

L'ACCIAIO NELL'ARCHITETTURA STRUTTURALE: PROGETTAZIONE CONCETTUALE E COSTRUTTIVA DI GRANDI COPERTURE

M. Majowiecki

IUAV

University of Venice, ITALY

1 ABSTRACT

Long span roof are today widely applied for sport, social, industrial, ecological and other activities. The experience collected in last decades identified structural typologies as space structures, cable structures, membrane structures and new - under tension - efficient materials which combination deals with lightweight structural systems, as the state of art on long span structural design. In order to increase the reliability assessment of wide span structural systems a knowledge based synthetical conceptual design approach is recommended. Theoretical and experimental in scale analysis, combined with a monitoring control of the subsequent performance of the structural system, can calibrate mathematical modelling and evaluate long term sufficiency of design.

2 INTRODUCTION

Lightweight structures are today widely applied for:

Sport buildings

- Stadia
- Sport halls
- Olympic swimming pools
- Ice tracks and skating rinks
- Indoor athletics

Social buildings

- Fair pavillions
- Congress halls
- Auditorium and theatres
- Open air activities

Industrial buildings

- Hangars
- Warehouses
- Airport terminals

Ecology buildings

- Waste material storage
- Pollution isolation

The state of the art trend on widespan enclosures: the lightweight structures - from compression to tension.

According to the state of the art, the more frequently typologies and materials used for wide span enclosures are: **Space structures**

- single layer grids
- double and multi layer grids

- single and double curvature space frames

Cable structures

- cable stayed roofs
- suspended roofs
- cable trusses
- single and multilayer nets

Membrane structures

- prestressed anticlastic membranes
- pneumatic membranes

Hybrid structures

- tensegrity systems
- beam-cable systems

Convertible roofs

- overlapping sliding system
- pivoted system
- folding system

The historical trend in the design and construction process of wide span enclosures was and is the minimization of the dead weight of the structure and , consequently, the ratio between dead and live loads (DL/LL).

From ancient massive structures (DL/LL>>1) to modern lightweight structures (DL/LL<<1), the DL/LL ratio was reduced more than 100 times due to the most effective exploitation of the properties of special high-strength materials, in combination with structural systems where tensile stresses are dominant (Tension structures). Due to the inherent stability of tension against compression, tension structures leads naturally to optimization of the system energy against structures which are subjected to bending moments or are stressed axially with the possibility of reversal from tension to compression, as is the case with grids and framed structures. Therefore, the actual trend on lightweight structural typologies is to combine, as far as possible, a dominant tension mechanical system and hi-strength materials.

In Table 1, is possible to observe the exceptionally efficiency of steel from the strength to weight ratio ($K=\sigma/\gamma$) in tension (K_t), remaining the principal material of construction accompanied by the hi-tech innovations.

The different mechanical behaviour of compression and tension structures can be illustrated by Fig.1 where, starting from a thin parabolic arch under uniform distributed load , it is possible to observe, during incremental loading, the following phases of the load displacement curve:

- Phase A: unloaded structure.
- Phase AB: compression phase; geometric softening; decrease of tangential stiffness, reduction in the positive value of the secondary term of the total potential energy $\delta^2\pi$.
- Phase BCE: unstable phase; dynamic displacement from B to E with liberation of kinetic energy (cross hatched area). Here, the secondary term of total potential energy is negative ($\delta^2\pi < 0$).
- Phase DEF: tension phase; geometric hardening increase in the tangent stiffness, branch of stable equilibrium with increasing value of secondary term of the total potential energy ($\delta^2\pi$). Phase DEF is characteristic of the behaviour of tension structures. The non-linear geometric hardening results in a less than proportional increase of stresses in relation to increase external loads. This provides an increased nominal safety factor evaluated at ultimate limit state (β safety index).

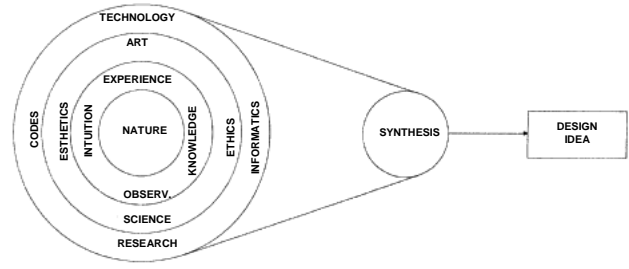


Fig.2 Holistic approach to structural design

3 KNOWLEDGE BASED CONCEPTUAL DESIGN AND RELIABILITY LEVEL

The conceptual design is knowledge based and, basically, property of individual experts. Their involvement in early stages of design is equivalent, from the reliability point of view, to a human intervention strategy of checking and inspection and, from a statistical point of view, to a "filtering" action which can remove a significant part of "human errors". According to the design requirements, the conceptual design is defined by a knowledgeable expert synthetical approach based on the reliability intuition of the selected model which has to be confirmed by the results of the analysis phase. The conceptual design approach is holistic and directly depends on the skills and abilities of the design team members.

Special aspects of conceptual design decisions on long span structures.

From the observations of the in service performance of all or part of structural systems, we have received many informations and teachings regarding the design and verification under the action of ultimate and serviceability limit states.

Considering the "scale effect" of long span structures several special design aspects arise as:

- the snow distribution and accumulations on large covering areas in function of statistically correlated wind direction and intensity;
- the wind pressure distribution on large areas considering theoretical and experimental correlated power spectral densities or time histories;
- rigid and aeroelastic response of large structures under the action of cross-correlated random wind action considering static, quasi-static and resonant contributions;
- the time dependent effect of coactive indirect actions as pre-stressing, short and long term creeping and temperature effects;
- the local and global structural instability;
- the non linear geometric and material behaviour;
- reliability and safety factors of new hi-tech composite materials;

MATERIALS	σ_t^R N/mm ²	σ_c^R N/mm ²	γ_k N/m ³ 10 ³	K_t m	K_c m
Bricks		3	18		166
Wood	85	37.5	5	21.250	9.375
Concrete		30	25		1.200
Steel 52	520		79.5	6.664	----
Steel 105	1050		79.5	13.376	----
Titanium	900		45	20.000	----

Composite materials hi-tech

Unidir. Carbon fibres	1400		15.5	90.000	
Textile carbon fibres	800		15.5	52.000	----
Unidir. Aramidic fibres	1600		13	123.000	----
Textile aramidic fibres (Kevlar)	750		13	58.000	----
Unidir. Glass fibres	1100		20	55.000	----
Textile glass fibres	450		20	22.500	----

Table 1 Mechanical properties of construction materials

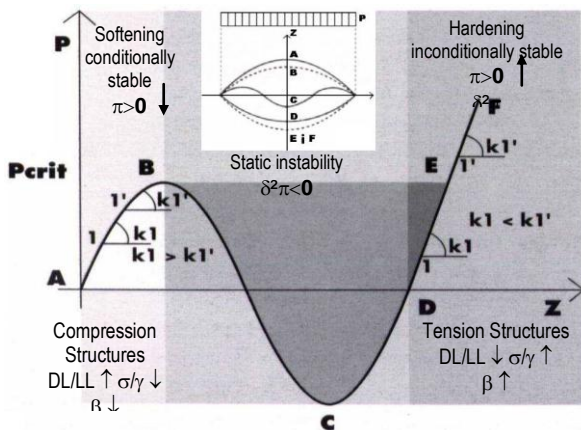


Fig.1 Mechanical behaviour from arch to cable

- the necessity to avoid and short-circuit progressive collapse of the structural system due to local secondary structural element and detail accidental failure;
- the compatibility of internal and external restrains and detail design, with the modelling hypothesis and real structural system response;
- the parametric sensibility of the structural system depending on the type and degree of static indeterminacy and hybrid collaboration between hardening and softening behaviour of substructures.
- In the case of movable structures, the knowledge base concerns mainly the moving cranes and the related conceptual design process have to consider existing observations, tests and specifications regarding the behaviour of similar structural systems.

In order to fill the gap, the IASS working group n°16 prepared a state of the art report on retractable roof structures including recommendations for structural design based on observations of malfunction and failures.

4 SISTEMI RETICOLARI SPAZIALI

4.1 CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE STRUTTURALI

Svariati sistemi costruttivi di strutture reticolari spaziali sono stati proposti e usati da Ditte specializzate e da studiosi di ogni parte del mondo.

I sistemi reticolari spaziali sono costituiti da solo due elementi costruttivi: nodi e aste.

La caratteristica fondamentale che contraddistingue e qualifica tutti i sistemi costruttivi è, come si vedrà in seguito, il collegamento (nodo) dei vari elementi (aste) nell'assemblaggio dell'intera struttura; è dalle caratteristiche esecutive, sia tecniche che tecnologiche, di tali connessioni che dipende il risultato funzionale, statico ed economico della costruzione fig.3.

Tutto il problema costruttivo è condizionato dalla loro realizzazione e non si estrinseca solo all'atto esecutivo, ma si proietta, con prospettiva ben più vasta, nella statica e nell'architettura del progetto, condizionandone talvolta forme e schemi.

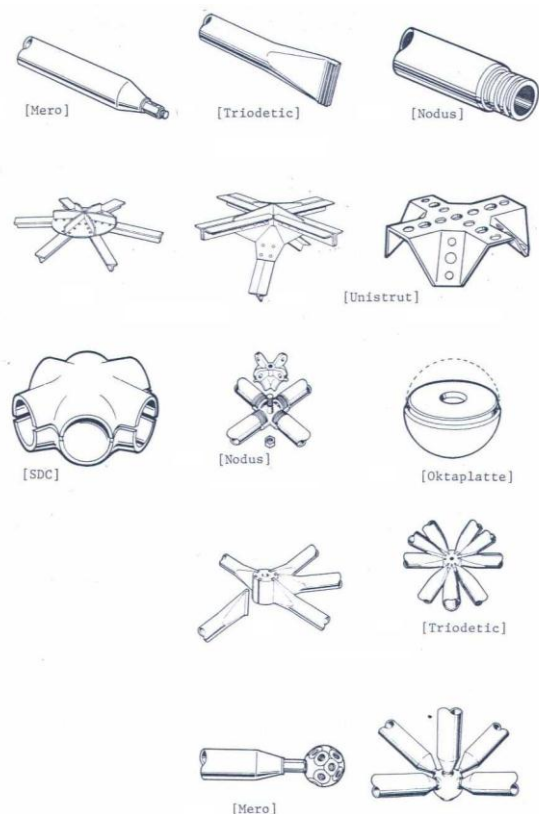


Fig.3 Sistemi di collegamento delle strutture spaziali

La tecnica moderna più progredita tende ormai, con orientamento unanime, alla costruzione prefabbricata che, per le strutture in oggetto, non è da confondersi con la produzione di costruzioni standardizzate, ma piuttosto con la ricerca di sistemi standardizzati di costruzioni, basati sull'uso di elementi leggeri e intercambiabili, di alta qualità e di semplice produzione, che offrano grande varietà di disegno, che siano prontamente sostituibili in caso di nuove esigenze e, infine, che, avvalendosi di

minime tolleranze, garantiscano un montaggio facile, rapido e preciso.

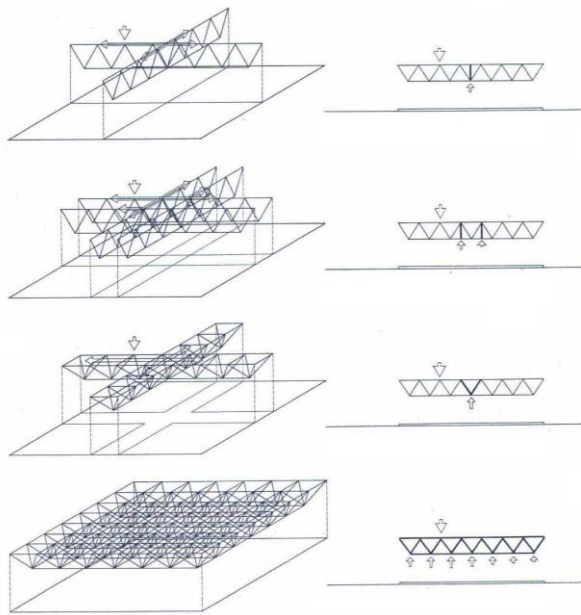


Fig.4 Schema concettuale di struttura spaziale

4.2 I GRIGLIATI PIANI

a) Generalità

La copertura di vasti ambienti a pianta quadrata, rettangolare e talvolta anche poligonale può venir realizzata efficacemente senza l'ingombro di pilastri interni impiegando grigliati piani in acciaio a semplice o a doppio strato.

Il grigliato piano a semplice strato è un sistema spaziale costituito da due o più ordini di travi semplici o composte che si intersecano ad angolo retto o obliquo. Esse sono collegate fra loro ad ogni intersezione e sono caricate da forze normali al piano medio: va da sé che le caratteristiche della sollecitazione prevalenti nelle membrature sono gli sforzi taglianti e i momenti flettenti e torcenti.

Il grigliato piano a doppio strato è invece costituito da due reticoli semplici, uno superiore e l'altro inferiore fig.4, collegati tra loro da aste verticali o variamente inclinate. Il tipo di maglia dei reticoli componenti, che

possono essere uguali o diversi, caratterizza il grigliato che può risultare a due o più direzioni fig.5. Il sistema di collegamento di (fig.6) permette di realizzare differenti forme di grigliati spaziali, potendo adattarsi a numerosi impieghi. Esso comprende solo due elementi base: un'asta tubolare di lunghezza fissa e una sfera di connessione provvista di 18 fori filettati; pertanto un nodo può ricevere, senza eccentricità, le estremità di 18 aste.

Il procedimento costruttivo è molto flessibile e presenta attualmente, mediante macchine a controllo numerico, un elevato grado di prefabbricazione: il montaggio si esegue per mezzo di mano d'opera non qualificata senza alcuna difficoltà, con l'impiego di un solo tecnico e con rilevante economia di tempo.

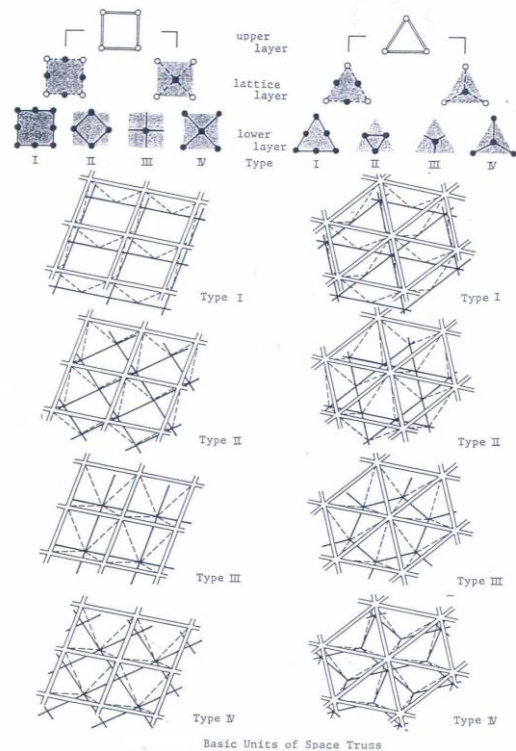


Fig.5 Moduli standard di grigliati spaziali

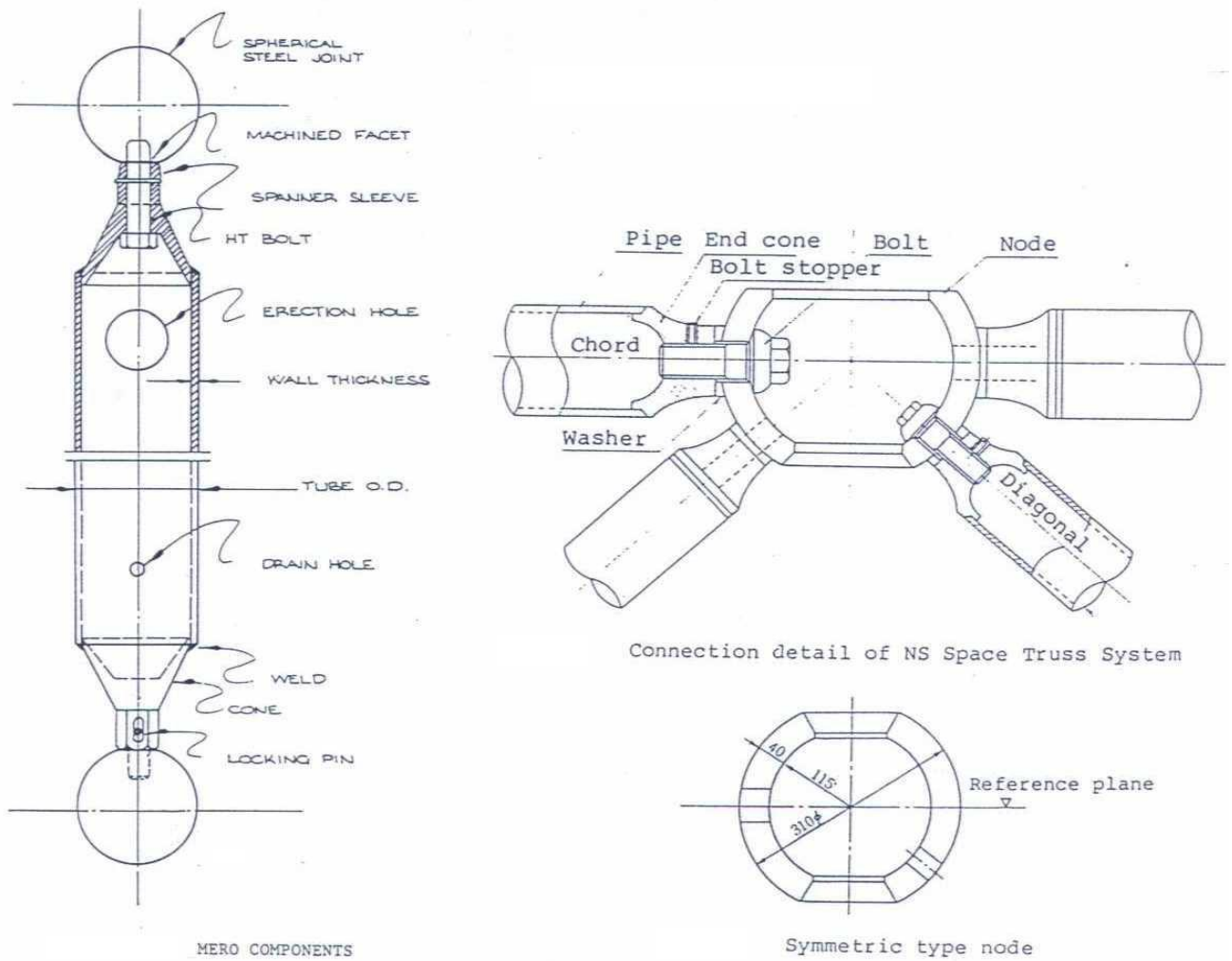


Fig.6 Il collegamento reticolare spaziale

4.3 I GRIGLIATI A SEMPLICE CURVATURA

a) Generalità

Il passaggio dai grigliati piani ai sistemi reticolari a guscio conduce alla realizzazione di strutture particolarmente rigide che offrono soluzioni tra le più interessanti per la copertura di vaste aree. La loro forma geometrica può essere assai varia: se è vero infatti che le volte a botte e le cupole di rivoluzione sono le più diffuse, è anche vero che realizzabili con successo sono altresì gusci di forma diversa quali le volte di traslazione ad archi generatori circolari, i paraboloidi ellittici, ecc., generalmente di superficie a curvatura di Gauss ovunque positiva fig.7.

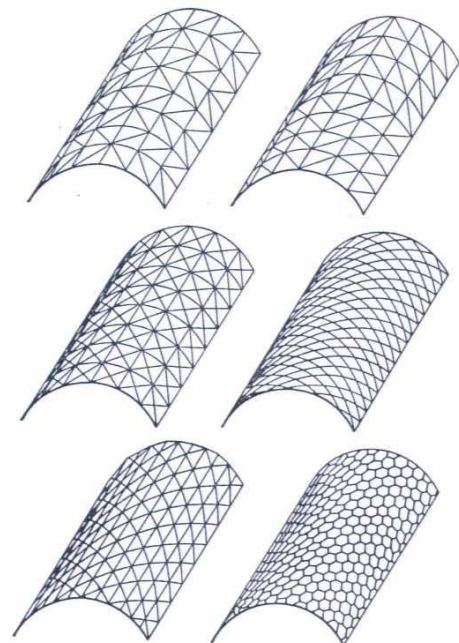


Fig.7 Grigliati monostrato a semplice curvatura

4.4 I GRIGLIATI A DOPPIA CURVATURA

Tenuto presente quanto detto al paragrafo che precede, può senz'altro affermarsi che i sistemi reticolari configurati su superfici a doppia curvatura positiva (sinclastiche) o negativa (anticlastiche) sono tra le più interessanti strutture spaziali, capaci di racchiudere grandi spazi con una superficie minima. In particolare quelle in grigliato a semplice e doppio strato, con reticoli a due o tre direzioni, hanno avuto, in questi ultimi anni, una notevole diffusione. Per luci intermedie, intorno ai 20-60 m, esse sono competitive con le strutture intelaiate convenzionali e con gli stessi gusci in cemento armato; per luci superiori diventano poi sempre più interessanti economicamente fino ad offrire, col doppio e pluristrato, la possibilità di superare anche i 200 m di luce, senza alcuna alternativa concorrenziale di altre forme strutturali fig.8.

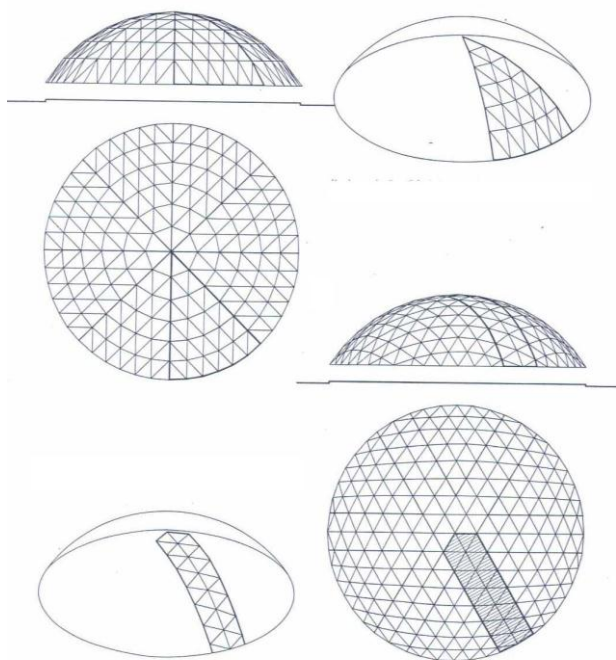


Fig.8.a Sistemi reticolari spaziali a doppia curvatura

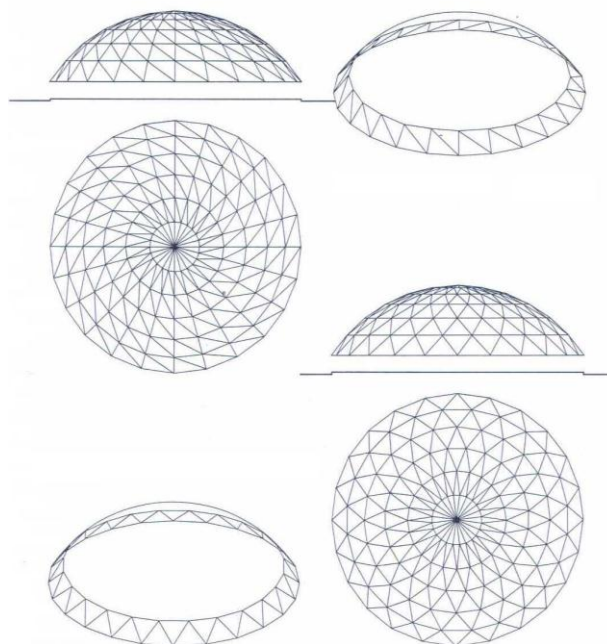


Fig.8.b Sistemi reticolari spaziali a doppia curvatura

Un interessante indirizzo costruttivo è espresso dalle cosiddette cupole geodetiche, il cui studio e il cui sviluppo si deve principalmente al famoso architetto americano B. Fuller.

Una cupola geodetica è in sostanza un grigliato in cui gli elementi dello schema geometrico di partenza giacciono lungo i cerchi massimi di una sfera dando luogo a un reticolo tridirezionale, che include virtualmente triangoli sferici equilateri. Gli elementi che formano la struttura sono in genere rettilinei essendo le corde di archi geodetici: il reticolo risulta pertanto estremamente regolare e porta a una distribuzione sostanzialmente uniforme delle sollecitazioni per tutti gli elementi della cupola. Il comportamento sia spaziale che reticolare del complesso è quindi pressochè perfetto; a questo vantaggio si aggiunge poi quello di consentire una spiccata prefabbricazione legata al fatto che la lunghezza degli elementi componenti è praticamente sempre la stessa, anche per forti luci e schemi complessi.

Nel campo delle strutture spaziali a doppia curvatura è oggi possibile ottenere superfici cosiddette "libere" (non definibili da una funzione geometrica) generate da condizioni di equilibrio e di ottimizzazione della forma. La caratteristica regolarità modulare viene meno; in questi casi si possono avere lunghezze delle aste ed angoli al nodo molto variabili ottenibili, solo attualmente, con processi costruttivi automatici.

La tendenza architettonica moderna e le moderne specifiche normative relative alla durabilità strutturale sono fattori di impulso per l'utilizzo di acciai speciali ed inossidabili nell'ambito delle strutture reticolari spaziali.

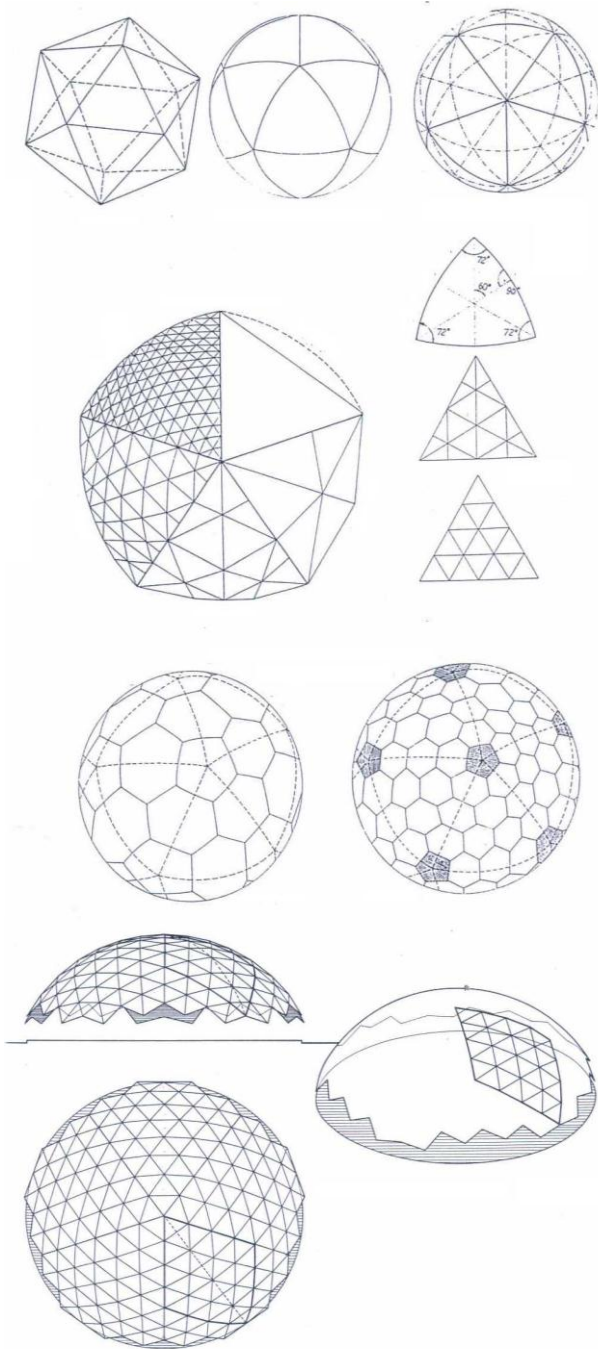


Fig.9 Generazione geometrica di cupola geodetica

5 SISTEMI STRUTTURALI IN PREVALENTE REGIME DI MEMBRANA: LE TENSOSTRUTTURE

L'impiego di materiali che lavorano, essenzialmente in regime di soli sforzi di compressione, associati a schemi strutturali e tipologie costruttive basate sull'effetto stabilizzante della gravità agente su masse strutturali di notevoli dimensioni, individuano una tradizione costruttiva « MASSIVA » o « PESANTE », dove il rapporto tra « peso portante » e « peso portato » è molto maggiore dell'unità, comportando, in senso energetico, un basso rendimento strutturale.

Quanto detto si può schematizzare chiaramente nel seguente modo, definendo:

STRUTTURE PESANTI: $\frac{\text{peso portante}}{\text{peso portato}} \gg 1$

dove:

PESO PORTANTE = peso proprio, permanente o « morto » della struttura

PESO PORTATO = carichi utili o accidentali, portati dalla struttura.

Una notevole riduzione del suddetto rapporto avviene in corrispondenza della seconda rivoluzione industriale: nuovi materiali da costruzione, ed in particolar modo l'acciaio, permettono di associare nuovi schemi costruttivi e tipologie strutturali assai più efficienti.

L'elevato rapporto resistenza-peso del materiale acciaio permette alle costruzioni metalliche di varcare, per prime, la soglia del rapporto unitario tra PESO PORTANTE e PESO PORTATO, considerando, quale carico accidentale di riferimento, una pressione di 1 kN/mq. Gli schemi strutturali, associati al materiale acciaio, permettono alle costruzioni metalliche di ottenere una notevole riduzione dei pesi strutturali (circa dieci volte) rispetto alle strutture in cemento armato.

Le strutture possono reggere i carichi con stati di sollecitazione, nei quali siano predominanti i momenti flettenti associati agli sforzi di taglio, oppure gli sforzi normali. Naturalmente, per le note proprietà generali, è preferibile che siano questi ultimi a prevalere ed, in particolare, che si abbia sforzo positivo ossia di trazione, per non mettere in gioco il pericolo di instabilità dell'equilibrio.

Con la disponibilità di acciai ad alta resistenza e con l'avvento delle funi d'acciaio normale ed inox, è stato possibile associare a queste ultime degli schemi strutturali che permettono di impiegare il materiale al massimo delle proprie capacità di resistenza, instaurando esclusivamente sforzi membranali di trazione. Detti schemi e tipologie strutturali sono perciò chiamati « TENSOSTRUTTURE ».

Ad esse è dovuto principalmente il raggiungimento dell'obiettivo di minimizzazione dei pesi propri delle strutture orizzontali di copertura.

Il peso portante (peso morto) strutturale è ora, orientativamente, di 100 volte minore rispetto a quello delle strutture in c.a. e di 10 volte minore delle convenzionali strutture metalliche. In questo modo si pongono i progettisti davanti a nuove problematiche strutturali, quali la stabilizzazione della copertura contro i problemi di sollevamento prodotti dalla depressione del vento, dall'instabilità aeroelastica, dal flutter, ecc.

Con le tensostrutture è possibile definire una nuova, moderna tradizione costruttiva: le STRUTTURE LEGGERE, dove il rapporto peso portante/peso portato diventa una quantità molto minore dell'unità.

Pertanto diamo la seguente definizione:

STRUTTURE LEGGERE: $\frac{\text{peso portante}}{\text{peso portato}} \ll 1$

Le strutture leggere in generale, e le tensostrutture in particolare, sono diretta conseguenza dello sviluppo scientifico e tecnologico. Le realizzazioni più rappresentative hanno richiesto materiali ad alta resistenza, studi teorici molto raffinati, impiego di elaborazioni elettroniche ecc., disponibili solo da alcuni decenni, anche se l'intuizione della validità degli schemi tensostrutturali risale ai primordi stessi della civiltà.

5.1 METODI DI STABILIZZAZIONE GEOMETRICA PER FUNI SINGOLE

Dall'osservazione del comportamento meccanico dell'elemento strutturale fune illustrato nel precedente paragrafo si può immediatamente dedurre che, per poter usufruire delle sue ottimali caratteristiche portanti per strutture di copertura, è necessario ovviare alla intrinseca ipostaticità geometrica, contenendo gli spostamenti

cinematici rigidi, dannosi per il materiale di copertura, con opportuni metodi di stabilizzazione geometrica.

In funzione dei metodi di stabilizzazione geometrica è possibile definire i sistemi strutturali come segue fig.10:

- 1) Sistemi stabilizzati con l'introduzione di elementi flessionalmente rigidi, quali archi o travi.
- 2) Sistemi stabilizzati per gravità mediante l'introduzione di pesi permanenti sostanzialmente più grandi dei carichi accidentali, in modo da contenere, in particolare modo, le deformazioni causate da carichi asimmetrici.
- 3) Sistemi stabilizzati mediante un ordine o famiglia di cavi secondari, che abbiano il compito di introdurre uno stato di pretensione. La stabilizzazione è ottenuta per mutuo contrasto tra funi portanti o primarie e funi stabilizzanti o secondarie.

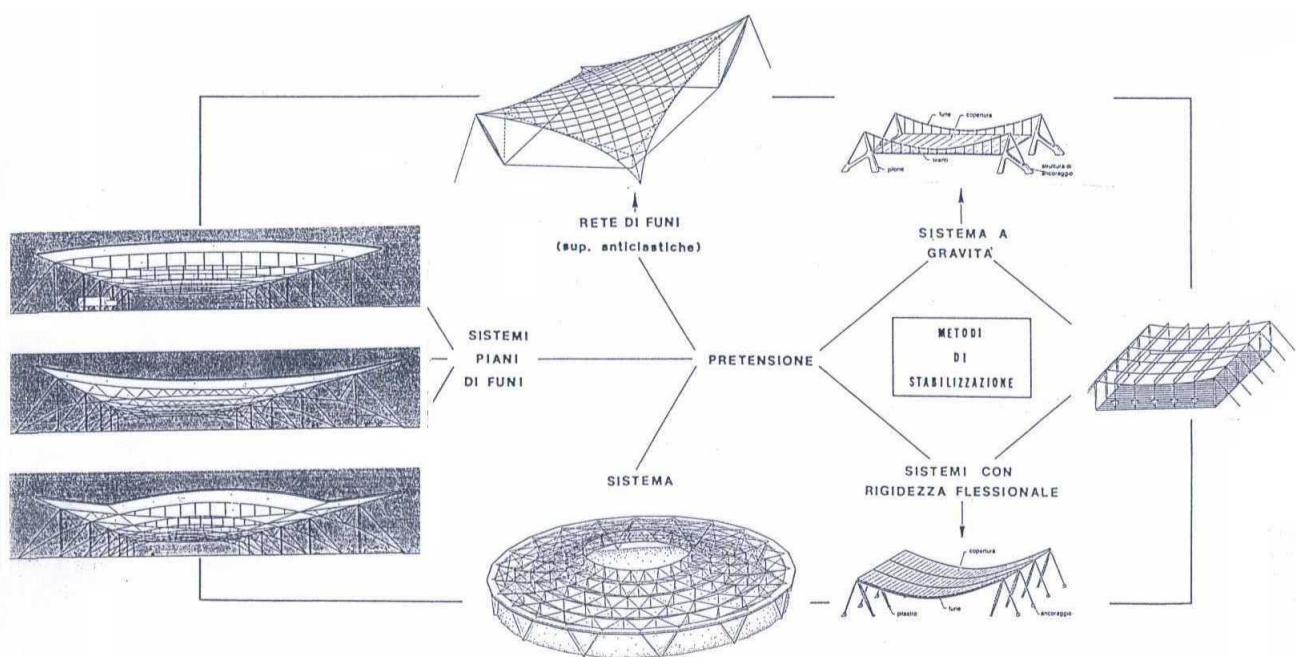
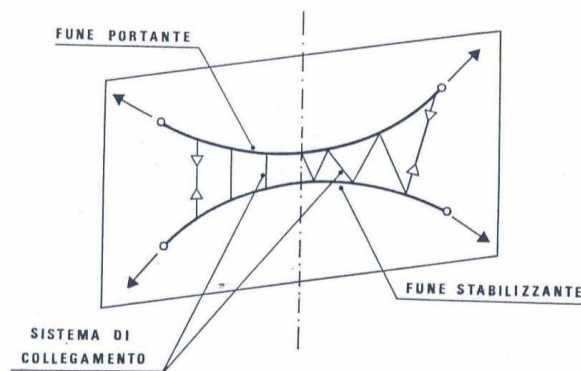


Fig.10 Sistemi tensostrutturali

5.2 METODI DI STABILIZZAZIONE PER SISTEMI PIANI DI FUNI

Il modo più economico, e quindi più usato, per ridurre la notevole deformabilità propria, è quello di introdurre una rigidità artificiale attraverso un'adeguata pretensione (rigidezza geometrica K_g) iniziale. In genere la pretensione si realizza introducendo, in aggiunta alle funi portanti con curvatura rivolta verso l'alto, altre funi dette « stabilizzanti », o « di tensione » a curvatura rivolta verso il basso. La pretensione nasce dal mutuo contrasto di questi due ordini di funi.

Nei sistemi piani le funi, portante e stabilizzante, sono poste nello stesso piano verticale che coincide con il piano dei carichi (tensostrutture piane o travi in fune) fig.11.



L'irrigidimento del sistema, ottenuto per mutuo contrasto tra le funi a curvatura contrapposta, è realizzato tramite elementi verticali paralleli tra loro o con collegamenti diagonali (sistema Jawerth).

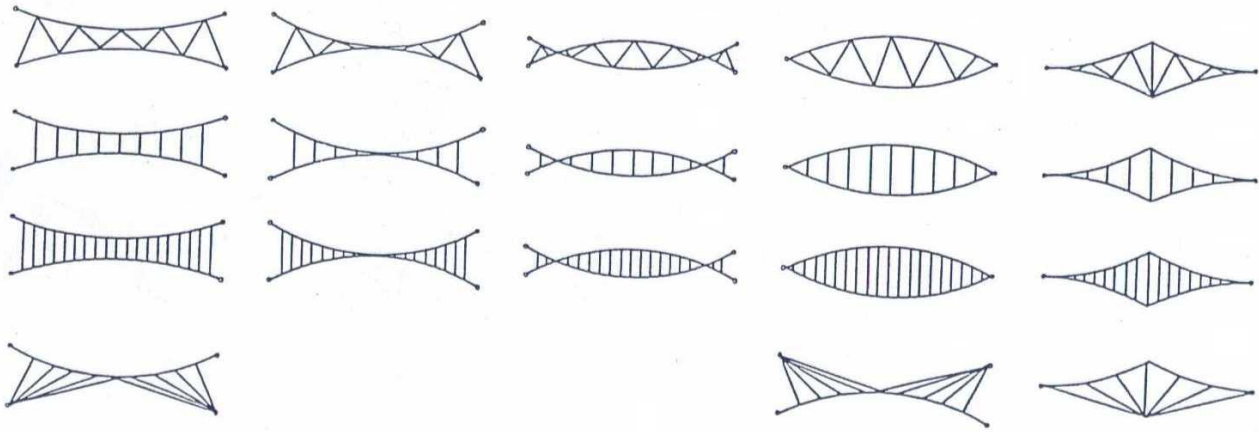


Fig.11 Tensosttrutture piane

I sistemi di stabilizzazione piani (travi di funi) esaminati fino ad ora, opportunamente modificati per le esigenze che via via si incontrano nella progettazione delle tensosttrutture, danno origine ad una serie di soluzioni

valide, sia dal punto di vista della stabilità che da quello estetico. Alcune di queste possono riassumersi nelle fig. 12.a e 12.b, nelle quali sono illustrate le soluzioni più rappresentative.

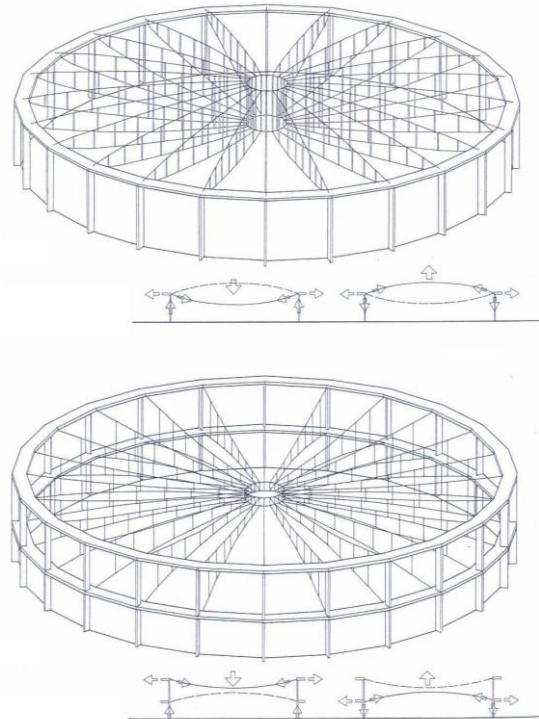
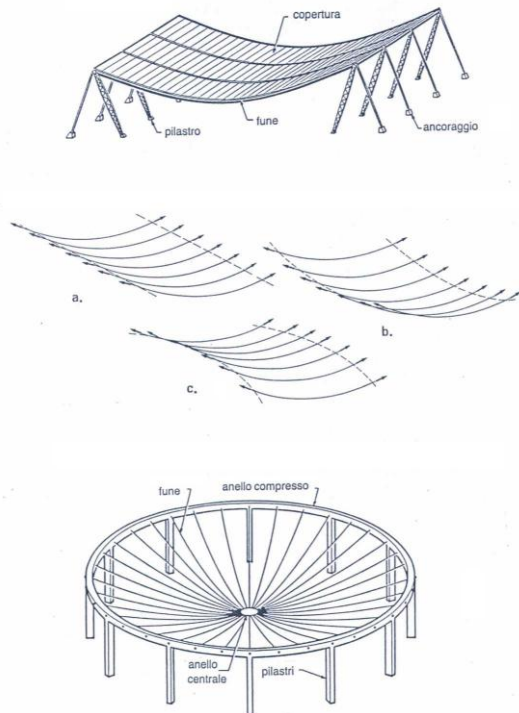


Fig.12.a Schemi costruttivi realizzati con travi di funi

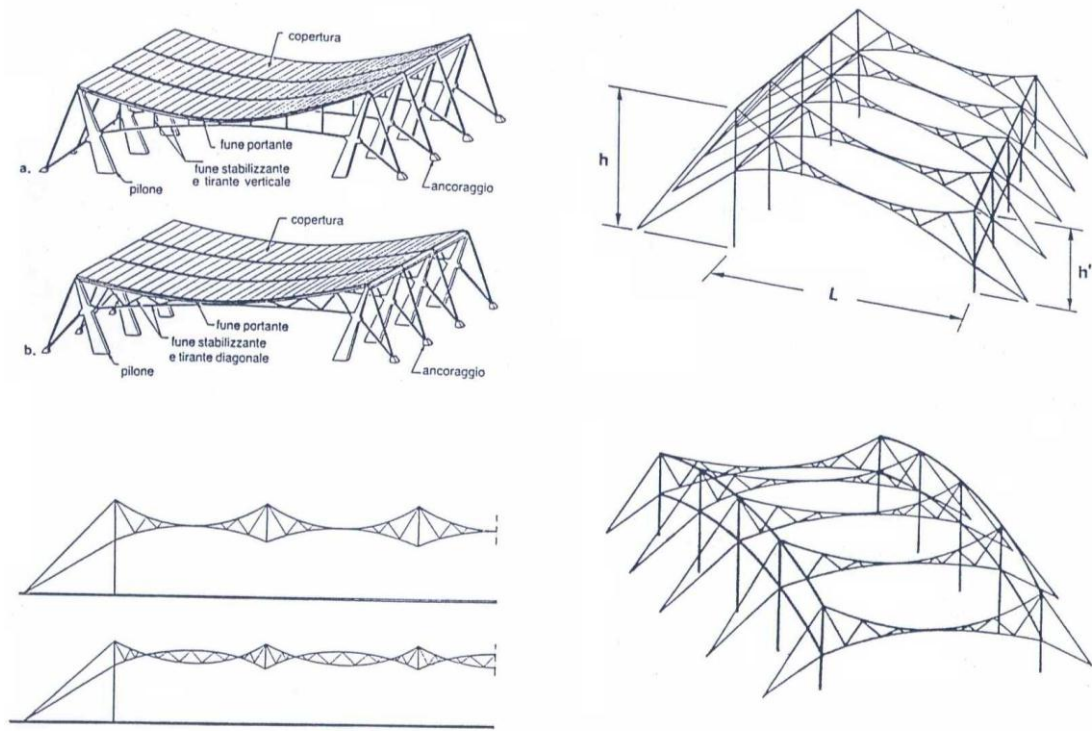


Fig.12.b Schemi costruttivi realizzati con travi di funi

5.3 SISTEMI SPAZIALI

Il sistema spaziale di stabilizzazione è una diretta conseguenza di quello piano. Le funi portanti e le tenditrici non sono più disposte sullo stesso piano, ma in piani verticali distinti, il più delle volte intersecantisi ad angolo retto fig.13.

Per meglio comprendere la meccanica strutturale delle reti di funi si prenda in esame la figura: un carico concentrato su un cavo sospeso provoca una deformazione localizzata nel punto di applicazione della forza stessa; un insieme di cavi trasversali stabilizza il cavo portante riducendo l'effetto della deformazione.

Quanto più si aumenta il numero dei cavi di stabilizzazione tanto più si ha una valida opposizione alla deformazione. Nel sistema a cui si perviene tutti i

cavi appartenenti alle due famiglie partecipano al meccanismo resistente contro le deformazioni provocate dai carichi applicati.

La stabilità della copertura è, in altri termini, subordinata alla condizione che, in ogni suo punto, i cavi passanti per esso siano a curvature opposte e si scambino una mutua azione per effetto della pretensione.

La caratteristica fondamentale, che accomuna tutte le tipologie delle tensostrutture con stabilizzazione a rete di cavi, è dunque la doppia curvatura negativa. Una precisa tipologia non è nettamente identificabile, come nel caso dei sistemi piani, in quanto, per le reti, la classificazione non può essere dissociata dalle sue condizioni geometriche al contorno e quindi non può essere dissociata dalle strutture di bordo fig.14.

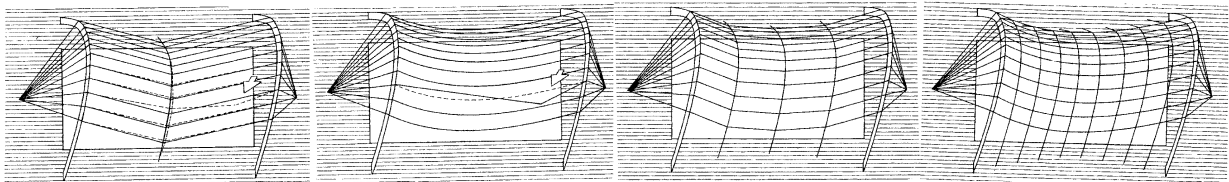


Fig.13 Sistema di stabilizzazione spaziale monostrato

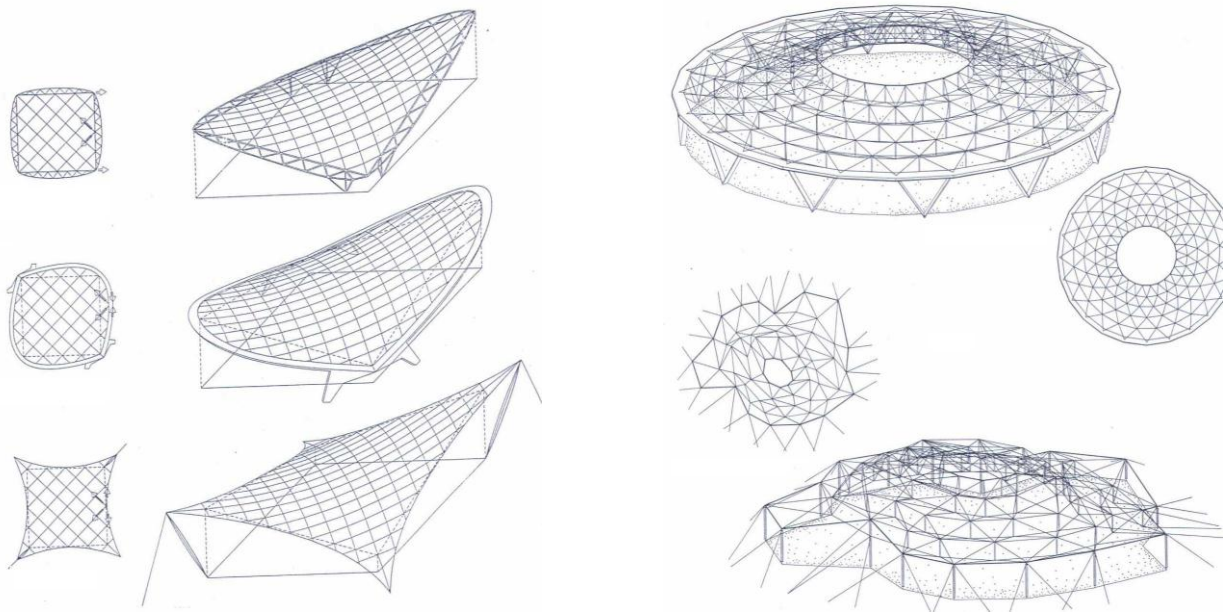


Fig.14 Sistemi di ancoraggio di rete di funi

5.4 TENSOSTRUTTURE A MEMBRANA

Supponendo che la rete di funi di copertura possa essere talmente serrata da poterla confrontare alla trama di un tessuto, in questo caso è possibile parlare di funzionamento membranale continuo del sistema strutturale di copertura.

Se il materiale fisicamente continuo è impermeabile e l'entità degli sforzi è compatibile con le caratteristiche proprie di resistenza è possibile creare delle tipologie costruttive nelle quali la struttura portante ed il materiale di copertura siano costituiti da una sola entità. Queste tipologie vanno sotto il nome comune di «strutture a tenda» o «coperture a vela» che, più propriamente noi definiremo «strutture membranali presollecitate».

Per quanto riguarda la geometria strutturale quello che è stato detto per le tensostrutture a rete è valido anche per le membrane di copertura.

Molti tipi di materiali sintetici quali il poliestere ricoperto di PVC e la fibra di vetro ricoperta di P.T.F.E, il Kevlar, i tessuti di fibre di carbonio sono stati usati frequentemente per la realizzazione di membrane, in tutto il mondo. Le membrane costituite da materiale sintetico possono essere usate strutturalmente solo per costruzioni di modeste dimensioni.

Nel caso di luci libere che determinino sollecitazioni non sopportabili da questi materiali, è necessario ridurre lo stato tensionale della membrana introducendo un ente resistente con superiore affidabilità quali una rete di funi o nastri di acciaio. In questo caso il materiale della membrana lavora come struttura secondaria e assolve, contemporaneamente, al compito di materiale di copertura.

Per costruzioni di tipo permanente e per notevoli luci libere, negli ultimi anni sono state realizzate opere interessanti che utilizzano membrane metalliche (acciaio, acciaio inox, alluminio). Tensostrutture a membrana metallica presollecitata sono state messe in opera principalmente in USA, URSS e Germania fig.15.

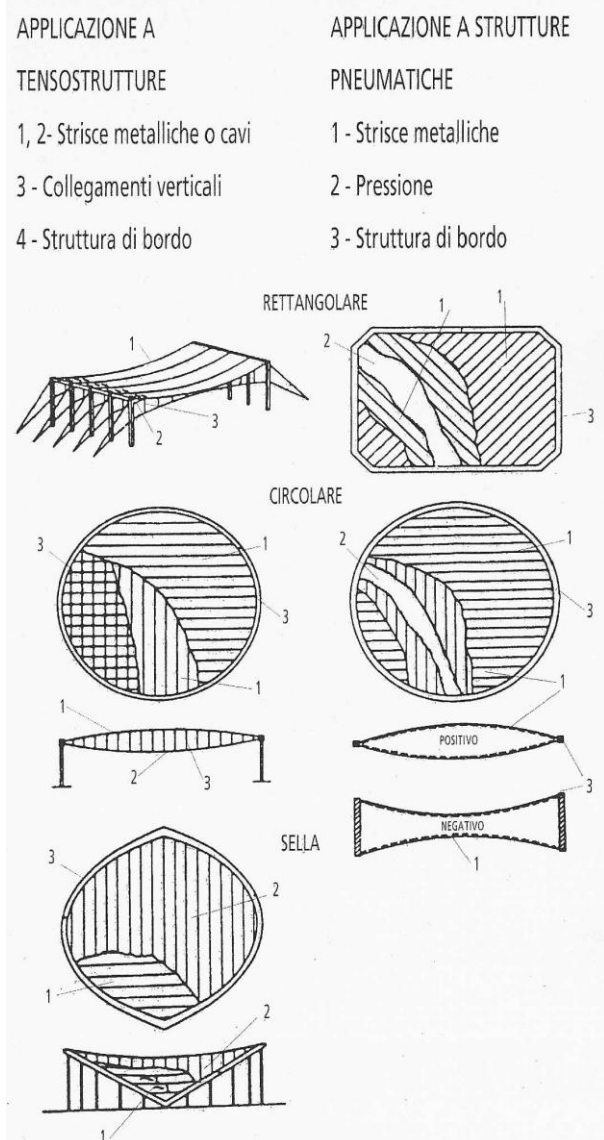


Fig.15 Sistema membranale realizzato con coils in acciaio inox

6 SOME WIDE SPAN ENCLOSURES

Due to the lack of space, only some design&analysis illustrations of wide span enclosures, where the author was directly involved, will be included in the present paper with the intention to transmit some experiences that today may be part of the knowledge base.

7 BIBLIOGRAFIA

- P. Matildi, C. Foti, A. Sollazzo “Sistemi reticolari spaziali”, vol. V , Italsider, 1971.
- M. Majowiecki “Tensostrutture: progetto e verifica” , CREA, 1995.
- H. Engel, Tragsysteme, Deutsche Verlags-Anstalt, 1967.