Questo caso è di particolare rilevanza poiché, a partire dal solaio del *Lanificio Gatti*, rappresenta la prima soluzione studiata in tale ambito. Inoltre, come nel caso del Lanificio, questi solai confondono la propria identità tra 'piastre tra pilastri' e 'piastre a fungo' con un vincolo centrale.

Tale configurazione è stata applicata su una pianta quadrata singola (es. Sede della cassa di Risparmio, Venezia), su una serie di piastre in una direzione (es. piano della galleria del *Palazzo del Lavoro*, Torino) e su una serie di piastre in due direzioni (es. *Lanificio Gatti*, Roma) con i vincoli puntuali sugli spigoli. In questa categoria sono stati da noi considerati anche progetti in cui la pianta non è perfettamente quadrata, ma presenta un allungamento in una direzione (es. progetto per la *Manifattura tabacchi*, Roma e Progetto per la *Stazione centrale* di Napoli).

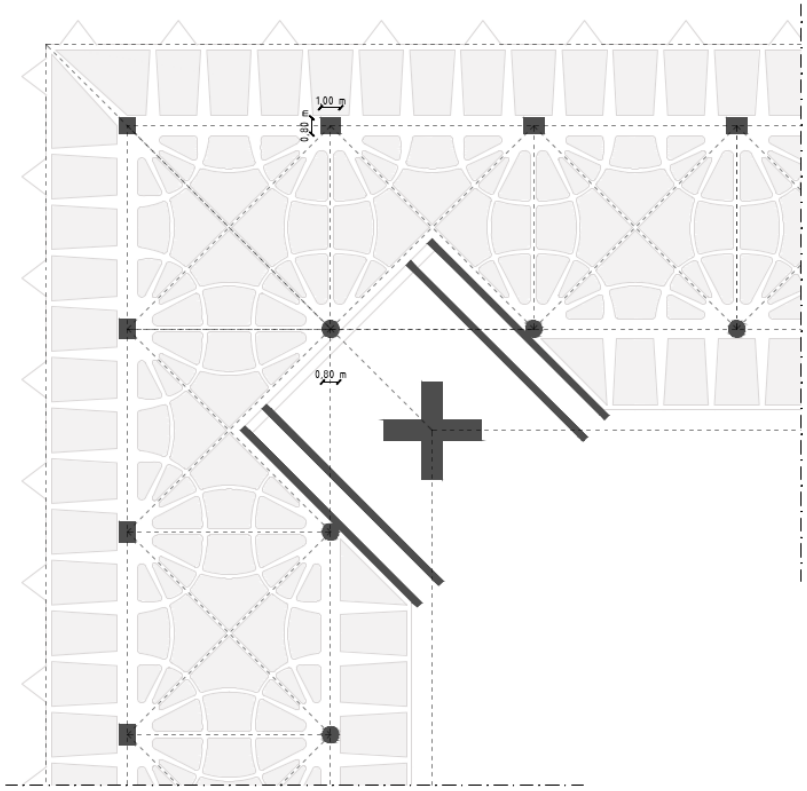
Questo modello risulta significativo in quanto, negli anni '50, erano già disponibili gli strumenti analitici necessari per studiare il comportamento di piastre quadrate vincolate sui bordi o sugli angoli, rendendo tale modello l'unico che scaturisce da uno studio matematico e che può trovare riscontro nella verifica con le linee isostatiche ideali. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che, in tutti i casi in cui i solai sono costituiti da una serie di campate, non si osservano variazioni nelle nervature legate ai fenomeni di bordo, come l'interferenza con altre piastre o la loro assenza. Questo dettaglio evidenzia che, nel caso di campate multiple, non sono stati effettuati ragionamenti riguardanti le interferenze tra le varie piastre, ma si è trattato di un semplice accostamento di singoli solai. È emblematico, a tal proposito, il caso del *Palazzo del Lavoro*, dove tutte le campate presentano nervature identiche, indipendentemente dal fatto che siano posizionate su angolo, su bordo o che manchi una porzione di solaio.

Nei disegni seguenti, da noi selezionati a scopo esemplificativo, è possibile individuare una profonda analogia formale. Considerando la singola campata delimitata da quattro pilastri, si osserva che la principale variazione riguarda esclusivamente il numero di nervature, mentre il loro profilo rimane sostanzialmente invariato.

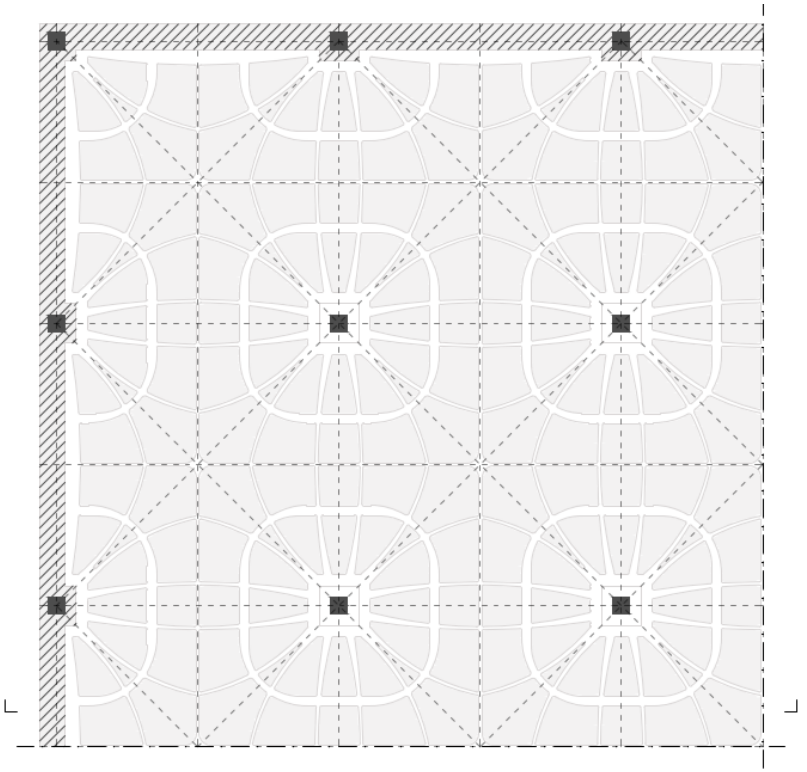


Sede della cassa di Risparmio, Venezia. Piastra quadrata singola

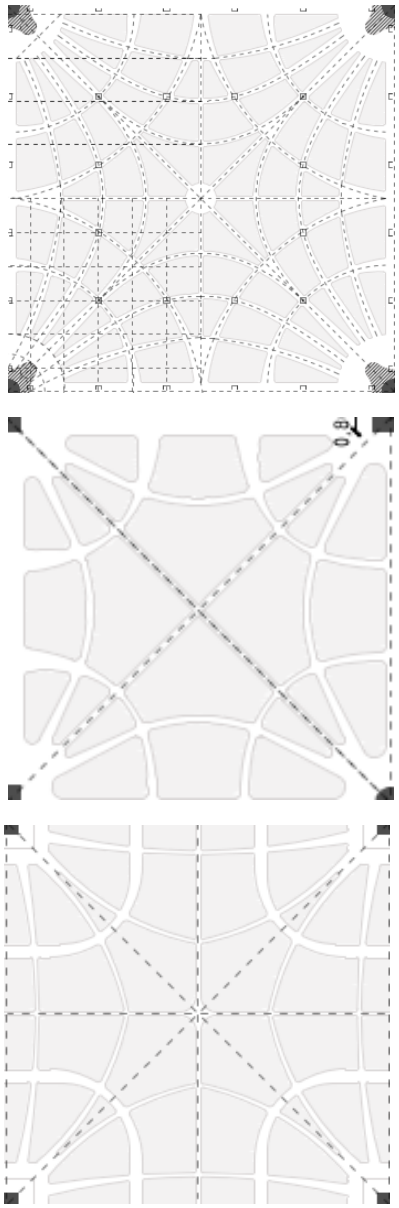
La configurazione adottata nel solaio del *Palazzo del Lavoro* di Torino può essere considerata come un modello di riferimento, caratterizzato dalla presenza di nervature diagonali, da una nervatura disposta concentricamente attorno al pilastro e un'altra che si estende radialmente da esso fino a connettersi con il pilastro successivo.



Piano della galleria del Palazzo del Lavoro, Torino. Serie di piastre in una direzione



Lanificio Gatti, Roma. Serie di piastre in due direzioni

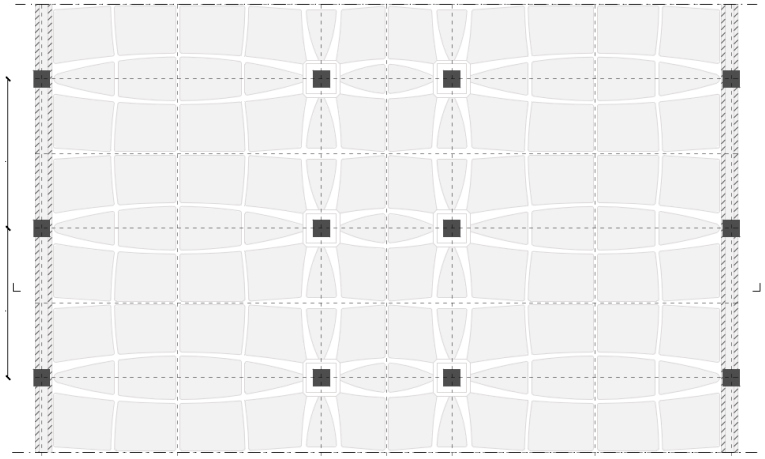


Confronto tra le singole campate

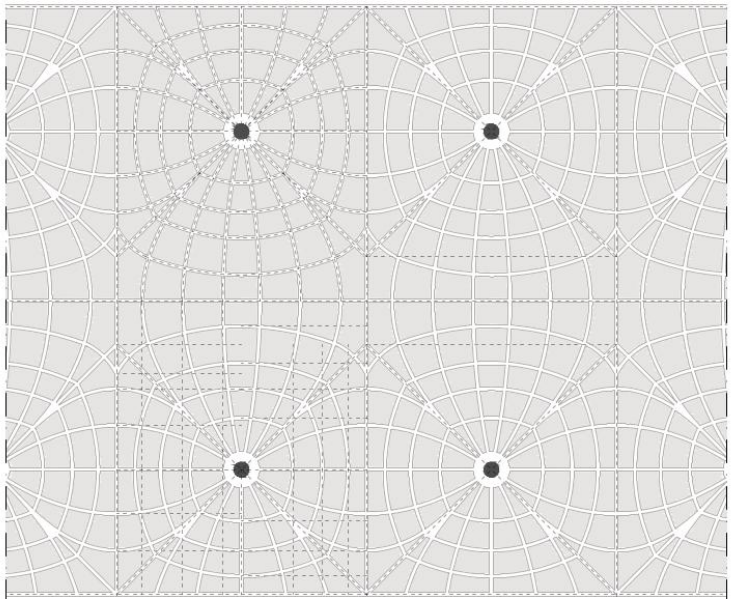
I progetti che seguono, entrambi non realizzati, presentano un allungamento in una direzione.

Il disegno del solaio della *Manifattura tabacchi* di Roma, realizzato tra il 1951 e il 1953 in concomitanza con i progetti per il *Lanificio Gatti* e la *Manifattura tabacchi* di Bologna, presenta due tipologie di campate: una centrale, di forma sostanzialmente quadrata, e una laterale, significativamente più allungata. La campata centrale, sebbene priva delle nervature diagonali e concentriche, può essere confrontata con i casi precedenti. Tuttavia, in questa configurazione, si osservano nervature ortogonali disposte in mezzeria, presumibilmente introdotte per esigenze costruttive. La campata allungata, invece, presenta una lunghezza pari al doppio di quella centrale e può essere interpretata come una versione estesa della configurazione di base, con una deformazione che sembra originarsi dal travetto posizionato a un terzo della sua lunghezza.

Il disegno del solaio della *Stazione centrale* di Napoli, approntato nel 1954 in occasione del concorso per la progettazione dell'edificio, presenta una configurazione caratterizzata da un fitto reticolo di nervature. Un aspetto di particolare interesse è rappresentato dall'effetto dell'allungamento della campata sulla disposizione delle nervature: mentre in una direzione i travetti diagonali risultano interrotti, nella direzione opposta essi mantengono la loro continuità.



Progetto per la Manifattura tabacchi, Roma



Progetto per la Stazione centrale, Napoli

4.1.2 Linee isostatiche su altre forme

La categoria dei *Solai a linee isostatiche su altre forme* rappresenta un'ampia gamma di soluzioni espressive basate su questo modello. In questa categoria sono stati da noi considerati solai con forme eterogenee, quali rettangolari, circolari, ovali, trapezoidali e con modanature, senza limitazioni morfologiche. L'unico criterio di selezione adottato riguarda la presenza di un sistema di nervature a profilo curvilineo, escludendo il modello a fungo quadrato trattato precedentemente. L'obiettivo è quello di raccogliere esempi che illustrino la varietà progettuale di tali soluzioni.

I solai appartenenti a questa categoria, essendo tra loro differenti, presentano caratteristiche strutturali e formali peculiari. Alcuni possono essere direttamente ricondotti al principio delle linee isostatiche (es. Progetto per la nuova sede *La Rinascente*, Roma; *Palazzo dello sport*, Roma; *Chiesa del Cuore Immacolato di Maria*, Borgo Panigale), altri, invece, mostrano semplicemente una disposizione curvilinea delle nervature, (es. *Progetto per un centro sportivo*, Kuwait, 1968-1969).

I disegni relativi al progetto per la nuova sede *La Rinascente* e per il *Palazzo dello sport* presentano solai con configurazioni planimetriche differenti: rispettivamente rettangolare e trapezoidale. Nonostante tale diversità, si evidenzia un'analogia formale nelle nervature, che nel caso del solaio trapezoidale si distinguono dal modello rettangolare per un restringimento della base minore, funzionale al disegno della serie polare con un angolo di 7° e 30'. Le differenze principali tra le due soluzioni riguardano i vincoli strutturali: in entrambe le configurazioni la posizione dei pilastri non determina la definizione delle linee isostatiche, mentre il vincolo primario è costituito dalla trave di bordo, la quale impone un carico distribuito. In particolare, nel solaio del *Palazzo dello sport* si osserva una flessione dei travetti in direzione ortogonale rispetto alle travi radiali, suggerendo la presenza di un incastro lungo quella sezione.

Questi due esempi mostrano come la teoria delle linee isostiche si pieghi alle esigenze del progetto. Dall'analisi grafica emergono analogie e differenze tra i progetti e tra gli andamenti delle nervature curvilinee ispirate alle linee isostatiche. Tuttavia, non è possibile determinare con certezza se tali configurazioni aderiscano pienamente ai principi teorici delle linee isostatiche ideali, né se siano supportate da un'analisi analitica rigorosa.

È particolarmente interessante osservare come Pier Luigi Nervi descriva il progetto per la nuova sede *La Rinascente* (poi realizzata da franco Albini) in una lettera indirizzata all'architetto Ignazio Gardella, con il quale stava collaborando. La lettera, datata 5 maggio 1961, accompagna l'invio di una tavola progettuale e contiene alcune riflessioni che offrono uno sguardo diretto sul processo ideativo[99]:

> *Caro Gardella,*
>
> *Ti allego un primo studio del solaio a nervature isostatiche che però a cosa fatte mi sembra meno interessante di quanto credessi.*
>
> *Forse diradando maggiormente le nervature si potrebbe migliorare ma mi domando anche se il risultato meriti la inevitabile maggior complicazione costruttiva.*
>
> *Che ne pensi?*

La risposta del 12 giugno di Gardella è

[99] MAXXI - PLN P31.2

Caro Nervi,

Ho avuto la tua del 5 giugno col primo studio del solaio a nervature isostatiche.

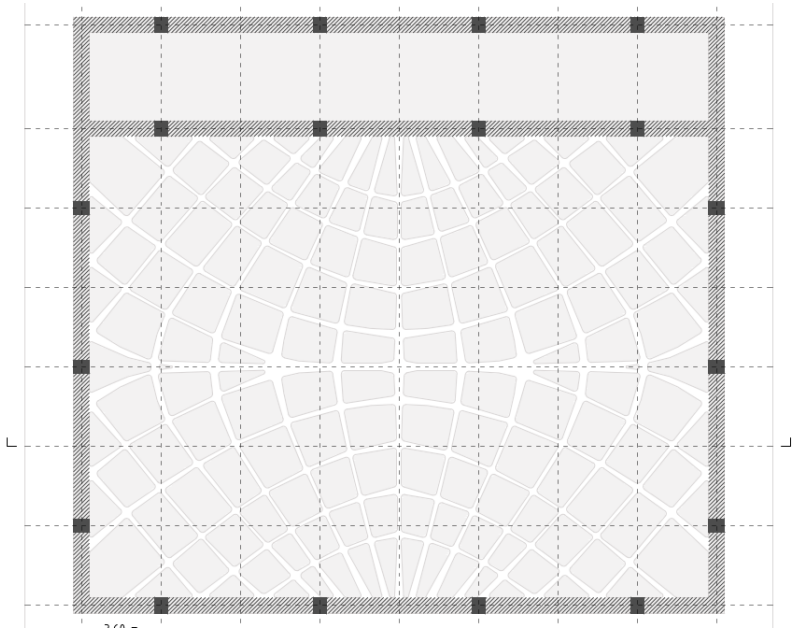
A me, a prima vista, la struttura sembra piuttosto interessante, in quanto dà una vibrazione strutturale alla grande piastra del solaio.

L'unico dubbio, è se, data la limitata altezza dell'ambiente, si riesca a leggere l'andamento delle nervature. Di questo ci si potrebbe in parte rendere conto con un piccolo modellino.

Dalla lettura di questo scambio epistolare emergono diverse considerazioni rilevanti. Innanzitutto, l'uso da parte di Nervi dell'espressione "nervature isostatiche" merita attenzione. Egli impiega il termine pur consapevole dell'impossibilità tecnica di realizzare nervature perfettamente aderenti alle linee isostatiche; si tratta, piuttosto, di soluzioni ispirate a tali principi. La scelta terminologica può essere interpretata come una semplificazione comunicativa o una strategia retorica per conferire autorevolezza al progetto, senza entrare nei dettagli della modellazione teorica.

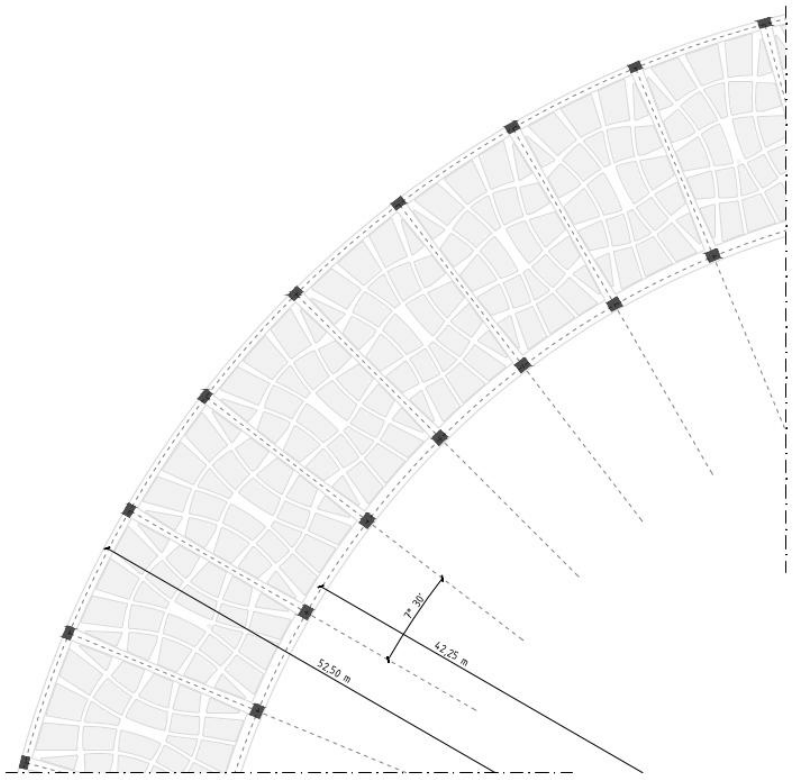
In secondo luogo, la lettera testimonia un approccio progettuale marcatamente sperimentale: Nervi, pur avendo già elaborato uno studio e realizzato i disegni, esprime un certo disincanto verso il risultato ottenuto, definendolo "meno interessante" di quanto si aspettasse. Questa affermazione sottolinea la natura processuale del progetto, inteso come un sistema aperto a revisioni, modifiche e valutazioni successive alla prima elaborazione.

Infine, dalle parole di entrambi emergono due aspetti fondamentali nella progettazione di questi solai: quello costruttivo e quello percettivo-spaziale. Nervi si interroga sulla minore complessità realizzativa che comporterebbe un diradamento delle nervature, mentre Gardella si concentra sulla possibilità che, a causa della limitata altezza dell'interpiano, le nervature non siano chiaramente leggibili dal punto di vista percettivo. Questi elementi confermano che le valutazioni costruttive e spaziali rimangono centrali nel processo decisionale, nonostante l'attenzione si rivolga in questo caso esclusivamente allo sviluppo formale di questi progetti[100].



Progetto per la nuova sede La Rinascente, Roma. Piastra a pianta rettangolare

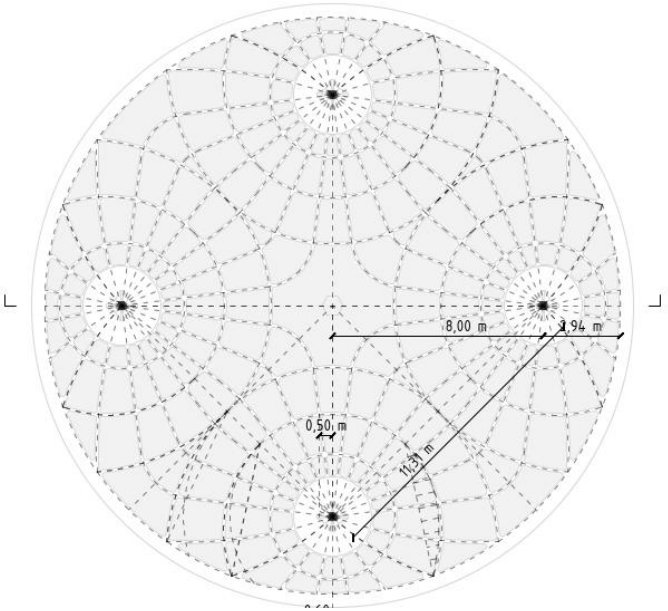
[100] Vedi la sezione nella tavola relativa al progetto per la nuova sede La Rinascente, Roma.



Palazzo dello sport, Roma. Serie di piastre a pianta trapezoidale

Il solaio della *Chiesa del Cuore Immacolato di Maria* a Borgo Panigale si caratterizza per una configurazione composta da quattro unità circolari che si integrano a formare una struttura complessiva anch'essa di forma circolare. Il progetto affronta in maniera esplicita il tema del solaio a fungo, adottato come modulo base e ripetuto per generare l'intero sistema di copertura.

Questo concetto è ulteriormente enfatizzato dalla presenza di un marcato ingrossamento del capitello alla sommità di ciascun pilastro, elemento che assorbe e ingloba le nervature proprio in corrispondenza del punto di appoggio. Le nervature, infatti, si presentano più fitte in prossimità del centro della campata, dove si concentra la trasmissione degli sforzi, e tendono progressivamente a diradarsi man mano che si allontanano da esso, confermando una logica strutturale coerente con il comportamento di una lastra a fungo.



Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Borgo Panigale (BO). Serie di piastre a pianta circolare

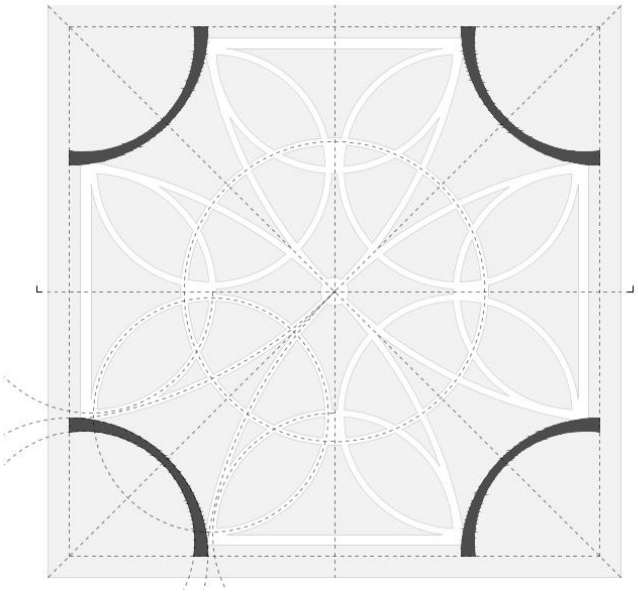
Tutti gli esempi analizzati finora possono essere ricondotti, in misura diversa, alla teoria delle linee isostatiche, sia per quanto riguarda l'andamento delle nervature, sia per la configurazione dei punti di appoggio.

Un caso parzialmente differente è rappresentato invece dal progetto del solaio all'interno del centro sportivo in Kuwait. In questo caso, la struttura presenta una forma quadrata, con appoggi

su setti la cui geometria è definita da un profilo curvilineo su una porzione di cerchio. Questo motivo circolare si ripete anche nel disegno delle nervature, che però non possono essere interpretate come espressione diretta delle linee isostatiche, ma piuttosto come semplici nervature curvilinee.

Nonostante l'assenza di un riferimento esplicito alla teoria delle linee isostatiche, il disegno del solaio offre spunti di riflessione interessanti. Si osserva, infatti, che una serie di nervature si dispone concentricamente rispetto alla posizione del vincolo, mentre un'altra assume un andamento radiale. Inoltre, l'intersezione tra queste due famiglie di nervature avviene con angoli pressoché retti, richiamando l'ortogonalità tipica delle due famiglie di linee isostatiche.

Questa configurazione lascia intuire una chiara volontà espressiva che, pur discostandosi dalle leggi statico-analitiche in senso stretto, continua a trarne ispirazione, traducendo quei principi in un linguaggio formale più libero e progettualmente autonomo.



Progetto per la zona della pratica sportiva nel centro sportivo, Kuwait, 1968-1969. Piastra con modanature

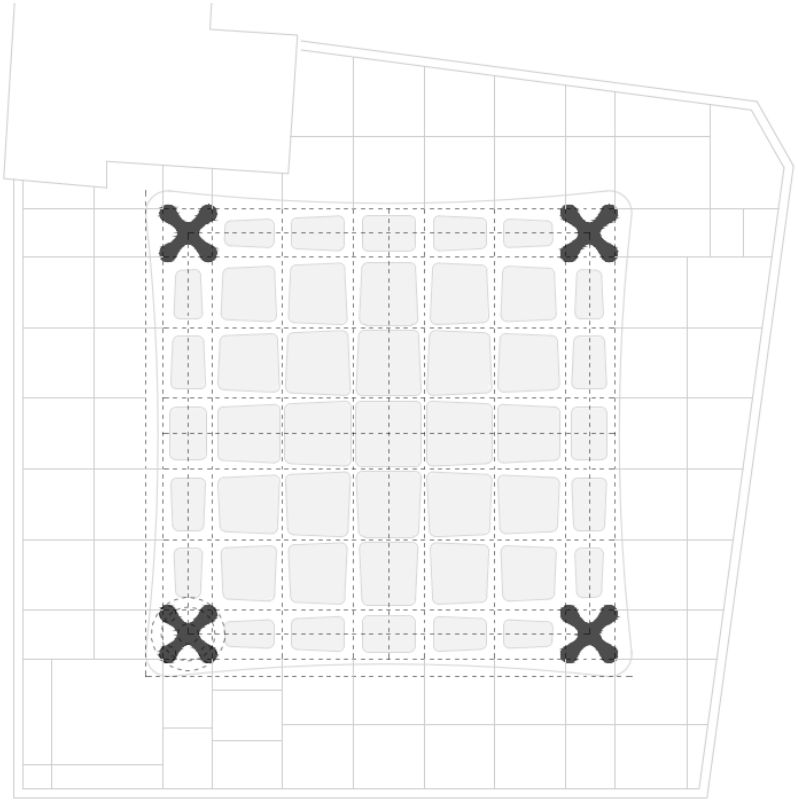
4.1.3 Linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie

La categoria dei *Solai a Linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie* rappresenta le famiglie di varianti semplificative dei profili complessi delle linee isostatiche. Questa categoria prende le fila dal caso già trattato del progetto per la *Manifattura tabacchi* di Bologna. In quel caso la variante realizzata con nervature a graticcio può - secondo noi - essere ricondotta ad una variante precedente a nervature isostatiche, la prima infatti risulta come una naturale semplificazione della seconda, continuando a presentare alcuni tratti fondamentali nell'intersezione tra travi e travetti e nell'intersezione tra travetti.

Linee a graticcio

Nella famiglia dei solai a graticcio vengono presentati tre esempi: primo progetto per la *sede della cassa di Risparmio* a Venezia, il solaio della *stazione del Vaglio Lise* a Cosenza e il solaio dell' *Edificio per i servizi monetari della Banca d'Italia* in via Tuscolana a Roma.

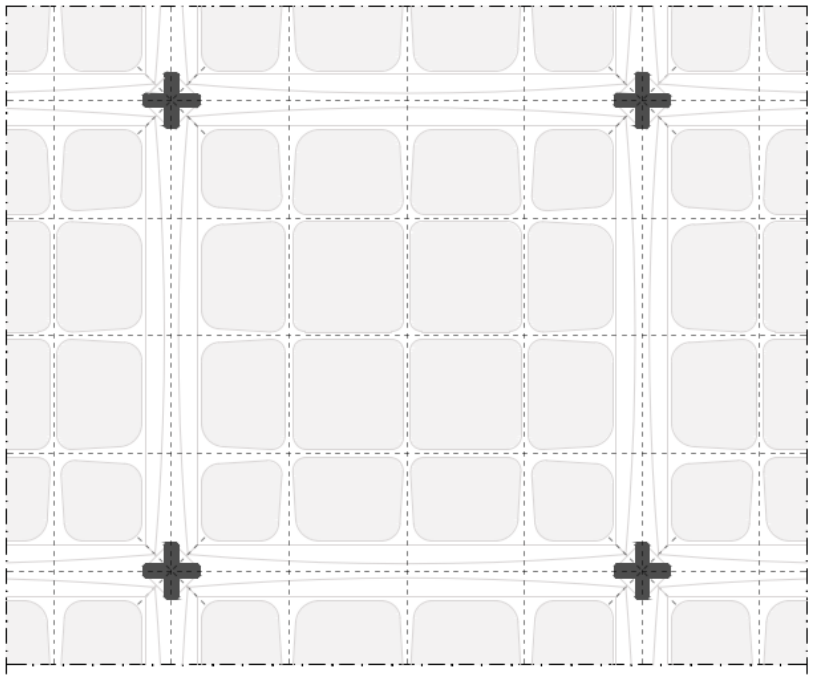
Il primo progetto per la sede della *Cassa di Risparmio* a Venezia, presentato nel 1964, prevede un solaio a graticcio caratterizzato da una maglia regolare e da travetti che si assottigliano nella zona di mezzeria. Dal punto di vista geometrico, questa configurazione si distingue chiaramente dalla variante realizzata nel 1967. Tuttavia, tra le due soluzioni permangono alcune analogie significative: la presenza di una maglia strutturale definita, l'andamento variabile dei travetti lungo la luce, l'impiego di pilastri a sezione variabile, il profilo stondato della soletta agli spigoli e il raddoppiamento delle travi perimetrali, elemento che può essere messo in relazione con l'ispessimento della trave di bordo nel progetto realizzato. Non è noto il motivo che conduce al cambiamento progettuale relativo al solaio nervato "costituito da una struttura a nervature scatolari", ma si può ipotizzare che la soluzione definitiva sia stata definita in una fase successiva[101].



Primo progetto per la Sede della cassa di Risparmio, Venezia

[101] De Magistris A, Deambrosis F., Palazzo Nervi-Scattolin. Venezia, Milano 2021.

Questo caso risulta particolarmente interessante se messo a confronto con quello della *Manifattura tabacchi* di Bologna: qui, infatti, la soluzione realizzata si presenta più semplice rispetto alla proposta iniziale. Al contrario, nella sede della *Cassa di Risparmio*, la versione costruita appare più complessa rispetto al primo progetto. Si può ragionevolmente supporre che, trattandosi di un edificio destinato a funzioni di rappresentanza, si sia ritenuto opportuno adottare un disegno dell'intradosso più elaborato e formale, capace di conferire maggiore eleganza all'ambiente interno.



Stazione ferroviaria di Vaglio Lise, Cosenza

Il solaio della *stazione ferroviaria di Vaglio Lise* a Cosenza, si configura come un sistema a campate quadrate organizzato secondo un graticcio a maglia regolare anch'essa quadrata. Questa soluzione strutturale viene impiegata per coprire l'intero edificio principale della stazione, fatta eccezione per i blocchi scala e per la cappella, che presenta invece un solaio circolare a nervature curvilinee.

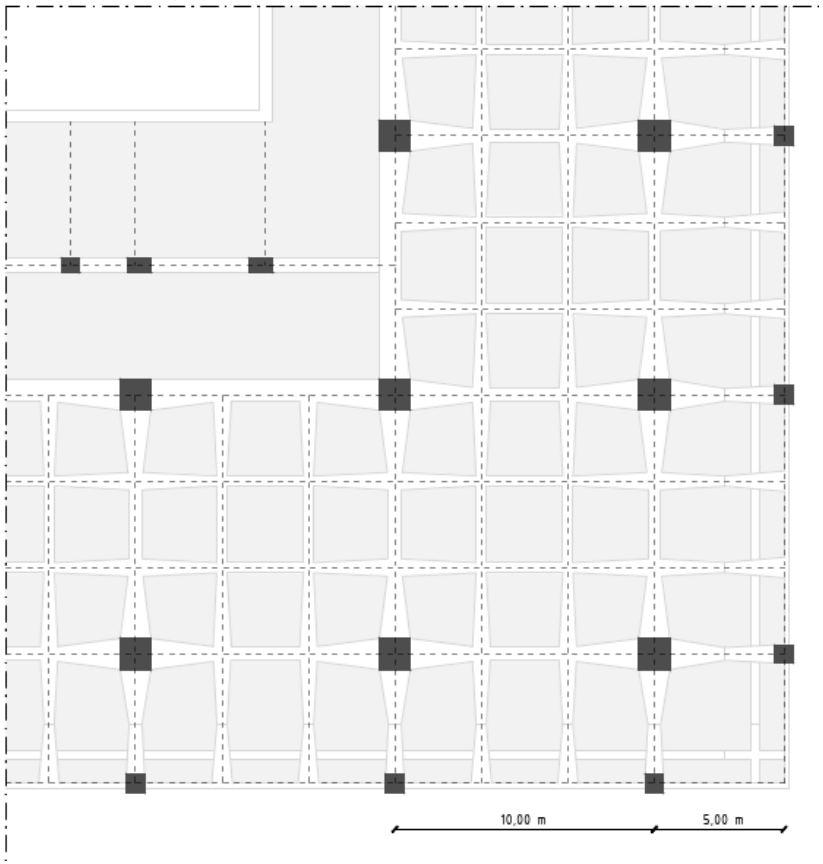
La soluzione adottata per il corpo principale della stazione deriva direttamente dai ragionamenti progettuali sviluppati in occasione della *Manifattura tabacchi* di Bologna e, a partire da quel caso, viene ripresa e reinterpretata in numerosi altri progetti, mantenendo un'impostazione analoga nella forma e nel sistema distributivo delle nervature.

Il solaio dell' *Edificio per i servizi monetari della Banca d'Italia*, situato in via Tuscolana a Roma, si configura anch'esso come un sistema a campate quadrate, organizzato secondo una maglia regolare quadrata. A differenza di altri esempi, tuttavia, questa soluzione non viene applicata all'intero edificio, che presenta in altri settori configurazioni strutturali differenti.

Rispetto ai casi precedenti, questo progetto rappresenta un'ulteriore semplificazione. Permane unicamente l'ispessimento localizzato dei travetti in corrispondenza dell'intersezione con la trave perimetrale, mentre scompaiono del tutto le geometrie curve delle intersezioni, tipiche dei solai ispirati alle linee isostatiche.

In questo contesto, risulta certamente complesso ricondurre direttamente questa soluzione al ragionamento teorico sulle linee isostatiche sviluppato da Nervi e Arcangeli. Tuttavia, è importante adottare uno sguardo ampio, che consideri non solo i risultati formali ma anche il processo progettuale da cui tali esiti derivano. In quest'ottica, anche soluzioni che sembrano inizialmente distanti

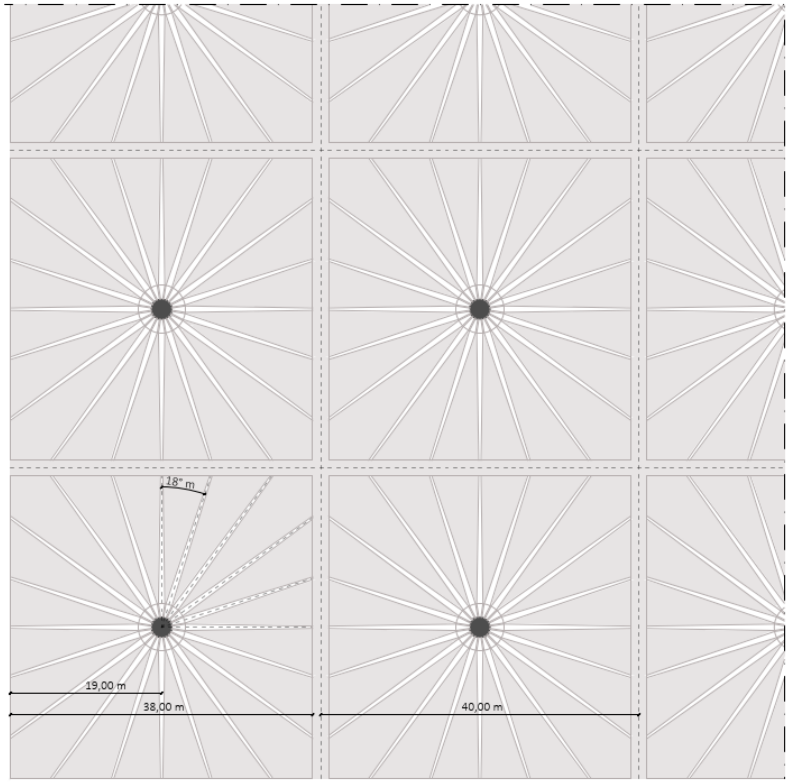
possono essere lette come esiti coerenti, sebbene semplificati, di un medesimo approccio teorico e metodologico.



Edificio per i servizi monetari della Banca d'Italia in via Tuscolana, Roma

Linee a mensola radiale

La categoria dei solai, che nella nostra ricerca definiamo 'con linee a mensola radiale' si fonda sull'andamento delle linee isostatiche in una piastra a fungo a pianta circolare. In questo caso specifico, si osserva una configurazione particolarmente significativa: è infatti l'unico schema in cui una delle due famiglie di linee isostatiche non assume una forma curva. Le due famiglie sono, rispettivamente, radiali e concentriche rispetto al centro della piastra. Le linee radiali, dunque, mantengono un andamento rettilineo, condizione che non si verifica più nel momento in cui la geometria della piastra si discosta dalla forma perfettamente circolare.



Piano principale del Palazzo del Lavoro, Torino.

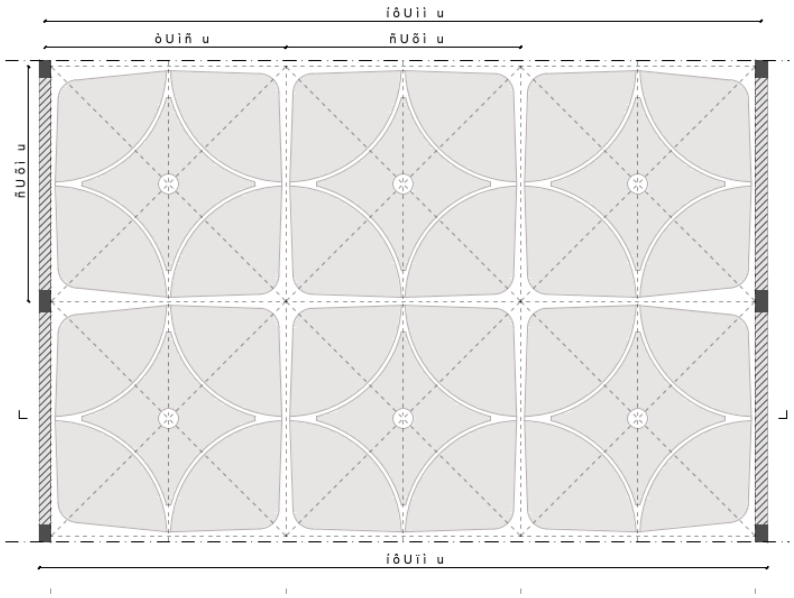
In quest'ottica, il solaio del piano principale del *Palazzo del Lavoro* di Torino può essere interpretato come una semplificazione di questo modello ideale. In quel progetto, le campate si presentano come elementi quadrati, indipendenti tra loro e caratterizzati da un vincolo puntuale posto al centro. Se si considerassero le linee isostatiche ideali per una campata quadrata, queste risulterebbero differenti; tuttavia, nella soluzione adottata, si assiste a un'estensione delle linee radiali tipiche di una piastra circolare, proiettate su un perimetro quadrato.

Linee su orditure secondarie

La categoria dei solai a linee su orditure secondarie raccoglie esempi in cui il disegno delle nervature mostra andamenti curvilinei riconducibili, per forma, alle linee isostatiche, pur in presenza di condizioni di vincolo differenti rispetto al caso preso in esame. L'interesse di questi esempi risiede proprio nella tensione tra la volontà formale di richiamare schemi statici ispirati alla teoria delle linee isostatiche e la loro applicazione in contesti strutturalmente diversi.

Un esempio emblematico è costituito dal solaio dei corpi bassi dell'*Autogrill Motta*, situato lungo il tratto autostradale Limena-Padova. In questo caso, la configurazione delle nervature suggerisce un comportamento affine a quello di una piastra a fungo, o comunque riconducibile a un vincolo distribuito interno alla superficie. Si riconosce infatti un motivo curvilineo di tipo circolare, il cui centro è collocato ai due terzi della larghezza della campata.

Tuttavia, l'effettiva posizione dei vincoli contraddice questa lettura teorica: essi sono infatti posti esclusivamente lungo il bordo, attraverso elementi puntuali di irrigidimento. Le travi principali, disposte lungo le direttrici del graticcio simulando la presenza di vincoli centrali che in realtà non esistono. Con un vincolo distribuito sul bordo ci si aspetterebbe un andamento delle nervature a partire dal perimetro, come avviene nel progetto per la nuova sede *La Rinascente* a Roma.



Autogrill Motta autostrada Limena-Padova, Padova

4.1.4 Linee su altre superfici piane orizzontali e verticali

La categoria delle *Linee su altre superfici* rappresenta il punto in cui le sperimentazioni sui solai a linee isostatiche rivelano appieno il loro potenziale espressivo. Pur nascendo da premesse strettamente legate all'ottimizzazione strutturale e, successivamente, all'esplorazione di nuove possibilità costruttive, questi modelli dimostrano una forza formale tale da generare una varietà di interpretazioni e applicazioni che travalicano la pura funzionalità.

All'interno di questa categoria si distinguono due sottoinsiemi: le *linee su superfici orizzontali* e le *linee su superfici verticali*. Le prime non costituiscono vere e proprie piastre, poiché non presentano una continuità strutturale tale da permettere un comportamento monolitico; si tratta piuttosto di superfici articolate, dove il disegno delle nervature o degli elementi portanti si afferma come codice visivo più che come vincolo meccanico. Le seconde, invece, si configurano come *lastre*, ovvero superfici sollecitate nel proprio piano, in cui l'andamento delle linee isostatiche assume un ruolo strutturalmente attivo e visivamente riconoscibile.

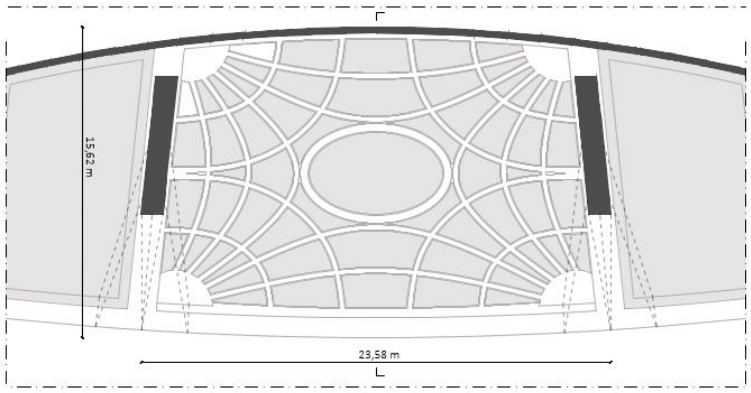
Superfici orizzontali

Il caso delle superfici orizzontali trova un'applicazione particolarmente significativa nel progetto per la *Sala delle Udienze* nella Città del Vaticano, dove si individuano tre episodi distinti: la tribuna papale, l'ingresso e la sala per le udienze particolari.

In tutte e tre le situazioni, viene adottato un principio compositivo comune: si tratta di solai a nervature ispirate alle linee isostatiche, ma privati della soletta piena, lasciando visibile unicamente la struttura delle nervature. Questi elementi orizzontali, dunque, perdono completamente la loro funzione originaria di copertura, trasformandosi in strutture che conservano esclusivamente l'impronta morfologica del solaio, modellata secondo l'andamento delle linee isostatiche dei momenti principali. Per questa ragione, tali dispositivi possono essere interpretati più come controsoffitti che come solai veri e propri. Come controsoffitti, infatti, non solo assolvono a una funzione estetica e simbolica, ma anche tecnica: accolgono e celano al loro interno gli impianti e i sistemi di illuminazione, integrandoli nel disegno architettonico. In particolare la tribuna papale accoglie il complesso sistema di cineprese e microfoni per le riprese televisive.

In questo modo, il profilo delle linee isostatiche, pur perdendo la sua funzione strutturale primaria, continua a guidare la forma, assumendo un valore espressivo e funzionale all'interno dello spazio.

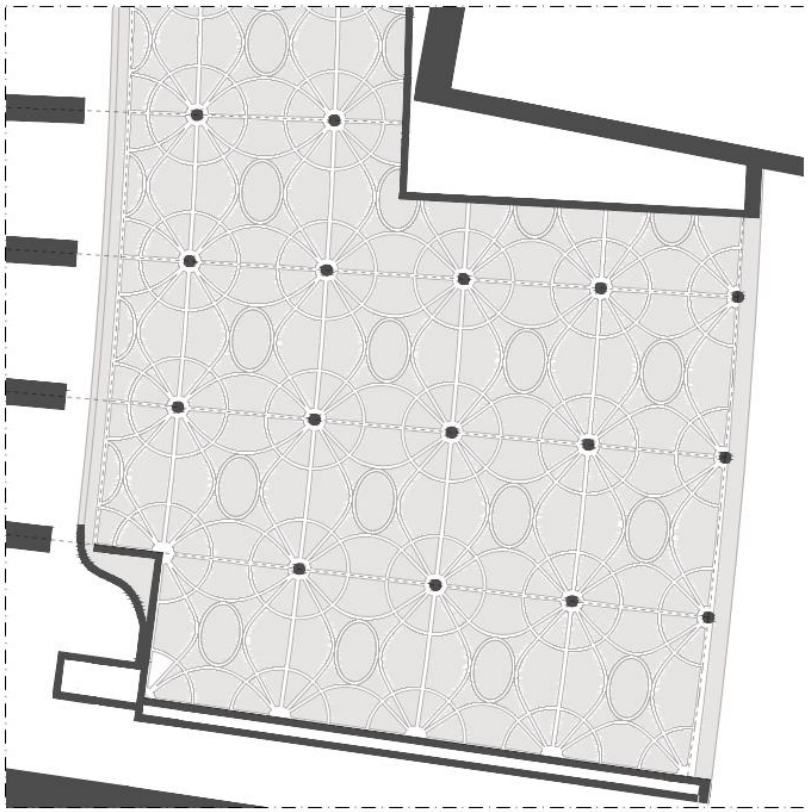
Il controsoffitto della tribuna papale copre il punto focale della Sala delle udienze in Vaticano, replicandone la pianta trapezoidale della sala maggiore e inserendosi nel sistema spaziale definito dai grandi pilastri obliqui che sorreggono la volta principale. La forma non corrisponde ad un trapezio regolare: i lati maggiori seguono infatti un profilo curvilineo, descritto da archi di cerchio. Tale andamento è il medesimo delle file di sedute poste al di sotto della cupola, di fronte alla tribuna. Il controsoffitto è realizzato come un'unica campata, nella quale il disegno delle nervature si ispira all'andamento delle linee isostatiche di un solaio vincolato puntualmente agli angoli. A interrompere questa coerenza geometrica vi è l'oculo centrale, che sottolinea in modo marcato il punto in cui si colloca il trono papale, rafforzando la centralità della tribuna. Questo oculo, insieme alla prima fascia di lacunari attorno all'angolo, è chiuso da una pannellatura opaca ma luminosa, che funge da schermo per l'impianto di illuminazione.



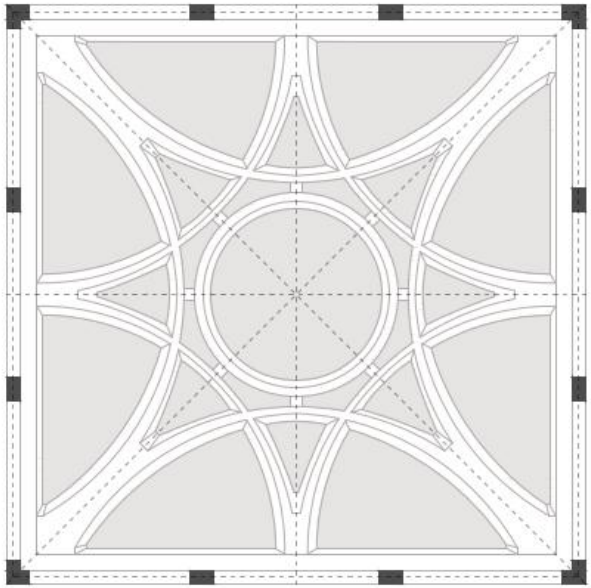
Tribuna papale nella Sala per le udienza in Vaticano

Il controsoffitto dell'ingresso è formato da un sistema di campate che copre uno spazio irregolare ed è sorretto da pilastri circolari, sormontati da capitelli anch'essi circolari e rivestiti in materiale metallico. Questo controsoffitto si presenta come un pattern continuo che decora uno spazio basso e disomogeneo. La singola campata si configura come una versione ridotta del controsoffitto della tribuna papale: la pianta, apparentemente rettangolare, è in realtà trapezoidale con i lati maggiori curvi; il disegno delle nervature si ispira all'andamento delle linee isostatiche e, anche in questo caso, è presente un oculo centrale, che rompe la coerenza geometrica delle nervature isostatiche ideali. L'oculo, come per la tribuna papale, è chiuso da una pannellatura luminosa.

Il controsoffitto della Sala per le udienze particolari si configura come un'unica campata a pianta quadrata. Il disegno delle nervature si ispira all'andamento delle linee isostatiche di una piastra vincolata puntualmente agli angoli, anche se, in realtà, il supporto strutturale è distribuito lungo il bordo. Come negli altri casi, è presente un oculo centrale di forma circolare: anche qui la pannellatura che lo chiude ingloba il sistema di illuminazione, insieme al primo giro di lacunari che lo circonda.



Ingresso nella Sala per le udienza in Vaticano



Sala per le udienze particolari nella Sala per le udienza in Vaticano

Superfici verticali

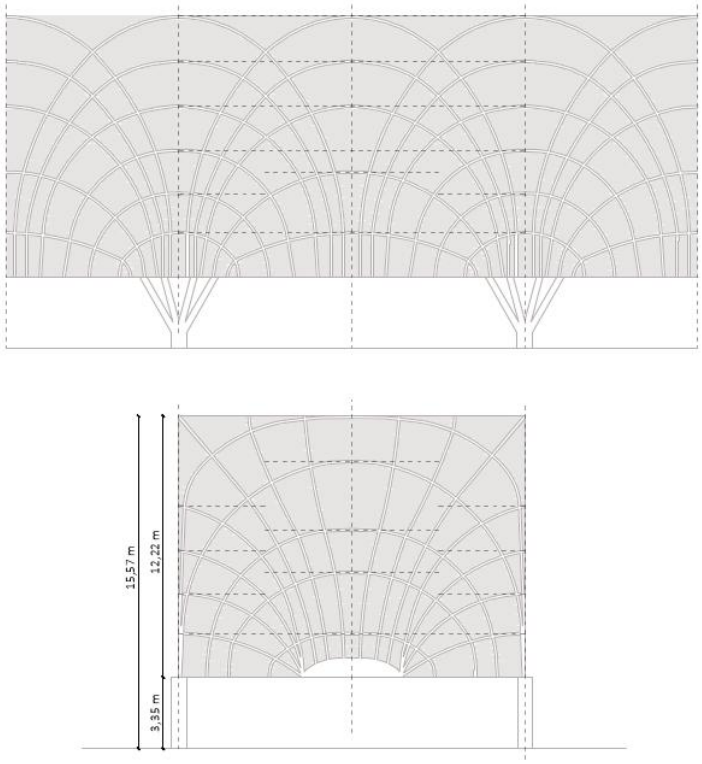
Il caso delle superfini verticali è sicuramente distante dal tema dei solai a linee isostatiche. Tuttavia è interessante analizzare il modo in cui la sperimentazione di un singolo modello sia progredita e si sia espansa ad altri sistemi, anche concettualmente più semplici ed intuitivi.

Il caso delle superfici verticali si configurano come un modello di lastra e cioè un elemento bidimensionale piano, caricato nel proprio piano. Le line isostatiche degli sforzi normali indicano le traiettorie lungo le quali sono presenti gli sforzi normali principali di trazione e compressione. Tali modelli sono descritti nel brevetto di Arcangeli come "travi parete e strutture portanti a due dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le linee isostatiche degli sforzi normali". Questo il testo:

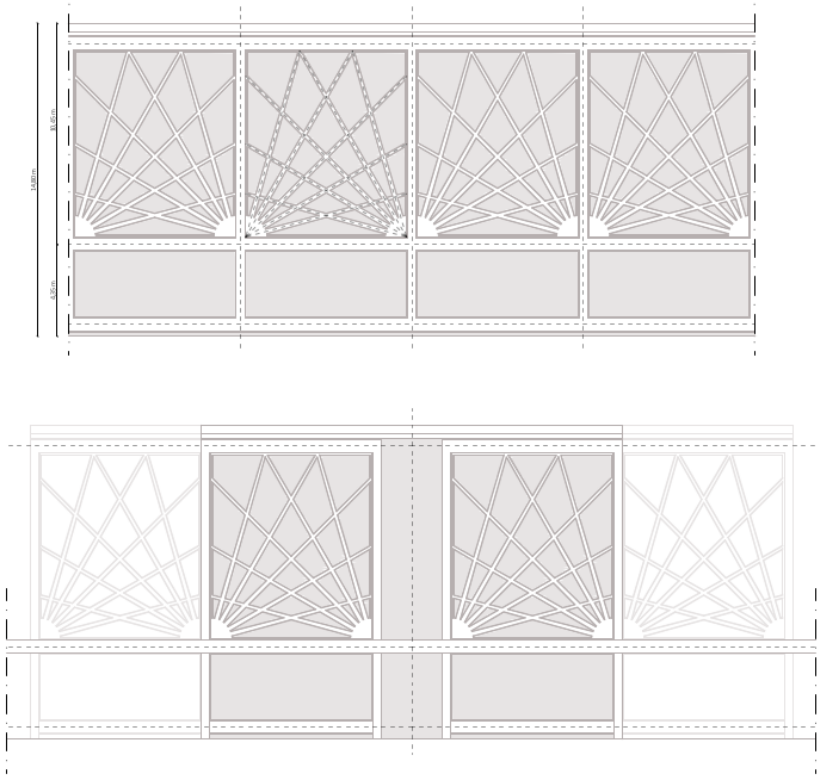
> *Perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o a tre dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le line isostatiche dei momenti o degli sforzi normali*

Il caso a cui si fa riferimento di seguito è il progetto per la *Chiesa del quartiere ANIC* a Ravenna. I disegni di studio sono conservati nell'Archivio Arcangeli[102], mentre i disegni di progetto definitivo sono custoditi negli archivi dello studio Nervi. I documenti di Arcangeli presentano due prospetti di un edificio a pianta rettangolare. Il profilo delle linee è ispirato all'andamento delle linee isostatiche su una lasta con carico distribuito appoggiata su vincoli puntuali. I disegni di progetto mostrano l'architettura compiuta di una chiesa a pianta cruciforme, di cui i pannelli nervati costituiscono i moduli. Le nervature acquisiscono spessore e perdono l'andamento curvilineo. In questo caso, come per i solai con le nervature a graticcio, è necessario analizzare il processo progettuale di questi disegni, piuttosto che soffermarsi sul semplice esito formale. Pur essendo il risultato finale distante dalla teoria delle linee isostatiche, resta chiaramente leggibile come una sua semplificazione coerente e consapevole.

[102] Archivio ARCANGELI, Roma
Fascicolo A 237
I documenti di archivio non fanno riferimento al progetto per la chiesa nel quartiere ANIC a Ravenna. Tuttavia è possibile associare i disegni per le analogie geometriche. Nonostante si tratti del disegno di un prospetto o più propriamente di una lastra, il fascicolo riporta nel titolo l'indicazione "Esposizione Parigi - Solai a Nervature Isostatiche e Varie - Prof. Ing. P.L. Nervi. Dicembre 1953 - Luglio 1954".



Disegni per il Progetto della chiesa per il quartiere ANIC, Ravenna



Progetto della chiesa per il quartiere ANIC, Ravenna

5 Alcune conclusioni

Dai dati finora emersi, la genesi dei solai a linee isostatiche appare strettamente connessa, da un lato, agli aspetti analitico-matematici sviluppati da Aldo Arcangeli e, dall'altro, agli aspetti costruttivi approfonditi da Pier Luigi Nervi. Tuttavia, la successiva traiettoria di sviluppo rivela una tendenza a privilegiare la dimensione formale, spesso a scapito della coerenza strutturale e dell'interesse tecnico-costruttivo.

Tale squilibrio è ulteriormente evidenziato dal rapporto asimmetrico tra la vasta produzione di elaborati grafici e l'esiguo numero di realizzazioni effettive. In altri termini, gran parte di questi progetti rimane confinata in una dimensione ideale, più che operativa, senza tradursi in opere reali capaci di esprimere pienamente gli aspetti strutturali, formali e costruttivi. Questa condizione, dunque, rivela la difficoltà di ricomporre in un esito reale l'unità teorica che la ricerca sulle linee isostatiche intendeva perseguire.

Inoltre, il lavoro di analisi condotto ha comportato inevitabili forzature metodologiche, includendo, sin dalle prime fasi, tipologie di solai che si discostano in modo significativo dall'impostazione originaria della ricerca sulle traiettorie dei momenti principali, concepita con finalità di ottimizzazione strutturale. Tali casi, e in particolare i solai a graticcio, sono stati tuttavia assunti come strumenti di indagine utili a esplorare le differenti declinazioni di uno stesso paradigma e le sue potenzialità sperimentali. Nonostante ciò, essi risultano, sotto il profilo sia formale sia strutturale, distanti dai principi fondativi propri dei solai a linee isostatiche.

Questo atteggiamento progettuale - caratteristico maggiormente delle opere mature tra gli anni '60 e '70 - si manifesta in alcuni esempi: la produzione di più configurazioni di solaio per un

medesimo progetto, indice di una ricerca prevalentemente figurativa; la realizzazione di controsoffitti "a linee isostatiche" che, per funzione e comportamento, si pongono in contraddizione con la teoria statica delle stesse linee, riducendone l'impianto a pura veste estetica.

A ciò si aggiunge la tendenza a concepire soluzioni di elevata complessità geometrica trascurando, in sede preliminare, la fattibilità esecutiva: si vedano, a titolo indicativo, il progetto per un *Centro sportivo* in Kuwait (1966-1969), quelli per il *Centro culturale* a Tripoli (1966-1968) e i solai realizzati per la *Torre del complesso MLC25* a Sydney (1971-1977). In tali casi, la sofisticazione formale non trova un corrispettivo nell'ottimizzazione del comportamento strutturale in relazione alle linee isostatiche.

Questi ultimi esempi, infine, aprono una questione più ampia relativa all'attività internazionale di Nervi negli anni Settanta: la trasposizione in contesti esteri di una grammatica strutturale nata in un orizzonte tecnico-culturale specifico sembra accentuare la tensione tra ambizione morfologica, requisiti prestazionali e vincoli esecutivi.

Nervi, d'altronde, aveva iniziato a trattare il tema della libertà formale, come allontanamento delle leggi naturali, già nel 1961[103]:

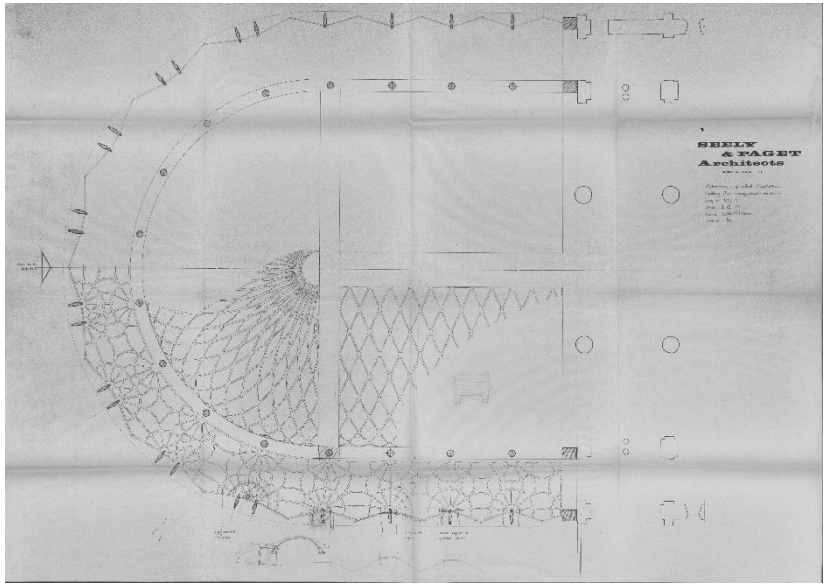
> *Questo stile di aderenza a leggi naturali sarà comune a tutta l'umanità e non potrà più cambiare se non attraverso una volontaria, o catastrofica, rinuncia al sempre più completo dominio della natura, meta costante degli sforzi dell'umanità dalla sua apparizione sulla terra.*
>
> *Né si deve pensare che tutto ciò porterà ad una insopportabile monotonia e all'annullamento della personalità dei singoli o dei popoli.*
>
> *Per stretti che siano i vincoli di uno stile, di una scuola o delle stesse leggi naturali, resta sempre un minimo di libertà nella definizione di particolari, di proporzioni o infine di decorazioni cromatiche, più che sufficienti a differenziare l'una realizzazione dalle sue consimili.*
>
> *Se queste osservazioni sono valide, noi assistiamo al più grandioso fenomeno che sia mai avvenuto nello sviluppo della cultura umana: la nascita di uno stile comune a tutta l'umanità, definito da capisaldi ancorati a legge di natura e che pertanto non potrà più subire involuzioni, ma solo evolversi in progressivo avvicinamento a verità immutabili.*

Tra i casi in cui sono state sviluppate più soluzioni progettuali per un medesimo edificio, si distingue quello relativo alla *Cattedrale di Portsmouth* (1964-1968), elaborato in collaborazione con lo studio Seely & Paget Architects. Per tale intervento, nel mese di ottobre del 1965, viene presentato un primo progetto, accompagnato da alcune varianti alternative; a questa proposta, Seely & Paget rispondono nel dicembre dello stesso anno con un'ulteriore versione.[104]

[103] Nervi P.L., *Uno stile comune per l'architettura*, in Civiltà delle Macchine, numero straordinario, ottobre 1961.
La traduzione di questo testo si trova in Nervi P.L., *Vers un style de vérité?*, in *Architecture, formes + fonctions 1961-62*, p.45. L'unica distinzione tra i due testi è relativa a agli attributi della "rinuncia al dominio della natura. Se in Civiltà delle Macchine è "volontaria o castrastrofica" in *Architecture, formes + fonctions* è "volontaire et catastrophique"

[104] MAXXI - PLN P56.4.

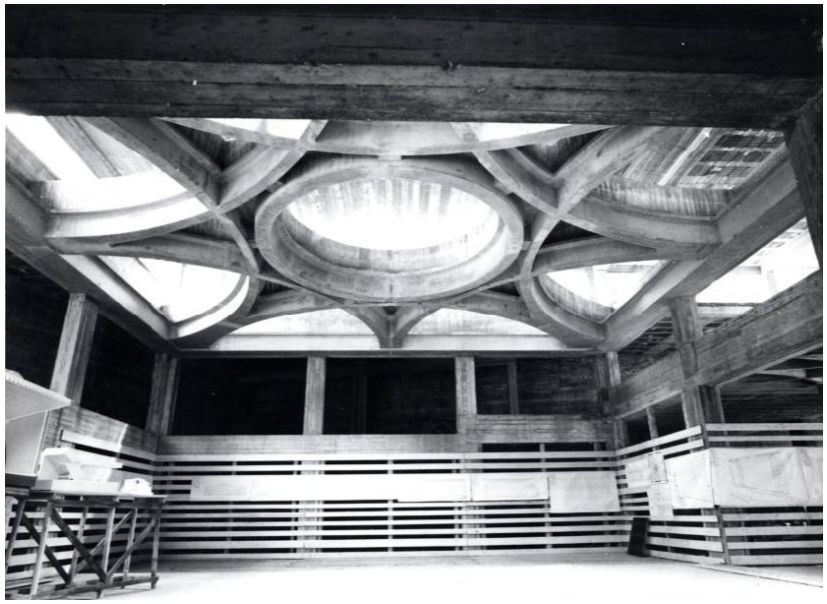
Sebbene la pratica di proporre più ipotesi progettuali rientri nella consuetudine del processo architettonico, essa risulta concettualmente inappropriata nel caso di un progetto fondato sull'analisi delle traiettorie delle linee isostatiche dei momenti flettenti e quindi su un principio univoco di funzionamento strutturale. In un tale contesto, infatti, la soluzione dovrebbe configurarsi come unica, poiché derivata da una specifica logica di ottimizzazione statica e di razionalizzazione costruttiva.



Proposta di Seely & Paget Architects

L'esempio della Cattedrale di Portsmouth rende così esplicito l'atteggiamento maturato negli anni '70 da Pier Luigi Nervi e dallo Studio Nervi nei confronti di questi solai: questi vengono impiegati per conferire valore aggiunto formale e commerciale alle proposte architettoniche, più che per perseguire rigorosamente la coerenza del modello teorico matematico-costruttivo.

Tra i casi in cui le linee isostatiche perdono progressivamente il loro carattere strutturale, si colloca anche l'esempio emblematico dei controsoffitti della *Sala delle Udienze Pontificie* in Vaticano (1963-1971). In questo complesso, le coperture sono articolate in tre sistemi: quello della tribuna papale, dell'ingresso e delle udienze particolari. Questi condividono la stessa logica: la dematerializzazione del solaio e la conseguente perdita della sua corporeità costruttiva, a vantaggio di una valenza puramente espressiva e formale.



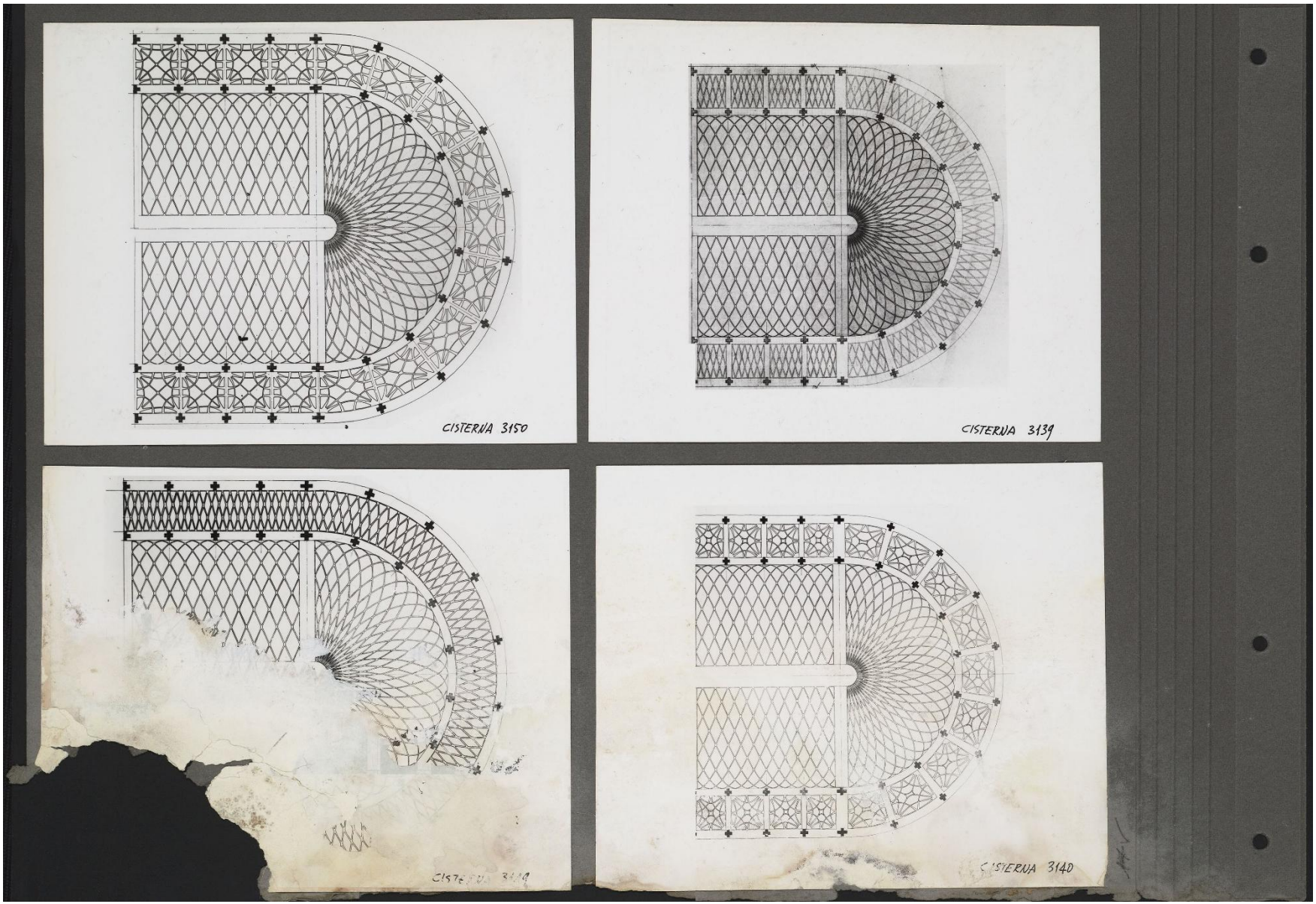
Sala per le udienze particolari



Tribuna papale



Ingresso



Soluzioni alternative per il progetto per la Cattedrale di Portmouth

5.1 Rassegna delle opere

La rassegna delle opere, sintetizzata nelle appendici *Cronologia delle opere*[105] e *Schede delle opere*, ha l'obiettivo di raccogliere e sistematizzare i dati relativi ai progetti che possono essere considerati esempi di "solai a linee cosiddette isostatiche", realizzati o progettati da Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli. La selezione qui presentata comprende non solo opere effettivamente realizzate, ma anche disegni associabili a linee isostatiche, progetti di solai a linee cosiddette isostatiche, solai non convenzionali e strutture che non si configurano come superfici orizzontali.

I progetti sono stati selezionati in questa rassegna tramite le caratteristiche descritte nel capitolo precedente. Infatti, come indicato nella *Cronologia delle opere* (ivi, parte 2, p.200), ogni progetto è stato ricondotto a una delle seguenti categorie: linee isostatiche a fungo su maglia quadrata; linee isostatiche su altre forme; linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie; linee su altre superfici piane orizzontali e verticali.

Cronologia delle opere

La *Cronologia delle opere* offre una visione d'insieme chiara e immediata sull'evoluzione dei progetti nel tempo, evidenziando come alcune opere siano state influenzate da altre a loro contemporanee. Dall'analisi della tabella emerge, ad esempio, una pausa tra il 1952 e il 1957, interrotta solo dal caso isolato del progetto per la *Stazione centrale* di Napoli del 1954, dei progetti legati ai solai a linee isostatiche. Tale interruzione permette di individuare un primo nucleo di cinque progetti (dal *Lanificio Gatti* al *Palazzo UNESCO*) e otto disegni, che per la loro concentrazione temporale - tra il 1949 e il 1952 - possono essere considerati come delle esperienze pilota, delle vere e proprie sperimentazioni.

Un aspetto particolarmente significativo di questa fase è la varietà delle soluzioni esplorate in un arco di tempo molto ristretto. In questi primi anni vengono infatti messi alla prova diversi tipi di solai: a fungo su maglia quadrata (*Lanificio Gatti* e *Manifattura tabacchi* di Roma), a graticcio (*Manifattura tabacchi* di Bologna e il *solaio sperimentale* del Laboratorio alla Magliana), nonché solai su altre forme (rettangolare per la *Manifattura tabacchi* di Bologna e trapezoidale per l'ingresso nord del Segretariato del *Palazzo UNESCO*). L'unica tipologia non affrontata in questa fase iniziale è quella legata a configurazioni più complesse o alternative, come controsoffitti o superfici verticali.

Se le prime opere sono da considerarsi delle esperienze pilota, bisogna anche riconoscere l'atteggiamento di aderenza alle prerogative iniziali. Al contrario, nelle opere più mature c'è un complessivo allontanamento dalla logica statica e dall'ottimizzazione costruttiva, fino a culminare, come si è visto, in un virtuosismo prevalentemente decorativo della *Sala per le udienze pontificie* in Vaticano.

Per ordinare il materiale, la *Cronologia delle opere* associa a ogni disegno un numero identificativo e ne associa più di uno se per lo stesso progetto sono stati realizzati più solai o più progetti di diversa tipologia per lo stesso solaio[106].

[105] Per la datazione è stata usata quella proposta da "Carlo Olmo e Cristiana Chiorino (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Architettura come sfida*, Cinisello Balsamo 2010". Per le opere non presenti, è stata usata quella proposta dall'archivio MAXXI e dall'archivio ARCANGELI.

[106] La cronologia inizia dal disegno 0 perché non si tratta di un progetto. Il disegno 0 è legato al Brevetto di Arcangeli
Brevetto IT 455678.

I disegni sono i seguenti, indicando con il testo sottolineato quelli realizzati:

0 Disegno di Arcangeli. Brevetto

1 Lanificio Gatti, Roma (Disegno A. Arcangeli, mod. Lanificio Gatti)

2 Lanificio Gatti, Roma (Progetto realizzato)

3 progetto per la Manifattura tabacchi, Roma. Fabbricato lavorazione

4 Laboratorio sperimentale alla Magliana, Roma

5 Manifattura tabacchi, Bologna. Magazzino Ballette (variante non realizzata a linee isostatiche)

6 Manifattura tabacchi, Bologna. Magazzino Ballette (variante realizzata a linee ortogonali)

7 Palazzo UNESCO, Parigi. Sale per l'editoria e le pubblicazioni (progetto preliminare non realizzato)

8 Palazzo UNESCO, Parigi. Ingresso nord Segretariato

9 Progetto per la Stazione centrale di Napoli, Napoli

10 Progetto per la nuova sede La Rinascente, Roma

11 Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Borgo Panigale (BO)

12 Palazzo dello sport, Roma. Piano della galleria

13 Palazzo del lavoro, Torino. Piano principale

14 Palazzo del lavoro, Torino. Piano mezzanino

15 Progetto per la Fiera internazionale di Genova, Genova. Padiglione fieristico e palazzo dello sport

16 Cartiera di Burgo, Mantova

17 Progetto della Chiesa per il quartiere ANIC, Ravenna (Disegno A. Arcangeli, mod. Ravenna)

18 Progetto della Chiesa per il quartiere ANIC, Ravenna

19 Autogrill Motta autostrada Limena-Padova, Padova (soluzione girevole non realizzata)

20 Autogrill Motta autostrada Limena-Padova, Padova. Copertura dei corpi Bassi (soluzione a ponte realizzata)

21 Progetto per la Fiera di Catania. Edificio a utilizzazione multiple, Catania. Piano mezzanino

22 Edificio per i servizi monetari della Banca d'Italia in via Tuscolana, Roma

23 Progetto Cattedrale dedicata alla Gran Madre di Dio, Taranto

24 Grattacielo Australia Square, Sydney

"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 line isostatiche dei momenti o degli sforzi normali" (Roma, Luglio 23, 1949 by Nervi & Bartoli. Inventore: Aldo Arcangeli).
Nei casi dei progetti per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth e per il Museo e centro studi antropologici Pitt Rivers di Oxford sono indicati i valori "x6" e "x2". Questa indicazione specifica il numero di varianti - rispettivamente quattro e due - della stessa tipologia. In particolar modo per la Cattedrale di Portsmouth sono state realizzate quattro varianti dello stesso solaio, mentre per il Museo e centro studi antropologici Pitt Rivers sono stati disegnati solai dello stesso tipo per piani diversi.

25 Sala per le udienza in Vaticano. Tribuna papale

26 Sala per le udienza in Vaticano. Ingresso

27 Sala per le udienza in Vaticano. Sala per le udienze particolari

28 Sede della Cassa di risparmio, Venezia (progetto preliminare non realizzato a linee ortogonali)

29 Sede della Cassa di risparmio, Venezia (progetto realizzato a linee isostatiche)

30 Progetto per Enrico Fermi memorial, Chicago

31 Progetto per Auditorium Maximum della Ruhr Universitaet, Bochum

32 Progetti per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth, Portsmouth (x6)

33 Cultural and Convention Center, Norfolk, Virginia

34 Progetto per il Museo e centro studi antropologici Pitt Rivers, Oxford (x2)

35 Progetto per il Centro culturale, Tripoli. Sala espositiva

36 Progetto per il Centro culturale, Tripoli. Ingresso

37 Chiesa di San Pietro, Trissino (VI)

38 Progetto per il Centro sportivo, Kuwait. Zona di pratica sportiva

39 Good Hope centre, Cape Town. (progetto non realizzato)

40 Good Hope centre, Cape Town. (progetto realizzato)

41 Stazione ferroviaria di Vaglio Lise, Cosenza. Stazione

42 Stazione ferroviaria di Vaglio Lise, Cosenza. Cappella

43 Torre del centro MLC25, Sydney. Ingresso del teatro

44 Torre del centro MLC25, Sydney. Ingresso della torre

45 Sede BAD (African Development Bank), Abidjan. Ingresso

46 Progetto per Nunziatura apostolica, Abidjan

47 Cappella presidenziale di Félix Houphouet-Boigny, Yamoussoukro

48 Filiale di Banca d'Italia, Cosenza. Salone

PARTE SECONDA

1 Analisi del rapporto tra forma, costruzione e struttura.

Lo studio sviluppato nella prima parte di questo lavoro raccoglie e organizza quanto già noto sul tema dei solai a linee isostatiche, ordinando materiali e documenti con l'obiettivo di chiarirne la complessità.

I solai a linee isostatiche rappresentano un modello complesso, interpretato di volta in volta in una formulazione diversa. È possibile tentare di classificare le opere realizzate secondo alcuni parametri, ma non è possibile delineare categorie definite che restituiscano tutti gli aspetti del progetto. Gli aspetti indagati fino ad ora sono legati ad istanze differenti: matematico-strutturali, costruttive e formali.

Se le istanze matematico-analitiche e costruttive costituiscono il centro ideativo di questo modello, al quale si aggiunge in un momento immediatamente successivo l'istanza formale, non è chiaro come queste istanze si sovrappongano e dialoghino tra loro nel processo progettuale.

In questo quadro complesso, la seconda parte dello studio si propone di approfondire la genesi di questi solai, analizzando in parallelo il rapporto tra forma, struttura e costruzione.

Questo metodo è, senza dubbio, il solo in grado di restituire una visione completa non solamente sull'approccio progettuale di questi solai, ma anche del processo progettuale di Pier Luigi Nervi nel suo complesso. Come già sottolineato, uno degli obiettivi di questo lavoro è proporre una metodologia di analisi applicabile all'intera produzione dello Studio Nervi.

L'analisi strutturale restituisce un modello che trae origine da rigorose teorie matematiche legate allo studio delle superfici caricate - nel piano e fuori dal piano - ossia piastre e lastre. Si tratta di individuare traiettorie lungo le quali certi sforzi vengono

minimizzati o esclusi, ottenendo così un'ottimizzazione del comportamento statico. Le prime realizzazioni di solai a linee isostatiche mirano chiaramente all'applicazione di questi principi teorici, tuttavia, nelle opere del periodo più maturo, emerge un progressivo distacco dalle motivazioni strutturali, a favore di una maggiore autonomia dell'istanza formale.

Dall'analisi storico-costruttiva emerge un modello progettuale che si è sviluppato e consolidato nel tempo, a partire dagli anni Cinquanta, fino a diventare un archetipo nella produzione dello Studio Nervi.

Tuttavia, sebbene questo modello nasca dall'intento di tradurre in costruzione concreta le linee isostatiche - potenzialmente infinite nella loro formulazione teorica - fin da subito emergono i limiti imposti dalla realtà costruttiva. In altri termini, si evidenzia immediatamente una frattura tra la purezza del modello teorico e la sua effettiva realizzabilità, che ne segna una sorta di fallimento originario. Questa tensione tra ideale matematico e prassi costruttiva costituisce uno degli aspetti più significativi del processo.

Dal punto di vista formale il panorama dei disegni è estremamente ricco e variegato, ma non sempre chiarisce il reale approccio progettuale o le soluzioni costruttive adottate. La successione cronologica delle opere non riflette un'evoluzione lineare delle forme: si alternano modelli più o meno complessi, appartenenti a famiglie geometriche differenti, che rispondono tanto a esigenze funzionali quanto a scelte espressive di carattere plastico-artistico. I solai si presentano con forme, densità, direzioni e sezioni estremamente eterogenee. Talvolta le curve si inscrivono in griglie ortogonali regolari, in altri casi seguono geometrie complesse o apparentemente irregolari. In alcune opere, l'origine strutturale delle nervature appare evidente; in altre, queste diventano puri elementi decorativi, suggerendo un uso più simbolico che funzionale del linguaggio statico.

Di fronte a questa varietà, si è tentato di effettuare un'analisi che riuscisse a tenere contemporaneamente le fila di tutti gli aspetti del progetto.

Il panorama delle opere realizzate secondo questo modello è molto vasto, tuttavia alcuni progetti si prestano ad approfondimenti volti a comprendere il modo in cui le istanze proprie del progetto convergono nella definizione di una soluzione esteticamente valida, staticamente corretta e realizzabile dal punto di vista costruttivo.

1.1 Parametri e ipotesi

L'obiettivo della nostra indagine è mettere a confronto i risultati ottenuti dall'analisi di diversi casi studio, al fine di individuare elementi ricorrenti nell'approccio progettuale e realizzativo.

Per garantire un confronto il più possibile obiettivo, sono stati selezionati quattro parametri di riferimento, scelti in modo da rendere i progetti tra loro comparabili e da restituire un quadro chiaro delle possibilità progettuali esplorate dallo studio Nervi.

I parametri sono:

- Il solaio ha una funzione di copertura di uno spazio.
  Questa funzione di copertura garantisce la finalità strutturale di un elemento piano e pieno, cioè di un elemento piastra;
- Andamento delle nervature paragonabile a linee isostatiche.
  Questo parametro permette di considerare solo quei progetti che sono effettivamente derivanti dal brevetto di Aldo Arcangeli, escludendo quelli che ne sono solo associabili;
- Progetti realizzati.
  La realizzazione di un progetto garantisce lo studio dell'intento costruttivo;
- Progetti realizzati con la firma di Pier Luigi Nervi.
  La firma di Pier Luigi Nervi garantisce la transdisciplinarietà dell'approccio progettuale, cioè l'attenzione agli aspetti costruttivi, strutturali e formali.

Sulla base di questi parametri sono stati selezionati sei casi studio, ossia gli unici che li contemplano tutti. Per questo motivo, i casi studio possono essere considerati significativi e rappresentativi al tempo stesso: ciascuno esemplifica in modo efficace il metodo progettuale e costruttivo, riflettendone le diverse declinazioni.

Nonostante i parametri selezionati restringano a sei il numero di casi studio analizzabili, l'ipotesi è che questo studio restituisca una variabilità e una ricchezza del processo progettuale e costruttivo difficile da mettere a sistema. Cioè che alla fine sia difficile stabilire un vero e proprio confronto tra i progetti, dovendo confermare che ogni progetto è a sé e l'unico aspetto che davvero li accomuna è il fatto che rispondano ad esigenze specifiche del progetto stesso. Alla fine - si può concludere - ne risulta un irriducibile atteggiamento artigianale che rende il prodotto finale come unico.

Inoltre, sebbene la selezione dei parametri adottati abbia portato a restringere il campo d'indagine a soli sei casi studio, l'ipotesi alla base di questa ricerca è che tali esempi restituiscano una notevole variabilità nelle modalità progettuali e costruttive impiegate, tanto da rendere complessa - se non impossibile - una sistematizzazione rigorosa e univoca del processo. In altri termini, pur all'interno di una cornice metodologica coerente, l'ipotesi è che dall'analisi comparativa emerga la profonda eterogeneità delle soluzioni adottate, ciascuna frutto di esigenze contestuali specifiche e di scelte progettuali calibrate in modo puntuale e irripetibile.

1.2 Metodo

Il metodo da noi utilizzato consiste nel descrivere gli aspetti formali e costruttivi e valutarne l'aderenza alla capacità strutturale tramite un'analisi qualitativa e quantitativa. L'obiettivo di questa analisi è effettuare un confronto tra le linee isostatiche dei momenti e le nervature realizzate nei progetti presi in esame, tramite un'analisi visiva e - in alcuni casi - tramite la misurazione dello

scarto dei momenti torcenti. Per effettuare questa analisi sono stati usati procedimenti simili tramite l'uso dei software Grasshopper 3D e Karamba3D.

1.3 Casi studio

I casi studio sono stati selezionati poiché rispettando tutti i parametri. Per questo motivo presentano delle caratteristiche comuni che rendono possibile un'analisi comparata.

I casi studio selezionati sono i seguenti:

- Lanificio Gatti, Roma
- Palazzo UNESCO, Parigi. Ingresso nord Segretariato
- Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Borgo Panigale (BO)
- Palazzo dello sport, Roma. Piano della galleria
- Palazzo del lavoro, Torino. Piano mezzanino
- Sede della Cassa di risparmio, Venezia

I casi studio analizzati non presentano analogie dal punto di vista geometrico. Si tratta infatti di solai molto differenti: alcuni su singola campata, come nel caso del *Palazzo UNESCO*, della *Chiesa di Borgo Panigale* e della *Sede della Cassa di Risparmio*; altri disposti in serie in una sola direzione, come nel *Palazzo dello sport* e nel *Palazzo del lavoro*; altri ancora in serie in due direzioni, come nel *Lanificio Gatti*. Questa differente distribuzione influisce direttamente sul rapporto con i supporti e con i vincoli strutturali, richiedendo considerazioni specifiche in ciascun caso.

Anche dal punto di vista strutturale, i casi studio si distinguono nettamente. Pur trattandosi sempre di solai, variano notevolmente per dimensioni delle luci - dai 5 metri del *Lanificio Gatti* fino ai 24 metri della Sede della *Cassa di Risparmio* - e per la natura dei carichi. Si passa, ad esempio, dalla pensilina del *Palazzo UNESCO*, che ha una funzione puramente protettiva e copre un piccolo spazio all'aperto, al solaio della *Cassa di Risparmio*, su cui grava l'intero peso dell'edificio.

I parametri legati alla geometria, ai vincoli, ai carichi e alla capacità strutturale influenzano in modo determinante l'andamento delle linee isostatiche. Per questo motivo, l'inclusione di casi studio differenti rispetto a questi aspetti, consente di osservare come la metodologia progettuale si adatti a condizioni diverse, offrendo così uno sguardo più ampio e articolato sulle scelte operate in fase di progetto.

Un ultimo elemento di rilievo riguarda l'aspetto cronologico. I casi studio presi in esame, con l'unica eccezione del progetto di Venezia, non sono distribuiti in maniera equilibrata lungo tutto l'arco temporale dell'esperienza legata ai solai a linee isostatiche dal 1949 al 1979. I progetti si concentrano esclusivamente nel primo decennio di attività. Questa concentrazione riflette un momento preciso della produzione dello studio Nervi, riconducibile alla fase iniziale di sperimentazione e messa a punto del modello. Dunque il dato cronologico suggerisce che i progetti sviluppati negli anni successivi mostrano un progressivo allontanamento da queste prime modalità operative. L'evoluzione è tale da rendere difficile un confronto diretto tra le opere della fase iniziale e quelle della maturità progettuale, poiché i presupposti teorici, le finalità progettuali e le condizioni operative risultano profondamente mutati.

In questo lavoro verranno trattati quattro dei sei casi studio: Lanificio Gatti, palazzo UNESCO, Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Sede della Cassa di risparmio.

1.3.1 Lanificio Gatti, Roma

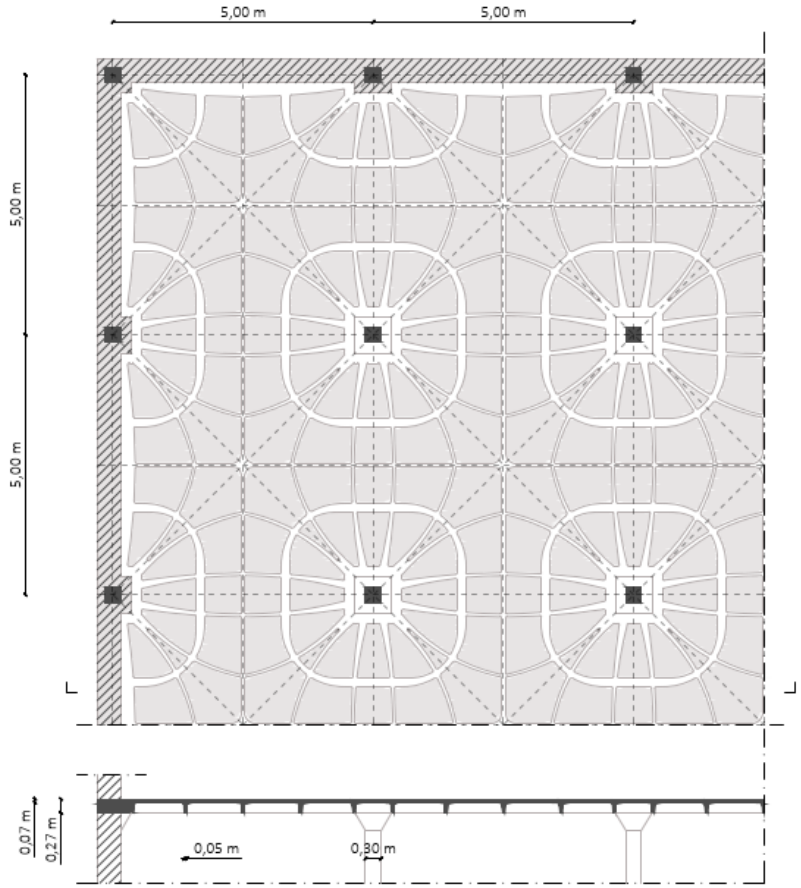
Valutazione formale e costruttiva del solaio del Lanificio Gatti a Roma

Il Lanificio Gatti è costruito a Roma nel 1951 su progetto di Carlo Cestelli Guidi che coinvolge Pier Luigi Nervi, offrendogli l'opportunità di sperimentare nuove soluzioni sia sotto il profilo progettuale che tecnico-esecutivo nell'ambito romano nel dopoguerra.



Lanificio Gatti. Piano principale

L'edificio si articola su due livelli: un piano terra esteso sull'intera superficie e un piano interrato parzialmente sviluppato. Mentre il piano terra è coperto da una raffinata struttura a shed - esito della sinergia progettuale tra Cestelli Guidi e Nervi - è il solaio del piano interrato a costituire la prima sperimentazione delle linee isostatiche, legata sia alla progettazione che alla realizzazione.



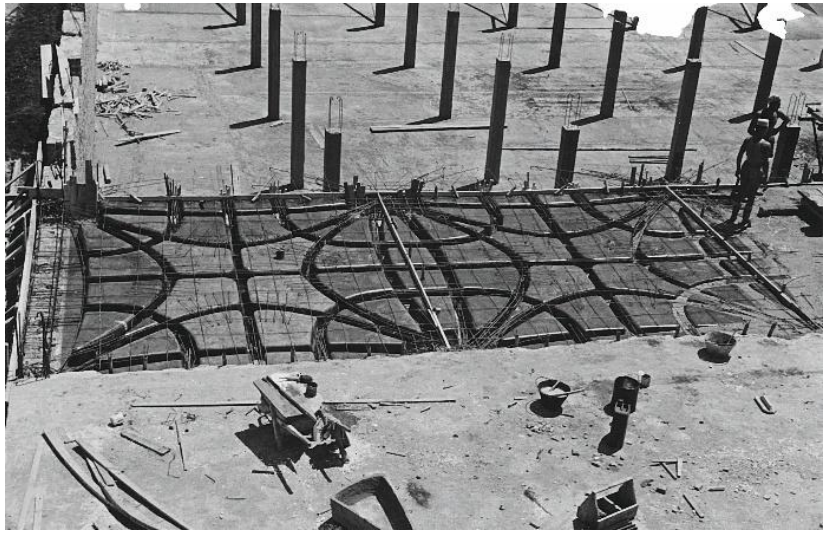
Solaio a linee isostatiche del Lanificio Gatti



Lanificio Gatti. Piano interrato

Il solaio del piano interrato si basa su una maglia strutturale ortogonale regolare di 5×5 metri, articolata in 6×15 campate, sostenute da pilastri a fungo in calcestruzzo armato, dotati di capitelli prefabbricati a sezione tronco-piramidale. La realizzazione di questo sistema strutturale avviene mediante l'impiego di casseri in ferrocemento montati su ponteggi mobili, una tecnica già sperimentata in precedenza per il solaio del *Magazzino Ballette* della *Manifattura tabacchi* di Bologna.

Due tipologie di casseforme vengono utilizzate: la "Forma A", di forma quadrata con lati curvilinei, destinata alle porzioni centrali delle campate, e la "Forma B", di forma rettangolare, impiegata tra i pilastri per raccordare le nervature ai capitelli prefabbricati. La complessità esecutiva di tale sistema rende l'esperimento non replicabile nei progetti successivi di Nervi, configurando così il Lanificio Gatti come un unicum nella sua produzione.



Cantiere del solaio a linee isostatiche

Nervi descrive il progetto in questo modo[107]:

> *L'avere messo a punto tale procedimento costruttivo[108] mi ha poi permesso di rendere realizzabile una proposta dell' Ing. Aldo Arcangeli addetto all'ufficio tecnico della Soc. Ingg. Nervi e Bartoli, quella cioè di disporre le nervature di un solaio secondo le isostatiche dei momenti principali esistenti nell'interno di un sistema sollecitato da forze.*

[107] Nervi P.L., *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Milano 1955.

[108] Nervi fa riferimento alla costruzione tramite cassaformi in ferrocemento messa a punto nella realizzazione del solaio del Magazzino Ballette nella Manifattura tabacchi di Bologna, avvenuta l'anno precedente.

Tali linee sono qualcosa di assoluto, dipendente esclusivamente dal giuoco di forze in atto.

Il meraviglioso è che così facendo, e limitando il nostro compito a quello di modesti Interpreti di realtà fisiche, veniamo a scoprire armonie di forme, impreviste e quanto mai espressive.

Le nervature di un solaio disposte lungo le isostatiche dei momenti acquistano un andamento curvilineo di grande efficacia; più espressive ancora sono quelle di un solaio di tipo a fungo, ossia portato da pilastri disposti ad interassi uguali.

La realizzazione di solai di questo tipo per il lanificio Gatti in Roma ha confermato in modo completo l'esattezza delle previsioni teoriche e l'efficienza del procedimento.

Con elementi prefabbricati in ferro-cemento si potrebbe poi agevolmente passare a strutture resistenti per forma con nervature disposte lungo le isostatiche delle tensioni principali; si aprono campi di illimitate possibilità statiche ed architettoniche.

Contrariamente però a quanto affermato da Pier Luigi Nervi nella sua descrizione, la realizzazione del solaio del Lanificio Gatti non corrisponde a un sistema strutturale "a fungo" in senso stretto, ovvero con appoggio puntuale al centro della campata. L'analisi delle fotografie di cantiere evidenzia chiaramente che il getto del solaio avviene tra quattro pilastri, configurando di fatto una situazione strutturale completamente diversa.

[109] ARCHIVIO CSAC – Gatti.

Sebbene il risultato formale risulti assimilabile a una soluzione a fungo - per via della maglia quadrata e della trama delle nervature convergenti verso un centro campata virtuale - dal punto di vista strutturale le differenze sono sostanziali. Nel caso del solaio effettivamente a fungo, i momenti flettenti massimi si concentrano in corrispondenza del supporto centrale, mentre nella configurazione adottata nel Lanificio Gatti, tali sollecitazioni si manifestano in mezzeria tra i pilastri. Questa inversione comporta anche una diversa distribuzione delle armature, con implicazioni significative sia sul dimensionamento che sulla concezione del comportamento statico dell'intera struttura.

Pertanto, sebbene la morfologia della nervatura tende a restituire un'immagine coerente con il modello a fungo, il comportamento strutturale reale è quello di un solaio continuo tra campate, realizzato mediante l'impiego di un ponteggio mobile. Questa discrepanza tra intenzione progettuale e realizzazione costruttiva mette in luce una tensione tra forma e struttura.

Il carattere ambiguo del solaio del Lanificio Gatti trova ulteriore conferma nell'analisi delle tavole di progetto redatte dallo studio Nervi & Bartoli, in particolare nei disegni di dettaglio del solaio. Questi elaborati grafici forniscono indicazioni preziose sia dal punto di vista cronologico che metodologico. Dal punto di vista cronologico, si osserva una trasformazione nella terminologia utilizzata nei cartigli delle tavole[109]. Inizialmente, i disegni del 13 febbraio e del 6 marzo 1951 si riferiscono esplicitamente al solaio come "Solaio a fungo con nerv[ature]. Isost[atiche]."[110] e "Solaio a fungo isostatico". Tuttavia, nelle tavole successive, datate 17 marzo

[110] La tavola del 13 febbraio 1951 "Opificio Gatti. Solaio a fungo con nerv. isost." Contiene appunti e schizzi a mano prodotti molto probabilmente da Aldo Arcangeli. Si riconosce, infatti, la scrittura.

e 11 aprile 1951, la dicitura si modifica in "Armatura solaio isostatico", omettendo qualsiasi riferimento al sistema "a fungo". Questa variazione lessicale, se letta in relazione alla tempistica della progettazione, suggerisce una possibile revisione dell'interpretazione strutturale del solaio, indicando che, almeno in fase esecutiva, si sia abbandonata l'idea originaria di una struttura "a fungo", privilegiando invece una soluzione basata su appoggi puntuali perimetrali.

Ulteriori conferme si rinvengono nella tavola 36 dell'11 aprile 1951, contenente il dettaglio dell'armatura del solaio. In questo elaborato si può cogliere un elemento particolarmente significativo: dall'analisi delle sezioni trasversali longitudinali delle travi C e D (travi tra i pilastri) si nota che l'armatura superiore è concentrata in prossimità del pilastro, mentre l'armatura inferiore è continua lungo la trave con l'intensificazione del numero di barre nella mezzeria. Questa distribuzione è compatibile con un comportamento da trave appoggiata su pilastri con vincolo di semi-incastro, escludendo il comportamento a fungo. In questa tavola possono essere individuati alcuni dettagli preziosi per la lettura di quest'opera. In primo luogo, la rappresentazione riguarda esclusivamente un quarto della campata, trattato come modulo rappresentativo dell'intero solaio. In secondo luogo, l'assenza di un'armatura a torsione sistematica è indicativa di una precisa scelta progettuale: sono infatti presenti solo cinque staffe da 6 mm nella zona più distante dal pilastro lungo la trave C. Questa configurazione suggerisce che Nervi e Arcangeli hanno concepito le nervature seguendo effettivamente l'andamento delle linee isostatiche dei momenti flettenti, escludendo deliberatamente la componente torcente.

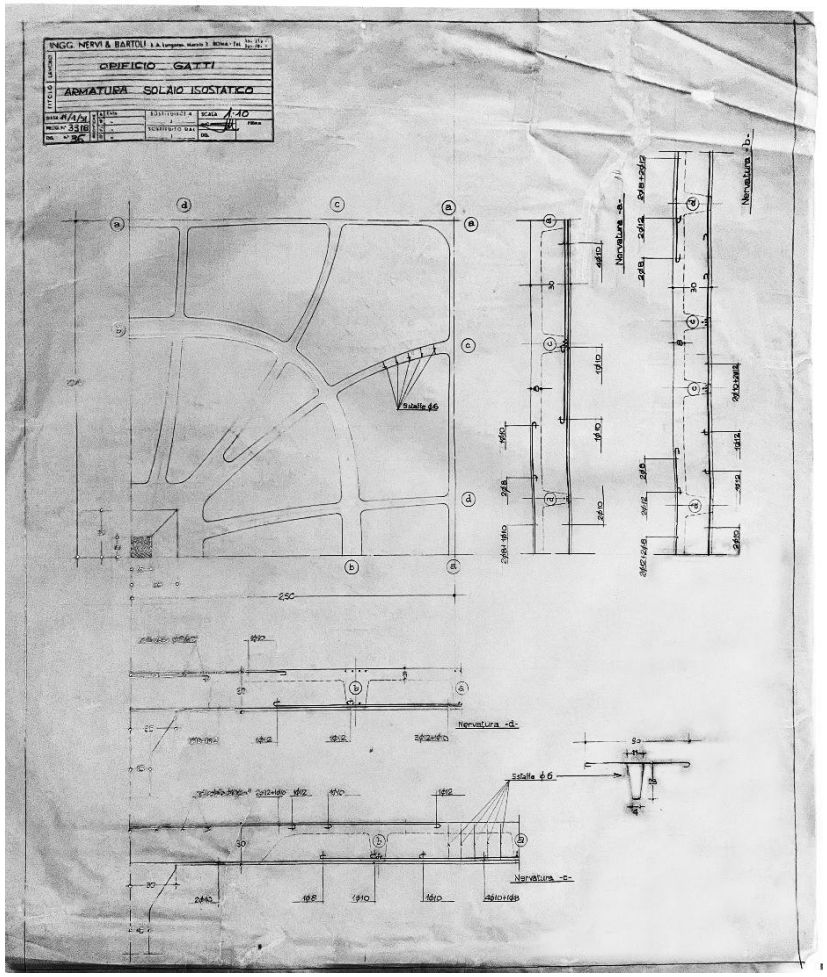


Tavola delle armature longitudinali

In una prima conclusione, l'approccio progettuale relativo al Lanificio Gatti denuncia in primo luogo il carattere sperimentale di questo progetto. È chiaro che la distanza tra il modello descritto e quello realizzato è il sintomo di un prodotto che, benché realizzato, non ha avuto sin dal primo momento un indirizzo chiaro e che,

quindi, è frutto dell'adattamento progressivo, reciproco e iterativo delle capacità costruttive sulla forma e sulla funzione strutturale.

Valutazione statica

Alla luce della discrepanza tra la descrizione formale fornita da Nervi e il comportamento strutturale effettivamente osservabile nel solaio del Lanificio Gatti, è stata condotta una serie di analisi con l'obiettivo di chiarire quale modello analitico sia stato effettivamente preso in considerazione nella fase ideativa del progetto. La questione centrale attorno a cui ruota questa indagine è la seguente: al di là della descrizione, questo solaio è stato concepito come un sistema "a fungo", con vincolo puntuale centrale, oppure come un solaio continuo su quattro appoggi angolari? Dare una risposta a queste domande è indispensabile perché ci aiuta a capire se Nervi ha tradito le prerogative di onestà strutturale nella descrizione del solaio, esponendo un modello che non era stato preso in considerazione, oppure nella costruzione, realizzando un modello diverso da quanto descritto.

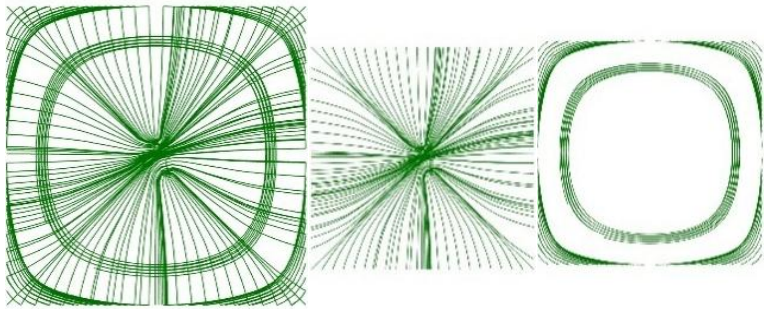
Per semplificare il confronto tra le due ipotesi strutturali, tutte le analisi hanno considerato un singolo modulo della maglia strutturale, trascurando volutamente gli effetti di bordo e le condizioni di continuità con i campi adiacenti, trattandosi comunque di una maglia regolare e sufficientemente estesa da rendere plausibile l'approccio locale.

La prima analisi svolta, di tipo qualitativo e basata su modelli semplificati, è finalizzata alla comparazione delle linee isostatiche dei momenti flettenti nei due scenari ipotizzati. In entrambe le configurazioni, il sistema è stato modellato come una piastra quadrata piena, di lato pari a 5 metri e spessore 20 cm. Per la definizione della mesh sono stati identificati alcuni punti notevoli dell'elemento: la posizione dei pilastri (centrale e agli angoli) e la discretizzazione del bordo in 21 segmenti di pari lunghezza per ogni lato. Per l'analisi è stato attribuito alla mesh un materiale isotropo omogeneo pari a C25/30, il carico proprio e sono stati definiti i vincoli nella posizione puntuale dei pilastri.

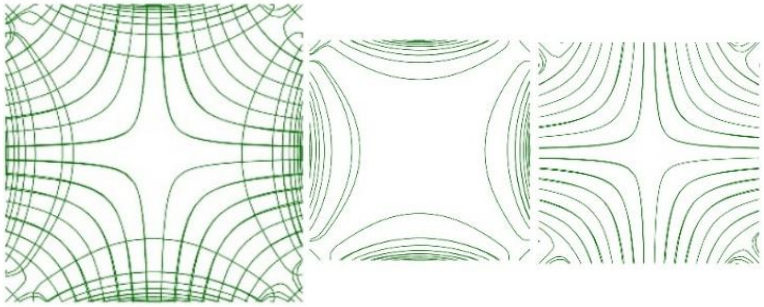
Dall'elaborazione dei due modelli sono state estratte le linee isostatiche dei momenti flettenti principali in entrambe le direzioni ortogonali.

Dall'osservazione del primo caso (con vincolo centrale) ne risulta che le line isostatiche che dipartono dal centro tendono ad essere ortogonali con il bordo: questa tendenza varia tra le linee diagonali che sono a 45 gradi e le linee di mezzeria che sono perfettamente ortogonali. Le linee isostatiche che assumono andamento concentrico rispetto al centro mostrano una morfologia intermedia tra una geometria perfettamente circolare - tipica di una piastra circolare con vincolo centrale - e una configurazione quadrilatera, effetto diretto della forma geometrica del solaio. È importante precisare che l'addensamento visivo delle linee concentriche verso i bordi è riconducibile alle modalità di visualizzazione adottate dal software di calcolo. In particolare, le linee sono generate a partire da nodi selezionati lungo il bordo, con l'aggiunta di un punto intermedio tra il vincolo centrale e il bordo stesso, influenzando così la densità apparente del tracciamento.

Nel secondo modello, rappresentante la configurazione a quattro vincoli d'angolo, le linee isostatiche si distribuiscono in modo sensibilmente differente. In questo caso, le linee si irradiano dai nodi d'angolo, propagandosi lungo i lati della piastra, mentre quelle "concentriche" ai vincoli stessi sono a 45° nei pressi del vincolo, fino a protendere sempre di più verso il centro.



Linee isostatiche del modello con vincolo centrale; linee radiali; linee concentriche

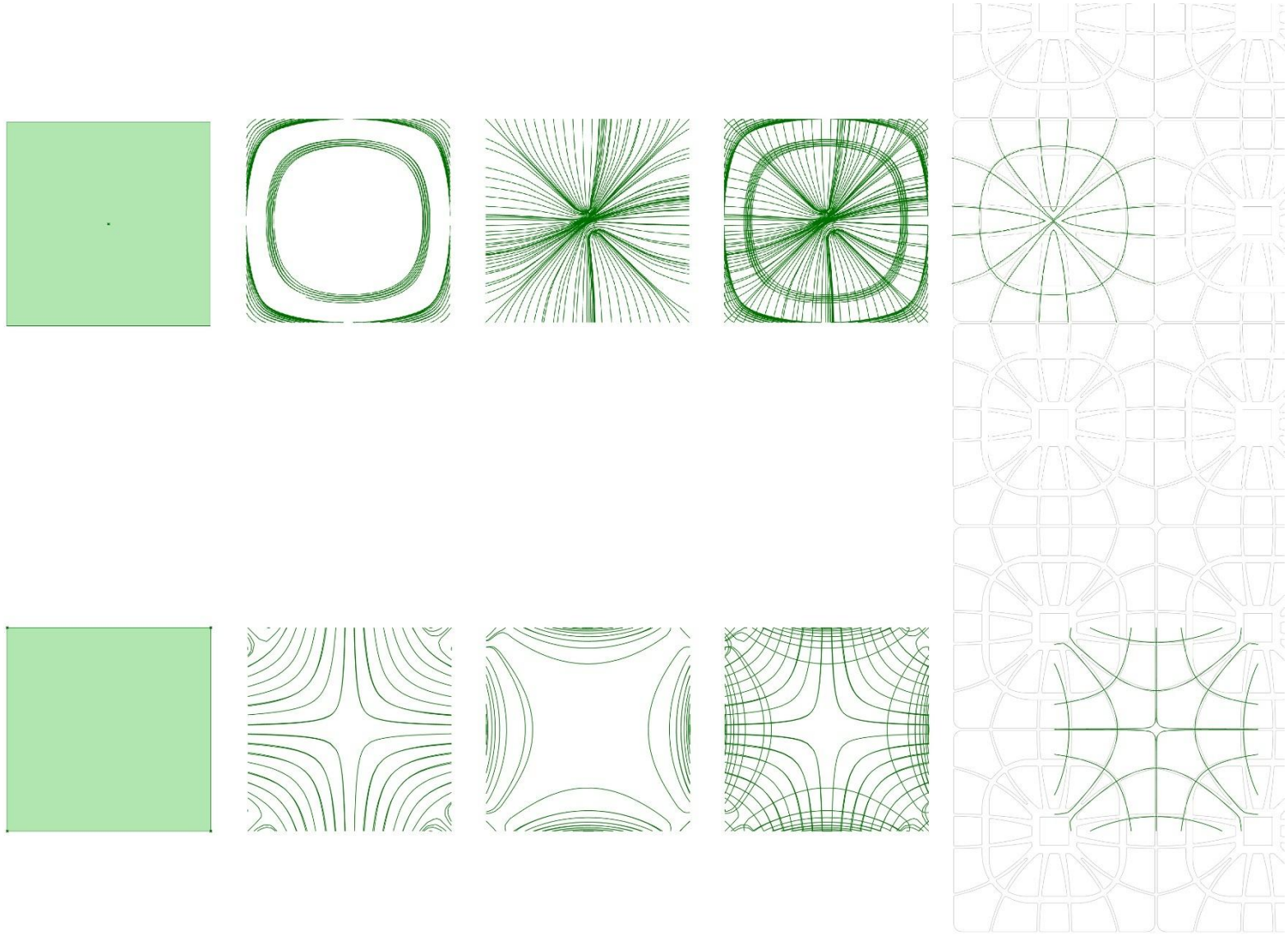


Linee isostatiche del modello con vincoli sugli angoli; linee radiali; linee concentriche

Nonostante l'analisi qualitativa delle linee isostatiche dei momenti fornisca una comprensione generale sull'orientamento e l'organizzazione delle due principali famiglie - radiali e concentriche - essa risulta inadeguata a stabilire un nesso diretto con il progetto realizzato, in quanto fortemente condizionata dalla selezione arbitraria dei punti da cui le linee vengono tracciate. Tale limite metodologico compromette la possibilità di derivare deduzioni significative rispetto alla coerenza tra progetto teorico e realizzazione. Per superare questa criticità, è stata effettuata una nuova discretizzazione della mesh, calibrata sulla geometria reale del solaio progettato da Nervi, con l'obiettivo di ottenere un confronto più affidabile tra geometrie paragonabili.

Dal confronto tra l'andamento delle linee isostatiche del primo modello (con vincolo centrale) e il profilo delle nervature del solaio effettivamente costruito, emerge che le curve concentriche rispetto al nodo centrale non assumono una forma perfettamente circolare e l'adeguamento alla direzione ortogonale al bordo con le linee che vi si intersecano è ininfluente. Inoltre, si rileva l'incapacità di questo modello di generare una vera nervatura lungo il bordo, elemento strutturalmente significativo nell'opera realizzata.

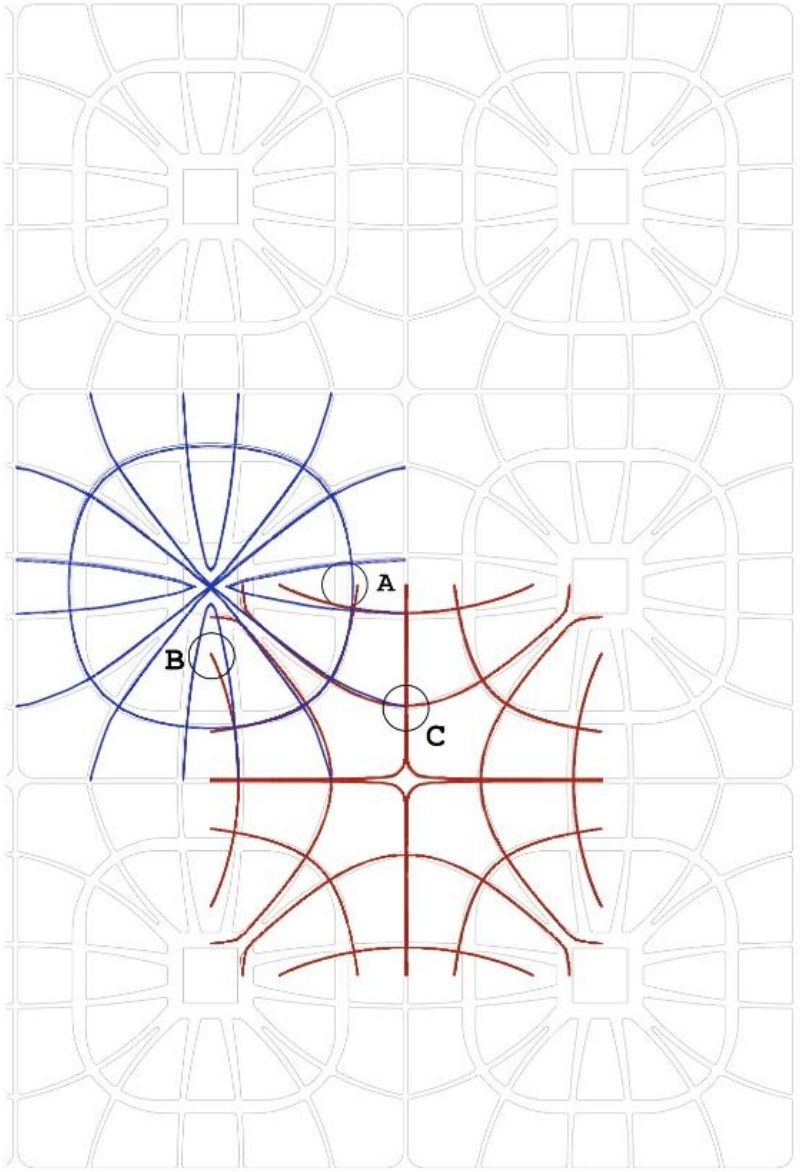
Dal confronto, infine, con il profilo del solaio realizzato da Nervi con il secondo caso (con vincolo sugli angoli) si nota un forte disallineamento delle curve concentriche al pilastro nell'intersezione con il bordo, poiché non si manifesta la tendenza all'ortogonalità con il profilo esterno. Al contrario, le linee radiali che si originano dai vincoli angolari mostrano una buona corrispondenza con le direzioni delle nervature reali, ad eccezione della linea più prossima al bordo, la cui intersezione con il perimetro presenta una deviazione significativa. Nell'analisi di questo caso bisogna notare, invece, che le linee di mezzeria corrispondono precisamente con la linea di bordo che non è in grado di produrre il caso precedente.



Linee isostatiche di entrambi i modelli sovrapposte alla pianta realizzata

Successivamente è stata effettuata un'ulteriore analisi comparativa sovrapponendo simultaneamente la geometria del solaio realizzato con le geometrie ideali dei due modelli analitici: il modello "a fungo" (tracciato in blu) e quello "tra quattro pilastri" (tracciato in rosso). La sovrapposizione è stata limitata a un quadrante rappresentativo, pari a un quarto della campata, in modo da evidenziare le corrispondenze e le discrepanze tra i tre assetti (modelli ideali e struttura costruita).

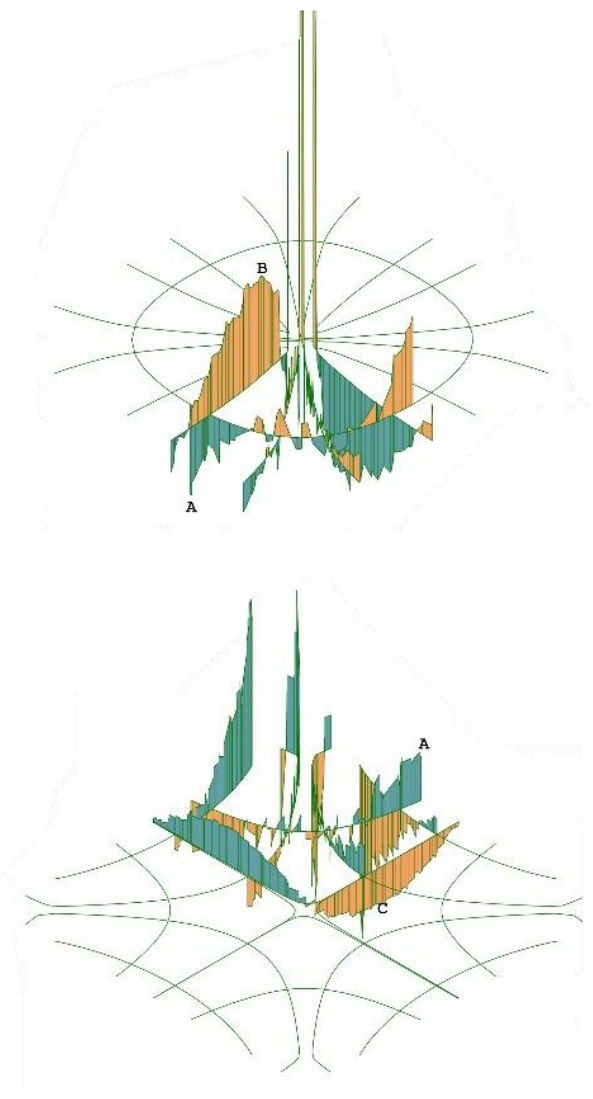
Dal confronto emergono alcune evidenze di particolare rilievo che permettono di ricondurre parzialmente la geometria costruita al modello "a fungo": in corrispondenza del punto A, ad esempio, si osserva una linea isostatica ortogonale al bordo, perfettamente coerente con l'orientamento della nervatura realizzata. Tuttavia, è significativo notare che in quella zona la trave presenta una sezione sensibilmente maggiorata, come se fosse stata progettata per inglobare più direzioni di flusso delle sollecitazioni, suggerendo una consapevolezza della complessità geometrica. Inoltre, le linee isostatiche trasversali al nodo centrale attraversano idealmente il pilastro, in analogia con le nervature trasversali che lo oltrepassano nella configurazione costruita. Al contrario, si rilevano anche elementi che riconducono inequivocabilmente il solaio al modello a vincoli d'angolo. In particolare, le nervature disposte lungo le mezzerie - assenti nello schema a fungo - risultano del tutto coerenti con l'andamento delle linee isostatiche generate dal modello su quattro vincoli. Questa evidenza suggerisce una sintesi progettuale che combina caratteristiche proprie di entrambi i modelli.



Linee isostatiche di entrambi i modelli sovrapposte tra loro

Grazie alla sovrapposizione del quarto in comune tra i due modelli è stato possibile valutare la distanza tra i due. Questa operazione è stata svolta estraendo i momenti torcenti di un modello sull'altro per valutare effettivamente lo scostamento e identificare i punti in cui c'è maggiore distanza. Se, infatti, le linee fossero assolutamente sovrapponibili, non ci sarebbero momenti torcenti, che invece si sviluppano maggiormente nei punti A, B e C, i quali corrispondono a punti di disconnessione segnalati nelle immagini. Nella prima immagine vengono mostrati i momenti torcenti del solaio su quattro vincoli lungo le linee isostatiche del modello a fungo, mentre la seconda mostra i momenti torcenti del solaio a fungo lungo le linee isostatiche del modello su quattro vincoli. Questa operazione restituisce quanto già visto, cioè mostra lo svilupparsi dei momenti torcenti maggiori nei punti di disconnessione, descrivendo che effettivamente i due modelli sono diversi e accertando le differenze.

Parallelamente, la sovrapposizione dei due modelli su un quadrante comune è stata utilizzata per misurare le discrepanze mediante l'analisi dei momenti torcenti. Tale operazione è stata condotta proiettando le linee isostatiche di ciascun modello sull'altro e valutando la formazione di momenti torcenti. Infatti, laddove le linee fossero perfettamente congruenti, non si genererebbero momenti torcenti. Tuttavia, l'analisi evidenzia concentrazioni significative nei punti A, B e C, che corrispondono a zone di disconnessione tra i due modelli.



Momenti torcenti lungo le linee isostatiche del modello opposto

Nella prima immagine allegata si osservano i momenti torcenti sviluppati dal modello a quattro vincoli lungo le linee isostatiche del modello a fungo; nella seconda, al contrario, si mostrano i momenti torcenti del modello a fungo lungo le linee isostatiche del modello su quattro vincoli. In entrambi i casi, l'insorgere di momenti torcenti nei punti critici conferma l'assenza di sovrapposizione tra i due schemi strutturali e rafforza l'ipotesi che il solaio realizzato sia frutto di un approccio misto, in cui l'intuizione formale si sovrappone a una soluzione strutturale più aderente alle condizioni di vincolo reali.

Infine, è stata condotta un'ultima analisi volta a indagare l'ispessimento della sezione delle travi, con particolare riferimento alla trave anulare concentrica attorno al pilastro. Come precedentemente ipotizzato, tale ispessimento potrebbe essere motivato dalla volontà di concentrare in quella zona il maggior numero possibile di giaciture. Tuttavia, risulta più plausibile che l'incremento di sezione sia riconducibile alla necessità di compensare l'aumento dei momenti flettenti.

L'immagine mostra in pianta l'incremento dei momenti flettenti lungo le sezioni delle travi nei due modelli presi in esame. Nel caso del modello a fungo si nota che i momenti flettenti sono distribuiti in maniera non costante lungo la linea anulare attorno al pilastro: i momenti risultano inferiori lungo le diagonali e crescono significativamente lungo gli assi ortogonali del pilastro. Tale distribuzione è opposta rispetto a quanto rilevato nel modello a quattro vincoli, ma risulta coerente con la geometria effettivamente realizzata, nella quale si osserva una variazione di spessore della trave da 10 a 25 cm.

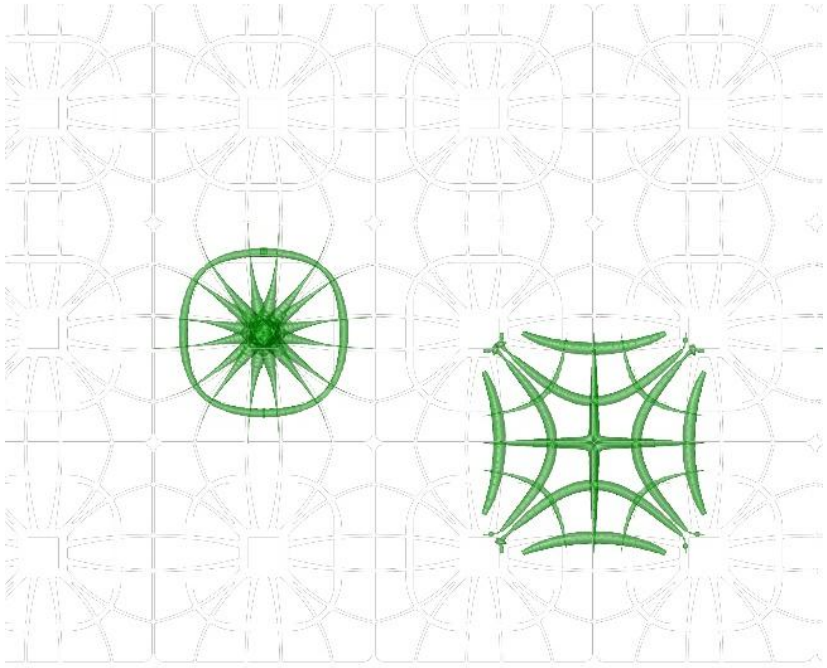


Diagramma in pianta del momenti flettenti lungo le linee isostatiche

Questa modalità progettuale trova un riscontro esplicito anche nella tavola preparatoria[111] del brevetto n. IT 455678, depositato il 23 luglio 1949. Nella tavola intitolata *"Studio di solaio a fungo con nervature isostatiche"*, firmata da Aldo Arcangeli, è chiaramente rappresentato un ispessimento localizzato delle nervature concentriche al pilastro lungo gli assi principali, mentre le altre

[111] Diapositiva C-38 contenuta all'interno dell'album delle diapositive dello Studio Nervi nella sezione "Edifici dell'industria - Cultura Commercio - Trasporti" – MAXXI.

nervature mantengono uno spessore costante e ridotto. Analogamente al solaio del Lanificio Gatti, anche in questa tavola si evidenzia un ringrosso nell'area immediatamente adiacente al pilastro, assimilabile a un capitello, perfettamente coerente con la distribuzione analitica dei momenti flettenti in quella zona.

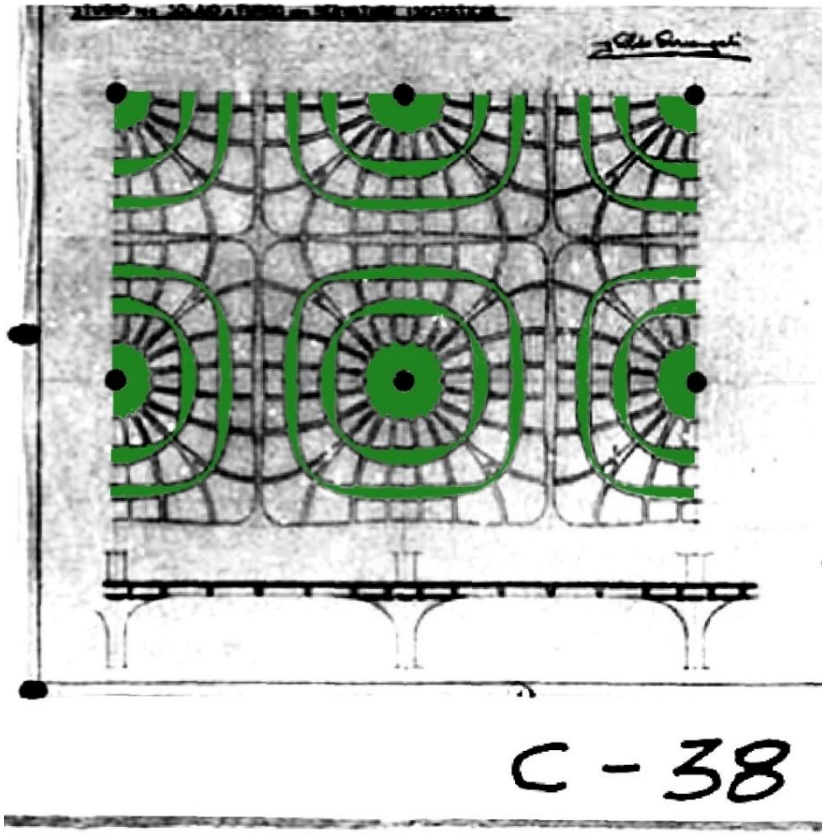


Tavola preparatoria del brevetto

In conclusione, le analisi di tipo statico, sebbene puntuali, non consentono di formulare una risposta definitiva circa le reali intenzioni progettuali di Pier Luigi Nervi e di Aldo Arcangeli. I risultati ottenuti non permettono di attribuire il solaio del Lanificio Gatti in modo univoco né al modello "a fungo" né a quello "su quattro pilastri". Gli esiti delle verifiche condotte, supportati dalle analisi precedentemente affrontate sugli aspetti formali e costruttivi, confermano piuttosto una natura ibrida dell'opera, nella quale convivono elementi riferibili a entrambi i modelli, selezionati in base a opportunità tecnico-costruttive specifiche.

Dall'analisi dei documenti d'archivio emerge che l'impostazione iniziale del progetto era orientata verso uno schema a fungo, successivamente adattato a un impianto su campate per ragioni esecutive, sfruttando gli aspetti migliorativi della soluzione precedente come l'ispessimento della trave anulare in corrispondenza degli assi dei pilastri.

Un ruolo determinante è stato svolto dal brevetto IT 455750 e dalle sperimentazioni effettuate nel *Magazzino Ballette* della *Manifattura tabacchi* di Bologna: la costruzione di solai tramite casseri in ferrocemento su ponteggi tubolari mobili. Questa modalità costruttiva, come descritto da Nervi stesso, ha reso possibile la realizzazione di questo solaio su campate con nervature curvilinee, altrimenti non realizzabile con le tecniche convenzionali dell'epoca.

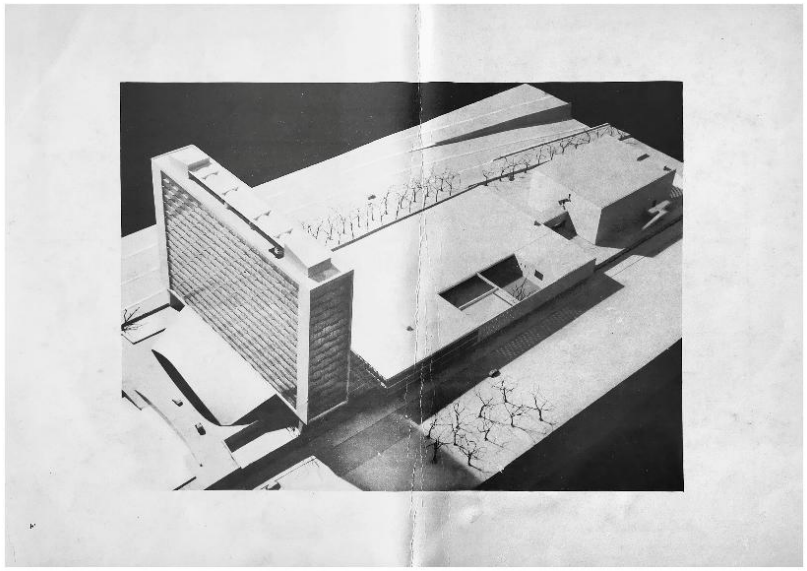
Infine, è verosimile che la definizione formale del solaio come "a fungo" sia stata mantenuta per finalità descrittive o comunicative, nonostante tale nomenclatura non rispecchi fedelmente l'effettivo comportamento strutturale dell'opera.

1.3.2 Palazzo Unesco, Parigi

Il primo e il secondo progetto

All'inizio[112] degli anni Cinquanta si decide di procedere alla realizzazione di una nuova sede dell'UNESCO a Parigi e viene istituito un comitato internazionale di cinque membri - composto da Lucio Costa, Walter Gropius, Le Corbusier, Ernesto Rogers e Sven Markelius - incaricato di supervisionare il progetto e di gestire i rapporti con le istituzioni coinvolte. Nel 1952 il comitato designa tre progettisti: Marcel Breuer, selezionato tra gli architetti statunitensi; Bernard Zehrfuss, scelto tra i rappresentanti francesi; e Pier Luigi Nervi, proposto per il suo riconosciuto ruolo tecnico.

Il comitato individua un'area nei pressi del Bois de Boulogne, che ottiene l'approvazione dell'UNESCO e delle autorità francesi, e per la quale il gruppo di progettazione elabora immediatamente un progetto preliminare. Quest'ultimo prevede tre volumi principali: il palazzo destinato agli uffici; un corpo basso, in parte ipogeo e organizzato attorno a patii, destinato a funzioni di servizio quali ristorante, biblioteca, sale stampa, magazzini e banca; e la sala per conferenze, concepita per ospitare le assemblee generali dell'UNESCO.



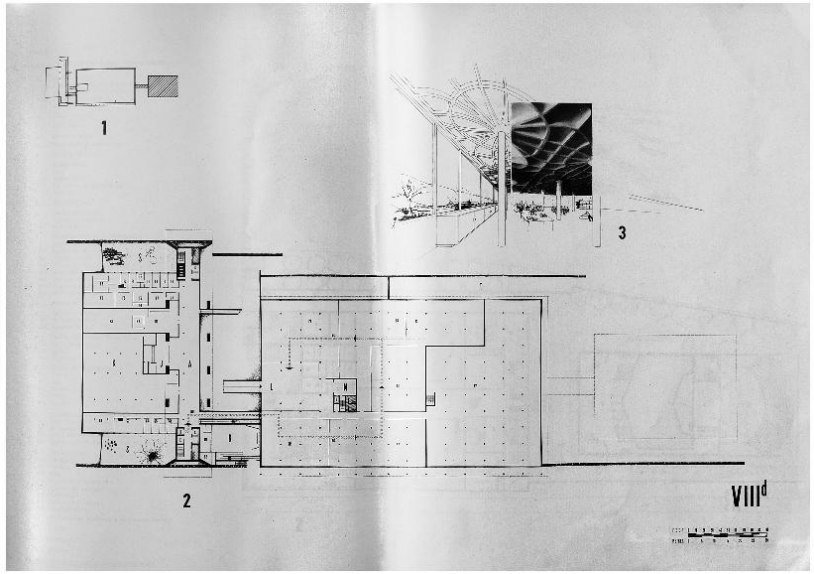
Primo progetto per il Palazzo UNESCO. Modello

La documentazione grafica[113] relativa a questa fase non include disegni di dettaglio, ad eccezione di un elaborato intitolato *Vue perspective du hall de publication (dalles à nervures isostatiques)*, che si rivela essere un fotomontaggio della fotografia del solaio del *Lanificio Gatti* sovrapposta alla prospettiva del primo piano dell'edificio basso della nuova sede. Questo unico elaborato fornisce due informazioni di rilievo: da un lato evidenzia il ruolo di Pier Luigi Nervi all'interno del gruppo di progettazione e nel rapporto con il comitato dei cinque; dall'altro conferma la piena riuscita formale dell'esperimento strutturale realizzato l'anno precedente nel piano

[112] Rogers E. N., *Il dramma del Palazzo dell'UNESCO* in «Casabella Continuità», n. 226, aprile 1959, pp.2-25.
Gropius W., Costa L., Le Corbusier, Markelius S., Nervi P.L., Zehrfuss B., *Testimonianze dei protagonisti sul Palazzo dell'UNESCO* in «Casabella Continuità», n. 226, aprile 1959, pp. 5-17.

[113] MAXXI - PLN P25.8.

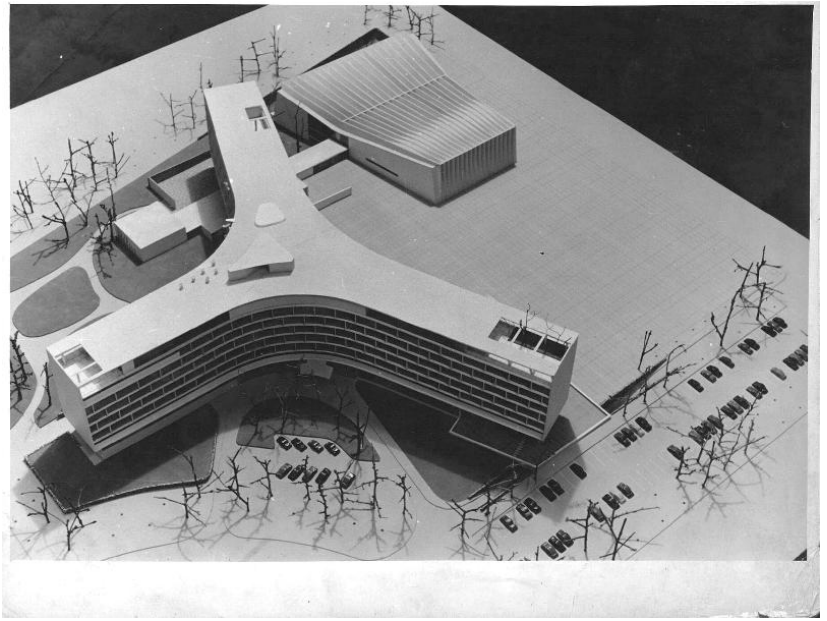
inferiore del *Lanificio Gatti*. Risulta significativo che il fotomontaggio venga adottato come strumento di comunicazione, poiché esso, più che fornire indicazioni tecniche o strutturali, trasmette un messaggio essenzialmente estetico, volto a valorizzare le potenzialità espressive di una soluzione architettonica e strutturale già sperimentata con successo.



Primo progetto per il Palazzo UNESCO. Solaio a linee isostatiche

Nonostante l'approvazione iniziale del progetto, emergono sin da subito criticità legate all'area prescelta, che inducono le autorità francesi a proporre nuovamente un lotto situato in Place de Fontenoy, precedentemente escluso. I progettisti ricevono pertanto l'incarico di elaborare un nuovo progetto in relazione a tale sito.

Il secondo progetto viene redatto in poco tempo e presentato il 2 aprile 1953[114]. È costituito da due edifici principali: il segretariato (corpo alto), il padiglione per le conferenze (corpo basso) ai quali successivamente viene aggiunto l'edificio di cinque piani fuori terra, destinato a ospitare le Delegazioni nazionali.



Primo progetto realizzato per il Palazzo UNESCO. Modello

Nella stesura del progetto la figura di Nervi è determinante, soprattutto nel disegno delle strutture[115]. Lui stesso scrive:

[114] Breuer M., Nervi P.L., Zehrfuss B., *Unesco : preliminary project, Place Fontenoy, Paris 2 april* 1953, Parigi 1953.

[115] Nervi P.L., *Le strutture dell'UNESCO* in «Casabella Continuità», n. 226, aprile 1959, pp.17-20.

Nel definire il tipo e la forma delle strutture portanti degli edifici dell'UNESCO, ci siamo lasciati tranquillamente guidare dalla infallibile bussola della costruttività e della statica. In altre parole, abbiamo cercato, per quanto possibile, che la progettazione partisse dal «di dentro» dei problemi; linea di condotta che, del resto, è stata seguita anche nello studio delle distribuzioni planimetriche e funzionali.

Tra gli elementi più rilevanti del progetto si distinguono i pilastri a sezione variabile con superficie rigata, l'edificio destinato alle conferenze caratterizzato da una copertura ondulata le cui modulazioni rispondono direttamente all'andamento dei momenti flettenti, e infine le due pensiline: una rivolta verso la nuova piazza in direzione di avenue de Suffren, l'altra orientata in direzione nord verso Place de Fontenoy.

In tale occasione appare evidente come Nervi utilizzi il rilievo internazionale dell'impresa e la risonanza che essa inevitabilmente avrebbe avuto, trasformando il progetto in una sorta di vetrina rivolta al panorama architettonico mondiale. Tale atteggiamento emerge con particolare chiarezza nella scelta di concepire due pensiline differenti per il medesimo edificio, in apparente contrasto con i principi di economicità e razionalità che solitamente guidano la produzione dello studio Nervi. Le due strutture, infatti, non condividono alcun criterio comune né dal punto di vista statico, né da quello costruttivo, né tantomeno sotto il profilo espressivo, assumendo piuttosto il valore di due opere autonome, pensate come veri e propri segni architettonici da esibire.

La descrizione prosegue:

Ci siamo permessi di uscire da questa direttiva per le due pensiline e più specialmente per quella sulla grande spianata di ingresso verso Avenue de Suffren.

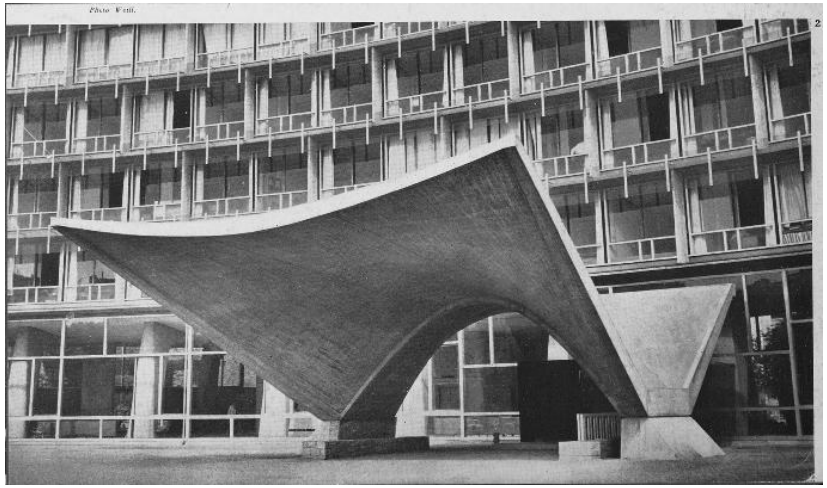
Lo schema strutturale di questa pensilina è decisamente antistatico e se le sue dimensioni avessero dovuto essere 10 volte maggiori sarebbe stata irrealizzabile.

La causa di questa antistaticità sta nella opposta curvatura delle direttrici della rigata che ne determina la forma geometrica, per cui nella serie di sezioni trasversali date da un piano verticale, via via spostantesi verso l'estremità si incontra necessariamente una sezione rettilinea, ossia una sezione che non può avere «una capacità resistente per forma».

Tutto quanto resta sporgente oltre tale sezione deve essere sostenuto per pura capacità flessionale della sezione stessa ed è evidente che, se tale parte, in luogo di una striscia di circa m. 1,50 come nel nostro caso, avesse dovuto essere notevolmente più grande, il problema statico sarebbe diventato, come dicevo sopra, insolubile.

D'altra parte abbiamo considerato che l'opposizione delle due curvature fosse un elemento espressivo da conservarsi anche a prezzo di una insincerità strutturale; personalmente penso che proprio questa insincerità concorra a dare alla pensilina stessa quel carattere un po' aggressivo e arbitrario che bene si contrappone alla rigida strutturalità di tutto il rimanente.

Se è chiaro il modo in cui la pensilina verso l'avenue de Suffren ha uno schema antistatico in favore di un carattere aggressivo e fortemente espressivo, non è chiaro il modo in cui il progetto della pensilina nord verso Place de Fontenoy sia stata progettata ignorando "l'infallibile bussola della costruttività e della statica".



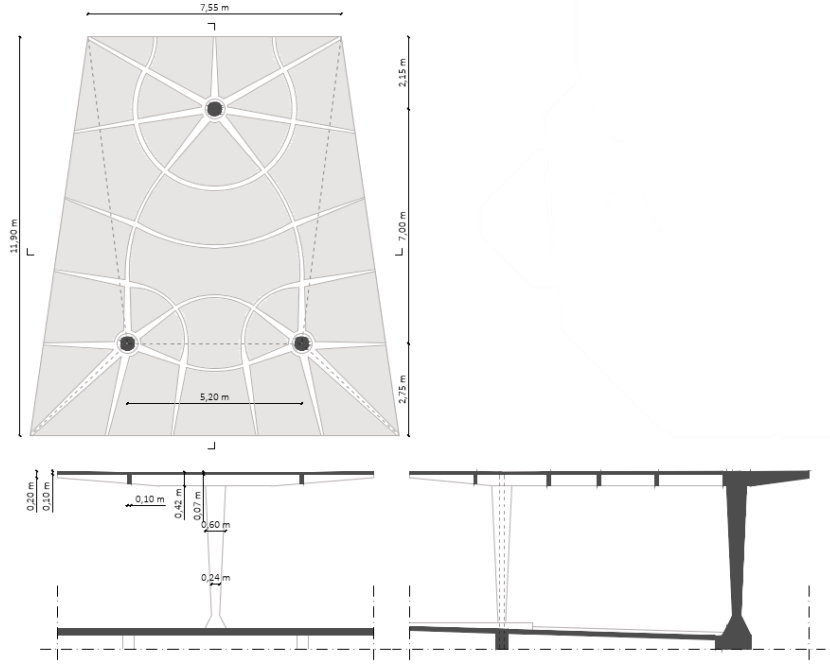
Pensilina verso avenue de Suffren



Pensilina verso place de Fontenoy

Valutazione formale e costruttiva della pensilina nord del Palazzo Unesco

La pensilina nord del *Palazzo UNESCO*, rivolta verso place de Fontenoy, consiste in una soletta piana di forma trapezoidale e con una superficie di circa 110 m². Questa struttura si inserisce nel contesto delle sperimentazioni sui solai a linee isostatiche, rappresentando uno degli esempi pionieristici del primo periodo di sviluppo di tali progetti. In particolar modo tale disegno è il primo a presentare un impianto privo del doppio asse di simmetria, come per i casi a pianta quadrata o rettangolare.



Solaio della pensilina verso avenue de Suffren

Per questa pensilina Nervi raccomanda, fin dalla fase progettuale, l'impiego di una cassaforma speciale, al fine di ottenere una

superficie in calcestruzzo perfettamente liscia[116]. Solo i pilastri mostrano i segni delle tavole di casseratura sottili e perfettamente lavorate. La scelta di Nervi riflette il tentativo di riprodurre, attraverso le casseforme lignee e l'uso di un intonaco di finitura, la qualità superficiale già da lui raggiunta in precedenza mediante stampi in ferrocemento. Tale accorgimento risponde sia alla ridotta sezione delle nervature, sia alla volontà di conferire omogeneità visiva all'elemento architettonico. La superficie liscia della pensilina costituisce un unicum all'interno del repertorio delle soluzioni sperimentate nel complesso UNESCO.

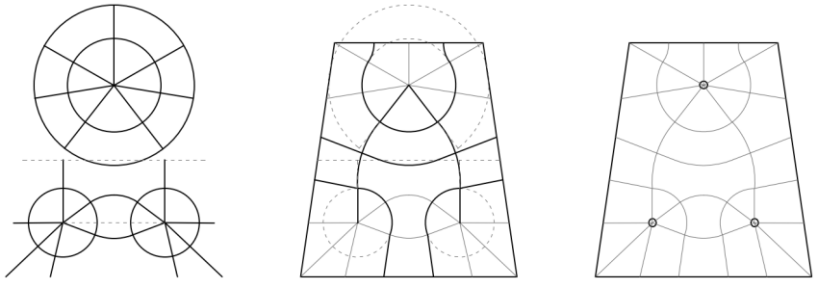
La pensilina è sostenuta da tre pilastri rastremati, con sezione che varia dai circa 24 cm alla base ai 60 cm in sommità. All'interno della sezione dei pilastri è ricavato un profilo cavo destinato alla raccolta e al deflusso delle acque meteoriche. Pur non essendo sottoposti a un'area di influenza equivalente, i pilastri presentano caratteristiche geometriche identiche; a variare in modo significativo è invece l'andamento delle nervature del solaio, che si distribuiscono in maniera differenziata tra il pilastro isolato rivolto verso la piazza e la coppia di pilastri collocata in prossimità del corpo edilizio.

È necessario sottolineare che, al momento della progettazione, non erano disponibili strumenti analitici in grado di descrivere con precisione l'andamento delle linee isostatiche in un sistema di tale complessità. Si può pertanto ipotizzare che la definizione della trama delle nervature sia stata ottenuta attraverso un'elaborazione grafica, fondata su una raffinata sensibilità strutturale e sulla conoscenza di schemi più semplici già sperimentati, quali le campate quadrate o rettangolari con pilastri agli angoli o in posizione centrale.

[116] Gargiani R., Bologna A., The rhetoric of Pier Luigi Nervi: Concrete and ferrocement forms, Oxford 2016.

In particolare, è plausibile che il disegno della pensilina sia stato elaborato a partire dalla sovrapposizione di due modelli di riferimento: uno schema "a fungo", caratterizzato da linee concentriche e radiali rispetto a un vincolo centrale, e uno schema a due campate con pilastri contrapposti, nel quale le linee radiali e concentriche risultano influenzate dall'interazione con la campata adiacente. L'andamento infatti non è rettilineo, ma vede un raccordo tra le linee radiali. In quest'ultimo caso, inoltre, l'andamento delle linee radiali presenta una distribuzione asimmetrica: più affusolate verso il centro della pensilina e più distese verso il bordo esterno.

In una fase successiva del processo progettuale, è verosimile che tali modelli semplificati siano stati composti all'interno del profilo trapezoidale della pensilina, valutandone le reciproche interferenze. Ne risulta un disegno complesso in cui le linee radiali e concentriche subiscono progressive deformazioni: le seconde perdono la regolarità circolare, deformandosi in funzione della presenza delle campate contigue, mentre tutte le linee tendono generalmente a incontrare il bordo con direzione ortogonale, fatta eccezione per quelle in prossimità degli angoli.



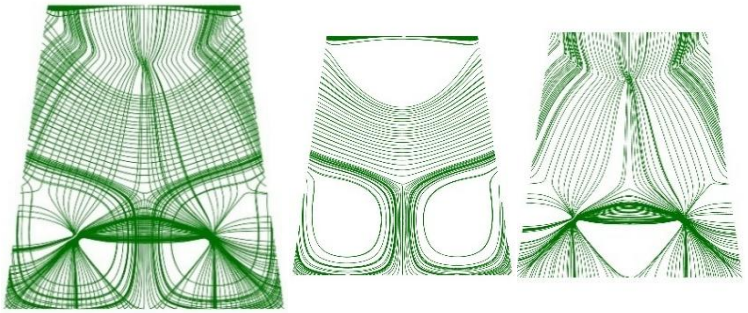
Valutazione statica

Il disegno del progetto realizzato è stato confrontato con le linee isostatiche dei momenti flettenti al fine di valutare e verificare la distanza tra le nervature di un modello complesso nella forma e nei vincoli e le linee isostatiche ideali.

Il sistema è stato modellato come una piastra trapezoidale piena, con geometria paragonabile a quella realizzata e spessore 20 cm. Per la definizione della mesh sono stati identificati alcuni punti notevoli dell'elemento: la posizione dei pilastri e la discretizzazione del bordo in segmenti paragonabili alla distanza delle nervature sul profilo esterno. Per l'analisi è stato attribuito alla mesh un materiale isotropo omogeneo pari a C25/30, il carico proprio e sono stati definiti i vincoli nella posizione puntuale dei pilastri.

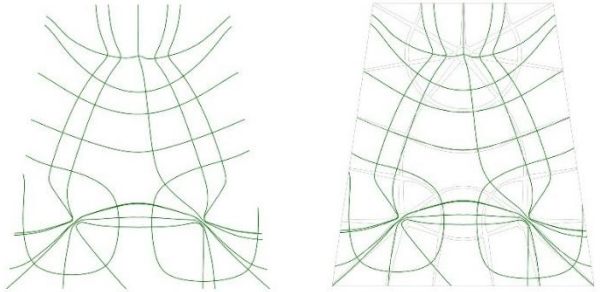
Dall'elaborazione dei due modelli sono state estratte le linee isostatiche dei momenti flettenti principali in entrambe le direzioni ortogonali. L'osservazione di tale geometria ci ha permesso di confermate la tipologia di vincolo (incastro) e di effettuare alcune considerazioni sull'andamento delle due famiglie di linee: la famiglia delle linee "concentriche" ai pilastri è particolarmente influenzata dalla posizione asimmetrica dei pilastri; la famiglia delle linee "trasversali" si distribuisce in modo da unire i pilastri con giaciture che si modificano nel percorso in modo da congiungere le linee radiali ai pilastri.

Successivamente si è tentato di discretizzare i punti della mesh in relazione alla forma realizzata per effettuare un confronto su geometrie paragonabili. Dal confronto con il profilo del solaio realizzato da Nervi emerge che la famiglia di linee concentriche risulta significativamente condizionata dalla presenza delle campate adiacenti e non presenta la marcata circolarità che caratterizza la nervatura attorno al pilastro isolato rivolto verso la



Linee isostatiche del modello; linee radiali; linee concentriche

piazza. Tale differenza è riconducibile sia alla particolare conformazione trapezoidale della pensilina, sia alla posizione non baricentrica del pilastro stesso all'interno del sistema strutturale. Si osserva inoltre che l'insieme delle linee tende, nella maggior parte dei casi, a intersecare il profilo esterno, seguendo un andamento coerente con la logica costruttiva delle nervature realizzate. In continuità con tale coerenza, le linee convesse che si sviluppano tra il pilastro isolato e la coppia di pilastri in aderenza al corpo edilizio non trovano una corrispondenza puntuale con quelle del modello ideale, ma presentano comunque una riconoscibile affinità formale. Questa consonanza, pur nella diversità geometrica, testimonia il legame concettuale tra l'impianto teorico e la soluzione costruttiva adottata.



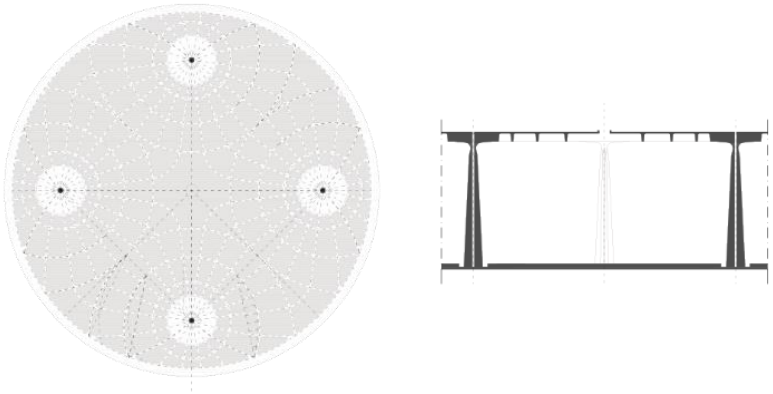
1.3.3 Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Borgo Panigale (BO)

Valutazione formale e costruttiva della copertura della chiesa del Cuore Immacolato di Maria a Borgo Panigale

La chiesa del quartiere Ina-Casa di Borgo Panigale, vicino Bologna, viene realizzata tra il 1957 e il 1962 con il progetto di Giuseppe Vaccaro. Nervi è chiamato a collaborare per la definizione tecnico-costruttiva per la realizzazione della copertura circolare su quattro appoggi[117].



Interno della Chiesa di Borgo Panigale



Solaio della Chiesa di Borgo Panigale

La chiesa è costituita da un un'aula circolare, coperta dal solaio nervato, e da uno spazio anulare, coperto da un solaio ad una quota inferiore, liscio all'intradosso. Lo spazio liturgico è descritto unicamente dalla presenza dei quattro pilastri le cui diagonali ricordano una croce; tra questi punti si snodano i percorsi liturgici, tra cui quello che lega l'ingresso all'altare.

I pilastri che sorreggono la copertura dell'aula circolare sono a sezione cruciforme rastremati verso l'alto. Sono sormontati da una struttura a fungo, composta da un elemento solido come un capitello esteso, e da una superficie nervata. I pilastri in cemento armato sono stati realizzati utilizzando dei casseri con doghe in legno.

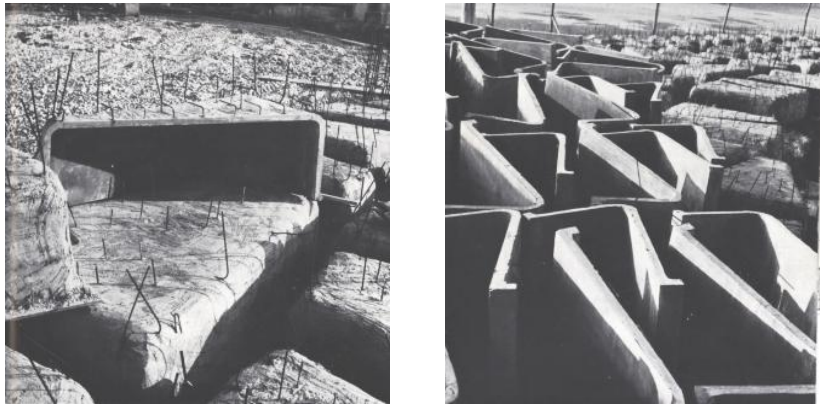
Per ottenere la posa perfetta del calcestruzzo a vista della copertura, invece, viene utilizzato un sistema di prefabbricazione di tavelloni.

[117] Nervi P.L., *Soluzione tecnico-costruttiva della copertura per la chiesa dell'architetto Vaccaro a Borgo Panigale*, in Quaderni di «Chiesa e Quartiere», n. 4, 1957, Architettura e Religione, pp. 32-35.

Nervi P.L., Vaccaro G., *Chiesa e complesso parrocchiale del Cuore Immacolato di Maria nel quartiere INA-Casa a Borgo Panigale*, in Quaderni di «Chiesa e Quartiere», n. 20, 1961, Architettura e Religione, pp. 74-98.

Nervi stesso descrive così il processo:

> *In quanto alla esecuzione si potrebbe adottare il sistema a tavelloni prefabbricati su modello in gesso, già da me più volte sperimentato, e che mi pare l'unico possibile per raggiungere una perfetta esecuzione e un costo senza confronto inferiore a quello che si avrebbe con le usuali casseforme in legno e la successiva rifinitura ad intonaco e stucco.*



Tavelloni prefabbricati a piè d'opera

Le tavole riportano spiegazioni minuziose sulla modalità costruttiva dei tavelloni e sulla geometria di ogni pezzo. Nervi fa realizzare a terra, limitatamente ad un solo quadrante della copertura, 59 forme al negativo tramite dei blocchi in muratura rifiniti esternamente di gesso; con queste forme vengono realizzati i relativi tavelloni.

Nell'accostamento di due tavelloni resta a vista il solco tra i due elementi. Tale giunto rende manifesto il processo di lavorazione basato sull'assemblaggio di pezzi precedentemente prodotti. Infine La linea decisa marca l'andamento curvilineo e ricco delle nervature nell'intradosso.

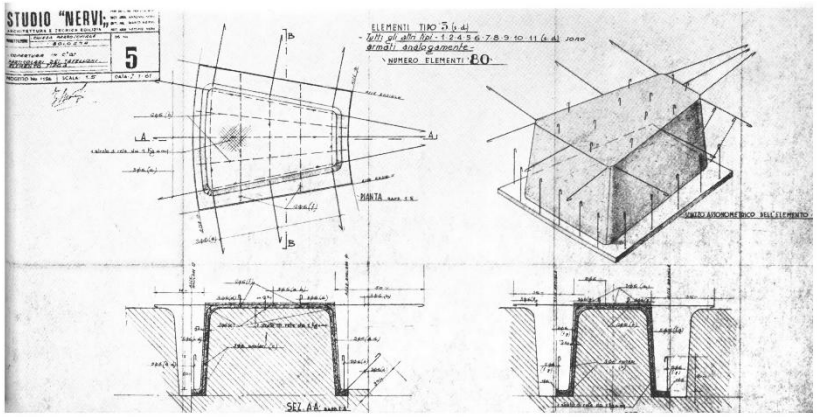


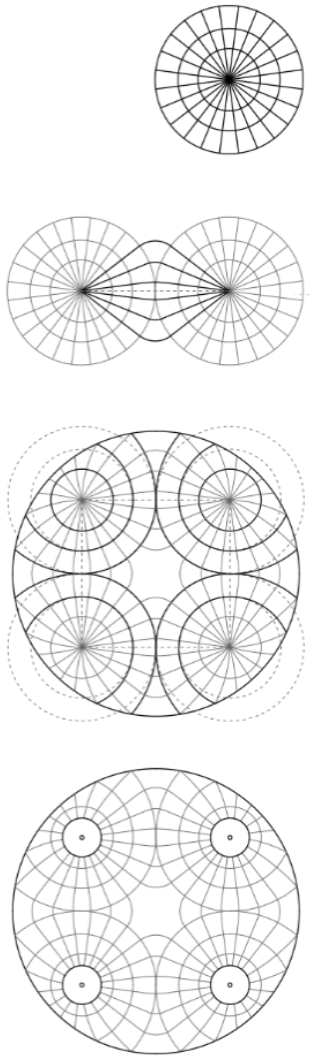
Tavola di dettaglio dei tavelloni



Dettaglio delle nervature

La scelta di questa soluzione costruttiva è stata particolarmente influenzata dalla ditta incaricata dei lavori: Lo studio Nervi è solito collaborare con la Nervi & Bartoli (come a Venezia), mentre in questo cantiere la costruzione viene affidata alla ditta Fratelli Donati. Per questo motivo vengono fornite tavole di progetto ricche di descrizioni per ottenere la perfezione nelle lavorazioni, nella creazione e nella posa degli elementi[118].

Il disegno delle nervature di questo solaio è ispirato alle linee isostatiche dei momenti di un singolo solaio circolare a fungo con un vincolo centrale e due ordini di travi: uno radiale e uno concentrico. Il solaio su quattro pilastri risulta come il semplice accostamento di 4 moduli in cui le travi vengono collegate tramite raccordi curvi, ma non subiscono nessuna variazione nel contatto con la soletta adiacente, né con la modifica del profilo esterno. Infine la dimensione del capitello ingloba la sezione degli elementi strutturali prossimi al nodo: le venti travi radiali e la prima nervatura circolare. Vi è tuttavia un piccolo accomodamento delle due travi circolari esterne per evitare la realizzazione di un elemento con un angolo troppo stretto e per seguire l'idea dell'ortogonalità delle famiglie di linee isostatiche. Infine la soluzione del nodo tiene in considerazione l'asse di tutti gli elementi, ma permette una perfetta esecuzione, evitando elementi troppo piccoli.



Genesi della geometria del solaio

[118] Gargiani R., Bologna A., *The rhetoric of Pier Luigi Nervi. Concrete and ferrocement forms*, Oxford 2016.

Valutazione statica: valutazione dello scostamento del momento torcente

Per il solaio della chiesa di Borgo Panigale, Nervi stesso scrive:

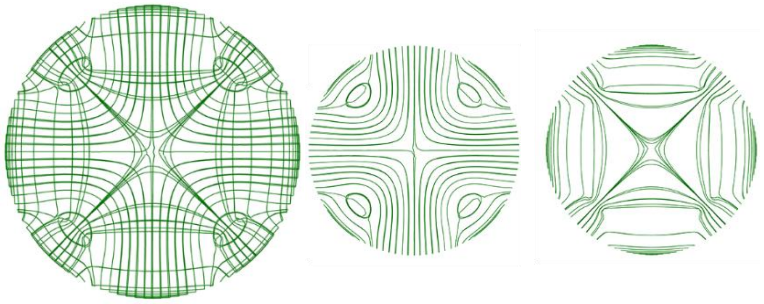
> *L'idea era di mettere in evidenza un sistema di nervature corrispondenti ad una naturale trasmissione dei carichi da vari punti della copertura circolare ai 4 pilastri di appoggio, e, come primo orientamento, Vaccaro pensava a qualcosa di analogo alle nervature disposte lungo le linee delle isostatiche dei momenti principali. E difatti abbiamo cercato di avvicinarci, in via concettualmente corretta anche se matematicamente non esatta, a tale disposizione la cui caratteristica più essenziale è data dalla presenza di due famiglie di nervature incontrantesi a 90°. È anche evidente che le nervature di una delle due famiglie debbono concorrere sui punti di appoggio, ossia sui 4 pilastri.*

È stata modellata una soletta piena circolare di 11 m di raggio e 0.23 m di spessore, pari in massa alla piastra realizzata.

Per la definizione della mesh sono stati descritti alcuni punti notevoli dell'elemento: la posizione dei pilastri tramite le diagonali passanti per il centro e lunghe 16 m; la discretizzazione del bordo in 208 punti equidistanti tra loro, garantendo il regime di assialsimmetria.

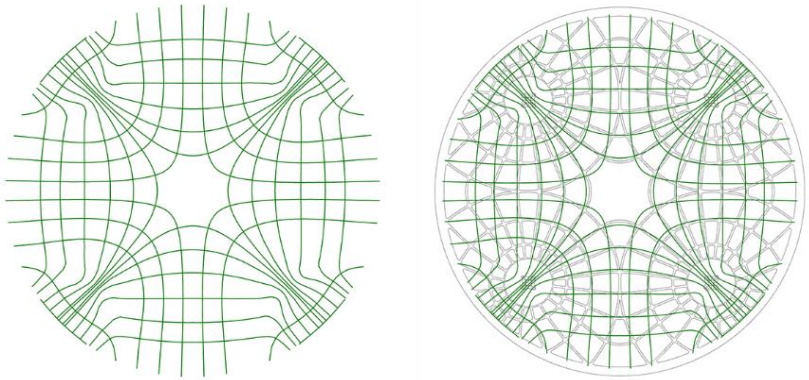
Per l'analisi è stato attribuito alla mesh un materiale isotropo omogeneo pari a C25/30, il carico proprio e sono stati definiti i vincoli nella posizione puntuale dei pilastri. Questa semplificazione è stata adottata perché si è visto che la soluzione con un vincolo diffuso sul profilo esterno della soletta superiore del pilastro non avrebbe portato ad un reale cambiamento dei risultati, ma solo ad una lettura più faticosa.

Dall'analisi della mesh sono state estratte le linee isostatiche dei momenti in entrambe le direzioni. L'osservazione di tale geometria ci ha permesso di confermate la tipologia di vincolo (cerniera) e di effettuare alcune considerazioni sull'andamento delle due famiglie di linee: la famiglia delle linee "concentriche" al pilastro non è perfettamente circolare, ma è particolarmente influenzata dalla forma triangolare del campo di appartenenza; la famiglia delle linee "trasversali" al pilastro è più rada nella zona centrale, mentre nella zona esterna non cambia di convessità. Si verifica che le linee isostatiche dei momenti percorrono le diagonali tra i pilastri e gli interassi.



Linee isostatiche del modello; linee concentriche; linee radiali

Successivamente si è tentato di discretizzare i punti della mesh in relazione alla forma realizzata per effettuare un confronto su geometrie paragonabili. Sono state estratte 20 linee concentriche e 24 linee trasversali. Dal confronto con il profilo del solaio realizzato da Nervi risulta che la prima famiglia di linee non è perfettamente circolare e l'accomodamento effettuato sulle otto nervature maggiori (due per ogni quadrante) nell'intersezione con la trave di bordo è pressoché ininfluente. La famiglia di linee trasversali nella zona centrale è invece affine alla geometria realizzata, ma le linee non presentano un cambiamento di direzione verso il bordo della soletta e ne diventano man mano coincidenti.



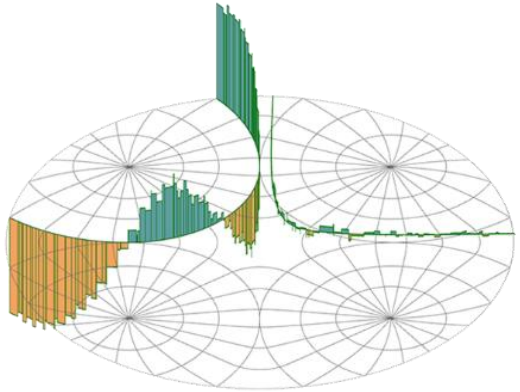
Linee isostatiche sovrapposte sulle nervature realizzate

Il confronto tra la geometria ideale e quella reale, è stato da noi studiato attraverso l'analisi del momento torcente nella trave concentrica maggiore. Questa scelta è stata spinta dall'idea di porre l'attenzione su due geometrie non coincidenti tra loro (per valutarne lo scarto) e distanti dai vincoli (per evitarne l'influenza).

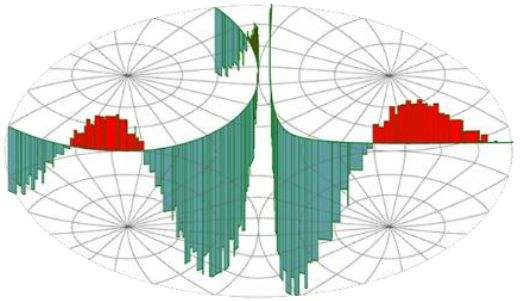
L'analisi mostra gli sforzi di momento torcente lungo due curve: a sinistra la linea isostatica dei momenti, a destra quella della nervatura realizzata. È chiaro che il primo caso mostra un'imprecisione del software poiché tale linea dovrebbe avere momento torcente nullo; nel secondo si nota l'inversione del segno da un limite all'altro.

Dai risultati appare che lo sforzo torcente massimo della linea ideale è pari a l'11.23% del momento torcente massimo della linea reale. Questo dato conferma che le nervature della chiesa di Borgo Panigale non sono delle vere ottimizzazioni strutturali, ma presentano una violazione geometrica diffusa su buona parte del solaio.

Tale scelta è legata alla genesi formale del progetto, tuttavia può trovare in parte riscontro nell'analisi dei momenti flettenti lungo le medesime curve. Il momento Flettente massimo lungo la linea isostatica dei momenti è pari al 111.88% del momento flettente lungo la nervatura realizzata.



Diagrammi dei momenti torcenti. Lungo le nervature realizzate (sinistra) e lungo le rispettive linee isostatiche (destra)



Diagrammi dei momenti flettenti. Lungo le nervature realizzate (sinistra) e lungo le rispettive linee isostatiche (destra)

1.3.4 Sede della Cassa di risparmio, Venezia

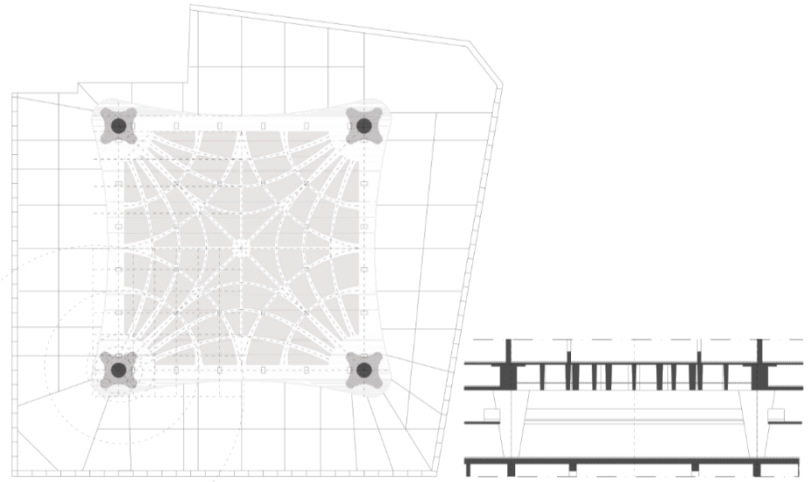
Valutazione formale e costruttiva del solaio tecnico della Cassa di risparmio a Venezia

La Cassa di risparmio di Venezia viene realizzata tra il 1963 e il 1972. Il progetto è inizialmente affidato solo all'architetto Angelo Scattolin che coinvolge successivamente Pier Luigi Nervi[119]. Questa collaborazione nasce dalla necessità di avere all'interno del team di progettazione una figura autorevole, quale Nervi allora all'apice della fama, per porre il progetto al riparo delle critiche attese.



Interno della sede della Cassa di risparmio

[119] De Magistris A., Deambrosis F., *Palazzo Nervi-Scattolin*, Milano 2021.



Solaio della Cassa di risparmio di Venezia

Il nuovo edificio, infatti, scartata la possibilità di una ristrutturazione, prevede la sostituzione del vecchio palazzo tardo-ottocentesco tra campo Manin e campo San Luca e l'idea dei progettisti consiste nel riproporre la volumetria pressoché nelle dimensioni dell'esistente. L'involucro esterno, tuttavia, resta a lungo motivo di critiche e di mediazioni con la Soprintendenza.

L'incarico a Nervi, affidatogli grazie alla sua notorietà, riguardava soprattutto la richiesta da parte della committenza di ridurre al minimo gli ingombri delle strutture del piano terra, in rapporto alla natura fragile del sottosuolo della città e alla presenza di fabbricati perimetrali particolarmente sensibili alle vibrazioni.

Per questo motivo il progetto prevede la costruzione di una paratia di calcestruzzo armato di fondazione con 4 setti uniti da una platea. Questa soluzione consente di raggiungere uno strato di terreno

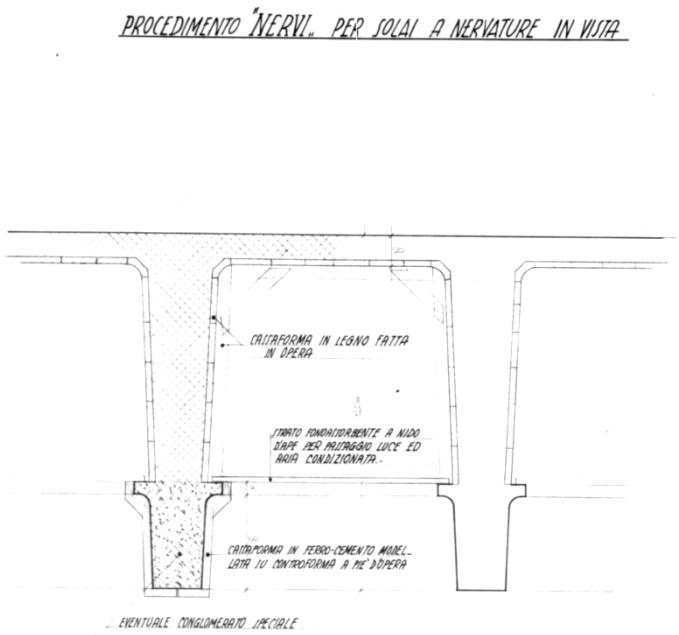
resistente a quota -20 m, di avere nella parte interrata l'area destinata al caveau e di costruire quattro punti di appoggio destinati a supportare tutto l'edificio. In questo modo si garantisce la totale flessibilità del piano terra, sgombro da tutte le strutture.

I montanti sono costituiti da quattro grandi pilastri innestati nell'intersezione dei setti; I pilastri a sezione variabile (circolare alla base, cruciforme alla sommità) tramite il solaio tecnico fungono da unici sostegni ai tre piani superiori che accolgono la direzione generale dell'istituto, la presidenza e gli spazi consiliari. Il piano terra è certamente l'ambiente più prestigioso dell'edificio: coperto con il solaio ispirato alle linee isostatiche ospita la zona pubblica dell'istituto e gli uffici nel piano ammezzato.

Il solaio a nervature curvilinee rappresenta l'emblema di questa opera poiché un unico elemento risponde alla richiesta di una straordinaria capacità statica e allo stesso tempo copre uno spazio di rappresentanza. L'intradosso delle nervature è ulteriormente ingentilito dall'istallazione di un pannello fonoassorbente a nido d'ape ad una quota di 68 cm dal limite inferiore delle travi. Questo strato ha la funzione di contenere la risonanza, di nascondere la sezione spropositata delle nervature e degli impianti per l'illuminazione e per l'aria condizionata. Grazie a questi pannelli, si creano dei campi chiari e luminosi nel solaio che sottolineano l'andamento curvo delle nervature scure.

Nel 1968 la realizzazione di questo solaio, come per tutto l'edificio, è oltremodo laboriosa data l'assoluta mancanza di spazio per l'attrezzatura di cantiere e la difficoltà dell'approvvigionamento del materiale. Le casseforme di questo solaio vengono realizzate in una zona distante dal cantiere, sulla spiaggia.

Prima viene realizzata a piè d'opera la controforma di un quarto di solaio nello spessore di 68 cm (fino al pannello fonoassorbente),



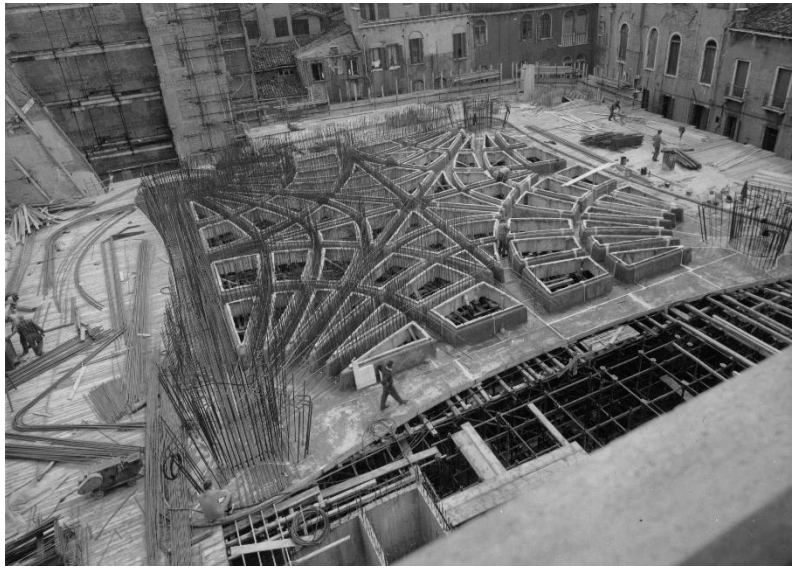
Dettaglio della sezione del solaio

successivamente vengono modellate su questa le casseforme in ferro-cemento in porzioni utili al trasporto, infine queste ultime vengono montate in cantiere per il getto del solaio. La porzione di nervatura superiore al pannello di altezza pari a circa 132 cm viene realizzata tramite una cassaforma in legno fatta in opera sulla dimensione di quella sottostante.

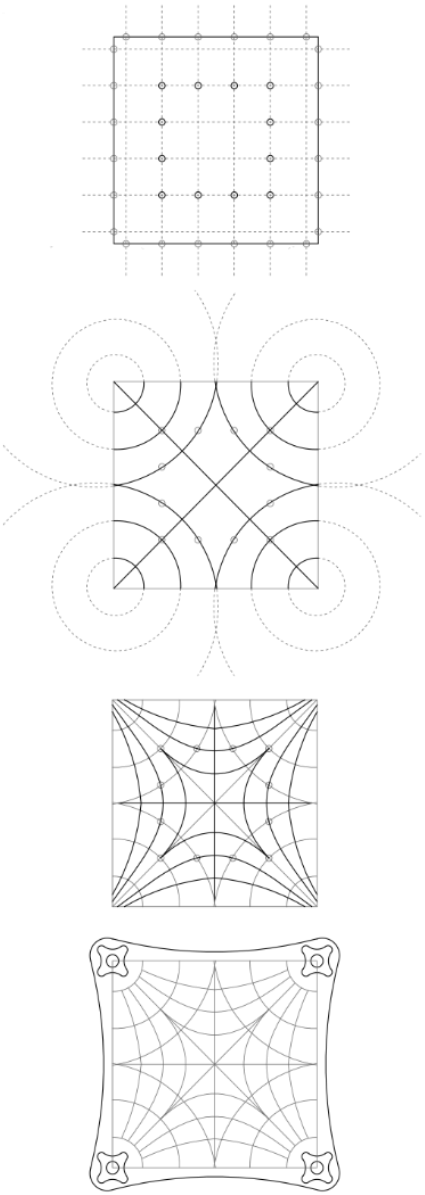
Il disegno delle nervature di questo solaio è ispirato alle linee isostatiche dei momenti in un solaio quadrato vincolato agli angoli. La discretizzazione delle linee è tuttavia legata alla necessità di supportare dei pilastri con una maglia regolare di 3.48 m nella zona centrale, oltre a quelli sulla trave di bordo. Per questo motivo gli assi di entrambi gli ordini di nervature passano sugli assi dei pilastri superiori. Tale vincolo, legato alla maglia strutturale di tutto



Realizzazione delle controforme e delle casseforme



Realizzazione della porzione inferiore del solaio



Genesi della geometria del solaio

l'edificio è assai più stringente di ogni altra richiesta di progetto e non può essere disatteso.

Si può notare inoltre che il disegno di questa piastra è riconducibile al disegno di quattro moduli a fungo con il vincolo centrale nei pilastri principali: vi è solo un disassamento delle nervature concentriche per conciliare la posizione degli elementi portanti. Infine, il solaio presenta un profilo curvilineo ai bordi che ripropone le convessità delle linee isostatiche, riduce gli effetti di taglio negli spigoli e accoglie l'imposta del pilastro.

È necessario ricordare inoltre che il primo progetto redatto nel 1964 per quest'opera presenta il solaio nervato a elementi ortogonali. La seconda soluzione, poi definitiva, è quindi solo una delle tante possibili proposte che si sarebbero potute prendere in considerazione.

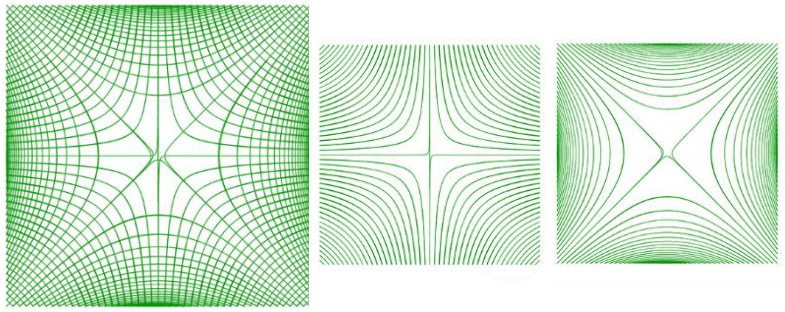
Valutazione statica: valutazione dello scostamento del momento torcente

Per il solaio della Cassa di risparmio di Venezia è stata modellata una soletta piena quadrata di 20 m di lato e 1.90 m di spessore, pari in massa alla piastra realizzata.

Per la definizione della mesh sono stati descritti alcuni punti notevoli dell'elemento: la posizione dei pilastri angli angoli della struttura; la discretizzazione del bordo in 46 punti per lato al fine di avere i punti con una distanza pari ad un sottomultiplo (1/8) dell'interasse dei pilastri (3.48 m) che gravano sul solaio e ne determinano la geometria.

Per l'analisi è stato attribuito alla mesh un materiale isotropo omogeneo pari a C25/30, il carico proprio e sono stati definiti i vincoli nella posizione dei pilastri. Come nel caso precedente, è stato evitato il vincolo diffuso sul bordo della soletta piena.

Dall'analisi della mesh sono state estratte le linee isostatiche dei momenti in entrambe le direzioni. L'osservazione di tale geometria ci ha permesso di confermate la tipologia di vincolo (cerniera) e di indagare l'influenza sull'andamento delle linee isostatiche derivante dai carichi puntuali. Ne è risultato che, nonostante il carico dei pilastri sia pari al 78.51% della massa del solaio, non è possibile apprezzare una reale variazione nell'andamento delle linee. Questo fenomeno è giustificato dalla presenza di vincoli puntuali che governa in generale il flusso delle forze e dalla distribuzione omogenea dei 36 pilastri su tutta la superficie della piastra, assimilabili dunque ad un carico distribuito.

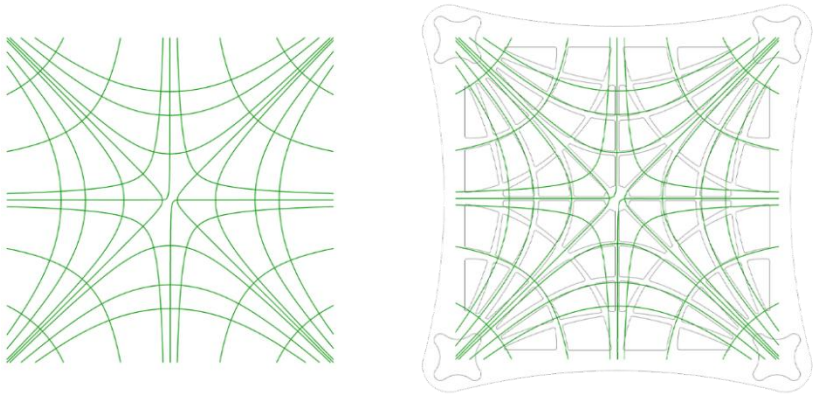


Linee isostatiche del modello; linee concentriche; linee radiali

Si possono effettuare alcune considerazioni sulle due famiglie di linee: la famiglia delle linee "concentriche" al pilastro non è assimilabile ad un arco di circonferenza, ma è ortogonale alla diagonale tra i pilastri nella zona prossima al vincolo e affusolata verso il centro nella mezzeria; la famiglia delle linee "trasversali" al pilastro sono più rade nella zona centrale e seguono lo stesso andamento delle nervature realizzate. Si verifica che le linee

isostatiche dei momenti percorrono le diagonali tra i pilastri e gli interassi.

Successivamente si è tentato di discretizzare i punti della mesh in relazione alla forma realizzata per effettuare un confronto su geometrie paragonabili. Sono state estratte 12 linee concentriche, 12 linee trasversali, 2 linee diagonali e 2 in mezzeria. Dal confronto con il profilo del solaio realizzato da Nervi risulta che la prima famiglia di linee ha un profilo variabile e non circolare, ma tuttavia trova una coincidenza significativa con la seconda nervatura; la famiglia di linee trasversali nella zona centrale è affine alla geometria realizzata.



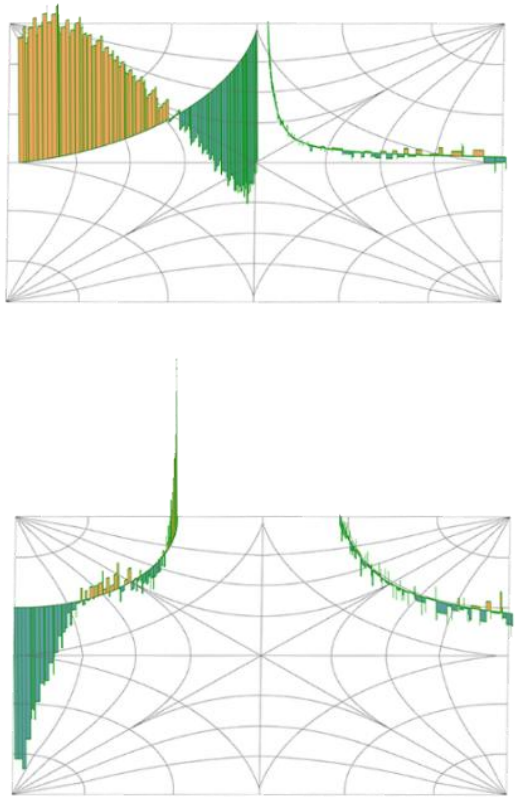
Linee isostatiche sovrapposte sulle nervature realizzate

Dati questi risultati, è stato stabilito di effettuare il confronto tra la geometria ideale e quella reale, attraverso l'analisi del momento torcente in due casi: la trave concentrica maggiore che presenta una divergenza più accentuata e la seconda trave concentrica che, al contrario, risulta, a meno della zona di vincolo, equivalente. Questa scelta è stata spinta dall'idea di porre l'attenzione su geometrie coincidenti e non coincidenti tra loro (per valutarne lo scarto) e distanti dai vincoli (per evitarne l'influenza).

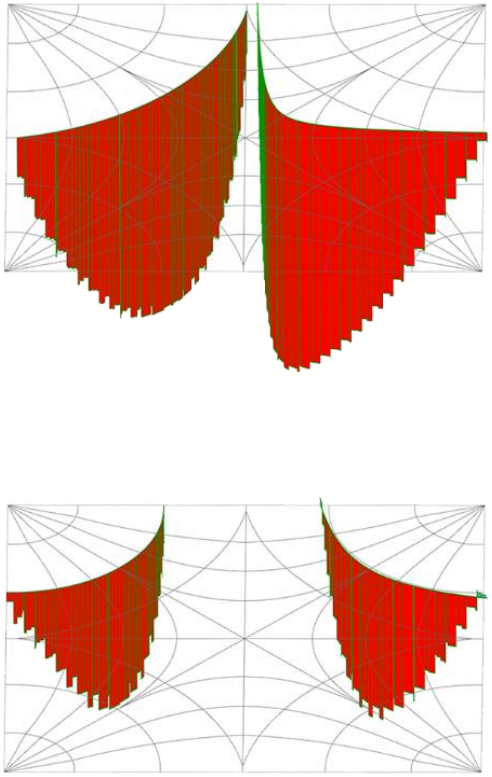
Le analisi mostrano gli sforzi di momento torcente lungo le curve: a destra le linee isostatiche dei momenti, a sinistra quelle delle nervature realizzate.

Nel primo caso di risultati appare che lo sforzo torcente massimo della linea ideale è pari a l'10.77% del momento torcente massimo della linea reale. Questo dato conferma che, come ipotizzato, questa nervatura non presenta un'ottimizzazione strutturale relativamente al momento torcente. In ogni caso bisogna ricordare che la posizione di questa nervatura è vincolata dalla presenza di due pilastri soprastanti. Tale scelta, inoltre, trova giustificazione nell'analisi dei momenti flettenti. Il momento flettente massimo lungo la linea isostatica dei momenti è pari al 118.10% del momento flettente lungo la nervatura realizzata. Questo incremento è notevole, considerando anche la gravosità del carico sulla piastra.

Nei risultati del secondo caso bisogna, invece, fare delle distinzioni: lo sforzo torcente massimo della linea ideale è pari a l'14.42% del momento torcente massimo della linea reale all'incastro e pari al 93.24% in mezzeria. Questo dato conferma che questa nervatura ha momento torcente praticamente nullo in mezzeria, discostandosi dalla soluzione perfetta solo nella zona in cui di fatto è inglobata nella trave di bordo. Tale coincidenza trova riscontro anche nell'analisi dei momenti flettenti. Il momento flettente massimo lungo la linea isostatica dei momenti è pari al 107.61% del momento flettente massimo lungo la nervatura realizzata. Dunque, i valori sono paragonabili.



Diagrammi dei momenti torcenti. Lungo le nervature realizzate (sinistra) e lungo le rispettive linee isostatiche (destra) in entrambi i casi



Diagrammi dei momenti flettenti. Lungo le nervature realizzate (sinistra) e lungo le rispettive linee isostatiche (destra) in entrambi i casi

1.4 Conclusioni dell'analisi

Dalle analisi svolte ne deriva l'impossibilità di ricondurre i progetti esaminati a un unico modello progettuale o a una grammatica comune condivisa. Piuttosto, ciò che li accomuna è un atteggiamento operativo che potremmo definire "artigianale" - nel senso più alto del termine - in cui la componente tecnica e quella creativa dialogano in maniera stretta e indissolubile. Ogni progetto si configura quindi come un unicum, il risultato di un processo di adattamento continuo a vincoli specifici, esigenze funzionali e intenzioni formali. Questo approccio, fondato su un'elevata sensibilità progettuale, conferisce a ciascuna realizzazione una sua autonomia e irripetibilità, rendendo lo studio stesso un'esplorazione della flessibilità del metodo più che la dimostrazione della sua ripetibilità.

In conclusione, la ricerca evidenzia come l'apparente unitarietà del modello dei solai a linee isostatiche si frantumi, nella pratica progettuale dello studio Nervi, in una costellazione di soluzioni individuali, in cui l'unico tratto condiviso è l'adesione a un principio di coerenza interna tra struttura, forma e costruzione, piuttosto che a una regola codificata e generalizzabile.

2 Analisi delle possibilità di calcolo

Alla luce delle analisi condotte, si è cercato di delineare con maggiore precisione l'ambito delle valutazioni strutturali che potevano essere svolte all'interno dello Studio Nervi.

L'obiettivo è comprendere se i solai a linee isostatiche siano stati effettivamente calcolati come tali, oppure se rappresentino il frutto di un'intuizione progettuale guidata principalmente da una sensibilità estetica e costruttiva.

Sono stati considerati due metodi di studio. Il primo riguarda analisi realmente condotte, per le quali è stata rinvenuta documentazione d'archivio: il caso della Sede della Cassa di Risparmio.

Il secondo caso analizza invece il processo di ricerca analitica delle linee isostatiche, ossia lo strumento teorico di cui i progettisti disponevano. Tale metodo, benché complesso e laborioso, rappresenta l'unico in grado di fornire una soluzione accettabile - in base alle condizioni iniziali del problema - relativamente alle traiettorie che descrivono le linee isostatiche.

2.1 Relazioni di Calcolo per il progetto della Sede della Cassa di Risparmio

Prima di affrontare nel dettaglio il caso della Sede della Cassa di Risparmio di Venezia, è necessario chiarire la particolare natura del solaio a linee isostatiche che la caratterizza. Esso non può essere considerato un solaio ordinario: presenta infatti peculiarità strutturali e funzionali che ne estendono il significato oltre la definizione tradizionale. Si tratta di un sistema di grande scala, sostenuto da quattro pilastri principali, che sopraelevava il piano di fondazione dell'edificio sovrastante, il quale gravava interamente su di esso.

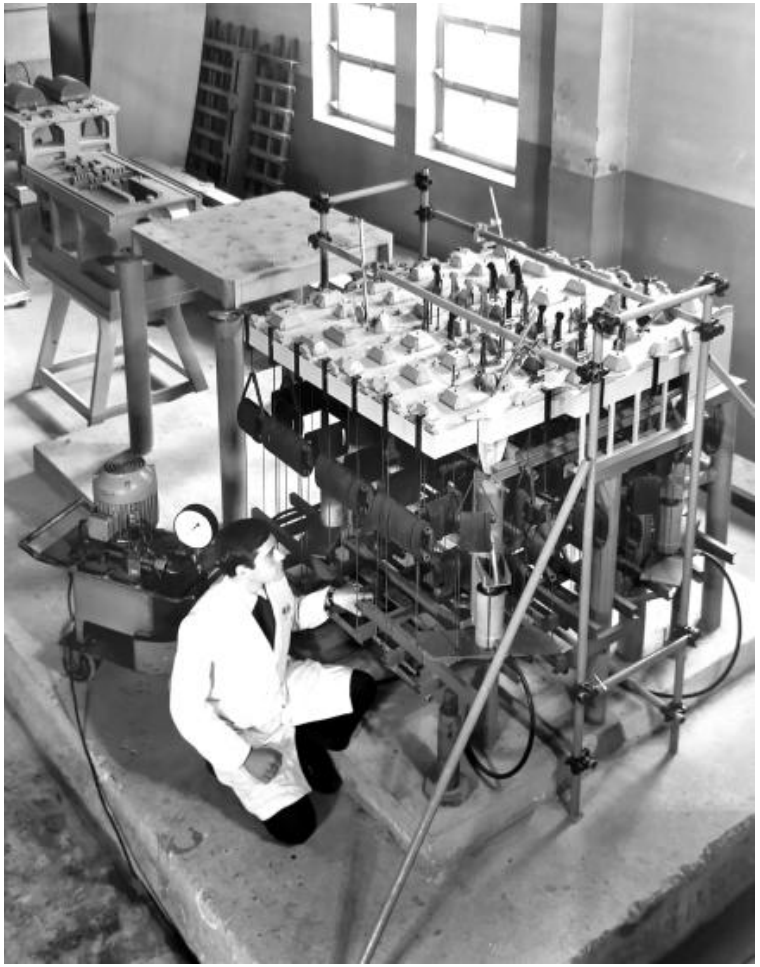
Il solaio, inoltre, con un'altezza complessiva di oltre due metri (tra nervature e soletta), accoglie e maschera al suo interno gli impianti tecnici, e al tempo stesso funge da sala di ingresso della banca, assumendo quindi anche una funzione rappresentativa e istituzionale.

Considerata la complessità statica della struttura, il solaio è stato analizzato mediante un modello elastico presso l'ISMES.

Nell'archivio del MAXXI sono stati rinvenuti due documenti di particolare rilievo:

- La relazione dell'ISMES relativa alla sperimentazione sul modello[120]
- La relazione di calcolo dell'impresa Ingg. Nervi e Bartoli[121]

Come anticipato, l'obiettivo questa analisi all'interno della ricerca è comprendere in che modo sia stato eseguito il calcolo strutturale di questo solaio, con particolare attenzione alla configurazione delle nervature curvilinee.



Prove su modello

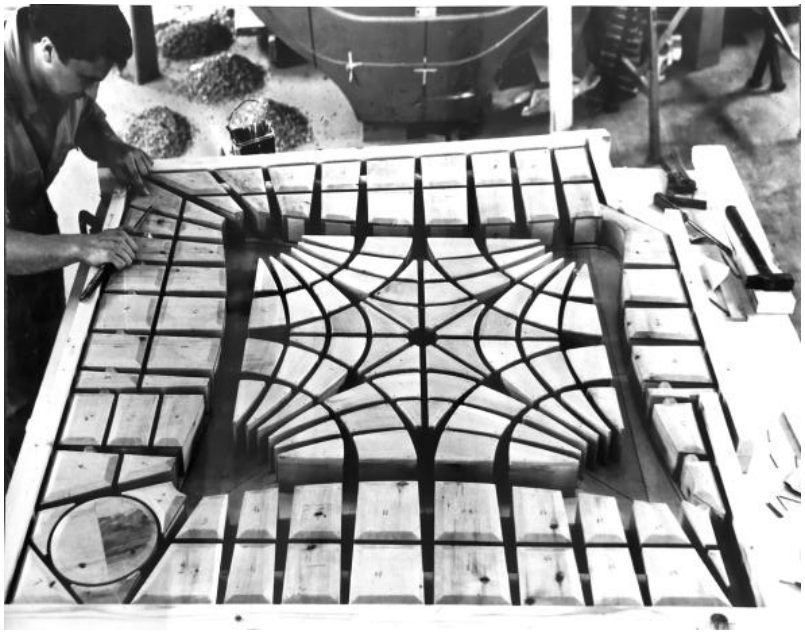
[120] MAXXI - PLN P201.3.

[121] MAXXI - PLN P198.2.

2.1.1 Relazione ISMES. Esperienza su modello elastico

La relazione, datata aprile 1968, riporta nella prima pagina "esperienze su modello elastico. Solaio di copertura del salone . *Cassa di Risparmio - Venezia*".

La relazione è composta di 9 pagine, 7 tavole e 2 foto.



Prove su modello

La relazione, firmata da Enzo Lauletta, Emanuele Fumagalli e Guido Oberti, è organizzata in questo modo:

- Premesse
- Costruzione del modello - sue caratteristiche - rapporto di similitudine
- Attrezzatura di prova e misura
- Prove di carico.

In sintesi, il documento non riporta i risultati numerici delle prove, ma si concentra sulle descrizioni metodologiche e sulle verifiche necessarie a valutare la bontà e la significatività delle misurazioni effettuate. Per garantire l'attendibilità dei dati, il modello in resine sintetiche e sabbia doveva risultare quanto più possibile comparabile alla struttura reale, riproducendo con accuratezza tutti i dettagli geometrici e meccanici rilevanti dal punto di vista statico.

La comparabilità tra il modello e la struttura effettiva è quindi stabilita attraverso parametri geometrici e meccanici che ne assicurano la coerenza in scala e in comportamento elastico. Infine, le prove di carico sono eseguite in più serie successive, con lo scopo di determinare il valore di carico di riferimento da adottare nella serie finale, ovvero quella destinata a fornire le misurazioni definitive sul comportamento del solaio.

Le tavole sono[122]:

tav.1 schema della copertura con indicazione della distribuzione dei carichi
tav.2 deformazioni unitarie $\varepsilon \cdot 10^{-5}$
tav.3 sforzi al reale in kg cm^{-2}
tav.4 deformazioni globali
tav.5 deformazioni unitarie $\varepsilon \cdot 10^{-5}$. Seconda serie di prove[123]

[122] Le tavole dalla 2 alla 7 sono tutte relative alle misurazioni per effetto del peso proprio del solaio e delle strutture sovrastanti.

[123] Nella seconda serie di prove sono stati eliminati 9 pilastrini sul bordo.

tav.6 sforzi al reale in kg cm^{-2}. Seconda serie di prove
tav.7 deformazioni globali. Seconda serie di prove

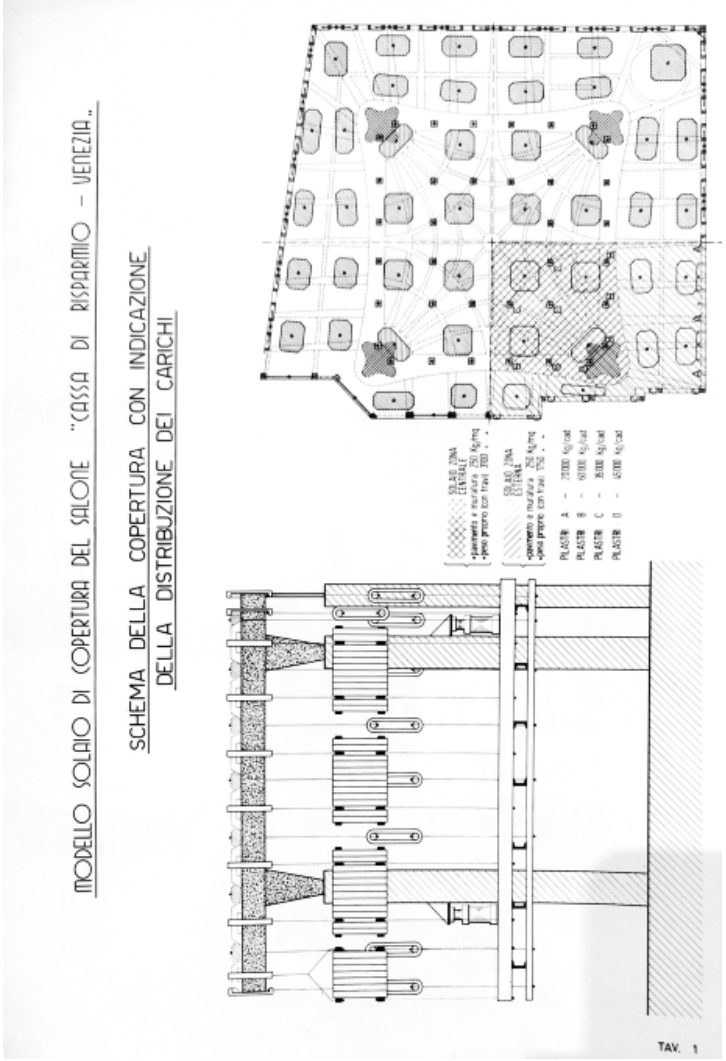
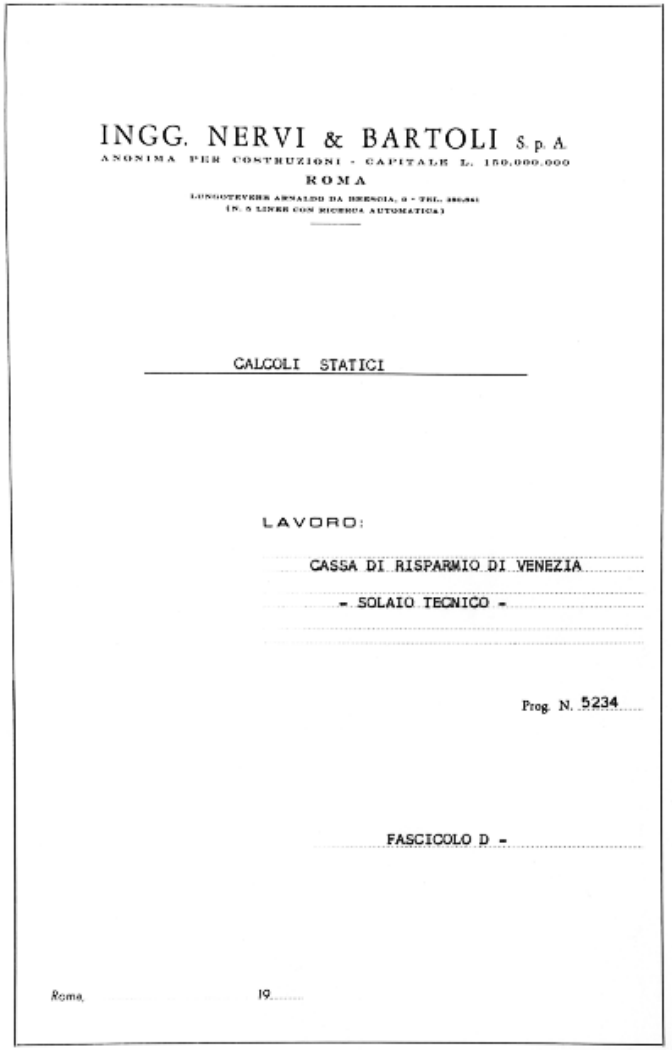


Tavola 1

2.1.2 Relazione di Calcolo dello Studio Nervi



Copertina della relazione

La copertina del documento fornisce alcune informazioni rilevanti. Innanzitutto, non è riportata una data esplicita, ma questa può essere dedotta indirettamente: nella relazione vengono infatti sintetizzati i risultati delle prove eseguite presso l'ISMES, datate aprile 1968. È dunque plausibile che la relazione sia successiva a tale data e sia stata redatta in un periodo immediatamente seguente.

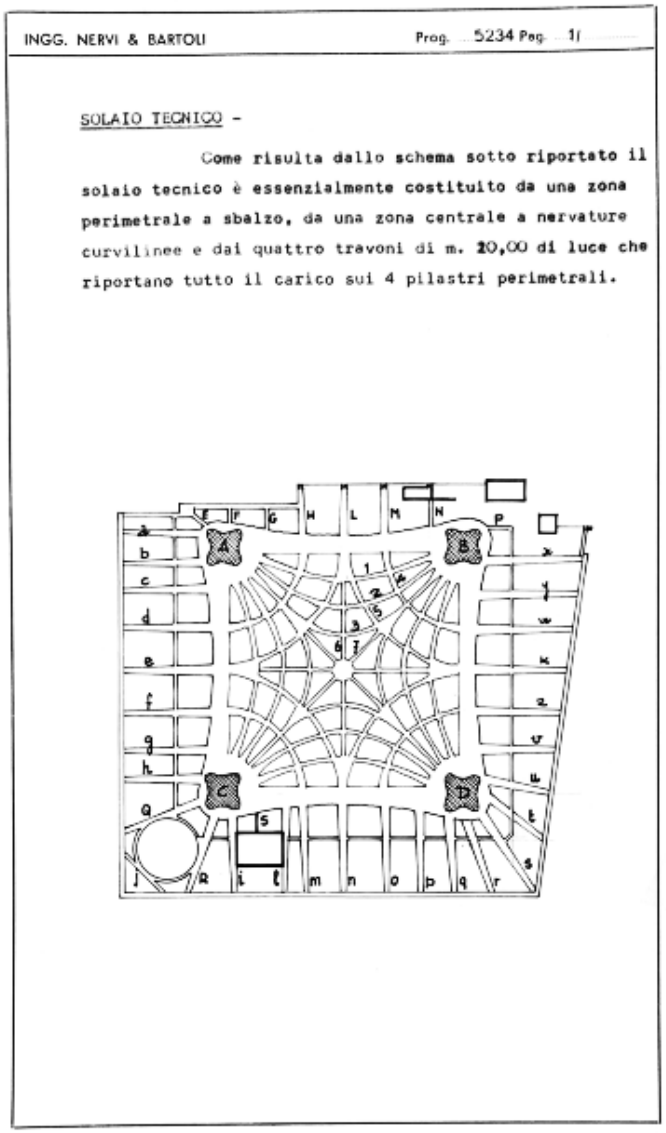
Un ulteriore elemento significativo è la denominazione della società redattrice, riportata come Ingg. Nervi e Bartoli e non come Studio Nervi. Tale distinzione suggerisce che il documento sia stato elaborato in una fase avanzata del processo progettuale, successiva alla definizione del progetto e del disegno della traiettoria delle nervature.

La relazione inizia descrivendo il *solaio tecnico*:

"Come Risulta dallo schema sotto riportato il solaio tecnico è essenzialmente costituito da una zona perimetrale a sbalzo, da una zona centrale a nervature curvilinee e dai quattro travoni di m. 20,00 di luce che riportano tutto sotto il carico sui quattro pilastri perimetrali."

E continua:

"La zona perimetrale a sbalzo ha la soletta sia superiormente che inferiormente ed è costituita dalle mensole portanti collegate da una trave di bordo a parete piena e da una trave intermedia di collegamento realizzata con schema reticolare per consentire il passaggio e la utilizzazione dei vani tecnici ricavati all'interno di detto solaio."



INGG. NERVI & BARTOLI Prog. 5234 Pag. 1/

SOLAIO TECNICO -

Come risulta dallo schema sotto riportato il solaio tecnico è essenzialmente costituito da una zona perimetrale a sbalzo, da una zona centrale a nervature curvilinee e dai quattro travoni di m. 20,00 di luce che riportano tutto il carico sui 4 pilastri perimetrali.

pagina 1

"I calcoli di verifica delle strutture sono stati collezionati nel seguente ordine:

1 SOLETTE
2 MENSOLE
3 TRAVE DI BORDO
4 TRAVE INTERNEDIA DI COLLEGAMENTO
5 ZONA CENTRALE A NERVATURE CURVILINEE
6 TRAVI PRINCIPALI"

Nello studio di questa relazione è stata presa in considerazione la parte relativa al punti 5 e 6, di cui, innanzitutto si riporta un indice da noi elaborato.

5 ZONA CENTRALE A NERVATURE CURVILINEE

1 Primo dimensionamento del solaio come Piastra. Analisi del carico
1.1 Carico totale
- Momento in campata
- Momento all'incastro

1.2 Carico concentrato
- Momento in campata
- Momento all'incastro

1.3 Momento totale in campata
- Area ferri

1.4 Momento totale all'incastro
- Area Ferri

2 Verifica del solaio a nervature curvilinee

2.1 Nervatura centrale
- 2.1.1 Sezione in campata
  - Momento (semincastro) con carico triangolare
  - Momento con carico dalle altre nervature
  - Momento totale
  - Area Ferri
- 2.1.2 Sezione all'incastro. Momento
- 2.1.3 Verifica a taglio
  - Nell'appoggio
  - In mezzeria
  - Sforzo di scorrimento
  - Area Staffe

2.2 Nervatura N 2 curvilinea. Analisi del carico
- 2.2.1 Sezione in campata
  - Momento
  - Area Ferri
- 2.2.2 Sezione all'incastro. Momento
- 2.2.3 Verifica a taglio in ogni punto
  - Area Staffe

2.3 Nervatura N 3 curvilinea. Analisi del carico
- 2.3.1 Sezione in campata
  - Momento
  - Area Ferri
- 2.3.2 Sezione all'incastro. Momento
- 2.3.3 Verifica a taglio in un punto

6 TRAVI PRINCIPALI

1 Carichi
1.1 ripartiti
1.2 concentrati
1.3 Momento

2 Momenti di continuità trave C-D
2.1 Momento lato C
2.2 Momento lato D
2.3 Momento in campata
2.4 Asse neutro. Momento di inerzia
2.5 Analisi delle sollecitazioni

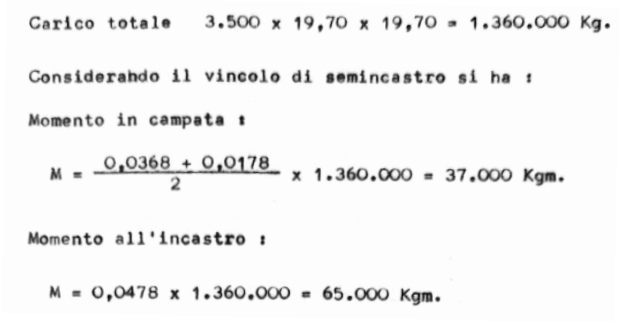
3 Momenti di continuità trave A-C (e B-D)
3.1 Momento lato C
3.2 Momento lato A
3.3 Momento in campata
3.4 Asse neutro. Momento di inerzia
3.5 Analisi delle sollecitazioni

4 Momenti di continuità trave A-B
4.1 Momento lato A
4.2 Momento lato B
4.3 Momento in campata

5 Verifica a taglio
5.1Area Staffe

Da una prima lettura delle sezioni 5 e 6 della relazione emerge che il procedimento seguito prevede, in sequenza, la valutazione dei carichi, il calcolo dei momenti flettenti e, successivamente, la determinazione delle armature. Tuttavia, non viene fornito alcun riferimento al fatto che le nervature siano state tracciate in corrispondenza delle linee isostatiche; al contrario, esse vengono semplicemente descritte come "nervature curvilinee", senza ulteriori specificazioni di carattere teorico o metodologico.

Nella prima parte della sezione 5, la struttura viene considerata e valutata come una piastra; le analisi presentate, infatti, hanno carattere preliminare e di massima. È verosimile che la funzione di questa sezione sia quella di definire un ordine di grandezza dei carichi e delle sollecitazioni agenti sul sistema strutturale. Il calcolo è condotto mediante valori tabellari, dei quali riportiamo un esempio relativo al carico totale (1.1).


Carico totale 3.500 x 19,70 x 19,70 = 1.360.000 Kg.

Considerando il vincolo di semincastro si ha :

Momento in campata :

$$M = \frac{0,0368 + 0,0178}{2} \times 1.360.000 = 37.000 \text{ Kgm.}$$

Momento all'incastro :

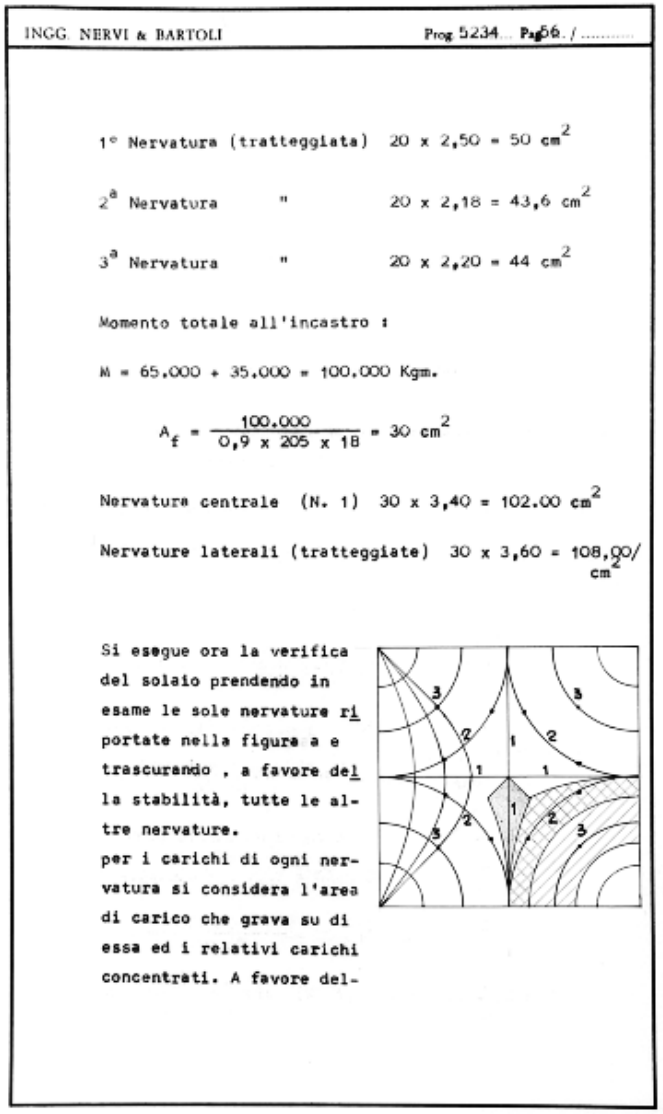
M = 0,0478 x 1.360.000 = 65.000 Kgm.

Dopo aver determinato che il carico complessivo - derivante da sovraccarico, neve, impermeabilizzazione, soletta e nervature - è pari a 3.500 kg/mq, per un carico totale di 1.360.000 kg, viene eseguita la valutazione del momento in campata, assumendo per la struttura un vincolo di semincastro.

Tale valutazione è condotta mediante la media dei coefficienti tabellari (0.0368 e 0.0178), corrispondenti rispettivamente al caso di piastra semplicemente appoggiata e di piastra incastrata al contorno. Si può ipotizzare che questi valori di riferimento siano tratti dal terzo volume del manuale di Belluzzi[124]. Al contrario, non è stato possibile individuare il valore utilizzato per la determinazione del momento all'incastro.

[124] Belluzzi O., *Scienza delle costruzioni vol.3*, Bologna 1980.
Paragrafo 630: la lastra rettangolare appoggiata al contorno. Carico uniforme.
Paragrafo 634: la lastra rettangolare incastrata al contorno. Carico uniforme.
L'uso di questo manuale è plausibile poiché la prima è del 1961.

Successivamente si passa subito alla verifica del solaio.



INGG. NERVI & BARTOLI Prog 5234 Pag 56 / .....

1° Nervatura (tratteggiata) 20 x 2,50 = 50 cm^2

2ª Nervatura " 20 x 2,18 = 43,6 cm^2

3ª Nervatura " 20 x 2,20 = 44 cm^2

Momento totale all'incastro :

M = 65.000 + 35.000 = 100.000 Kgm.

$$A_f = \frac{100.000}{0,9 \times 205 \times 18} = 30\ cm^2$$

Nervatura centrale (N. 1) 30 x 3,40 = 102.00 cm^2

Nervature laterali (tratteggiate) 30 x 3,60 = 108,00/ cm^2

Si esegue ora la verifica del solaio prendendo in esame le sole nervature riportate nella figura a e trascurando , a favore della stabilità, tutte le altre nervature.
per i carichi di ogni nervatura si considera l'area di carico che grava su di essa ed i relativi carichi concentrati. A favore del-

Nella verifica delle travi, vengono prese in considerazione solo quelle rappresentate nella figura di riferimento; risultano infatti assenti - come evidenziato nella pagina 1 - le travi diagonali. Tale scelta appare giustificata da un criterio di calcolo cautelativo, volto a ottenere una valutazione in favore di stabilità.

L'analisi strutturale, infatti, risulta condotta soltanto su tre delle sette nervature complessive, come indicato nella tavola riportata a pagina 1.

Le travi analizzate sono considerate elementi rettilinei soggetti sia a carichi concentrati sia a un carico distribuito, determinato in funzione dell'area di influenza rappresentata dal tratteggio nella figura precedente.

A titolo esemplificativo, si riporta il calcolo relativo alla nervatura curvilinea n. 2, illustrato nelle pagine seguenti.

La relazione descrive il procedimento nei seguenti termini: "Si considera la luce a sviluppo trascurando gli effetti di torsione eliminati dalle nervature che la interessano. I carichi si assimilano a carichi concentrati nei punti di incrocio con le altre nervature".

Questa premessa risulta particolarmente significativa per comprendere l'approccio adottato nel modello di calcolo: le nervature curvilinee vengono infatti considerate come travi appoggiate con vincolo di semincastro e carichi puntuali, senza alcun riferimento alle linee isostatiche dei momenti principali.

Non vengono quindi presi in considerazione né gli effetti benefici legati alla possibile assenza dei momenti torcenti, né la collaborazione torsionale tra nervature in corrispondenza dei loro

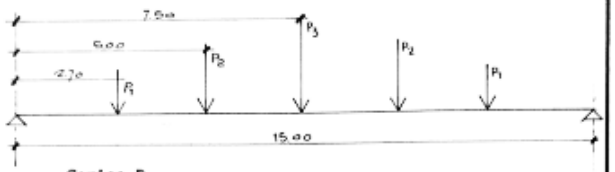
incroci, né, infine, il comportamento strutturale proprio di una trave curva.

INGG. NERVI & BARTOLI Prog 5234 Pag 60 / .....

Nervatura N° 2 curvilinea -

Si considera la luce a sviluppo trascurando gli effetti di torsione eliminati dalle nervature che la interessano.

I carichi si assimilano a carichi concentrati nei punti di incrocio con le altre nervature :



Carico P_1

2,00 x 2,20 x 3.500 = 15.400 Kg.

Carico P_2

2,30 x 2,20 x 3.500 + 35.000 = 52.800 Kg.

Carico P_3

$$2{,}60 \times 2{,}90 \times 3.500 + \frac{3{,}90 \times 1{,}20}{2} \times 3.500 = 35.000 \text{ Kg.}$$

Con il vincolo di semincastro si ha :

Sezione in campata :

$$M = \frac{15.400}{2}\left(2{,}70 + \frac{\overline{2{,}70}^{\,2}}{15}\right) + \frac{52.800}{2}\left(5{,}00 + \frac{\overline{5{,}00}^{\,2}}{15}\right) + \frac{35.000 \times 15{,}00}{6} = 24.600 +$$

+ 176.000 + 87.400 = 288.000 Kgm.

Pagina 60

INGG. NERVI & BARTOLI Prog 5234 Pag 61 / .....

$$\alpha = \frac{205}{\sqrt{288.000}} = 0{,}382 \qquad \sigma_c = 62 \text{ Kg/cm}^2$$

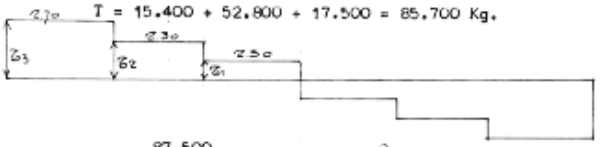
$$A_f = \frac{288.000}{0{,}9 \times 205 \times 20} = 78 \text{ cm}^2$$

Sezione all'incastro :

$$M = \frac{15.400 \times 2{,}70 \times 12{,}30}{15} + \frac{52.800 \times 5{,}00 \times 10{,}00}{15} + \frac{35.000 \times 15{,}00}{8} = 34.000 + 176.000 + 66.000 =$$

= 276.000 Kg/m.

Verifica a taglio :



$T = 15.400 + 52.800 + 17.500 = 85.700$ Kg.

$$\tau_3 = \frac{87.500}{0{,}9 \times 215 \times 40} = 11{,}30 \text{ Jg/cm}^2$$

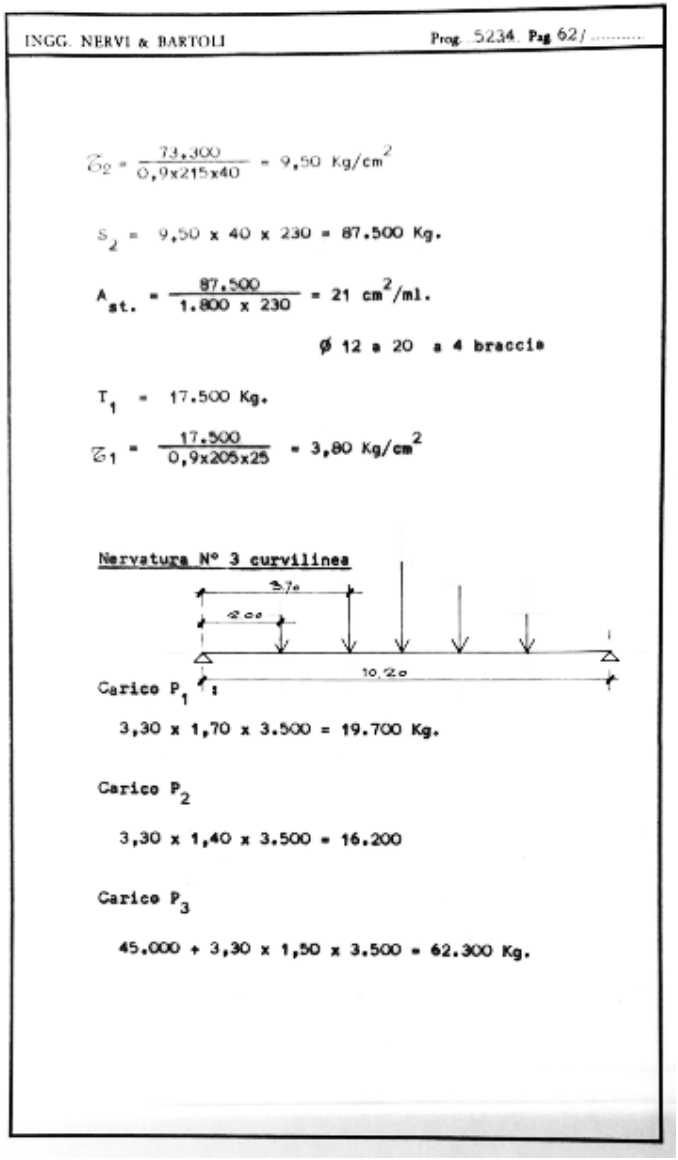
$S_3 = 11{,}30 \times 40 \times 215 = 97.000$ Kg.

$$A_{st.} = \frac{97.000}{1.800 \times 2{,}70} = 20 \text{ Cm}^2/\text{ml.}$$

Ø 2 a 20 (4 braccia)

$T_2 = 17.500 + 52.800 = 73.300$ Kg.

Pagina 61



INGG. NERVI & BARTOLI — Prog. 5234. Pag 62/.....

$\sigma_2 = \frac{73.300}{0,9 \times 215 \times 40} = 9,50 \text{ Kg/cm}^2$

$S_2 = 9,50 \times 40 \times 230 = 87.500 \text{ Kg.}$

$A_{st.} = \frac{87.500}{1.800 \times 230} = 21 \text{ cm}^2/\text{ml.}$

ø 12 a 20 a 4 braccia

$T_1 = 17.500 \text{ Kg.}$

$\sigma_1 = \frac{17.500}{0,9 \times 205 \times 25} = 3,80 \text{ Kg/cm}^2$

Nervatura N° 3 curvilinea

Carico P_1

3,30 x 1,70 x 3.500 = 19.700 Kg.

Carico P_2

3,30 x 1,40 x 3.500 = 16.200

Carico P_3

45.000 + 3,30 x 1,50 x 3.500 = 62.300 Kg.

Pagina 62

Le conclusioni della relazione di calcolo riportano fanno riferimento sia a questo documento che ai risultati delle sperimentazioni effettuate all'ISMES:

"Considerazioni sulla struttura del solaio tecnico con confronto dei risultati dei calcoli di verifica con i risultati delle prove su modello.

Come si può constatare dallo schema riportato all'inizio di questo fascicolo la struttura del solaio risulta fortemente iperstatica e gli schemi di vincolo che via via sono stati adottati per la verifica delle varie parti della struttura non hanno tenuto certamente conto di tutte le componenti iperstatiche; questo va certamente a favore della stabilità e possiamo senz'altro affermare che le sollecitazioni sopra determinate per le varie strutture sono notevolmente superiori alle reali sollecitazioni di lavoro.

Quanto sopra è confermato anche dalle prove eseguite su un modello elastico in scala 1: 25 presso l'Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) di Bergamo, che hanno dato valori di sollecitazioni molto più bassi.

E' necessario tenere presente che nelle prove su modello elastico si opera con un materiale perfettamente omogeneo ed isotropo che pertanto esclude parziali reazioni delle sezioni resistenti.

Altra cosa della quale occorre tenere conto è che, nella prova su modello, mentre i carichi concentrati (pilastri sovrastanti il solaio) comprendevano sia i carichi permanenti sia i sovraccarichi 11 carico ripartito (zona centrale e zona perimetrale a sbalzo) non comprendeva i sovraccarichi accidentali previsti nelle solette superiori e inferiori del solaio.

Nel confronto delle sollecitazioni ottenute dai calcoli con quelle risultanti dalle prove su modello, è necessario aumentare queste ultime del 6% per tener conto dei sovraccarichi suddetti.

Nella tabella che segue sono riportate le sollecitazioni ottenute per alcune strutture dalla prova su modello e dai calcoli di verifica."

In conclusione, l'insieme delle verifiche analitiche e delle prove sperimentali condotte presso l'ISMES convergono verso un quadro complessivamente rassicurante in termini di comportamento strutturale e margine di sicurezza.

Le verifiche mostrano che i valori di progetto risultano superiori a quelli effettivamente riscontrati in esercizio, come confermato dai risultati ottenuti sul modello in scala. Tale condizione rimane valida anche dopo l'adeguamento maggiorativo del 6%, introdotto per tenere conto dei sovraccarichi accidentali non applicati durante la prova.

Dalle analisi emerge quindi un margine favorevole tra domanda e capacità, a beneficio della sicurezza globale del sistema strutturale. Alla luce di questi risultati, si può concludere che il solaio soddisfa pienamente le verifiche previste, garantendo adeguati margini di sicurezza rispetto alle azioni di esercizio e alle combinazioni di progetto.

2.1.3 Conclusione dell'analisi delle relazioni

Le relazioni di calcolo redatte dalla società Nervi e Bartoli e dall'ISMES restituiscono un quadro che, in precedenza, poteva essere soltanto ipotizzato. Dall'analisi dei documenti emerge infatti che, nella realizzazione dei solai a linee isostatiche, queste ultime si traducono, di fatto, soltanto in nervature curvilinee, con una conseguente perdita del principio originario di corrispondenza tra forma e struttura che aveva ispirato l'impostazione teorica del modello.

Non è tuttavia possibile affermare con certezza che tale interpretazione sia del tutto corretta, poiché non disponiamo di elementi sufficienti per escludere che, durante la fase di disegno delle nervature, siano state comunque svolte valutazioni preliminari di natura isostatica. Allo stesso modo, non è lecito estendere questa osservazione in modo generalizzato a tutti i progetti realizzati nel medesimo periodo o dallo stesso studio.

Ciò che può invece essere affermato con sicurezza è che, nel caso in esame, la verifica strutturale e il dimensionamento delle armature non tengono conto delle proprietà meccaniche di flessione associate alle linee isostatiche. Inoltre, la validazione del comportamento statico complessivo risulta affidata alle prove sperimentali condotte su modelli in scala, le quali assumono un ruolo determinante nella definizione e nella conferma delle prestazioni della struttura.

2.2 Metodo analitico

Il metodo analitico per descrivere l'andamento delle linee isostatiche rappresenta l'unico approccio originariamente disponibile durante le sperimentazioni e rimane, ancora oggi, il mezzo più rigoroso. Per questo motivo, di seguito, si intende indagare tale metodo.

Si è scelto di prendere in considerazione un modello semplice ma rappresentativo: la piastra quadrata. Questo modello offre il vantaggio di una configurazione geometrica regolare e di un comportamento facilmente interpretabile. La scelta non è casuale: è verosimile che questo modello sia stato effettivamente oggetto di riflessione nelle prime fasi della ricerca. In particolare, nei disegni di Aldo Arcangeli (ivi, parte 1, p. 86) si rintracciano studi dedicati proprio alla piastra quadrata, dai quali emerge un interesse per il variare delle traiettorie isostatiche in funzione delle condizioni di vincolo.

Il modello della piastra quadrata risulta inoltre rilevante in relazione al solaio del *Lanificio Gatti* (ivi, parte 2, p. 142). Come già detto, la descrizione del sistema "a fungo" di una piastra quadrata non trova piena corrispondenza con la configurazione effettivamente realizzata della medesima piastra "tra pilastri". Tale discrepanza sottolinea una certa ambiguità interpretativa già presente nelle prime applicazioni della teoria.

Una simile ambiguità si riscontra anche nel brevetto n. 455678 di Arcangeli, in particolare nelle figure 1[125] e 2, dove la rappresentazione in pianta e in sezione mostra un taglio del disegno anomalo: la soluzione illustrata appare ibrida, intermedia tra il solaio "a fungo" e quello "tra pilastri". In essa coesistono, come si vede nell'immagine seguente, due logiche differenti: un solaio a fungo (in rosso) con metà dei campi adiacenti e contemporaneamente un solaio tra pilastri (in blu) con metà dei campi adiacenti. In questo ultimo caso si può inoltre osservare che la sezione del disegno è tracciata oltre l'asse degli appoggi, a evidenziare la singolarità della rappresentazione.

Il disegno restituisce dunque simultaneamente due interpretazioni strutturali, mettendo in evidenza le - probabili- difficoltà, in quella fase, di definire un modello univoco.

L'unico elemento che consente di attribuire tale rappresentazione alla soluzione di tipo "a fungo" è la presenza del capitello nel punto di appoggio, che svolge la funzione di distribuire i carichi verticali e di evitare il punzonamento.

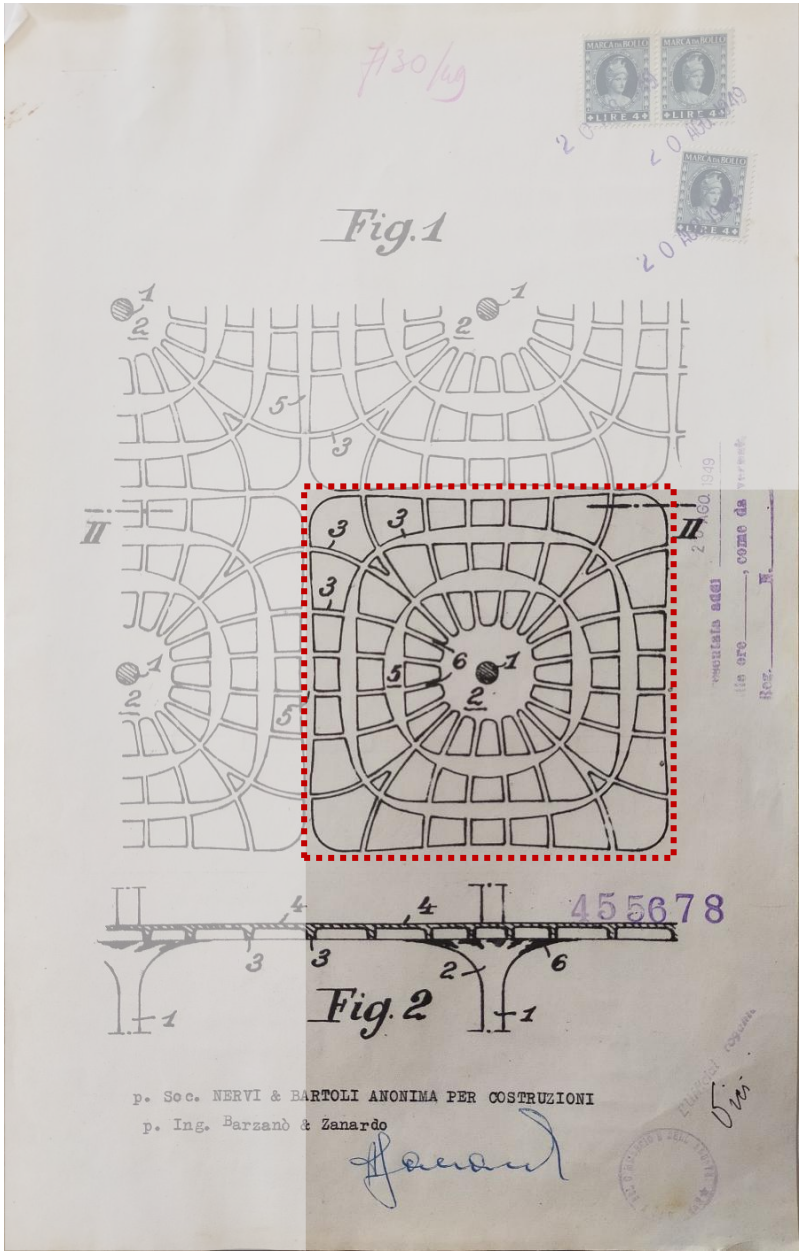
Come spiega Eduardo Torroja[126]:

> *Un'altra differenza fra piastra a fungo e piastra vincolata al contorno risiede nella importanza relativa della sollecitazione tangenziale. Nelle lastre a fungo, il carico applicato a ciascun pannello si scarica sul perimetro, necessariamente limitato, del piedritto. Ad evitare il pericolo di punzonamento, la testa del piedritto viene munita di un capitello che aumenta il perimetro destinato ad assorbire gli sforzi taglianti, e che contribuisce anche ad assorbire le flessioni che si concentrano in prossimità degli appoggi.*

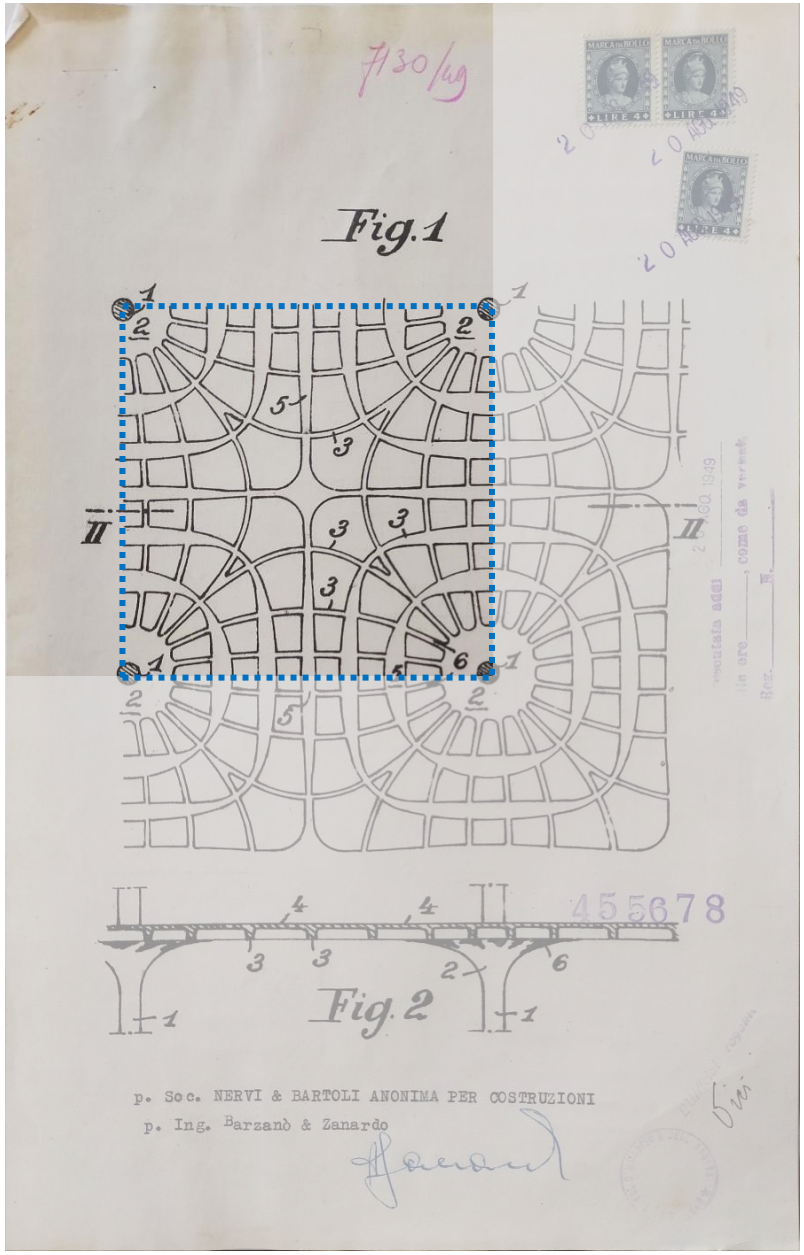
Per questi motivi si è deciso di lavorare sulla piastra quadrata al variare dei vincoli di appoggio.

[125] Di cui si può vedere una rielaborazione della tavola preparatoria a pag. 148 che mostra una configurazione ben diversa.

[126] Torroja E., *Razón y ser de los tipos estructurales*, Madrid 1957 (trad. it., *La concezione strutturale. Logica ed intuito nella ideazione delle forme*, Torino 1995).



solaio a fungo



Solaio tra pilastri

2.2.1 Soluzioni analitiche delle piastre

Secondo la teoria classica delle piastre sottili, la flessione della piastra è governata dall'equazione differenziale[127].

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\,\partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{B} \qquad (1)$$

Dove

w è la flessione della piastra
p è il carico
$B = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$ è la rigidezza a flessione
h è l'altezza della sezione§
E è il modulo elastico
ν è il modulo di Poisson

I momenti flettenti M_x, M_y, il momento torcente M_{xy} sono espressi in funzione della flessione w

$$M_x = -B\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right);\ M_y = -B\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)$$

$$M_{xy} = -(1-\nu)B\frac{\partial^2 w}{\partial x\,\partial y} \qquad (2)$$

Per una piastra in flessione le linee isostatiche sono le traiettorie delle direzioni dei momenti principali. La loro pendenza $r = \frac{dy}{dx}$:

$$r_{1,2} = \frac{1}{2}\left[\frac{M_y - M_x}{M_{xy}} \pm \sqrt{\left(\frac{M_y - M_x}{M_{xy}}\right)^2 + 4}\right] \qquad (3)$$

In mancanza di documentazione diretta relativa alle soluzioni analitiche originariamente impiegate da Arcangeli e Nervi, si è fatto riferimento a metodi coerenti con quelli esposti da Nadai nel suo trattato sulle piastre elastiche[128]. Tale scelta trova fondamento nella presenza, nell'archivio di Aldo Arcangeli, di appunti manoscritti che testimoniano un approfondito studio di quel volume.

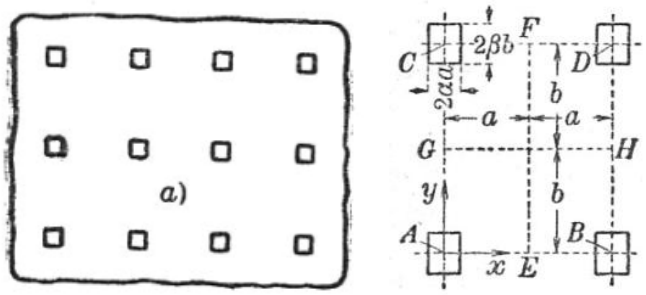
I modelli selezionati sono: *Soluzione a fungo, soluzione con appoggi sugli angoli, soluzione con appoggi distribuiti sul bordo*.

Tali modelli sono quelli indagati dai disegni di Arcangeli, nella disamina del *Lanificio Gatti* e nei disegni del brevetto 455678.

[127] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., *Theory of Plates and Shells*, New York 1959.

[128] Le soluzioni selezionate riportano nelle note il riferimento del testo: Nadai A., *Die elastischen Platten. Die Grundlagen und Verfahren zur Berechnung ihrer Formänderungen und Spannungen, sowie die Anwendungen der Theorie der ebenen zweidimensionalen elastischen Systeme auf praktische Aufgaben*, Berlin, 1925.

Soluzione a fungo[129]



Consideriamo il caso del solaio esteso indefinitivamente in tutte le direzioni (e quindi con infiniti pilastri), sorretto da pilastri disposti in file ortogonali tra loro, ossia situati nei vertici di rettangoli uguali. La struttura sia soggetta a un carico uniforme p agente sull'intero solaio. In queste condizioni, tutti i campi rettangolari della lastra si comportanto nello stesso modo.

Le condizioni che la superficie elastica soddisfare $w = w(x, y)$ deve sono (figura in alto a destra):

$$\begin{cases} \mathrm{w} = 0 \text{ nei punti } \mathrm{A, B, C, D} \\ \dfrac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} = 0 \text{ nei punti delle rette } \mathrm{AC, BD, EF} \\ \dfrac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}} = 0 \text{ nei punti delle rette } \mathrm{AB, CD, GH} \end{cases}$$

(4)

Si prende, quindi, in considerazione la soluzione mediante le serie doppie.

[129] Belluzzi O., *Scienza delle costruzioni vol.3*, Bologna 1980. Capitolo 26: Le lastre piane; Paragrafo 648: I solai a fungo. Sovraccarico totale.

Indichiamo qui con $\mathrm{2a\ e\ 2b}$ le dimensioni di ogni campo, che è soggetto al carico $\mathrm{4pab}$. Supponiamo che le sommità delle teste dei pilastri siano rettangolari, di dimensioni $\mathrm{2a\alpha}$ e $\mathrm{2b\beta}$ (α e β numeri minori di 1);. Ogni campo della lastra è dunque soggetto nella maggior parte della sua superficie al carico uniforme p rivolto in basso, e nei rettangoli corrispondenti alle teste dei pilasti alla forza pure uniforme rivolta in alto.

Tale distribuzione di carico periodico (cioè che si ripete in ogni campo) si può rappresentare con la serie doppia di Fourier:

$$\begin{aligned} &\mathrm{p(x,y)} \\ &= -\mathrm{p}(2\sum_{\mathrm{m=1}}^{\infty}\frac{\sin(\mathrm{m\pi\alpha})}{\mathrm{m\pi\alpha}}\cos\left(\frac{\mathrm{m\pi x}}{\mathrm{a}}\right) \\ &+ 2\sum_{\mathrm{n=1}}^{\infty}\frac{\sin(\mathrm{n\pi\,\beta})}{\mathrm{n\pi\,\beta}}\cos\left(\frac{\mathrm{n\pi y}}{\mathrm{b}}\right) \\ &+ 4\sum_{\mathrm{m=1}}^{\infty}\sum_{\mathrm{n=1}}^{\infty}\frac{\sin(\mathrm{m\pi\alpha})}{\mathrm{m\pi\alpha}}\frac{\sin(\mathrm{n\pi\,\beta})}{\mathrm{n\pi\,\beta}}\cos\left(\frac{\mathrm{m\pi x}}{\mathrm{a}}\right)\cos\left(\frac{\mathrm{n\pi y}}{\mathrm{b}}\right)) \end{aligned}$$

(5)

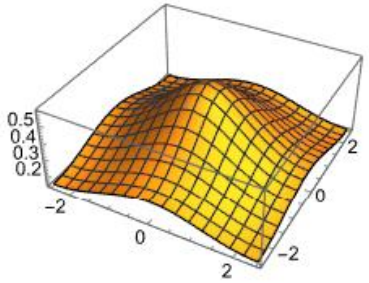
dove $\mathrm{m\ e\ n}$ sono successivamente tutti i numeri interi (pari e dispari). Quindi, per la (1) si deduce la funzione $\mathrm{w(x,y)}$ integrando quattro volte $\mathrm{p(x,y)}$ e si ottiene

$$w = c - \frac{p}{(\pi^4 B)} * \left(2a^4 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1}{m^4}\right) * \frac{\sin(m\pi\alpha)}{m\pi\alpha} * \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) + 2b^4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^4}\right) * \frac{\sin(n\pi\beta)}{n\pi\beta} * \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) + 4a^4 b^4 \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{\sin(m\pi\alpha)}{m\pi\alpha} * \frac{\sin(n\pi\beta)}{n\pi\beta}}{((m^2b^2 + n^2a^2)^2)} * \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) * \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \right)$$

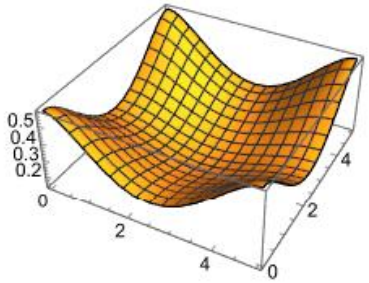
(6)

Il valore della costante *c* si ricava tenendo in considerazione $w = 0$ per $x = 0, y = 0$. La funzione w è tale che soddisfa già spontaneamente alla seconda e alla terza delle condizioni (4).

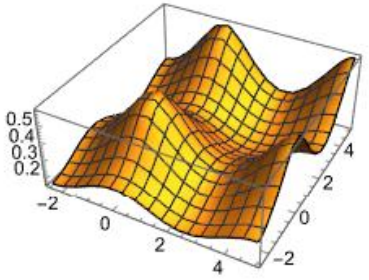
Siamo dunque in grado di calcolare l'abbassamento w di un punto qualsiasi. I momenti $M_x\, M_y\, M_{xy}$ si deducono dalla (2) e le pendenze $r_{1,2}$ dalla (3).



Deformata della piastra nella porzione sul pilastro



Deformata della piastra nella porzione tra due pilastri



Deformata della piastra nella porzione analoga a quella del brevetto 455678

Soluzione con appoggi sugli angoli[130]

Poiché l'Equazione (1) è lineare, possiamo cercarne la soluzione nella forma:

$$w = w_o + w_1 \tag{7}$$

Dove w_o è la soluzione particolare e w_1 è la soluzione omogenea.

$$w_o = \left(\frac{p}{48\,(1-\nu)B}\right)[\,5(a^4 + b^4) - 6\nu a^2 b^2 - 6(a^2 - \nu b^2)x^2 - 6(b^2 - \nu a^2)y^2 + x^4 - 6\nu x^2 y^2 + y^4] \tag{8}$$

Considerando qui con $2a$ e $2b$ le dimensioni della piastra rettangolare.

$$w_1 = \frac{p}{B}\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^{n-1}\left(\frac{A_n \cosh(\alpha_n y)}{\cosh(\alpha_n b)} + \frac{B_n\, y \sinh(\alpha_n y)}{a\cosh(\alpha_n b)}\right)\cos(\alpha_n x) + \frac{p}{B}\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^{n-1}\left(\frac{C_n \cosh(\beta_n x)}{\cosh(\beta_n a)} + \frac{D_n\, x \sinh(\beta_n x)}{b\cosh(\beta_n a)}\right)\cos(\beta_n y) \tag{9}$$

Dove:

$$\alpha_n \equiv \frac{(2n+1)\pi}{2a};\quad \beta_n \equiv \frac{(2n+1)\pi}{2b}$$

$$(n = 0, 1, 2, 3, \dots) \tag{10}$$

$$B_n\left(\frac{3+\nu}{1-\nu} * \tanh(\alpha_n b) - \frac{\alpha_n b}{\cosh^2(\alpha_n b)}\right) = \left(\frac{4}{b}\right)\sum_{m=0}^{\infty} D_m \left(\frac{\alpha_n {\beta_m}^2}{({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)^2} + \frac{b}{{\alpha_n}^3}\right)$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots) \tag{11}$$

$$D_n = B_n \tag{12}$$

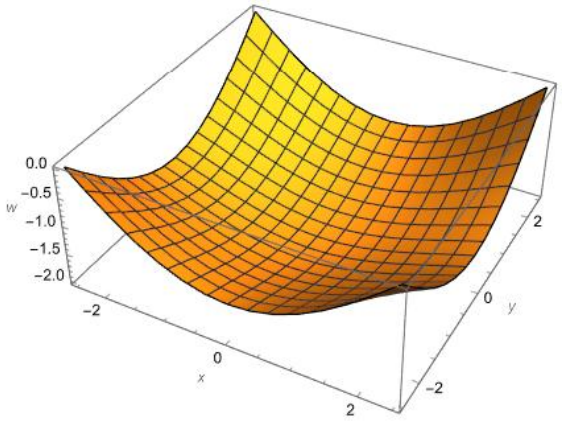
$$A_n = -\left(\frac{bB_n}{a}\right)\left(\tanh(\alpha_n b) + \frac{2}{(1-\nu)}\,\frac{1}{(\alpha_n b)}\right) \tag{13}$$

$$C_n = -\left(\frac{aD_n}{b}\right)\left(\tanh(\beta_n a) + \frac{2}{(1-\nu)}\,\frac{1}{(\beta_n a)}\right)$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots) \tag{14}$$

[130] Batista M., *New analytical solution for bending problem of uniformly loaded rectangular plate supported on corner points*, in «The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering», Vol. 3, n. 2, Novembre 2010, pp.75-84.

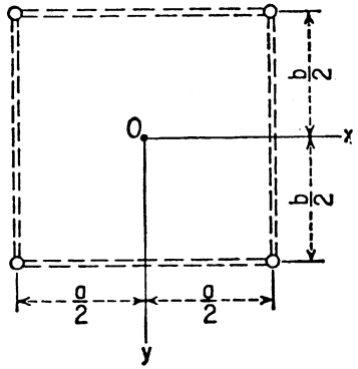
Siamo dunque in grado di calcolare l'abbassamento w di un punto qualsiasi. I momenti $M_x\, M_y\, M_{xy}$ si deducono dalla (2) e le pendenze $r_{1,2}$ dalla (3).



Deformata della piastra

Soluzioni con appoggi distribuiti sul bordo[131]

Consideriamo una piastra soggetta a una pressione uniforme e sostenuta lungo il perimetro da quattro travi flessibili. Tutte le travi si suppone abbiano appoggi rigidi agli angoli della piastra, e due travi parallele tra loro possono avere la stessa rigidezza flessionale.



132

$$w = \left(\frac{p}{384\,B\,(\gamma+\delta)}\right)[\,\gamma(16x^4 - 24a^2x^2 + 5a^4) + \delta(16y^4 - 24b^2y^2 + 5b^4)] + \sum A_n \cosh\left(\frac{n\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) + \sum B_n \cosh\left(\frac{n\pi x}{b}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) + \sum C_n y \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) + \sum D_n x \sinh\left(\frac{n\pi x}{b}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$$

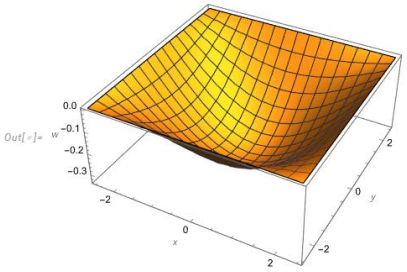
(15)

dove $\frac{\delta}{\gamma}$ e $A_n, \dots, D_n$ sono alcune costanti; $n = 1,3,5, \dots$; soddisfano l'equazione differenziale della piastra (1), nonché le condizioni di simmetria.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \text{ per } y = \dfrac{a}{2} \\ \dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \text{ per } x = \dfrac{b}{2} \\ w(x,y) = 0 \text{ per } y = \dfrac{a}{2} \\ w(x,y) = 0 \text{ per } x = \dfrac{b}{2} \end{cases}$$

(16)

Siamo dunque in grado di calcolare l'abbassamento w di un punto qualsiasi. I momenti $M_x\, M_y\, M_{xy}$ si deducono dalla (2) e le pendenze $r_{1,2}$ dalla (3).



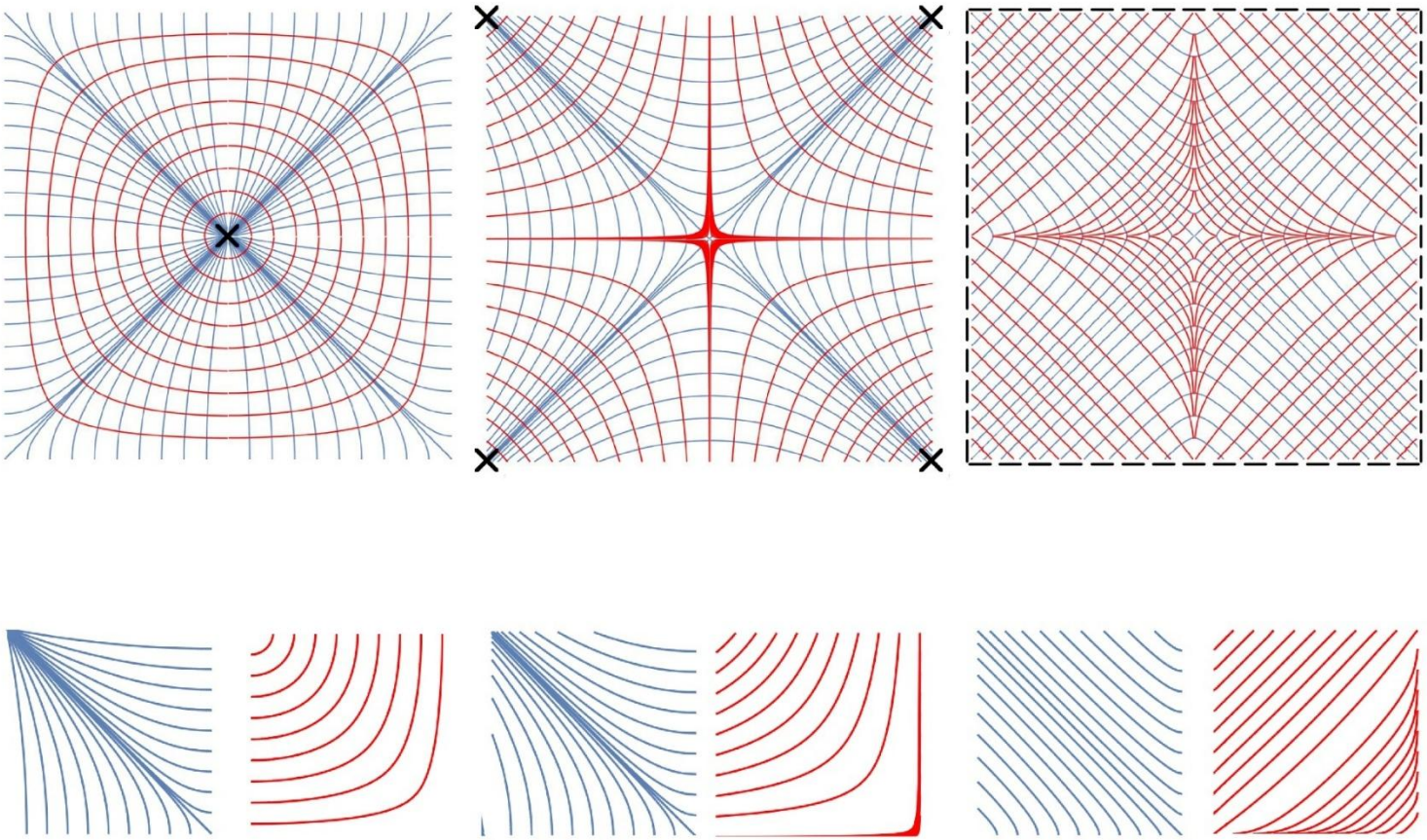
Deformata della piastra

[131] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., *Theory of Plates and Shells*, New York 1959. Capitolo 6: Rectangular plates with various edge conditions; Paragrafo 49: Rectangular plates having four edges supported elastically or resting on corner points with all edges free.

[132] In questo caso a e b sono pari a lato intero e non al semilato del caso precedente.

Tramite la valutazione della pendenza dei momenti flettenti è possibile ricostruire l'andamento delle linee isostatiche nelle tre diverse soluzioni analizzate. Sebbene le loro configurazioni globali presentino differenze significative, l'osservazione della porzione angolare comune consente di riconoscere analoghe distribuzioni delle traiettorie.

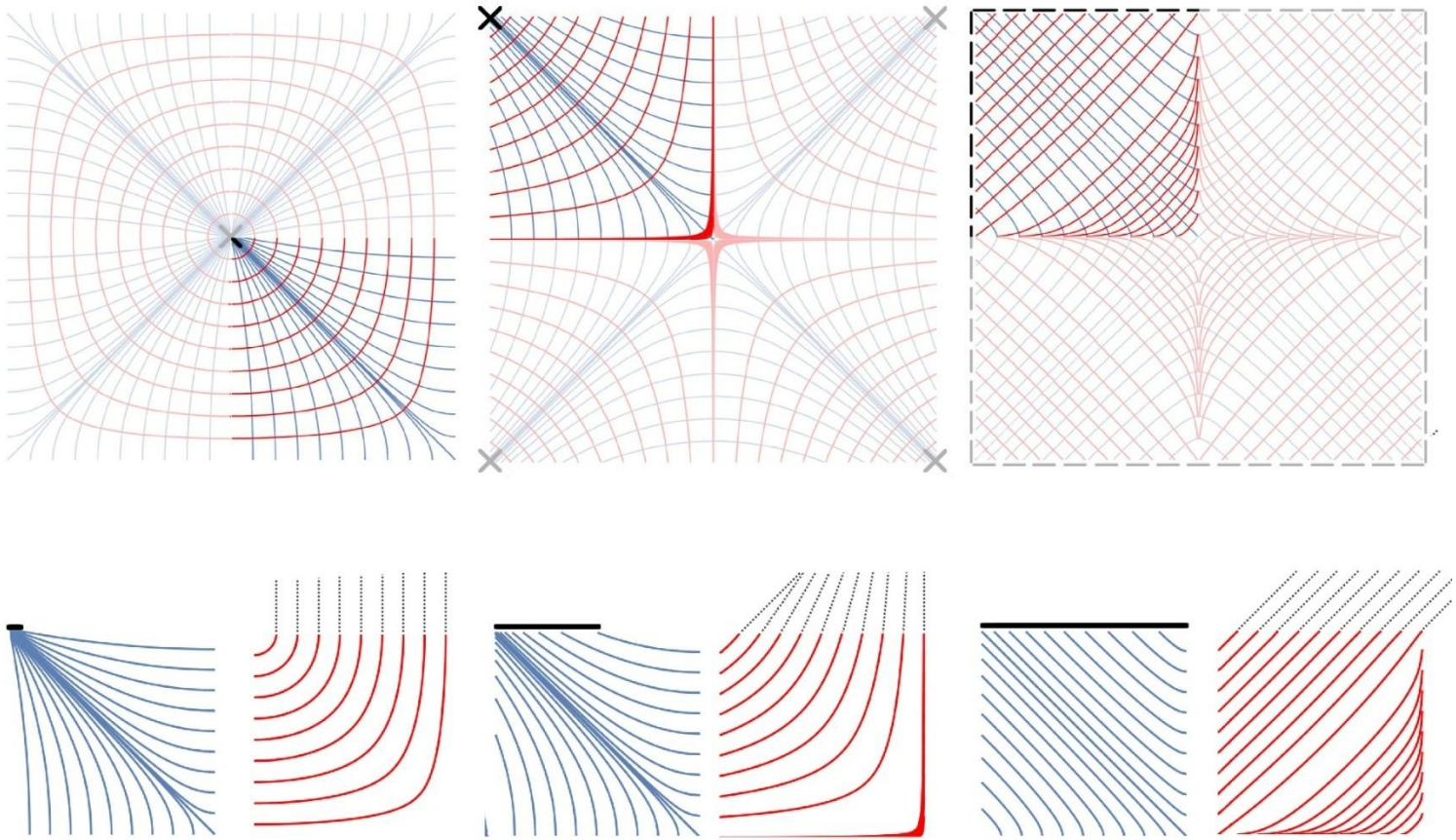
La soluzione con i lati appoggiati evidenzia una distribuzione delle linee isostatiche che intersecano i bordi a 45°; nella configurazione del solaio "a fungo", invece, le linee si dispongono in modo radiale e concentrico rispetto al pilastro, mentre nella soluzione "tra pilastri" si riconosce una configurazione intermedia tra le due precedenti.



In alto: soluzione a fungo, soluzione con appoggi sugli angoli, soluzione con appoggi distribuiti sul bordo. In basso: dettaglio delle due famiglie di linee nell'angolo

La soluzione "a fungo" trova un riscontro puntuale nei disegni di Aldo Arcangeli, nella pianta del Lanificio Gatti e nelle rappresentazioni contenute nel brevetto.

Si può pertanto supporre che le successive elaborazioni costruttive di Arcangeli e Nervi derivino da una consapevolezza intuitiva dell'analogia strutturale tra il modello "a fungo" e quello "tra pilastri", soprattutto in relazione al comportamento delle linee isostatiche, piuttosto che da una conoscenza analitica compiuta del secondo sistema.



In alto: soluzione a fungo, soluzione con appoggi sugli angoli, soluzione con appoggi distribuiti sul bordo. In basso: dettaglio delle due famiglie di linee nell'angolo

CONCLUSIONI

Il lavoro di ricerca svolto sui solai a linee isostatiche si è rivelato, al di là della specificità del tema, un osservatorio privilegiato per comprendere la logica profonda del metodo progettuale di Pier Luigi Nervi e, più in generale, per interrogare il rapporto tra struttura, forma e costruzione nel processo di ideazione dell'architettura.
Attraverso l'analisi storica e scientifica di questo particolare tipo di solai - ideati da Nervi e dal suo collaboratore Aldo Arcangeli negli anni Cinquanta - è stato possibile inquadrare un momento cruciale dell'evoluzione del pensiero nerviano: quello in cui la sperimentazione strutturale si confronta con la ricerca di "soluzioni-tipo", ossia modelli che, come macchine o aeroplani, sintetizzano man mano in sé il progresso scientifico e tecnologico di un'epoca. Secondo Nervi, infatti, ogni avanzamento tecnico non è che una tappa di un processo evolutivo continuo, nel quale si tende progressivamente verso oggetti sempre più efficienti, coerenti e "necessari".

Le soluzioni-tipo sono il frutto del continuo progresso della tecnica, che va via via perdendo l'iniziale libertà creativa per avvicinarsi a soluzioni sempre più perfette.

Le linee isostatiche possono dunque essere lette come un caso emblematico di questa tensione evolutiva: un tentativo di tradurre la purezza della logica strutturale in forma costruita. In particolare, Nervi, descrivendo questi solai appena realizzati, dice: «*La libertà creativa, in questo caso, è quasi totalmente scomparsa, riducendosi alla sola scelta delle isostatiche più adatte. È evidente che il passo da compiere per arrivare alla vera soluzione-tipo per determinate dimensioni e carichi è molto piccolo e facilmente superabile con pochi tentativi. Una volta raggiunta tale soluzione, e ferme restando le proprietà organiche del ferro e del conglomerato, nonché la nostra volontà di impiegarne la minore quantità possibile, la progettazione di un solaio diventa univocamente determinata*». In pratica,

Nervi dice chiaramente che questi solai sono esclusivamente frutto di un puro calcolo matematico e che la libertà del progettista sta solo nella scelta di realizzare questa o quella nervatura.

Tuttavia, l'analisi dei documenti e delle testimonianze contemporanee - in particolare quella di Mario Desideri - rivela un elemento di contraddizione. All'interno dello Studio Nervi ci si accorge ben presto che tali linee non potevano essere realizzate in modo pienamente coerente con il modello teorico. In altre parole, le nervature di quei solai non erano, in senso stretto, "isostatiche". L'atteggiamento descritto da Desideri è stato riscontrato anche nelle valutazioni statiche da noi autonomamente compiute su quattro casi studio. Inoltre, nello studio di questi casi che abbiamo preso in esame, non siamo riusciti a riconoscere un approccio univoco alla progettazione, riconoscendo anzi un "fare artigianale" che, applicato di volta in volta ad ogni progetto, ne ha risolto le esigenze.

Questa apparente discrepanza potrebbe, a una lettura superficiale, essere interpretata come un atto di dissimulazione o di incoerenza teorica. Tuttavia, una riflessione più attenta mostra come essa rappresenti piuttosto la manifestazione più autentica del metodo nerviano.

Se le soluzioni-tipo e le opere di architettura sono frutto di un processo che, man mano, dovrebbe convergere in un discorso di perfezionamento di scienza e arte al fine di raggiungere opere "vere", non prevedono in alcun modo l'intervento umano. Attualizzando questo discorso, tali soluzioni potrebbero essere prodotte dall'intelligenza artificiale tramite l'imposizione di parametri predefiniti. Nervi, tuttavia, introduce a questo quadro due temi: la sensibilità statica e la sensibilità artistica. La prima rende le opere reali, la seconda le rende espressive. Tuttavia si tratta, appunto, di sensibilità, quindi afferenti prettamente al mondo umano, alle conoscenze e alle esperienze personali.

In questa ottica, Nervi stabilisce il terreno fertile per il progetto delle soluzioni-tipo, dei solai a linee isostatiche nello specifico e delle opere di architettura in generale. Queste sensibilità non sono valutabili o quantificabili e, quindi, al di là dei parametri predeterminati, caratterizzano davvero il progetto, perché costituiscono, di fatto, il campo libero all'interno del quale muoversi per determinare il progetto, finanche a contraddire le determinazioni iniziali.

La "sensibilità statica" è quella capacità intuitiva, maturata dall'esperienza e dall'intelligenza costruttiva, che permette di trasformare i dati del calcolo in forma architettonica. La sensibilità statica consente all'intuito di tradurre l'idea statica e costruttiva nel progetto di architettura. La sensibilità estetica dà il carattere espressivo all'architettura, cioè conferisce un'immagine che è, ovviamente, in profonda connessione con il soddisfacimento delle esigenze statiche e costruttive.

I solai a linee isostatiche, pur tradendo a volte il rigore teorico da cui derivano, rappresentano proprio l'incontro fra le istanze diverse del progetto: essi non sono un fallimento dell'idea originaria, ma un suo adeguamento alle condizioni reali del costruire, un compromesso virtuoso fra le esigenze del progetto e il progetto realizzato. Il segreto del progetto di questi solai sta nell'avverbio "quasi", che stabilisce il campo di adeguamento.

In questa prospettiva, il presunto "scarto" tra intenzione e risultato non è un limite, ma il luogo stesso in cui si manifesta l'opera di Nervi. Le sue strutture non sono la semplice applicazione di principi scientifici, ma la loro trasfigurazione attraverso la sensibilità e l'esperienza dell'arte del costruire. Così, anche nel caso

delle linee isostatiche, il progetto non perde autenticità nel momento in cui si discosta dalla teoria: al contrario, trova proprio in quel margine di libertà la propria necessità formale e la propria verità architettonica.

Il percorso compiuto in questa ricerca mostra quindi come le "soluzioni-tipo" nerviane non rappresentino un punto d'arrivo definitivo, ma un processo aperto di progressiva approssimazione tra scienza e arte, prima, e tra razionalità e sensibilità, poi. È in questa dinamica, fatta di tentativi, adattamenti e invenzioni, che si manifesta il senso più profondo dell'opera di Nervi: una ricerca di equilibrio tra l'esattezza della tecnica e l'imponderabilità del gesto umano.

Che è quanto, in altre parole, aveva già visto Agnoldomenico Pica nel 1949[133]:

> *A questa stregua è chiaro come non sia possibile parlare, come fa il Nervi, di forme dell'architettura «immutabili» perché «scientificamente perfette»; né, tanto meno, si può parlare di un'architettura che sia tale solo in quanto matematicamente traducibile in formule e concetti scientificamente plausibili. Anzi, è vero tutto il contrario: quanto nell'architettura è soggetto alla riprova scientifica, per mirabile e perfetto che sia, rappresenta «il caduco», il transeunte; mentre tutto ciò che misteriosamente si sottrae a quella categoria, ossia l'impronta viva della fantasia creatrice, rappresenta «l'eterno», l'assoluto.*
>
> *Il senso del messaggio moderno, dopo tempi di strani sperdimenti, sta proprio nell'avere indicato, o forse soltanto ricordato, che quella bellezza non è un fatto gratuito, né può prescindere dal momento tecnico né da quello economico, che ne costituiscono il contenuto. Ma, al di fuori di essa, in sede di architettura, non avrebbero alcun diritto di cittadinanza.*
>
> *A questa stregua non possiamo che concordare con Nervi quando ritiene che l'atto del costruire sia arte piuttosto che scienza. Ma, per coerenza, vogliamo mettere l'accento su questa conclusione e avvertire che il senso ultimo e più alto di un'architettura è proprio e soltanto in quei valori espressivi e poetici, in quei risultati dell'intuizione creativa che nessun calcolo di iperstatica e nessun estensimetro saranno mai in grado di misurare.*

[133] Pica A., *Senso dell'architettura*, in «Domus», n. 241, dicembre 1949, pp. 26.

Post scriptum: le possibilità attuali

L'originalità dei solai a linee isostatiche si manifesta soprattutto nel fatto che, nella storia dell'architettura, non trovano un seguito diretto. Il motivo risiede nella loro natura profondamente legata a un approccio progettuale specifico: se da un lato è possibile calcolare le linee isostatiche, costruirle e realizzare nervature curvilinee espressive, dall'altro non è possibile replicare la particolare metodologia progettuale e costruttiva che le ha generate, intimamente connessa all'esperienza di Nervi e del suo gruppo di lavoro. Va inoltre considerato che il vincolo del brevetto ebbe un ruolo significativo: nei primi anni successivi all'invenzione, le soluzioni descritte nei brevetti di Arcangeli e Nervi non potevano essere facilmente riprodotte da altri.

Le sperimentazioni successive restano dunque poche; di seguito se ne propone una rapida rassegna, con l'intento di fornire un quadro sintetico, più che una descrizione dettagliata. Tra queste, alcune meritano particolare attenzione.

In primo luogo vi sono le sperimentazioni di Sergio Musmeci, che lavora nello studio di Nervi tra il 1949 e il 1952, proprio nel periodo in cui vengono messe a punto le prove sui solai a linee isostatiche. Musmeci fa tesoro di quelle esperienze, le riprende e rielabora nel tempo, anche se senza esiti significativi sul piano realizzativo.

Sono contemporanee le ricerche di Amancio Williams, che realizza modelli fisici in filo di ferro per lo studio del comportamento delle piastre quadrate.

Va ricordato poi il progetto di Mario Fiorentino per il concorso del Fermi Memorial, caratterizzato da una fittissima trama di linee - isostatiche di ispirazione - sulla copertura. Le linee del disegno sembrano tuttavia rappresentare più un flusso dinamico che un accorgimento strutturale in senso stretto. Allo stesso concorso partecipa anche lo Studio Nervi, presentando una grande piastra quadrata a linee isostatiche sostenuta da quattro appoggi.

Infine, si segnala il progetto per l'Aula Magna della Biblioteca dell'Università Bocconi, nel quale Giovanni Favini studia e riproduce i disegni del brevetto di Arcangeli e i progetti di Nervi, proseguendo idealmente quella linea di ricerca.

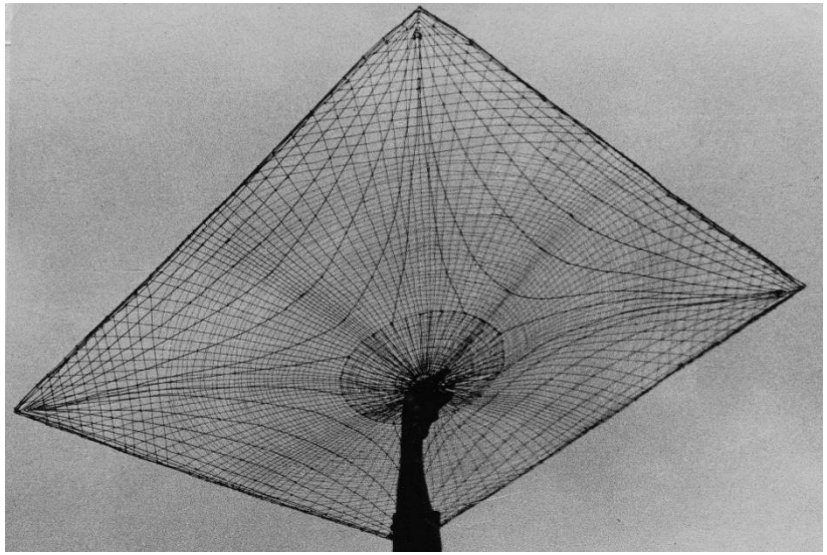
Oggi, con il progresso tecnologico e l'evoluzione dei metodi di calcolo numerico, sono state sviluppate nuove proposte per la realizzazione di modelli strutturali a linee isostatiche. Il calcolo manuale non consente infatti di risolvere il problema evidenziato da Desideri, secondo cui questi solai risultano difficilmente realizzabili poiché, nel momento in cui le linee isostatiche vengono trasformate in nervature reali, il modello iniziale si modifica, alterando di conseguenza anche la disposizione delle linee stesse. Per superare questo limite è necessario un modello matematico iterativo, capace di produrre una convergenza progressiva tra la geometria delle nervature realizzate e quella delle linee isostatiche del solaio nervato.

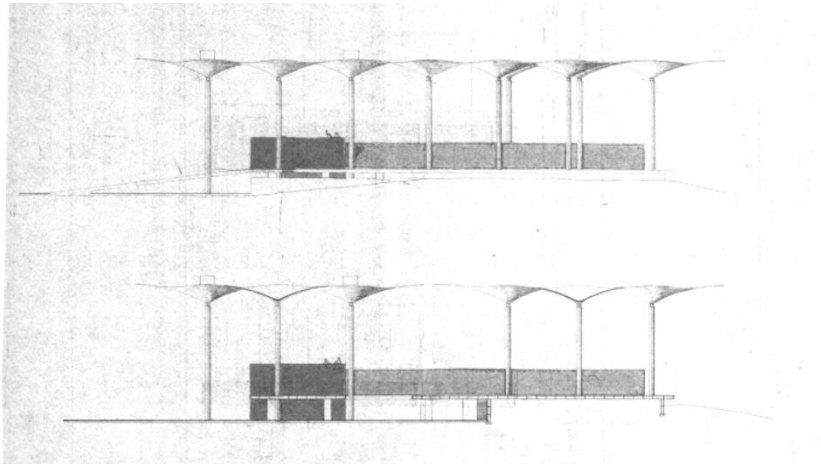
Negli ultimi anni, il gruppo di ricerca dell'ETH di Zurigo ha condotto sperimentazioni avanzate che riprendono fedelmente il processo originariamente sviluppato da Arcangeli e Nervi, realizzando elementi-solaio prefabbricati secondo lo stesso principio costruttivo impiegato da Nervi per i tavelloni del *Palazzetto dello Sport* di Roma e per la *Chiesa di Borgo Panigale*[134].

[134] https://www.youtube.com/watch?v=aEdGgMCRavI
https://www.youtube.com/watch?v=mJBIHSWwHk8

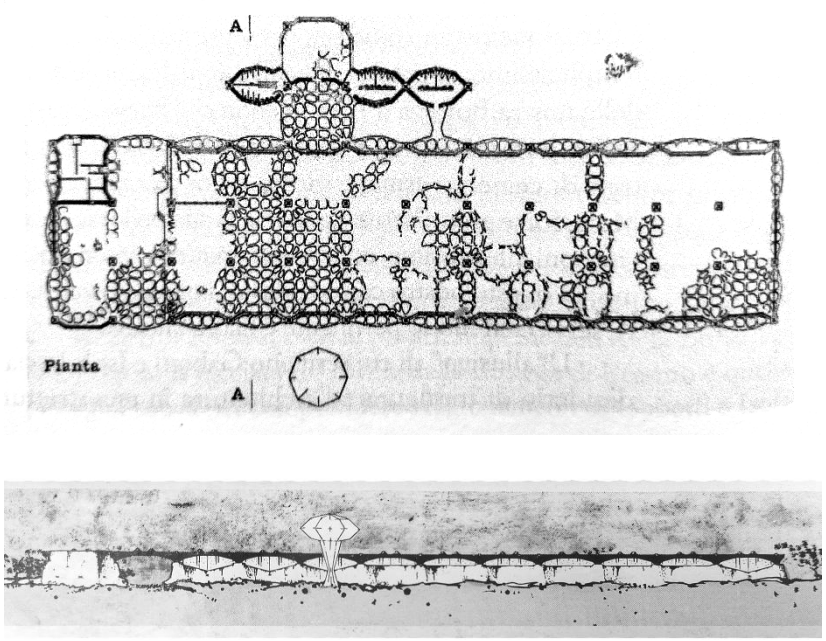
Amancio Williams, Una Nueva Bóveda Cáscara (e altri progetti), 1951-1952



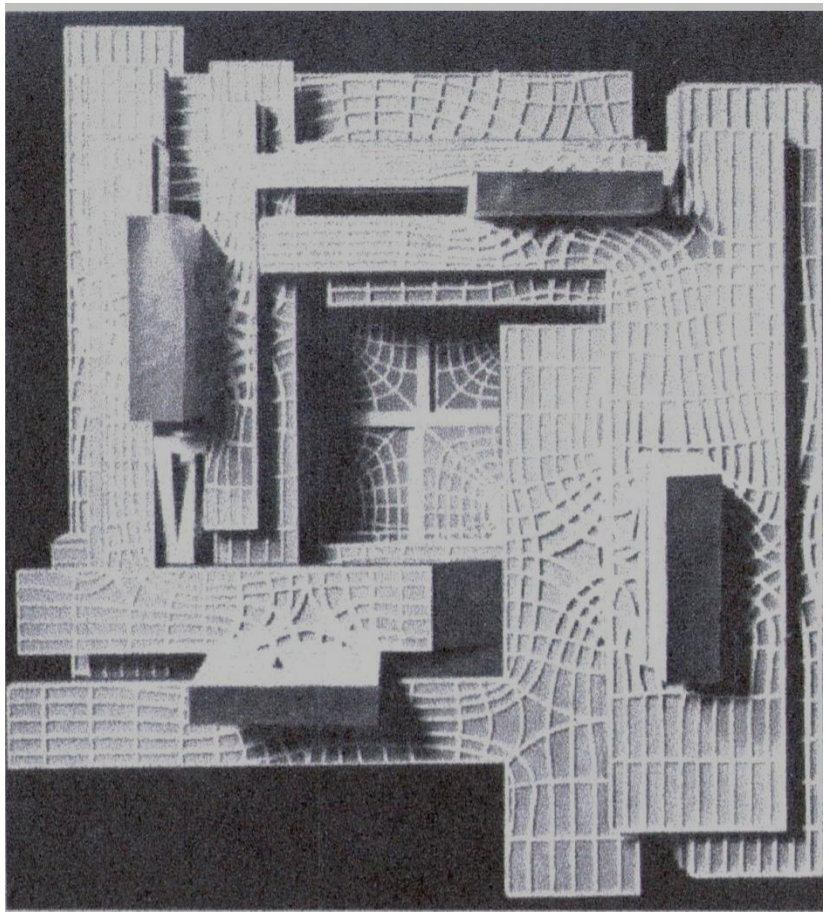




Roberto Gabetti, Aimaro Oreglia Isola, Progetto per la fabbrica di televisori National Video Europa, Strada nazionale caudina, Casalnuovo (Napoli) 1954-1955

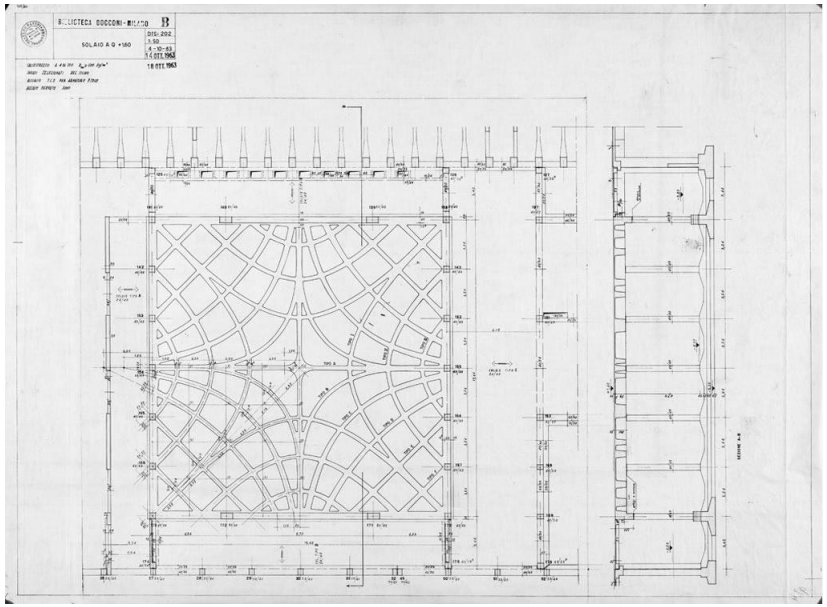


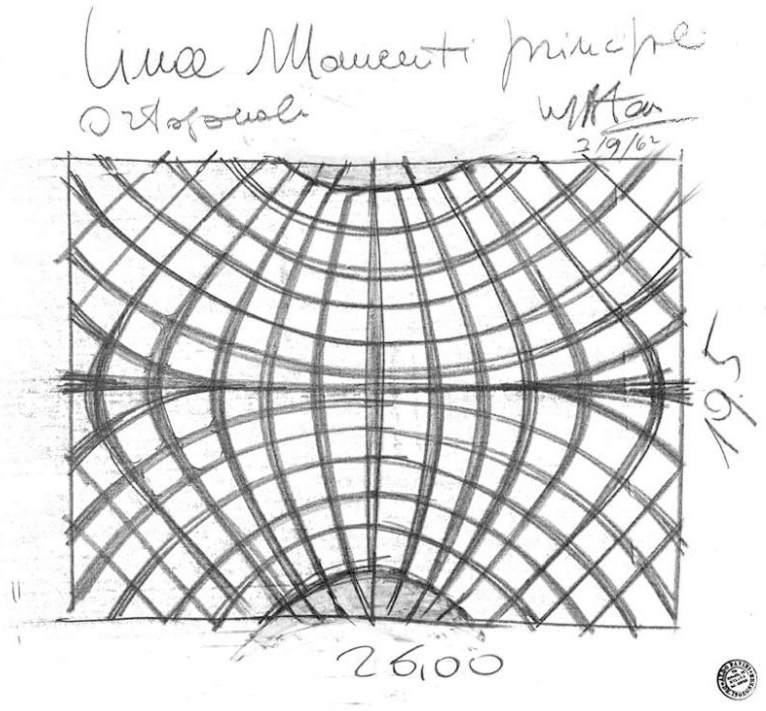
Progetto per il concorso per il Fermi Memorial, Mario Fiorentino, Hilda Selem, Michele Valori, Arrigo Carè, Chicago, 1957



Aldo Favini, Giovanni e Lorenzo Muzio, Aula magna della biblioteca dell'università Bocconi, Milano, 1962







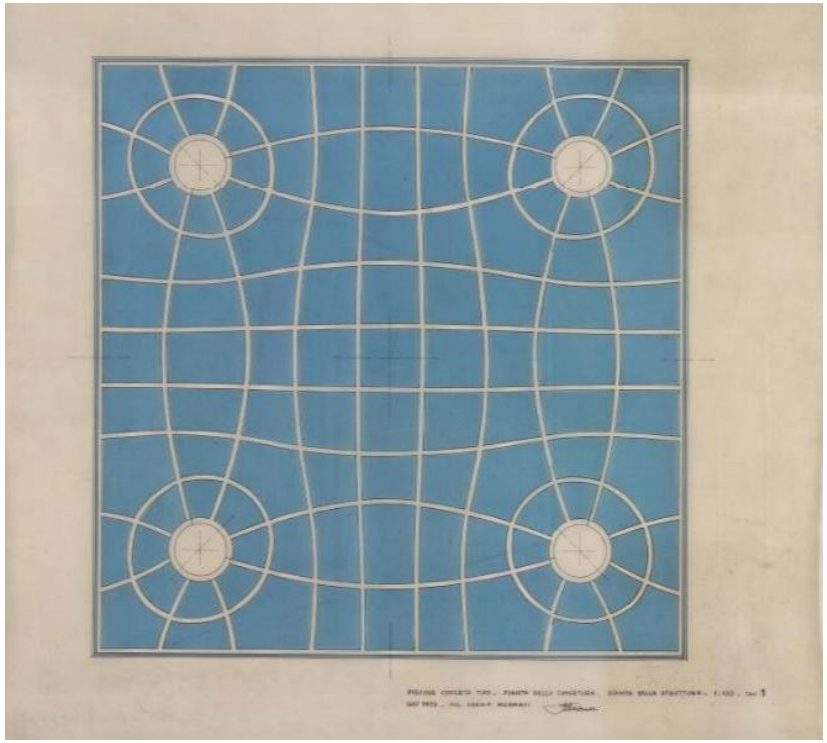
S. Musmeci, pilastro ad 'ombrello' per il progetto del capannone industriale della Società Arrigoni, Cesena, 1964

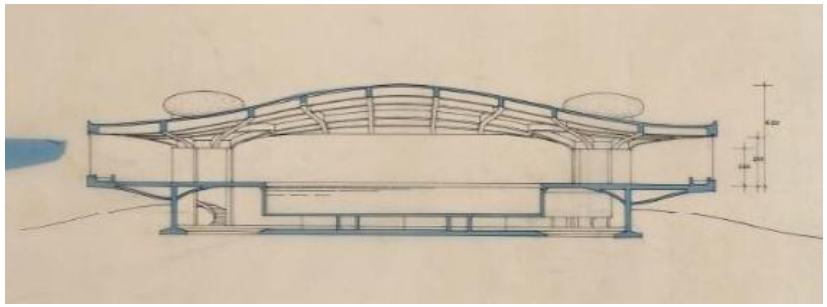
S. Musmeci, la 'rete di travi' della sala conferenze della Biblioteca Nazionale, Roma, 1965-1971

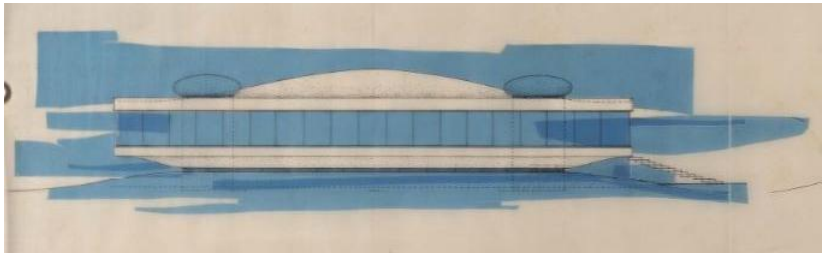


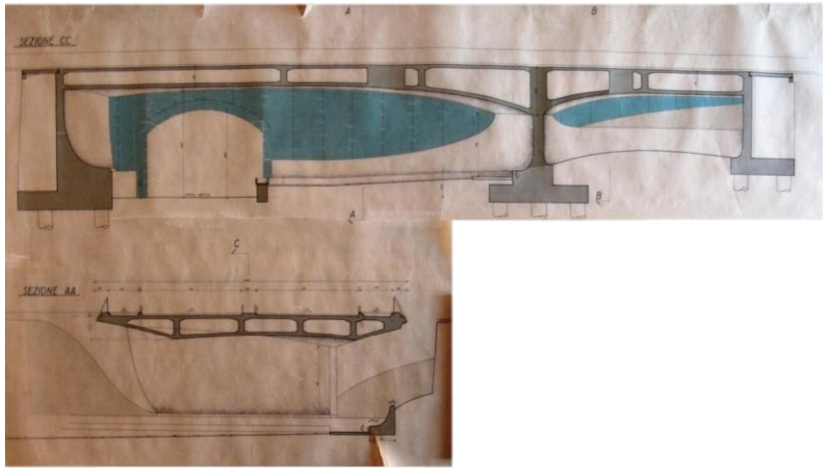


S. Musmeci, progetto della piscina coperta tipo per la Società Immobiliare Generale, Roma, 1973

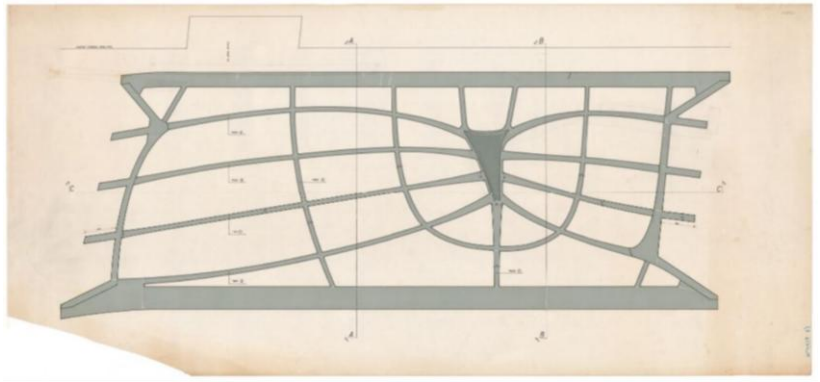


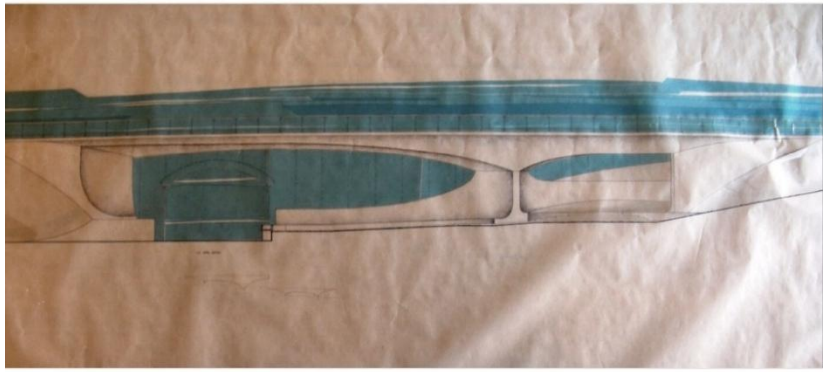






S. Musmeci, Prolungamento di Via Marco Polo fino a Via Cilicia. Cavalcavia sulla Via Appia Antica, Roma, 1980 (con Zenaide Zanini)





Michael Hopkins and Partners , Schlumberger Extension building, Cambridge, 1992. (Exposed ribbed soffits around the perimeter.)

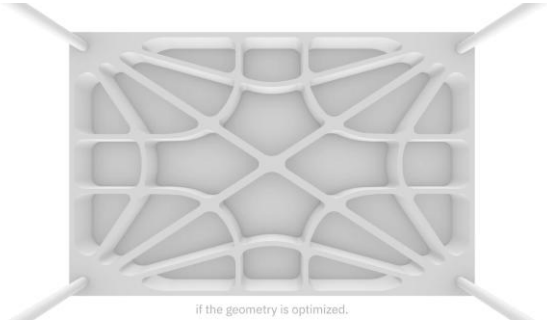


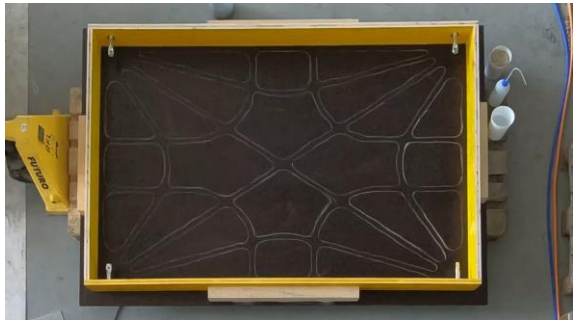


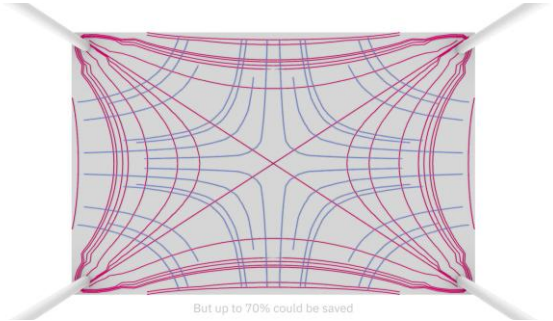


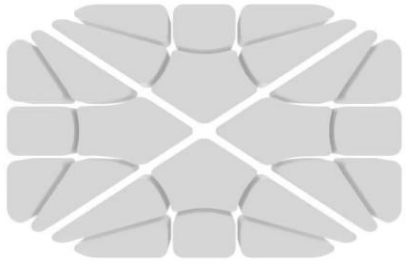
ETH Zurich develops formwork from 3D-printed foam to slash concrete use in buildings, 2022



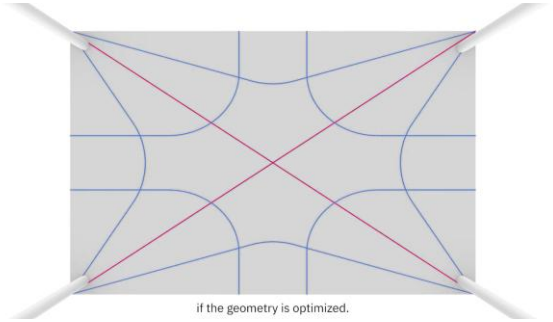


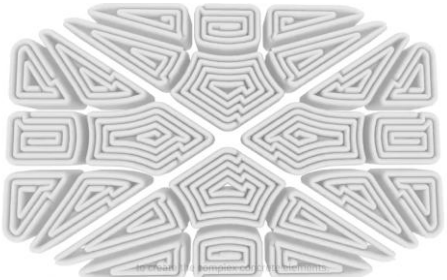


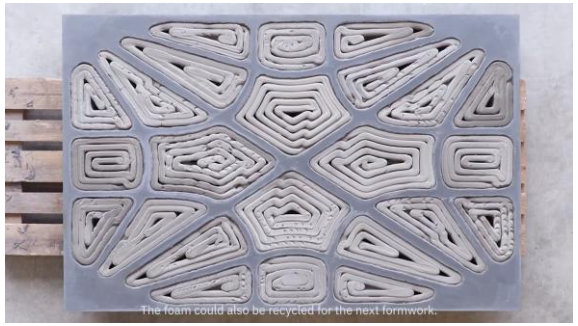






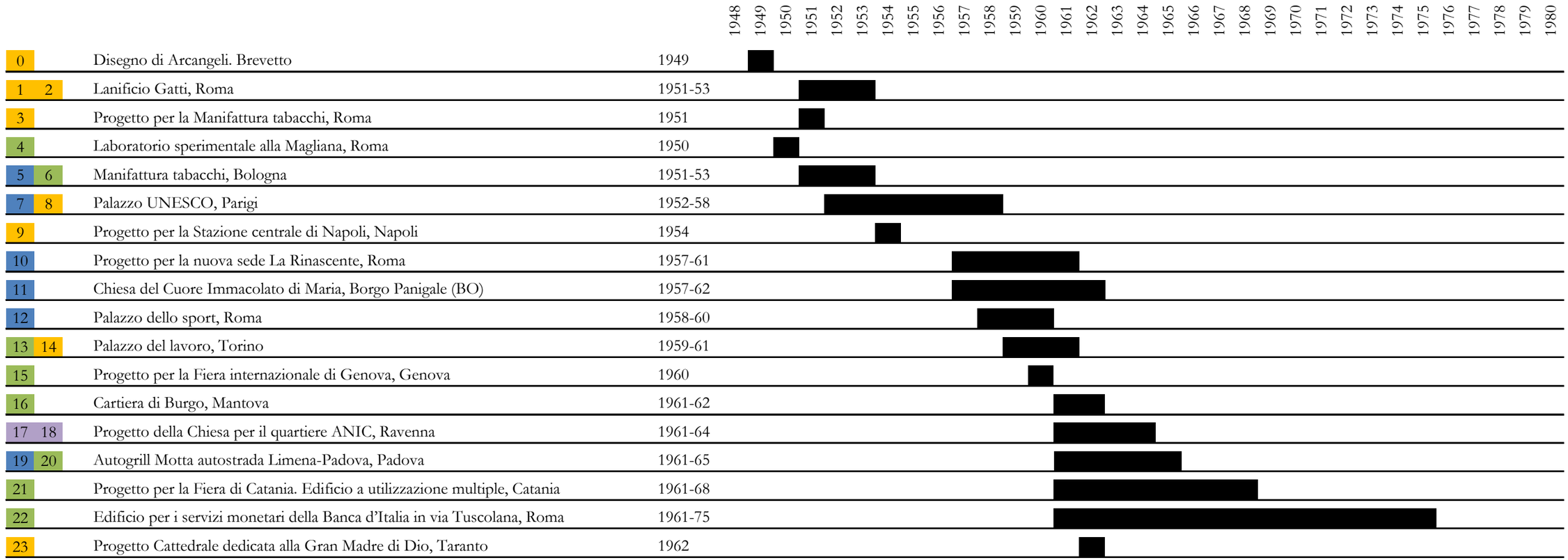




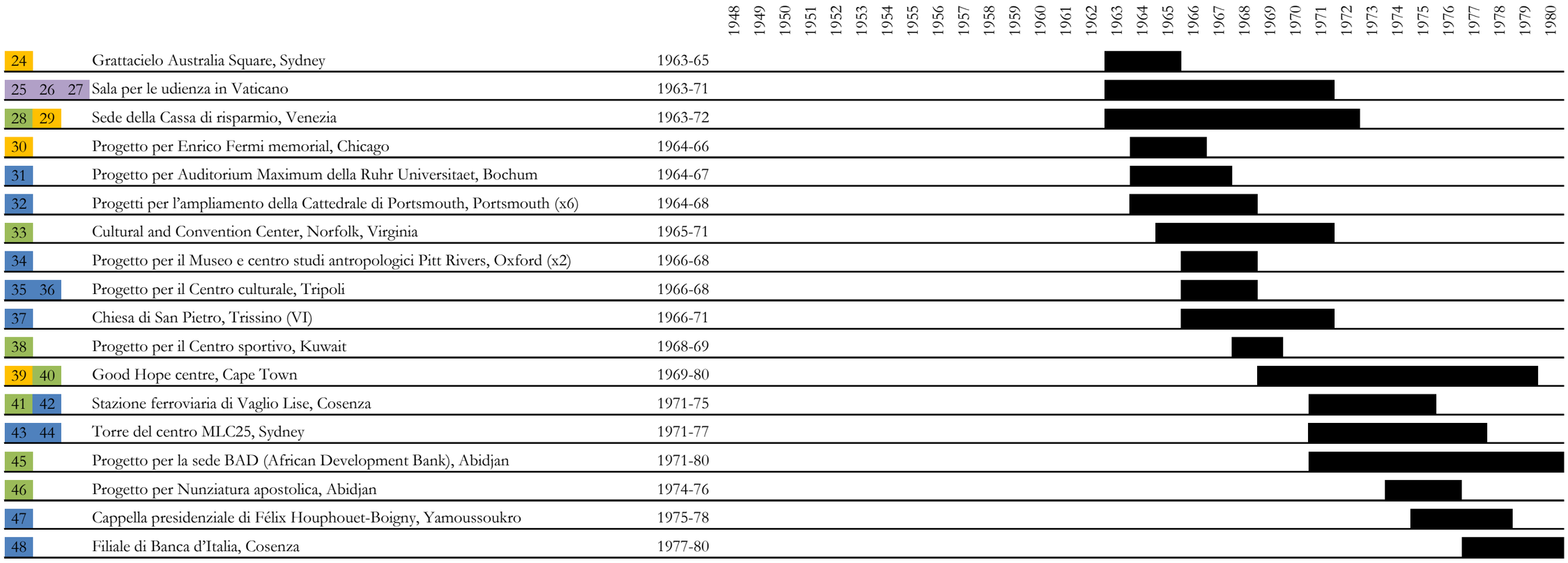


APPENDICI

Cronologia delle opere



Linee isostatiche a fungo su maglia quadrata
Linee isostatiche su altre forme
Linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie
Linee su altre superfici piane


1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980
24 Grattacielo Australia Square, Sydney 1963-65
25 26 27 Sala per le udienza in Vaticano 1963-71
28 29 Sede della Cassa di risparmio, Venezia 1963-72
30 Progetto per Enrico Fermi memorial, Chicago 1964-66
31 Progetto per Auditorium Maximum della Ruhr Universitaet, Bochum 1964-67
32 Progetti per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth, Portsmouth (x6) 1964-68
33 Cultural and Convention Center, Norfolk, Virginia 1965-71
34 Progetto per il Museo e centro studi antropologici Pitt Rivers, Oxford (x2) 1966-68
35 36 Progetto per il Centro culturale, Tripoli 1966-68
37 Chiesa di San Pietro, Trissino (VI) 1966-71
38 Progetto per il Centro sportivo, Kuwait 1968-69
39 40 Good Hope centre, Cape Town 1969-80
41 42 Stazione ferroviaria di Vaglio Lise, Cosenza 1971-75
43 44 Torre del centro MLC25, Sydney 1971-77
45 Progetto per la sede BAD (African Development Bank), Abidjan 1971-80
46 Progetto per Nunziatura apostolica, Abidjan 1974-76
47 Cappella presidenziale di Félix Houphouet-Boigny, Yamoussoukro 1975-78
48 Filiale di Banca d'Italia, Cosenza 1977-80
Linee isostatiche a fungo su maglia quadrata
Linee isostatiche su altre forme
Linee a graticcio, linee a mensola radiale, linee su orditure secondarie
Linee su altre superfici piane

Schede delle opere

L'appendice *Schede delle opere* dedica uno spazio specifico a ciascun progetto analizzato, presentando per ognuno pianta e sezione significative[135]. Nei casi di solai a singola campata viene mostrato l'intero impianto, mentre per i solai continui si seleziona una porzione rappresentativa. In ogni scheda sono riportate le principali quote dimensionali necessarie a definire le caratteristiche geometriche e volumetriche dell'opera, come l'interasse, lo spessore delle solette e delle nervature.

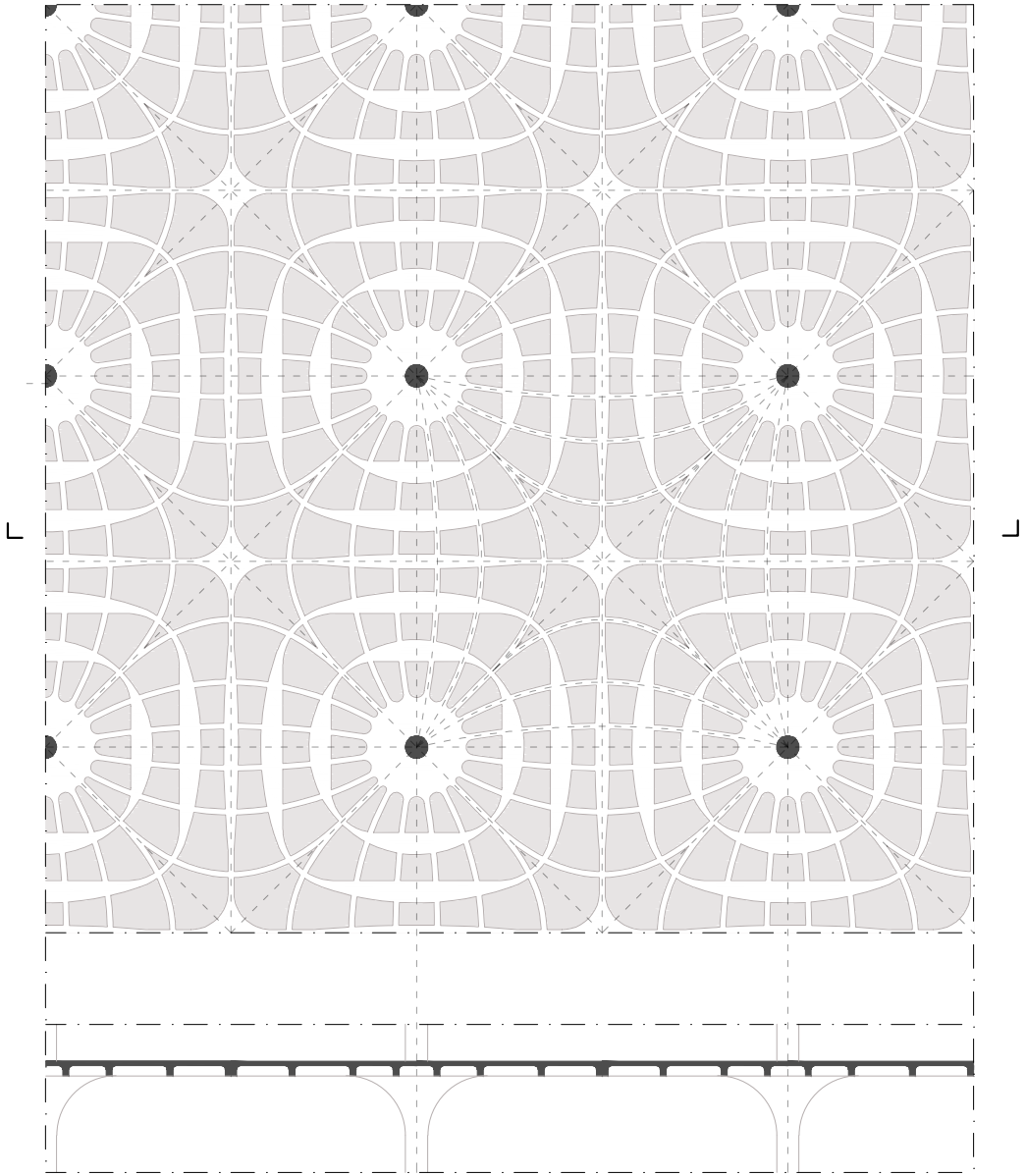
Oltre ai dati geometrici, le schede forniscono indicazioni sulla configurazione dei vincoli e sulla tipologia dei supporti, elementi fondamentali per comprendere la distribuzione e l'orientamento delle linee isostatiche all'interno della piastra. A queste informazioni si affiancano dettagli relativi agli aspetti costruttivi, offrendo una lettura più completa del progetto.

L'analisi congiunta di geometrie, volumi e tecniche esecutive consente di mettere in relazione tra loro i vari progetti, evidenziando connessioni e affinità anche tra opere apparentemente distanti per scala, forma o andamento delle nervature. Le schede, infine, documentano la ricchezza e la varietà della produzione progettuale e grafica, restituendo un quadro preciso della sperimentazione condotta intorno al tema dei solai a linee isostatiche.

La rassegna è strutturata secondo un ordine cronologico, con l'intento di offrire una lettura il più possibile neutra e oggettiva dei progetti. Si è evitato di seguire criteri basati su classificazioni formali, costruttive o strutturali, per non enfatizzare un aspetto a discapito degli altri. Questo approccio consente di osservare in modo equilibrato come le diverse soluzioni progettuali si siano sviluppate nel tempo, mantenendo una visione ampia e non gerarchica delle sperimentazioni affrontate.

Questa rassegna, inoltre, non si limita a raccogliere i progetti di Pier Luigi Nervi e Aldo Arcangeli che presentano solai a linee isostatiche o affini. Una semplice catalogazione, infatti, non apporterebbe alcun contributo significativo alla conoscenza del tema. Allo stesso modo, non ha la pretesa di offrire una raccolta esaustiva: è possibile che alcuni progetti siano sfuggiti alla ricerca. Non intende neppure riprodurre i disegni, operazione peraltro resa impossibile dalla natura eterogenea del materiale d'archivio. Di conseguenza, non è possibile garantire un livello uniforme di dettaglio in tutte le schede. L'obiettivo è piuttosto quello di offrire una lettura chiara e articolata di un archetipo che ha segnato in profondità la produzione dello Studio Nervi. Attraverso il confronto dei progetti sviluppati tra il 1949 e il 1980, si cerca di mettere in evidenza le caratteristiche che li legano agli studi e alle sperimentazioni sui solai a linee isostatiche. Questa antologia vuole dunque mostrare, chiarire e valorizzare la varietà e la complessità di una ricerca che ha attraversato trent'anni di attività progettuale.

[135] Non è stato possibile restituire elaborati ed informazioni dettagliate per ogni disegno. Si Rimanda alla bibliografia di dettaglio per le informazioni di riferimento.



0 Disegno di Arcangeli.
Brevetto, 1949

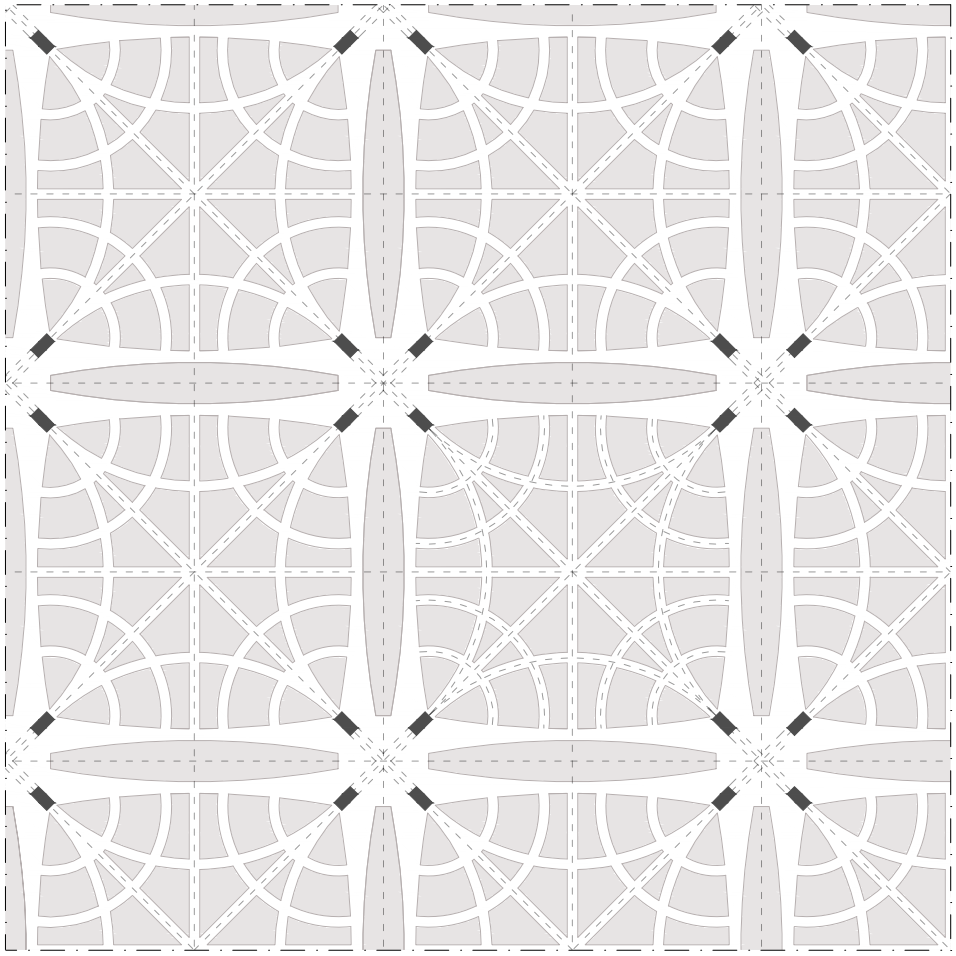
scala 1:100

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia quadrata

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile modulo quadrato

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri circolari Ø30cm

Note:
Le dimensioni di questo solaio sono state determinate in analogia con il Lanificio Gatti



1 Lanificio Gatti, Roma (Disegno A. Arcangeli, mod. Lanificio Gatti), 1949

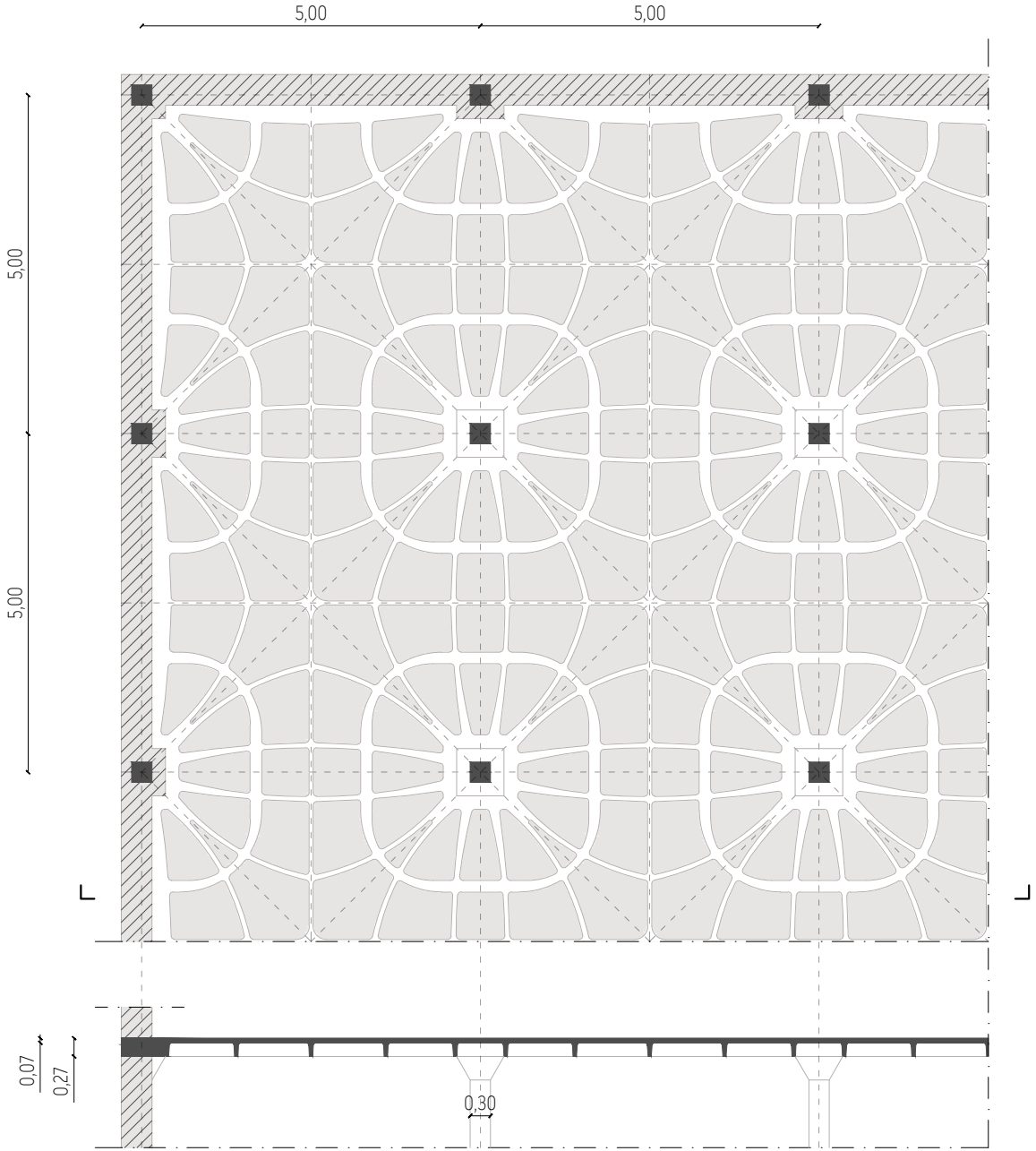
Scala 1:100

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia quadrata

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile su modulo quadrato

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri tetrapodi 14x30cm

Note:
Le dimensioni di questo solaio sono state determinate in analogia con il Lanificio gatti, ipotizzando che questo ne sia uno studio



2 Lanificio Gatti, Roma, 1951-1953
Con C. Cestelli Guidi
N. prog. Nervi e Bartoli: 3318

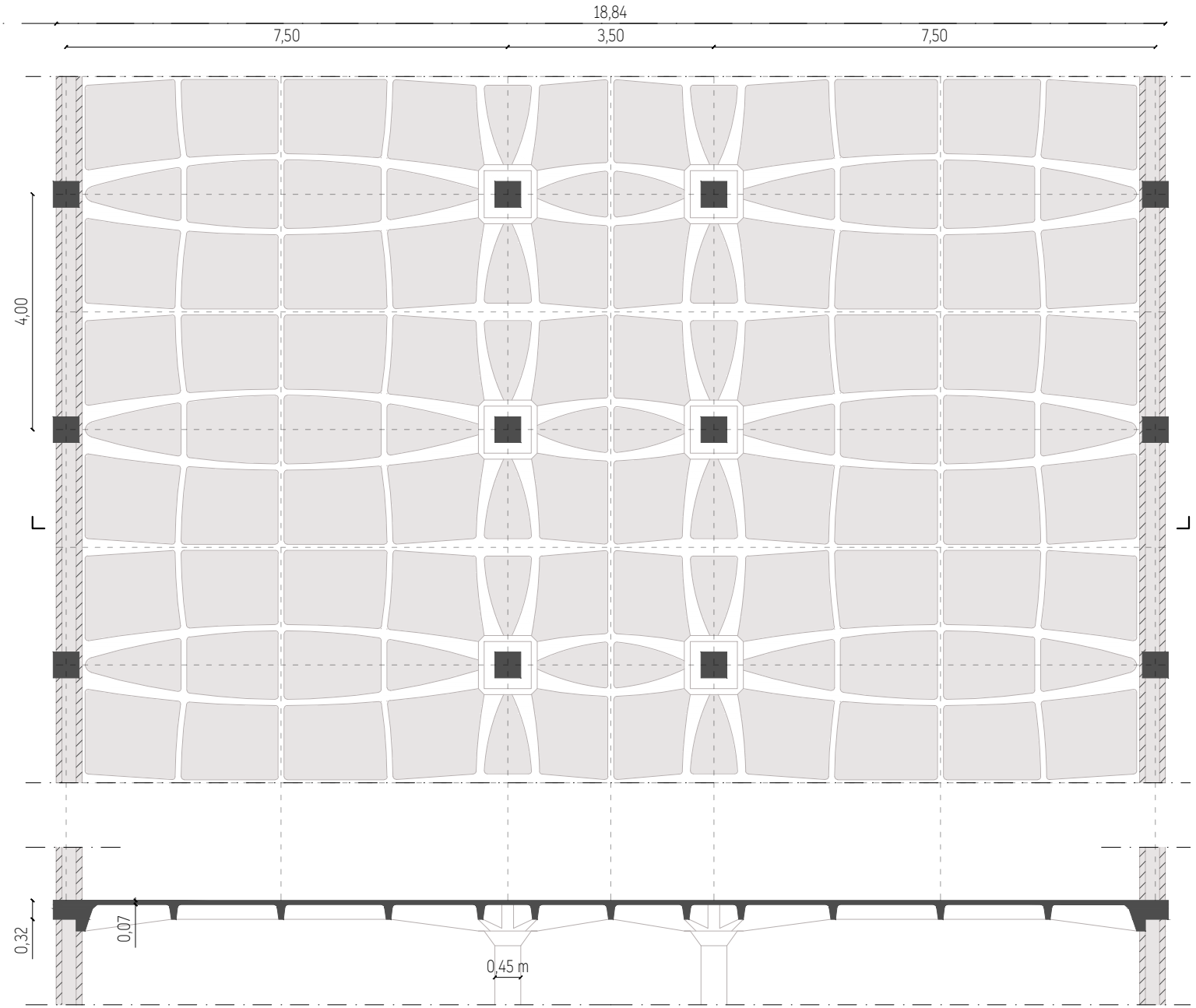
Scala 1:100

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia quadrata

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri 30x30 cm; distribuito sul bordo esterno



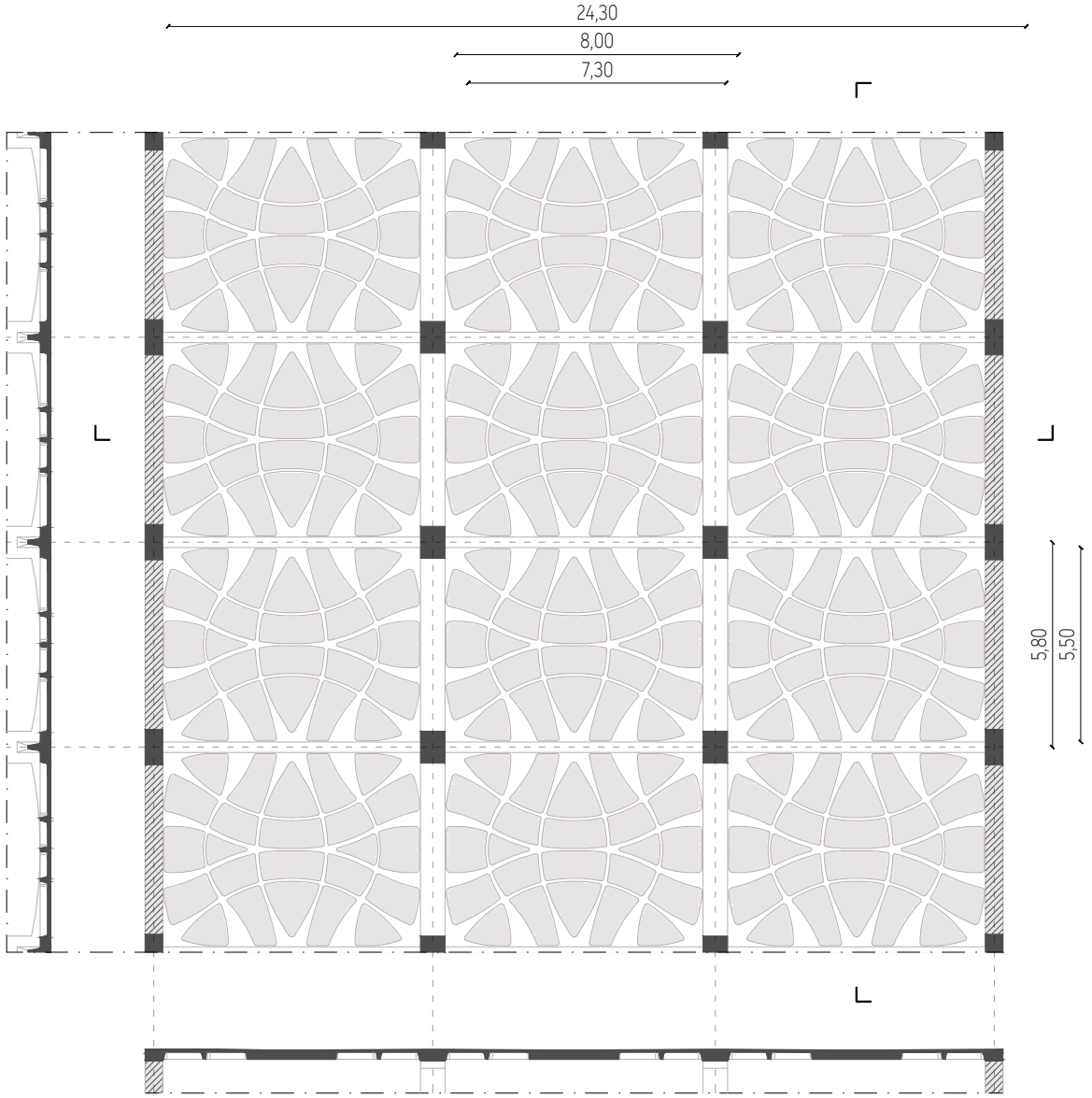
3. Progetto per la Manifattura tabacchi, Roma, 1951. Fabbricato lavorazione
N prog. Nervi e Bartoli: 3380

Scala 1:100

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia rettangolare, non baricentrica

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri 45x45 cm; distribuito sul bordo esterno



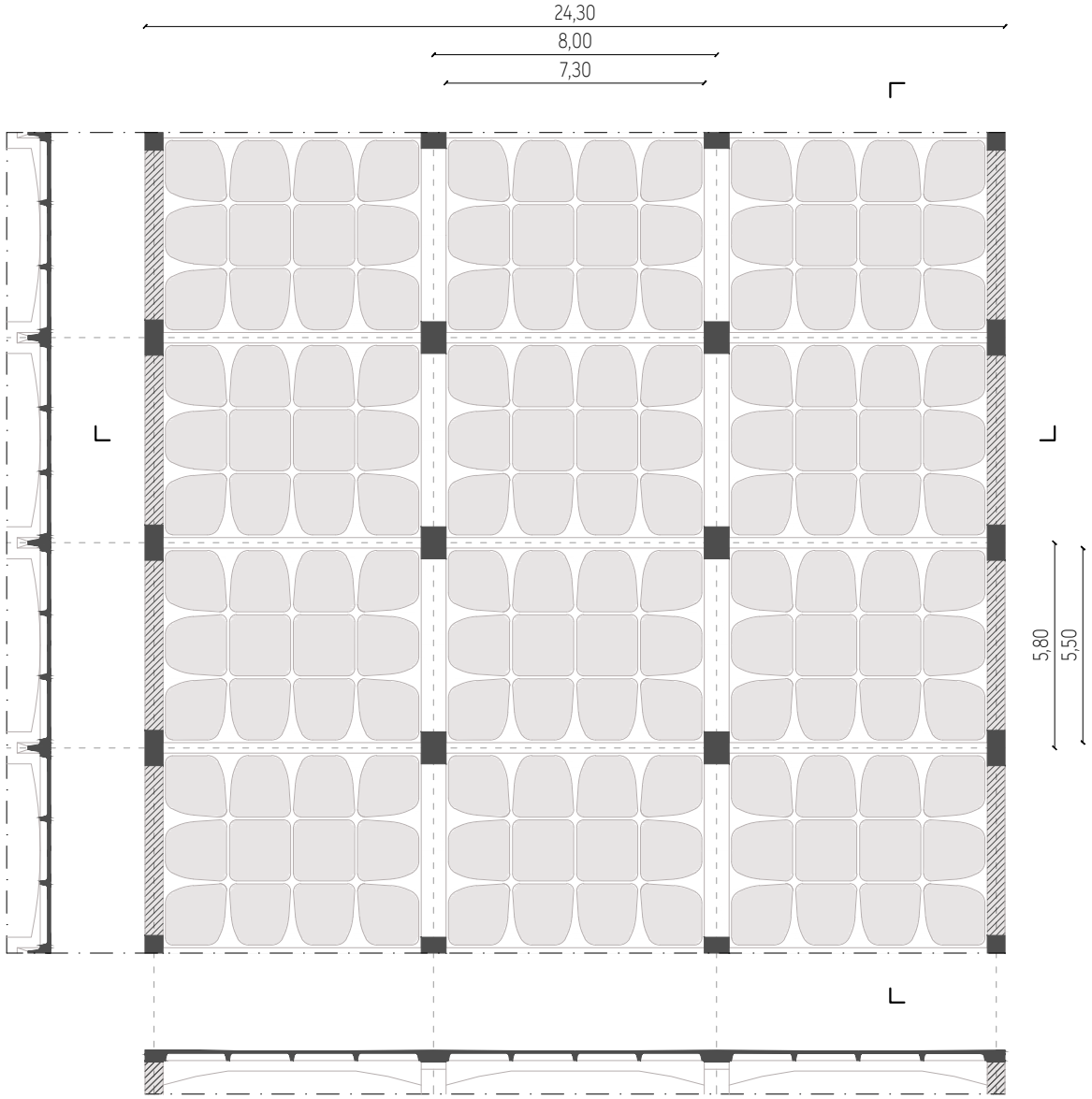
5 Manifattura tabacchi, Bologna, 1951-1953. Magazzino ballette (variante non realizzata a linee isostatiche)
N° prog. Nervi e Bartoli: 2948, 3291

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a linee isostatiche in serie su maglia rettangolare

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri 100x150 cm; distribuito sul bordo esterno



6 Manifattura tabacchi, Bologna, 1951-1953. Magazzino ballette (variante realizzata a linee ortogonali)
N° prog. Nervi e Bartoli: 2948, 3291

Scala 1:200

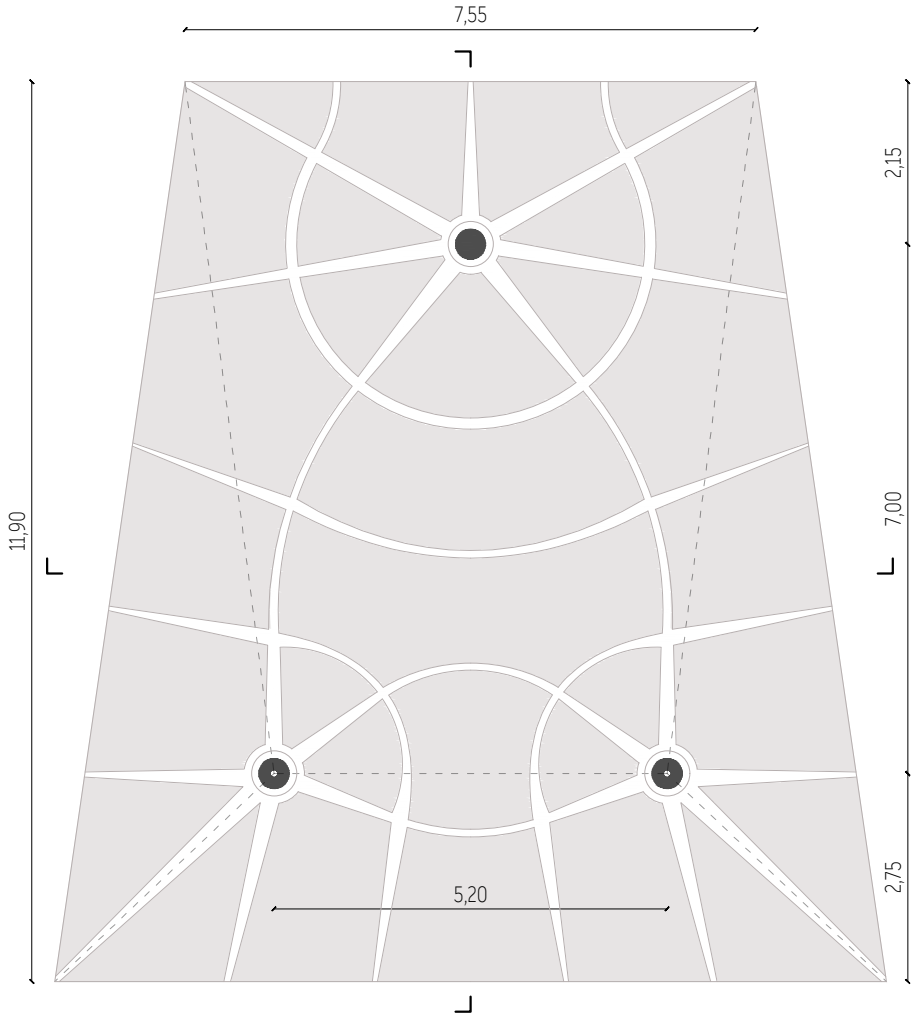
Tipologia:
solaio a graticcio in serie su maglia rettangolare

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri 100x150 cm; distribuito sul bordo esterno

Note:
Il solaio è stato realizzato impiegando la cassaforma precedentemente testata su una sola campata presso il Laboratorio sperimentale alla Magliana a Roma. Tale continuità giustifica l'attribuzione della stessa tavola a entrambe le realizzazioni



8 Palazzo UNESCO, Parigi, 1952-1958. Ingresso nord Segretariato
N. Studio Nervi: [1049]

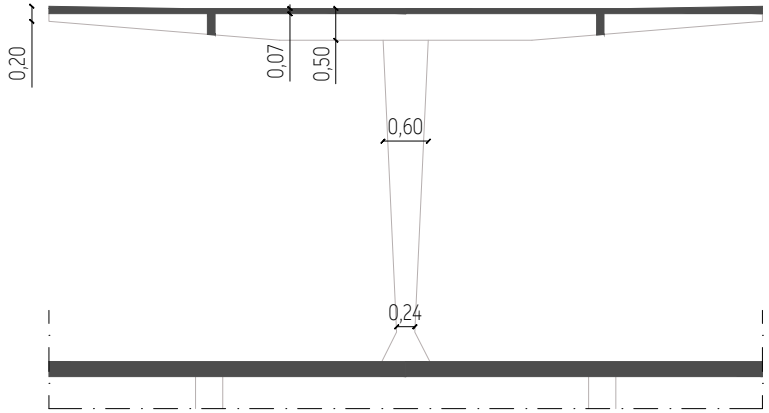
Scala 1:100

Tipologia:
solaio a fungo su maglia trapezoidale, non baricentrica

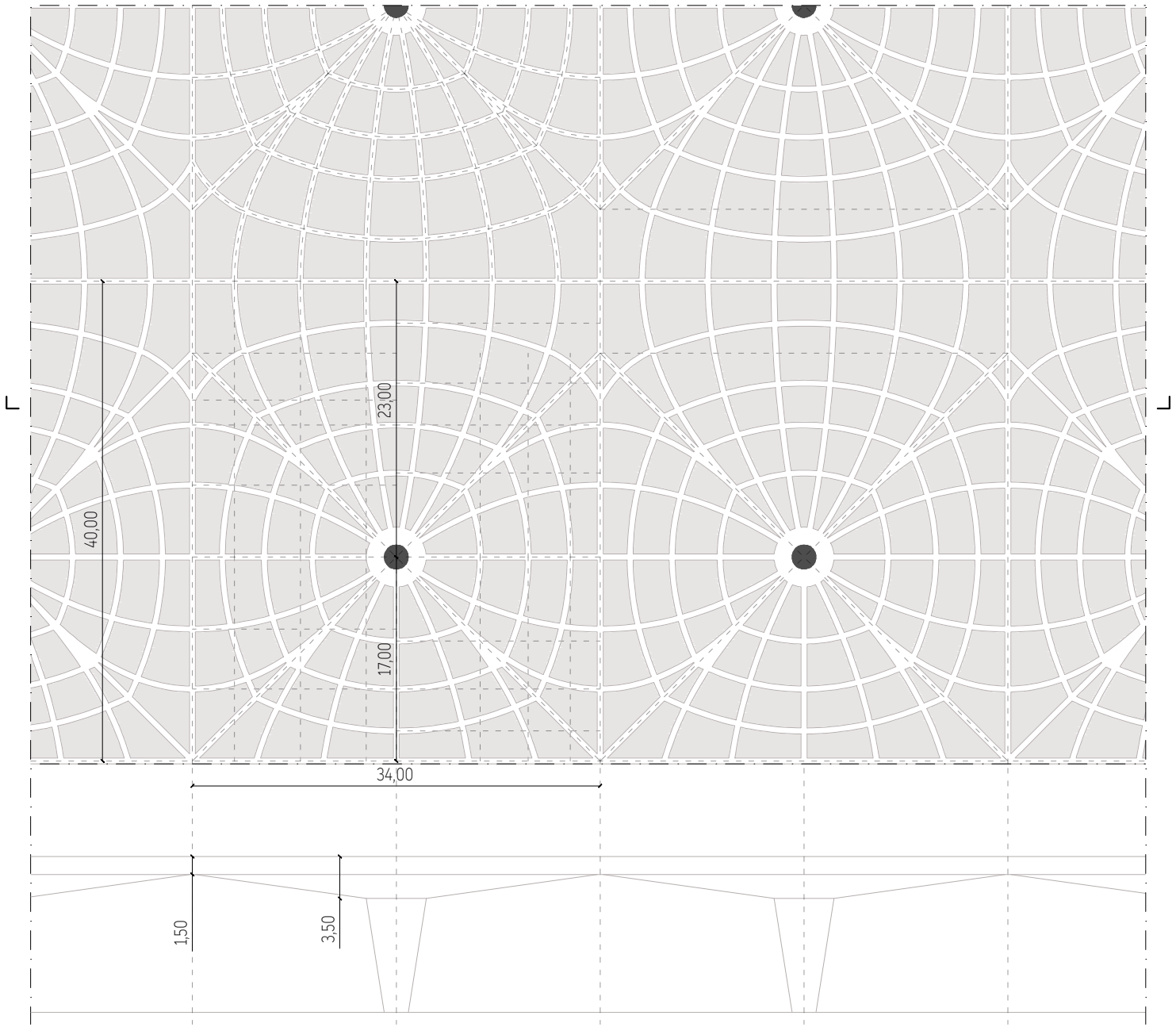
Metodo di realizzazione:
casseri in legno

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su 3 pilastri circolari a sezione variabile Ø 24-60cm. I pilastri sono cavi e contengono i pluviali; il bordo è libero







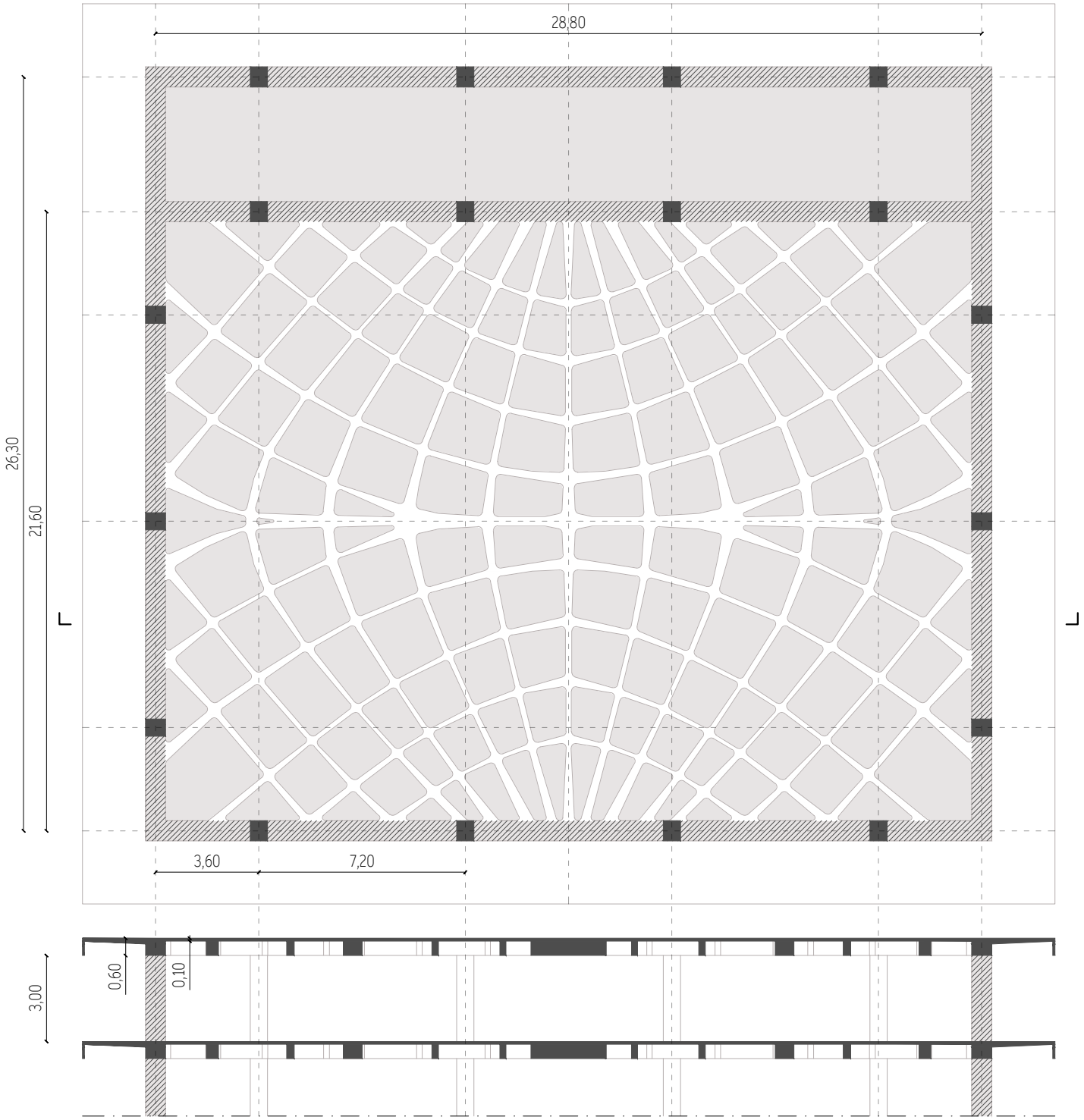
9 Progetto per la Stazione centrale di Napoli, Napoli, 1954
N° prog. Nervi: 1051 1114

scala 1:500

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia rettangolare non baricentrica

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri a sezione circolare rastremata, alla base Ø 200cm in sommità Ø 500cm



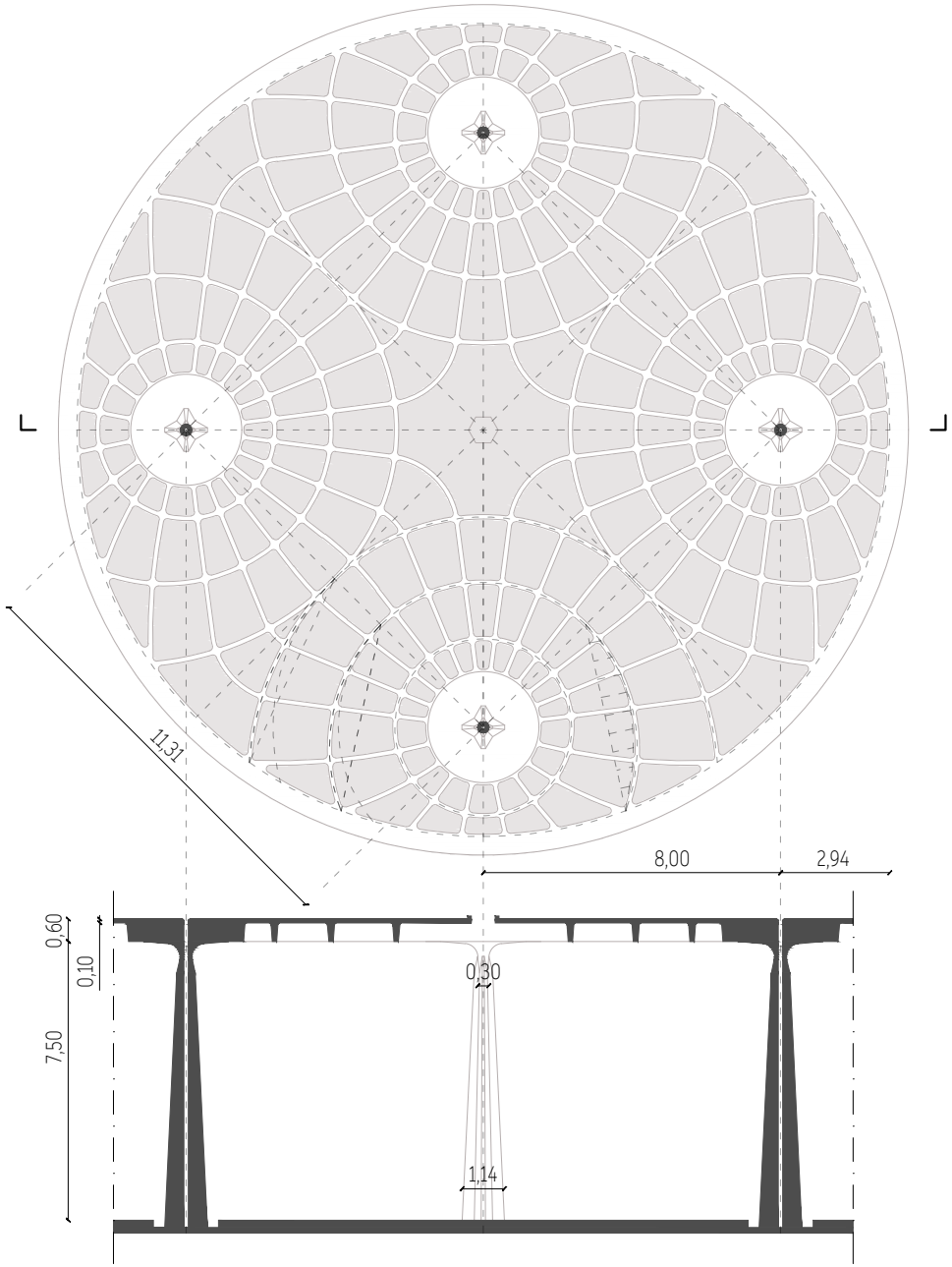
10 Progetto (terzo) per la nuova sede La Rinascente, Roma, 1957-1961
Con I. Gardella e L. Piccinato
N° prog. Nervi: 1097

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica rettangolare

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
distribuito sui lati lunghi. La presenza dei pilastri non influenza l'andamento delle linee



11 Chiesa del Cuore Immacolato di Maria, Borgo Panigale (BO), 1957-1962
Con G. Vaccaro

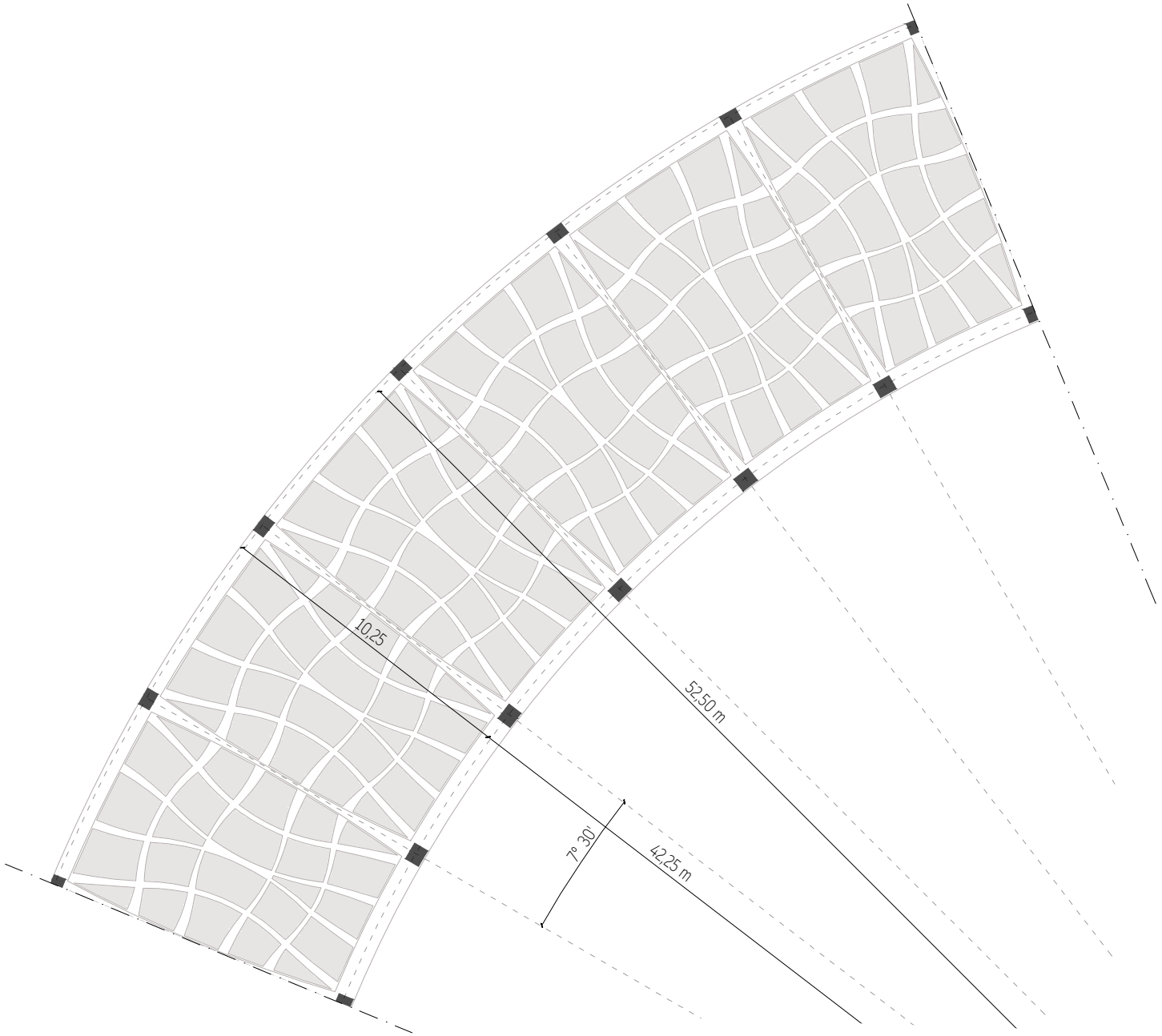
Scala 1:200

Tipologia:
4 solai a fungo su maglia circolare

Metodo di realizzazione:
singoli elementi prefabbricati a terra e messi in opera; l'accostamento di due elementi costituisce una porzione di nervatura

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su 4 pilastri a sezione variabile, cruciforme alla base 114cm e circolare in sommità Ø 30cm. I pilastri sono cavi e contengono i pluviali



12 Palazzo dello sport, Roma, 1958-1960. Piano della galleria
Con M. Piacentini
N° prog. Nervi: 1091
N° prog. Nervi e Bartoli: 4330

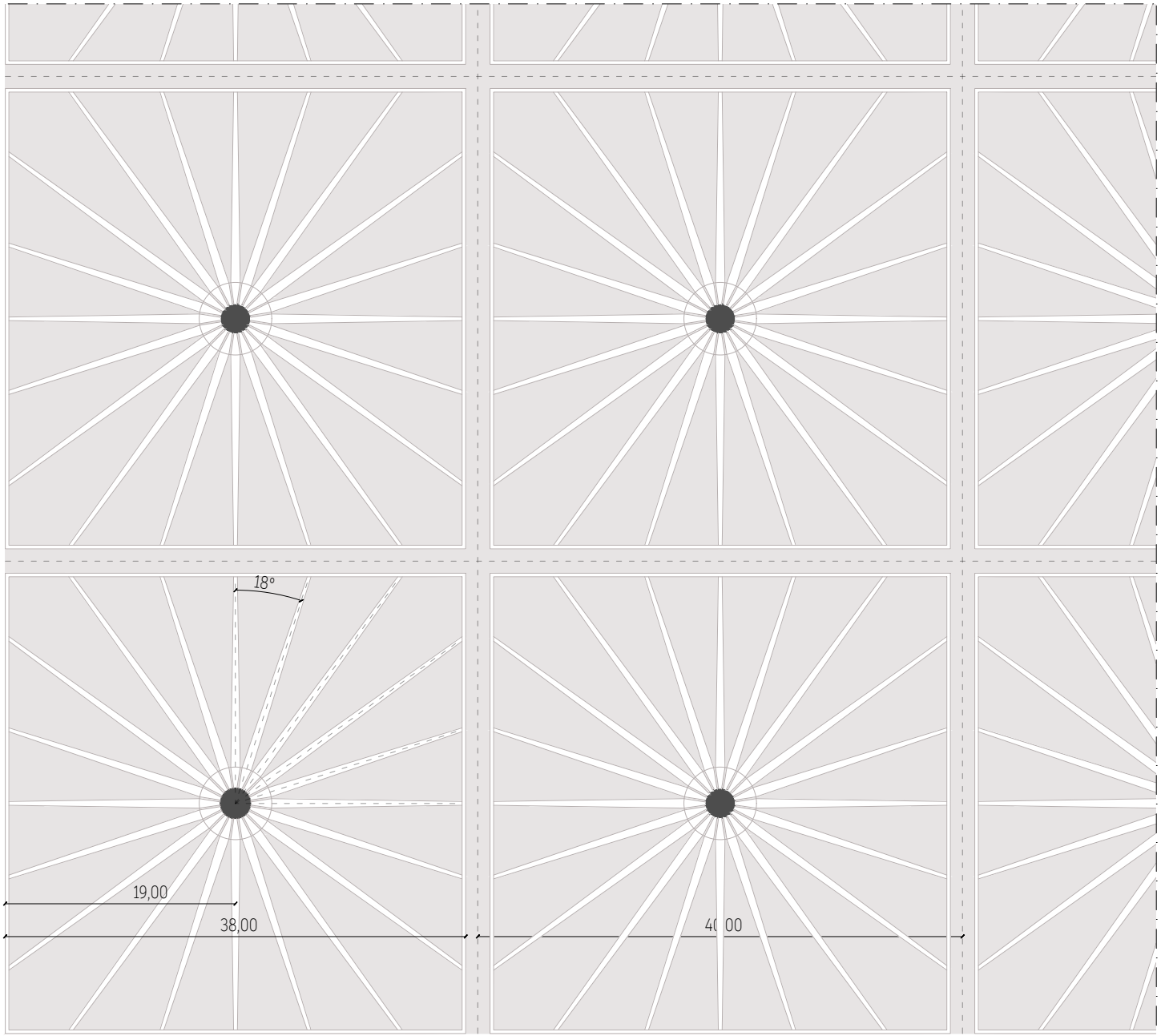
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a maglia trapezoidale in serie (48) a formare un anello

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
distribuito sui lati radiali



13 Palazzo del lavoro, Torino, 1959-1961. Piano principale
Con G. Covre
N° prog. Nervi: 1149
N° prog. Nervi e Bartoli: 4558

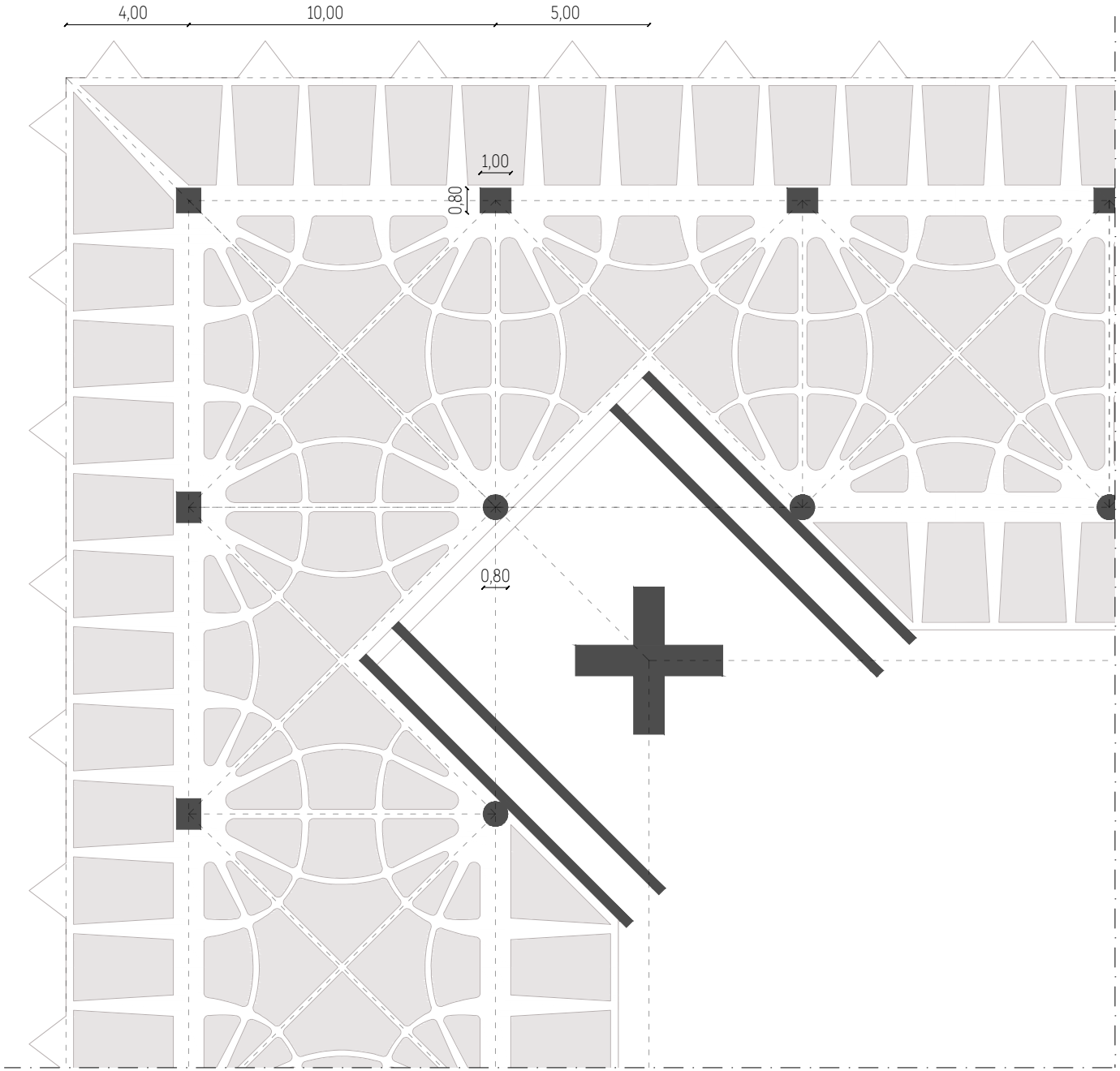
Scala 1:500

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia quadrata

Metodo di realizzazione:
travi in acciaio

Geometria delle linee:
linee rette a sezione rastremata

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri a sezione variabile, cruciforme alla base 480cm e circolare in sommità Ø 250cm



14 Palazzo del lavoro, Torino, 1959-1961. Piano mezzanino
Con G. Covre
N° prog. Nervi: 1149
N° prog. Nervi e Bartoli: 4558

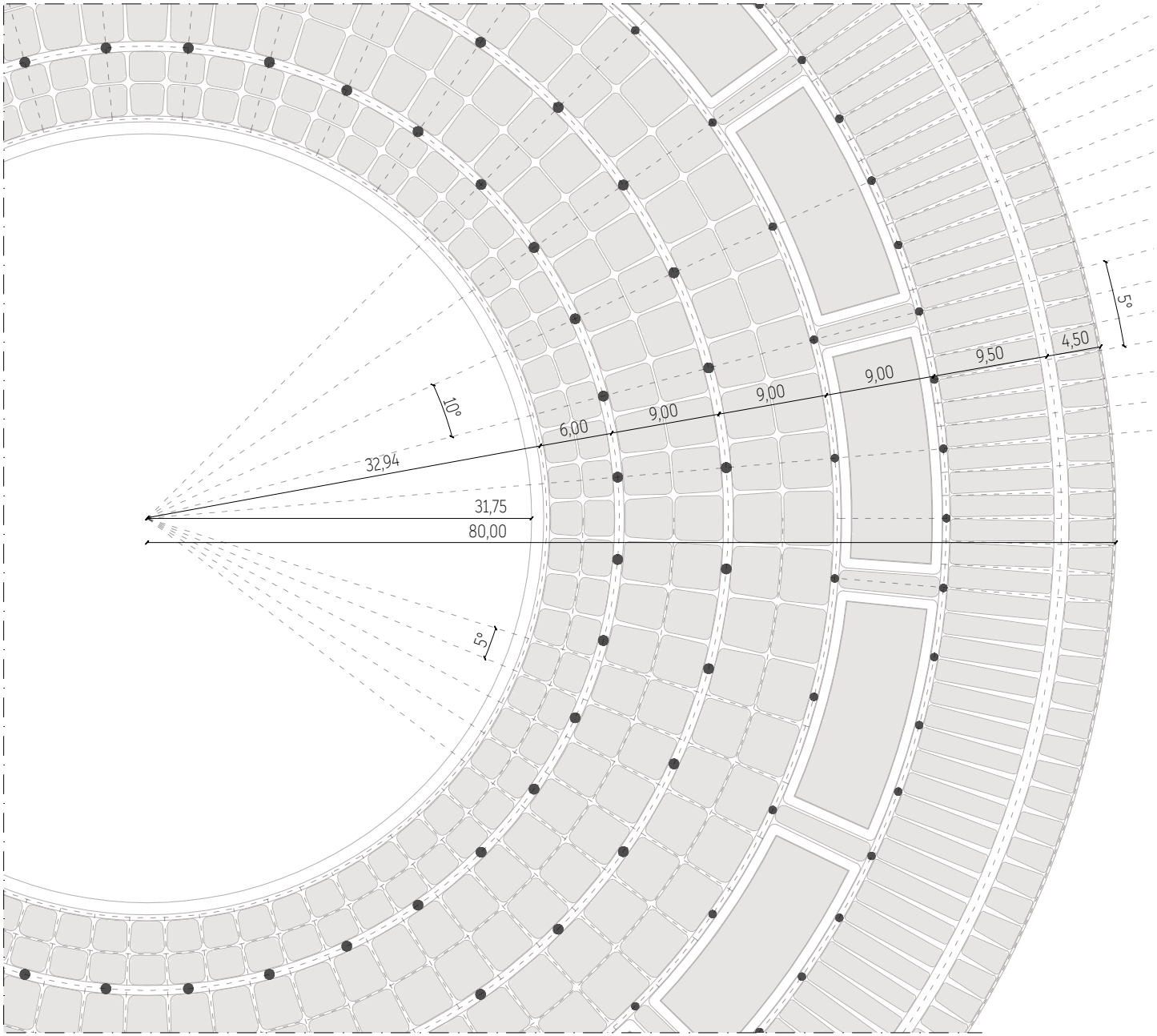
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia quadrata

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri circolari Ø 80cm e rettangolari 110x80cm



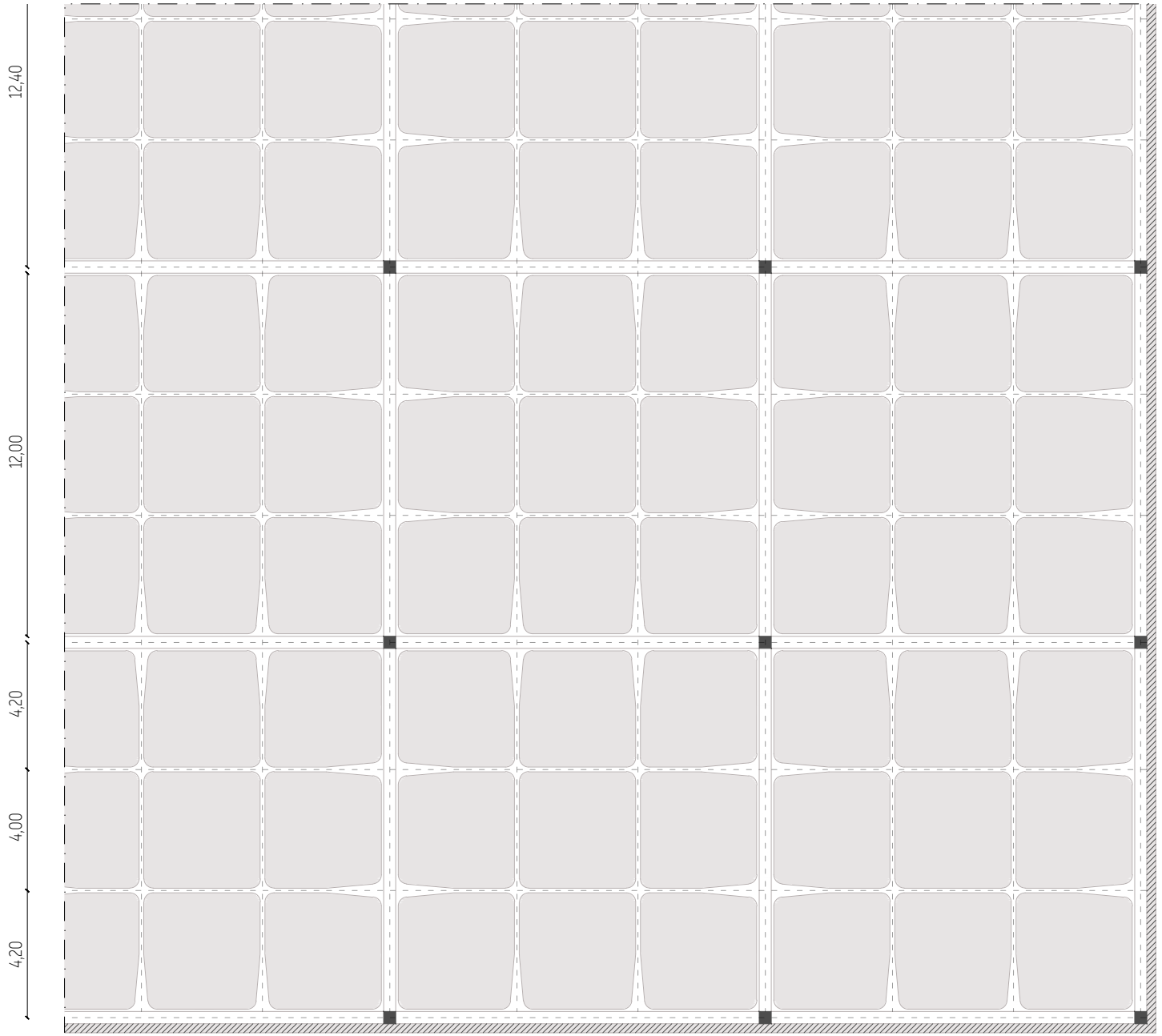
15 Progetto per la Fiera internazionale di Genova. Padiglione fieristico e palazzo dello sport 1960

Scala 1:500

Tipologia:
solaio a graticcio in serie ad anello

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri a sezione circolare Ø 80cm



16 Cartiera di Burgo, Mantova, 1961-1962. Deposito
N° prog. Nervi e Bartoli: 4688

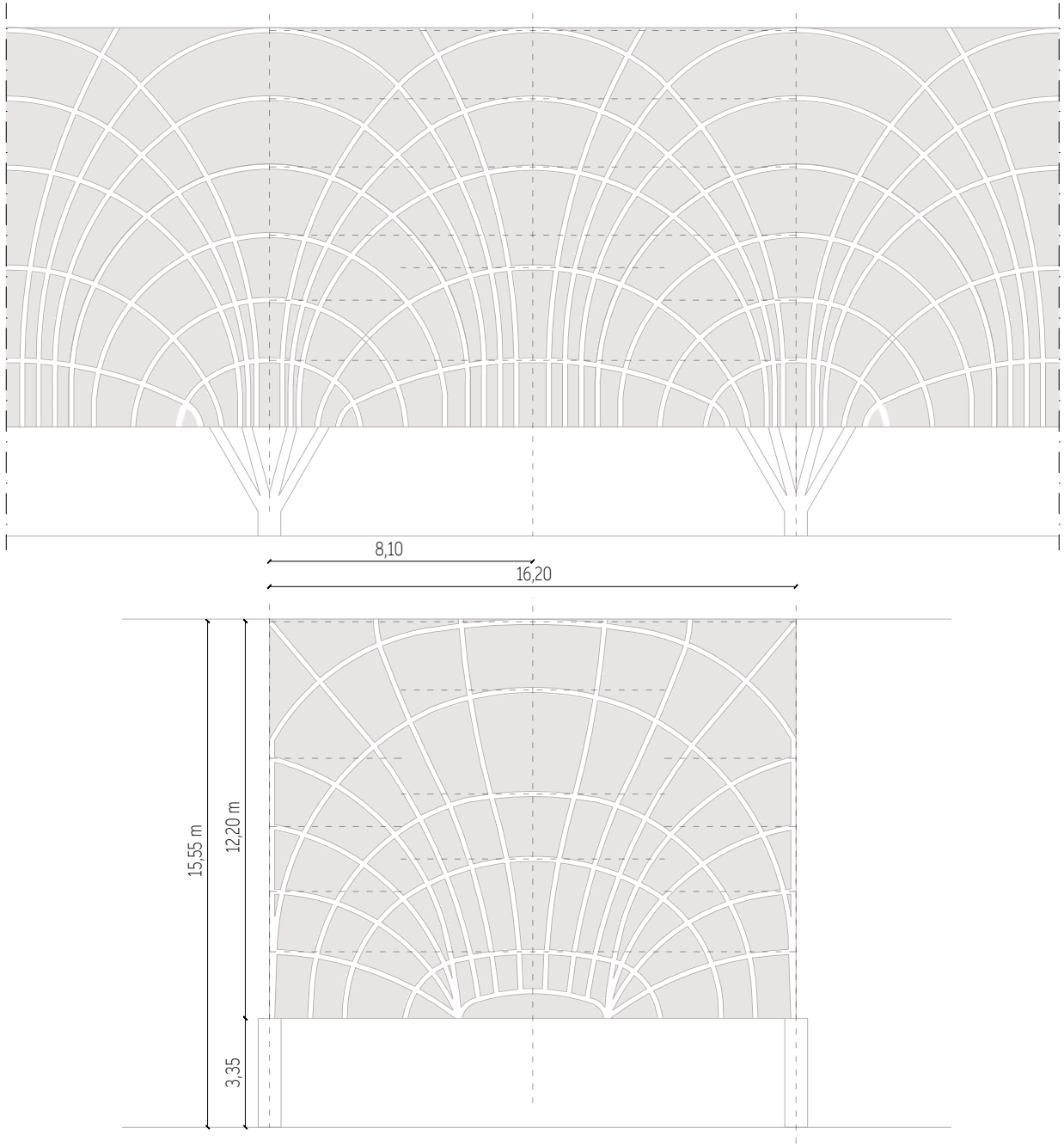
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a graticcio in serie su maglia quadrata

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri 40x40 cm; distribuito sul bordo esterno



17 Progetto della Chiesa per il quartiere ANIC, Ravenna (Disegno A. Arcangeli, mod. Ravenna) 1961-1964
N° prog. Nervi: 1122

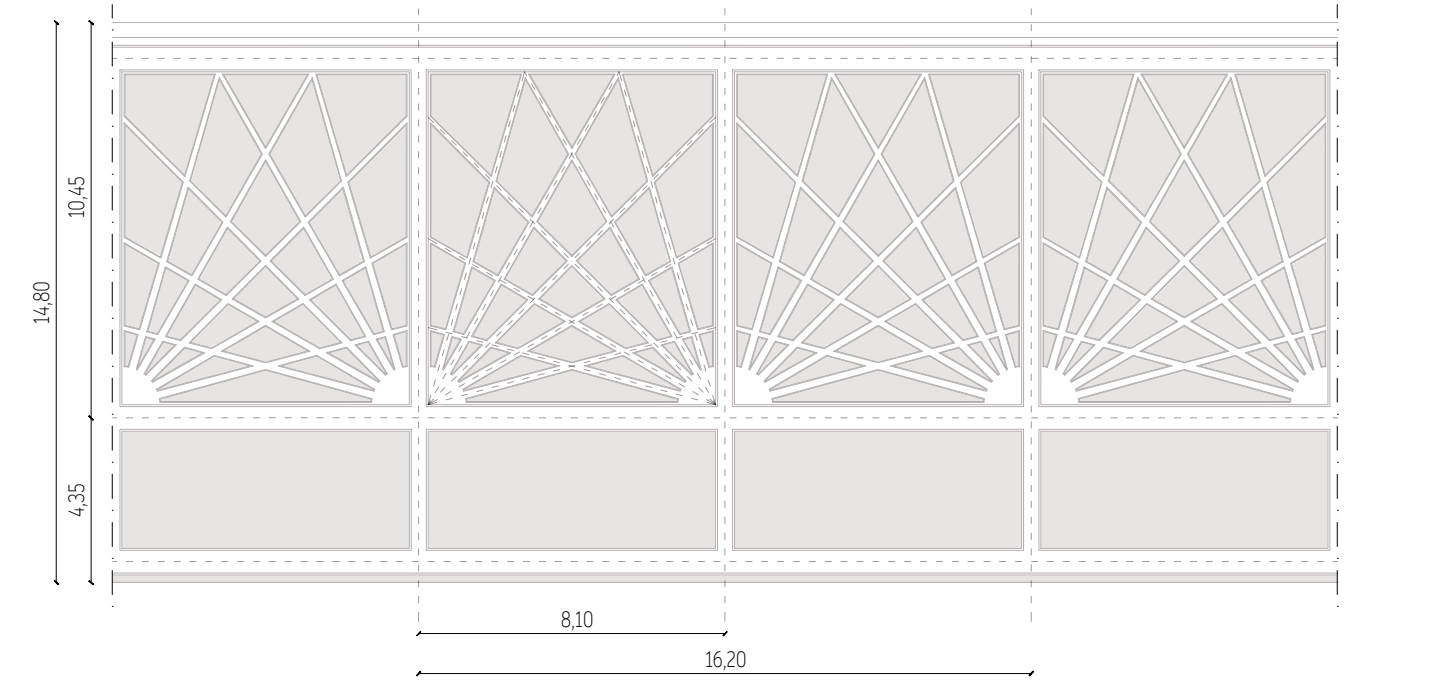
Scala 1:200

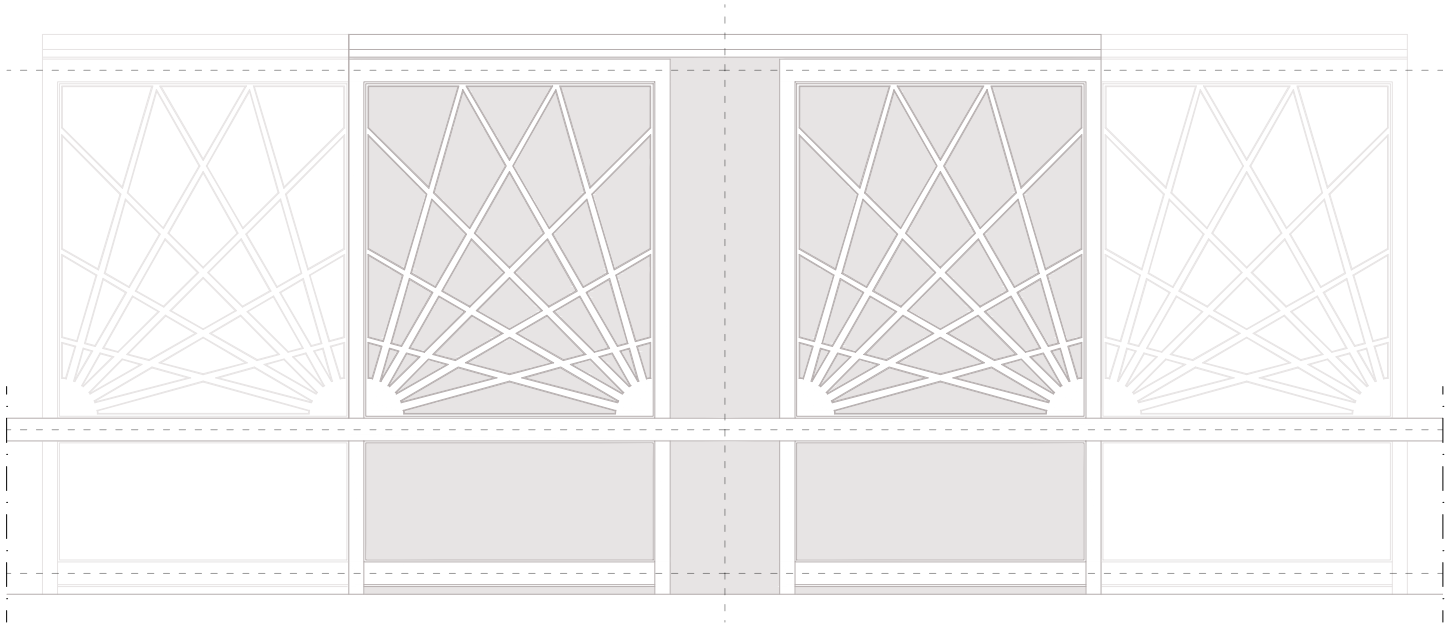
Tipologia:
parete con linee isostatiche di sforzo normale

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante
Dimensioni del modulo:
16,20x12,20 m

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri

Note:
Le dimensioni di questa parete sono state determinate in analogia con il progetto della chiesa per il quartiere ANIC a Ravenna, ipotizzando che questo ne sia uno studio





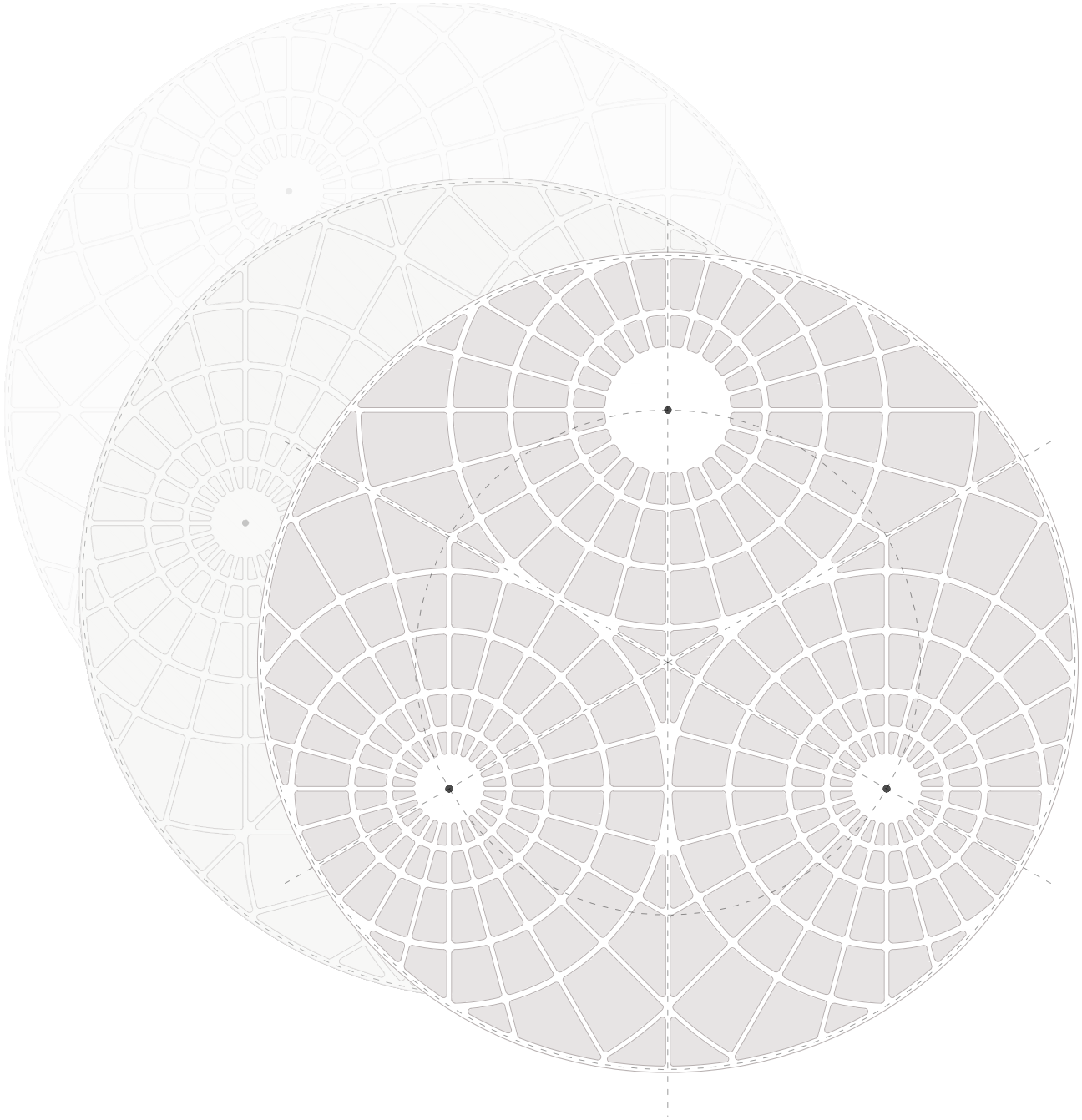
18 Progetto della Chiesa per il quartiere ANIC, Ravenna 1961-1964
N° prog. Nervi: 1122

Scala 1:200

Tipologia:
parete con linee isostatiche di sforzo normale

Geometria delle linee:
linee rette a sezione costante
Dimensioni del modulo:
16,20x10,45 m

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri



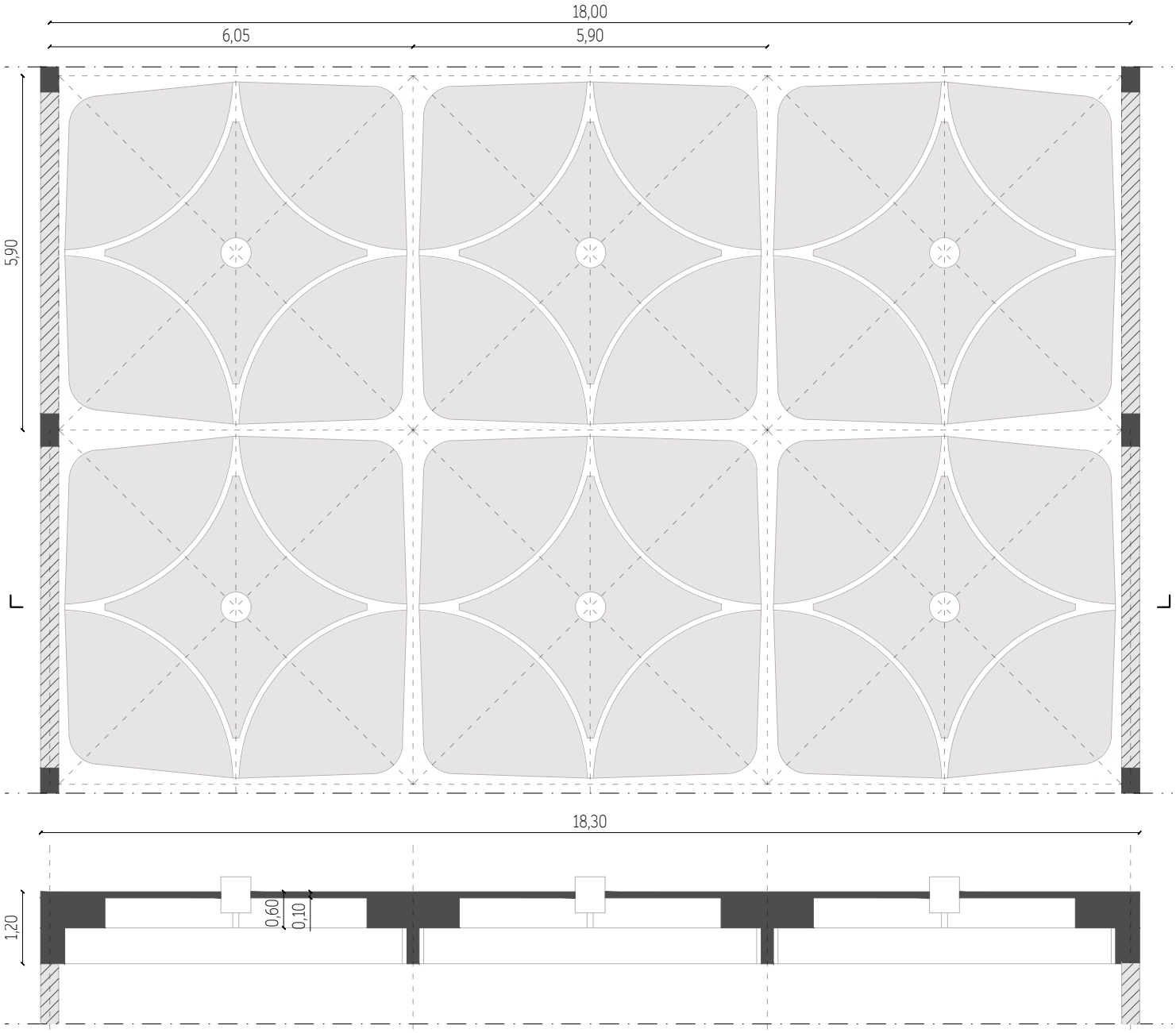
19 Autogrill Motta
autostrada Limena-Padova, Padova, 1961-1965
(soluzione girevole non realizzata)
Con M. Bega
N° prog. Nervi: 1148
N° prog. Nervi e Bartoli: 5129

Scala 1:200

Tipologia:
3 solai a fungo su maglia circolare

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante. Dai pochi disegni disponibili è stata dedotta la dimensione approssimativa della piattaforma: Ø 26m; dimensioni del modulo: Ø 13,80m

Tipo di supporto:
puntuale su 3 pilastri. Uno dei pilastri (in alto) contiene il supporto per rendere il solaio girevole, tuttavia non è chiaro il meccanismo



20 Autogrill Motta autostrada Limena-Padova, Padova, 1961-1965. Copertura dei corpi bassi (soluzione a ponte realizzata) con M. Bega
N° prog. Nervi: 1148
N° prog. Nervi e Bartoli: 5129

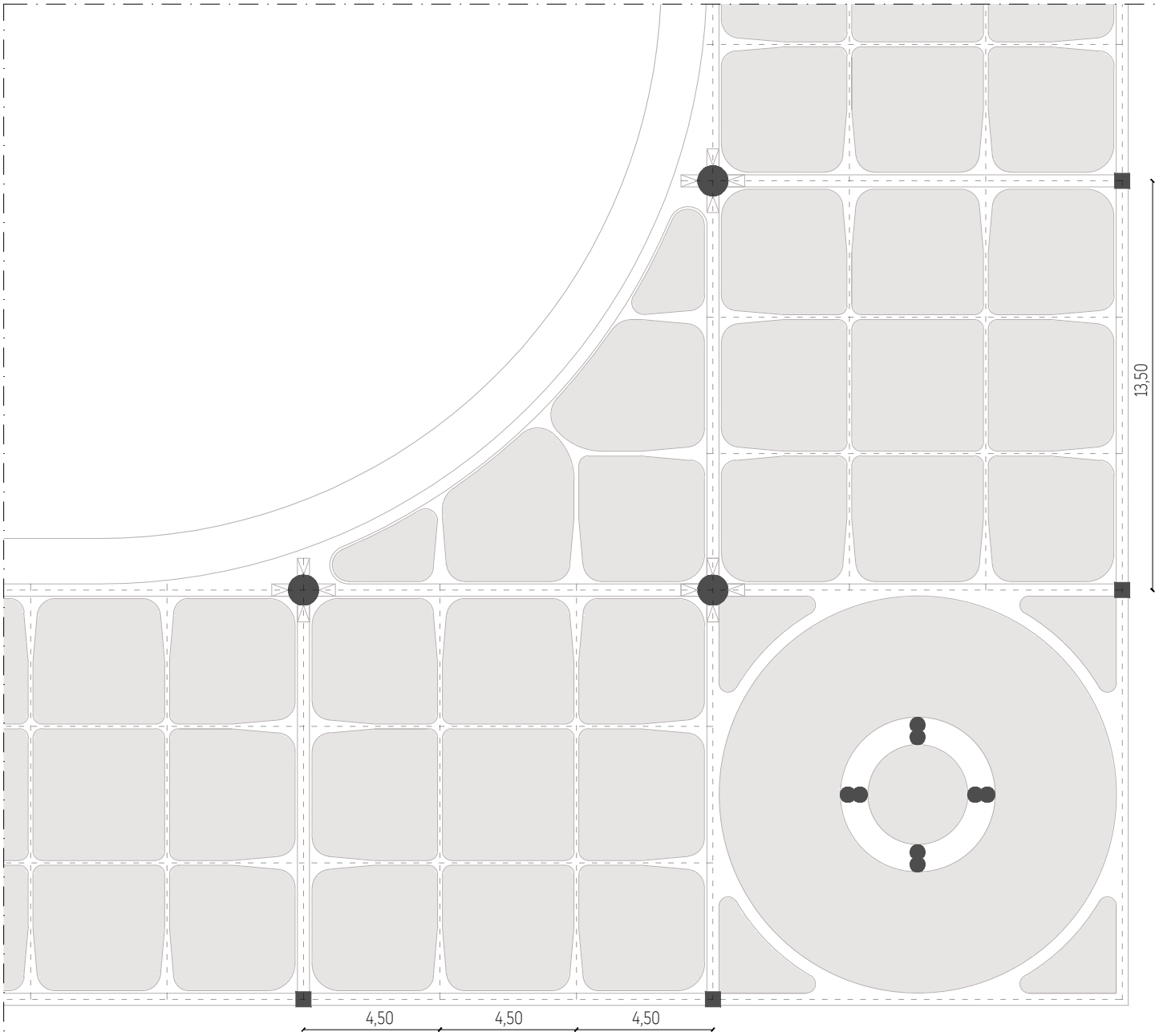
Scala 1:100

Tipologia:
solaio a maglia quadrata in serie

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
distribuito sulle travi principali che costituiscono i campi quadrati in cui è diviso l'intero solaio



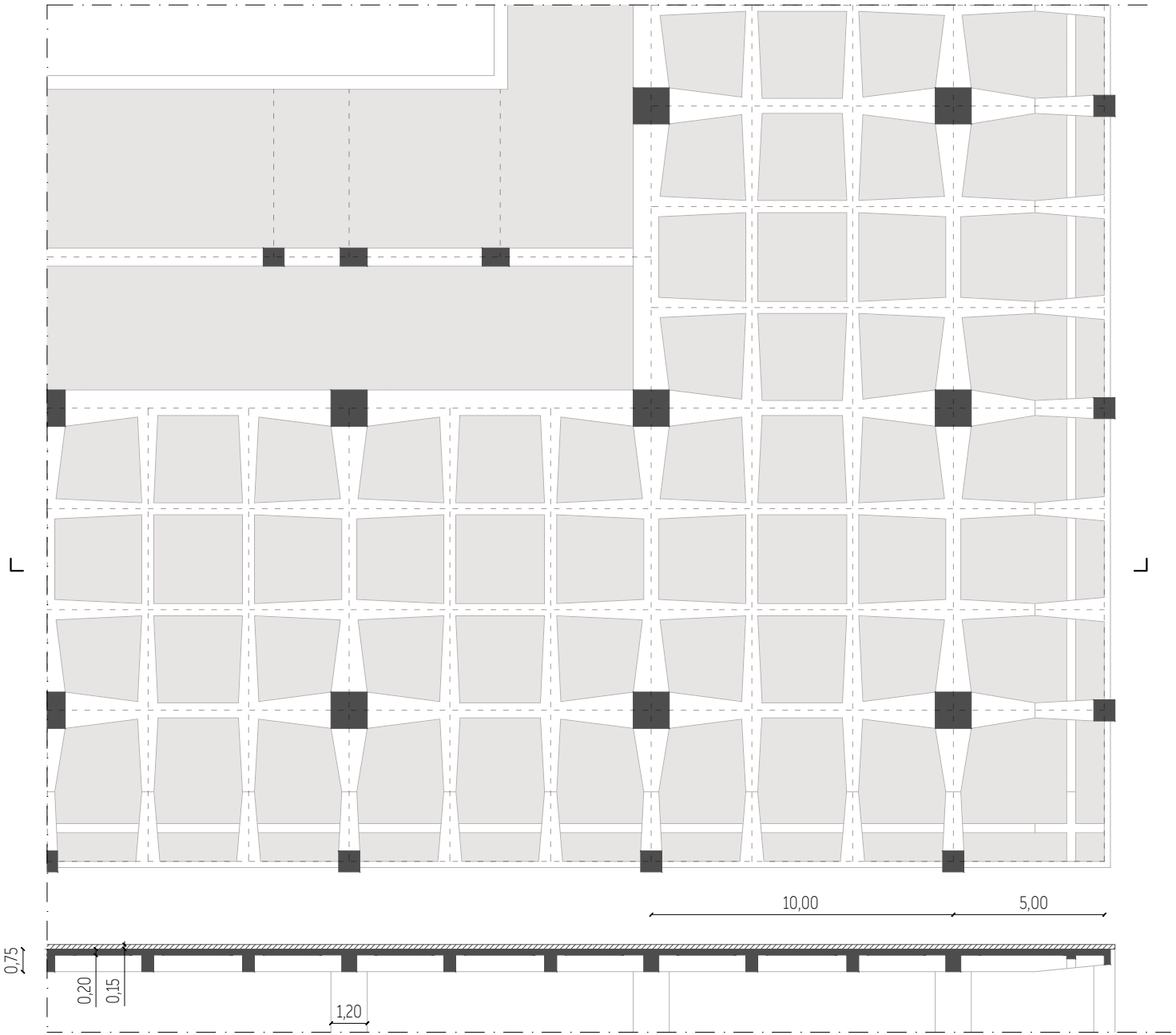
21 Progetto per la Fiera di Catania. Edificio a utilizzazione multiple, Catania 1962. Piano mezzanino
N° prog. Nervi: 1128

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a graticcio a maglia quadrata

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri a sezione variabile, cruciforme alla base 210cm e circolare in sommità Ø 100cm; i pilastri di bordo hanno sezione quadrata 50x50 cm



22 Edificio per i servizi monetari della Banca d'Italia in via Tuscolana, Roma 1961-1975
N° prog. Nervi: 1130

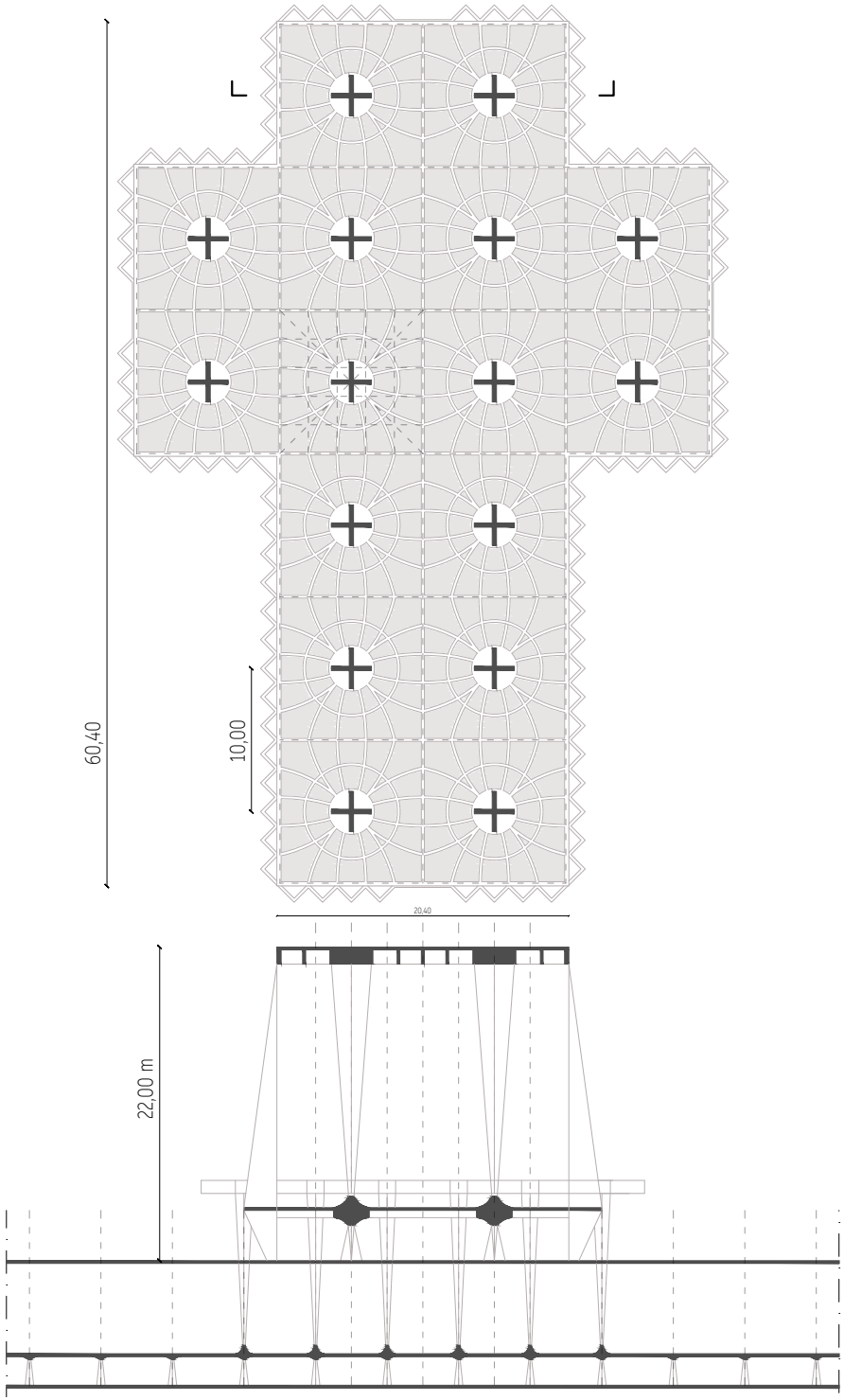
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a graticcio a maglia quadrata

Metodo di realizzazione:
casseri in legno

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri 120x120cm



23 Progetto Cattedrale dedicata alla Gran Madre di Dio, Taranto, 1962
N° prog. Nervi: 1152

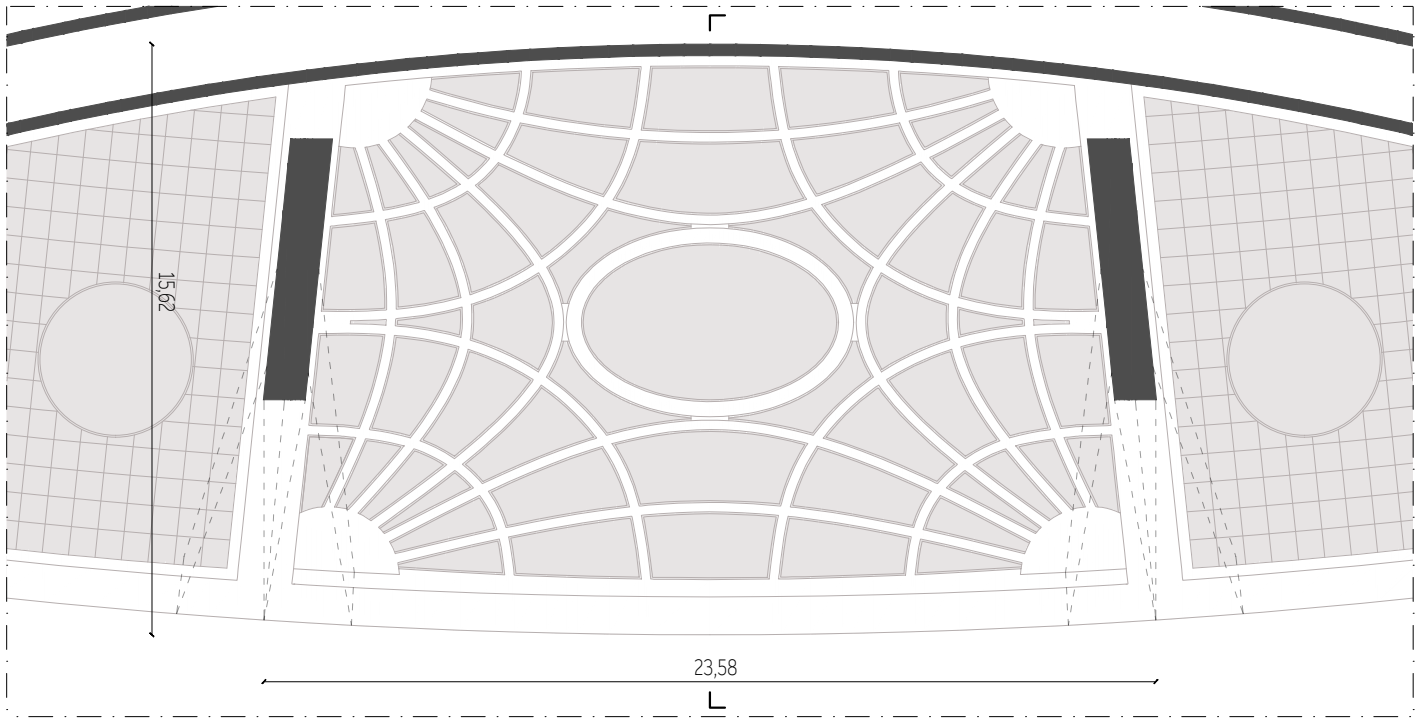
Scala 1:500

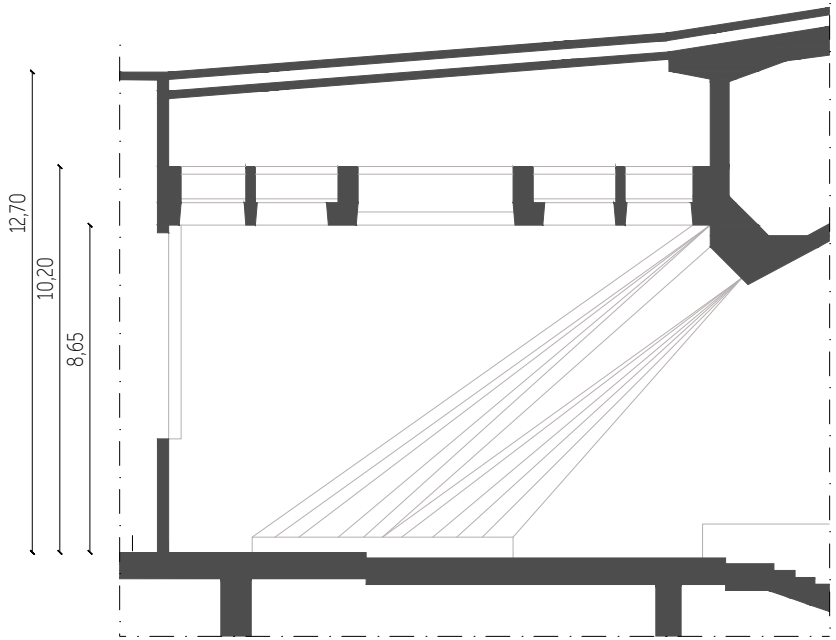
Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia quadrata

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su 16 pilastri a sezione variabile, cruciforme alla base circolare in sommità.

Note:
La geometria di questo solaio è stata ricostruita sulla base di un numero limitato di disegni, alcuni dei quali eseguiti a mano libera. Di conseguenza, la rappresentazione potrebbe riportare alcune imprecisioni. Non è stato possibile interpretare del tutto il disegno della sezione del piano interrato





25 Sala per le udienza in Vaticano, Roma, 1963-1971. Tribuna papale
N° prog. Nervi : 1189
N° prog. Nervi e Bartoli: 5128

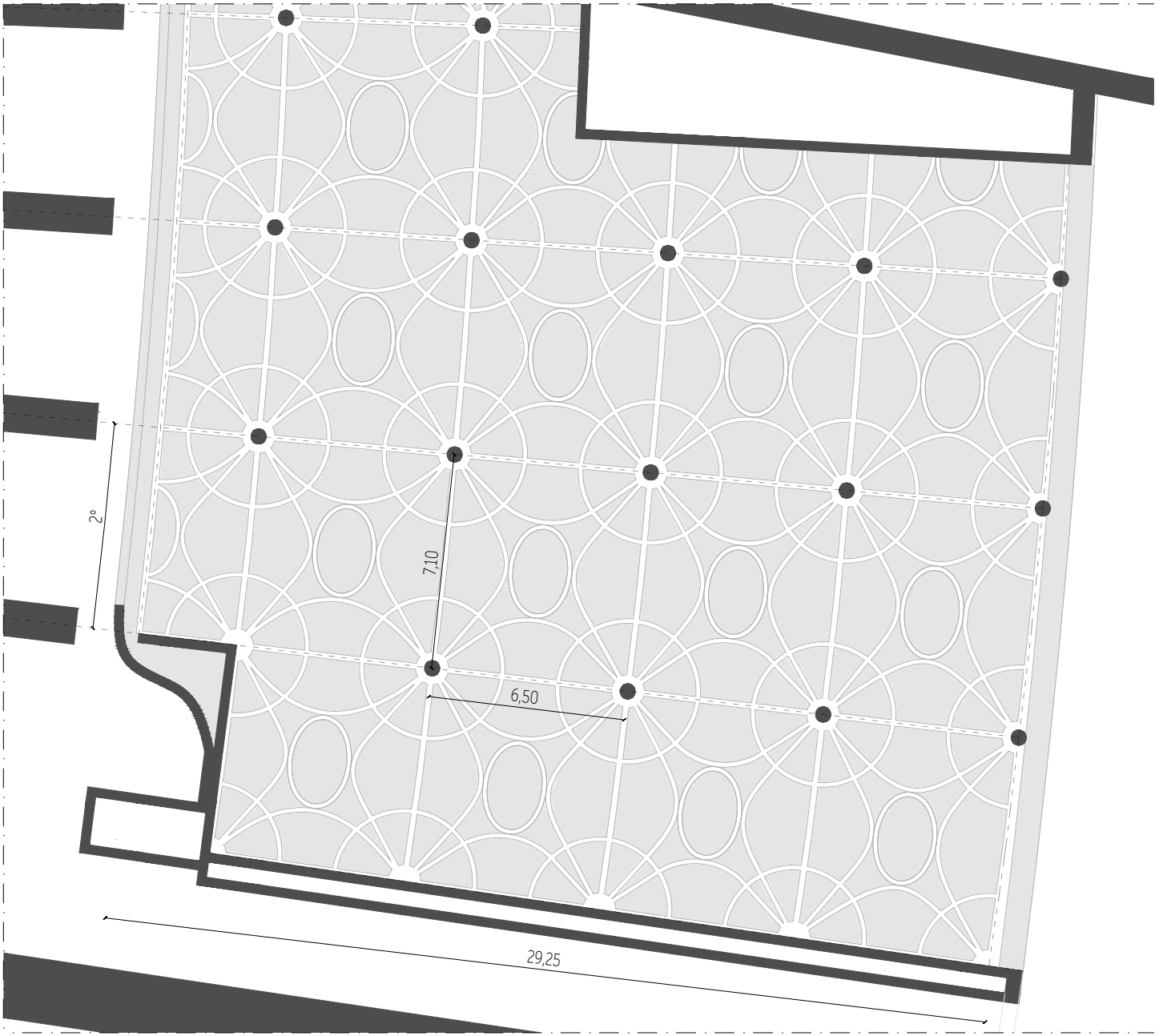
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica trapezoidale con oculo centrale

Metodo di realizzazione:
uso di elementi prefabbricati eseguiti fuori opera che costituiscono casseformi a perdere in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale sugli angoli



26 Sala per le udienza in Vaticano, Roma, 1963-1971. Ingresso
N° prog. Nervi : 1189
N° prog. Nervi e Bartoli: 5128

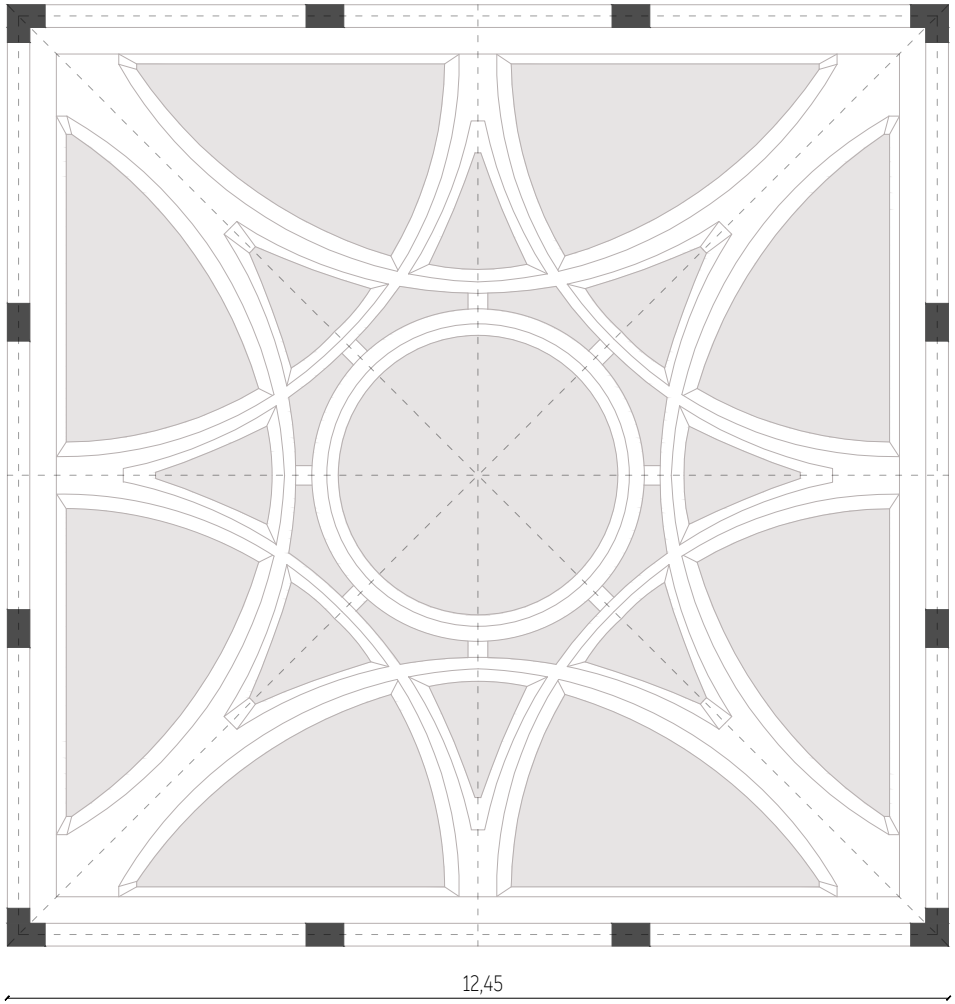
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia trapezoidale

Metodo di realizzazione:
uso di elementi prefabbricati eseguiti fuori opera che costituiscono casseforme a perdere in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri



27 Sala per le udienza in Vaticano, Roma, 1963-1971. Sala per le udienze particolari
N° prog. Nervi : 1189
N° prog. Nervi e Bartoli: 5128

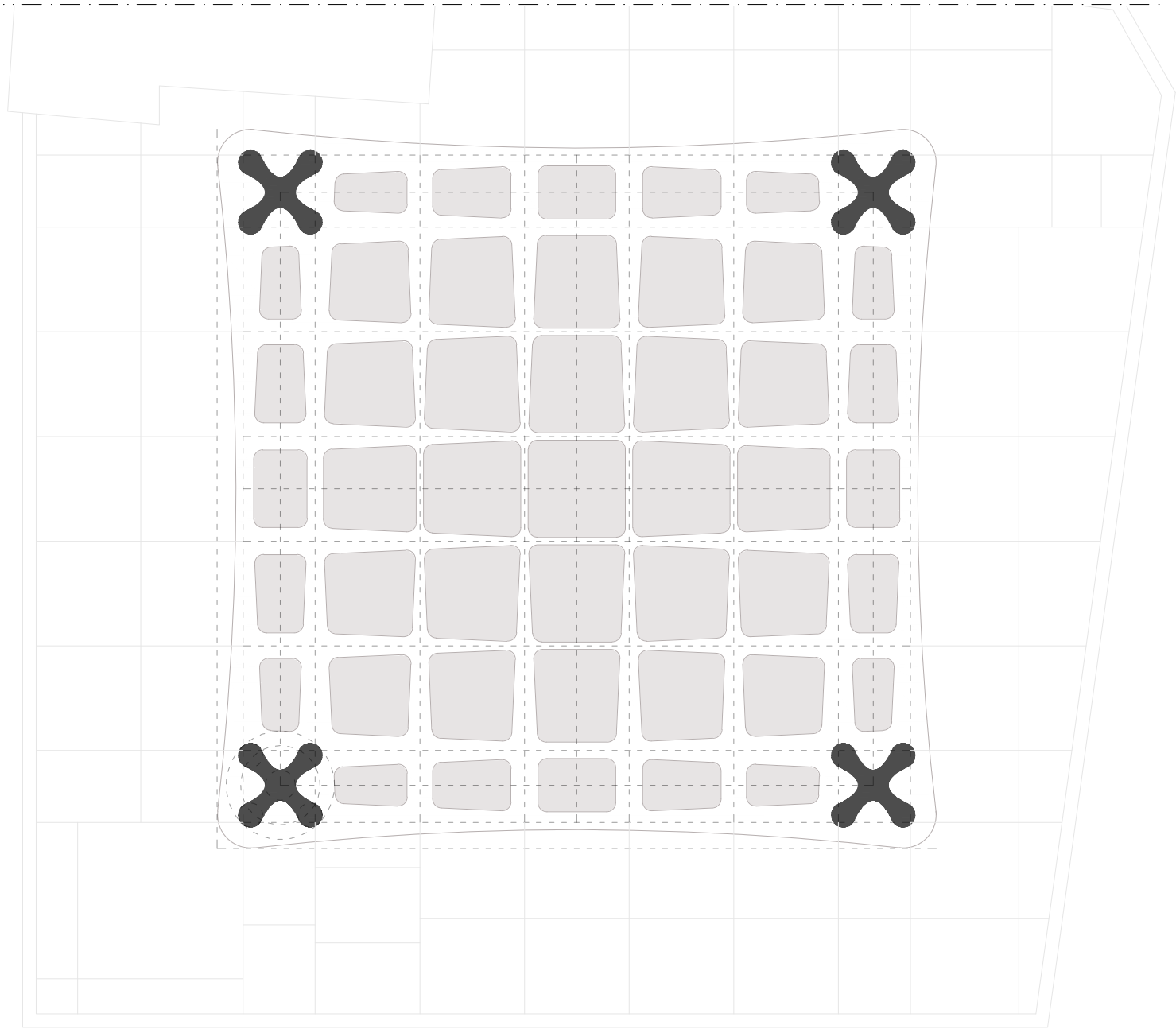
scala 1:100

Tipologia:
solaio a piastra unica quadrata con oculo centrale

Metodo di realizzazione:
uso di elementi prefabbricati eseguiti fuori opera che costituiscono casseforme a perdere in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale sugli angoli



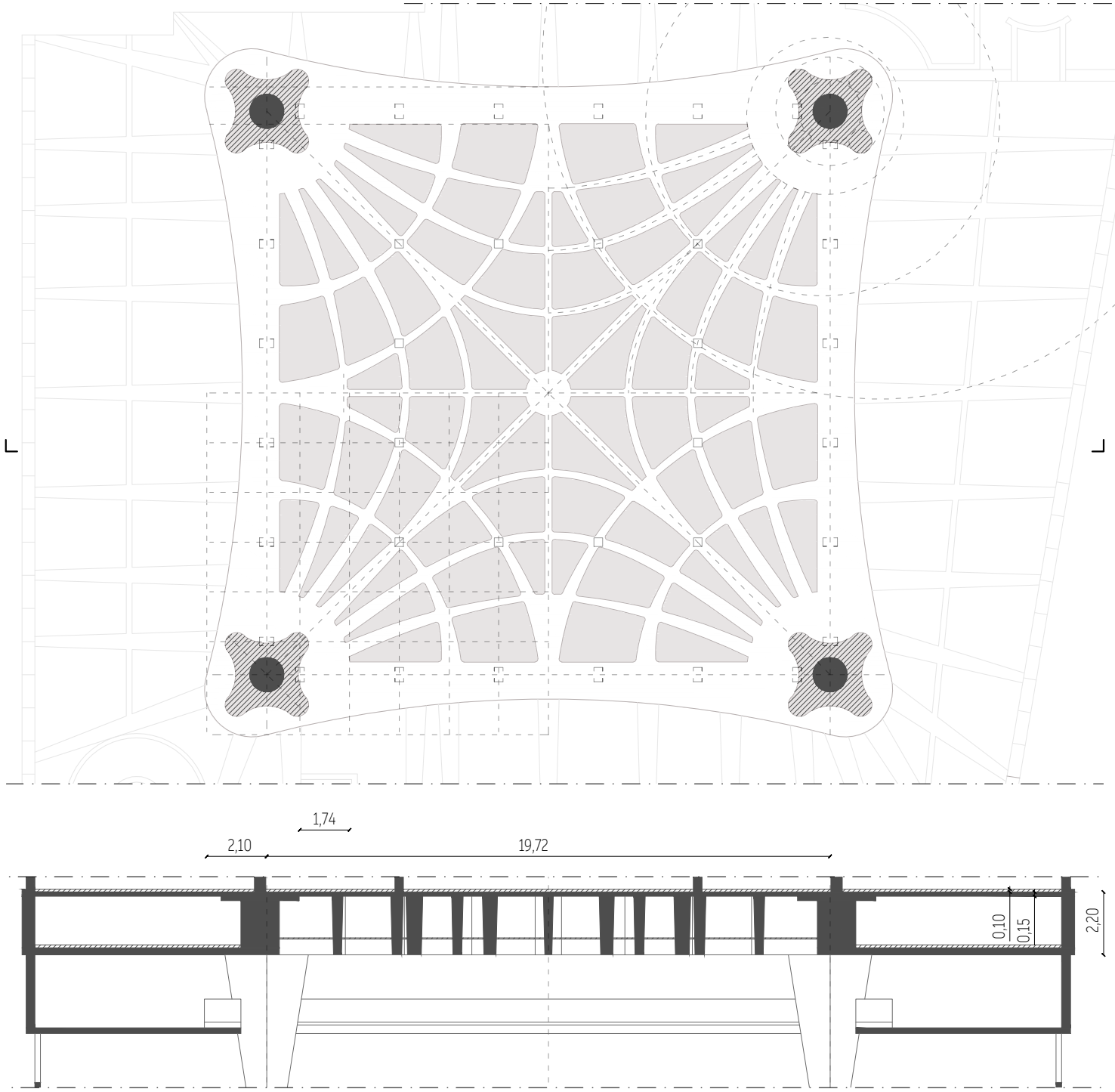
28 Sede della Cassa di risparmio, Venezia, 1963-1972 (progetto preliminare non realizzato a linee ortogonali)
Con A. Scattolin
N° prog. Nervi: 1185
N° prog. Nervi e Bartoli: 5234

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a graticcio a piastra unica quadrata

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su 4 pilastri a sezione variabile, circolare alla base (probabilmente Ø 120cm) e cruciforme in sommità 360cm.



29 Sede della Cassa di risparmio, Venezia, 1963-1972 (progetto realizzato a linee isostatiche)
Con A. Scattolin
N° prog. Nervi: 1185
N° prog. Nervi e Bartoli: 5234

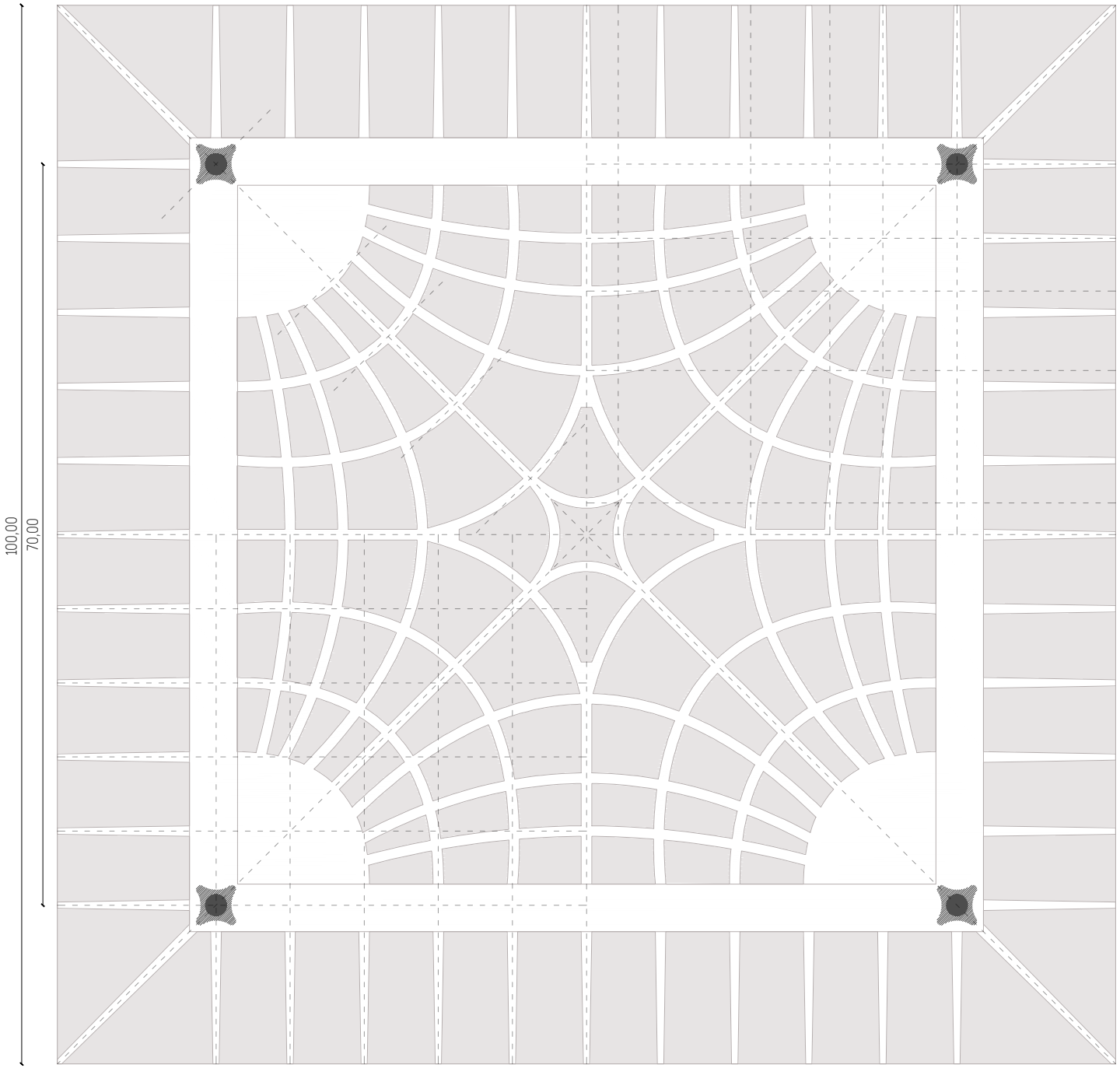
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica quadrata

Metodo di realizzazione:
uso di elementi prefabbricati eseguiti fuori opera che costituiscono casseformi a perdere in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su 4 pilastri a sezione variabile, circolare alla base Ø 120cm e cruciforme in sommità 380cm.



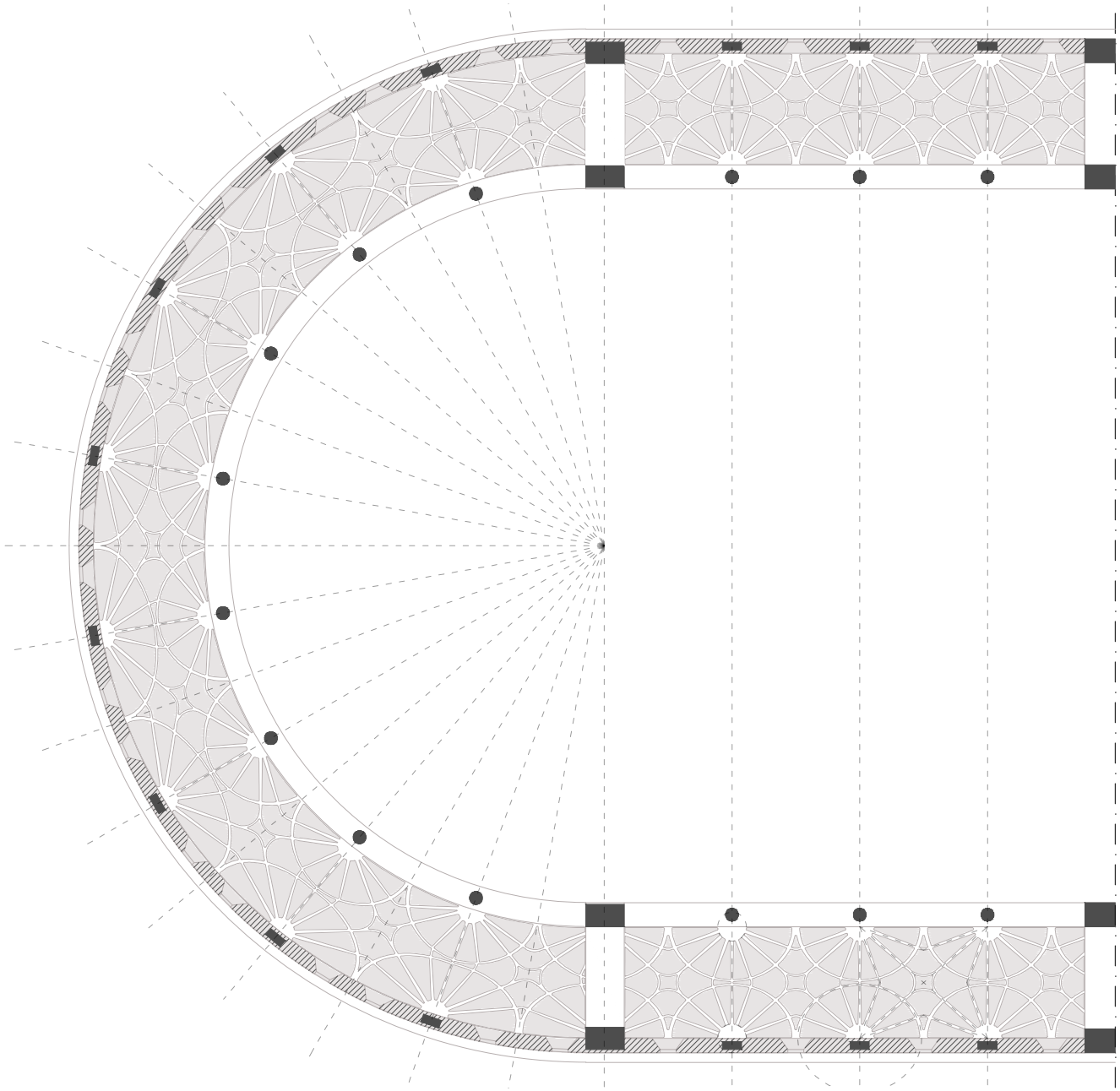
30 Progetto per Enrico Fermi memorial, Chicago, 1964-1966
N° prog. Nervi: 1205

Scala 1:500

Tipologia:
solaio a piastra unica quadrata

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su 4 pilastri a sezione variabile, cruciforme alla base 500cm e circolare in sommità Ø 200cm.



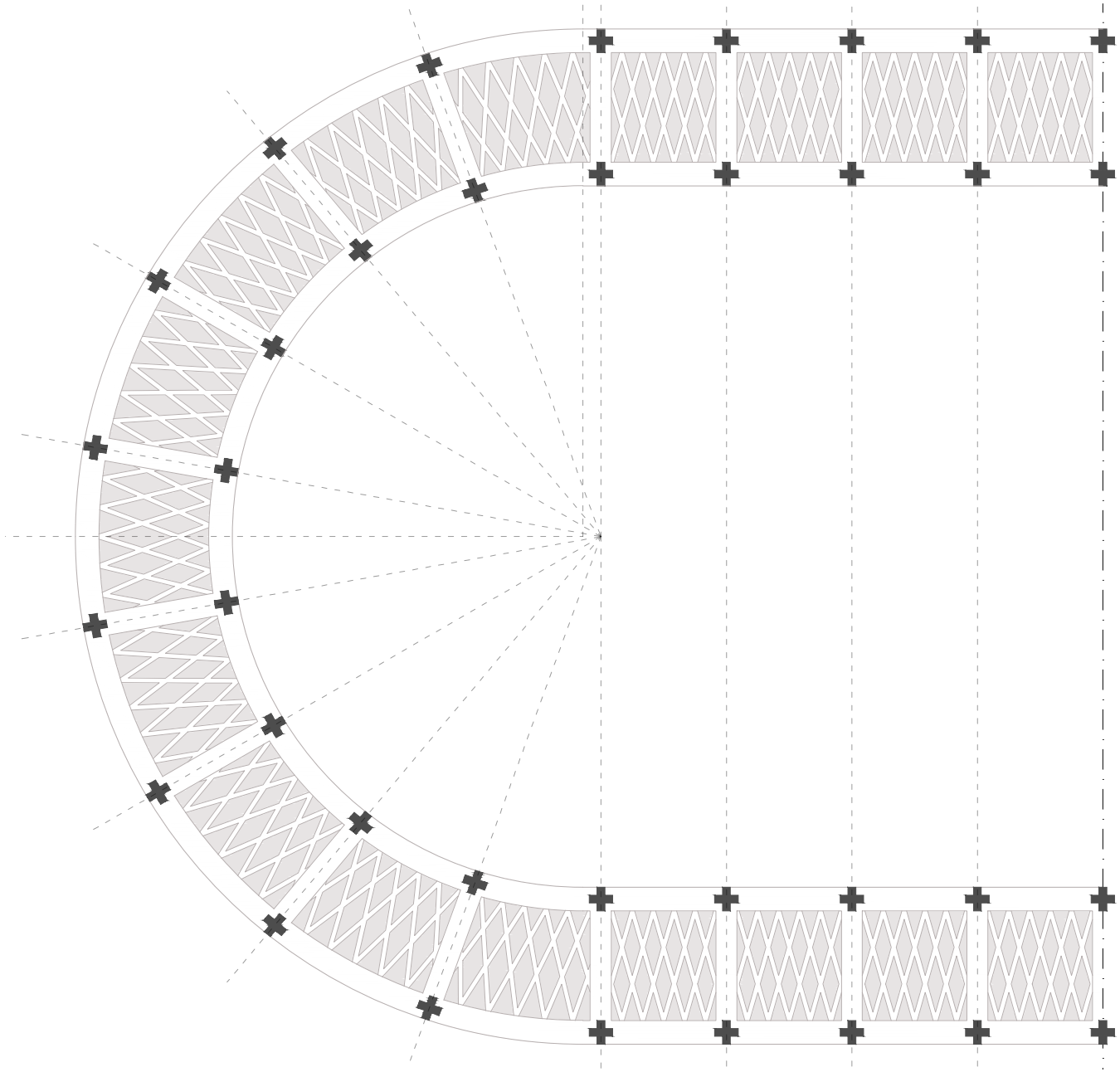
32 Progetto per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth, Portsmouth, 1964-1968
Con Seely e Paget Architects
N° prog. Nervi: 1212

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia trapezoidale e rettangolare

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri circolari Ø 40cm e pilastri inseriti nella muratura di dimensioni 50x25cm



32 Progetto per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth, Portsmouth, 1964-1968
Con Seely e Paget Architects
N° prog. Nervi: 1212

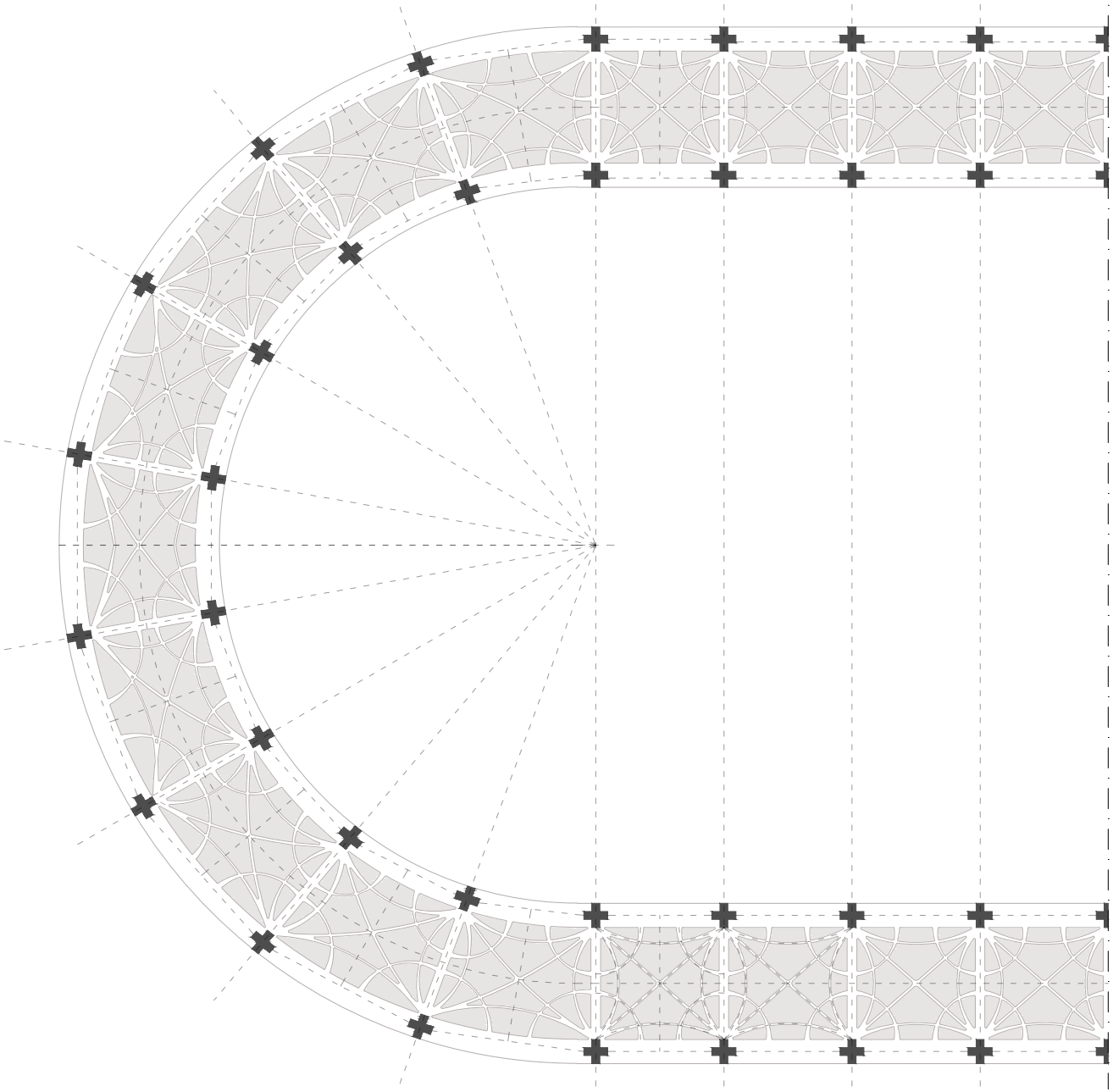
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a graticcio romboidale su campate regolari rettangolari e trapezoidali

Geometria delle linee:
linee rette a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri cruciformi 75 cm

Note:
esiste una variante di questa versione priva delle travi tra i pilastri, che presenta un disegno continuo nell'intradosso. Questa configurazione viene proposta come un'alternativa al disegno precedente



32 Progetto per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth, Portsmouth, 1964-1968
Con Seely e Paget Architects
N° prog. Nervi: 1212

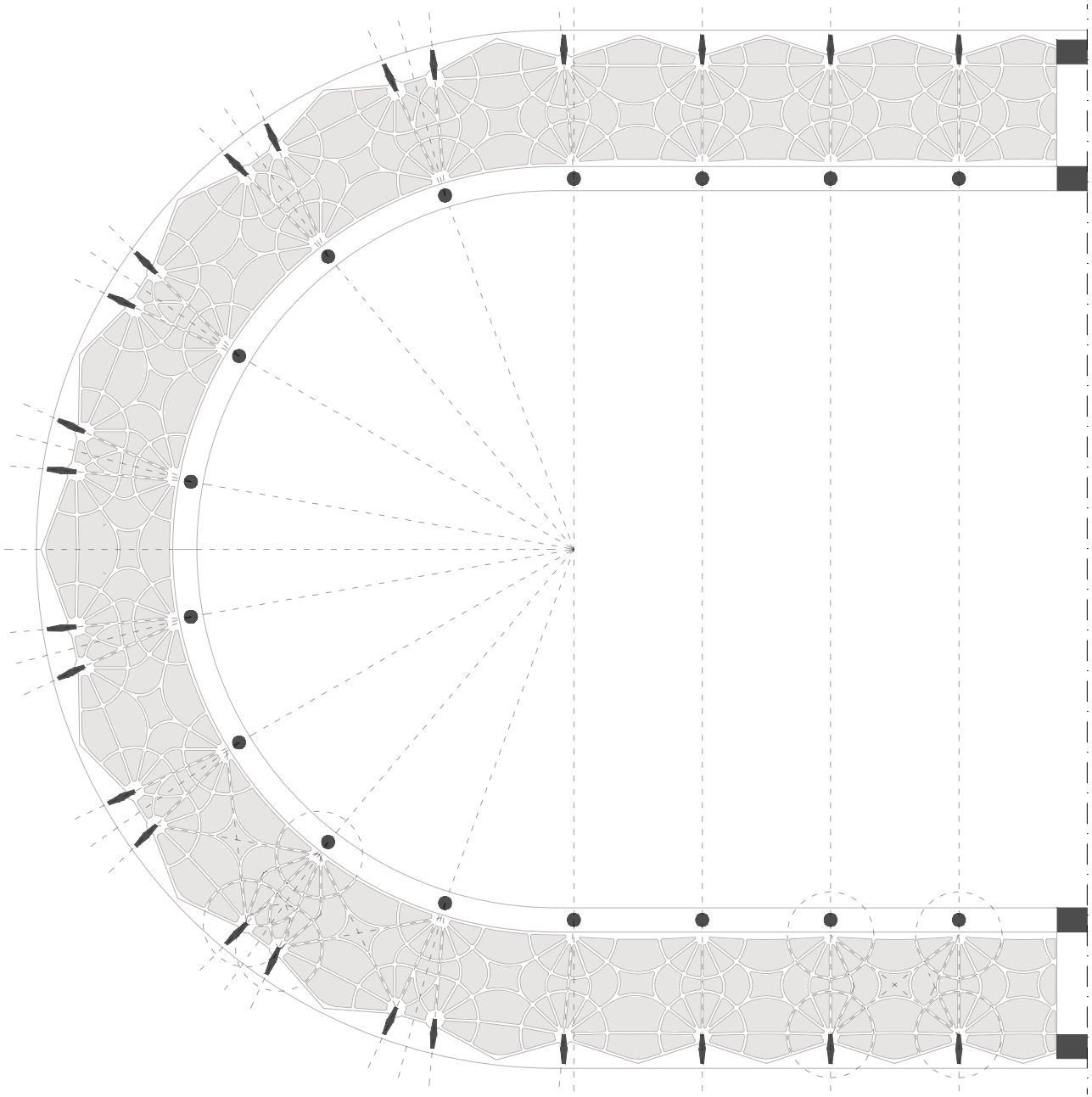
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia trapezoidale e rettangolare

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri cruciformi 75 cm

Note:
esiste una variante di questa versione in cui le travi tra i pilastri sono più spesse, paragonabili a quelle della versione precedente. Questa configurazione viene proposta come un'alternativa al primo disegno



32 Progetto per l'ampliamento della Cattedrale di Portsmouth, Portsmouth, 1964-1968
Con Seely e Paget Architects
N° prog. Nervi: 1212

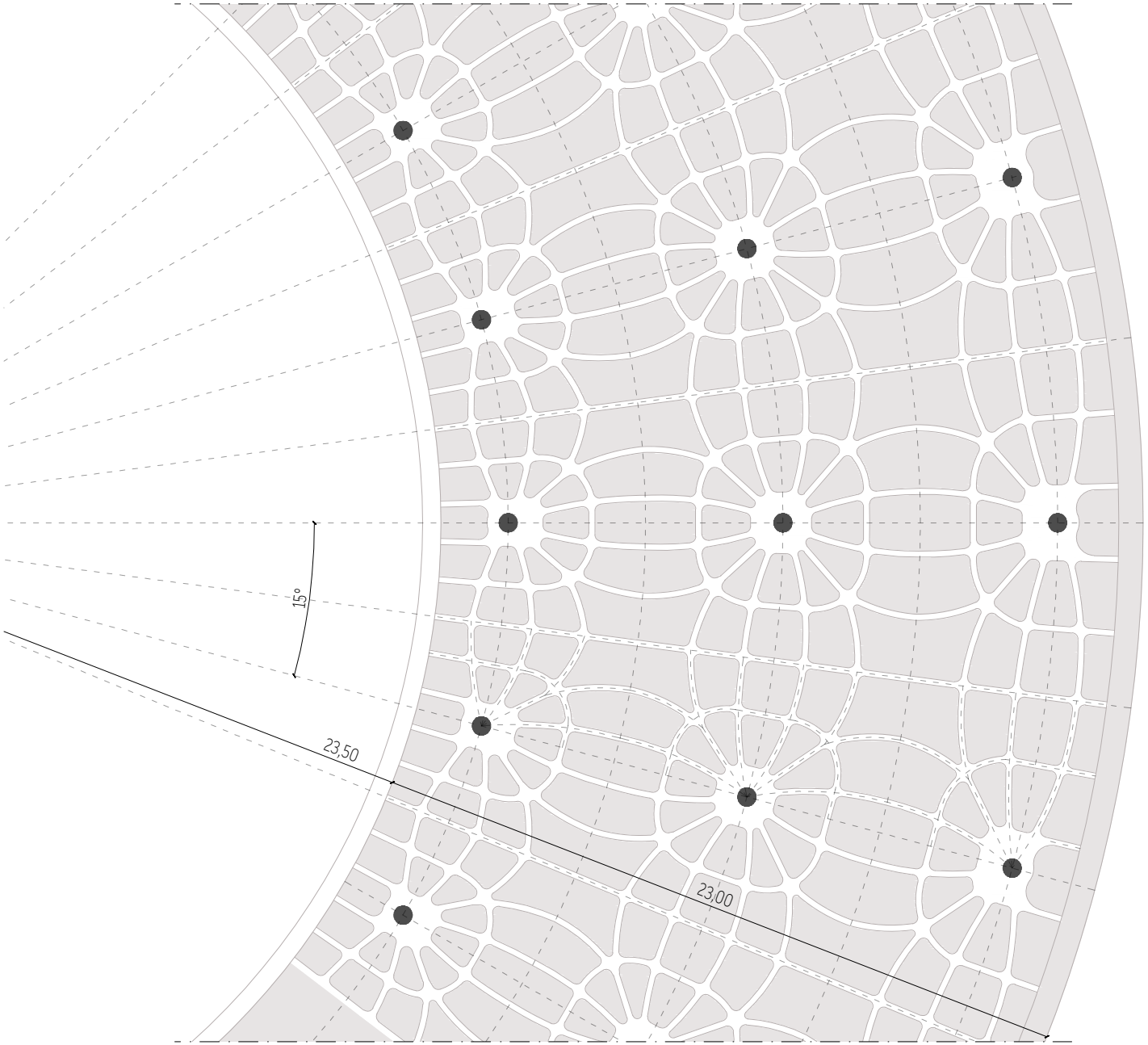
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia trapezoidale e rettangolare

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri circolari Ø 40cm e pilastri dal profilo allungato di lunghezza 100cm

Note:
Questo disegno, realizzato dallo studio Seely e Paget Architects, testimonia la collaborazione tra gli studi e la rielaborazione di un disegno ormai consolidato e considerato definitivo.



32 Progetto per il museo e centro studi antropologici Pitt Rivers, Oxford, 1966-1968
N° prog. Nervi: 1225

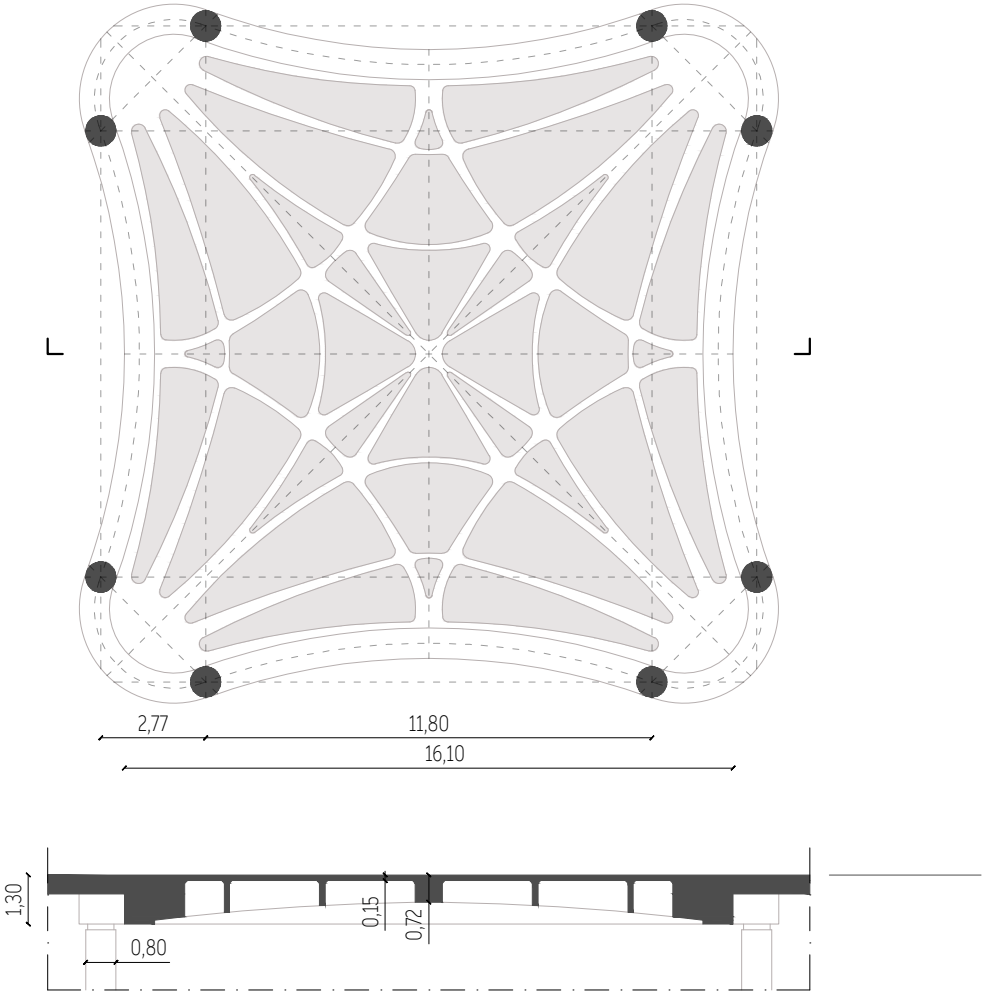
Scala 1:200

Tipologia:
solaio a fungo in serie su maglia trapezoidale

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri circolari Ø 60cm

Note:
questo solaio si ripete nei quattro piani dell'edificio, con differenze poco significative nel disegno delle nervature. Questo disegno è stato preceduto da uno studio che presenta un'andamento delle linee simile, ma caratterizzato da una maggiore rigidità geometrica



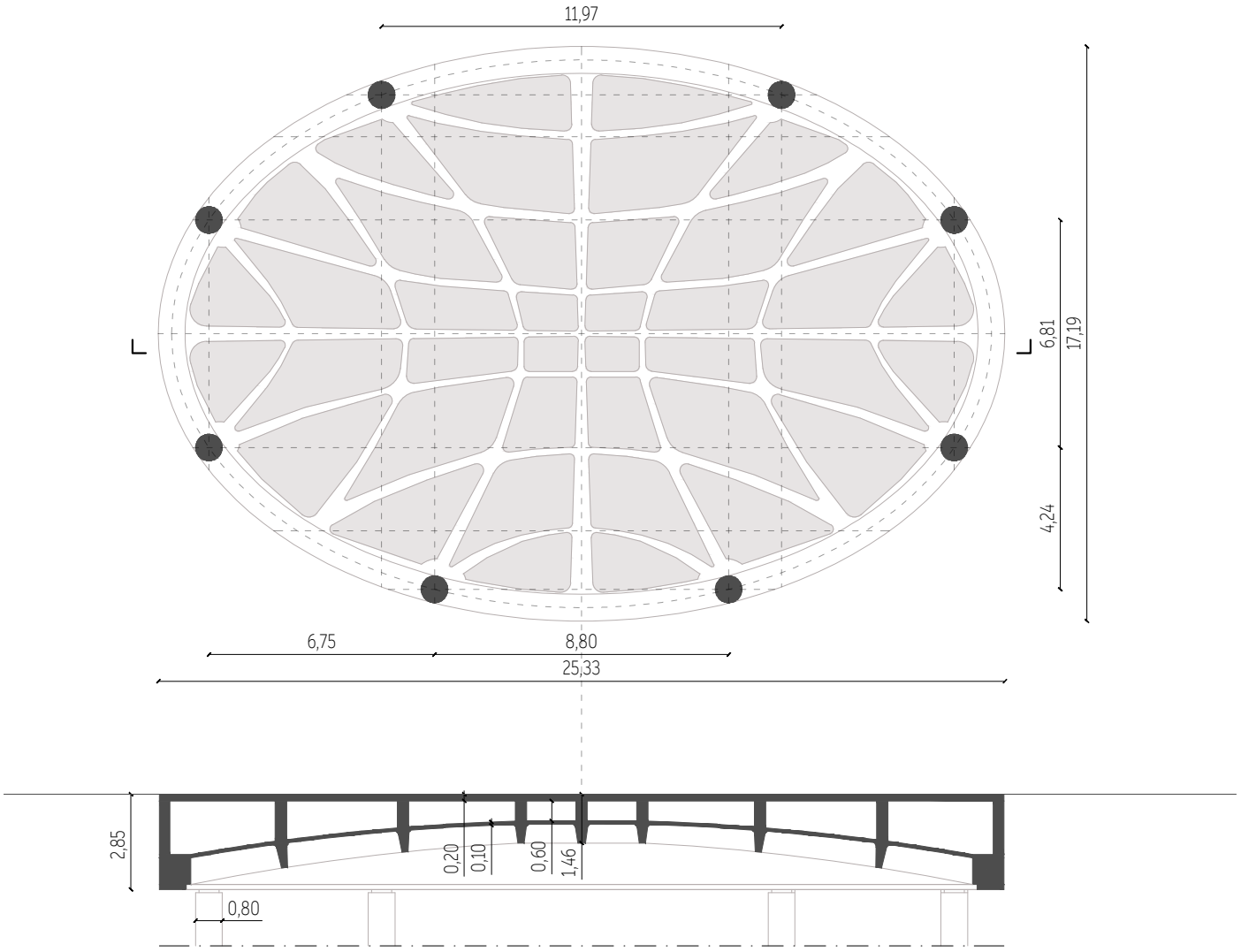
35 Progetto per il Centro culturale, Tripoli, 1966-1968. Sala espositiva
N° prog. Nervi: 1217

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica quadrata

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale sugli angoli; la presenza degli 8 pilastri circolari Ø 80cm non influenza l'andamento delle linee



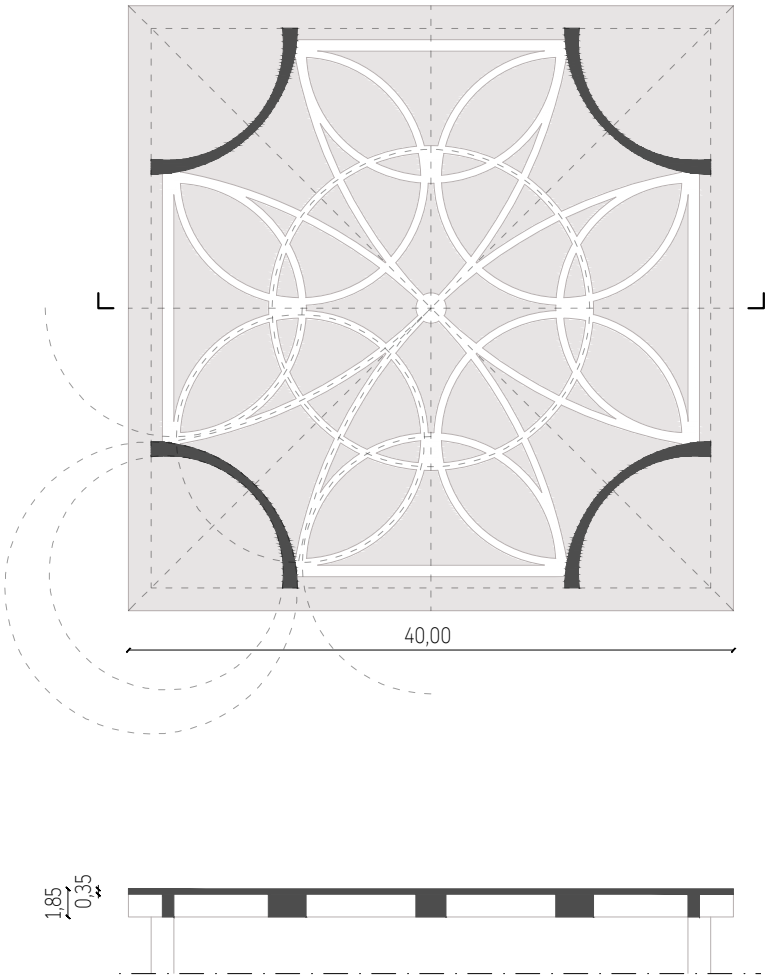
36 Progetto per il Centro culturale, Tripoli, 1966-1968. Ingresso
N° prog. Nervi: 1217

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica non piana ovale

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
distribuito sul bodo esterno. La presenza degli 8 pilastri circolari Ø 80cm non influenza l'andamento delle linee.



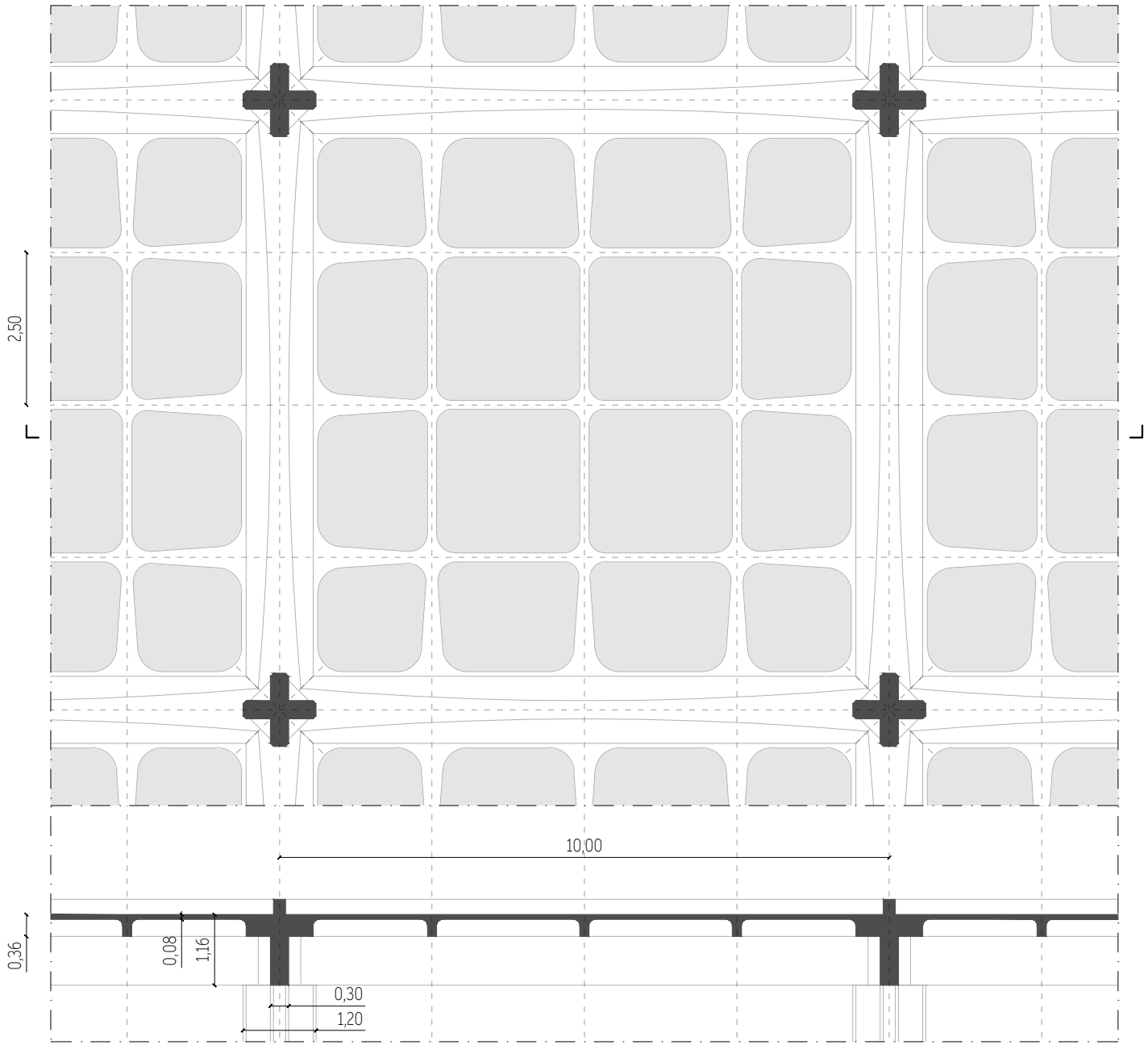
38 Progetto per il Centro sportivo, Kuwait, 1968-1969. Zona di pratica sportiva
N° prog. Nervi: 1259

Scala 1:500

Tipologia:
solaio a piastra unica poligonale

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
distribuito lungo i lati diagonali



41 Stazione ferroviaria di Vaglio Lise, Cosenza, 1971-1975. Stazione
N° prog. Nervi: 1302

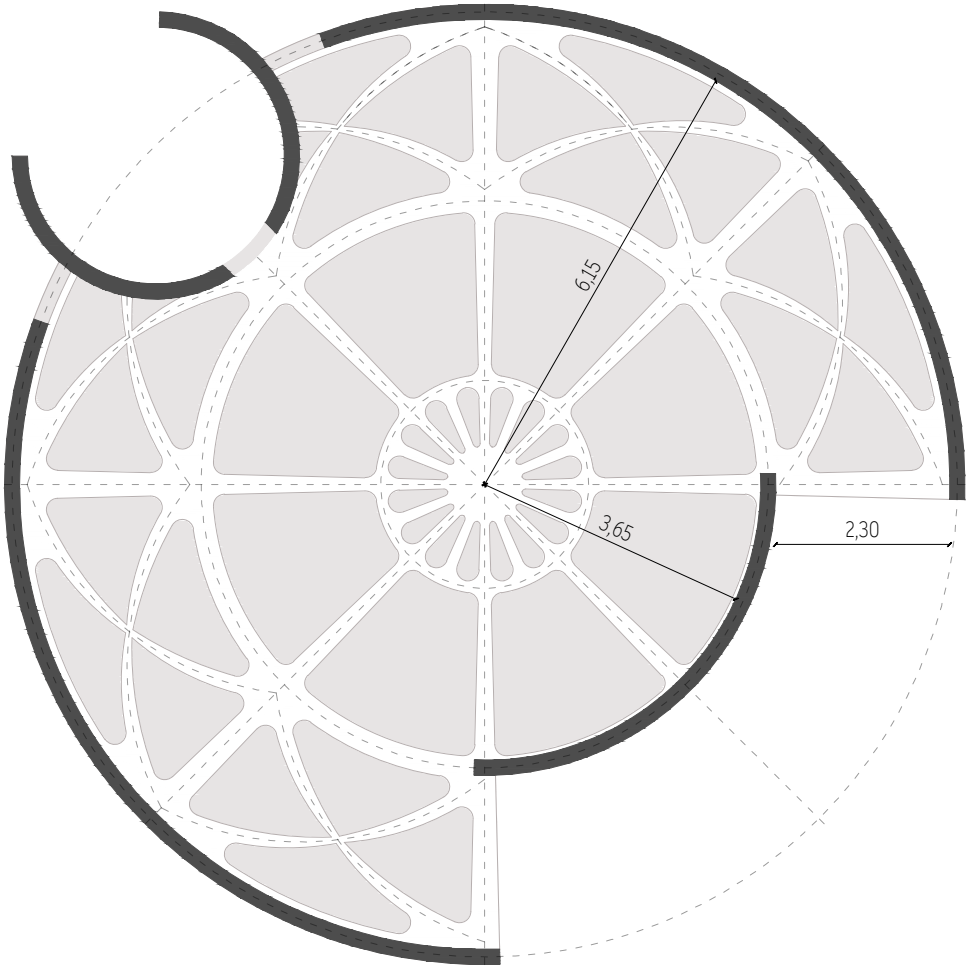
scala 1:100

Tipologia:
solaio a graticcio in serie su maglia quadrata

Metodo di realizzazione:
casseformi in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee rette a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri cruciformi 120x120cm



42 Stazione ferroviaria di Vaglio Lise, Cosenza, 1971-1975. Cappella
N° prog. Nervi: 1302

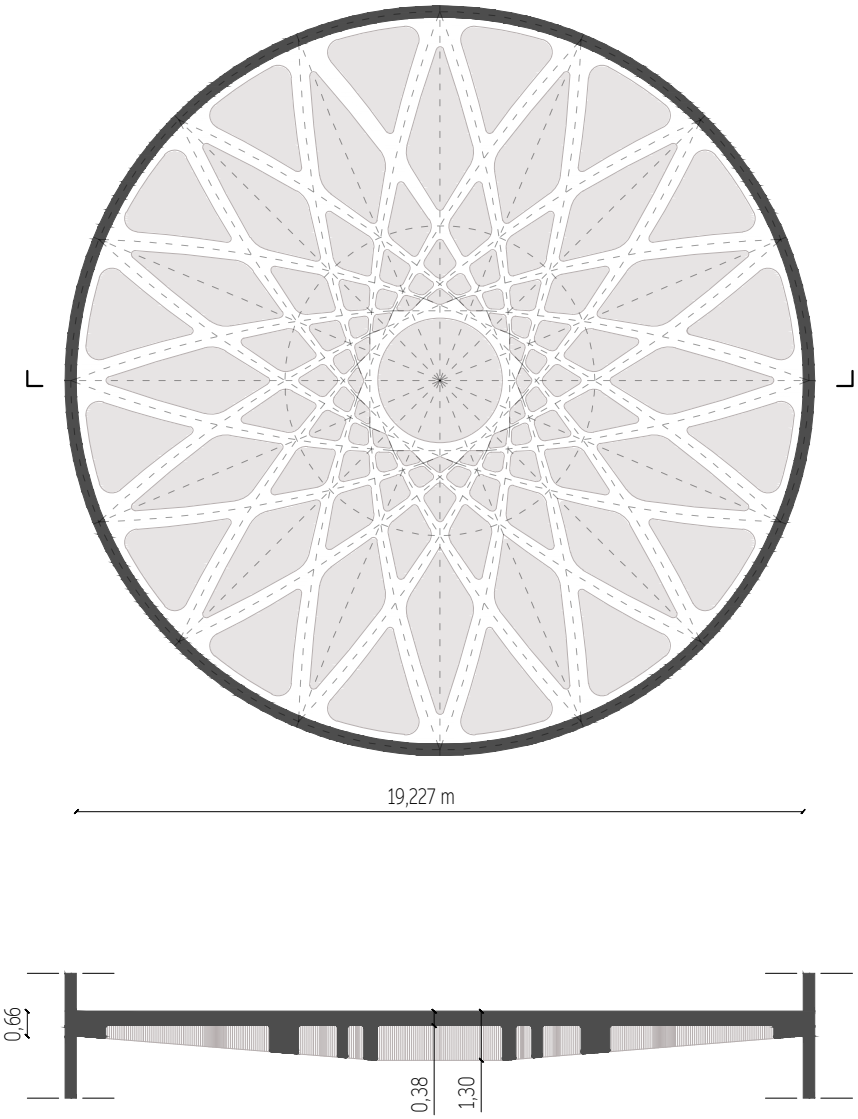
Scala 1:100

Tipologia:
solaio a piastra unica circolare

Metodo di realizzazione:
casseforme in ferrocemento

Geometria delle linee:
linee curve a sezione costante

Tipo di supporto:
distribuito sul bordo esterno



43 Torre del centro MLC25, Sydney, Australia 1971-1977. ingresso del teatro
N° prog. Nervi: 1305

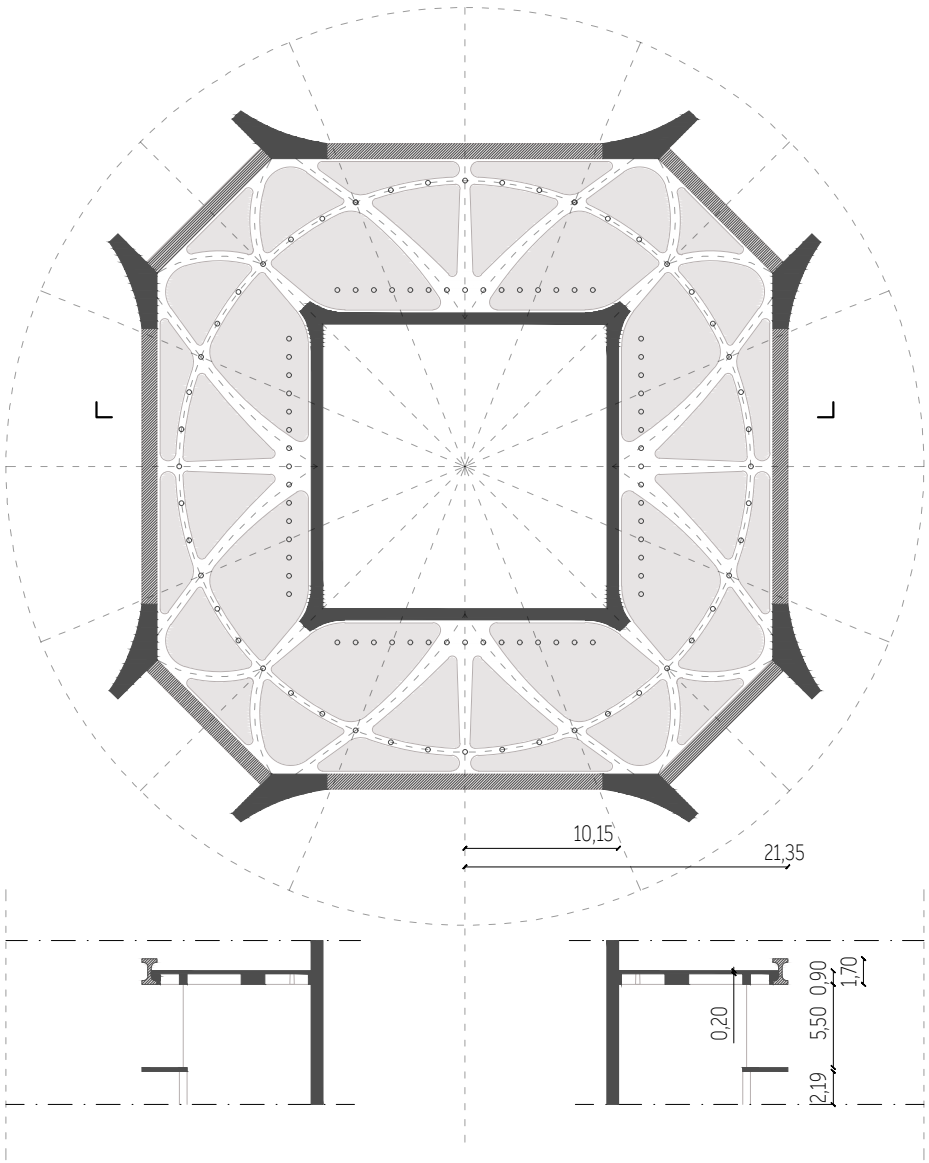
scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica circolare

Metodo di realizzazione:
singoli elementi prefabbricati a terra e messi in opera; l'accostamento di due elementi costituisce una porzione di nervatura

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
distribuito sul bordo esterno



44 Torre del centro MLC25, Sydney, 1971-1977. Ingresso della torre
N° prog. Nervi: 1305

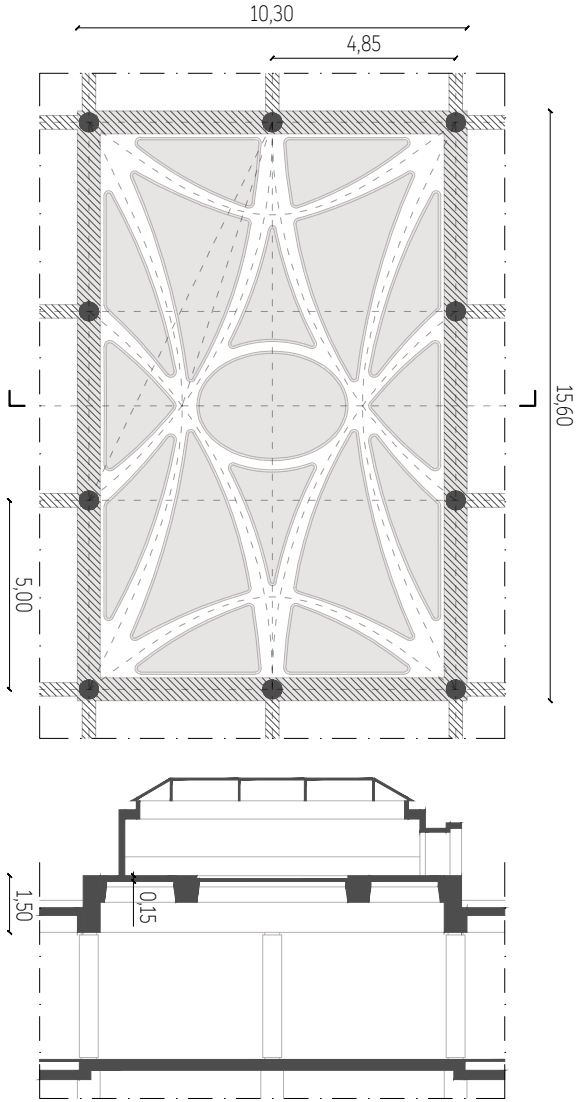
Scala 1:500

Tipologia:
solaio a piastra unica poligonale cava

Metodo di Realizzazione:

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
puntuale su pilastri agli angoli



48 Filiale di Banca d'Italia, Cosenza, 1977-1980. Salone
N° prog. Arcangeli: 835

Scala 1:200

Tipologia:
solaio a piastra unica rettangolare

Metodo di realizzazione:
casseri in legno

Geometria delle linee:
linee curve a sezione variabile

Tipo di supporto:
distribuito sui tutti i lati. La presenza dei pilastri non influenza l'andamento delle linee.

BIBLIOGRAFIA

Vista la prolifica attività editoriale di Pier Luigi Nervi, nella bibliografia sono stati distinti i suoi scritti da tutta la restante bibliografia. Per una consultazione più agevole sono state distinte le monografie dagli articoli e saggi. I testi di Nervi sono stati organizzati in ordine cronologico, mentre la bibliografia generale per autore.

Scritti di Pier Luigi Nervi. Monografie

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

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

Nervi P.L., *Structures*, New York 1956 (edizione in inglese di *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*).

Nervi P.L., *Nuove strutture*, Milano 1963 (trad. ted. *Neue Struktu-ren*, Stuttgart 1963; trad. ing. *New Structures*, London 1963; trad. spagn. *Nueva Estructuras*, , Barcellona 1963).

Nervi P.L., *Aesthetics and Technology in Building*, Cambridge (Mass.) 1965. (rist. a cura di Chiorino C., Margiotta Nervi E., and Leslie T., *Aesthetics and technology in building: The Twenty-First-Century Edition*, Urbana 2018)

Scritti di Pier Luigi Nervi. Articoli e Saggi

Nervi P.L., *Lettera senza titolo in Lettere al Direttore*, in «Ingegneria», n. 1, luglio 1922, p. 24.

Nervi P.L*., Scienza o arte dell'ingegnere?*, in «L'Ingegnere. Rivista Tecnica del Sindacato Nazionale Fascista Ingegneri», n. 7, luglio 1931, pp. 473-474; poi come Scopo dell'ingegneria, in «Il Lavoro Fascista», 9 febbraio 1934, p. IV.

Nervi P.L., *Problemi dell'architetto*, in «Casabella», n. 5, maggio 1933, p. 34.

Nervi P.L., *Arte e tecnica del costruire*, in «Quadrante», n. 2, giugno 1933, p. 28.

Nervi P.L., *Pensieri sull'ingegneria*, in «Quadrante», n. 6, ottobre 1933, pp. 20-21.

Nervi P.L., *Problemi della realizzazione architettonica*, in «Casabella», n. 74, febbraio 1934, pp. 2-3.

Nervi P.L., *Corsivo n. 134*, in «Quadrante», n. 16-17, agosto-settembre 1934, p. 43.

Nervi P.L., *Per l 'autarchia. I problemi economici delle costruzioni e la politica dell'architettura*, in «Il Giornale d 'Italia», 23 luglio 1938. p. 3.

Nervi P.L., *Referendum sull'acciaio. Risposta dell Ing. P.L. Nervi*, in «Casabella Costruzioni», n. 129, settembre 1938, p. 51.

Nervi P.L., *Per la massima autarchia edilizia*, in «Casabella Costruzioni», n. 147, marzo 1940, p. 3.

Nervi P.L., *La tecnica ed i suoi orientamenti estetici*, in «Stile», n. 19-20, luglio-agosto 1942, pp. 9-15.

Nervi P.L., *Aspetti e problemi della ricostruzione edilizia*, in «Architettura», n. 6-8 giugno-luglio-agosto 1943, pp. 171-173.

Nervi P.L., *Le basi della ricostruzione*, in «Ricerca Scientifica e Ricostruzione», a. 15°, n. 1, luglio 1945, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, pp. 3-7.

Nervi P.L., *Aspetti e problemi della ricostruzione edilizia*, in «Ricerca Scientifica e Ricostruzione», a. 15°, n. 4-5, ottobre-novembre 1945, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, pp. 360-362.

Nervi P.L., *Per gli studi e la sperimentazione nell'edilizia*, in Rassegna del primo convegno nazionale per la ricostruzione edilizia, Milano, 14-15-16 dicembre 1945, fase. 3, p. 12.

Nervi P.L., *Corretto costruire*, in «Strutture. Rivista di Scienza e Arte del costruire», n. 1, aprile 1947, pp. 4-5.

Nervi P.L., *Ancora sul «senso dell'architettura»,* in «Domus», n. 244, marzo 1950.

Nervi P.L., *Economia Edilizia*, in «La Casa», aprile 1950, pp. 150-152.

Nervi P.L., *Il ferro-cemento: sue caratteristiche e possibilità*, «L'Ingegnere», n. 1, gennaio 1951, pp. 17-25.

Nervi P.L., *La «resistenza per forma». Caratteristica statico-architettonica del cemento armato*, in «Pirelli - Rivista d'informazione e di tecnica», anno IV, n. 4, agosto 1951, PP- 11-12.

Nervi P.L., *Le proporzioni nella tecnica*, in «Domus», n. 264-265, dicembre 1951, pp. 45-48. Testo della relazione presentata al convegno De Divina Proportione, tenutosi alla Triennale di Milano nel settembre 1951.

Nervi P.L., *Possibilità costruttive ed architettoniche della prefabbricazione strutturale*, in «Architettura Cantiere», n. 1, 1952, pp. 33-43.

Breuer M., Nervi P.L., Zehrfuss B., *Unesco : preliminary project, Place Fontenoy, Paris 2 april* 1953, Parigi 1953

Nervi P.L., *La moderna tecnica costruttiva e i suoi aspetti architettonici*, in AA.VV., *Architettura d 'oggi*, Firenze 1955, pp. 5-22.

Nervi P.L., *Concrete and structural form, in «The Structural Engineer»*, n. 5, maggio 1956, pp. 155-172.

Nervi P.L., *The place of structure in architecture*, in «Architectural Record», n. 7, luglio 1956, pp. 189-191.

Nervi P.L., *Soluzione tecnico-costruttiva della copertura per la chiesa dell'architetto Vaccaro a Borgo Panigale*, in Quaderni di «Chiesa e Quartiere», n. 4, 1957, Architettura e Religione, pp. 32-35.

Nervi P.L., *Rapporti tra la tecnica e l 'estetica del costruire*, in «Atti della Accademia Nazionale di San Luca», nuova serie, vol. III, 1957-1958, pp. 85-96.

Breuer M., Nervi P.L., Zehrfuss B.H., *Le siege de L'Unesco, Paris*, in «L'Architecture d'Aujourd'hui», n. 81, 1958-1959, pp. 3-33.

Nervi P.L., *Opinione sull'insegnamento dell'architettura*, in «Architettura Cantiere», n. 22, 1959 (inserto speciale «L'insegnamento dell'architettura nella Università Italiana» a cura di Ludovico Quaroni), pp. XL-XLI.

Nervi P.L., *Critica delle strutture*, in «Casabella Continuità», n. 223, gennaio 1959, p. 55.

Nervi P.L., *Critica delle strutture. Cinque Ponti*, in «Casabella Continuità», n. 224, febbraio 1959, p. 54.

Nervi P.L., *Critica delle strutture. Rapporti tra ingegneria e architettura*, in «Casabella Continuità», n. 225, marzo 1959, p. 50. (Ripubblicato come *Zum Thema Architekt und Ingenieur*, in «Bauwelt», n. 5, 1959, p. 639).

Nervi P.L., *Le strutture dell'UNESCO*, in «Casabella Continuità», n. 226, aprile 1959, pp. 17-20.

Nervi P.L., *Critica delle strutture. Modello e imitazione*, in «Casabella Continuità», n. 227, maggio 1959, pp. 50-51.

Nervi P.L., *Architettura e strutturalismo*, in «Casabella Continuità», n. 229, luglio 1959, p. 5.

Nervi A., Nervi P.L., *Relazione di progetto per il concorso del Palazzo del Lavoro a Torino*, in «Casabella Continuità», n. 235, gennaio 1960, pp. 33-34.

Nervi P.L., *Funzionalità, solidità, economia e bellezza*, in «Ingegneri architetti», n. 12, dicembre 1960.

Nervi P.L., Vaccaro G., *Chiesa e complesso parrocchiale del Cuore Immacolato di Maria nel quartiere INA-Casa a Borgo Panigale*, in Quaderni di «Chiesa e Quartiere», n. 20, 1961, Architettura e Religione, pp. 74-98.

Nervi P.L., *Struttura e forma in architettura*, in «Domus», n. 374, gennaio 1961, pp. 1 -6.

Nervi P.L., *Architettura strutturale con riferimento al Palazzo del Lavoro*, in «Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino. Atti e Rassegna Tecnica», n. 6, giugno 1961, pp. 165-178.

Nervi P.L., *L 'influenza del cemento armato e del progresso tecnico-scientifico sull'architettura di oggi e di domani*, in «L'architetto», luglio-agosto 1961, pp. 26-36.

Nervi P.L., *Il Palazzo del Lavoro*, in «L'Architettura. Cronache e storia», n. 70, agosto 1961, p. 224-237.

Nervi P.L., *Uno stile comune per l 'architettura*, in «Civiltà delle Macchine», numero straordinario, ottobre 1961, pp. 51-52.

Nervi P.L., *Vers un style de vérité?*, in *Architecture, formes + fonctions 1961-62*, p. 45.

Nervi P.L., *Le strutture in cemento armato*, «Il Cemento», n. 59, settembre 1962 (memoria presentata al XIII Convegno Nazionale degli Ingegneri Italiani), pp. 13-17.

Nervi P.L., *Some Considerations About Structural Architecture*, in «The Student Publications of the School of Design», North Carolina State College, vol. 11, n. 2, 1963, pp. 40-47.

Nervi P.L., *La formazione dell'architetto oggi*, in «Il Veltro», n. 1, febbraio 1963, pp. 49-54.

Nervi P.L., *E già iniziato l 'immutabile stile del futuro?*, in «Atti della Accademia di San Luca», nuova Serie, voi. VII, anno 1963-1964, pp. 1-22.

Nervi P.L., *Considerazioni sullo stile costruttivo e produttivo del prossimo e lontano futuro*, in «Il Mondo di Domani», 1964, pp. 373-380.

Nervi P.L., *Tecnica costruttiva ed espressività architettonica*, in P. Nardi (a cura di), *Arte e cultura contemporanee*, «Quaderni di San Giorgio», n. 23, Atti del IV Corso Internazionale di Alta Cultura (Venezia, Fondazione Cini, 1962), Sansoni, Firenze 1964, pp. 593-604.

Nervi P.L., *Is Architecture Moving toward Unchangeable Forms?*, in G. Kepes (a cura di). *Structure in Art and in Science*, George Braziller, New York 1965, pp. 96-104.

Nervi P.L., *On the Design Process*, in G. Kepes (a cura di), *Structure in Art and in Science*, New York 1965, pp. 105-110.

Nervi P.L., *Chiesa per il quartiere Anic di Ravenna*, in «Fede e Arte», n. 2, 1965, p. 165-171.

Nervi P.L., *Risposta al Questionnaire* de «L'Architecture d'Aujourd'hui», n. 119, 1965, pp. 5-6.

Nervi P.L., *Espressione architettonica e tecnica costruttiva*, in «Casabella», n. 299, dicembre 1965, p. 38.

Nervi P.L., *Lettera a Casabella*, in «Casabella», n. 301, gennaio 1966, p. 16.

Nervi P.L., *Forme estetiche e leggi fisiche*, testo del dibattito tra Bruno De Finetti, Gillo Dorfles e Pier Luigi Nervi svoltosi il 12 marzo 1966 a Roma, in «Civiltà delle Macchine», anno XIV, n. 3, maggio-giugno 1966, pp. 19-30.

Nervi P.L., *La preparazione didattica degli architetti*, in P. Nardi (a cura di), *Arte e Cultura nella Civiltà contemporanea*, «Quaderni di San Giorgio», n. 29, Atti del VI Corso Internazionale di Alta Cultura (Venezia, Fondazione Cini, 1964), Sansoni, Firenze 1966, pp. 507-516.

Nervi P.L., Contributo italiano nel campo della sperimentazione su modelli, in L'ingegneria italiana nel mondo, atti del XV Convegno Nazionale degli Ingegneri Italiani (Politecnico di Milano, 15-17 novembre 1968), Milano 1968, pp. 3-6

Nervi P.L., *Struttura, intuito e architetti*, in «L'Ingegnere», n. 3, marzo 1969, pp. 233- 236.

Nervi P.L., *Presentazione*, in F. Coarelli, *Grandi Monumenti. Roma*, Milano - Kodansha, Tokyo 1971, pp. 6-7. (tr. ingl. *Monuments of Civilization. Rome*, London 1972, pp. 6-7).

Nervi P.L., Introduzione ai volumi della collana «Storia Universale dell'Architettura» (diretta da Pier Luigi Nervi), Milano 1971.

Nervi P.L., *Fecondità tecnica, estetica ed economica dei conglomerati cementizi armati*, in Atti del convegno «Tecnologie avanzate e loro riflessi economici, sociali e politici», «Accademia Nazionale dei Lincei», 1972, pp. 507-517.

Bibliografia generale. Monografie

Antonucci M., Trentin A. (a cura di), *La Manifattura tabacchi a Bologna di Pier Luigi Nervi: ricerche sull'architettura industriale contemporanea tra storia, tecnica e riuso*, Bologna 2019.

Antonucci M., Neri G., *Pier Luigi Nervi in Africa. Evoluzione e dissoluzione dello Studio Nervi 1964 - 1980*, Roma 2021.

Arcangeli A., *Nozioni sulle volte sottili*, Roma 1951.

Bares R., C*alcolo di lastre e piastre. Con la teoria elastica lineare*, Novara 1990.

Belluzzi O., *Scienza delle costruzioni vol.3*, Bologna 1980

Bianchino G., Costi D. (a cura di), *Cantiere Nervi: La costruzione di una identità. Storie, geografie, paralleli*, Parma 2012.

Billington D.P., *Robert Maillart's Bridges: The art of engineering*, Princeton 1989.

Bologna A., *Pier Luigi Nervi ou l'art de la structure : Photographies de la collection Alberto Sartoris*, Lausanne, 2013.

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

Cestelli Guidi C., *Carlo Cestelli Guidi*, Roma 1997.

Charleson A.W., *Structure As Architecture. A source book for architects and structural engineers*, Oxford 2005.

Chiorino C., Olmo C. (a cura di), *Pier Luigi Nervi. Architettura come sfida*, Cinisello Balsamo 2010.

Ciucci G. (a cura di), *Giuseppe Terragni. Opera completa*, Milano 1996.

Colonnetti G., *La statica delle costruzioni. Volume I*, Torino 1928

Colonnetti G. (a cura di), *Scienza delle costruzioni*, *Vol. III, La tecnica delle costruzioni: le pareti sottili. Realizzazioni di P. L. Nervi, E, Torroja e G. Oberti*, Torino 1957.

Cruvellier, M.R., Sandaker B.N.; Dimcheff L. (a cura di), *Model Perspectives: Structure, Architecture and Culture*. London- New York 2017.

Danusso A., Oberti G., *Indagini sperimentali sulle costruzioni. "La fotoelasticità"*, Milano 1932.

Dell'Aira P.V., *Luigi Vietti. Progetti realizzazioni degli anni '30*, Firenze 1997.

Dell'Aira P.V., Prandi E., *Luigi Vietti. Scritti di architettura e di urbanistica 1932-1935*, Firenze 2022.

De Magistris A., Deambrosis F., *Palazzo Nervi-Scattolin*, Milano 2021.

Desideri P., Nervi jr P.L., Positano G. (a cura di), *Pier Luigi Nervi*, Zanichelli, Bologna 1979.

Desideri P., De Magistris A., Olmo C., Pogacnik M., Sorace S. (a cura di), *La concezione strutturale. Ingegneria e architettura in Italia negli anni cinquanta e sessanta*, Torino - Londra - New York 2013.

Desmoulins C. (a cura di), *Bernard Zehrfuss architect. From the spiral of time*, Cinisello Balsamo, 2015.

Gargiani R., Bologna A., *The rhetoric of Pier Luigi Nervi. Concrete and ferrocement forms*, Oxford 2016.

Gargiani R., *Eretici italiani dell'architettura razionalista. Razionalismo emozionale per l'identità democratica nazionale 1945-1966*, Milano 2020.

Giedion S., *Spazio, tempo ed architettura*, Milano 1954.

Gramigni M., *L'arte del costruire in Luigi Vietti*, Novara 2000.

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

Greco L., *Architetture autostradali in Italia. Progetto e costruzione negli edifici per l'assistenza ai viaggiatori*, Roma 2010.

Guarneri L., *Teoria e applicazioni sulla fotoelasticità. Sistemi di ricerca e di indagine capaci di portarci ad uno sfruttamento del materiale sempre più vicino alle leggi perfette della natura*, Milano 1950.

Huxtable A.L., *Pier Luigi Nervi*, New York 1960.

Iori T., *Il cemento armato in Italia: Dalle origini alla seconda guerra mondiale*, Roma 2001.

Iori T., *Pier Luigi Nervi*, Milano 2009.

Iori T., Poretti S. (a cura di), *Pier Luigi Nervi. Architettura come Sfida. Roma. Ingegno e costruzione*, Milano 2010.

Iori T., *150 anni di storia del cemento in Italia: Le opere, gli uomini, le imprese*, Roma 2011

J. Joedicke, Pier Luigi Nervi, Edizioni di Comunità, Milano 1957, pp. V-VIII (trad. ingl. The Works of Pier Luigi Nervi, The Architectural Press, London 1957 e Frederick A. Prager, New York 1957; trad, franc. Pier Luigi Nervi. Constructions et project, Editions Vincent Fréal et Cie, Paris 1957; trad. ted. Pier Luigi Nervi. Bauten und Projecte, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1957).

Kurrer K.E., *The history of the theory of structures: From Arch analysis to computational mechanics*, Berlin, 2008.

Leven M.M. (a cura di), *Photoelasticity. The Selected Scientific of M.M. Frocht*, Oxford 1969.

Mangione F., Ribichini L., Terragni A. (a cura di), *Giuseppe Terragni a Roma con Antonio Carminati, Cesare Cattaneo, Pietro Lingeri, Ernesto Saliva, Luigi Vietti e la collaborazione di Marcello Nizzoli, Mario Radice e Mario Sironi*, Roma 2015.

Mantero E., *Giuseppe Terragni e la città del razionalismo italiano*, Bari 1983.

Marandola M., Pogacnik M. (a cura di), *L'ingegneria italiana del Novecento. Scuole e protagonisti*, Milano-Udine 2022.

Marcus H., *Die Theori elastische Gewebe und ihre Anwendung auf die Berechnung biegsamer Platten. Unter besonderer Berücksichtigung der trägerlosen Pilzdecken*, Berlin, 1924.

Muttoni A., *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture.* Translated from the Italian by Stephen Piccolo, Lausanne 2011.

Nadai A., *Die elastischen Platten. Die Grundlagen und Verfahren zur Berechnung ihrer Formänderungen und Spannungen, sowie die Anwendungen der Theorie der ebenen zweidimensionalen elastischen Systeme auf praktische Aufgaben*, Berlin, 1925.

Neri G., *Capolavori in miniatura. Pier Luigi Nervi e la modellazione strutturale*, Mendrisio 2014.

Neri G., (a cura di) *Pier Luigi Nervi. Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, Novara 2014

Nervi V., *La vela rossa*, Torino, 1997.

Pace S. (a cura di), *Pier Luigi Nervi. Torino, la committenza industriale, le culture architettoniche e politecniche italiane*, Milano 2011.

Pica A., *Pier Luigi Nervi*, Roma 1969.

Pizzetti G., Zorgno Trisciuoglio A.M., *Principi statici e forme strutturali*, Torino 1980.

Salvadori M., Heller R. (a cura di), *Structure in Architecture*, Englewood Cliffs New Jersey 1963, (trad.it., *Le strutture in architettura*, Milano 1992).

Salvadori M., *Why Buildings Stand Up*, New York 1980 (trad. it., *Perché gli edifici stanno in piedi*, Milano 1997).

Solomita P., *Pier Luigi Nervi vaulted architecture. Towards new structures*, Bologna 2015.

Thompson D'A.W., *Crescita e forma*, Torino 1969.

Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., *Theory of Plates and Shells*, New York 1959.

Torroja E., *Razón y ser de los tipos estructurales*, Madrid 1957 (trad. it., *La concezione strutturale. Logica ed intuito nella ideazione delle forme*, Torino 1995).

Trentin A., Trombetti T. (a cura di), *La lezione di Pier Luigi Nervi*, Milano - Torino 2010.

Vagnetti L. (a cura di.), *La Facoltà di architettura di Roma nel suo trentacinquesimo anno di vita. Anno accademico 1954-55*, Roma 1955.

Wells M., *Engineers, A History of Engineering and Structural Design*, Oxfordshire 2010.

Zevi B., *Storia dell'architettura moderna*, Torino 1950.

Zevi B., *Storia dell'architettura moderna. Vol. 1: Da William Morris ad Alvar Aalto - La ricerca spazio-temporale*, Torino 2010.

Zevi B., *Storia dell'architettura moderna. Vol. 2: Da Frank Lloyd Wright a Frank O. Gehry: l'itinerario organico*, Torino 2010.

Bibliografia generale. Articoli e Saggi

Batista M., *New analytical solution for bending problem of uniformly loaded rectangular plate supported on corner points*, in «The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering», Vol. 3, n. 2, Novembre 2010, pp.75-84.

Cavallari-Murat A., *Static intuition and formal imagination in the space lattices of ribbed gothic vaults*, in «The Student Publications of the School of Design», North Carolina State College, vol. 11, n. 2, 1963, pp. 2-39.

Cresciani M., Forth J., *Three Resilient Megastructures by Pier Luigi Nervi*, in «International Journal of Architectural Heritage. Conservation, Analysis, and Restoration», n. 8, 2014, pp. 49-73.

De Falco C., *La costruzione della nuova stazione nel secondo dopoguerra*, in Lenza C. (a cura di), *La stazione centrale di Napoli. Storia e architettura di un palinsesto urbano*, Milano, 2010.

Furse A., Marti P., *Robert Maillart's design approach for flat slabs*, in «Journal of Stuctural Engineering», vol. 123., n. 8, Agosto 1997.

Greco C., *Pier Luigi Nervi e il ferrocemento*, in «Domus», n. 766, dicembre 1994, pp. 80-82.

Greco L., *Il Mottagrill di Pier Luigi Nervi e Melchiorre Bega a Limena sull'autostrada Torino-Trieste (1965-1967)*, in «L'Industria delle costruzioni», vol. 401, 2008, pp.100-102.

Greco L., *La costruzione in calcestruzzo armato negli edifici ristoro a ponte sulle autostrade italiane di seconda generazione*, in Catalano A., Sansone C. (a cura di), *Concrete 2009. The building techniques, Atti I International congress Technological development of concrete. Tradition, actualities, prospects*, Napoli, 2009, pp.427-434.

Greco L., *Building techniques and architectural quality of motorway restaurants in Italy. The case of Mottagrill by Pier Luigi Nervi and Melchiorre Bega*, in *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Brandenburg University, Berlin: Neunplus, 2009, vol. 2, pp. 745-751.

Halpern A.B., Billington D.P., Adriaenssens S., *The Ribbed Floor Slab Systems of Pier Luigi Nervi*, in «Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures» , 2013, pp. 127-136

Halpern A.B., Billington D.P., Adriaenssens S., *The Ribbed Floor Slab Systems of Pier Luigi Nervi*, in Cruvellier M.R., Sandaker B.N., Dimcheff L.(a cura di), *Model perspectives : structure, architecture and culture*, New York 2016.

Iori T., *Le plancher a nervures isostatiques de Nervi*, in Gargiani R. (a cura di), *L'architrave le plancher la plate-forme: Nouvelle historie de la construction*, Lausanne 2012.

Iori T., Poretti S., *Pier Luigi Nervi: His construction system for Shell and Spatial Structures* in «Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures», 2013, pp.117-126.

Mivelaz P., *Mushroom head, Pilzdecke, pilier-champignon: métamorphoses de la dalle sans sommiers,* In Gargiani R. (a cura di), *La colonne. Nouvelle histoire de la construction,* Lausanne 2008.

Mornati S., *Il magistero di Pier Luigi Nervi nella stazione ferroviaria di Vaglio Lise a Cosenza*, in S. D'Agostino (a cura di), *Storia dell'Ingegneria. Atti del 3° Convegno Nazionale*, Napoli 19-20-21 aprile 2010, Cuzzolin, Napoli 2010, tomo II, pp. 1109-1118.

Oberti G., *Il contributo dei modelli strutturali al progetto e al controllo della sicurezza delle grandi costruzioni*, in Atti del convegno «Tecnologie avanzate e loro riflessi economici, sociali e politici», «Accademia Nazionale dei Lincei», 1972, pp. 481- 506.

Pagano G., *Il concorso per il Palazzo del Littorio e della mostra della Rivoluzione*, in «Casabella», n. 82, ottobre 1934, pp. 4-9.

Pica A., *Senso dell'architettura*, in «Domus», n. 241, dicembre 1949, pp. 26.

Poretti S., *Le plancher en poteries et béton dans le modernisme italien*, in Gargiani R. (a cura di), *L'architrave le plancher la plate-forme. Nouvelle historie de la construction*, Lausanne 2012.

Posener J., *Concours du Palais du Licteur a Rome*, in «L'architecture d'Aujourd'hui», ottobre-novembre 1934, pp.73-74.

Sartoris A., *Le style de Nervi* in *Architecture, formes + fonctions 1961-62,* p. 14.

Shapiro Comte B., *La fotografia del CCA*, in «Casabella», n. 672, novembre 1999, pp. 112-113.

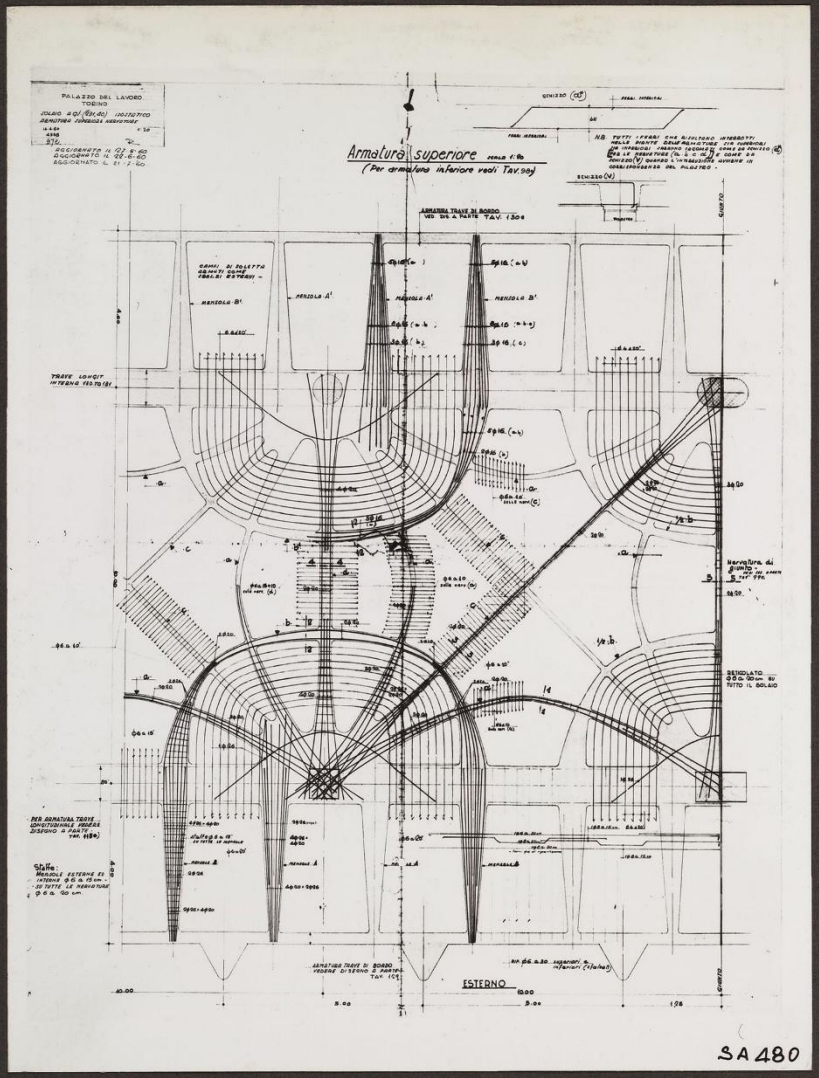
Tedesco Rocca A., *Il concorso per il Palazzo del Littorio in via dell'Impero a Roma*, in «L'architettura Italiana», novembre 1934, pp. 364-365.

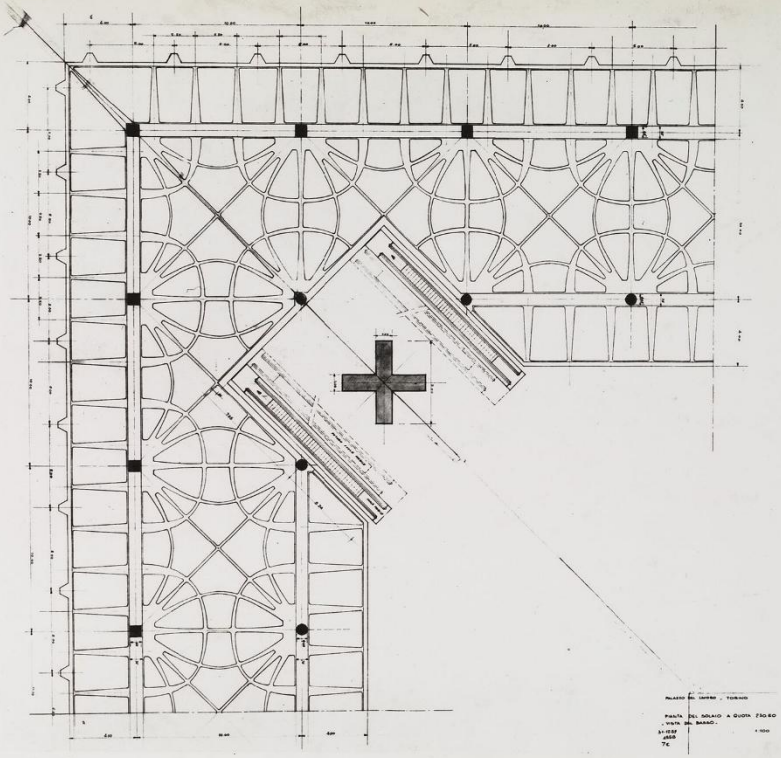
Thuy A., Rinke M., *The Mushroom Column: Origins, Concepts and Differences*, in « Building Knowledge, Constructing Histories: Proceedings of the Sixth International Congress on Construction History », Brussels, Belgium, 9-13 July 2018, Boca Raton 2018, pp. 1271-1278.

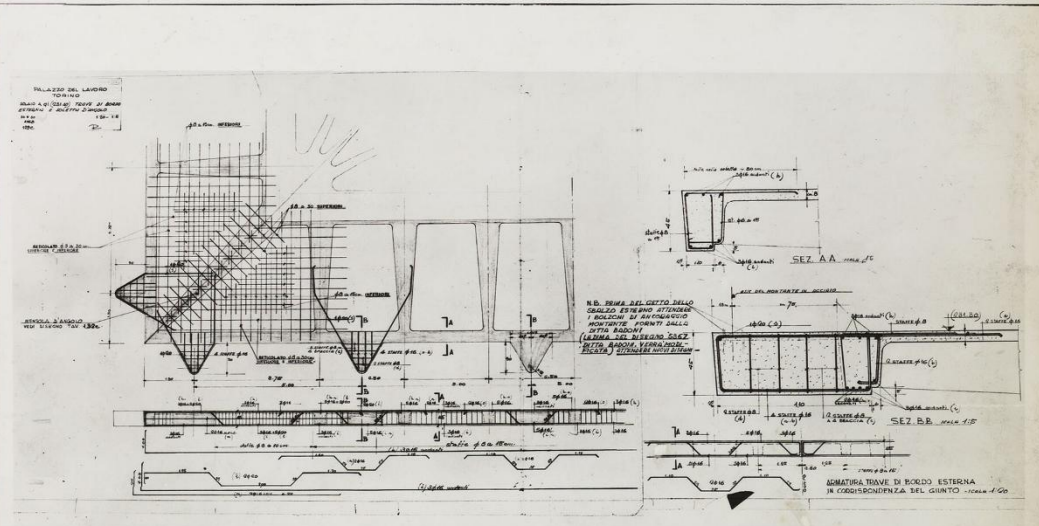
Vejrum P., Jensen M.S., *Design and construction of a ribbed concrete slab based on isostatic lines*, in Hvejsel M.F., Cruz P.J.S. (a cura di). S*tructures and architecture. A viable urban perspective?*, Boca Raton 2022, pp. 1247-1254.

Vitalis L*., Linee di struttura, linee di pensiero: 18 modi di disegnare le nervature isostatiche con Pier Luigi Nervi*, in « Galileo », n. 259, giugno-luglio 2022, pp.458-483.

Zevi B., *I sei difetti del palazzo dell'UNESCO*, «L'Architettura. Cronache e storia», n. 45, luglio 1959, p. 150.


PALAZZO DEL LAVORO
TORINO
Armatura superiore
(Per armatura inferiore vedi Tav.seg)
ESTERNO
SA 480


SA 482


PALAZZO DEL LAVORO
TORINO
SEZ. AA
SEZ. BB
ARMATURA TRAVE DI BORDO ESTERNA
IN CORRISPONDENZA DEL GIUNTO
SA 484