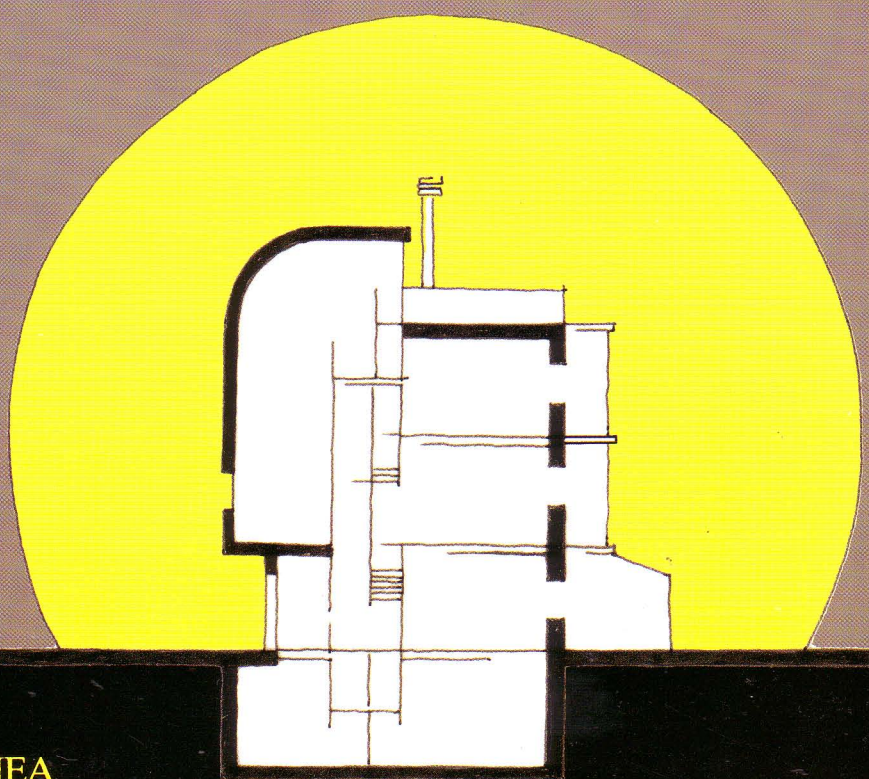
Ar.Tec
Associazione Scientifica
per la Promozione
dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia

3.2
L'INVOLUCRO EDILIZIO
Una progettazione complessa

a cura di:
Alessandro Greco
Enrico Quagliarini



ALINEA EDITRICE

GLI INVOLUCRI DEGLI INGEGNERI

THE ENVELOPES OF THE ENGINEERS

Tullia Iori
Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile
Via del Politecnico 1, Roma
e-mail: iori@ing.uniroma2.it

ABSTRACT

In the works of the engineers, it often happens that the envelope coincides with the structure. In these cases the architectonic language is entrusted to the solution devised for the structure. This coincidence turns out frequent when, in the within of the covers of great span, the constructive topic is that one of the thin shells of reinforced concrete. In the international panorama the more explicit reference is to the works of Felix Candela, Heinz Isler, Eduardo Torroja. These engineers work on the configuration of complex, saddle, with opposite double curvature surfaces that completely resolve the image of the building. In with of the most sophisticated versions of the correspondence envelope-structure two Italian works are met, both conceived in the period of maximum development of the thin vaults, in the median decades of the 1900's: the ribbed dome of the Pier Luigi Nervi's Small Sport Palace in Rome and the "Palavela" of Franco Levi in Turin. Leaving from the detailed analysis of these masterpieces, it will be attempted to pick the identity of the Italian structural experimentation on the topic, both in reference to the lines of national constructive development and recognizing the peculiarity of it regarding the parallels international processes.

Nelle grandi opere dell'ingegneri, spesso accade che l'involucro coincida con la struttura stessa: in questi casi il linguaggio architettonico è affidato interamente alla soluzione ideata per il sistema strutturale portante. Questa coincidenza risulta particolarmente frequente quando, nell'ambito delle coperture di grande luce, il tema costruttivo è quello delle volte in cemento armato a spessore sottile. Nel panorama internazionale il riferimento più esplicito è alle opere di Felix Candela, di Heinz Isler, di Eduardo Torroja, che lavorano – ciascuno con le proprie peculiari invenzioni costruttive - sulla configurazione di sagome complesse, a doppia curvatura inversa, che risolvono completamente l'immagine dell'edificio. Tra le più sofisticate versioni della corrispondenza involucro-struttura si incontrano due opere italiane, entrambe concepite nel periodo di massimo sviluppo delle volte sottili, nei decenni mediani del Novecento: la cupola nervata del Palazzetto dello Sport di Pier Luigi Nervi a Roma e la vela tripartita del Palazzo delle Mostre a Torino di Franco Levi. Partendo dall'analisi dettagliata di questi originali capolavori (e di poche altre opere coeve), si cercherà di cogliere proprio l'identità della sperimentazione strutturale italiana sul tema, sia in riferimento alle linee di sviluppo della vicenda costruttiva nazionale sia riconoscendone le singolarità rispetto ai paralleli processi internazionali.
Involucro e struttura si trovano a combaciare anche in alcuni sistemi costruttivi più recenti per i quali non mancano esempi di sbalorditive soluzioni strutturali che risolvono interamente la configurazione architettonica. Si pensi alle grandi coperture in tensostruttura: dalla discussa cupola del Millennium Dome a Greenwich (Richard Rogers con Buro Happold, 1996-1999), gigantesca calotta sferica assemblata attraverso una complessa rete di cavi pretesi (strallati a 12 piloni fusiformi) cui si vincola la membrana strutturale di Sheerfill; o, più indietro nel

tempo, alla suggestiva copertura a geometria complessa del padiglione tedesco all'Esposizione universale di Montreal (Frei Otto con Fritz Leonhardt, 1964-1967), nella quale una rete di cavi a maglia romboidale, presollecitati a contrasto di, alternativamente, pinnacoli e depressioni, sosteneva un pionieristico tessuto di poliestere rivestito di PVC funzionante staticamente come una zavorra stabilizzante; o, ancora, alla ribassatissima copertura pneumatica del padiglione statunitense all'Esposizione universale di Osaka (David Geiger, 1970), dove la membrana in pressione era trattenuta da una rete di cavi che si infilava in apposite tasche cucite a disegnare losanghe.
Ma molto prima dell'impiego moderno delle reti di funi e del trasferimento nell'edilizia delle membrane strutturali, altre strutture con comportamento membranale, prive di rigidezza flessionale, risolvevano contemporaneamente la funzione portante e quella di involucro esterno: si tratta delle superfici di cemento armato in spessore sottile.
Il loro impiego veniva avviato, nel 1923, con la versione sinclastica dei planetari di Franz Dischinger: il reticolo di aste tubolari metalliche, vincolate alle estremità da nodi concepiti secondo il brevetto Zeiss-Dywidag (e che anticipava le strutture reticolari spaziali della seconda metà del secolo), era ricoperto da una successione di reti di armatura a maglia di lato decrescente che venivano ricoperte a spruzzo da conglomerato cementizio, senza però mai superare i 6 centimetri di spessore. Il sistema, resistente per forma come conseguenza del comportamento membranale, esteso grazie al contributo teorico-tecnico di Ulrich Finsterwalder anche alle volte cilindriche (rinunciando così alla doppia curvatura), era divulgato in tutta Europa e oltre (raggiungendo gli Stati Uniti grazie alla catechesi di Anton Tedesko). Così contagiava la Spagna delle bovedas tabicadas e di Gaudì e veniva adottato anche da Eduardo Torroja che, con il brevetto Dywidag, costruiva la cupola ribassata del mercato di Algeciras (1933), che supera il diametro del Pantheon con però appena 8 centimetri di spessore, e la volta-trave con il caratteristico profilo ad ali di gabbiano del perduto Fronton Recoletos di Madrid (1935), svuotato da ampi lucernari longitudinali che, grazie al loro disegno triangolare, svelano il sistema costruttivo adottato. **(fig. 1)**
Era lo stesso Torroja a favorire il passaggio verso le superfici anticlastiche, scelte nella versione di iperboloidi ad una falda per la copertura della tribuna dell'ippodromo de La Zarzuela (1935). La suggestione delle sagome a doppia curvatura inversa di Torroja spingerà un altro spagnolo, Felix Candela, esiliato in Messico dopo la guerra civile, verso le ricerche sugli hypar: componendo, intersecando, abbinando frammenti di paraboloide iperbolico Candela darà vita ad alcuni degli involucri più flessuosi e divertiti del panorama costruttivo del Novecento. Tra tutti, la copertura del ristorante "Los Manantiales" a Xochimilco (1958), composizione di 'petali' geometrici di 8 centimetri di spessore ad omaggio del distretto messicano celebre appunto per le sue fioriture. **(fig. 2)**



Figura 1. – Eduardo Torroja, Mercato di Algeciras in Spagna (1933).

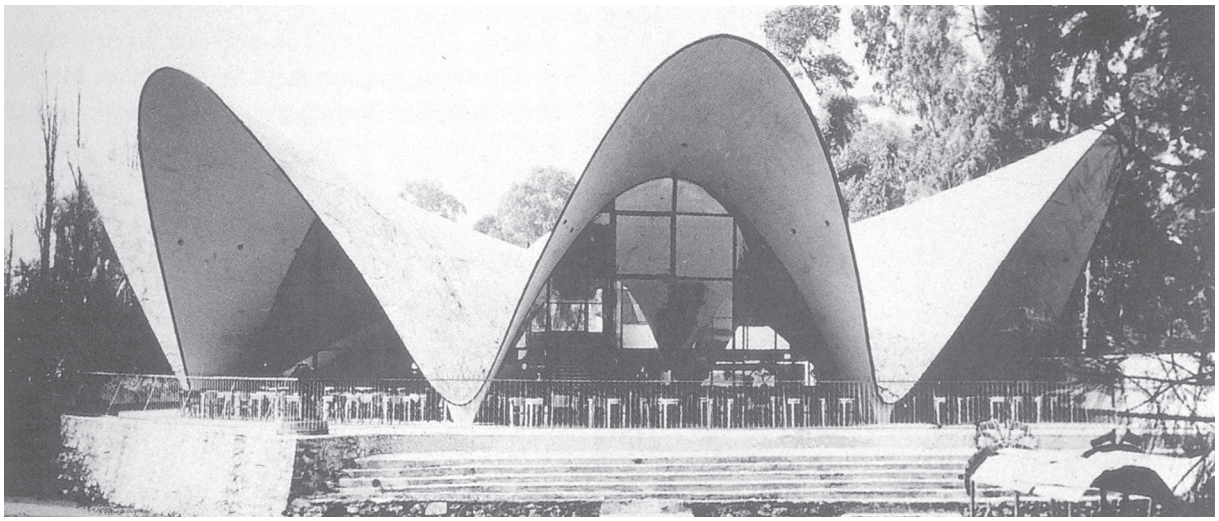


Figura 2. – Felix Candela, Ristorante "Los Manantiales" a Xochimilco in Messico(1958).

Esplorando nuovi modelli di resistenza strutturale oltre i limiti formali imposti dalle superfici rigate, sarà Heinz Isler a sagomare involucri sottili di forma qualunque, sottoposti al solo controllo della perfetta compressione attraverso simulazioni su modelli in scala ridotta: le sagome, complesse ma non innaturali (come quella del Burgi Garden Center di Camorino del 1971), vengono generate per inversione di prototipi in miniatura ottenuti sospendendo a pochi vincoli membrane certamente tese che vengono solidificate grazie a impasti a presa rapida. La certezza indispensabile di aver generato, con questo semplice ribaltamento, superfici soggette a sola compressione, per effetto del peso proprio, consente di contenere a pochi centimetri lo spessore di conglomerato cementizio ma non risparmia la fatica dell'assemblaggio delle casseforme, lontane ormai dalla banale geometria delle tavole accostate, sufficiente per la genesi di un hypar. **(fig. 3)**

In questo contesto di sperimentazione, che coinvolge l'intero panorama costruttivo internazionale tra il 1920 e il 1970, l'ingegneria italiana si ritaglia un ruolo di primo piano. Intanto già alla fine degli anni trenta Giorgio Baroni anticipa la sperimentazione sugli ombrelli a falde di hypar che renderanno celebre Candela, anche se le avverse condizioni autarchiche (pur determinanti come stimolo all'invenzione) vanificheranno in parte il suo brevetto, utilizzato in pochissimi esemplari adibiti a magazzini, per altro ancora esistenti e funzionanti, a Tresigallo (1940), a Milano e nei mercati generali di Roma e Caserta (1947-1950). Ma soprattutto, a validare il contributo dell'Italia nella soluzione di strutture/involucro, sono alcune originali coperture che rappresentano i capolavori delle due linee di sviluppo dell'ingegneria italiana subito dopo la guerra. Linee di sviluppo legate ai riconosciuti maestri del mondo accademico-scientifico, Arturo Danusso e Gustavo Colonnetti, che stimolano da una parte la sperimentazione sul ferrocemento, che condurrà Pier Luigi Nervi ad una personale insuperabile affermazione nel mondo architettonico-costruttivo; dall'altra quella sul cemento armato precompresso, che contribuirà in modo decisivo all'affermazione di un folto gruppo di progettisti italiani ai vertici del panorama internazionale.

Esemplare (anche ai nostri scopi) nell'opera del più celebre ingegnere italiano è il Palazzetto dello Sport al quartiere Flaminio, realizzato tra il 1956 e il 1957 per l'occasione delle Olimpiadi romane del 1960 (con la collaborazione di Annibale Vitellozzi per gli aspetti non strutturali), tutto raccolto sotto la protezione di una cupola ribassata di 60 metri di diametro, sostenuta da 36 cavalletti radiali. A differenza delle molte superfici sottili a doppia curvatura semplice e inversa che affollano il quadro internazionale, perfettamente lisce e prive di tracce dei flussi di tensioni, l'involucro del Palazzetto conserva scolpita all'intradosso - nel disegno a grandi riquadri romboidali - la memoria della tecnica esecutiva, basata su alcuni semplici quanto originali passaggi costruttivi noti con il nome di "Sistema Nervi". **(fig. 4)**

Il Palazzetto, infatti, rappresenta la più efficace traduzione architettonica di quel mix di 'prefabbricazione strutturale' e ferrocemento che Nervi ha cominciato a mettere a punto già prima della seconda guerra mondiale. **(fig. 5)**



Figura 3. – Heinz Isler, Burgi Garden Center di Camorino in Svizzera (1971).

Il Palazzetto, infatti, rappresenta la più efficace traduzione architettonica di quel mix di 'prefabbricazione strutturale' e ferrocemento che Nervi ha cominciato a mettere a punto già prima della seconda guerra mondiale. **(fig. 5)**
Per risolvere il problema costruttivo di realizzare una superficie curva sottile irrigidita da nervature (troppo complessa per un getto in opera), Nervi inventa un cassero a perdere, cioè un elemento-forma di pochi centimetri di spessore, un "tavellone romboidale", preparato a piè d'opera. Gli elementi-forma sono porzioni geometricamente esatte della superficie da realizzare: questo si ottiene facilmente realizzando una superficie-dima che riproduca esattamente la sagoma da costruire. Sulla dima si preparano i campioni (in muratura rifinita con gesso) che poi vengono adoperati per la preparazione in serie degli elementi-forma. Il processo segue, infatti, diversi passaggi in sequenza: il campione (che possiamo chiamare, con Nervi, elemento 'nonna'), è unico e rimane sulla dima. Serve però per realizzare un piccolo numero di pezzi in ferro-cemento (elementi 'madre') che più batterie di operai, lavorando al coperto, utilizzeranno, ribaltati, come controforma per realizzare gli elementi 'figlia'. Questi vengono accatastati uno sull'altro e grazie a leggerezza, resistenza e dimensioni contenute, potranno essere rapidamente movimentati con una sola gru operante nel centro dell'edificio. Gli elementi-forma (che in questo processo 'generazionale' sono identici ai campioni) possiedono una sagoma tale che, una volta accostati in opera, su un ponteggio provvisorio – leggero ed economico - , generano un canale, chiuso inferiormente, nel quale si può eseguire il getto della nervatura. Il getto, poi, viene esteso a formare una solettina superiore continua.



Figura 4. – Pier Luigi Nervi, Palazzetto dello Sport dall'alto a Roma (1956-1957).

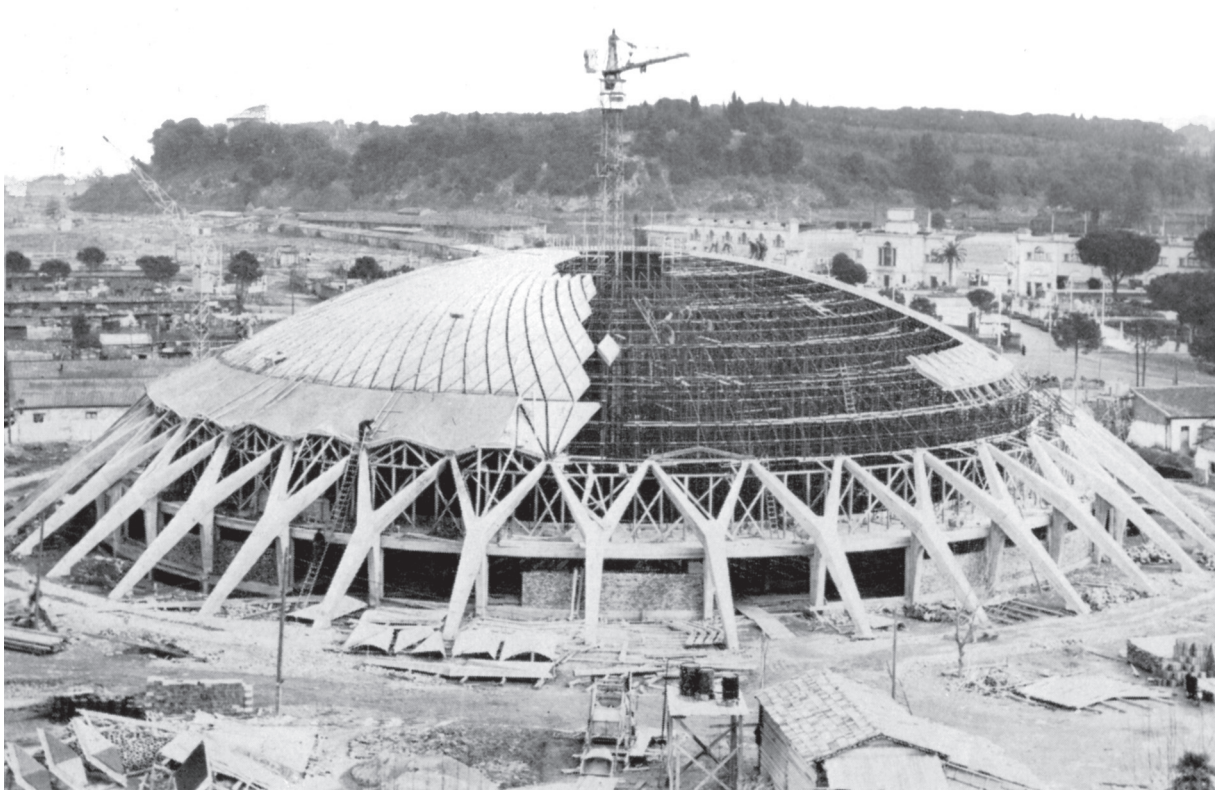


Figura 5. – Pier Luigi Nervi, Palazzetto dello Sport in costruzione (1956-1957).

Così la calotta sferica del Palazzetto è composta da 1620 pezzi, di appena 19 tipi diversi (11 tavelloni romboidali di misure diverse e 2 pezzi speciali per comporre l'oculo e chiudere il bordo, ripetuti ognuno 108 volte; poi 6 pezzi diversi per comporre il festone perimetrale, ripetuti 36 volte). Alla fine del lavoro numerosi getti in opera avranno solidarizzato i tanti pezzi separati fondendoli in un unico capolavoro (e proprio nella complessa combinazione di prefabbricazione ed esecuzione in sito risiede uno degli aspetti più interessanti del "Sistema Nervi"). La singolare tecnica costruttiva, che Nervi inventa come progettista, realizza come costruttore e controlla in fase esecutiva come direttore del cantiere, costituisce il momento più originale della costruzione in cemento armato in Italia (ma proprio nel momento di massimo successo la sua efficienza sarà annullata dal vertiginoso aumento dei costi della manodopera e dall'impossibilità della reiterazione del controllo dell'intero processo progettuale-costruttivo da parte di un solo, pur infaticabile, soggetto).

A fare da contrappunto alla soluzione nervata di Nervi, ma ancora a confermare il carattere originale e l'identità dell'architettura tecnica italiana, si pone un altro grande involucro realizzato solo pochi anni dopo l'inaugurazione del Palazzetto: il Palazzo delle Mostre di Franco Levi (con la collaborazione degli architetti Annibale e Giorgio Rigotti e la consulenza di Nicolas Esquillan), oggi noto come Palavela, concepito nella versione originale per il Centenario dell'Unità d'Italia, celebrato a Torino nel 1961.
Cosa differenzia la vela torinese da costruzioni geometricamente simili (e solo di qualche anno precedenti) come l'auditorium di Kresge al MIT (1953-1955), ideato da Eero Saarinen e Othmar H. Ammann, o il CNIT parigino (1956-1958), progettato proprio dal consulente strutturale di Levi?
Sebbene la comparazione fra strutture sia genericamente inutile e inappropriata, perché suggerisce una graduatoria di valore che non tiene conto del contesto realizzativo, della storia costruttiva e della suggestione sperimentale che ha influenzato il progettista, in questo caso il confronto conferma la peculiarità della progettazione italiana e consente una più concreta identificazione dei caratteri originali.

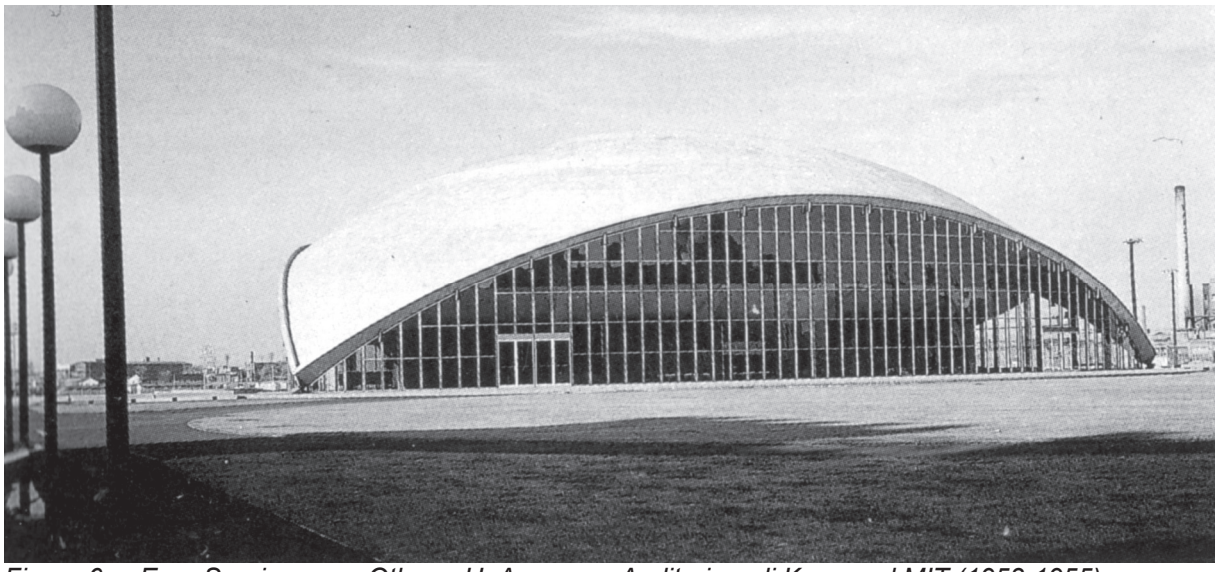


Figura 6. – Eero Saarinen con Othmar H. Ammann, Auditorium di Kresge al MIT (1953-1955).

L'auditorium del MIT si inserisce a pieno titolo nella linea delle sperimentazioni sulle superfici in cemento armato di spessore sottile a comportamento membranale: la sagoma, ritagliata su una sfera di 34 metri di raggio, proietta a terra un triangolo equilatero a lati curvi con luce libera di 49 metri. Per circa l'80% della superficie lo spessore del guscio è di appena 9 centimetri, raggiungendo i 46 centimetri lungo il bordo dove notoriamente queste geometrie elementari manifestano i maggiori 'disturbi' flessionali e necessitano di irrobustimenti che spesso ingannano la comprensione del comportamento statico e della reale diffusa sottigliezza. **(fig. 6)**
Viceversa, il gigantesco triangolo parigino, con i suoi 238 metri di luce libera, rinuncia alla soluzione membranale per configurare una struttura cellulare, ottenuta per assemblaggio di due gusci (ancora molto sottili, 6,5 centimetri), già sagomati a piccole onde, innervati da timpani ortogonali prefabbricati. E' proprio la massiccia adozione di pezzi prefabbricati a rendere esemplare la costruzione dei tre cilindri parabolici aperti a ventaglio e alzati a cupola. **(fig. 7)** (Per inciso, anche Nervi, consultato nel 1955 sulla possibilità di coprire un'area triangolare appoggiandosi solo su tre punti, aveva avanzato un progetto per il CNIT: la sua versione prevedeva tre segmenti cilindrici risolti con una maglia reticolare ad aste prefabbricate di ferrocemento da saldare con nodi gettati in opera, nei quali convergevano contemporaneamente anche aste precompresse).

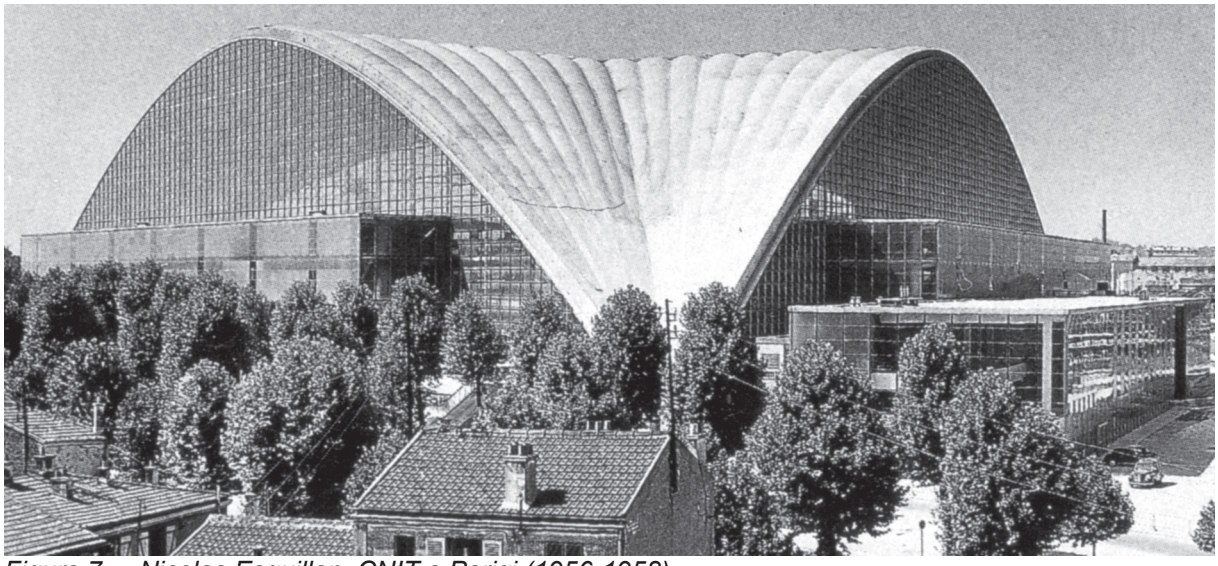


Figura 7. – Nicolas Esquillan, CNIT a Parigi (1956-1958).

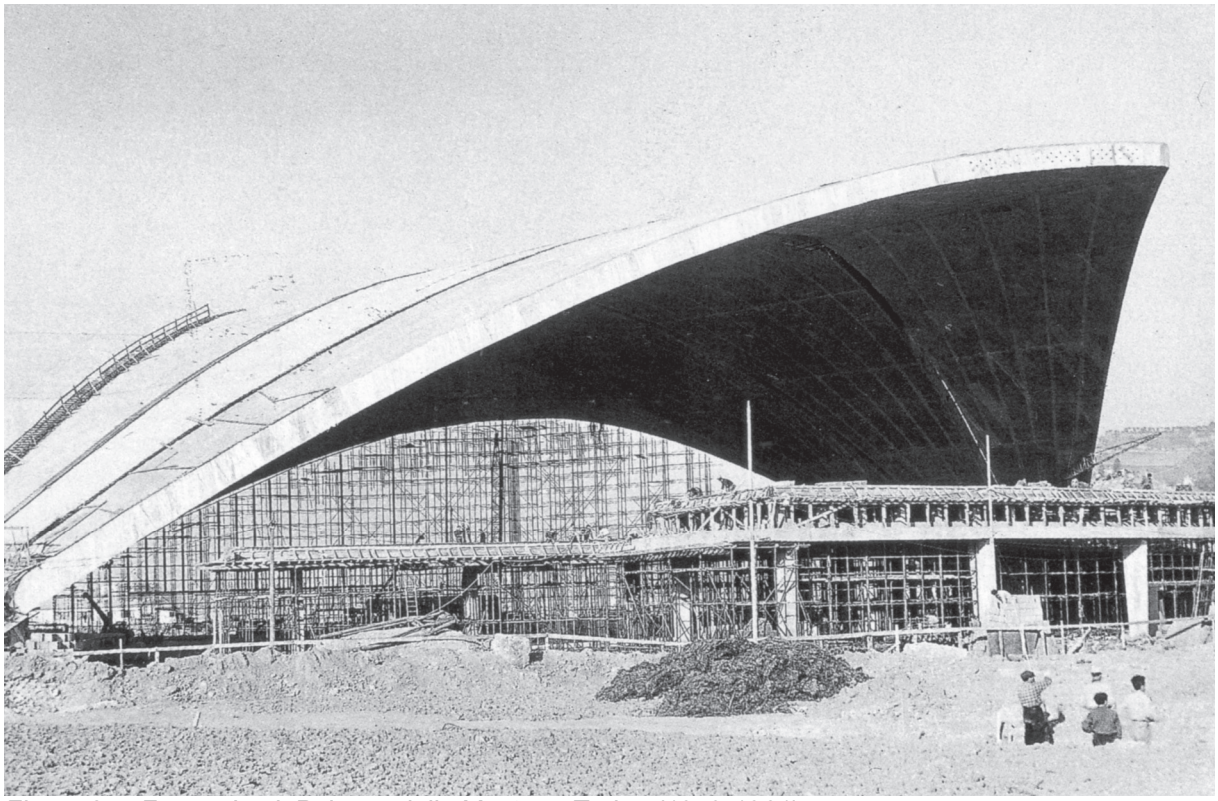


Figura 8. – Franco Levi, Palazzo delle Mostre a Torino (1959-1961).

Il Palavela, certamente debitore nell'idea generale al prototipo francese, ne esaspera alcune ipotesi configurandosi come una struttura che se non raggiunge il record di luce della precedente – solo 130 metri la distanza tra gli appoggi – offre soluzioni ancor più ardite. **(fig. 8)**

La copertura del Palazzo, come è noto, si compone di tre fusi ben distinti: la stella a tre punte centrale, cui si accostano tre archi a sagoma variabile, completati esternamente da altri tre archi, questi ultimi completamente a sbalzo rispetto al triangolo equilatero che ha vertici nei tre appoggi (così da trasformare la pianta in un esagono): ogni fuso è cellulare, composto da due solette armate (6 centimetri di spessore) tenute distanziate 1,18 metri da nervature trasversali e longitudinali. Levi adotta, dunque, una scomposizione strutturale alla Nervi, consapevole di poter rinsaldare la struttura a posteriori dosando sapientemente non i getti in opera ma quegli stati di coazione che, insieme a Colonnetti, ha contribuito a sviluppare in Italia. Coazioni che assumono l'aspetto di 'deformazioni sistematiche' alla Freyssinet in fase di disarmo (attraverso la tecnica del sollevamento mediante martinetti idraulici posizionati agli appoggi); che agiscono attraverso una catena presollecitata che assorbe le ingenti spinte della volta in fondazione; che operano nel pur esile spessore delle solette mediante cavi inguainati post-tesi, generando artificialmente quella sollecitazione di compressione (così faticosamente ricercata nelle volte membranali) che rende impermeabile all'acqua la superficie. Ma, ancor più rilevante staticamente, gli stati di coazione garantiscono stabilità ai tre fusi indipendenti: tre travi precompresse (celate nel pacchetto della volta), disposte a 120° sulla chiave della copertura, legano la stella centrale ai due fusi più esterni, vincolando quello a sbalzo (compreso il carico aggiuntivo della facciata vetrata) e raccogliendone le spinte.

La precompressione come "strumento a tutto fare" (come più volte Levi definisce la tecnica) diviene la naturale evoluzione di quella muratura sofisticata schiacciata dall'avvento del cemento armato: quella 'muratura armata' che proprio a Torino aveva conosciuto in Alessandro Antonelli le applicazioni più eroiche. Levi, come Antonelli (e come Freyssinet), non accetta come 'necessario' lo stato elastico di una costruzione quale risulti dalle sue condizioni abituali di esecuzione. Piuttosto cerca di modificarlo favorevolmente, mediante

coazioni imposte artificialmente (che per Antonelli, molti anni prima, assumevano l'aspetto di catene metalliche con cui cucire, grazie ad intuito e capacità di osservazione, lo snello guscio della sua Mole fino a renderlo stabile a dispetto delle naturali capacità dei materiali).

Ma anche Levi, come Nervi, fa parte di una generazione già anacronistica di progettisti al tempo stesso teorici, inventori, uomini di cantiere, capaci di correggere - se necessario - il funzionamento delle strutture direttamente in opera: progettisti di una razza estinta per effetto delle specializzazioni informatiche, impiantistiche, gestionali.
Nel campo delle strutture sottili in cemento armato, inoltre, in tutto il mondo il costo crescente della manodopera rispetto al valore dei materiali ha privilegiato soluzioni strutturali nelle quali la cubatura del cemento risparmiato non costituiva un parametro rilevante rispetto alla fatica del calcolo e della posa in opera. Così che gli involucri strutturali in cemento armato hanno conservato spazi solo tra i pochi cultori della forma libera, nostalgici dei tempi andati, disposti ad investire molto per far rivivere un paraboloide iperbolico (si pensi al bianco e lussuoso edificio di accesso del parco Oceanografico di Valencia, ultima opera di Candela, sponsorizzato in questa occasione da Santiago Calatrava).

BIBLIOGRAFIA:

Il contributo si ricollega ad una serie di ricerche condotte sulla storia dell'ingegneria strutturale italiana del Novecento. Per la bibliografia specifica si rimanda a:

Iori T., Poretti S. (a cura di), 2007, *Ingegneria italiana*, numero monografico di «Rassegna di architettura e urbanistica», 121/122, gennaio-agosto, Edizioni Kappa;
Iori T., 2005, *L'ingegneria italiana del dopoguerra: appunti per una storia*, in G. Mochi (a cura di), *Teoria e Pratica del costruire: saperi, strumenti, modelli*, vol. 2, pp. 763-772, Ravenna;
Iori T., Poretti S., 2005, *Pier Luigi Nervi's works for the 1960 Rome Olympics*, Atti del IV Congresso nazionale di "Historia de la construcción", pp. 605-614, Edicion Santiago Huerta, Madrid;
Greco C., Iori T., 2002, *Sperimentazioni autarchiche in Italia per le coperture di grande luce. I casi di Eugenio Miozzi e Giorgio Baroni*, in P.G. Bardelli, E. Filippi, E. Garda (a cura di), *Curare il moderno. I modi della tecnologia*, pp. 101-110, Marsilio, Venezia;
Iori T., 2001, *Gusci sottili di cemento armato*, «Area», 57, luglio /agosto, pp. 16-23;
Iori T., 2001, *Il cemento armato in Italia dalle origini alla seconda guerra mondiale*, Edilstampa, Roma.