

Sulla metodologia progettuale delle tensostrutture: dal modello architettonico al modello matematico; la progettazione grafica assistita dall'elaboratore elettronico.

■ Design methodology for tensile structures: from archi-tectonic model to mathematical model; computer aided graphic design.

di MASSIMO MAJOWIECKI

La metodologia progettuale delle tensostrutture è caratterizzata da una fase di definizione strutturale che viene indicata come « stato O ». Si tratta di determinare una configurazione geometrica della struttura associata ad uno stato coattivo di pre-trazione, che permetta di soddisfare l'equilibrio statico in ogni parte della struttura e sia idonea a garantirne la stabilità statica e dinamica nelle diverse condizioni di carico, tenendo conto, inoltre, che la geometria della superficie strutturale deve contemporaneamente soddisfare determinati requisiti architettonici definiti in sede di progetto preliminare.

Questa fase di progetto architettonico-strutturale è alquanto differente dalla corrispondente impostazione tradizionale di progetto che considera la geometria strutturale come dato noto del problema: nelle tensostrutture la geometria della struttura è conseguenza dello stato di pre-sollecitazione.



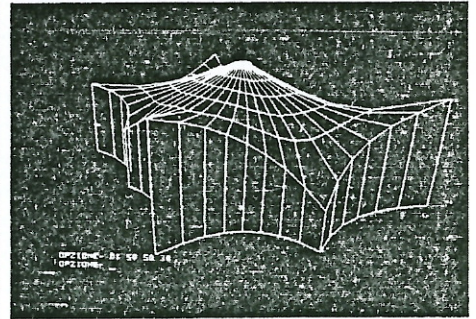
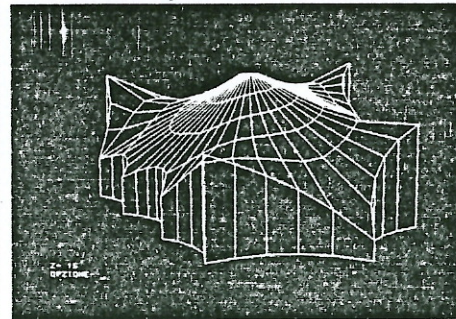
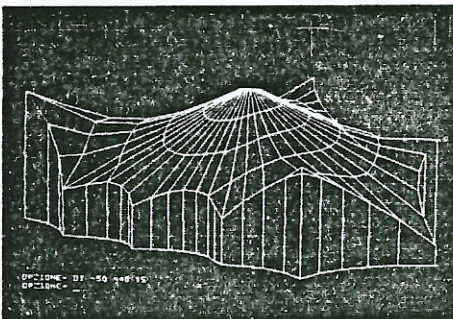
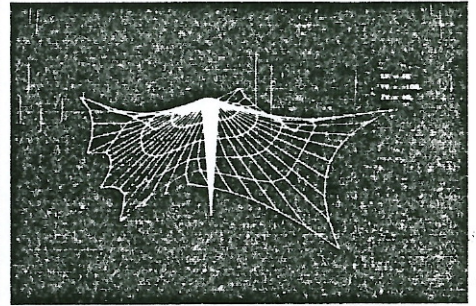
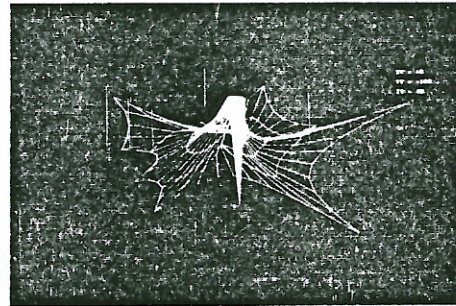
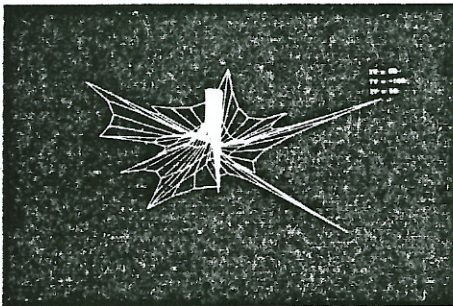
ded Structural Design), permette, mediante l'impiego di calcolatori forniti di un sistema grafico (Display graphics system), una progettazione visiva, rapida, economica e divertente.

Finito il progetto interattivo è possibile ottenere, su carta, mediante plotterizzazione, i risultati geometrici visibili sullo schermo: piante, prospetti, prospettive e le verifiche

numeriche del caso in esame. Le tecniche interattive fra uomo e macchina permettono di raggiungere simultaneamente i seguenti obiettivi:

— ottimo rapporto per la fase di analisi (operazione affidata alla macchina utilizzando la potenza, capacità e velocità nel calcolo automatico delle strutture) e la fase di sintesi (operazione affidata all'uomo responsabile del controllo della validità dei dati, della critica dei risultati e degli ordini di grandezza);

— ottimizzazione progettuale per via interattiva come conseguenza logica del ciclo interattivo di progetto che permette con estrema facilità e rapidità di modificare i dati e saggiarne le conseguenze mediante successive, iterative verifiche secondo la classica procedura di tentativo, verifica e correzione progettuale fondata sull'esperienza del progettista, il quale ha la capacità di sintetizzare una notevole massa di dati difficilmente esprimibile come problema matema-

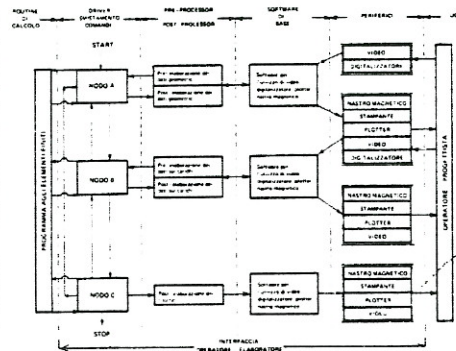


Sequenza interattiva di progetto. Il calcolo è stato eseguito mediante un elaboratore C.D.C. CYBER 76, mentre l'INPUT e l'OUTPUT

Per la definizione della geometria della struttura, la costruzione del modello architettonico è un metodo di progettazione atto a fornire, in via preliminare, tutte le informazioni volumetriche, distributive ed estetiche della superficie di copertura. Questi tipi di modelli non possono dare che una indicazione visiva, senza dare alcun conforto per quanto riguarda le verifiche di idoneità geometrica e tensionale, atte a garantire il suo funzionamento strutturale.

Dovendo essere i tentativi di progetto, in genere, numerosi, la costruzione di modelli architettonici e strutturali comporterebbe tempi e costi notevoli e qualche volta inammissibili in relazione al costo dell'opera. L'unico modo conveniente e rapido, nella moderna metodologia progettuale, sia architettonica che strutturale, delle tensostrutture è rappresentato dal modello matematico.

Il modello matematico, associato alle nuove tecniche interattive grafiche di progettazione assistita da calcolatore (C.A.D. = Computer Aided Design; C.G. = Computer Graphics; C.A.A.D. = Computer Aided Architectural Design; C.A.S.D. = Computer Ai-



tico. In un equilibrato rapporto uomo-macchina la macchina diventa, per mezzo della « interazione », l'utile prolungamento mentale ed operativo del progettista (creatore e non « verificatore ») aumentandone enormemente le capacità, velocità e qualità decisionali permettendo all'uomo di essere sollevato da pesanti oneri computazionali e ponendolo al centro del processo di sintesi progettuale.

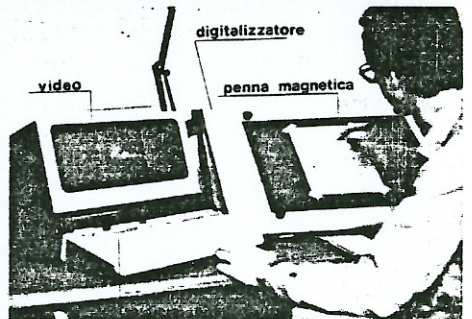
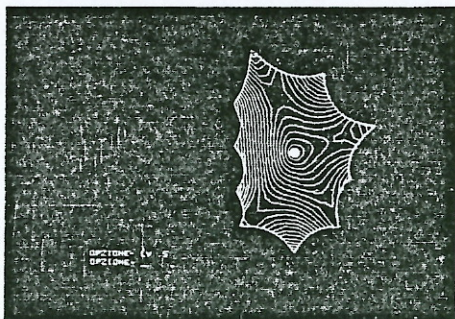
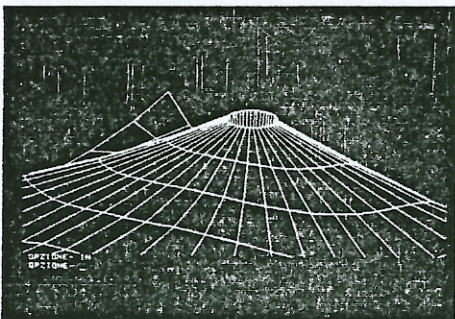
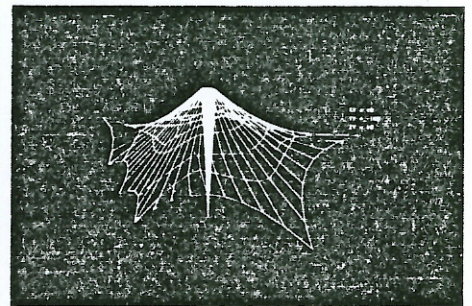
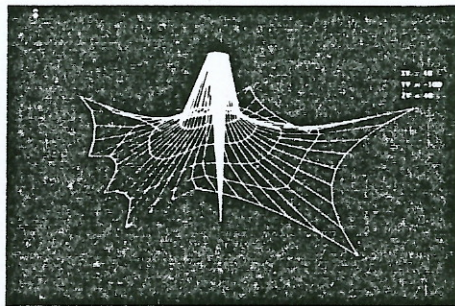
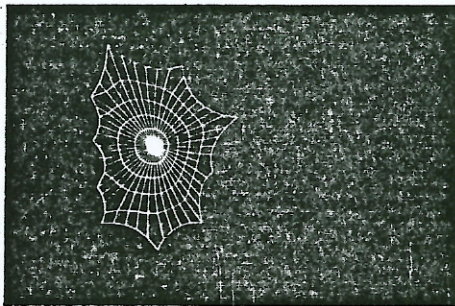
Per potere permettere al progettista architettonico o strutturale di comunicare con la macchina nel linguaggio che gli è proprio (linguaggio grafico) è necessario interporre tra la macchina (elaboratore elettronico) e l'uomo (progettista) delle opportune « interfacce »: hard-ware (macchina) e soft-ware (programmi elettronici).

Le macchine che consentono di dialogare — senza nessuna conoscenza di « linguaggio macchina » — in linguaggio simbolico grafico sono: il digitalizzatore+ cursore, il video grafico, la tastiera alfanumerica, il plotter. Il soft-ware è rappresentato da un programma agli elementi finiti costruito per la progettazione e per la verifica automatica delle tensostrutture.

■ Tensile structure design methodology is characterized by a phase of structural definition referred to as « state O ». What is involved here is the definition of a geometric configuration of the structure associated with a compulsory state of pre-tension, guaranteeing static equilibrium in every part of the structure and also static and dynamic stability in the various loading conditions, bearing in mind that the geometry of the structural surface must also satisfy certain architectonic requisites defined in the preliminary project design. This architectonic-structural phase differs a lot from traditional project organization which takes structural geometry as given: in tensile structures the geometry of the structure is a result of its prestressed state. The construction of the architectonic model is a design method for defining the geometry of the structure which is able to supply all preliminary volumetric, distributional and aesthetic information about the surface of the covering. These types of model can only give a visual indication and cannot give any assurance concerning geometric and tensile appropriateness needed to ensure adequate structural performance. Any design normally involving a large number of preliminary drafts, the

construction of architectonic and structural models would involve high and sometimes prohibitive time and cost expenditure in relation to the cost of the building. For tensile structures, the sole convenient and rapid method for modern architectonic and structural design is the mathematical model. The mathematical model, in association with new interactive computer-aided graphic design techniques (CAD = computer aided design; CG = computer graphics; CAAD = computer aided architectural design; CASD = computer aided structural design) and computers with a display graphics system, allows rapid, economical and entertaining visual designing. After the interactive phase, the geometric results can be plotted from the screen to paper: plans, elevations, perspectives and numerical data for the work in hand. Interactive techniques between man and machine have the following advantages: — excellent relationship in the analysis phase (operation entrusted to the computer using its power, capacity and calculating speed) and in the synthesis phase (operation entrusted to man, responsible for the control and validity of data, for the criticism of results and for the choice of size);

— optimization of design procedures as logical consequence of the interactive cycle which allows extreme facility and rapidity in the modification of data and evaluation of consequences by means of successive, repeated checks following the classical procedure of design trial, check and correction based on the experience of the designer, who possesses the ability of synthesizing a great mass of data difficult to express in terms of a mathematical problem. In a balanced man/machine relationship, the machine becomes the useful mental and operative projection of the architect. To allow the structural or architectural designer to communicate with the machine in his own (graphic) language we need to interpose between machine (electronic computer) and man (designer) suitable « interfaces »: hardware (machine) and software (programs). The machine that allow dialogue — not requiring any knowledge of « machine language » — in symbolic graphic language are: the digitalizer and cursor, the graphic display system, the alphanumeric key board, and the plotter. Software is represented by a finished programme constructed for design and automatic checking of tensile structures.



grafici sono stati eseguiti mediante hardware e software interattivi, messi a punto presso il laboratorio CAD-LAB di Bologna.

IL MODELLO MATEMATICO

Per ottenere il campo di validità geometrico-tensionale delle strutture, che hanno come ipotesi principale quella di lavorare essenzialmente in regime unilaterale di sforzi (solo sforzi positivi di trazione, $S > 0$), possiamo richiamare la sintetica espressione dell'equilibrio di membrana in assenza di carichi esterni:

$$\frac{\bar{n}_1}{K_1} + \frac{\bar{n}_2}{K_2} = 0; \quad \frac{\bar{n}_1}{n_1} = -\frac{K_1}{K_2} \quad (1)$$

dove:

\bar{n}_1, \bar{n}_2 : sforzi di membrana in direzione 1 e 2, rispettivamente;
 K_1, K_2 : raggio di curvatura delle famiglie di curve 1 e 2.

L'ipotesi strutturale che ci consente di lavorare solo in regime unilaterale di sforzi (positivi di trazione) è esprimibile formalmente come:

$$\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 > 0 \quad (\bar{n}_1 \text{ e } \bar{n}_2 \text{ positivi di trazione}), \quad (2)$$

ne consegue immediatamente dalla (1) che deve essere necessariamente:

$$K_1 \cdot K_2 < 0 \quad (\text{curvatura totale negativa}). \quad (3)$$

Considerando, nello specchio seguente, tutte

le possibilità di regime geometrico e di sollecitazione,

Stato di sollecitazione

Iperbolico

$$\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 < 0$$

Parabolico

$$\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 = 0$$

Ellittico

$$\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2 > 0$$

Geometria strutturale

Iperbolica

$$K_1 \cdot K_2 < 0$$

Parabolica

$$K_1 \cdot K_2 = 0$$

Ellittica

$$K_1 \cdot K_2 > 0$$

Tensostrutture

è possibile definire le tensostrutture come strutture a geometria di tipo IPERBOLICO (a sella) e a regime forzatamente ELLITTICO di sollecitazione.

Il regime di sollecitazione « forzato » si ottiene, evidentemente, con l'introduzione di uno sforzo di pre-tensione sufficiente a garantire che le sollecitazioni di compressione nella struttura possano essere intese come « diminuzione di una trazione preesistente »: appunto lo stato di pre-tensione caratteristico dello stato « O ».

La pre-tensione per le tensostrutture rappresenta l'energia necessaria da immagazzinare per opporsi ai carichi e garantire la

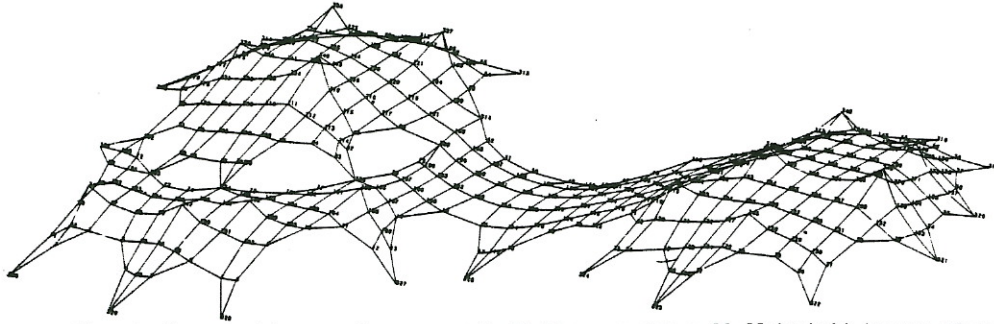
stabilità statica e dinamica del sistema strutturale.

Conosciuto ora il campo d'indagine strutturale, l'impostazione progettuale è la seguente: — definito, in via di massima, il modello architettonico;

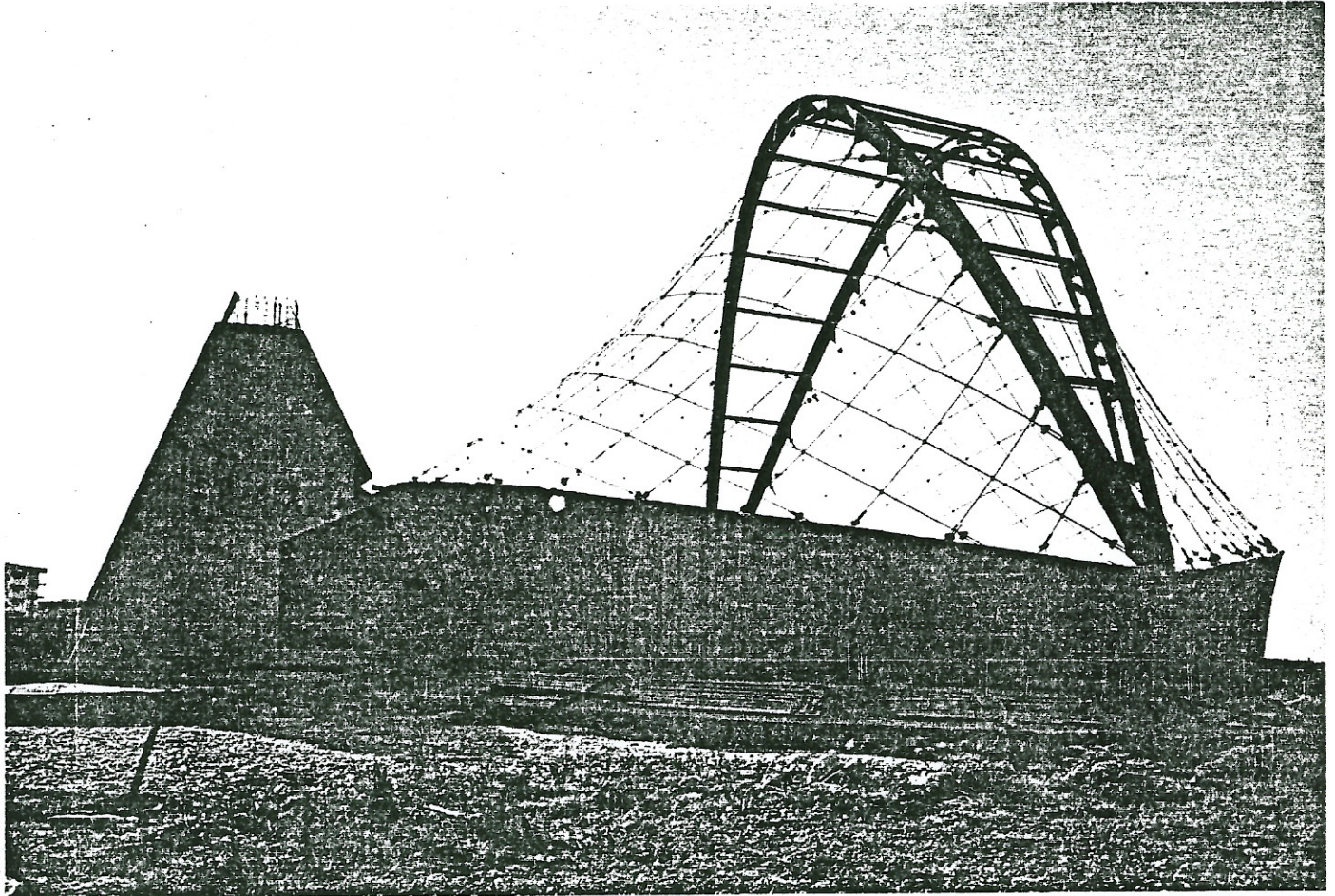
— trovare, mediante un modello matematico, la configurazione geometrica equilibrata, in regime di pre-tensione, che si discosti il minimo possibile dal modello architettonico. In termini matematici il problema si formula nei seguenti termini:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Variabili: } [X; Y; Z; S]; \\ \text{Obiettivo: } \Sigma [(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2] \rightarrow \min \\ \text{Vincoli: } g[X; Y; Z; S] = 0; S > 0. \end{array} \right.$$

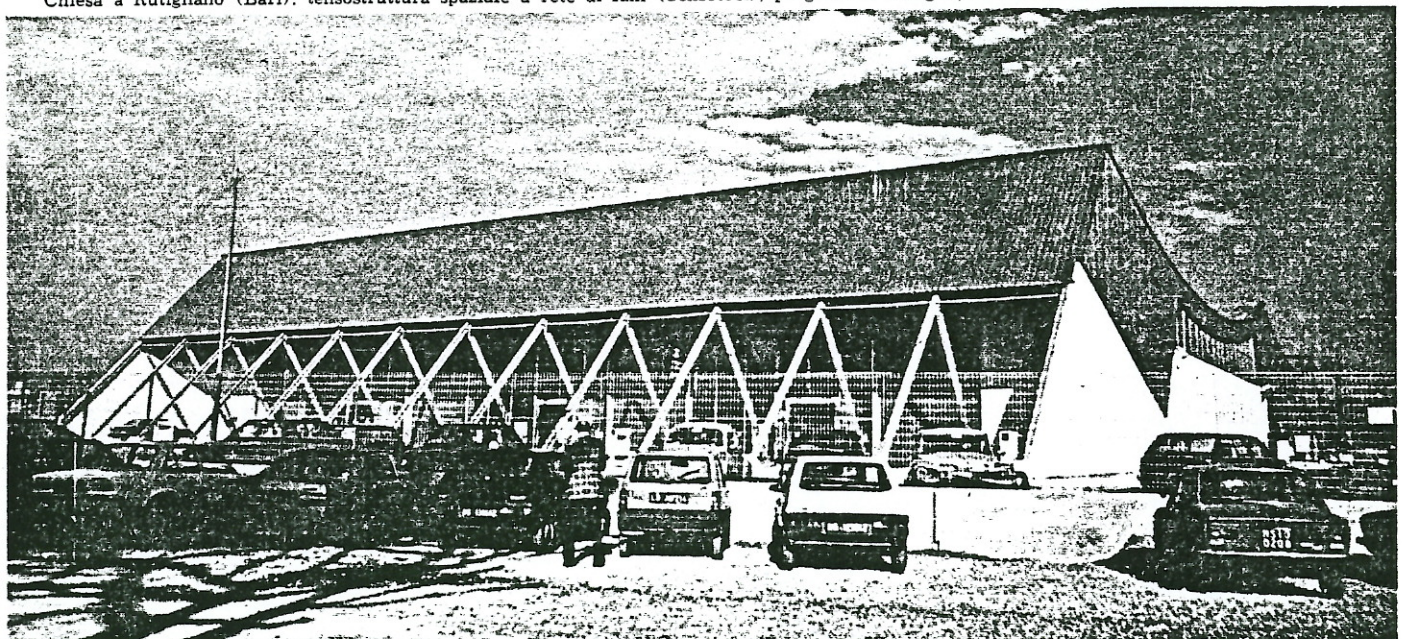
dove le variabili X, Y e Z sono le coordinate incognite della struttura schematizzata matematicamente ed S rappresenta lo stato di sollecitazione (pre-tensione). L'obiettivo da raggiungere è che il divario tra modello architettonico (X_0, Y_0, Z_0) e modello matematico (X, Y, Z) sia il minimo possibile. I vincoli, o condizioni del problema, sono il rispetto dell'equilibrio $g(X, Y, Z, S) = 0$ e dell'ipotesi strutturale $S > 0$.



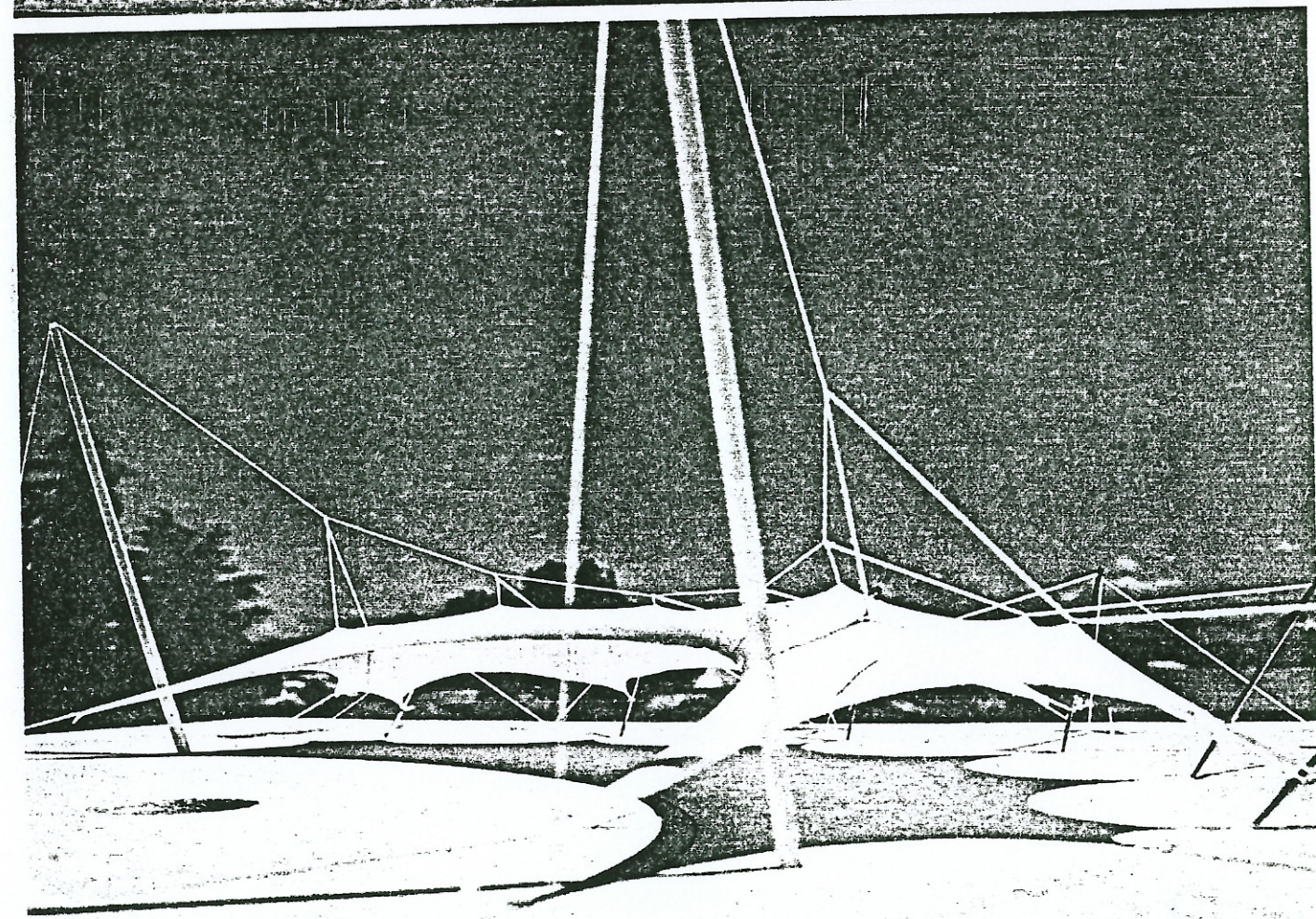
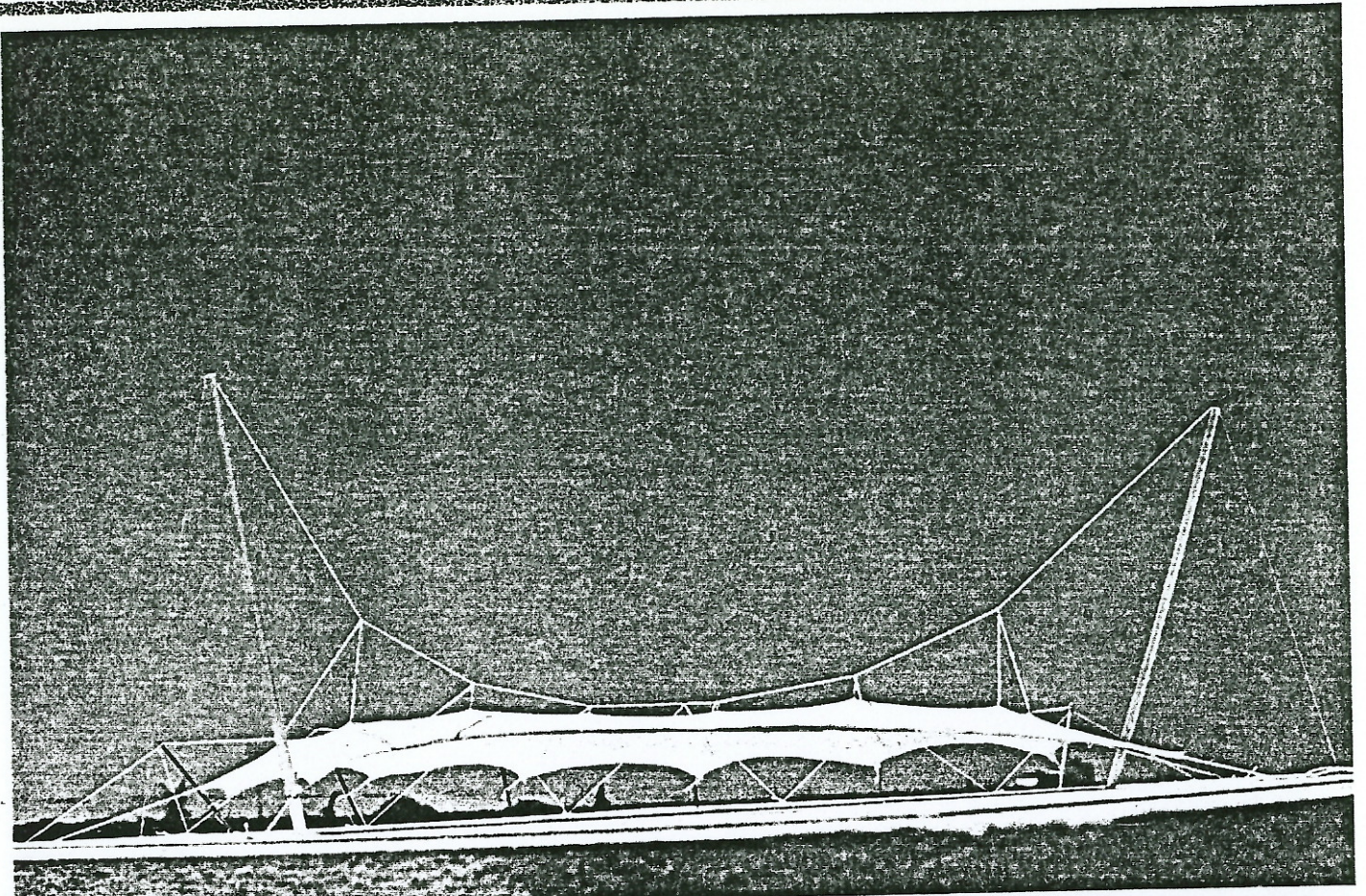
Tensostruttura spaziale a membrana. progetto V. Barce, membrana M. Majowiecki, impresa Plasteco.



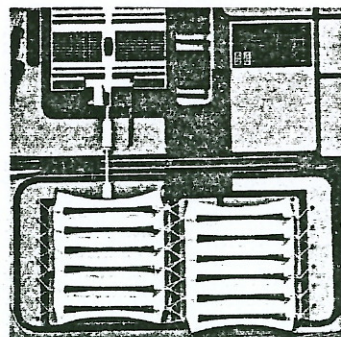
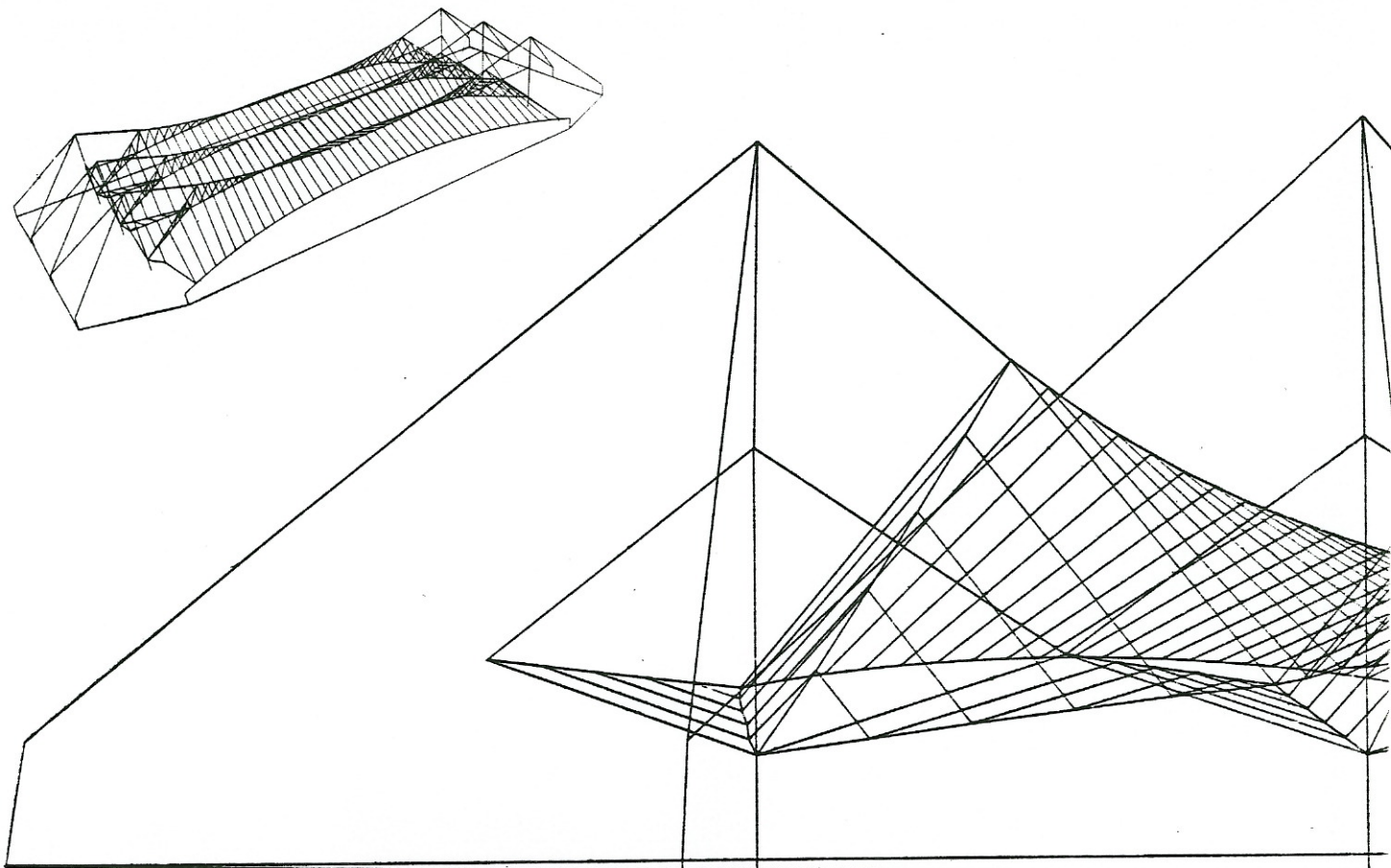
Chiesa a Rutigliano (Bari): tensostruttura spaziale a rete di funi (Tensoteci); progetto O. Mangini, tensostruttura D. Jawerth, M. Majowiecki.



Fiera del Marmo, Carrara: tensostruttura (Tensoteci) a campate multiple, progetto Conato, Cacciatori, Geloni, Telara, consulenza Majowiecki, 1979.

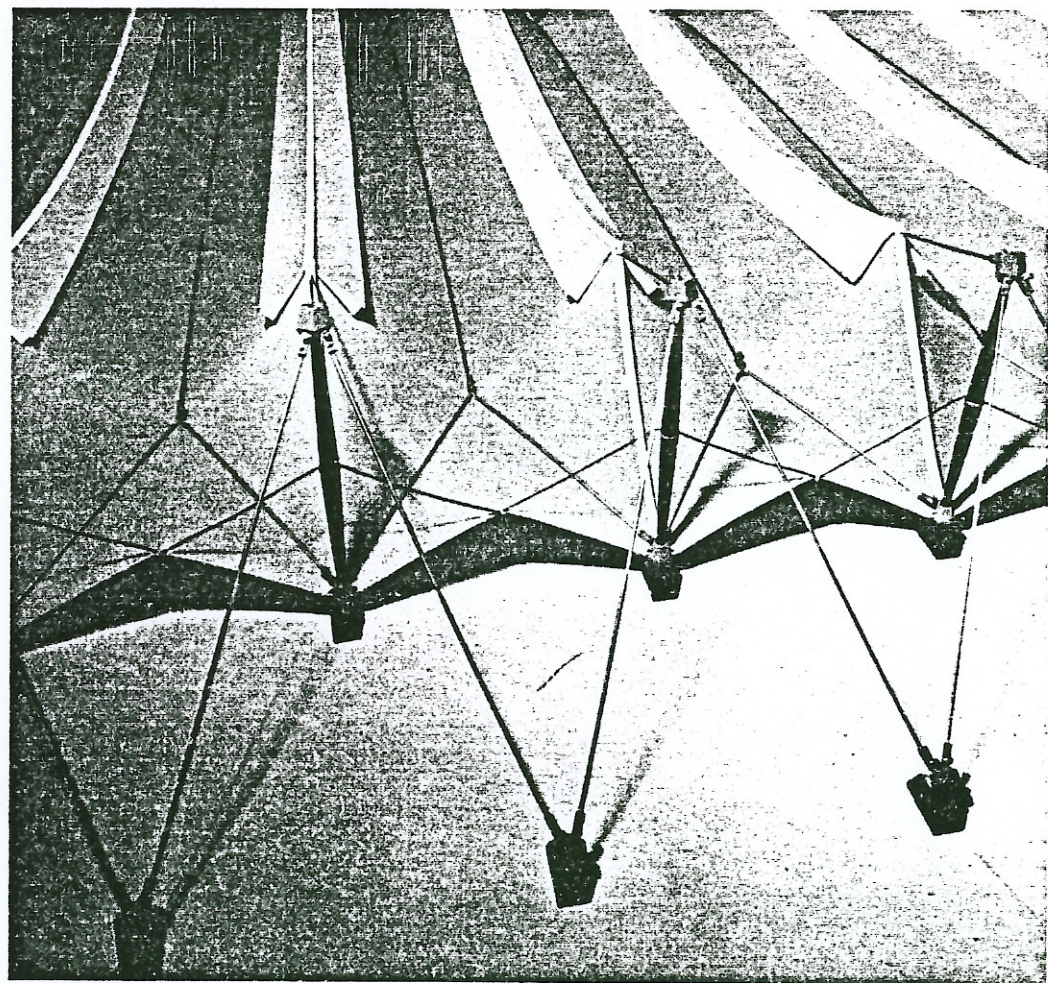


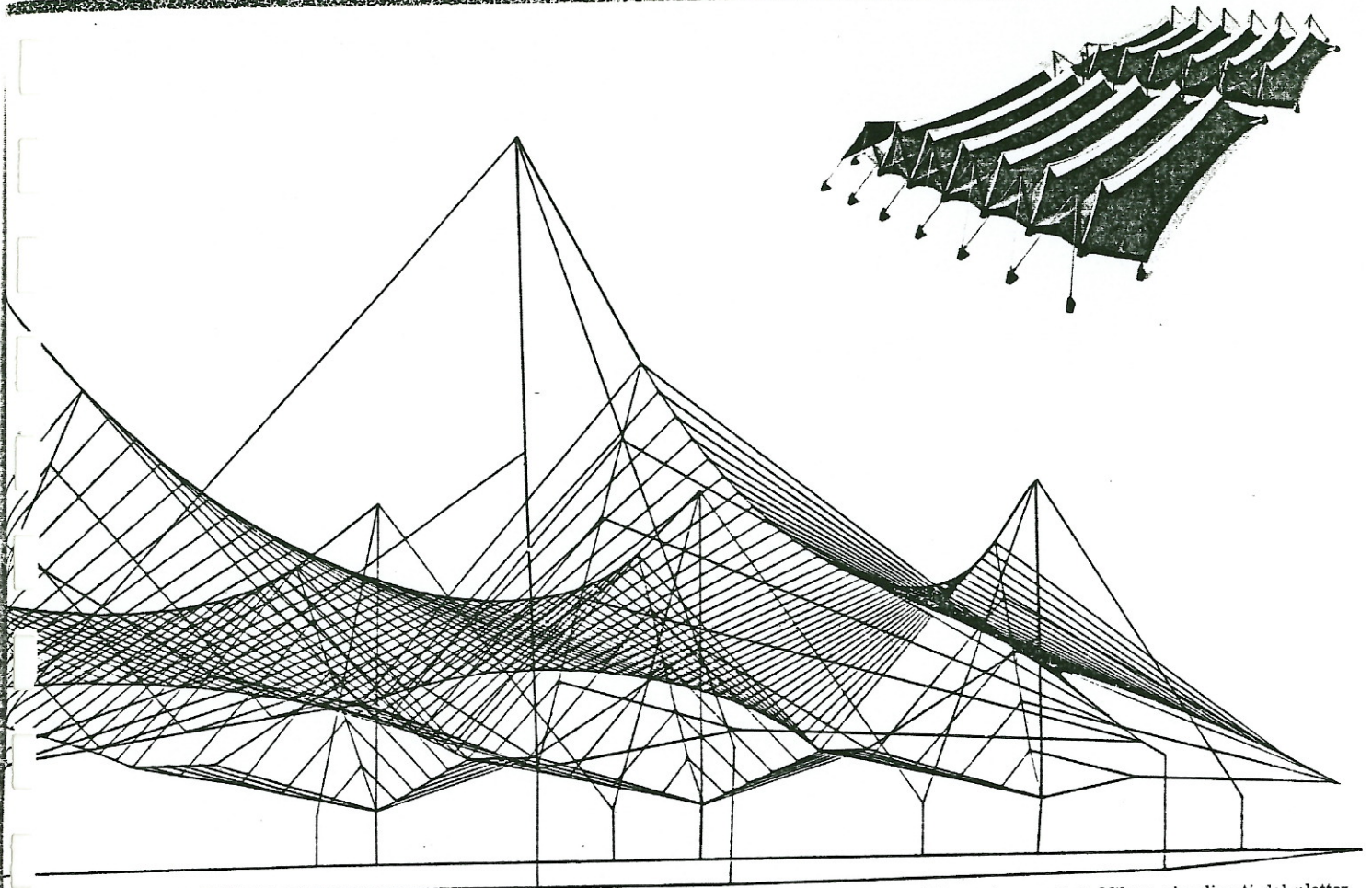
Modello per un centro di quartiere a Busto Arsizio, Carlo Moretti, 1980.



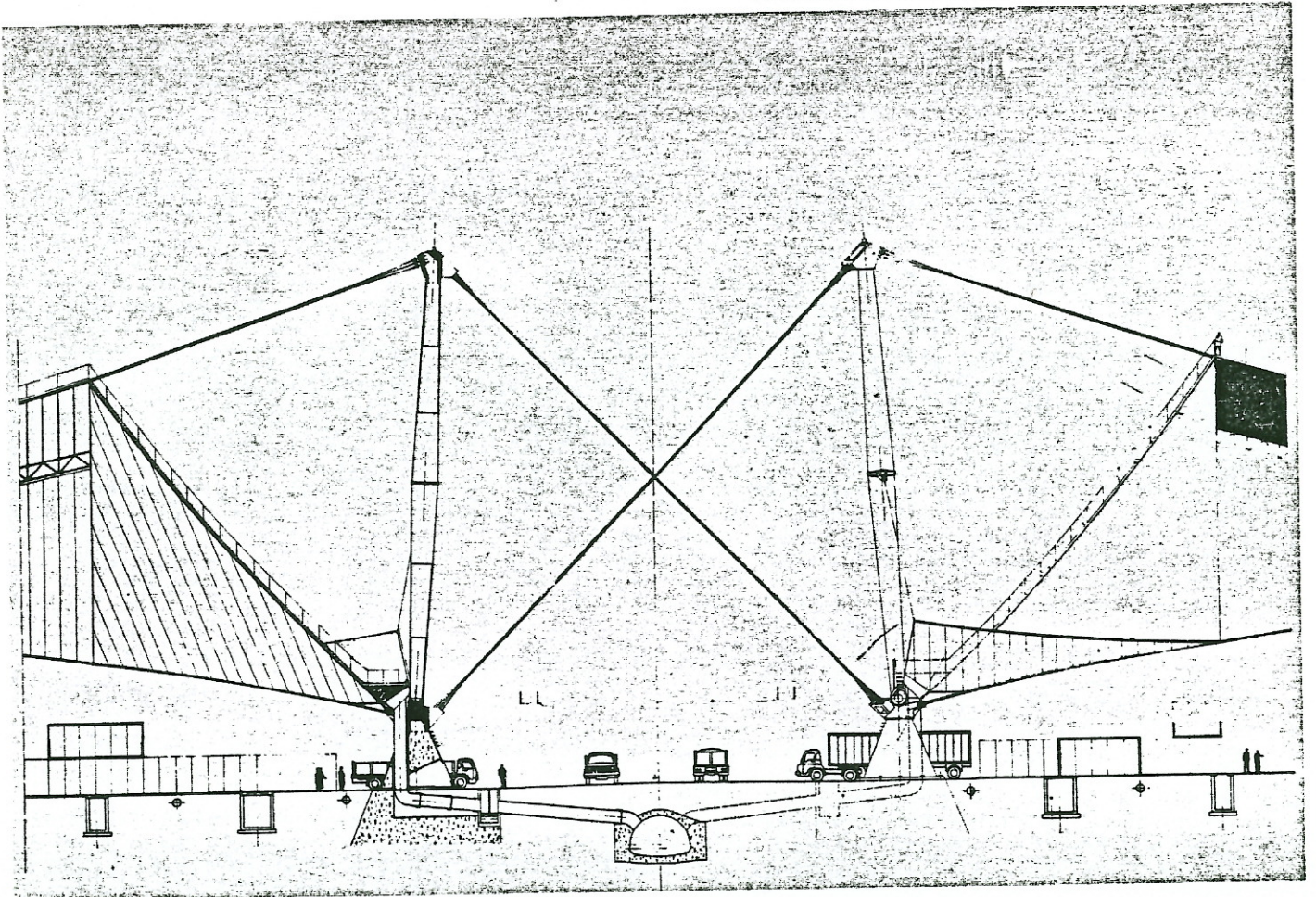
Progetto per la ristrutturazione e lo ampliamento delle strutture annonarie di Milano; nuovi mercati A1-A2. Architetti: A. Arrighetti (coordinatore), F. Baldessari, G. Gentili. Ingegneri: M. Costantino, G. Keffer. 1980

Per i nuovi mercati, con una superficie coperta complessiva di 97.000 mq, è stata prevista una struttura di copertura di grandi dimensioni. La distanza tra i vertici dei pilastri è di 220 m. Sotto la copertura, su una griglia modulare di 120 x 120 cm, potranno realizzarsi secondo le necessità degli utenti e con elementi a catalogo, diverse soluzioni e configurazioni spaziali.





Le strutture dei nuovi mercati di Milano visualizzati dal plotter.



A lato: particolare del modello. Sopra: sezione longitudinale.