

Lleuger i ampli. Aspectes sobre el disseny i la construcció d'àmplies estructures lleugeres

Jürgen W. Henniscke

Enginyer. Professor d'Estructures Lleugeres de la Universitat de Stuttgart.

Ingeniero. Profesor de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart.

Engineer. Professor of Soft Structures at the University of Stuttgart.

1. El principi de construcció lleugera

La situació actual de la construcció es caracteritza per una gran especialització. La complexitat d'objectius de la construcció obliga a la divisió del treball, a la qual cosa s'oposa la idea que l'art de la construcció és molt més que la simple suma de treballs individuals. Ove Arup, un dels grans enginyers de la nostra època, ho ha expressat així: «Tots els fets i totes les possibilitats que influeixen sobre un projecte cal que hagin estat entesos i assimilats abans que el projecte es defineixi. El tot ha de ser més important que qualsevol de les seves parts.» Com a conseqüència sorgeix una sola cosa: la feina en equip. És a dir, el grup com a mestre d'obres en el sentit clàssic és necessari per a harmonitzar tots els aspectes d'una obra en construcció: creació de la forma i la construcció tècnica, funcionalitat i rendibilitat pràctica, el medi ambient en la natura i els criteris estètics. Art de construir com a «harmonia perfecta dels mitjans amb relació al fi» (Henry Van der Velde).

Si és cert que l'home té una capacitat genèticament determinada de percepció i de sensació, i si és veritat que «el saber com a condició per a la comprensió del món formal arquitectònic» (Curt Siegel) és indispensable, aleshores l'estètica en l'arquitectura ja no és cap plantejament per a estetes i artistes purs, sinó que ha de ser inclosa en l'àmbit racional de les realitats tècniques. La màxima de «rendir més amb menys», en la qual es resumeixen les idees últimes d'una arquitectura amb estructures lleugeres, pren així una dimensió totalment nova i extensa que la converteix en el principi de la construcció lleugera. Lleuger és un objecte que pesa poc i que té, per tant, poca massa. La massa d'un objecte és equivalent a la quantitat de material que s'hi inclou.

Cada objecte que existeix materialment està exposat a forces externes i internes i té la capacitat d'acceptar aquestes exigències o de transmetre-les. Així, cada objecte és, en el sentit tècnic més ampli, una construcció.

Si comparem objectes diferents en situació de transmetre forces iguals sobre distàncies iguals, el que aconsegueix aquest treball amb la massa mínima és més lleuger que els altres objectes. Els objectes que poden transmetre forces amb una massa més petita es denominen construccions lleugeres.

1.1. Construccions lleugeres a la natura

Un ésser viu que, amb una massa menor o una energia menor, suporta càrregues grosses o exerceix forces majors té avantatge sobre els altres.

Els objectes de la natura viva poden tenir mides i masses molt diferents. Aconsegueixen unes funcions diferents i posseeixen diverses possibilitats de moviment. Versatilitat i mobilitat amb un alt rendiment constructiu són els criteris que caracteritzen el principi de construcció lleugera a la natura viva (figs. 1 i 2).

La construcció lleugera a la natura viva té una forma bàsica prefixada constructivament altament productiva: la cèl·lula. Des de la cèl·lula com a ens individual fins als complexos sistemes de les plantes i dels animals, aquest és l'element constructiu de tots els éssers vius. Les cèl·lules poden ser toves, romandre toves, però també poden adoptar tots els estats de l'enduriment.

Una cèl·lula tova és una estructura pneumàtica: un sistema constructiu a partir d'una coberta (membrana) flexible sotmesa a tracció i farcida per un fluid intern (protoplasma) que exerceix una pressió interna sobre la membrana (fig. 3). Tots els objectes de la natura viva són estructures pneumàtiques o en consten. Les estructures pneumàtiques s'acomoden a unes altres estructures pneumàtiques; s'emboliquen amb estructures pneumàtiques, reben pressions internes i provoquen graus de tensió variables a través dels farciments (gasosos, líquids, granulats) i de les membranes. La diversitat de formes i construccions dels éssers vius descansa sobre aquest únic sistema.

Un dels «invents» més importants de la natura viva, o fins i tot de la natura no viva, és la fibra. Es tracta d'un element allargat capaç de ser sotmès a demandes de tracció. Instal·lada a membranes cel·lulars o col·locada entre cèl·lules, en línia o en forma de xarxa, és, juntament amb les substàncies que es poden sotmetre a demandes de pressió, l'element de construcció decisiu a la natura viva per al modelat i l'augment del rendiment en el sentit del principi de construcció lleugera.

Les muntanyes, sorgides per mitjà de plegaments de l'escorça terrestre o com a fruit d'erupcions volcàniques, assoleixen unes mides i formes determinades que no són arbitràries. Les influències externes com ara l'erosió per l'aigua i pel vent o els sismes hi originen canvis de forma. Els astres formen sistemes d'equilibri gegantins. Com més gros es faci un astre, més esfèric s'ha de fer. Si ultrapassa la seva mida límit i la seva matèria ja no resisteix la pressió de la gravitació, explota i apareix un forat negre. En els àtoms actuen unes forces internes molt potents a les quals només en casos excepcionals o amb violència es pot fer perdre l'equilibri. Amb la seva massa escassa, els àtoms constitueixen el límit inferior de la lleugeresa.

També els animals tenen una tècnica. Utilitzen materials de la natura no viva i de la natura morta, com ara la terra i la fusta. Produeixen materials i elements de construcció propis, com ara cordes altament consistents i fibres molt resistents. Formen construccions de captura (teranyines), embassaments (dics de castor), cases (caus, nius) i ciutats (coralls, tèrmits, vespes, abelles) l'eficàcia constructiva i funcional dels quals, segons el principi de la construcció lleugera, pot assolir uns valors molt alts i competir totalment amb els productes humans.

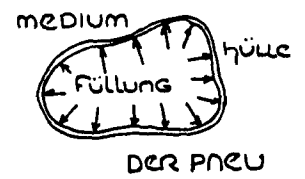
1.2. Construcció lleugera en la tècnica

Qualsevol construcció optimitzada té dos components: lleugeresa i economia. Els criteris més importants als països industrialitzats són l'ús del material i l'energia per a la producció i el transport, com també els costos salarials. L'optimització en el camp tècnic està orientada, preferentment i a curt termini, cap a la reducció de les despeses. Sovint s'hi accepten masses superiors si el transport és més barat o els costos salarials són més baixos.

Per als avions, la construcció lleugera és una necessitat per motius de funció. Pel que fa als automòbils o els vagons de tramvia, la situació és similar. Aquí ja no són els motius funcionals tan prioritaris per a una reducció dels costos de producció. Això afecta també la construcció naval i d'embarcacions. En l'esforç per la construcció lleugera, es tracta de mantenir tan baix com es pugui el pes d'una construcció amb capacitat portant invariable o augmentada mitjançant una utilització extensiva de totes les possibilitats creatives, estàtiques, constructives i dependents del material.



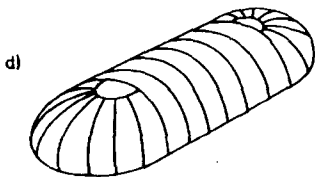
1



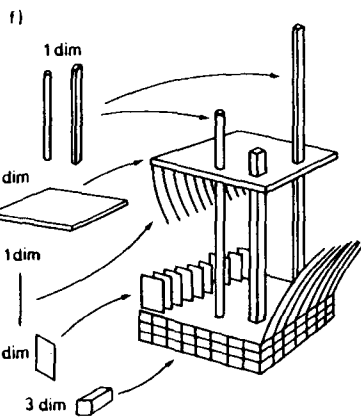
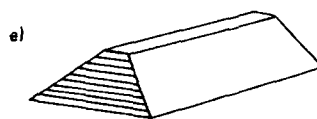
3



2



4



La construcció lleugera és un requisit per a les grans extensions i altures. Tanmateix, el fet de construir d'una manera realment lleugera és encara una virtut relativament poc cultivada en la construcció, potser perquè falten condicions que hi obliguin funcionalment o constructiva. Tot i que potser el *quid* està en la presència d'un raonament simple: només és «bo» i de «consistència» allò que està construït pesantment i en massa (almenys que ho sembla). La consciència d'haver de construir sempre per a segles, o almenys per a les properes generacions, està encara massa arrelada. Fixant l'esguard en un període d'utilització tan llarg com es pugui o —cosa que gairebé sempre comporta unes conseqüències pitjors— en rendibilitats més altes i ràpides, el nostre entorn continua construint-se sense escrúpols ni miraments.

La construcció lleugera no és tampoc cap panacea. Però podria ser un mitjà d'ajut en el penós camí cap al millorament i el canvi. Amb això hom no implica pas les tendències com ara, per exemple, de l'àrea de la construcció convencional d'acer o de les peces prefabricades. En aquestes àrees, l'objectiu prioritari és la reducció de la despesa de material per raons econòmiques. No s'implica tampoc aquí l'anomenada arquitectura de «fer servir i llençar». En vista de la reducció perillosament ràpida de les reserves naturals del món, no ens podem permetre de cap de les maneres una insensata i forassenyada despesa econòmica.

Darrera de tot el que és construït per homes i per als homes, hi ha la demanda feta a l'arquitectura de procurar un medi ambient digne de l'home i de destruir tan poca natura com es pugui. Amb una insistència constantment creixent es formulen les exigències següents: flexibilitat d'adaptació, mobilitat, construcció a data fixa, versatilitat, reciclabilitat —per esmentar tan sols algunes de les exigències més importants. Cap d'aquestes pretensions no és nova, però les construccions convencionals ofereixen pocs punts de partença per a assolir-les. Amb les construccions lleugeres, les possibilitats són substancialment més bones. Un camí entre molts altres de susceptibles de ser seguits. Una autèntica alternativa a les construccions convencionals, amb una gran abundància de noves possibilitats constructives i una varietat de formes infinitament àmplia.

1.3. Forma-força-massa

Cada objecte és una construcció. Té una forma, pot rebre forces i consta de material. La forma és integrada per la figura externa i l'estructura interna; en molts casos, amb prou feines és mesurable geomètricament. La capacitat de rebre forces es comprèn amb l'experimentació mitjançant el càlcul. El material té una massa que sobre la terra és igual al pes propi; aquesta massa pot ésser determinada amb una balança en la majoria dels casos.

Amb aquest sentit general del concepte de construcció, ja no importa si un objecte pertany a la natura viva o a la no viva, o si procedeix de la tècnica humana, i si té agregada una «missió» constructiva o de suport de pes.

Un objecte sorgeix amb tots els seus components en un procés: autoafirmatiu o per mitjà de la voluntat creadora humana, depenent de lleis físiques, químiques o —quan és un ésser viu— genètiques. Per tant, una construcció no és solament un objecte nu, sinó que sempre mostra al mateix temps un procés i el seu resultat. Totes dues coses han de ser considerades en el seu conjunt.

Això és vàlid, sobretot, quan un objecte és compost d'elements similars o diferents, en una barreja arbitrària i amb unes proporcions arbitràries. En un objecte així la suma de les seves parts no és fàcil. Cada obra de construcció —i encara molt més cada ésser viu— és una unitat complexa. El procés de formació i l'aspecte formal constitueixen una unitat. En l'anàlisi científica, aquesta unitat se separa necessàriament per a una simplificació i, de vegades, no es té cura de certs aspectes per tal de trobar-hi almenys una via d'accés. El pas posterior és decisiu: afegir al tot els coneixements adquirits analíticament en la síntesi.

De la mateixa manera generalitzant com s'entén el concepte de construcció, es pot esdevenir també la divisió dels diversos tipus de construcció. Immediatament després, la divisió de com percebem els objectes: durs o tous; tot seguit, de com els veiem, és a dir, segons la forma: unidimensionals, bidimensionals, tridimensionals, o bé lineals, superficials o corporis; en darrer lloc, de quina manera els objectes són sotmesos a forces: arrossegats, pressionats, corbats, desplaçats o retorçats, o bé responsables de la tracció, la pressió, la inflexió, l'empenta o la torsió (fig. 4).

Les forces poden actuar sobre una construcció des de fora (persones, vehicles, neu, vent) i des de dins (pes

propi, temperatura i humitat) i poden ser transmeses per la mateixa construcció, en la qual s'esdevé un desgast a causa d'aquestes mateixes càrregues (habitualment exterioritzat per mitjà de les tensions en el material). Els materials poden ser cossos sòlids, líquids o gasosos en combinació i densitat diferents. De vegades n'hi ha uns d'intermedis difícilment definibles com ara les forces magnètiques, les centrífugues, la força de gravetat o la irradiació d'energia.

La quantitat de formes possibles és interminable, les forces operants són normalment conegudes, els materials de què disposem estan limitats en la seva quantitat. Si ara volem elevar la capacitat portadora d'una construcció o reduir les despeses de material —per a una missió constructiva determinada i per a unes forces donades—, el coneixement de les relacions entre la forma i la massa de la construcció i la seva capacitat de transmissió de forces és d'un significat decisiu. Forma, força i massa estan en una interdependència directa i determinen conjuntament la productivitat o l'eficiència de la construcció.

2. Les grans estructures lleugeres: formes i construccions

Les estructures lleugeres d'una gran amplària s'han convertit, en les dues darreres dècades, en un component important de l'arquitectura contemporània a tot el món.

No obstant això, les construccions lleugeres han romàs fins ara com uns objectes exòtics en el paisatge de la construcció. Ni tan sols no pertanyen al repertori d'arquitectes i enginyers. De vegades, àdhuc tenim la impressió que només hom les recorda quan busca alguna cosa especial: una atracció que elevi la imatge i generi prestigi; alguna cosa que cridi l'atenció amb fins publicitaris i que inciti a la compra; una feblesa de l'arquitectura.

D'altra banda, cada any es basteixen per tot el món centenars de construccions lleugeres, des d'una vela petita per a jardí fins a un gran envelat per a un estadi. Però això no ha d'ocultar pas el fet que la majoria del que es construeix només és una còpia més o menys deficient de models que són molt millors. D'obres de construcció originals i reeixides n'hi ha poques.

Els diferents tipus de construcció d'estructures lleugeres ofereixen una varietat de formes il·limitada. Es

poden construir en les mides més diverses i per als fins i les utilitats més variats. Avui dia s'extreuen tan sols unes quantes de les múltiples possibilitats de la seva utilització.

L'estat actual de la tècnica en el camp de les estructures lleugeres es pot resumir en poques paraules.

Els problemes bàsics de la determinació de la forma, del tall, del càlcul i del comportament de l'estructura estan resolts. Hem respost a les preguntes essencials del procés constructiu, de les primeres matèries i dels materials, de la producció i del muntatge. Sabem com hem de construir-les, però també sabem que encara les podríem millorar en molts aspectes. En coneixem les propietats formals i constructives, els seus avantatges i les seves febleses.

En aquest ventall de possibilitats hi ha també el gran perill de considerar que «tot és construïble». L'arquitectura és més que un potencial tècnic. La cabana senzilla amb branques corbades també és una construcció òptima perquè ofereix al seu habitant allò que és la seva necessitat primitiva: protecció contra el temps, seguretat, un lloc per a dormir-hi —l'home que l'ha construïda està en harmonia amb la natura abans que ser-ne l'opositor. Si una arquitectura amb estructures lleugeres pogués contribuir una mica a aquesta visió de la qüestió, s'hauria assolit un gran objectiu.

2.1. Formes i construccions

Una estructura portant és una construcció que consta d'una o de diverses superfícies i dels seus suports respectius.

Aquestes superfícies poden ser corbades en forma de sella de muntar o bé en forma de cúpula, o també poden ser de forma plana. Amb relació a la seva dimensió, tenen sempre una alçada molt escassa. Poden ser superfícies tancades o construïdes en una estructura oberta de malla.

Segons el tipus de construcció, a la superfície portant es manté en la seva forma per mitjà del tesament, de la rigidesa del material o del pes. En carregar-la de pes, només queda sotmesa a tracció o, principalment, a pressió i flexió.

Els punts de sosteniment poden ser rectes o corbats, puntuals (per exemple, un pal) o en forma de línia (per exemple, bigues, arcs, cables) i poden estar situats al caire o bé a l'interior de la superfície portant. En carregar-les, hom les sotmet a tracció, pressió o flexió.

Una estructura és lleugera perquè té poc pes propi en relació amb la seva amplitud d'extensió i a la seva capacitat portadora. És a dir, és una construcció pobra en massa i requereix una despesa minsa en material.

Una estructura és lleugera quan, segons la dependència entre el pes propi com a magnitud específica de la despesa en material per unitat de superfícies, permet la relació següent: com més gran és l'amplada d'una construcció, menor cal que sigui el seu pes.

Per a una comprensió general, sembla tenir sentit d'explicar en aquest moment, i en poques paraules, els elements i les característiques dels diferents tipus de construcció de les estructures lleugeres.

2.2. Tendes i xarxes

Les *membranes pre-tesades* són tendes de campanya i construccions del tipus tenda. Una membrana o pel·lícula fina, la majoria de vegades corbada en forma de sella de muntar, s'estabilitza per mitjà del tesament produït mecànicament. La membrana tan sols se sotmet a tracció —entre totes les càrregues exteriors. Aquestes membranes gairebé sempre tenen la típica forma de tenda en punxa (fig. 5); però també poden estar repenjades en arcs (fig. 6) o tenir una forma corbada a manera d'esfera. A més a més, n'existeixen uns altres tipus que consisteixen en membranes planes (tendals de circ, tendes de campanya, paradetes ambulants en les quals el pre-tesament de la membrana té un paper menys important).

Xarxes pre-tesades de cable o corda. En general, les xarxes de malla homogènia són de punt quadrat (fig. 7) i tenen normalment, per raó del seu muntatge constructiu, un pes més gran que les membranes; són apropiades, sobretot, per a extensions o obres de construcció més grans, com ara les cobertes de pavellons esportius.

Les *xarxes especials* s'estabilitzen també mitjançant el tesament tot i que també són possibles com a estructures penjants o estabilitzades pel seu pes. Les cordes de la xarxa configuren superfícies planes o parcialment corbades que descriuen cossos diferents com, per exemple, piràmides, daus, prismes rectangulars i uns altres políedres —tot dependent en cada cas de la forma de la malla. S'han aplicat a parcs infantils.

Estructures penjants (figs. 8 i 9). Les estructures penjants són construccions que consten de cordes o d'uns altres elements de tracció, com ara cadenes o va-

retes, i s'estabilitzen gràcies al seu pes, a càrregues o a elements rígids complementaris.

2.3. Tendes i xarxes de corda

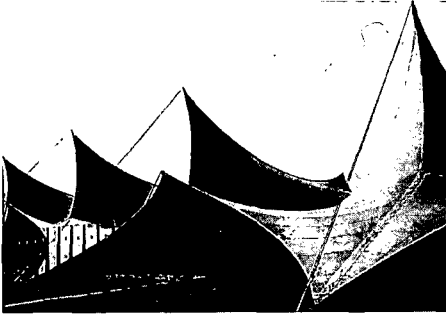
Les tendes pertanyen a les construccions més primitives fetes per l'home. En totes les èpoques de la història s'ha fet servir la tenda com a habitatge en les formes i mides més diverses.

La tenda circular, recolzada sobre barres de fusta, és un dels tipus de tenda més antics. Unes altres classes de tenda típica són la vela, la tenda de gepa i, com a variació, el para-sol i el paraigua. La cabana d'indi nord-americana, les tendes circulars perses, turques i centroeuropees dels segles XII al XVIII, les tendes dels nòmades àrabs, nord-africans (fig. 10) i asiàtics, són exemples d'una optimització de formes i construccions, dels seus elements i de l'equipament de les tendes, que ha durat molts de segles.

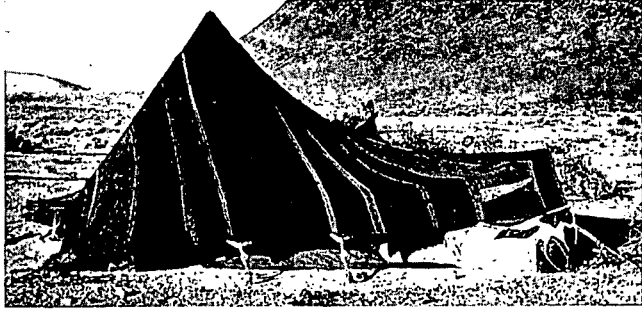
La construcció moderna de tendes ha partit d'aquestes tradicions i descansa sobre les mateixes bases i els mateixos detalls formals i constructius. Així, doncs, era conseqüent i necessari activar el desenvolupament de la construcció de tendes, mitjançant la investigació dels mètodes tradicionals i dels materials històrics de l'artesanía, per tal de no deixar caure en l'oblit les pràctiques antigues i fer-les útils per a la praxi actual de la construcció. La construcció de xarxes de corda consten de dos elements bàsics: la superfície portant, responsable de la tracció, i el pal —sotmès a sol·licitacions de pressió— com a suport. La tela teixida de manera compacta s'ha traslladat en unes dimensions més grans a la xarxa de malla poc atapeïda i nuada amb cordes.

Al costat dels grans sostres de xarxa de corda hi ha en la tècnica força exemples de xarxes coneguts a tot el món, des de tota mena de xarxes de pesca i de protecció fins a la tela metàl·lica i la raqueta de tennis.

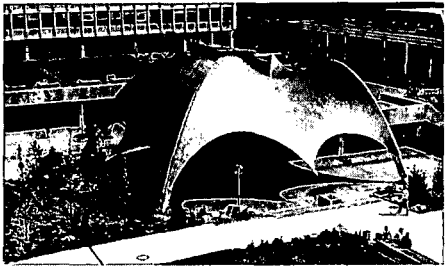
Les teles i les xarxes no poden estar recolzades directament en un punt a causa de la seva estructura material i la distribució de la tensió en l'estructura portant. Aquests punts de tensió es poden solucionar amb un o uns quants llaços de corda, solcs en canal i arestes reforçades amb corda, anells d'acer amb bombaments i suports ramificats de tipus arbre. També els caires de la superfície portant cal que estiguin agafats amb cordes per tal de rebre les tensions de la membrana i dividir-les entre el pal i la subjecció.



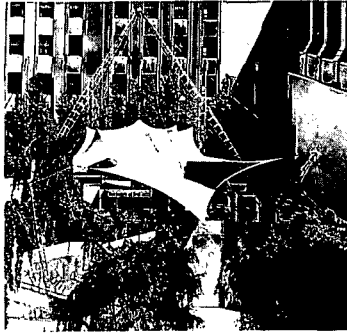
5



10



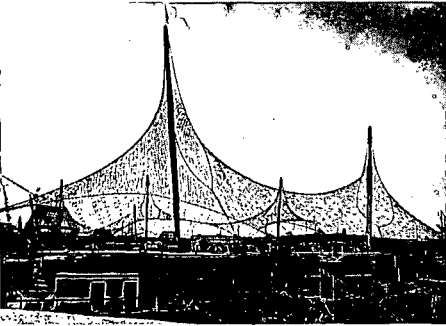
6



11



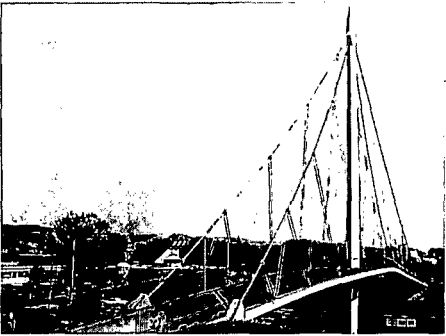
12



7



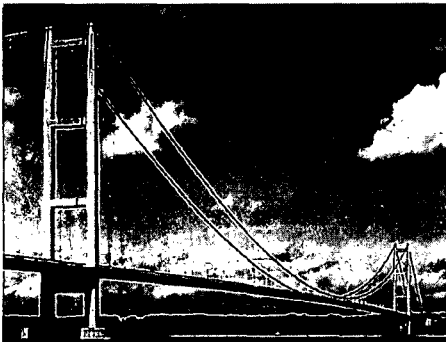
13



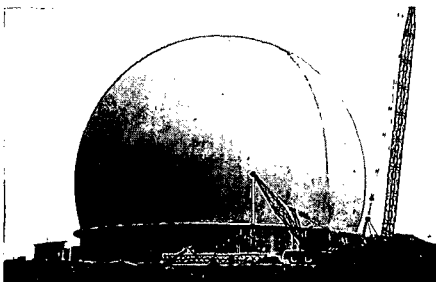
8



14



9



15

Les tendes i les xarxes de corda poden tenir alguns graus de transparència. Els teixits de fibres naturals i sintètiques poden ser de colors o es poden pintar. Les xarxes es poden cobrir amb aquests teixits o amb vidre, amb matèria sintètica, amb fusta o amb planxes combinant-ho amb unes altres mesures i muntatges per conservar l'escalfor i el so.

Cada any es cobreixen de dos-cents a tres-cents milions de metres quadrats de superfície terrestre amb teixits o xarxes dels tipus més diversos, estacionaris o temporals, perdurables o de vida curta, fixos, transportables o transformables. Les funcions i les utilitats comprenen des de sales d'exposicions, naus industrials i per a magatzem, tot passant per hivernacles, col·legis, instituts universitaris, grans magatzems i zones comercials i cobertes per al lleure i l'esport, fins a colònies i ciutats senceres, allotjaments per a protecció contra catàstrofes i cases unifamiliars autàrquiques (figs. 11 a 14). Si el concepte de «tenda» ja no s'ajusta tan sovint a la idea original, en tot cas aquestes construccions descansen bàsicament sobre els principis de forma i construcció de les tendes i les xarxes de corda.

2.4. Membranes o estructures pneumàtiques

Una fina membrana corbada, gairebé sempre en forma de cúpula, s'estabilitza amb la sobrepressió o amb la depressió d'un mitjà a través del qual sorgeix la tensió a la membrana. La membrana només és sol·licitada a tracció entre totes les càrregues exteriors. Aquest mitjà és, en la majoria dels casos, l'aire. Encara que també poden ser-ho unes altres gasos, o l'aigua i els líquids de tota mena. Les construccions de membranes pneumàtiques generalment tenen la típica forma de bombolla (fig. 15) o la forma cilíndrica i es poden variar i combinar de múltiples maneres.

Les construccions de membrana pneumàtica són, segurament, les més lleugeres i toleren unes extensions màximes. Especialment en les construccions hidràuliques, les estructures pneumàtiques s'apliquen com a recipients de contenció i com a discs.

Les estructures pneumàtiques són unes construccions antiquíssimes de l'ésser humà. Odres confeccionats amb cuir animal i salvavides de natació en són encara avui exemples comuns. El somni de volar es va realitzar per primera vegada gràcies a un globus de paper. Sense la invenció del pneumàtic de goma ple d'aire, l'automòbil seria avui impensable. Des de la bom-

bolla de xiclet fins a la pilota de futbol, des del bot pneumàtic fins al globus aerostàtic publicitari, des de la bossa d'aire de càmping fins al sac de sorra per a catàstrofes, des de la bossa de plàstic per a peixos daurats fins a la bossa precintada de taronges: les estructures pneumàtiques són una cosa molt quotidiana. Es poden menjar i s'hi pot jugar, poden nedar i volar —sempre hi ha una coberta exterior tibada a causa d'un farciment interior.

El desenvolupament de les estructures pneumàtiques com a construccions ha estat condicionat per la capacitat tècnica de fer els teixits tèxtils hermètics amb adhesius de cautxú i amb materials sintètics.

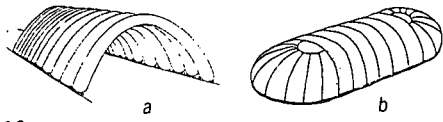
A les estructures pneumàtiques en la construcció sobre terra, una membrana recobreix un espai tancat en el qual, per mitjà de ventiladors, domina una sobrepressió tan insignificantment superior a la pressió d'aire normal, que quasi no es pot percebre (fig. 16). L'interior de la nau és accessible a homes i mercaderies a través de rescloses.

Quan es cobreixen unes grans extensions sense cap suport, amb cobertes grans que són al mateix temps protecció contra els agents atmosfèrics i cobertes climàtiques, la membrana cal que sigui reforçada amb xarxes de corda de malla folgada. Algunes formes especials de construccions pneumàtiques són coixins plens d'aire i tubs (fig. 17) que, bé aïlladament o bé com a complements, poden servir com a paret o coberta de nau.

A causa de la seva massa escassa i d'un senzill ancoratge constructiu, les estructures pneumàtiques són especialment apropiades per a construccions transportables i mòbils. Això implica també que les estructures pneumàtiques, tot i que poden ser construccions de llarga durada, la demanda de les quals desapareix després d'un quant temps d'ús, poden ser eliminades comparativament amb poques despeses i sense grans residus. Fins i tot poden ser eventualment reciclades.

Les construccions pneumàtiques no han de ser necessàriament fixes, ans al contrari poden ser també transformables. El canvi de la forma de construcció es duu a terme mitjançant la injecció o bé la sortida d'aire. O bé una membrana és col·locada per damunt d'una altra i s'estabilitza per mitjà de la pressió interior.

Una altra singularitat són les membranes que s'estabilitzen no pas per sobrepressió, sinó per depressió (fig. 18) i que es poden recolzar mitjançant pals interiors bombats o arcs (també poden ser tubs pneumàtics d'alta pressió).



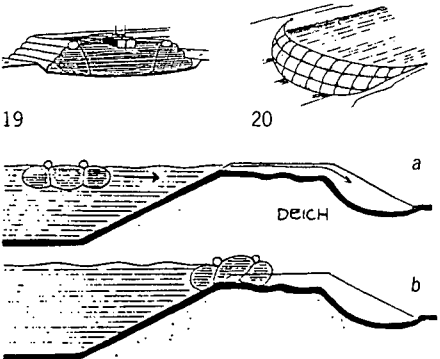
16



17



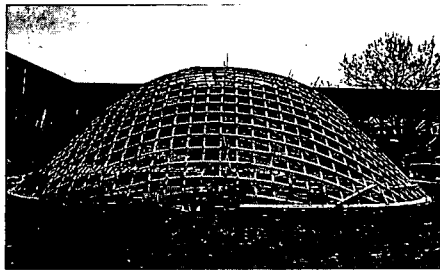
18



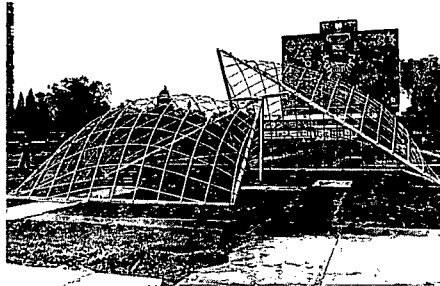
21



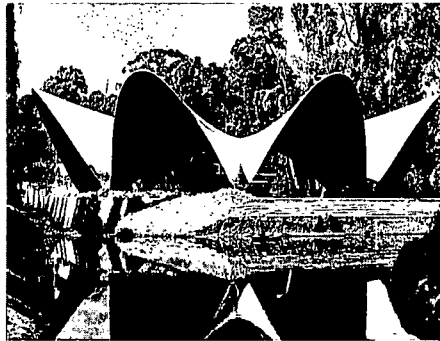
22



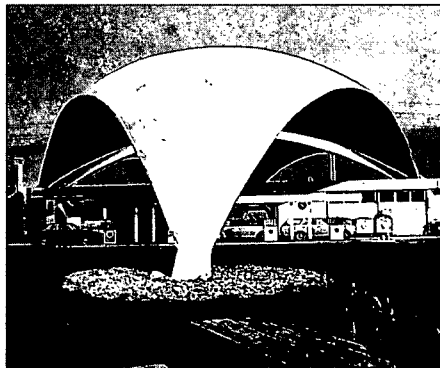
23



24



25



26



27

Juntament amb aquest tipus d'estructures pneumàtiques tancades, n'hi ha també d'obertes. En són exemples típics les veles de vaixell, els paracaigudes, els dipòsits de líquids oberts per la part de dalt (com ara les piscines desmuntables).

Un camp d'aplicació cada vegada més important són les construccions pneumàtiques a l'aigua com ara les construccions d'enginyeria per a la protecció d'aigües i de costes, per a la seva utilització en catàstrofes i per a estalviar energia (figs. 19 i 20). Això inclou des de dics, de rescloses i d'embassaments de tota mena, tot passant per centrals elèctriques d'onades, plantes depuradores i de dessalinització d'aigües marítimes i instal·lacions d'energia solar, fins a la captura d'algues i de peixos.

En són un exemple els tubs de membrana plens d'aigua amb una o diverses estances (amplària de fins a 5 metres i llargària de més de 50 metres) i capaços de flotar per actuar com a obturadors d'emergència en esquerdaments d'embassaments i de dics (fig. 21); les esculleres de membrana plenes d'aigua (aproximadament 2,5 m d'amplària i uns 40 m de llargària) per a regular el nivell de l'aigua, la velocitat del fluid i la quantitat de desguàs als rius. Uns altres exemples serien els tancaments mòbils de tub flexible plens d'aigua per al manteniment de canals de navegació o bé per al bloqueig i l'evacuació de qualsevol tram; els grans contenidors per a l'emmagatzematge de cereals o grava col·locats sobre terra o bé flotant a l'aigua.

Aquestes construccions han demostrat ser molt econòmiques, sobretot en aplicacions per a terminis relativament curts, a més de ser extraordinàriament avantatjoses per a la despesa general en energia, tant per a la seva producció com per al seu funcionament.

2.5. Les cobertes de malla

Les *cobertes de malla* són construccions de vareta corbades inflexibles i contínues que formen una reixa plana amb dibuix quadrangular i una distància constant entre els nusos. Se sotmeten principalment a sol·licitacions de pressió i flexió (fig. 22).

Un avantatge substancial d'aquest tipus de construccions és que l'espectre de les possibilitats tecnològiques per a la seva realització és extraordinàriament ampli (figs. 23 i 24). Són, per tant, construccions realitzables amb mitjans primitius, escàs *know-how* tècnic i estris fàcilment accessibles.

Les *cobertes lleugeres* són construccions que, a causa d'una consistència extremament dèbil de les seves parets i/o de la utilització de materials especials (per exemple, formigó armat o matèria sintètica), mostren un pes propi considerablement menor que unes altres construccions en forma de petxina (figs. 25 i 26).

Les *estructures portants transformables* o sostres transformables són construccions que es deixen obrir i tancar; és a dir, la seva forma es deixa canviar segons les necessitats. La majoria estan construïdes amb membranes pre-tesades (fig. 27), tot i que també se n'han construït amb membranes pneumàtiques i igualment amb tota mena de xarxes i malles imaginables. La construcció consta, en línies generals, d'una estructura portant superior a la qual es pot afegir o treure el sostre pròpiament dit. L'accionament es duu a terme a mà o amb motor. Un tipus especial de construcció de sostres transformables és el paraigua. També n'hi ha de realitzats convencionalment de fusta, d'acer, de formigó i de vidre en els quals peces completes de l'obra de construcció es desplacen sobre rails.

Les estructures portants transformables serveixen per a posar sostre a obres de construcció de mida petita o mitjana i els garanteixen la independència del temps atmosfèric, com, per exemple, piscines, instal·lacions esportives, teatres o llocs públics de tota mena. Com a vela damunt teatres o estadis, aquesta construcció ja es va fer servir molt sovint a l'antiga Roma.

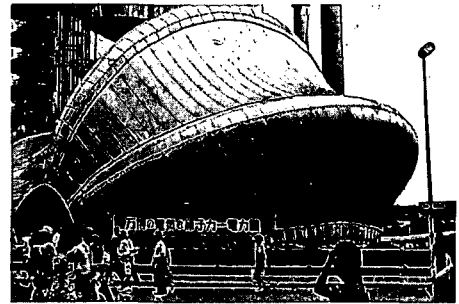
Les *estructures portants mixtes* o híbrides són construccions sorgides de la combinació constructiva d'un o d'alguns tipus de construccions esmentats fins ara o d'un d'aquests amb elements de construcció convencionals. A aquest grup pertanyen, per exemple, les membranes tesades entre tubs pneumàtics d'alta pressió (fig. 28); les cobertes de malla que, com a elements rígids constructius, contribueixen al suport de pes d'un esquelet d'acer o de formigó; els sostres penjants amb pre-tesament escàs com ara una xarxa de corda per a unes càrregues determinades; els ponts penjants en els quals el suport rígid de la calçada contribueix al seu sosteniment i a la seva solidesa.

Estructures reticulars de vareta

Consten de peces de vareta rectes, sotmeses a pressió o tracció, que, en una disposició espacial variada i en diferents formes planes, s'encavalquen en un entramat pla o corbat espacialment. La construcció final també hi pot adquirir una forma esfèrica (fig. 29).



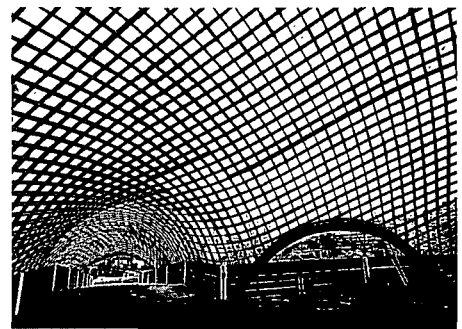
30



28



29



31



32

No obstant això, per la seva generació de formes particular i pel seu comportament portant, són, en el fons, una especialitat completament independent i, a més, molt extensa. Quant a la seva aplicació, han estat utilitzats des de fa temps per arquitectes i enginyers per a les funcions més diverses.

A les estructures de vareta pertanyen també les anomenades construccions de *Tensegritat*, desenvolupades per Buckminster Fuller. Consisteixen en cordes pre-tesades contínues i sotmeses a tracció sota càrregues exteriors, i amb varetes de pressió que tesen les cordes segons una sistemàtica determinada.

Cobertes de malla

Un dels mòbils bàsics en la història de la construcció és cobrir grans espais. Això, unit a l'afany de construir de manera flexible i amb la mínima despesa, ha portat des dels pesants teixits de l'antigor fins a les fines cobertes en forma de petxina de formigó. La reixeta com a element constructiu no és pas una cosa nova. Les cabanes i les cases d'Àfrica i Àsia, construïdes amb branques simples, amb varetes de fusta treballades o bambú, en són uns exemples mil·lenaris, com també les parets plegables de reixeta dels asiàtics. Els romans construïen glories petites amb reixetes de fusta arquejades (fig. 30), les galeries turques tenien reixetes corbades en forma de boia com a construccions de popa.

En la construcció moderna, el percentatge de despeses per a la carcassa arriba a representar més del 50% del total, motiu pel qual es fa comprensible que es prefereixin les superfícies convencionals com ara els cilindres, els conoides o els paraboloides hiperbòlics.

Les cobertes de malla han sorgit com a resultat de la recerca d'una forma de construcció senzilla i econòmica per a les cobertes en forma de petxina. Una coberta de malla consta d'elements de construcció escassos i senzills. Les varetes de la reixa són rectes i tenen la mateixa secció transversal. Tots els nusos són iguals. El caire es forma amb unes quantes varetes col·locades l'una al costat de l'altra o bé és una peça especial de construcció. Totes les peces es poden prefabricar i transportar empaquetades o doblegades en seccions o en la seva totalitat. El marge tecnològic va des de branques grosses o canyes de bambú per a fer la funció de vareta, amb nusos lligats simplement sobre varetes de fusta serrades, o perfils d'acer d'ús corrent al mercat com ara cargols de cargolar, fins a peces acabades amb

les quals es componen les varetes de la malla, amb peces de metall o plàstic que hi fan la funció de nus.

Les cobertes de malla es poden aixecar ràpidament i sense despeses ja que la reixa es munta i els nusos són rotatoris. S'eleva a mà o amb un elevador senzill, per la qual cosa les malles, originalment quadrades, transformen els seus angles en reixa de tisora i les varetes s'arquegen. No cal una armadura especial per a fer-ho. Així que hem fixat el caire i hem estirat els nusos, el model està fix i la coberta de malla ja té capacitat de càrrega.

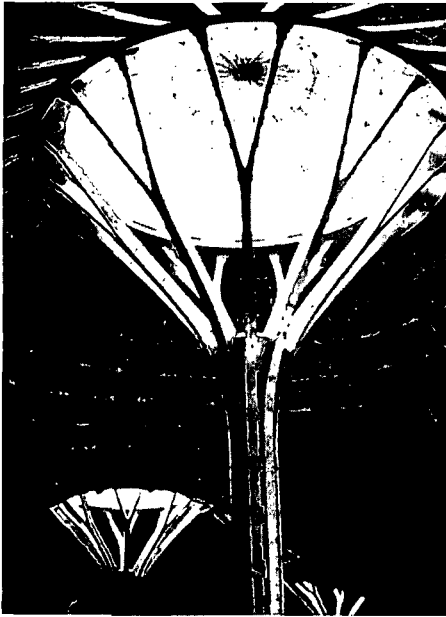
Les cobertes de malla es poden fer servir en tots els comportaments climàtics i ofereixen una gran flexibilitat. Són apropiades per a qualsevol finalitat en què s'hagin de cobrir espais petits o grans o posar-hi sostre, des d'un quiosc fins a un habitatge, des de la nau d'emmagatzematge senzilla fins a la gran coberta multifuncional, des de l'allotjament d'emergència temporal fins a l'obra definitiva (figs. 31 i 32). Les cobertes de malla no necessiten fonaments. Es deixen aixecar gairebé a qualsevol mena de terreny de construcció i són insensibles als esllavissaments de terra i als sismes perquè tenen una massa pobra i són molt elàstiques.

2.6. Els suports ramificats

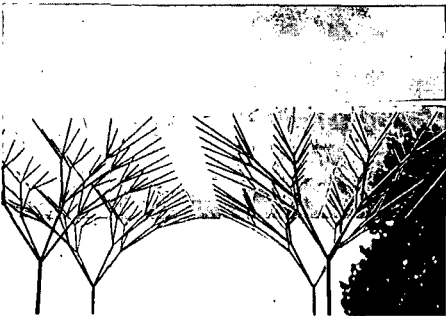
Els *suports ramificats* són un sistema estructural pla o espacial que consisteix en branques separades, cada una de les quals es bifurca en un punt determinat (nus) almenys en dues branques més. Aquestes estructures poden ser sotmeses a tensió, a compressió, a flexió i a torsió. Normalment, les càrregues exteriors només actuen als extrems de les vares. Les càrregues sobre nusos no existeixen. Les columnes ramificades normalment es fan servir com a suports per a qualsevol tipus d'estructura envoltant o de sostrada (figs. 33 i 34).

Les columnes ramificades no són pas un desenvolupament nou ni una invenció moderna. N'hi ha nombrosos antecedents històrics d'un estil igual o similar. Fins ara, no obstant això, les seves bases geomètriques i estructurals han estat poc investigades. Sembla que la majoria simplement s'han construït per raons espirituals i ornamentals.

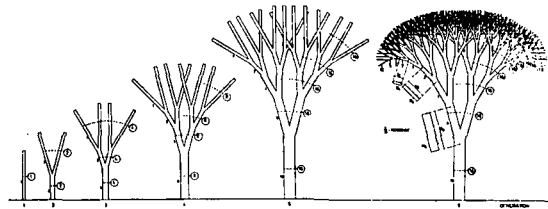
L'aspecte arquitectònic i l'eficiència econòmica depenen decisivament de la forma, segons els paràmetres geomètrics com ara la mena de nusos, la longitud de les branques, l'angle de ramificació, etc. Tota optimització d'un disseny orientada a una despesa menor de



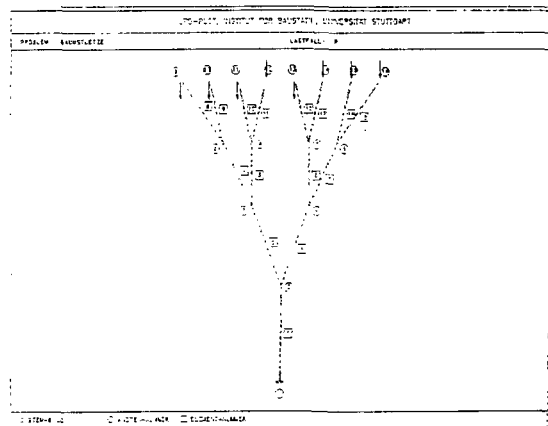
33



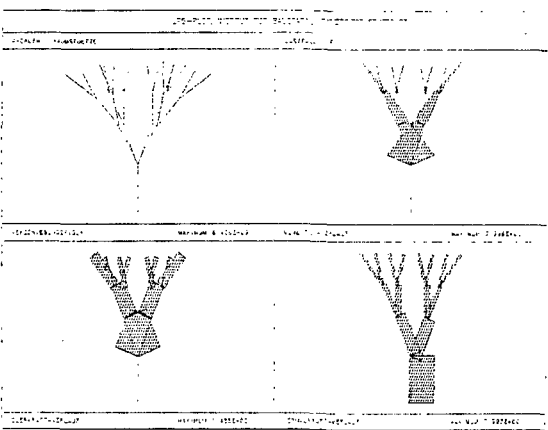
34



35



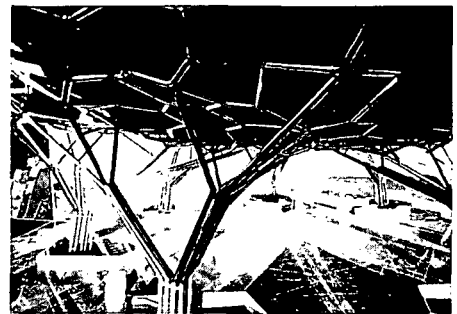
36



37



38



39

material cal que comenci per la forma. Els detalls estructurals, els materials i el tipus d'estructura primària també hi són importants, però secundaris. L'anàlisi estructural i l'elaboració constructiva normalment no ens porten unes dificultats més grans i es poden dur a terme, la majoria de vegades, amb mètodes corrents i tradicionals. Encara que les regles bàsiques i les lleis de la forma i la construcció òptimes d'estructures ramificades no estiguin investigades globalment, ja són conegudes en les seves línies essencials o almenys es poden reconèixer.

Tanmateix, sembla que hom ha redescobert la qualitat arquitectònica i l'atracció estètica de les estructures ramificades per principi, sense observar primer més coneixements sobre les propietats geomètriques i estructurals de les ramificacions arbòries i aprofundir un camp desconegut però prometedor per a l'arquitectura.

Dibuixos d'arbres tècnics: de la columna simple a una estructura arbòria amb nou generacions. Paràmetres donats: relació constant entre llargària i diàmetre (àrea) de les varetes en cada generació i suma constant dels diàmetres (àrees) de les varetes en totes les generacions (fig. 35).

Dibuixos en ordinador d'un suport arbori amb les mateixes càrregues verticals en cada punt de suport: desplaçaments, moments de curvatura, forces encreuades (transversals), forces normals (de dalt a l'esquerra a baix a la dreta) (figs. 36 i 37).

Maqueta d'una estructura membranosa pre-tesada (tenda) recolzada sobre columnes arbòries (fig. 38).

Maqueta d'una cúpula hexagonal de varetes «a l'inrevés», sostinguda per alguns suports ramificats (fig. 39).

3. Disseny i determinació de la forma

Les estructures portants lleugeres i àmplies no es dissenyen de la manera corrent. Les seves formes i construccions tenen un procés de planificació que es distingeix de l'obra de construcció tradicional. La seva part essencial és la determinació de la forma. En aquest cas, la tria subjectiva d'una forma arquitectònica és substituïda per una determinació objectiva de la forma.

La determinació de la forma és una operació empírica que descansa sobre lleis físiques senzilles i —segons el tipus de construcció— és determinada per les

lleis de generació de la forma. Aquesta operació es pot dur a terme experimentalment amb maquetes o programes matemàtics en ordinador.

La «llibertat de projecció» ja no es troba en qualsevol forma modelada, sinó en la tria i la transformació dels avantatges i de les condicions per a la determinació d'una forma òptima. A cada tipus de construcció d'una estructura lleugera corresponen un o alguns mètodes de determinació de la forma que contenen tots els trets i totes les propietats essencials d'aquest tipus de construcció. La decisió per a un tipus de construcció determinat significa per principi l'establiment d'un mètode de determinació de la forma, i viceversa.

Forma i construcció es condicionen recíprocament i formen una unitat no separable. Cada canvi de la forma té unes conseqüències immediates sobre la construcció i el seu comportament portant. Tota exigència amb relació a la capacitat portant i a l'estabilitat influeix directament sobre la forma.

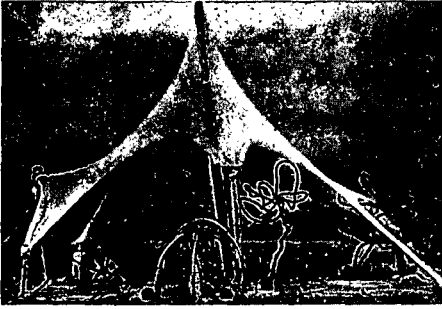
Cada decisió formal o constructiva implica unes possibilitats de producció i de muntatge.

La determinació de la forma és un procés d'optimització progressiva. Els criteris són qualitat arquitectònica i estètica de la forma i la construcció, com també la funció i la utilitat de l'obra de construcció i la seva integració en un entorn construït i natural. En cada fase d'un procés de determinació de la forma, tots els aspectes de l'obra de construcció a projectar cal que hi estiguin inclosos en una harmonia perfecta si és possible. Per a la projecció, això significa que els arquitectes i els enginyers, els experts i els constructors, han de cooperar en equip, braç a braç, des del principi i en totes les fases.

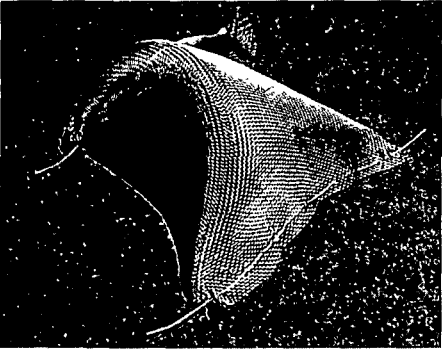
3.1. Determinació de la forma amb maquetes

El significat de la maqueta en un procés de determinació de la forma supera amb diferència la importància que li correspon, en general, en un procés de projecció «normal».

En aquest procés, la maqueta és un mitjà complementari per a la presentació de l'arquitectura: és una reproducció de l'obra de construcció la forma i la construcció de la qual foren determinades d'una altra manera. Aquí la maqueta és l'objecte de la planificació: és la mateixa obra en escala menor; per tant, simplificada necessàriament i reduïda al que és essencial, bé que amb tots els seus trets i propietats fonamentals de for-



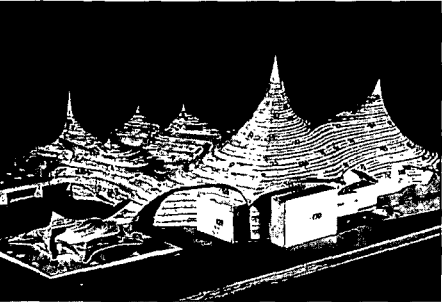
40



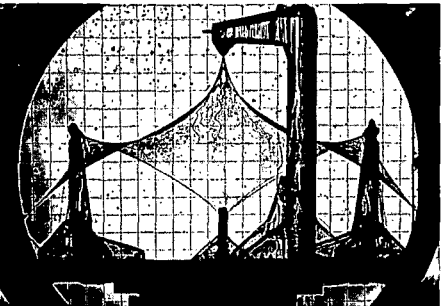
41



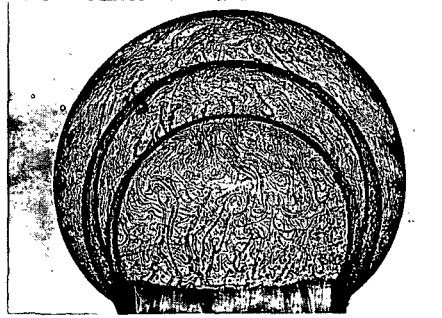
42



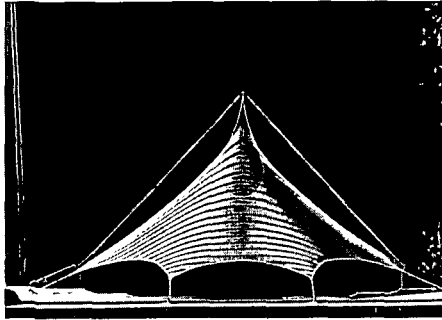
43



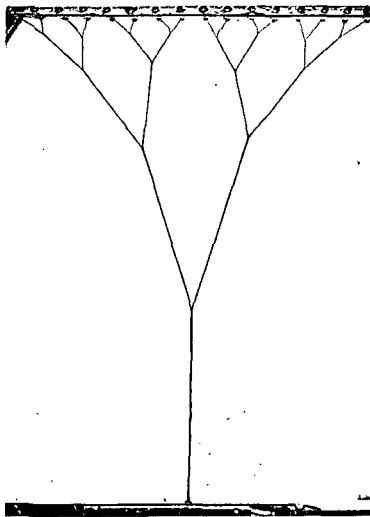
44



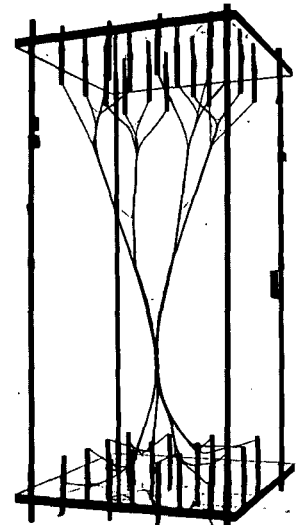
45



46



47



48

ma i construcció. L'estat de la planificació d'una estructura lleugera és visible i tangible a la maqueta determinant de la forma en cada fase i en cada moment.

En el procés de determinació de la forma, unes quantes maquetes de tipus i qualitats diferents normalment hi són necessàries. Això depèn tant del tipus de construcció triat, de la mida de l'obra de construcció i de la complexitat de la seva forma, com de la quantitat d'informació que hom vulgui transmetre, de la precisió desitjada (per exemple, maqueta prèvia i maqueta de mesurament) i de la finalitat d'aplicació de la maqueta respectiva (per exemple, determinació de la geometria de tall, les forces o les deformacions). Els tipus de maqueta es distingeixen sobretot en el material i en la tècnica de construcció. I, a més a més, hi ha diferències substancials en els mètodes de valoració i mesura.

Tot sovint és possible de fer útil una maqueta per a unes quantes exigències i finalitats; per exemple, mitjançant la millora ben calculada de la forma, la variació de detalls, la solidificació de la superfície, la incorporació d'instruments de mesurament o l'aplicació de diferents mètodes de mesurament; i amb aquesta maqueta —modificada gradualment— es poden recórrer diverses fases del procés de determinació de la forma.

Podem diferenciar tres tipus de maquetes: pre-maquetes, maquetes de mesurament i maquetes especials. L'ordre de successió correspon, en principi, a la manera de procedir en el procés de determinació de la forma.

Les *pre-maquetes* són unes maquetes senzilles, gairebé sempre petites i a voltes encara bastant genèriques, amb les quals es poden desenvolupar i presentar relativament de pressa i sense grans despeses les primeres idees de formes i construccions; per exemple: roba de mitja estesa per a representar tendes i xarxes de corda (fig. 40), globus inflats per a estructures pneumàtiques, malles metàl·liques corbades per a cobertes de malla (fig. 41), pel·lícules i bombolles de sabó per a tendes i estructures pneumàtiques. Aquestes maquetes serveixen per a l'acostament a una forma buscada i les seves possibilitats constructives i proporcionen una àmplia base inicial per a la selecció i el desenvolupament posteriors de la forma i la construcció definitives.

Les autèntiques maquetes de determinació de la forma són les *maquetes de mesurament*, per tal com la determinació de la forma significa el registre i la fixació de valors geomètrics i —en tant que la maqueta sigui apropiada per a allò— de valors estàtics. El coneixement exacte de la forma en llargàries, amplàries i alçà-

ries; en coordenades, angles, curvatures i corbes de nivell; en desenvolupaments i talls, és el fonament per a tots els passos següents de projecció fins a la realització de l'obra de construcció, especialment per al càlcul estàtic i el mesurament dels elements de construcció. Uns exemples de maquetes de mesurament són, entre d'altres, les pel·lícules de sabó i els teixits per a tendes i xarxes de corda; les bombolles de sabó i les pel·lícules de goma formades en guix per a estructures pneumàtiques; i les xarxes de cadena penjants per a cobertes de malla.

La comprovació a partir d'una maqueta de valors estàtics com ara les càrregues, el pre-tesament, les forces i les tensions, les deformacions i les dilatacions tan sols és possible quan aquesta és similar en la part geomètrica i l'estàtico-elàstica a l'obra projectada (per exemple, una maqueta de xarxa metàl·lica pre-tesada per a una construcció de xarxa de corda). Sobre la base de les lleis de l'estàtica de maquetes, aquests valors poden transferir-se directament de la maqueta a l'obra de construcció. Així tenim a disposició totes les dades necessàries per al càlcul, la mesura i la realització d'una estructura portant de superfície lleugera i extensible.

Les *maquetes especials* són, per exemple, maquetes de secció d'unes parts determinades d'una forma examinades amb més gran minuciositat a una escala major (punts alts o profunds, talls de superfícies, entre d'altres); maquetes de moviment d'estructures portants transformables en què s'estudien els procediments de conducció, el replegament, el doblegament i la mecànica motora en diversos estadis; maquetes de demostració que serveixen per a l'estudi de plantejaments de problemes especials: integració a l'entorn, interacció entre l'espai interior i l'exterior, caiguda de la llum o projecció de l'ombra en posició diferent del sol, possibilitats de desmuntatge o d'ampliacions futures (fig. 42); maquetes de túnel aerodinàmic (fig. 43).

3.2. Pel·lícules i bombolles de sabó

Les maquetes de les pel·lícules de sabó són el mètode fonamental de determinació de la forma per a tendes i xarxes de cable. Les maquetes de bombolles de sabó tenen el mateix significat elemental per a la determinació de la forma d'estructures pneumàtiques.

La forma de la pel·lícula d'un líquid, que s'escampa entre dues vores tancades qualsevol, és una superfície

mínima. Resulta de la tensió superficial del líquid a causa de forces intermoleculars, i és tan infinitament prima que una variació de la seva forma per mitjà del pes propi és imperceptiblement petita. Per tal d'aconseguir grans tensions de superfície, i amb això llargs períodes estàtics i prou extensió, s'utilitzen per a la producció de les pel·lícules solucions de sabó o detergents principalment.

La superfície mínima d'una pel·lícula de sabó és una forma autoformativa. Una maqueta les vores de la qual consisteixen en fils fins se submergeix a la solució i, en retirar-la'n, la pel·lícula sabonosa emergeix per si sola i sense influència exterior. Una bombolla de sabó és també autoformativa, només dependent del contorn prefixat i de la pressió interna. Si aquests experiments es fan en una cambra climatitzada i sense pols amb un grau d'humitat alt i temperatura baixa, les maquetes s'hi mantenen fins a una hora i mitja. El mesurament geomètric de la forma s'esdevé per mitjà de preses fotogràfiques de la maqueta sobre un vidre mat reticulat (fig. 44).

La superfície mínima d'una pel·lícula de sabó compleix dues condicions. En primer lloc, les curvatures estan igualment contraposades a cada punt de la superfície; en segon lloc, la tensió de superfície a cada punt és igual en totes les direccions i només hi entren tensions de tracció.

La segona condició també es compleix en una bombolla de sabó plena d'aire, és a dir, una bombolla formada pneumàticament i estabilitzada. En sentit estricte, tanmateix, aquesta no és una superfície mínima perquè presenta una curvatura en forma de cúpula. No obstant això, hom denomina la bombolla de sabó «superfície mínima» perquè —independentment de la magnitud de la pressió interior— cobreix sempre el volum més gran possible a la superfície més petita (fig. 45).

La forma de la pel·lícula mínima és la forma més avantatjosa constructivament per a l'estat de tensió d'una tenda o d'una xarxa de corda pre-tesada, o bé d'una estructura pneumàtica sota una pressió interna constant, i requereix unes despeses mínimes en material. Això no és aplicable necessàriament a uns altres casos de càrrega sota exigències exteriors, com, per exemple, el vent o la neu, que normalment es distribueixen desigualment i apareixen en direccions i dimensions variables.

La determinació de forma en una pel·lícula de sabó, o en una bombolla, per tant, pot ser amb freqüència

només un primer pas: la superfície mínima proporciona una forma inicial que cal que es continui desenvolupant cap a la forma de construcció definitiva amb uns altres mitjans de determinació de la forma. Això significa, concretament, que en molts casos, per raons de la càrrega i del comportament portant, caldrà variar la forma de la superfície mínima per a l'execució d'una construcció; per exemple, mitjançant canvis ben calculats de les curvatures de superfície, o mitjançant una incorporació de reforçament de membrana i cordes complementàries, amb la qual cosa no tan sols canvia la geometria de la forma, sinó que la distribució de tensions en la forma també resta condicionada.

3.3. Teixits i làmines

Les maquetes de teixits i làmines són els dos mètodes de determinació de la forma més importants per a l'elaboració i el desenvolupament de forma i construcció en tendes i xarxes de corda, i també en estructures pneumàtiques.

Un teixit cal que sigui elàstic (igual en les dues direccions de la malla, si és possible) o bé permeti el moviment dels angles entre ambdues direccions dels fils per tal de possibilitar les formes espacials. O cal que tingui ja un tall aproximatiu que s'optimitzi a la maqueta. En general, la forma d'una tenda o d'una xarxa de corda determinada amb una maqueta de teixit sempre diferirà, més o menys, de la superfície mínima.

S'hi empen teixits lleugers produïts industrialment i teixits de reixeta de tota mena de llana, seda, políester, poliamida i d'altres (fig. 46). Per a les xarxes de corda, també s'utilitzen les xarxes de fil o de filferro elaborades a mà.

A causa de la seva elasticitat, una làmina tan sols es pot transformar en una forma independent i corbada sense arrugues. Quan es forma per a una tenda o per a una xarxa de corda per mitjà de pre-tesaments exteriors, es comporta similarment a la superfície mínima.

Aquest tipus de maqueta es pot fer servir per al càlcul de tensions i forces que actuen sobre les estructures.

3.4. Xarxes penjants

Són el mètode fonamental de determinació de la forma per a cobertes de malla, que es pot caracteritzar amb tres paraules: penjant, inversió i forma de petxina.

La forma penjant és una forma autoformativa en què tan sols intervenen forces de tracció. A partir de la seva inversió, resulta la superfície de recolzament de la petxina de malla resistent a la flexió, en la qual, sota el pes propi, tan sols intervenen forces de pressió i no es presenta ni un moment de flexió.

Una forma penjant no és una superfície mínima. Les curvatures són en forma de cúpula. Les forces, a cada nus de la xarxa, són de mida diversa i no es distribueixen regularment —a excepció de les formes simètriques.

La producció d'una xarxa penjant de cadenes o de ganxos i d'anelles és relativament costosa.

Una maqueta de xarxa penjant és una maqueta de mesurament. Proporciona tots els valors geomètrics exigibles sobre la forma d'una petxina de reixeta i el tall de la reixeta i dels caires.

La determinació de la forma amb una xarxa penjant dóna com a resultat la forma de construcció definitiva, amb la qual cosa es deixen de banda unes diferències geomètriques de poca consideració entre les línies poligonals de la xarxa i les varetes corbades de la reixeta.

Bàsicament, el mètode de la determinació de la forma amb xarxes penjants és apropiat per a tota mena de cobertes amb superfície tancada, com també per a cobertes de vareta amb retícules de mòduls de quatre cares o més.

3.5. Fils en aigua

Aquest mètode serveix per a la determinació de la forma de suports i d'estructures ramificades. Hom introdueix a l'aigua una maqueta de fils de llana o de seda amb una llargada donada. Quan és estreta de l'aigua, els fils s'uneixen entre si a conseqüència de la tensió de superfície de l'aigua i construeixen un sistema ramificat (figs. 47 i 48).

No obstant això, hom ha desenvolupat un *know-how* propi per al càlcul sobre maquetes i el seu trasllat al disseny per ordinador que li permetria ser desenvolupat en una altra ocasió més específica.

Ligero y amplio. Aspectos sobre el diseño y construcción de amplias estructuras ligeras

1. El principio de construcción ligera

La situación actual de la construcción se caracteriza por una gran especialización. La complejidad de los cometidos de la construcción obliga a la división del trabajo. A esto se opone la idea de que el arte de la construcción es mucho más que sólo la suma de trabajos individuales. Ove Arup, uno de los grandes ingenieros de nuestro tiempo, lo ha expresado así: «Todos los hechos y posibilidades que influyen sobre un proyecto deben haber sido entendidos y asimilados antes de que se defina el proyecto. El todo debe ser más importante que cualquiera de sus partes». Como consecuencia surge sólo una cosa: trabajo en equipo. Es decir, el grupo como maestro de obras en el sentido clásico es necesario para armonizar todos los aspectos de una obra de construcción: creación de la forma y construcción técnica, funcionalidad y rentabilidad práctica, el medio ambiente en la naturaleza y los criterios estéticos. Arte de construir como «armonía perfecta de los medios con el fin» (Henry van der Velde).

Si es cierto que el hombre tiene una capacidad genéticamente determinada de percepción y de sensación, y si es verdad que «el saber como condición para la comprensión del mundo formal arquitectónico» (Curt Siegel) es indispensable, entonces la estética en arquitectura ya no es un planteamiento para estetas y artistas puros, sino que debe ser incluida en el ámbito racional de las realidades técnicas. La máxima de «rendir más con menos», en la cual se resumen las ideas últimas de una arquitectura con estructuras ligeras, cobra así una dimensión totalmente nueva y muy extensa que la convierte en el principio de la construcción ligera. Ligero es un objeto que pesa poco, que tiene, por tanto, escasa masa. La masa de un objeto es equivalente a la cantidad de material que se encierra en él.

Cada objeto existente materialmente está expuesto a fuerzas internas o externas y tiene la capacidad de aceptar estas exigencias o de transmitir las. Así cada objeto es, en el sentido técnico más amplio, una construcción.