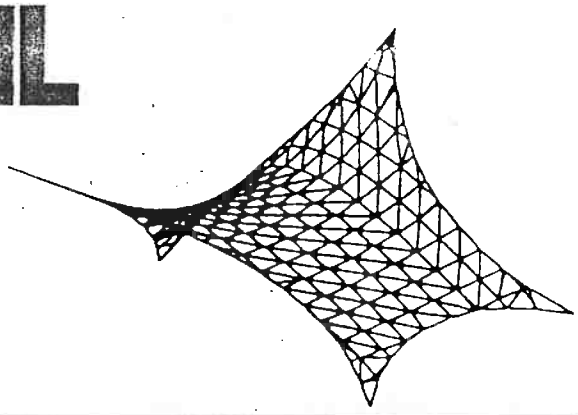
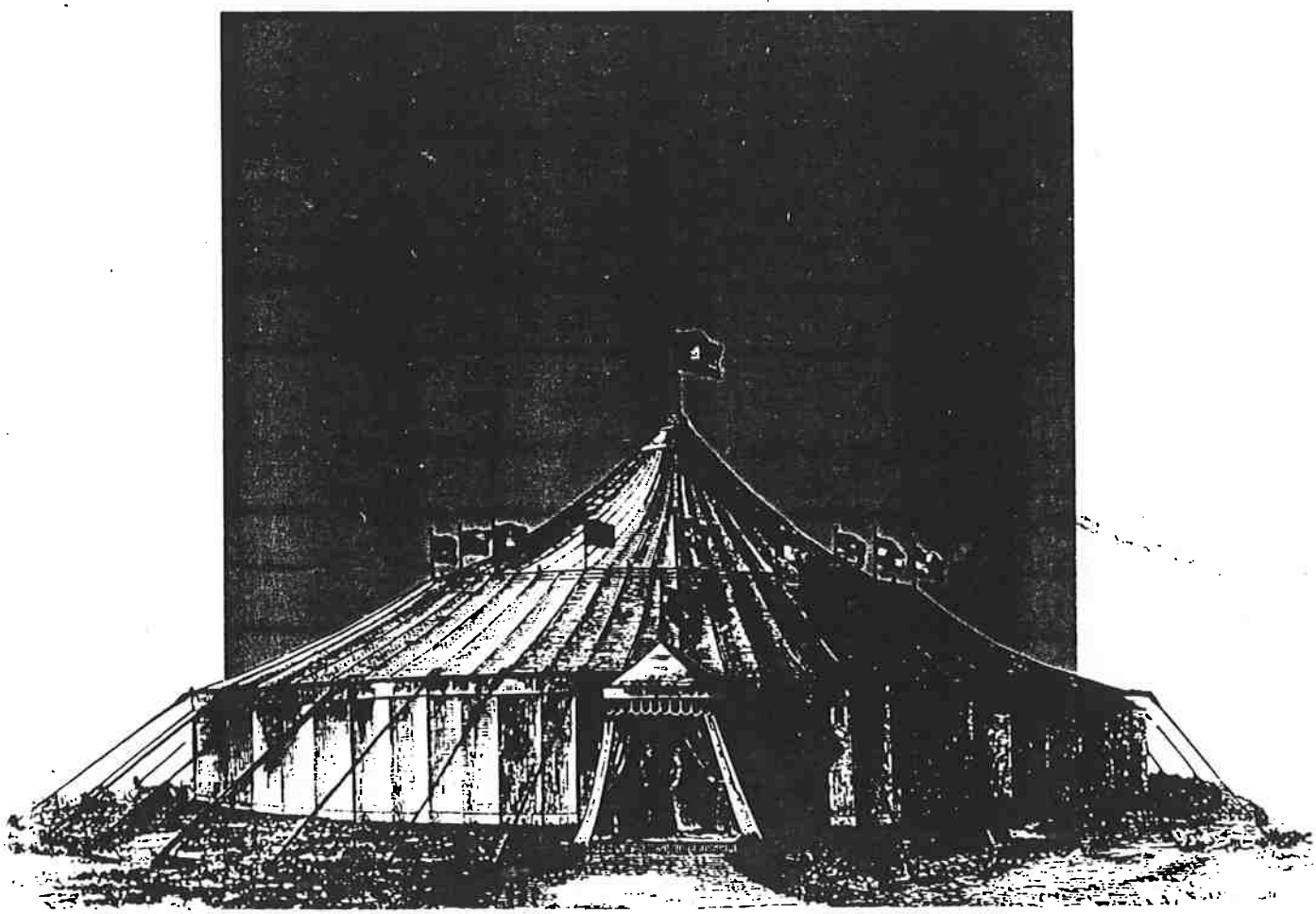
Introducción a la
ARQUITECTURA TEXTIL



cubiertas colgadas

Juan Monjo Carrió



Introducción a la
ARQUITECTURA TEXTIL

Juan Monjo Carrió

INDICE

Prólogo 7

Capítulo 1. INTRODUCCION

1.1. PREAMBULO 9
1.2. BREVE ANALISIS HISTORICO 11
1.3. JUSTIFICACION FUNCIONAL 21
1.3.1. Costes 21
1.3.2. Ambiente interior 22
1.4. FUNDAMENTOS TECNOLOGICOS 24
1.4.1. Planteamiento estructural 24
1.4.2. La tela como «malla de cables textiles» 26
1.4.3. La pretensión 27

Capítulo 2. TIPOLOGIA

2.1. FORMAS SIMPLES 31
2.1.1. Vía «geométrica» 32
2.1.2. Vía «tensional» 33
2.2. VARIANTES DE LAS FORMAS SIMPLES 34
2.2.1. «Conoides» 35
2.2.1.1. «Conoides asimétricos» 35
2.2.1.2. «Conoides lineales» 35
2.2.2. «Paraboloides hiperbólicos» 35
2.2.2.1. Deformaciones puntuales 36
2.2.2.2. Deformaciones lineales 37
2.3. FORMAS COMPUESTAS 40
2.3.1. Conoide - Conoide 40
2.3.2. Paraboloide - Paraboloide 42
2.3.3. Conoide - Paraboloide 45
2.4. CONCLUSION 45

Capítulo 3. ANALISIS ESTRUCTURAL PREVIO

3.1. CONSIDERACIONES PREVIAS 47
3.2. PARABOLOIDES DE REVOLUCION O CONOIDES 49
3.2.1. De base circular 50
3.2.2. Conoides piramidales o de base cuadrada 51
3.2.3. Conoides de vértice lineal 53
3.3. PARABOLOIDES HIPERBOLICOS 54
3.3.1. Anclaje en los vértices 56
3.3.2. Anclaje continuo 56
3.3.3. Anclaje mixto 58
3.4. SUPERFICIES COMBINADAS 59
3.4.1. Conoides en el mismo sentido 59
3.4.2. Conoides de sentidos opuestos 61
3.4.3. Conoides con paraboloides hiperbólicos 62
3.4.4. Paraboloides adosados 63
3.4.5. Conoides y paraboloides parciales 64
3.5. ESTRUCTURAS AUXILIARES 65
3.5.1. Puntos elevados 65
3.5.1.1. Mástiles 65
3.5.1.2. Pórticos 67
3.5.1.3. Estructuras fijas 68
3.5.1.4. Cables aéreos 69
3.5.2. Anclajes negativos 70

Capítulo 4. LA TELA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION

4.1. LA TELA 73
4.1.1. El tejido 73
4.1.2. La protección 76
4.2. CARACTERISTICAS MECANICAS 78
4.2.1. Resistencia a tracción 79
4.2.2. Resistencia a la tracción biaxial 80
4.2.3. Resistencia a la propagación del rasgado 80
4.2.4. Influencia de la humedad y la temperatura 81
4.3. CARACTERISTICAS FISICAS 82
4.3.1. Durabilidad 82
4.3.2. Estabilidad dimensional 84
4.3.3. Aislamiento térmico y acústico 85
4.3.4. Transparencia 87
4.3.5. Mantenimiento 88

Capítulo 5. CONFECCION

5.1. UNIONES 91
5.1.1. Juntas cosidas 92

5.1.2. Juntas pegadas 95
5.1.3. Juntas soldadas 95
5.1.4. Juntas mixtas 97
5.1.5. Juntas grapadas 97
5.1.6. Juntas practicables 98

5.2. BORDES 99

5.2.1. Borde perimetral 100
5.2.2. Inflexión interior 101

Capítulo 6. DISEÑO DE PATRONES

6.1. DESPIECE DE PATRONES 103

6.2. TIPOS DE DESPIECES 105

6.2.1. Despiece de conoides 106
6.2.2. Despiece de paraboloides 112

6.3. METODOS DE DEFINICION DE PATRONES 115

6.3.1. Métodos geométricos 115

6.3.1.1. Método geométrico-gráfico 115
6.3.1.2. Método geométrico-experimental 118

6.4. METODO ANALITICO 120

6.4.1. Memcut 122
6.4.2. Easycut 124

Capítulo 7. TECNICA CONSTRUCTIVA; BORDES Y ANCLAJES

7.1. BORDES 127

7.1.1. Relinga flexible 127
7.1.2. Relinga rígida 130

7.2. ANCLAJES 131

7.2.1. Anclajes interiores 131
7.2.2. Anclajes exteriores 138

7.3. ESTRUCTURA AUXILIAR 140

7.3.1. Mástiles 140

7.3.1.1. Mástiles articulados 141
7.3.1.2. Mástiles empotrados 150

7.3.2. Pórticos 151

7.3.2.1. Pórticos articulados 151
7.3.2.2. Pórticos empotrados 154

7.3.3. Trípodes 156
7.3.4. Puntos fijos 156

7.4. CABLES 158

Capítulo 8. DISEÑO Y MONTAJE

8.1. DISEÑO 159

8.1.1. Prediseño 160
8.1.2. Maquetas 160

8.1.2.1. Operatividad 161
8.1.2.2. Materiales 161
8.1.2.3. Proceso 163

8.1.3. Cálculo de tensiones 167

8.1.3.1. Esfuerzos exteriores 167
8.1.3.2. Programas de cálculo. Fundamentos 170

8.2. CONFECCION DE LA MEMBRANA 171

8.2.1. Diseño y corte de patrones 173
8.2.2. Unión de patrones y realización de bordes 173

8.3. MONTAJE 174

8.3.1. Borde libre 174
8.3.2. Borde rígido 176

8.4. MANTENIMIENTO 179

Bibliografía 181

Prólogo

Después de una serie de años dedicado al estudio de los fundamentos técnicos y funcionales de este tipo de arquitectura, con numerosas aproximaciones teóricas y académicas en mi labor docente, así como algunas realizaciones prácticas, y después de haber publicado un artículo general sobre el tema en el n.º 367 de Enero/Febrero de 1985 de la revista INFORMES DE LA CONSTRUCCION, me ha parecido muy atractiva la oferta realizada hace ya un par de años por la Comisión de Asuntos Tecnológicos del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid para llevar a cabo una publicación más amplia sobre este tema novedoso, en la seguridad de que sería el primer libro español sobre Arquitectura Textil.

Después de una serie de vicisitudes he logrado poner juntas un conjunto de ideas básicas sobre el tema que, sin ánimo de ser exhaustivo, considero que constituyen una aproximación suficientemente completa al problema que, si no lo agotan en ninguno de sus aspectos, por lo menos le dan al técnico los datos suficientes para conocerlo, descubrir las posibilidades formales y funcionales de esta nueva Arquitectura, disponer de una herramienta básica de diseño y «romper el hielo» de la nueva tecnología que le acompaña para no estar condicionado por el «handicap» técnico cuando se vea enfrentado a un problema de estas características.

Así pues, si después de leída esta breve «Introducción a la Arquitectura Textil» el técnico comprende el nuevo campo de diseño que tiene delante y se atreve a enfrentarse a él, con el respeto que merece siempre una nueva tecnología, este trabajo no habrá sido en vano. De hecho, dadas las posibilidades funcionales que nos aporta, considero que nuestro país es, por su climatología, un lugar ideal para que esta nueva Arquitectura tenga, en los próximos años, un desarrollo espectacular, toda vez que se hayan salvado los inevitables recelos a la novedad y que los industriales del ramo pongan su potencial a la disposición de los técnicos y diseñadores.

Juan Monjo Carrió

Madrid, Diciembre de 1990

Capítulo 1

Introducción

1.1. PREAMBULO

Podría acuñarse este término *(Arquitectura Textil)* para designar a todas aquellas soluciones arquitectónicas (es decir, de definición y envoltura de espacios habitables) que utilizan como material principal de estructura y cerramiento la tela y en las que, como consecuencia, cobra importancia la «tecnología textil» aplicada a la edificación. De hacerlo así estaríamos definiendo un tipo de Arquitectura muy actual que, aunque puedan encontrarse sus antecedentes en épocas muy remotas (incluso prehistóricas) y aunque en algunos aspectos se haya apoyado en soluciones tecnológicas de otros campos de la ciencia ya asentados, sin embargo, está todavía en un período de «observación», tanto por parte de técnicos como de profanos, aunque podemos augurarle un futuro prometedor.

Naturalmente, podríamos entrar en la discusión de si una «simple tela» puede constituir Arquitectura en el sentido tradicional de la palabra, cuando el uso principal, y casi exclusivo, que de ellas se ha hecho en la edificación, ha sido de mero complemento protector o decorativo. No obstante, desde el momento en el que la tela no sea un simple complemento sino que constituya la estructura, el cerramiento y la forma del edificio y cumpla las funciones principales del mismo, su categoría como material o elemento componente alcanza la de unidad constructiva e, incluso, la de sistema constructivo, y los resultados edilicios que con ella se obtengan pueden considerarse definitivamente como Arquitectura en el sentido más completo del término. De hecho, en el mundo actual de la edificación con tecnología más avanzada, lo que se ha dado en llamar «estructuras de tela» son una posibilidad ampliamente aceptada para grandes proyectos, tan grandes como la terminal Haj del aeropuerto de Jeddah en Arabia Saudita (400.000 m^2 cubiertos de tela, Fig. 1.1).

En este sentido, Host Berger opina que tanto por la apertura de espacios, como por la luminosidad, como, incluso, por la calidad escultórica, suponen una «nueva Arquitectura» (nueva Arquitectura a la que proponemos llamar «Arquitectura textil»).

Esta nueva Arquitectura tiene, evidentemente, unas características que la diferencian y que no se basan sólo en su tecnología (material, técnicas textiles, etc.) sino que afectan tanto a su concepción desde la fase de proyecto, como a su aspecto formal y compositivo y, sobre todo, a su aspecto funcional, ya que el espacio que encierra tiene, o puede tener, unas características especiales. En efecto, desde el punto de vista tecnológico, el tipo de material y sus capacidades mecánicas son nuevas, con un aprovechamiento máximo con respecto a su peso y una máxima economía con respecto a su costo. Exigen, por tanto, un enfoque nuevo, permitiendo la cobertura de grandes espacios con enorme facilidad.

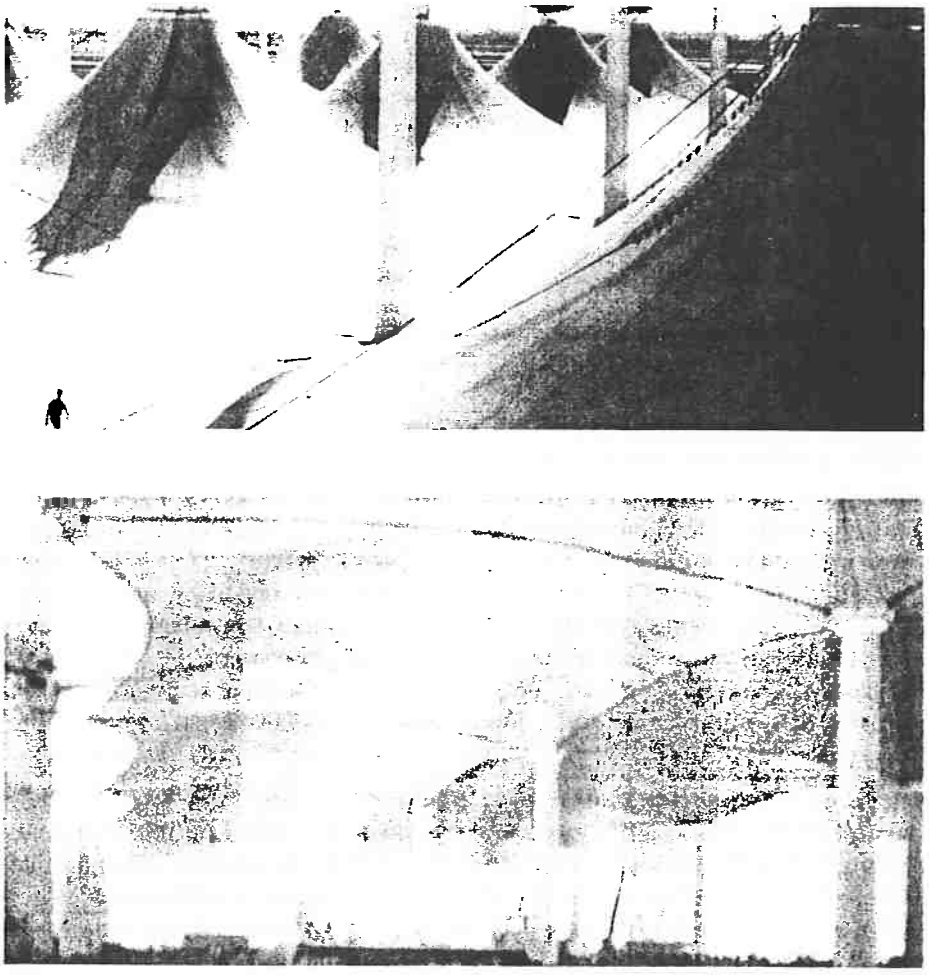


Figura 1.1. Vista parcial del aeropuerto de Jeddah durante la ejecución, por debajo y por encima.

Por otra parte, su aspecto formal rompe con los cánones clásicos y tradicionales de la Arquitectura (arco y dintel) apareciendo diseños más orgánicos, consecuentes con la tecnología propia y las necesidades funcionales del espacio.

Por último, el espacio definido tiene unas características especificas, de mayor claridad y flexibilidad, aunque también de ciertas limitaciones exigenciales, pero que en su conjunto constituye lo que Host Berger denomina un «mega espacio» o, incluso, un «espacio mejorado». *En definitiva podríamos decir que la Arquitectura textil está en el límite de la propia expresión de la naturaleza y consigue ambientes habitables con el mínimo de materiales y, por tanto, de coste de ejecución.*

Como veremos más adelante, la base fundamental para la estabilidad estructural de estas soluciones textiles y, por tanto, su integridad constructiva, está en el mantenimiento de una tensión de tracción suficiente en todos los puntos de la tela (en todas sus direcciones). Para asegurar esta tensión continua que mantiene estable la membrana, podemos optar por dos tipos de soluciones: la que consiste en aplicar un esfuerzo uniforme y perpendicular a la tela en todos los puntos que, al estar anclada en sus extremos, se transforma en un esfuerzo tangencial a la tela en cada punto, que produce la tensión de tracción deseada.

o, por otra parte, la que alcanza esa tracción a base de tensar la tela por sus extremos en direcciones y sentidos opuestos, incluso fuera del plano.

En el primer caso, nos encontramos ante las cubiertas denominadas hinchadas y soportadas por aire, ya que el esfuerzo perpendicular se consigue con sobrepresión de aire. En el segundo, estamos ante lo que se conoce como telas colgadas o tensadas y que, en cualquier caso, son las primeras que aparecen en la cronología de la Arquitectura textil, las que emplean medios más tradicionales desde el punto de vista estructural y constructivo (mástiles, cables y tensores) y las que van a constituir el objeto de este trabajo.

1.2. BREVE ANALISIS HISTORICO

Las estructuras de telas colgadas son, en su origen, las más antiguas, pues su base la podemos encontrar en los pueblos nómadas y guerreros de los albores de la historia, con una continuidad de uso que llega, incluso, hasta nuestros días, siempre que exista este carácter de provisionalidad y movilidad como el que sigue imperando en algunos pueblos árabes del desierto o, incluso, en nuestras civilizaciones, en los grupos de atracciones circenses cuyo espectáculo se alberga en carpas de diversas dimensiones y formas, pero con la tela como denominador común.

En un principio, fueron las pieles las que constituyeron las membranas que cerraban los espacios habitables, apoyadas sobre entramados leñosos. Más adelante, cuando apareció el tejido, éste sustituyó a la piel como membrana más flexible, de mayor tamaño y de formas y colores más variados (Fig. 1.2). El uso de las telas permitió llegar a superficies cubiertas relativamente grandes, para usos diversos, en forma de «tiendas»; la más antigua de las que tenemos noticias, de proporciones importantes, sea quizás la descrita en la Biblia (Exodo, 26) establecida como el primer templo divino o tabernáculo de los judíos, con forma rectangular de 15,75 m de longitud por 5,25 m de anchura.

Figura 1.2. Versión actual de una tienda de indios norteamericanos.

Las «tiendas» se han seguido empleando a lo largo de toda la historia, tanto para habitación como para comercio, o para espectáculo, o cualquier tipo de acto. Así tenemos, para habitación, por un lado, las tiendas de los pueblos nómadas de todos los continentes (mongoles, árabes, indios americanos, etc.) que tienen todavía un uso actual en las «jaimas» de los pueblos del Magreb, de concepción estructural realmente moderna (Fig. 1.3). Por otro, las tiendas de campaña de todos los ejércitos a lo largo de la historia, de uso inestimable todavía en la actualidad y de multitud de diseños formales y estructurales (Fig. 1.4). Por último, las tiendas de «camping» de los modernos excursionistas y turistas transhumantes, donde el diseño y la funcionalidad llegan a límites insospechados (Fig. 1.5).

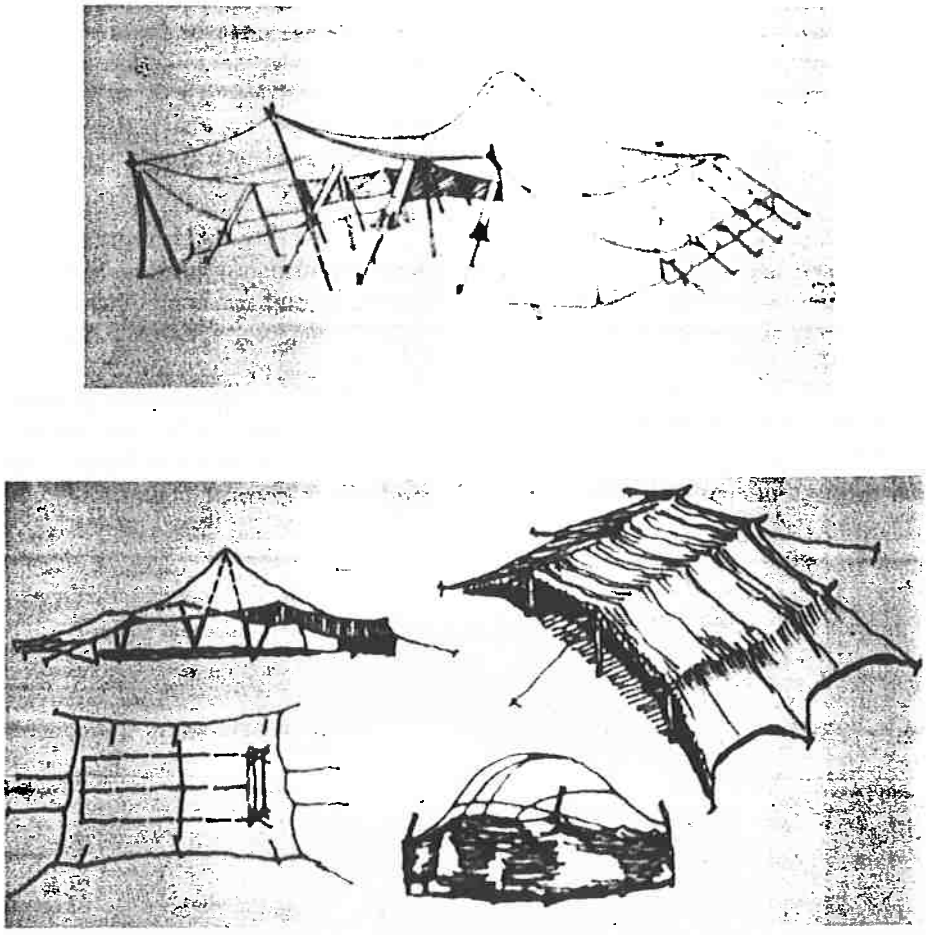


Figura 1.3. Jaimas tipo.

En el comercio y espectáculos es también antigua la tradición del uso de telas, bien para cerrar el espacio, bien para simplemente protegerlo del sol y de la lluvia. Tenemos así, desde los simples toldos protectores de tenderetes en comercios al aire libre y los toldos para proteger calles o patios comerciales, todavía en uso, hasta las cubiertas de grandes estadios, pasando por los recintos feriales, espectáculos provisionales, etc. (Figs. 1.6 y 1.7).

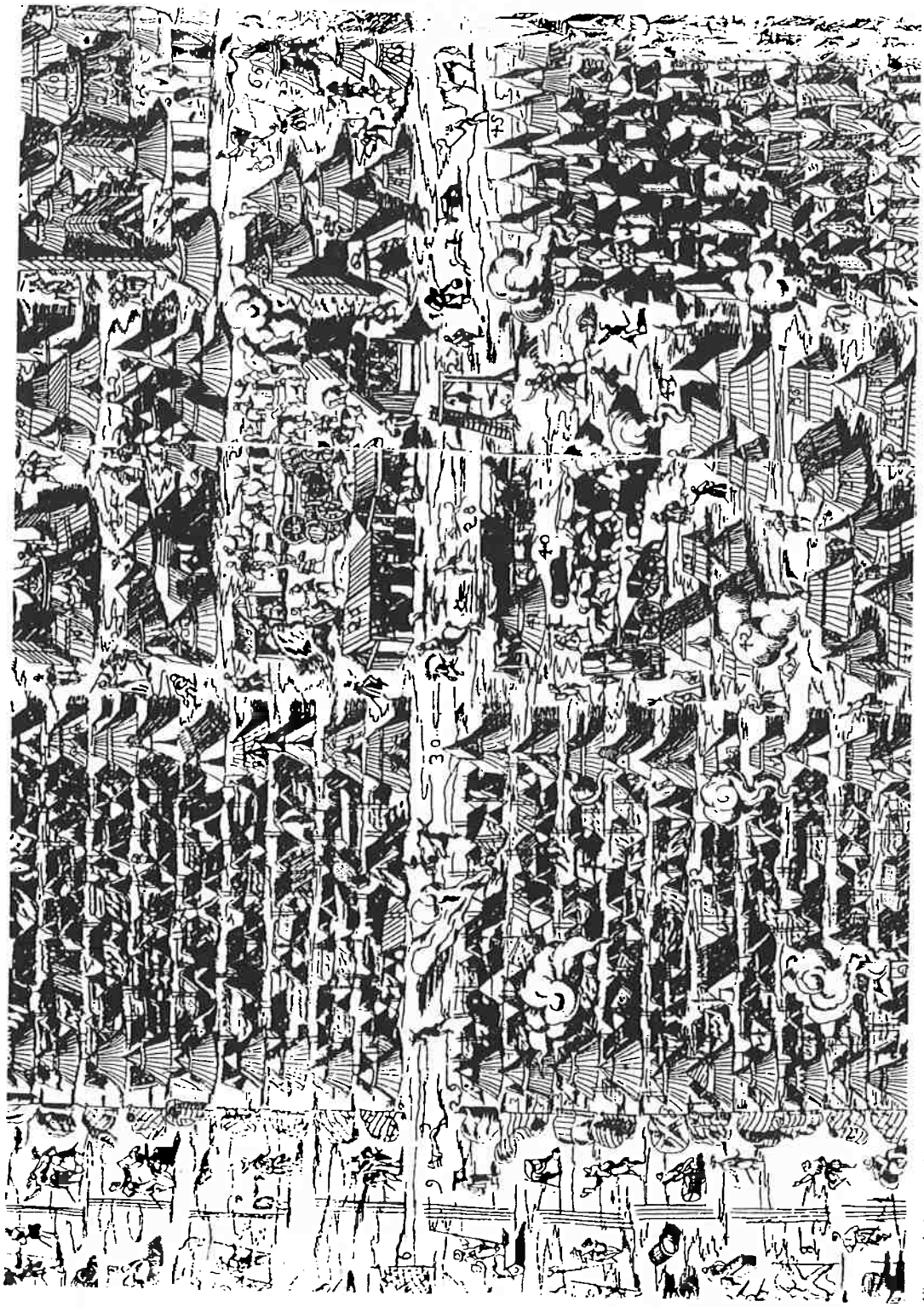


Figura 1.4. Antiguo grabado reflejando distintos tipos de tiendas en un campamento militar del siglo XVI.

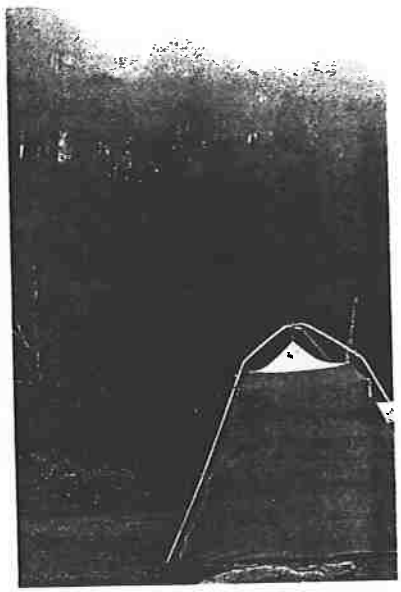


Figura 1.5. Tienda de montaña actual.

Entre los primeros (actividades comerciales) recordemos los tenderetes de los mercados semanales en la mayoría de las ciudades del sur del país y, en general, de la costa mediterránea, donde, entre otras, se ve la influencia de las costumbres marítimas al convertir las velas de los barcos en protecciones provisionales, sin excesiva preocupación por su estabilidad (la mayoría de las veces se utilizan como toldos velas triangulares que, al estar sujetas por tres puntos quedan en un solo plano y son, por tanto, inestables por principio, según veremos más adelante; todavía nos quedan renimiscencias actuales de este uso de telas triangulares, sin resolver, por tanto, su estabilidad).

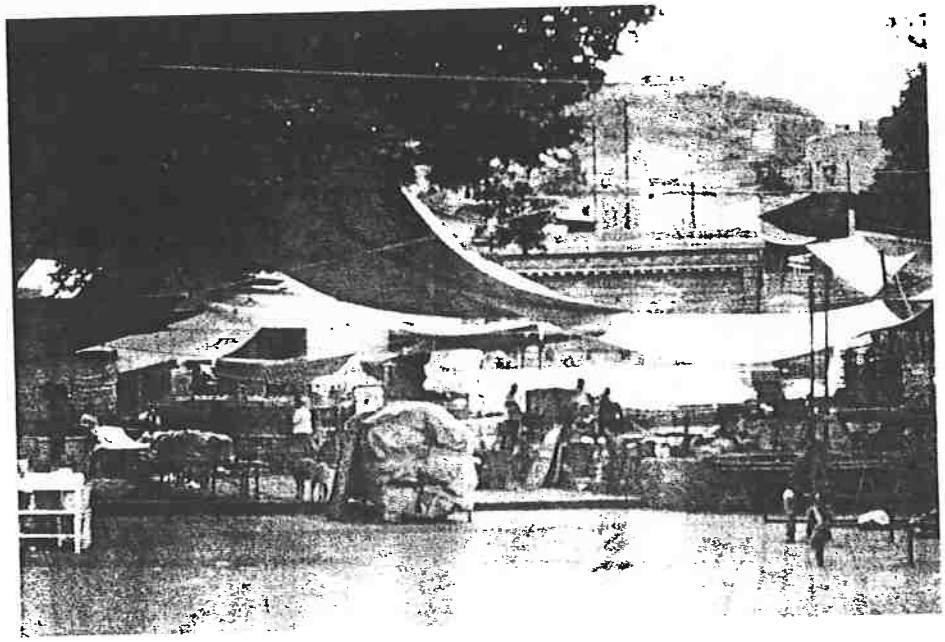


Figura 1.6. Toldos en un mercadillo en Mexico.

Figura 1.7. Toldos en la calle de las Sierpes en Sevilla.

En cualquier caso, los nuevos centros comerciales también se pueden cubrir con telas estabilizadas, bien por tensión, bien por presión del aire (Figs. 1.8 y 1.9).

Entre las cubiertas de grandes estadios tenemos que recordar las telas que utilizaban los romanos para cubrir parte de los anfiteatros («velarium») que, según los documentos que nos han llegado y las interpretaciones que se han hecho de ellos, podían ser simples toldos de grandes dimensiones sujetos por sus extremos y dejados, por tanto, a su propio peso y a los movimientos debidos a los empujes del viento (seguía sin estar resuelta su estabilidad) aunque lo más probable es que sí tuviera algún tipo de combinación de tensiones hacia arriba y hacia abajo.

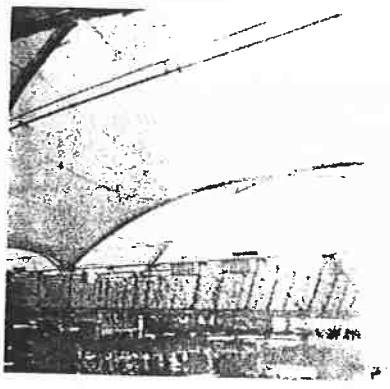


Figura 1.8. Centro comercial en USA.

Figura 1.9. Centro comercial en Orlando (Horiuchi).

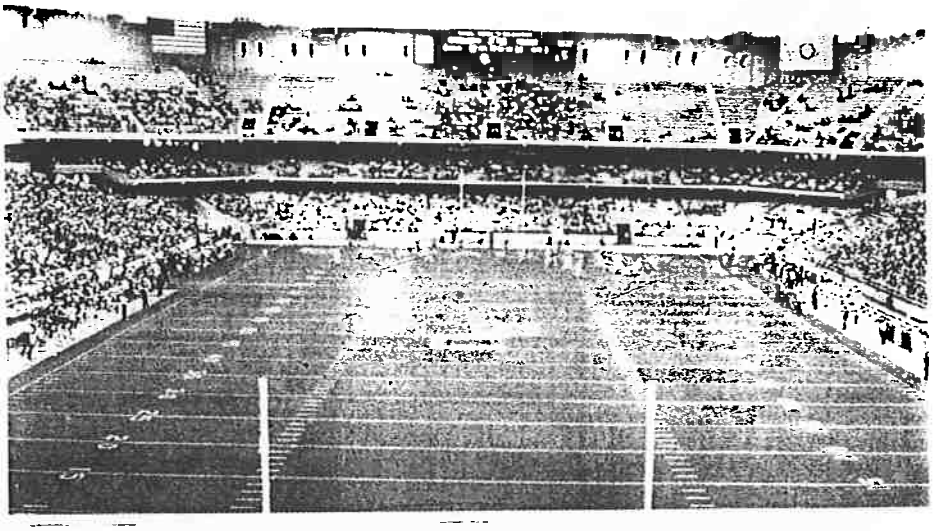


Figura 1.10. Estadio de fútbol americano con cubierta hinchable.

En la actualidad, la cubierta de espacios deportivos de este tipo se suele basar en cubiertas «presostáticas» debido a sus grandes dimensiones (Fig. 1.10). No obstante, parece que han surgido ciertos problemas entre los deportistas por la sobrepresión de aire, lo que hace que esta solución se esté revisando.

En el capítulo de los espacios para espectáculos destacan las carpas para circos, que cobran importancia a partir de principios del siglo XIX en que empiezan a utilizar grandes tiendas para cubrir tanto a los artistas como al público,

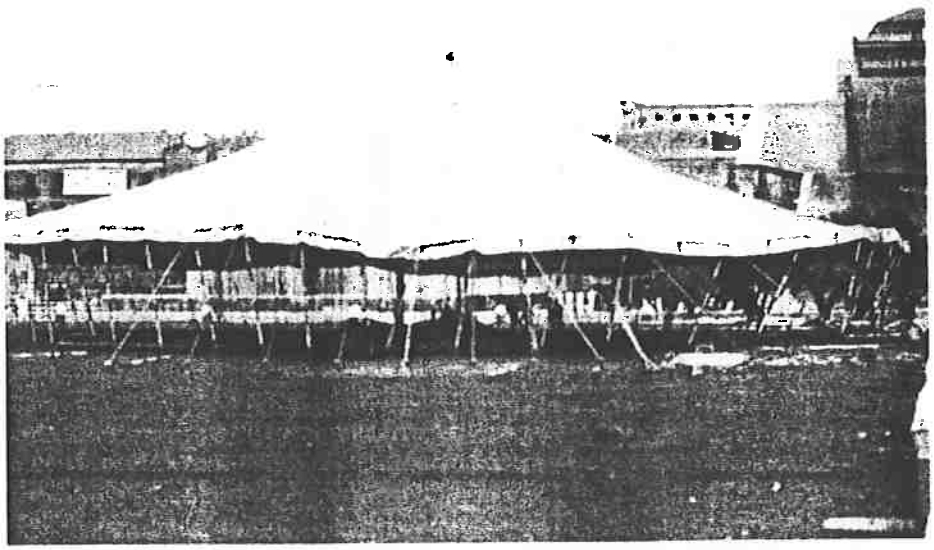


Figura 1.11.a. Antigua cubierta troncocónica de circo

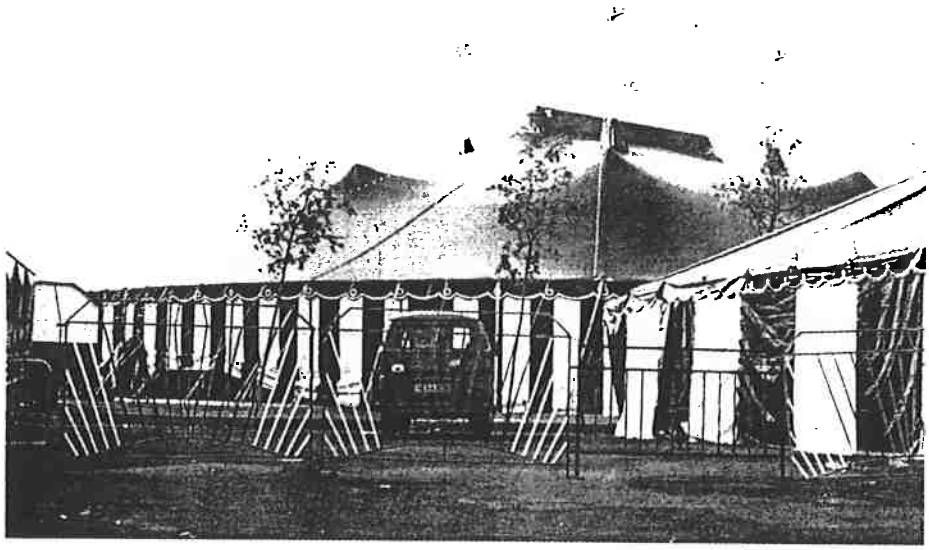


Figura 1.11.b. Moderna cubierta de circo con inflexiones intermedias.

basándose generalmente en uno o varios mástiles centrales de gran altura y la tela apoyada sobre ellos y tensada por su perímetro, adquiriendo una forma troncocónica que resulta difícil de estabilizar en algunas ocasiones de un modo definitivo (Fig. 1.11-a).

Las soluciones más modernas resuelven mejor estos problemas, introduciendo las necesarias inflexiones en la tela para obtener la estabilidad tensional (Fig. 1.11-b).

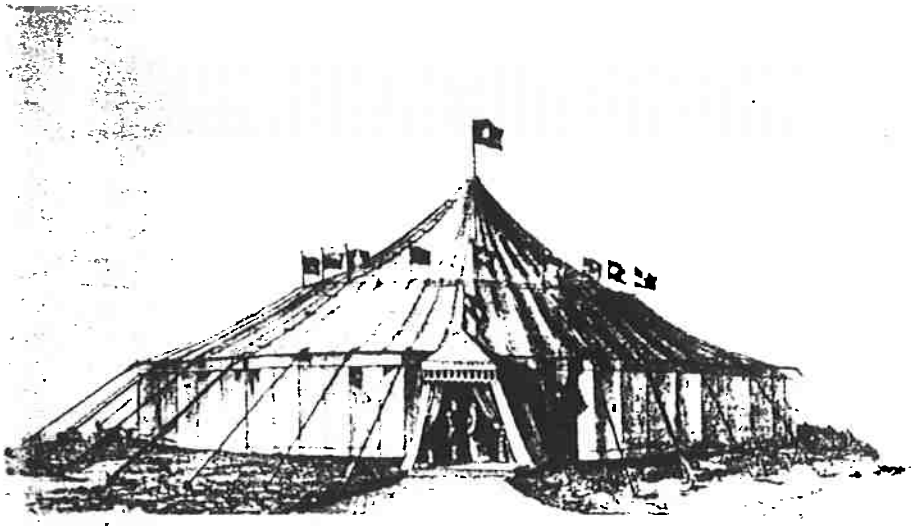
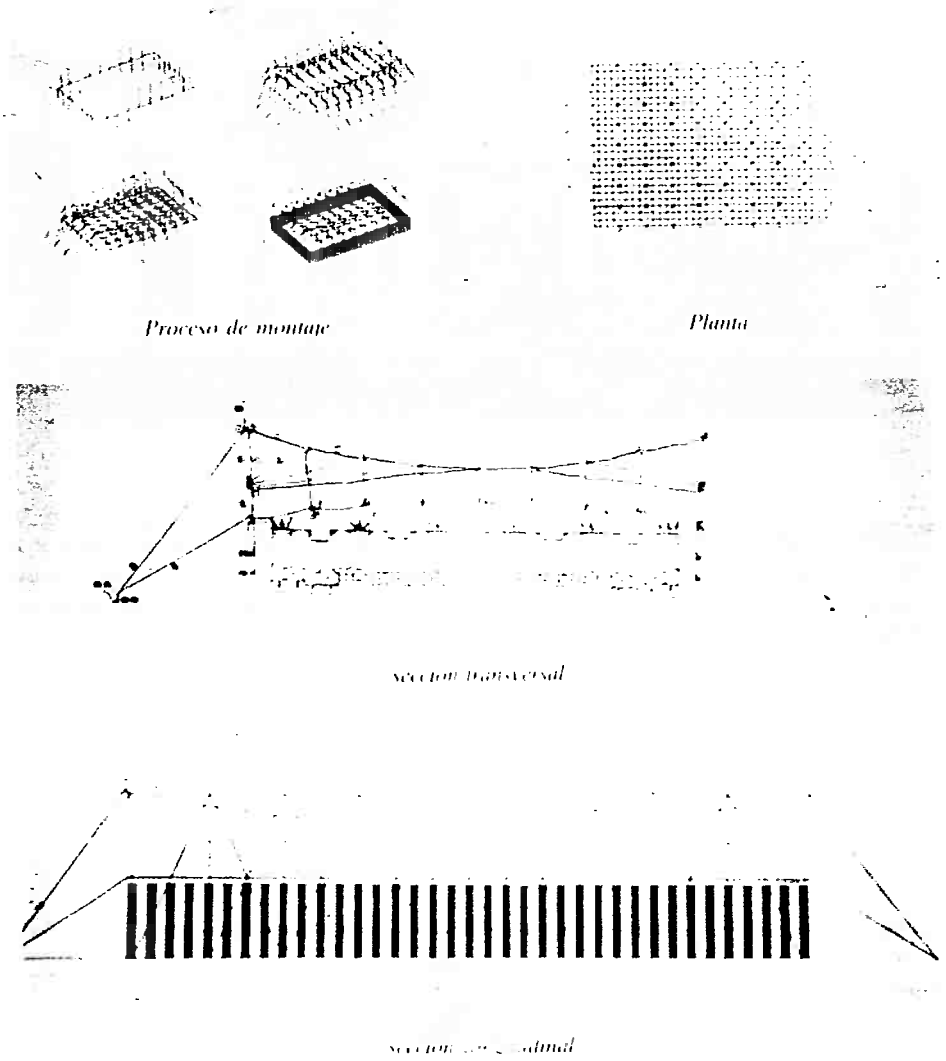


Figura 1.12. Tienda del siglo XIX para celebraciones

En contraposición a esta forma troncocónica, que se utilizó también en otro tipo de tiendas para reuniones y bailes, con menores dimensiones (Fig. 1.12) cabe destacar una solución empleada en Cataluña en el siglo pasado y estudiada recientemente por J.L. Llorens y A. Soldevila: nos referimos al «Envelat» empleado para bailes y fiestas locales, con un sistema de estabilidad opuesto al anterior, a base de mástiles perimetrales atirantados por cables interiores y exteriores de los que cuelga la tela que cubre y cierra el recinto (Fig. 1.13).



Proceso de montaje *Planta*

Sección transversal

Sección longitudinal

Figura 1.13. Esquemas del «envelat» reproducidos por J. L. Llorense y A. Soldevila.

En la actualidad, este tipo de espacios temporales para celebraciones se suelen resolver también mediante cubiertas soportadas por aire, por su facilidad de manipulación, dejando las «cubiertas colgadas» para situaciones más estables o que requieran mayor altura en su centro, como es el caso de los circos.

En cualquier caso, parece evidente que el uso de la tela como elemento constructivo básico para algunas soluciones arquitectónicas, es muy antiguo y se centra, principalmente, en el cerramiento de espacios de carácter temporal, tanto en épocas pasadas como en la actualidad.

Sin embargo, ahora podemos empezar a hablar de una arquitectura textil de carácter permanente gracias a los avances tecnológicos, tanto en el mundo textil, como en el edificatorio, y el presente trabajo tiene el objeto de introducir a su comprensión y a su manejo. Lo cierto, no obstante, es que la Arquitectura ha tenido que esperar hasta este siglo para aceptar este material y esta tecnología en su campo, gracias, entre otras cosas, a la aparición de las fibras sintéticas, que han permitido conferir a las telas unas capacidades mecánicas, físicas y químicas de evidente interés. De ese modo, con telas más resistentes y más duraderas, se ha podido pensar en su uso para grandes cubiertas con soluciones que incorporan una posibilidad de permanencia hasta entonces inusitada.

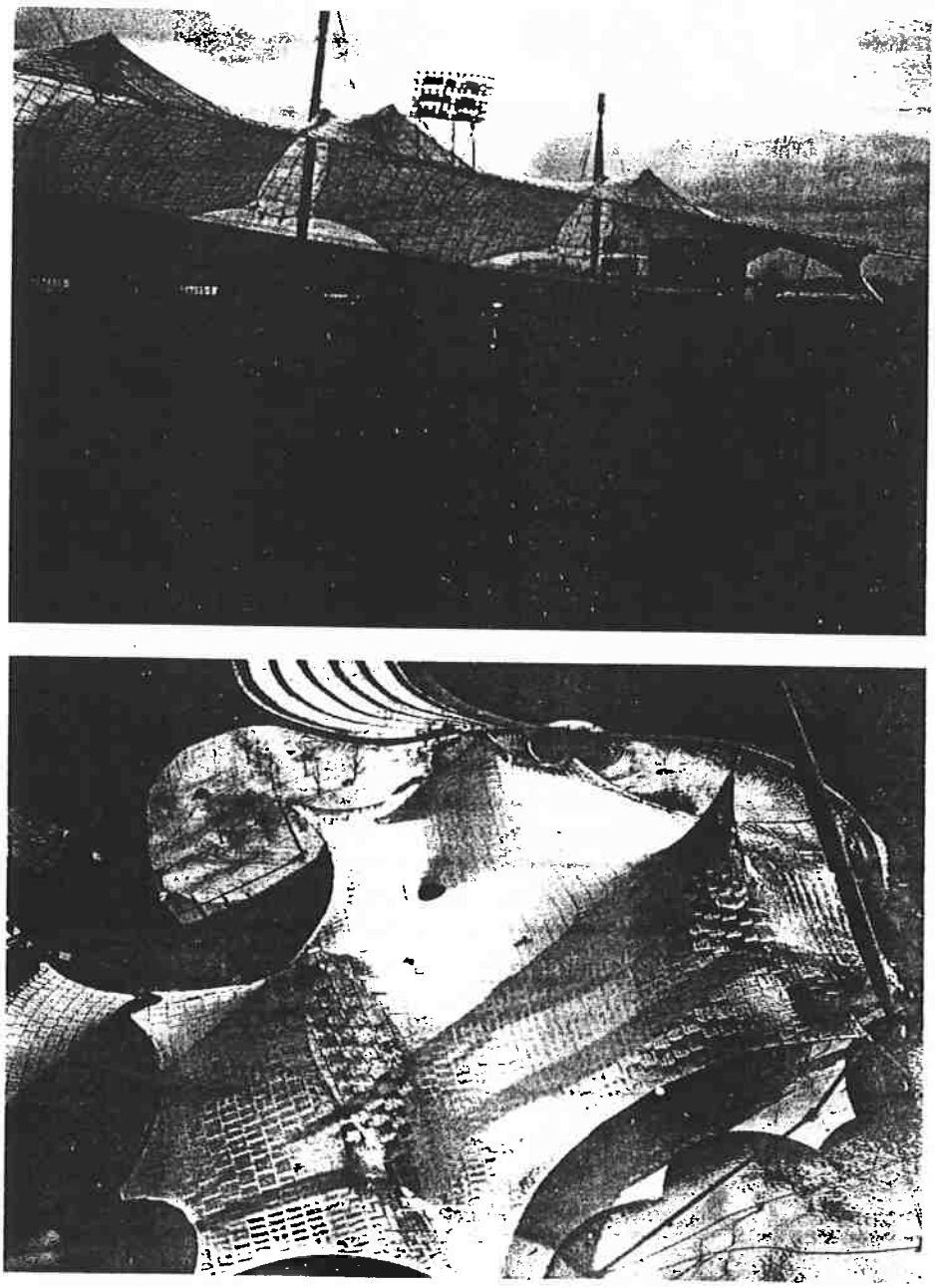


Figura 1.11 — Vistas parciales de las cubiertas de los estadios olímpicos de Munich

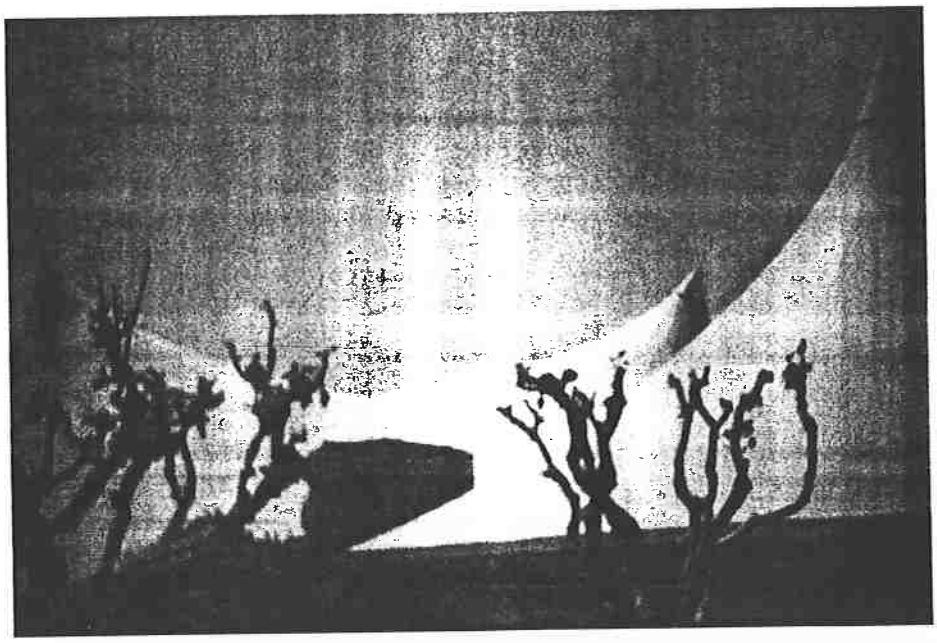


Figura 1.15. Cubierta del Colegio «La Verne» en California.

Podemos fijar la década de los 60 como la que marca la irrupción de estas soluciones de telas colgadas en la Arquitectura europea, de la mano, en gran medida, del alemán Frei Otto como evolución de las cubiertas de mallas de cables (Fig. 1.14), mientras que en los Estados Unidos (por citar los países pioneros en estos campos) su aparición se retrasa algo, hasta comienzos de los setenta en que se monta la «tienda» del colegio La Verne en California (Fig. 1.15).

Hasta estos momentos, la Arquitectura debe agradecer, no tanto la actuación de los técnicos (aunque sí de los científicos del mundo textil y del de la química de los plásticos) como la popular, en dos claras líneas de soluciones textiles por sus verdaderas posibilidades funcionales, a pesar de la pobreza de la tecnología.

Por un lado, los «artistas trashumantes» que han seguido manteniendo sus carpas circenses a pesar de los continuados problemas de seguridad que llevan consigo, y que pueden considerarse los verdaderos precursores de las grandes estructuras de telas colgadas actuales. Por otro, las soluciones populares de los pobladores de las regiones cálidas, y no me refiero solamente a los pueblos nómadas de los desiertos, sino también a los habitantes de las cuencas mediterráneas, que han sabido diversificar el uso de las velas de sus barcos convirtiéndolas en toldos de sus viviendas, calles y plazas, improvisados, primero, y premeditados y más permanentes, después.

También los militares han jugado su papel de conservadores y transmisores de una tradición arraigada de antiguo en los pueblos guerreros, usando tiendas de campaña que cumplían perfectamente su misión funcional y de provisionalidad, y que han derivado en las tiendas de «camping» tan extendidas en la actualidad.

A todos ellos, en conjunto, debemos la tradición del uso de la tela en nuestros edificios, con un carácter complementario primero (toldos) y un carácter integral después; tradición que ha podido complementarse con la nueva tecno-

logía textil para dar como fruto esta «Arquitectura textil» de grandes cubiertas con telas colgadas.

1.3. JUSTIFICACION FUNCIONAL

Todo ese proceso histórico, y el complemento tecnológico actual, nos pueden facilitar el análisis del interés real de su uso en nuevas soluciones, sin el cual todas las justificaciones tecnológicas huelgan.

1.3.1. Costes

Destaca, en primer lugar, la posibilidad de cubrir y cerrar grandes espacios a un coste relativamente reducido y con una gran rapidez de ejecución. En efecto, la capacidad estructural de la tela (que veremos en los apartados siguientes) y su reducido peso (de 1 a 5 kg/m^2) hacen que se puedan resolver fácilmente grandes luces con un costo mínimo de estructura soporte, además del propio de la tela.

Host Berger considera que, mientras el coste de las estructuras convencionales para grandes luces (vigas trianguladas, arcos, etc.) aumenta de un modo exponencial en relación a la luces a cubrir, el de las cubiertas textiles suele ser independiente de ese factor. La razón fundamental de este hecho es el peso de la propia estructura que, en las convencionales, supone una parte muy importante de la carga total a soportar, mientras que en las textiles carece de importancia. Por el contrario, en estas últimas, el coste se basa en el de la tela (más o menos sofisticada en su tecnología) cuyo precio es fundamental para el presupuesto total de la cubierta pero que puede mantenerse constante a pesar del aumento de las luces a cubrir, lo que produce, incluso, una disminución del coste del m^2 al aumentar aquélla.

En consecuencia, podríamos apuntar que las cubiertas textiles son más caras que las convencionales para luces reducidas (inferiores a 20 m) excepto en aquellos casos en que sea importante el paso de la luz natural. Por el contrario, para luces excepcionales, tales como espacios deportivos, la ventaja económica es tan grande que no tiene sentido ya plantearse otro tipo de cubiertas. Pero no solo este tipo de tamaños, sino que también para espacios intermedios (con distancia a cubrir de unos 40 m) las cubiertas textiles pueden ser más económicas, sobre todo si tienen importancia otros aspectos tales como iluminación natural, temporalidad, practicabilidad, etc. El precio de las grandes cubiertas construidas recientemente, incluida la estructura soporte, oscila entre las 15.000 y las 40.000 pesetas/m^2 según su magnitud dimensional (de 10 a 40 m de luz libre).

En cuanto a la rapidez de ejecución, ésta es evidente desde el momento en que la tela puede considerarse como una membrana continua prefabricada, que viene totalmente «confeccionada» de taller y que, por tanto, en obra no requiere más que la ejecución de la estructura soporte y la sujeción de la tela a la misma, con el consiguiente ahorro de mano de obra y trabajo «in situ», siempre más difícil de controlar.

Por otra parte, debemos considerar, la permanencia del carácter de temporalidad en estas soluciones textiles, a pesar de las características resistentes de las nuevas telas. En efecto, el hecho de su carácter de membranas prefabricadas hace posible su fácil montaje y desmontaje y, por tanto, su reutilización.

De hecho, ésa sigue siendo la característica fundamental en las carpas de los circos, y puede ser un aspecto que marque carácter a muchas de estas soluciones cuando su uso no sea temporal, como puede ser el caso de cubiertas de mercados públicos, grandes toldos de piscinas, etc. En todo caso, si una tela tiene que ser de «quita y pon» por sus características físicas deberán contemplar el continuo plegado y desplegado que, como veremos, puede ser un factor condicionante desde el punto de vista de su confección (Fig. 1.16).

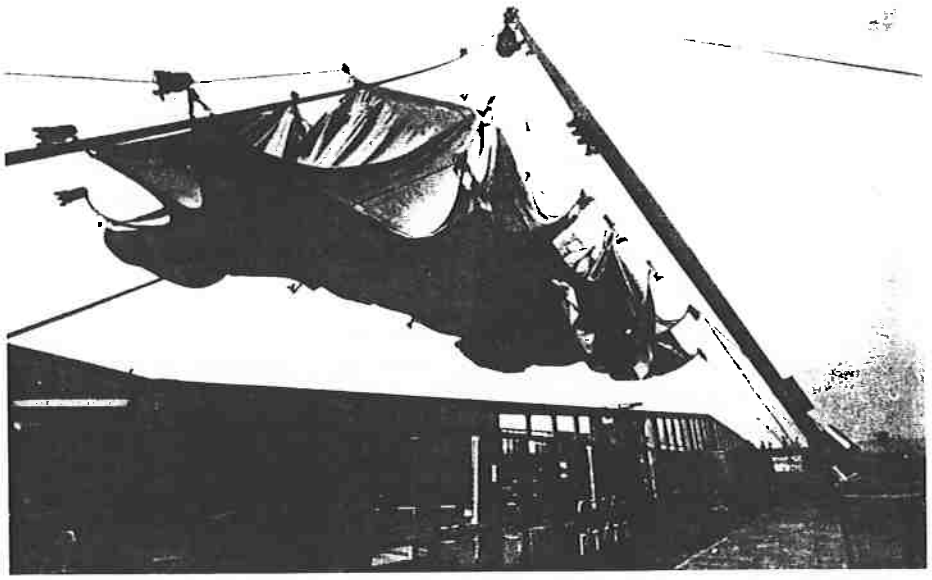


Figura 1.16. Cubierta plegable sobre piscina.

1.3.2. Ambiente interior

Para su funcionalidad es importante también el *carácter del ambiente* que queda cerrado por la tela, sobre todo si ésta constituye lo que llamaremos una solución integral. En efecto, como «cerramiento», la tela es un material relativamente pobre ya que, por su poco cuerpo, no constituye un buen aislamiento. Sin embargo, en contraposición, permite un mejor contacto con el entorno exterior (sobre todo luminoso) cuando ello es interesante. Analicemos estos aspectos.

Por un lado, la *transmisión luminosa* de las telas variará según el tipo de tejido y el recubrimiento, tal como veremos más adelante, ofreciendo una gama que va desde una transmisión pequeña de luz para la más opacas, del orden del 10 %, hasta una gran transmisión para la más claras, del orden del 50 %, incluso mayor para las nuevas telas transparentes a base de siliconas. Vemos, pues, que el ambiente luminoso debajo de estas cubiertas puede satisfacer grandes necesidades de iluminación, llegando incluso a producir una oscuridad total, con el uso de telas opacas.

Por otra parte, su aislamiento térmico, es muy pobre, ya que tiene una masa y un espesor muy reducidos (~ 1 mm de sección) por lo que no serán útiles cuando necesitemos una gran protección térmica. Sin embargo podemos suplir este teórico defecto mediante el diseño, tratando de aprovechar las energías

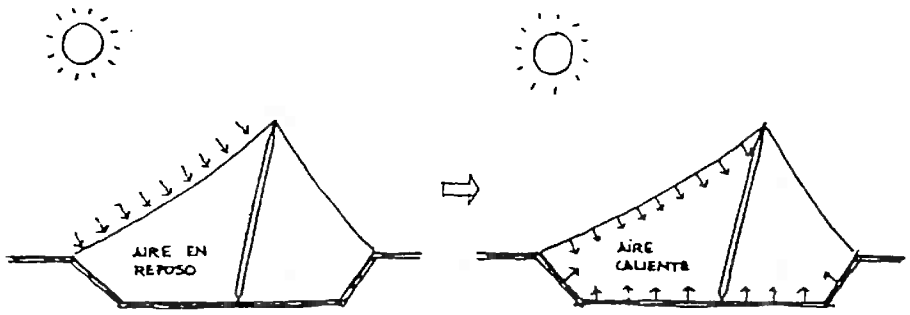


Figura 1.17. Efecto invernadero.

naturales a nuestra conveniencia. Así, en invierno, tenderemos a buscar el *efecto invernadero,* gracias a la gran transmisión de la energía solar apuntada (Fig. 1.17). Si mantenemos el aire interior en reposo, la tela nos ayudará a captar energía calorífica del exterior, tanto en la radiación solar directa, como de la difusa, consiguiendo un aumento interior de la temperatura que puede llegar a ser suficiente.

Siguiendo un procedimiento similar, aunque inverso, podremos trabajar en verano buscado el *efecto sombrilla.* Bastará, simplemente, con que evitemos la radiación directa gracias a la tela (disminuyendo en lo posible la transmisión de radiación a través) y establezcamos corrientes naturales de aire debajo de la misma, preferentemente ascendentes, con objeto de que exista una renovación continua que baje la temperatura interior (Fig. 1.18). Como un ejemplo podemos indicar que bajo la mencionada cubierta del aeropuerto Haj en Jeddah (Arabia Saudita) en pleno desierto, se consiguen temperaturas de 24° C. gracias al diseño de las «tiendas» de la cubierta que producen una continua circulación de aire (Fig. 1.19).

En definitiva, y como veremos más adelante, el uso de estas soluciones tiene que ir acompañado de un correcto diseño que obtenga, no sólo un óptimo aprovechamiento de la tela con fines económicos, sino además un correcto funcionamiento de la solución a efectos de un uso óptimo y una forma final adecuada al entorno.

En cualquier caso, y como colofón de su funcionalidad, podemos distinguir dos tipos de usos para estas soluciones textiles. Las que consideran el uso integral de las telas para la solución arquitectónica de que se trate (Arquitectura textil global) quizás la más interesante, y las que consideran estas soluciones como complemento del diseño y función del edificio (Arquitectura textil complementaria) con seguridad la más extendida y asequible en la actualidad que, aunque necesaria y útil ahora y siempre, no debe limitar nuestro horizonte de uso.

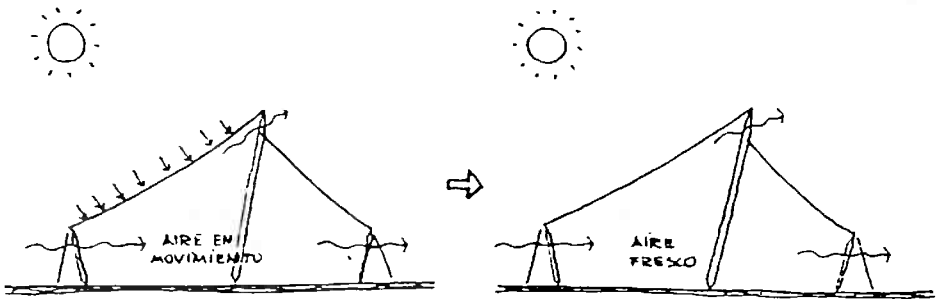


Figura 1.18. Efecto sombrilla.

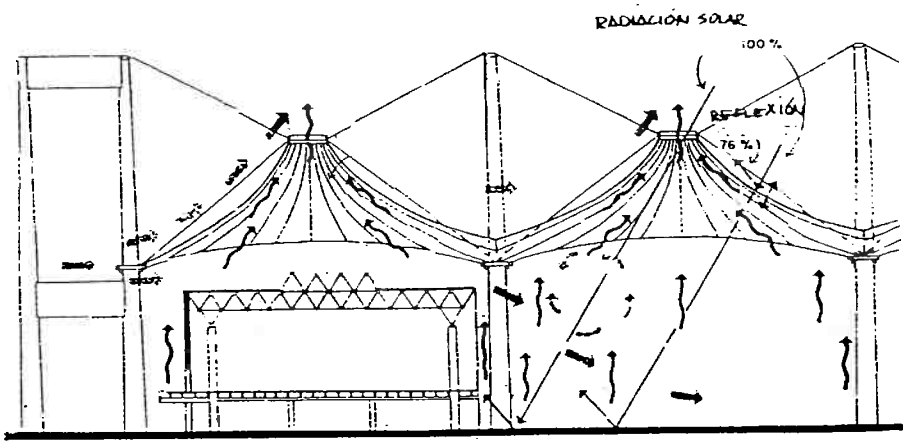


Figura 1.19. Esquema de aireación de la cubierta del aeropuerto de Jeddah.

1.4. FUNDAMENTOS TECNOLOGICOS

La utilización de la tela en la edificación, como la de cualquier otro material, parte de la base, por un lado, de su integridad física y, por otro, de su funcionalidad ante las exigencias del usuario y del medio.

En el apartado anterior hemos apuntado ya algo sobre la funcionalidad de las cubiertas textiles, de su adecuación económica y de su ambiente interior, diáfano, luminoso y aireado. Además de lo que veamos al estudiar las propiedades de la tela como material, debemos analizar ahora la estabilidad de la tela como membrana, sus fundamentos teóricos y técnicos y sus consecuencias estructurales y formales.

1.4.1. Planteamiento estructural

Para ello, conviene recordar la gran diferencia conceptual entre compresión y tracción y, por tanto, entre la estabilidad de los dos sistemas. *La compresión* exige rigidez de conjunto, solidez de los materiales, luces relativamente cortas (para evitar pandeos) y resultados de los esfuerzos dentro de los márgenes de los núcleos centrales de inercia de cada sección perpendicular a los mismos, a fin de evitar la aparición de flexiones. Esto lleva, sobre todo, a dos hitos fundamentales: *masa y rigidez*.

Por el contrario, la *tracción* permite flexibilidad del conjunto, ya que la continuidad del esfuerzo está asegurada por el «efecto biela», sin que haya peligro de aparición de flexiones. En consecuencia, desaparece la necesidad de la masa, siempre que la sección sea suficiente, en función de la capacidad resistente del material.

En definitiva, frente a la masa y rigidez, las soluciones estructurales basadas en la tracción presentan, como características básicas, la *ligereza y la flexibilidad* (Fig. 1.20).

Si, ahora, pensamos en una cubierta para una gran luz y de mínimo canto, y tratamos de resolverla por alguno de los dos sistemas de compresión o tracción, los resultados deberán ser francamente diferentes.

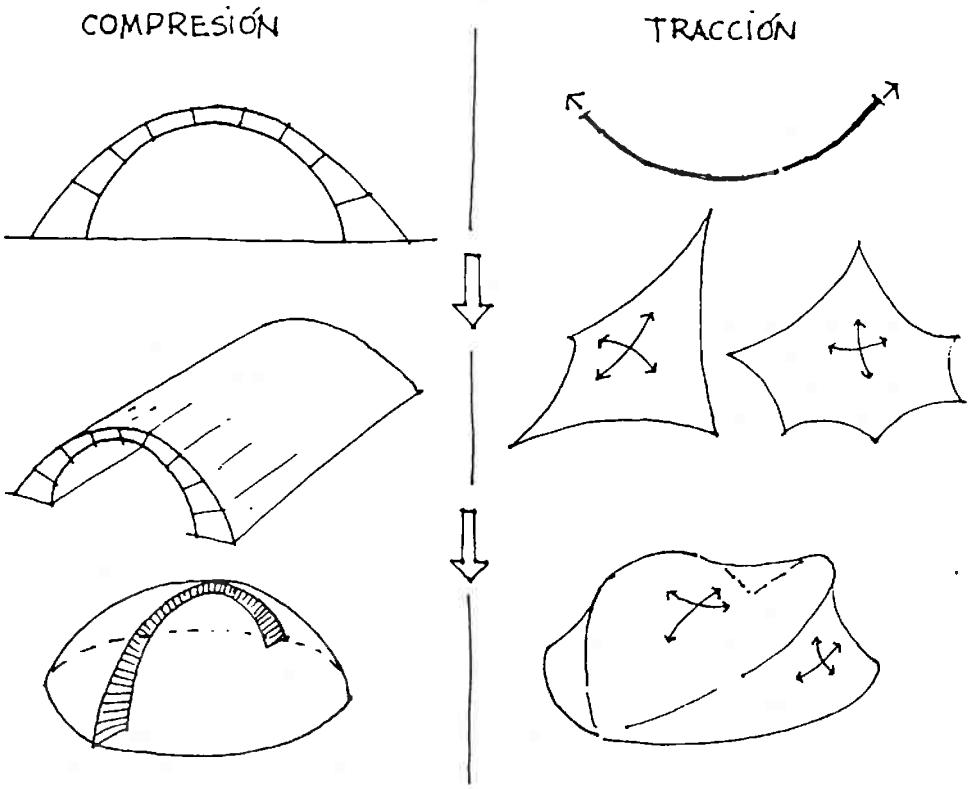


Figura 1.20. Compresión «versus» tracción.

A compresion, obtendremos formas rígidas de sección circular o parabólica, con grandes masas, sobre todo en su base, y su curvatura sinclástica con concavidad hacia abajo. Los posibles esfuerzos horizontales o de succión por viento se verán contrarrestados básicamente por su masa.

A tracción, por el contrario, resultarán formas flexibles, de curvatura anticlástica, con poca masa y, por su sistema estructural, capaces de resistir tanto las cargas de gravedad, como las horizontales o las de succión, pero, a su vez, incapaces de aceptar esfuerzos de compresión.

En el primer caso, nos encontraremos ante una *lámina* que, al reducir su canto y su curvatura, deberá resistir, además, esfuerzos complementarios de flexión. En el segundo, estamos ante una *membrana*, sometida exclusivamente a tracción. En definitiva, complejidad frente a simplicidad.

No obstante, esta simplicidad está basada en unos materiales distintos y una tecnología constructiva nueva. La compresión, parte de los materiales pétreos para resolver las bóvedas y llega al hormigón como material pétreo, pero formáceo, que puede disminuir su sección, pero necesita armarse para, a pesar de su rigidez, ser capaz, de resistir flexiones. La tracción, por el contrario, se inicia con la madera entrelazada, pasa por los perfiles metálicos articulados y llega a la red de cables como solución óptima de membrana. Por último, como una red de cables de peso y dimensiones muy pequeñas (micro-red) con un alto nivel de acabado, aparecen las actuales telas, que son el objeto de este trabajo.

Por ello, veamos cuál es la base conceptual que nos permite alcanzar la estabilidad estructural de las cubiertas textiles.

1.4.2. La tela como «malla de cables textiles»

En el caso de la tela, por ser éste un material flexible (una membrana, en su conjunto) se logra la estabilidad gracias a la tensión. Es decir sólo sometiendo la tela a una tensión de tracción en, por lo menos, dos direcciones cruzadas, le daremos la estabilidad necesaria para que pueda cumplir el resto de sus funciones. Si en algún punto aparecen esfuerzos de compresión, la tela se desestabiliza, arrugándose y pudiendo entrar en «colapso». Aunque este hecho es evidente, pues basta comprobarlo en cualquier trozo de tela que tengamos a mano en el que, hasta que no la sometamos a tracción en varias direcciones, no lograremos eliminarle las arrugas y darle, por tanto, estabilidad, sin embargo conviene analizarlo brevemente. Para ello, pensemos en el comportamiento mecánico de un cable. Si lo colgamos de un extremo, obtendremos una línea recta vertical que resulta inestable ante cualquier esfuerzo horizontal, ya que tiende a desplazarlo de su situación, a menos que lo atirantemos desde el extremo inferior. Lo mismo ocurre si colgamos el cable entre dos puntos. Por su peso propio tenderá a adquirir la forma de una catenaria, más tendida cuanto mayor sea la tensión en sus extremos y menor sea el peso propio (Fig. 1.21). No obstante, el cable solo, aunque esté tensado en sus extremos, sigue siendo inestable ante esfuerzos perpendiculares, sobre todo si lo son al plano vertical que contiene la catenaria, pudiendo desplazarse del mismo o, incluso, entrar en vibración y deformarse dentro de este plano. Para estabilizarlo, no basta, pues, introducirle una tensión contraria en el mismo plano, sino que habrá que tensarlo según algún plano cruzado (preferentemente perpendicular) con el primero. Aparece, así, un segundo orden de cables con tensión inversa (si la primera es hacia arriba, ésta será hacia abajo y viceversa) que, de tratarse de una cubierta de un espacio y contar con un conjunto de cables paralelos, debemos establecer dos «familias» de cables, la del primer orden, colgados, y la del segundo orden o estabilizadores, con tensión inversa (Fig. 1.22). Es lo que Host Berger llama los *esfuerzos hacia arriba* (absorbidos por los cables atirantados hacia abajo) y los *esfuerzos hacia abajo* (absorbidos por los cables atirantados hacia arriba).

En su conjunto, habremos llegado a una malla de cables tal que, en cualquier punto de cruce de la misma, éstos tienen tensiones contrarias. Si trasladamos esta situación a una tela (que es, en realidad, una malla tupida y prefabricada

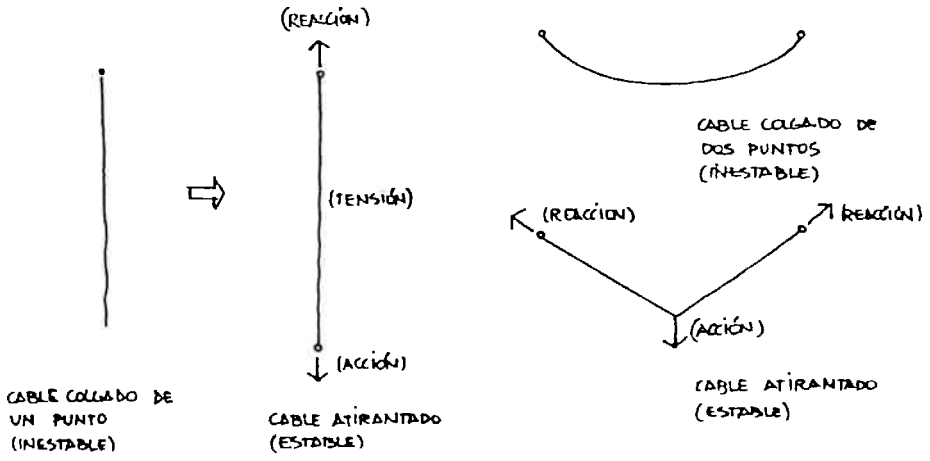


Figura 1.21. Estabilización del cable en su plano.

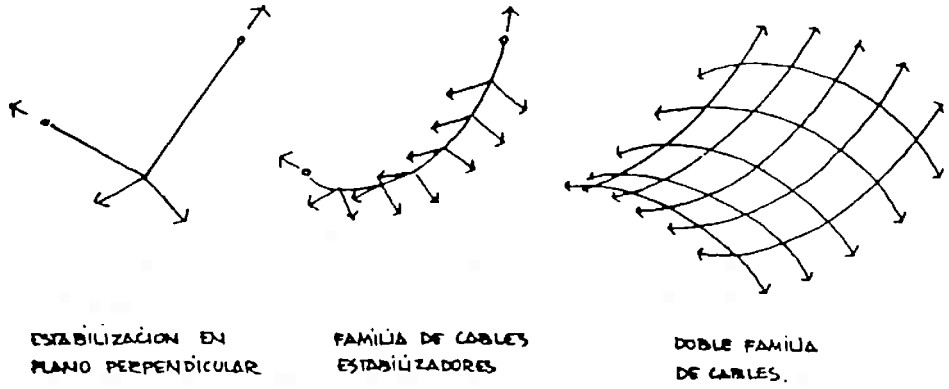


Figura 1.22. Estabilización de la familia de cables.

de cables textiles) comprenderemos perfectamente su sistema de estabilización y por lo tanto, la necesidad de la doble tensión (tensión en dos direcciones) para conseguir su estabilidad, asegurando la ausencia de compresiones.

1.4.3. La pretensión

Esta tensión en dos direcciones se obtiene, en realidad, por medio de una «pretensión» que se infiere a la tela en el momento de su montaje.

Para comprender mejor el efectò de esta «tensión previa», puede sernos útil estudiarla en un modelo abstracto, tal como hace C. G. Schierle, de la Universidad del Sur de California.

Siguiendo el modelo de la figura 1.23, cuyo dibujo representa un cable elástico, tenemos que, si en el caso a) el cable está en reposo y se somete a una tensión de 2 kg (b) en su centro sufrirá una deformación determinada (e). Si, por el contrario, partimos del caso c) en el que el cable está sometido a una pretensión de 1 kg por sus extremos y le introducimos la misma tensión anterior de 2 kg (d) la deformación ahora será solo de e/2. Es decir, en este caso (cable pretensado) de la carga de 2 kg, la mitad es absorbida por el extremo izquierdo a base de disminuir su pretensión, con lo que la deformación se ha quedado reducida a la mitad.

Suponiendo pues, unas condiciones como las del modelo, se puede llegar a establecer que:

— Un cable pretensado se deforma la mitad que uno en reposo ante un mismo esfuerzo.

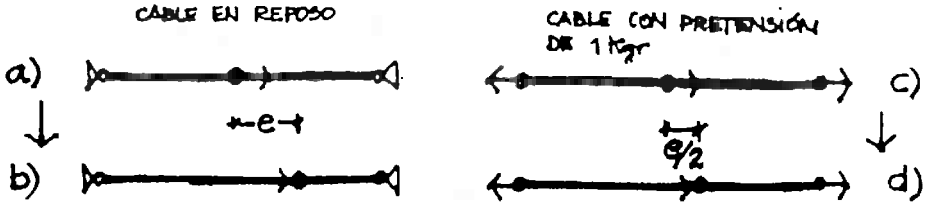


Figura 1.23. Modelo de C.G. Schierle para expresar el efecto estabilizador de la pretensión en un cable.

— Cuando la pretensión se anula, cualquier esfuerzo adicional produce la misma deformación que si el cable estuviera en reposo.

— Para prevenir la aparición de compresiones que dejan al cable inestable, se necesita una pretensión de aproximadamente el 50 % de la tensión prevista en cálculo.

De acuerdo con estas precisiones, se realizó un estudio en la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Sur de California, dirigido por C. G. Schierle, con mallas de cables cruzados sometidas a dos tipos distintos de pretensión, una del 25 % y otra del 50 % de la tensión de cálculo, con los siguientes resultados:

— La pretensión del 25 % produjo una deformación de 1/61 de la luz como mínimo y 1/98 como media. En consecuencia el 60 % de los cables estabilizadores quedaron sin tensión y, por tanto, la malla resultaba inestable ante cualquier esfuerzo.

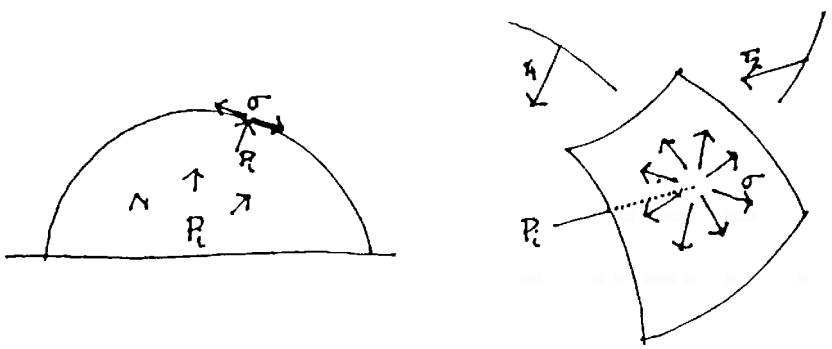
— La pretensión del 50 % produjo una deformación de 1/40 de la luz como mínimo y 1/80 como media, quedando una pretensión del 30 %, con lo que la malla resultaba estable.

En definitiva, si extrapolamos, tanto el modelo abstracto como las mallas del estudio, al caso de la tela, podremos concluir, como ya habíamos hecho, que esta pretensión del material resulta imprescindible para la estabilidad de la cubierta.

La introducción de esta doble tensión (pretensión) en las soluciones actuales de la Arquitectura textil es dual y marca la división entre los dos grandes tipos enunciados (telas colgadas y telas hinchadas).

En efecto, en las cubiertas soportadas por aire (hinchadas) la doble tensión se obtiene en el mismo sentido en las dos direcciones (cubierta sinclástica) ya que es consecuencia de la transformación en tensiones tangenciales del esfuerzo perpendicular a la tela producido por la sobrepresión (Fig. 1.24). Por el contrario, en las cubiertas colgadas, la doble tensión se obtiene en sentidos distintos en cada punto (superficie anticlástica) como consecuencia de los que hemos llamado «esfuerzos hacia arriba» y «esfuerzos hacia abajo».

Centrémonos ahora, en las telas colgadas. En ellas la tensión se introduce despreciando su peso propio (que es prácticamente despreciable) y sometiendo



$$R = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Figura 1.24. Estabilización por hinchado.

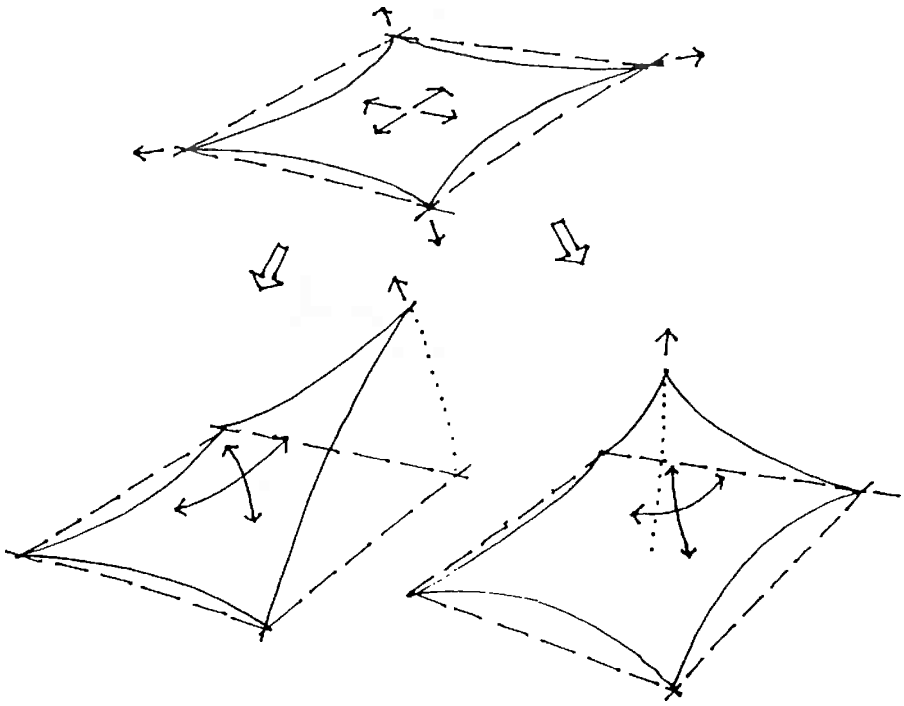


Figura 1.25. Estabilización por anticlasticidad.

sus extremos a una tensión directa. Si la tensión está en una sola dirección, aunque en dos sentidos, sólo tensaremos, por así decir, una de las supuestas familias de cables, y aparecerán «arrugas» en esta dirección. Para evitarlas deberemos introducir tensión en otra dirección (en la otra familia de cables). Sin embargo, si esto lo realizamos dentro de un plano, el resultado es una tela plana; tensada, pero inestable ante cualquier esfuerzo perpendicular (no tanto su peso propio, que como vimos es muy pequeño, cuanto las cargas del tipo de la nieve o el viento). Para introducir una estabilidad definitiva, deberemos salirnos del plano, de un modo similar a como veíamos en la familia de cables, y conseguir que la tela quede en forma de superficie «anticlástica» de tal modo que en cualquier punto de la misma existan curvaturas de sentidos opuestos, producidas por tensiones cruzadas y en estos mismos sentidos. Este será el único modo de conseguir una estabilidad total (Fig. 1.25).

El diseño funcional y los esfuerzos mecánicos que se puedan prever nos darán la superficie formal adecuada en cada caso. Sólo bastará utilizar el tejido que resista tanto las tensiones previas como las que resultan al aparecer las cargas exteriores, básicamente nieve y, sobre todo, viento. Más adelante veremos estos extremos.

En definitiva, la *anticlasticidad*, por un lado, y la *doble tensión en sentidos opuestos*, por otro, son la base de la estabilidad de las grandes superficies resueltas con «membranas», como es el caso de las cubiertas textiles. Todas las partes de las membranas colgadas que queden planas o con curvatura sinclástica (las planas son sinclásticas con radio de curvatura $r = \infty$) resultarán inestables y presentarán arrugas en la dirección en la que están sometidas a la tensión principal. En la otra dirección, la menos tensada, aparecerán esfuerzos de compresión (insuficiente tracción) que darán lugar a las arrugas (Fig. 1.26).

Cual sea el nivel de anticlasticidad necesario irá ligado al tamaño de la cubierta y a la tensión de estabilización necesaria. Sobre ello volveremos al estudiar el cálculo.

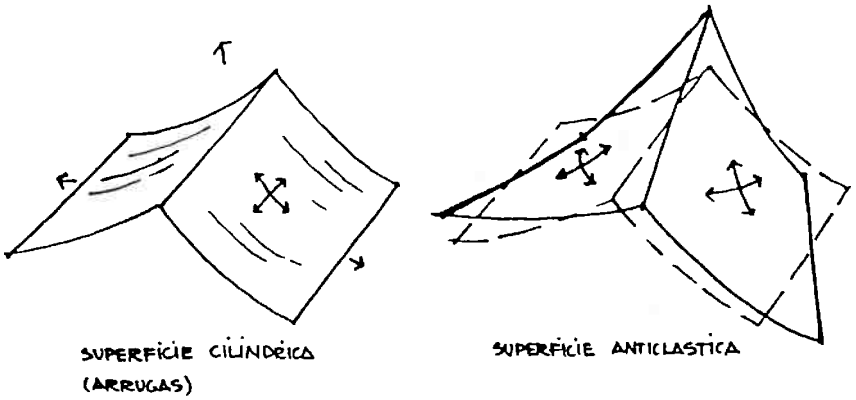


Figura 1.26. Eliminación de compresiones por anticlasticidad.

Capítulo 2

Tipología

En el capítulo 1 hemos visto los fundamentos tecnológicos de las cubiertas textiles colgadas que nos ocupan.

Recordemos que tres eran los puntos básicos para su estabilidad estructural:

— La necesidad de una *tensión de tracción*, en todos los puntos y en distintas direcciones, fundamental en el funcionamiento de estas cubiertas frente a la compresión, con todas las consecuencias de flexibilidad que ello aporta.

— La necesidad de una *tensión permanente* en la membrana (la tela) que nos obliga a introducir una *pretensión* que mantenga la tracción ante cualquier eventualidad de esfuerzos externos.

— La *curvatura anticlástica*, único modo de asegurar la estabilidad por tensión permanente en, por lo menos, dos sentidos en cada punto, introduciendo las dos familias de esfuerzo, «hacia arriba» y «hacia abajo».

Todo ello, y sobre todo este último punto, nos introduce en la tipología morfológica de la Arquitectura textil, tipología que lo es, a la vez, estructural y constructiva. En efecto, la exigencia de una curvatura anticlástica en toda la superficie de la membrana, condiciona la forma de la misma y, por tanto, su apariencia final.

Pero este condicionante no es limitativo, dado el gran número de formas que cumplen la condición, sino que, por el contrario, le imprime la nota característica de esta nueva arquitectura, es decir, la *flexibilidad* de sus formas y el *carácter orgánico* de su apariencia. Y, todo ello, a pesar de que, como veremos a continuación, esta tipología morfológica se resume en dos o tres formas básicas y sus combinaciones. Naturalmente, el resultado arquitectónico final estará en función de los conocimientos y la habilidad creadora del proyectista.

Veamos, pues, las diferentes formas que cumplen las exigencias de estabilidad estructural mencionadas en el capítulo anterior.

2.1. FORMAS SIMPLES

Podemos considerar que existen tres tipos de superficies básicas cuya curvatura es anticlástica en cualquiera de sus puntos: El *paraboloide de revolución*, con dos variantes según la situación relativa del eje, «conoide» y «paraboloide» propiamente dicho, y el *paraboloide hiperbólico*.

Estas tres superficies cumplen, pues, con la posibilidad de conseguir la estabilidad estructural de la membrana que las adopte, y a ellas, curiosamente, podemos llegar, tanto por la vía «geométrica», como por la vía «tensional».

2.1.1. Vía «Geométrica»

En efecto, geométricamente, las tres superficies anticlásticas más fácilmente definibles son ésas, por el simple procedimiento de trasladar una línea generatriz con curvatura en un sentido (en este caso una parábola) a lo largo de una directriz con curvatura en el otro sentido (bien una circunferencia, bien una hipérbole) (Fig. 2.1).

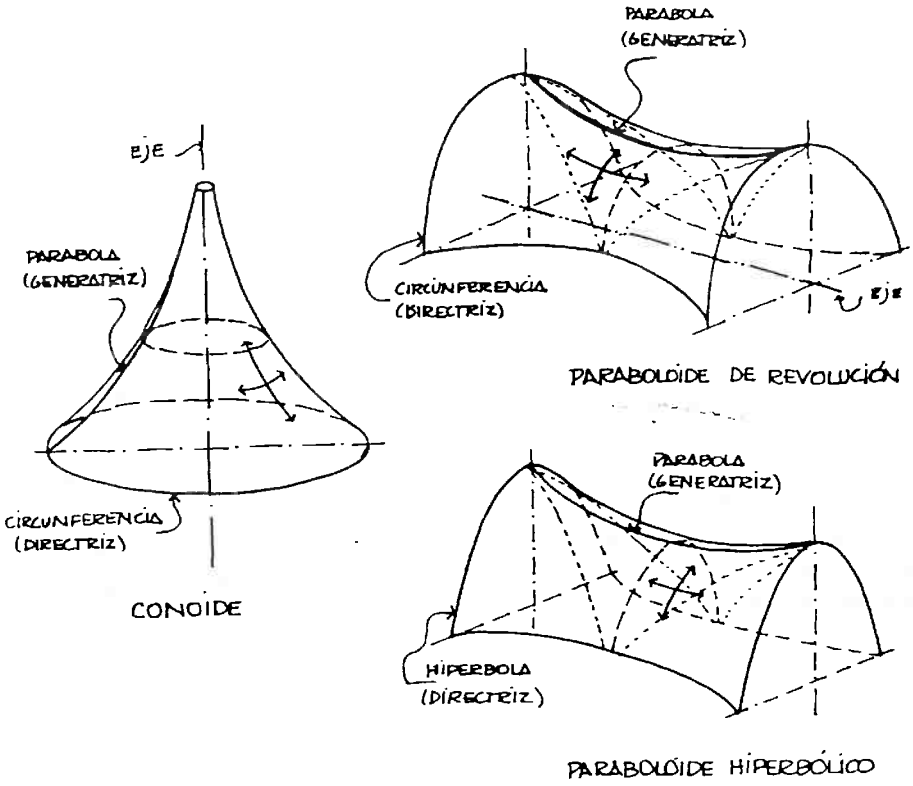


Figura 2.1. Superficies geométricas simples con curvatura anticlástica en todos sus puntos.

Geométricamente podemos definir, además, una cuarta forma anticlástica constituida por la parte interior de un «toro», obtenida al hacer girar media circunferencia como generatriz, alrededor de un eje exterior a la misma por su parte convexa (Fig. 2.2).

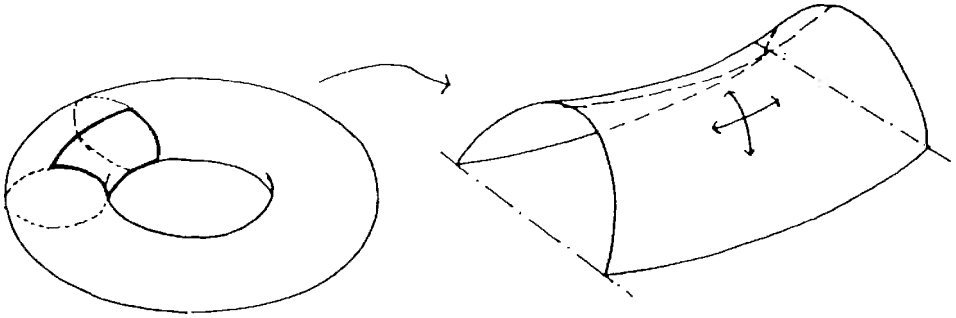
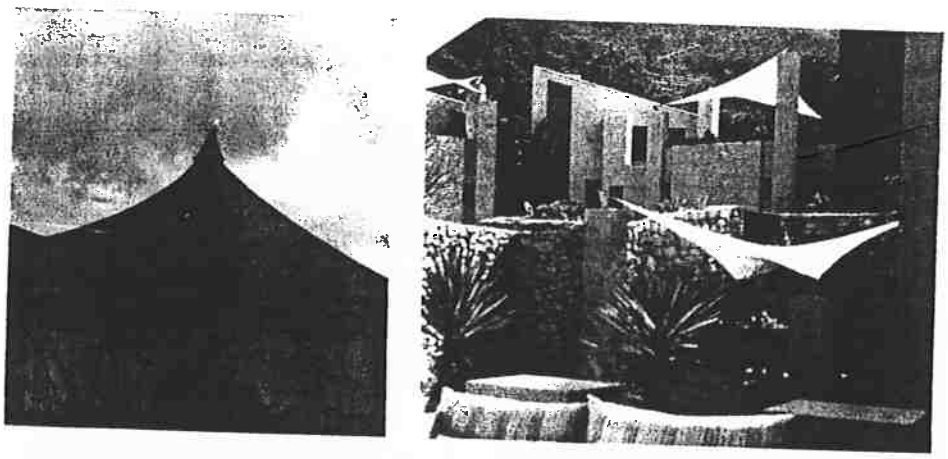


Figura 2.2. Interior del toro de revolución.

2.1.2. Vía «tensional»

A estos mismos tipos de figuras llegamos por la vía tensional. En efecto, si partimos de una membrana plana, por mucho que tensemos en todas las direcciones de su plano, no conseguiremos estabilizarla frente a esfuerzos perpendiculares al mismo. Para ello, no tendremos más remedio que deformar la membrana por alguno de sus puntos, introduciéndole un esfuerzo perpendicular. Si nos imaginamos una membrana elástica y le introducimos dicho esfuerzo en un punto interior (por ejemplo, en su centro) el resultado será un *conoide*, similar al obtenido geométricamente (Fig. 2.3).

Si, ahora, a la misma membrana plana le introducimos el esfuerzo deformante en sus bordes, elevando, por ejemplo, una de sus esquinas, el resultado será un paraboloide hiperbólico, igual también al geométrico.



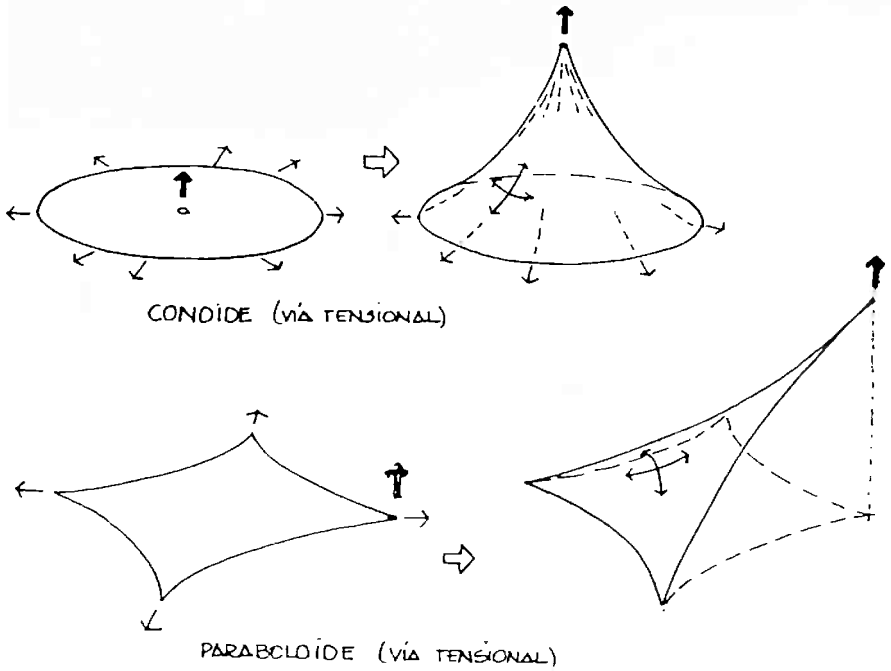
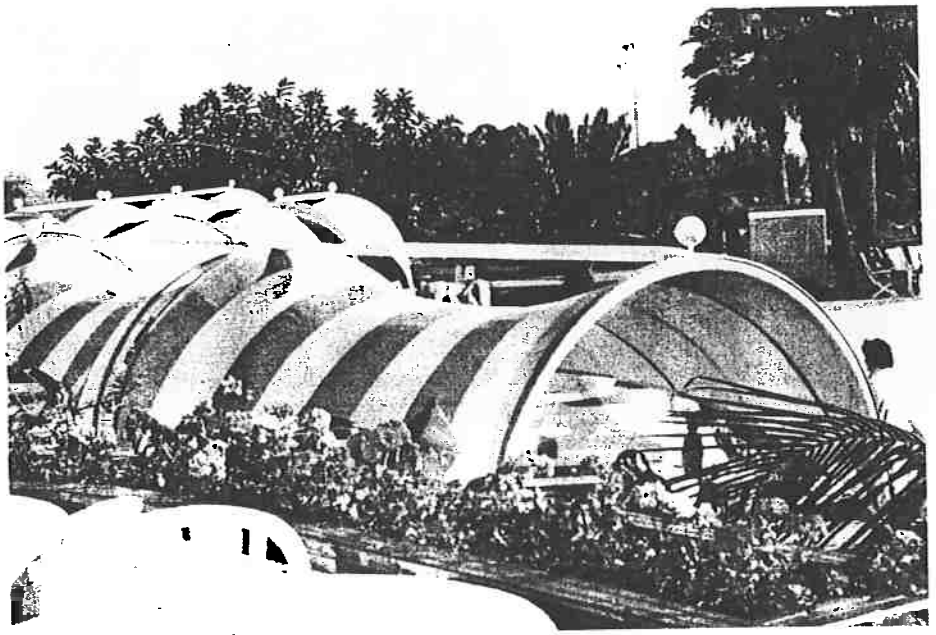


Figura 2.3. Generación de superficies anticlásticas por vía tensional-I.

Estas dos deformaciones, son las elementales e inmediatas para introducir estabilidad en la membrana plana tensada, y el proceso seguido expresa con claridad el logro tensional y formal. Por este procedimiento, podemos alcanzar también una forma geométrica similar a la de la parte interior del toro de revolución, como una variante de la deformación de la membrana por sus bordes, a base de elevar dos de ellos opuestos mediante sendas semicircunferencias paralelas (Fig. 2.4).

2.2. VARIANTES DE LAS FORMAS SIMPLES

De estos tres tipos básicos existen una gran cantidad de variantes formales que conviene mencionar. Para su análisis, seguiremos la vía que hemos llamado «tensional», por entenderla como más expresiva de la exigencia estructural de



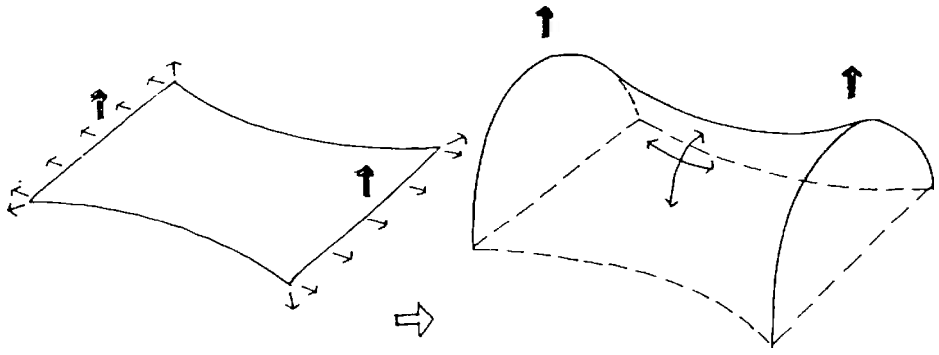


Figura 2.4. Generación de superficies anticlásticas por vía tensional-II.

estas membranas y más de acuerdo con su morfología «orgánica», de gran flexibilidad formal, así como con el procedimiento de diseño más usual en este tipo de arquitectura, a base de maquetas con membranas elásticas, tal como veremos en el capítulo correspondiente.

Para ello, siguiendo con la misma membrana plana del ejemplo, agruparemos las diversas variantes en dos conjuntos según que la deformación se lleve a cabo por el interior de la misma, o en su borde.

2.2.1. «Conoides»

Habíamos visto el conoide tipo, originado por una deformación puntual en el centro de la membrana y perpendicular a la misma. Las variantes más elementales resultarán, bien de introducir deformaciones puntuales asimétricas, bien de introducir deformaciones lineales.

2.2.1.1. «Conoides asimétricos» (Fig. 2.5)

Al introducir una deformación puntual asimétrica, resultarán formas similares a la de la figura aunque con una gran diversidad de soluciones formales que dependerá de la situación de la deformación y de la altura que alcance con respecto al plano original.

En muchos casos, el esfuerzo que debemos introducir es inclinado con respecto a la perpendicular al plano y esta nueva condición añade nuevas variaciones a la forma final.

En otras ocasiones, la deformación se produce en el borde y entonces nos aparece lo que podríamos denominar un «semiconoide», ya que esta forma sería la equivalencia a cortar por la mitad un conoide de revolución.

2.2.1.2. «Conoides lineales» (Fig. 2.6)

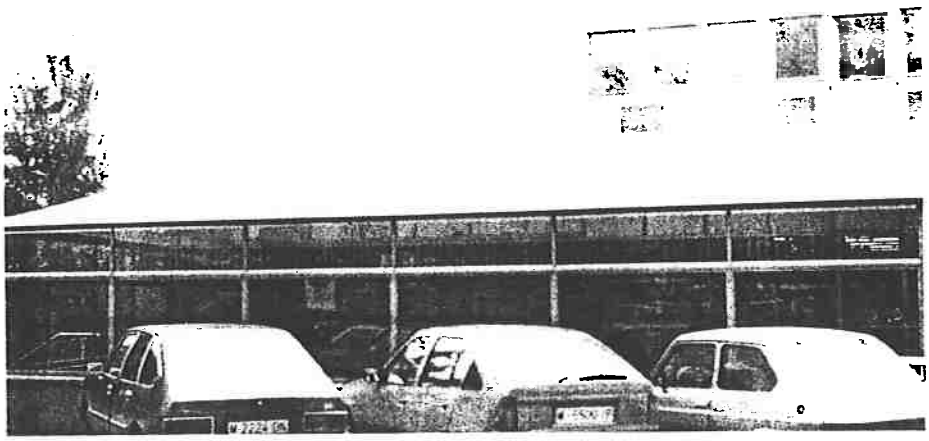
Podemos agrupar aquí todos aquellos casos en los que la deformación no sea puntual sino que siga una línea, la cual podrá ser, a su vez, recta o curva, y esta última estar contenida, o no, en un plano perpendicular al de la membrana inicial, y la recta ser paralela, o no, a dicho plano.

Por otra parte, la línea de deformación puede tener una situación central o simétrica con respecto a la membrana, o, por el contrario, ser asimétrica.

Todo ello da una gama de variaciones formales prácticamente inabarcable, para una misma solución funcional, lo que nos confirma en la «flexibilidad orgánica» antes mencionada.

2.2.2. «Paraboloides hiperbólicos»

En el ejemplo inicial, hemos planteado la solución tensional de la membrana elevando una de sus cuatro esquinas, consiguiendo un paraboloide hiperbólico simple. Comprendemos inmediatamente que existan otras muchas posibilidades de estabilización tensional por deformación del borde, que, de nuevo, podemos agrupar en función de que la deformación sea puntual o lineal y, a su vez, de que sea simple o múltiple. Veamos.



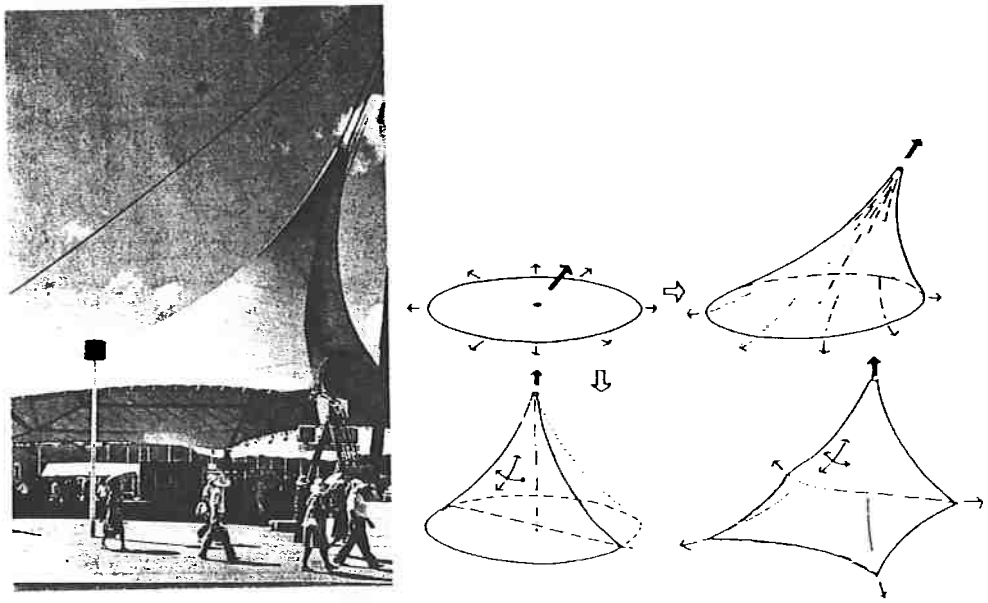


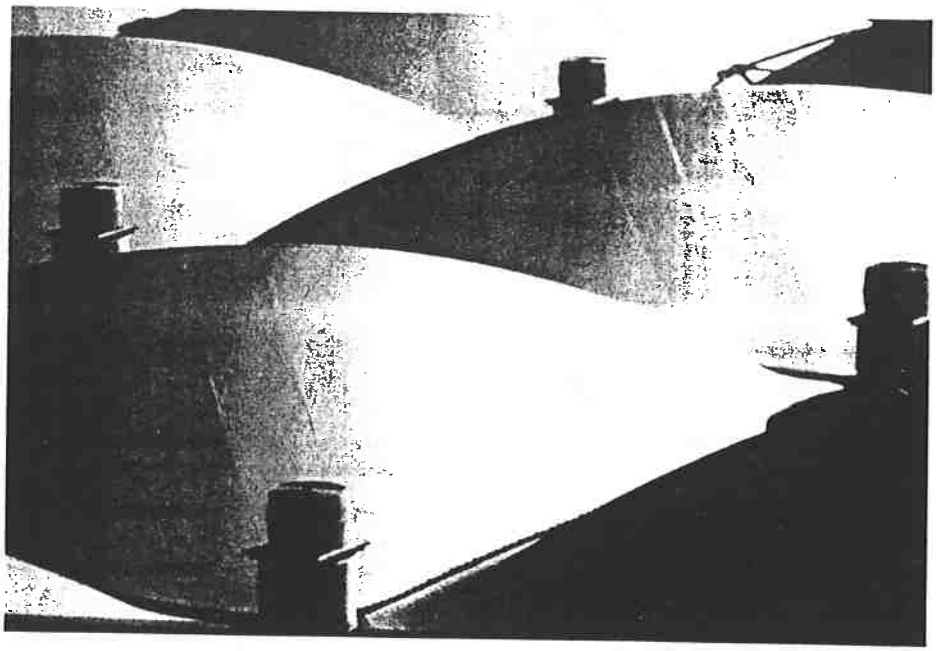
Figura 2.5. Conoides asimétricos y semiconoides.

2.2.2.1. *Deformaciones puntuales* (Fig. 2.7)

La misma solución indicada a base de elevar una de las cuatro esquinas, puede aceptar una serie de variaciones mediante su mayor o menor deformación o el complemento de deformación en el mismo sentido de la esquina situada en la diagonal, o de deformaciones combinadas de las cuatro esquinas.

Asimismo, si la membrana de partida no es cuadrada sino poligonal, las mismas variaciones anteriores se multiplican.

Por otra parte, podemos considerar la posibilidad de introducir deformaciones puntuales en el interior de cualquiera de los lados, obteniendo lo que podía-



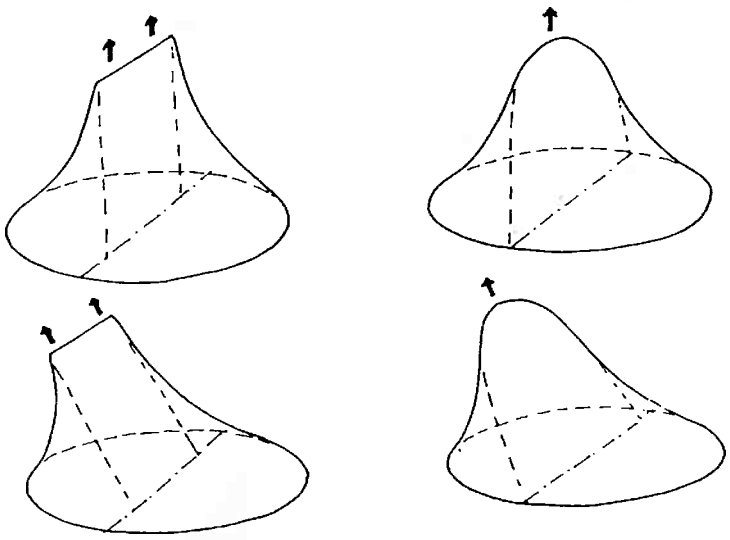


Figura 2.6. Conoides lineales.

mos llamar «*semiconoides*». Estos, a su vez, admiten variaciones de simetría y altura de deformación.

2.2.2.2. *Deformaciones lineales* (Fig. 2.8)

Si la deformación que introducimos es lineal, bien de un lado entero, bien de parte del mismo, aparecen nuevas formas que, aunque con cierta semejanza a las anteriores, abren nuevas posibilidades morfológicas. Incluso existe la posibilidad de combinar deformaciones lineales en unos lados, con puntuales en otros.

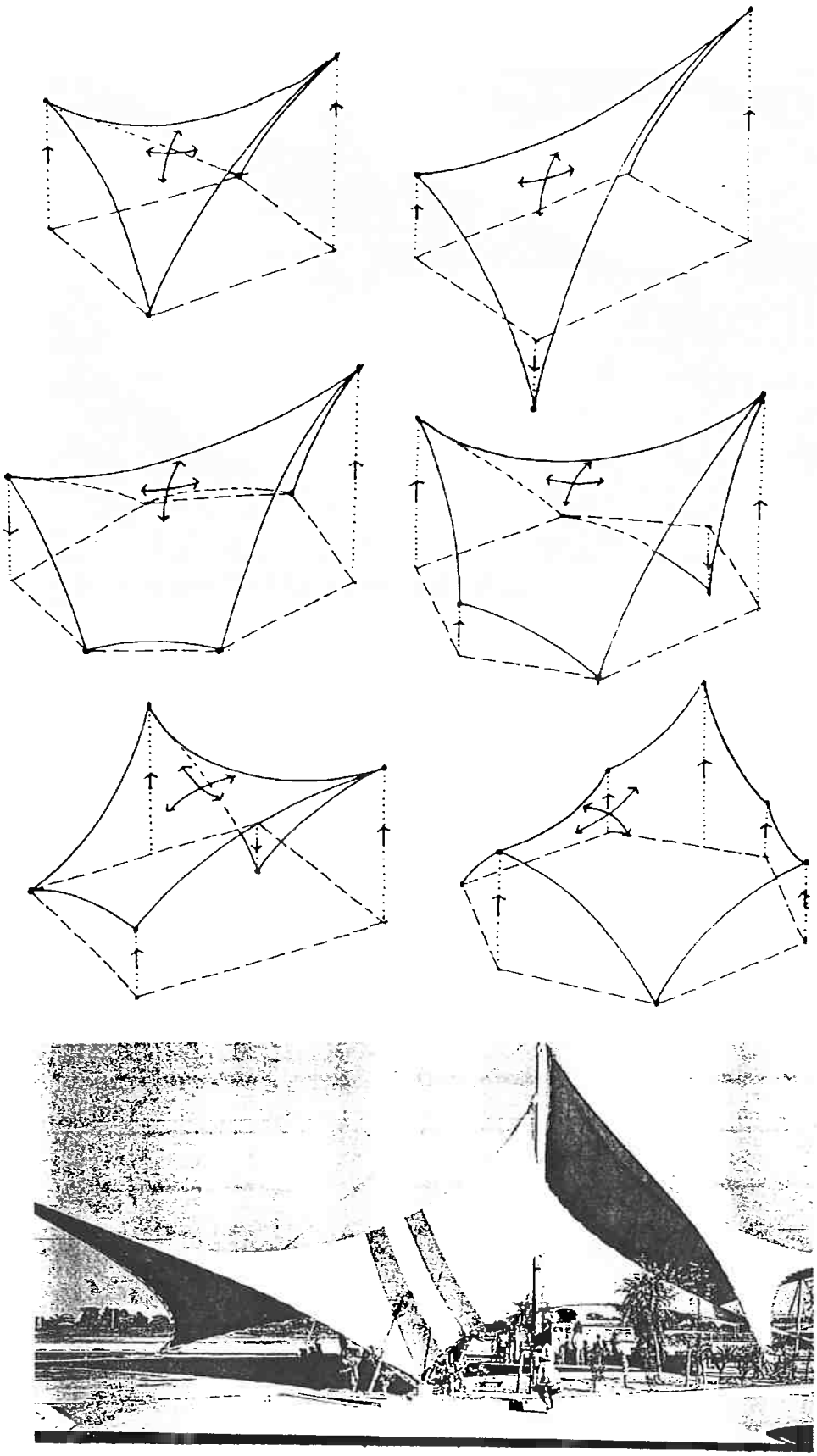
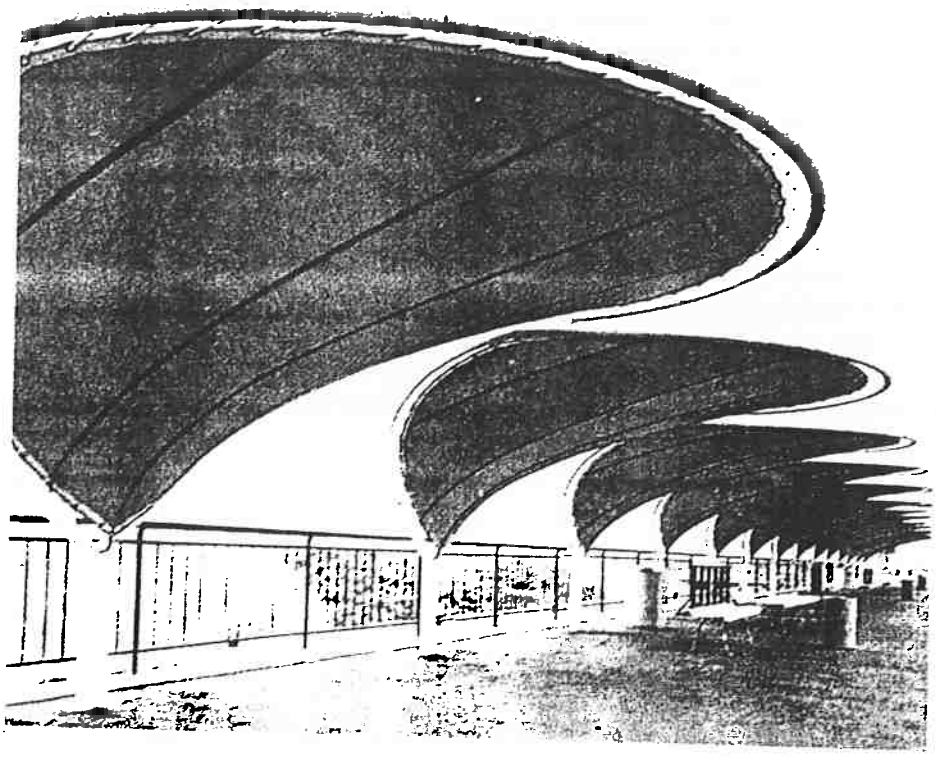


Figura 2.7 Paraboloides hiperbolicos de base poligonal por deformacion de puntos



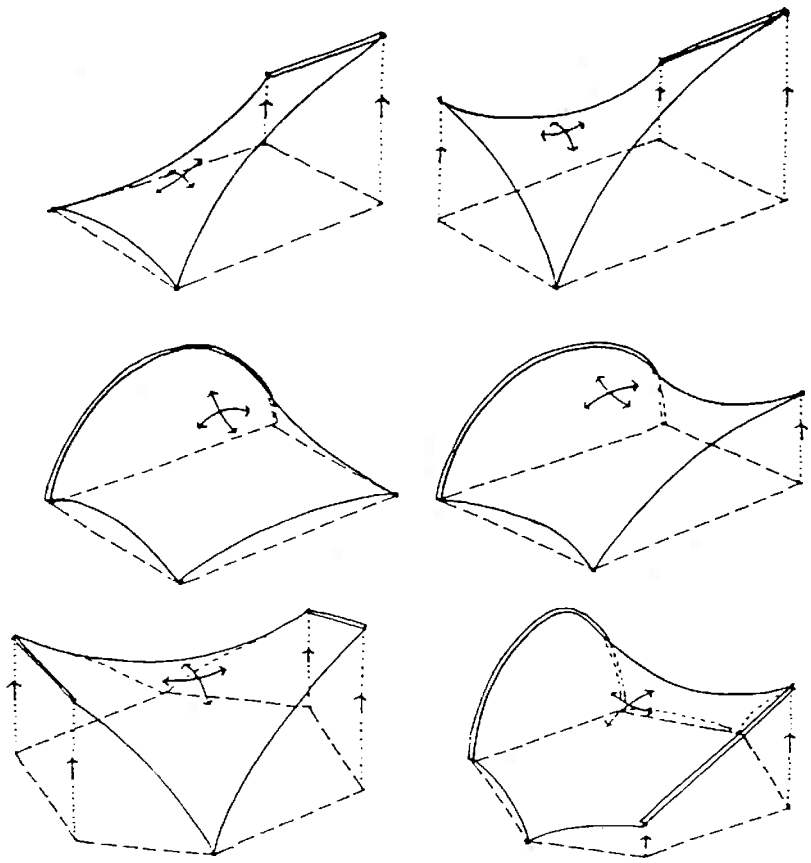


Figura 2.8 Paraboloides hiperbolicos de base poligonal por elevacion de lineas y mixtos.

Asimismo, la línea que introduce la deformación puede ser recta o curva y estar contenida en distintos planos, lo que aumenta el número de variaciones. De hecho, la superficie interior de un toro de revolución, mencionada más arriba, es uno de los casos posibles en el que introducimos deformaciones lineales curvas del mismo sentido en los dos lados de un cuadrado.

2.3. FORMAS COMPUESTAS

Podemos considerar como forma compuesta la combinación de cualquiera de las formas simples vistas hasta ahora. Ello nos llevará a un número tal de posibilidades que será prácticamente imposible analizarlas. Por ello tenemos que buscar un camino de tipificación simple que puede consistir en reunir todas las posibilidades en los tres grupos que resultan de la combinación, dos a dos, de las formas básicas estudiadas, a saber.

— Conoide - Conoide

— Conoide - Paraboloide

— Paraboloide - Paraboloide

2.3.1. **Conoide - Conoide** (Fig. 2.9)

Esta combinación aparece como consecuencia de introducir dos o más deformaciones puntuales. De nuevo, las posibilidades formales son numerosas como

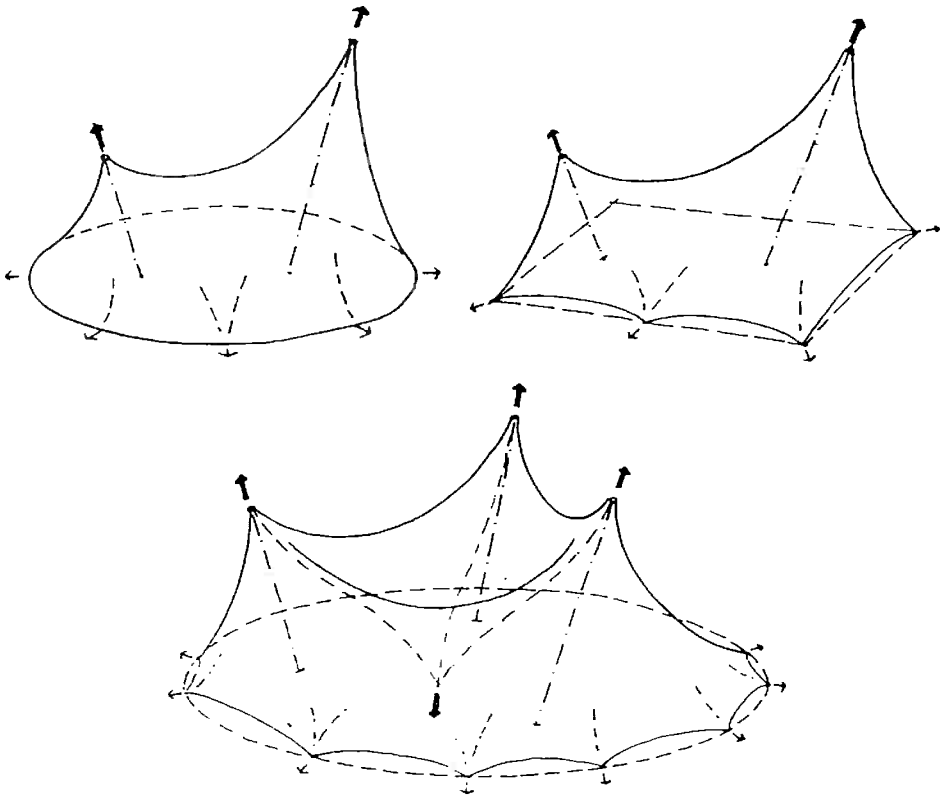
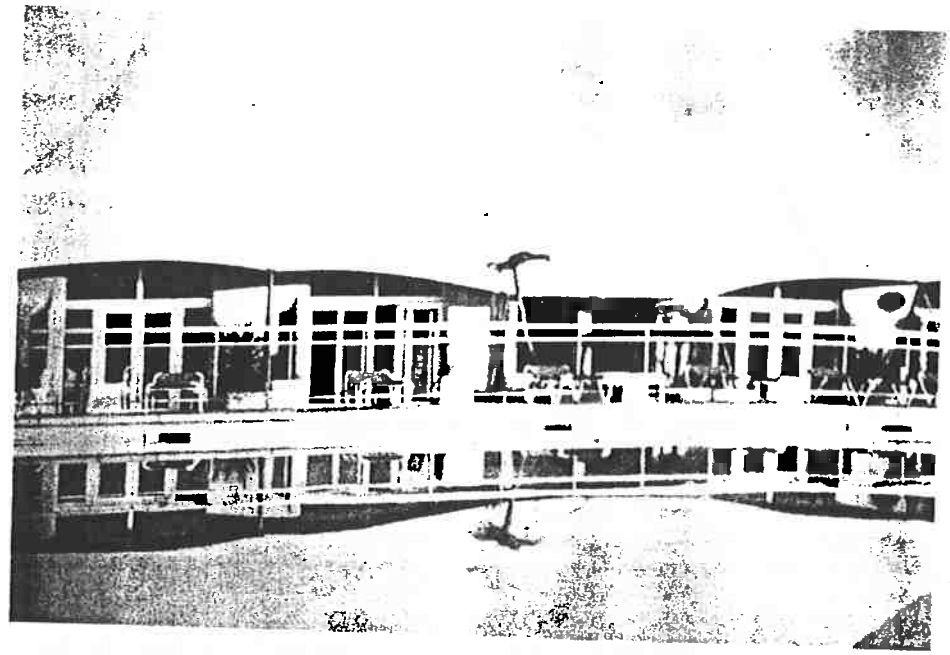


Figura 2.9. Combinación de conoides.



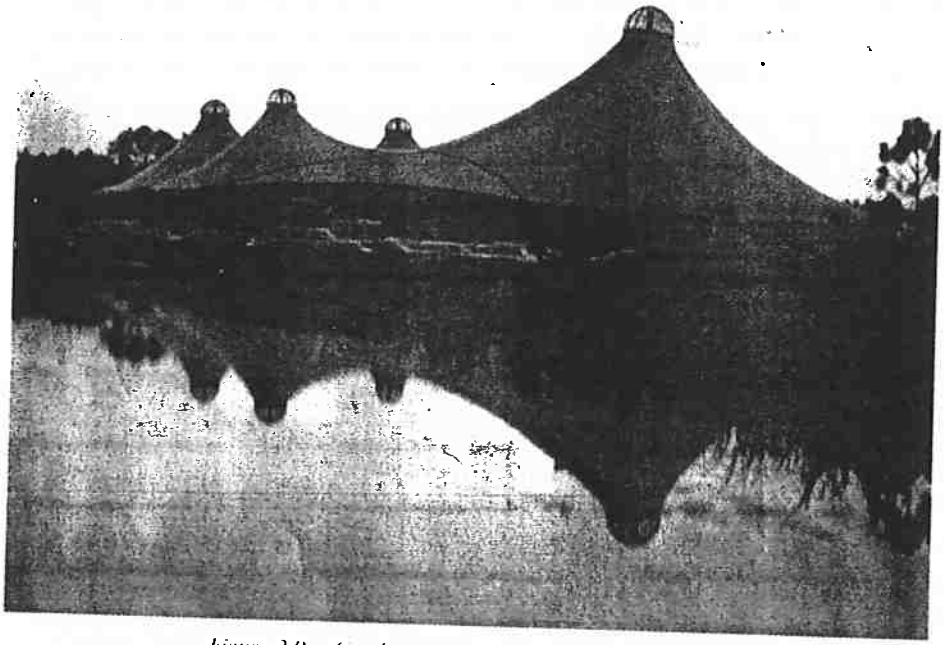


Figura 2.9. Combinación de conoides (continuación).

consecuencia de las distintas variables que entran en juego, a saber, número de puntos de deformación, situación y altura de los mismos, etc.

Un caso singular aparece cuando el número es superior a dos. Entonces, su situación relativa puede dejar una zona intermedia de curvatura sinclástica, con concavidad hacia arriba, y, por tanto, inestable. En ese caso, necesitamos introducir una nueva deformación en el interior de esa zona y con signo contrario, resultando un «conoide negativo», que recoge las tensiones hacia arriba de los conoides positivos adyacentes.

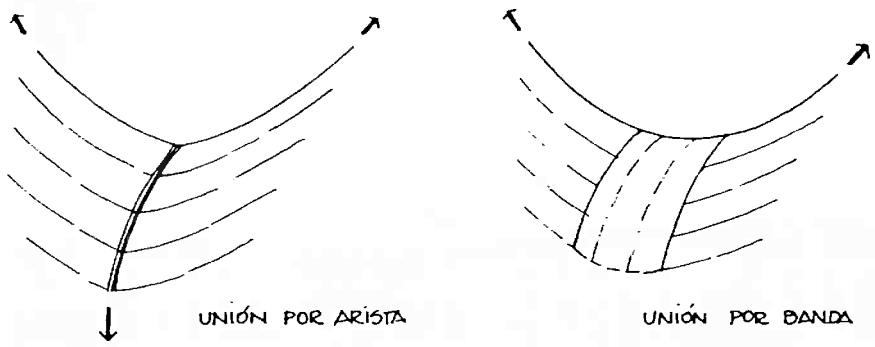


Figura 2.10. Tipos de unión entre superficies.

Por otra parte, la unión entre los distintos conoides puede ser de dos tipos, cualquiera de ellos manteniendo la estabilidad tensional (Fig. 2.10).

— Con *arista viva,* mediante un elemento lineal flexible y tensado (normalmente, un cable) que introduce y mantiene los esfuerzos hacia abajo de los conoides positivos que en ella se unen.

— Con *banda de unión,* cuando ésta no tiene solución de continuidad, constituida por una superficie intermedia similar a un paraboloide hiperbólico alargado (o a la superficie interior de un toro de revolución) recogiendo también los esfuerzos hacia abajo que mantienen en tensión los conoides adyacentes.

En realidad, por la vía tensional que estamos siguiendo, al introducir la deformación múltiple en la membrana plana, el tipo de unión que aparece naturalmente es la de la banda. La arista sólo surge cuando introducimos el cable que colabora en los esfuerzos hacia abajo, bien por razones estructurales, bien por razones simplemente formales.

2.3.2. **Paraboloide - Paraboloide** (Fig. 2.11)

Suele aparecer como yuxtaposición de paraboloides por sus aristas, sean éstas en línea recta o, caso más general, en líneas curvas.

Resulta una forma muy útil para cubrir grandes superficies (Fig. 2.12) y pueden ser de disposición paralela o radial.

También aquí podemos considerar los dos tipos de unión (en banda o en arista) mencionadas en el punto anterior, aunque quizás la más corriente sea la de arista con la ayuda de cables que introducen esfuerzos hacia arriba y hacia abajo, sobre todo en los casos de grandes dimensiones.

Cuando se trata de la yuxtaposición de dos paraboloides, estamos, en realidad, ante uno de los casos ya comentados en las variantes de las formas simples como conoides de deformación lineal. También la unión de varios de ellos nos da la forma compuesta que estamos estudiando.

En definitiva, se trata, como siempre, de introducir varias deformaciones lineales en la membrana plana de partida, tanto interiores como exteriores, siendo necesariamente unas positivas (con tensión hacia arriba) y otras negativas (con tensión hacia abajo).

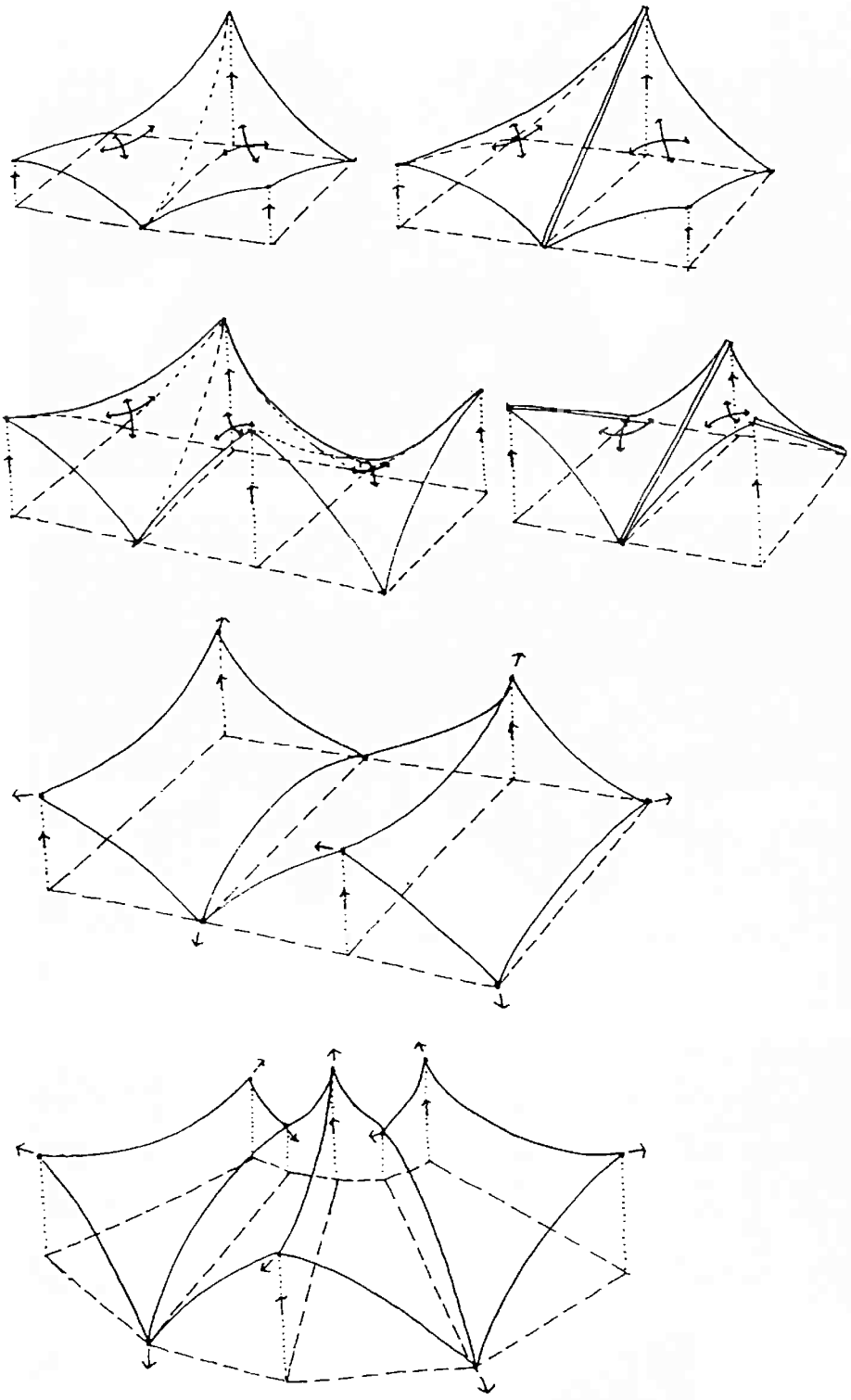


Figura 2.11. Combinacion de paraboloides.

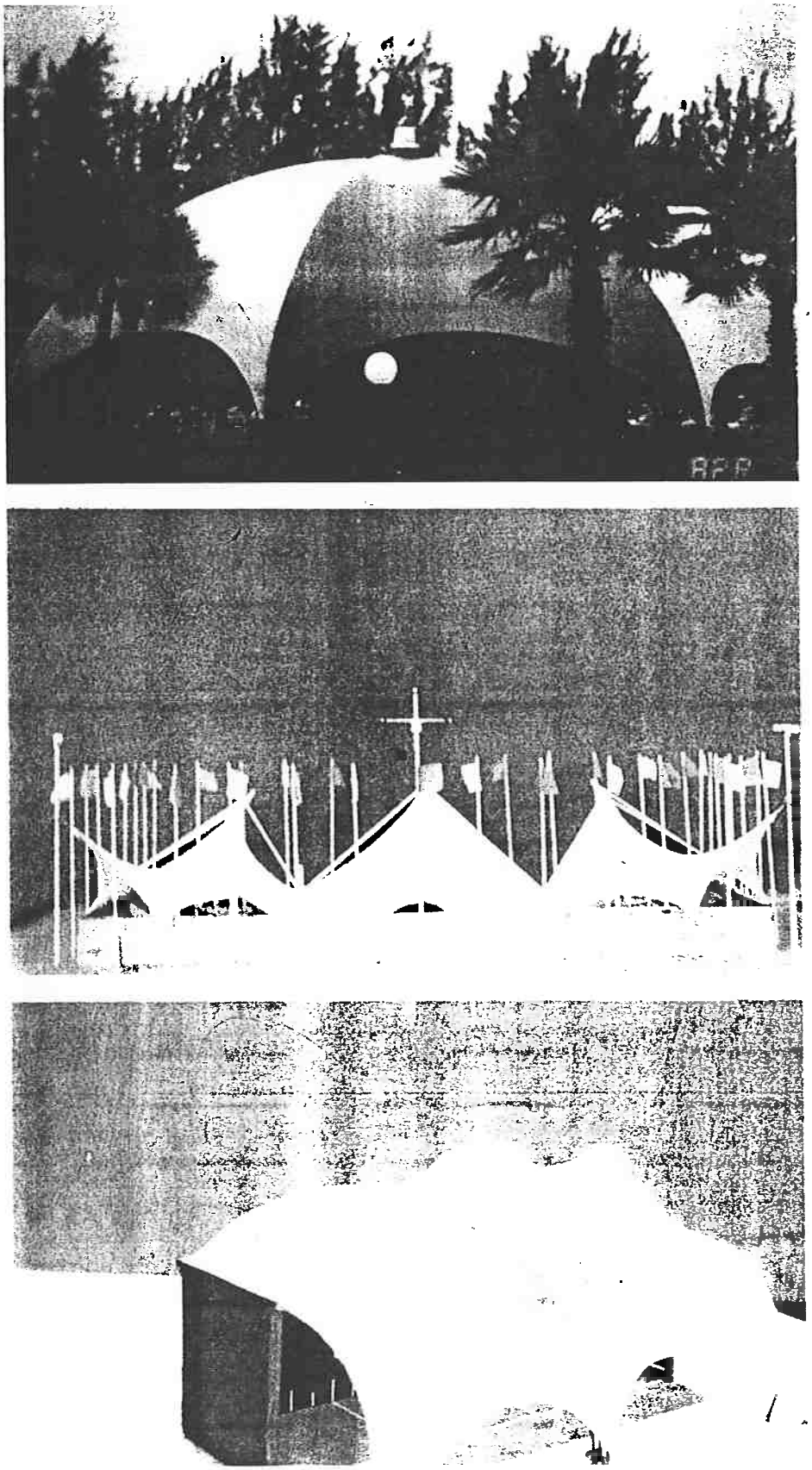


Figura 2.12. Paraboloides combinados.

2.3.3. Conoide - Paraboloide (Fig. 2.13)

Si, ahora, combinamos deformaciones puntuales con otras lineales, o deformaciones interiores con exteriores, sean lineales o puntuales, tendremos otro gran grupo de inmensa variedad formal, ya que entran en juego un número importante de variables (puntual o lineal, interior o exterior, altura, deformación, etc.).

Como en los casos anteriores, la unión entre las distintas formas simples podrá ser por arista o por banda y, asimismo, tendrá que haber deformaciones en los dos sentidos (positivas y negativas) para poder tener esfuerzos hacia arriba y esfuerzos hacia abajo que nos aseguren el mantenimiento de la tensión, de la anticlasticidad de todos los puntos de la superficie y, por tanto, de la estabilidad del conjunto.

2.4. CONCLUSION

En definitiva, hemos tratado de agrupar de un modo muy sintético, el gran número de variaciones formales que pueden aparecer a partir de las dos superficies anticlásticas que hemos denominado simples (conoides y paraboloide hiperbólico) a las que se puede llegar, tanto por la vía «geométrica», con

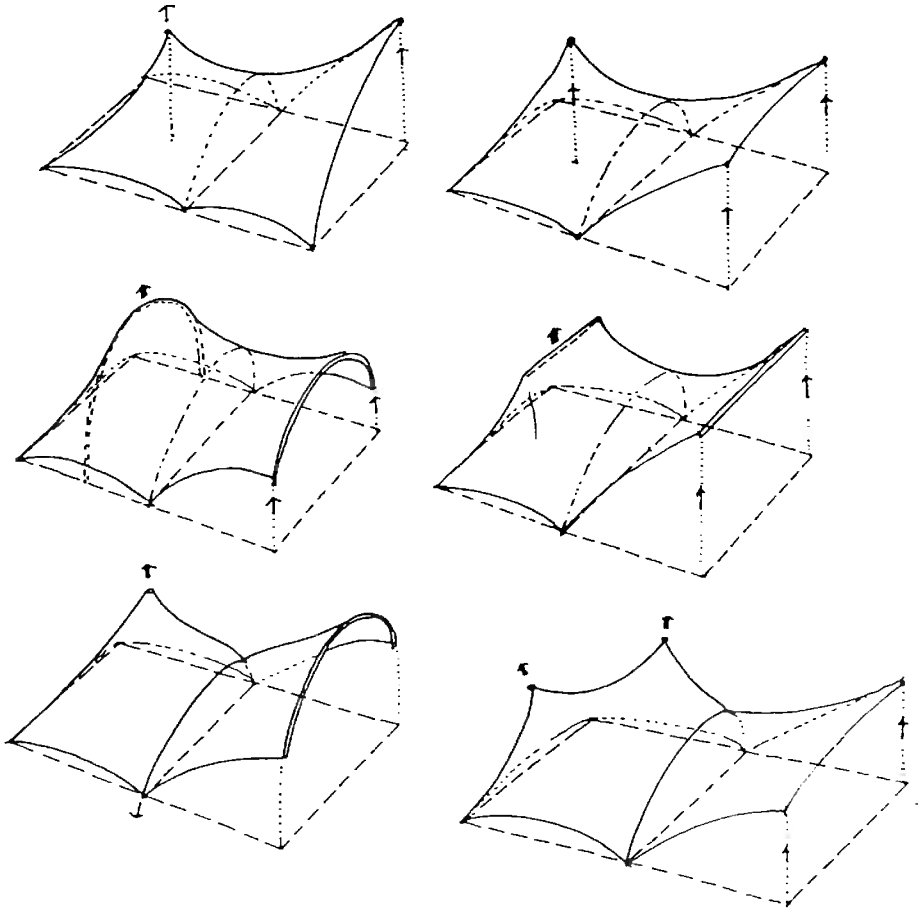


Figura 2.13. Combinación de conoides y paraboloides con deformaciones puntuales y lineales.

posible definición analítica, como por la vía «tensional», más expresiva de los requerimientos de estabilización de la membrana estructural en cuestión.

Esta última vía, que es, en definitiva, la utilizada en el proceso de diseño más usual, mediante maquetas con mallas flexibles, nos permite comprobar, de hecho, el gran número de posibilidades formales para una misma solución funcional, aunque la forma resultante sea imposible de definir en la práctica por métodos analíticos, o simplemente geométricos. Y ahí es, precisamente, donde juega su papel la creatividad del diseñador, creatividad que se debe basar, necesariamente, en el conocimiento de las exigencias tecnológicas apuntadas en el capítulo I y que se resumen en la anticlasticidad de la forma en todos los puntos de la superficie, así como en la situación bitensional de tracción en sentidos opuestos en cada uno de ellos.

De esas exigencias tecnológicas y de su análisis, vamos a hablar en los capítulos siguientes.

Capítulo 3

Análisis estructural previo

Las formas anticlásticas que dan origen a la gran variedad morfológica apuntada en el capítulo anterior, posibilitan, como hemos visto, la existencia de una tensión múltiple y de sentidos y planos opuestos en cada uno de los puntos de la membrana que le dan estabilidad.

Estas tensiones, que se pueden agrupar, de acuerdo con Host Berger, en «esfuerzos hacia arriba» y «esfuerzos hacia abajo» en el conjunto de la cubierta, recorren toda la membrana, desde los puntos de apoyo más altos hasta los de anclaje, y son los que introducen el estado tensional que debemos tratar de conocer en cada caso, para poder comprobar la estabilidad del conjunto antes de su ejecución, o introducir las correcciones pertinentes para alcanzar dicha estabilidad.

Naturalmente, el conocimiento del estado tensional entra de lleno en el ámbito del cálculo estructural de esas membranas tensionadas, y algo de ello hablaremos en el último capítulo.

No obstante, parece interesante hacer, ahora, un breve análisis estructural previo de las formas simples estudiadas en el capítulo anterior, con objeto de facilitar la compresión de los temas constructivos que debemos tratar en los capítulos siguientes. Para ello será necesario mencionar, previamente, los fundamentos generales en los que se basa la estabilidad tensional y su cálculo.

3.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

La búsqueda del equilibrio tensional de una membrana colgada está en función de dos parámetros básicos:

— La curvatura anticlástica en cada punto de su superficie.

— Las tensiones de estabilización, «pretensiones», que le apliquemos en el montaje.

Ambas, están íntimamente relacionadas y en función de ellas podemos obtener la tensión en cada punto.

Sabemos que el equilibrio en cada uno de dichos puntos, en una superficie sinclástica sometida a cargas perpendiculares está en función de la fórmula.

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = P$$

Donde T_1 y T_2 son las tensiones en las dos líneas principales de curvatura que se cruzan en el punto, R_1 y R_2 son los radios de curvatura correspondientes, y P es el resumen del conjunto de esfuerzos exteriores en dicho punto (Fig. 3.1). Por extensión, y a falta de otra fórmula más precisa, la mayoría de autores aplican ésta también a superficies anticlásticas como las que nos ocupan.

Esta imagen tensional se entiende mejor con una malla ortogonal que recogiese las dos líneas principales de curvatura que pasan por cada punto (pertenecientes a las dos familias de cables de la malla) con su tensión y su radio de curvatura cada una.

En las membranas sinclásticas, para una situación de equilibrio en un estado de «reposo» de agentes exteriores (viento, nieve, etc.) necesitamos introducir un esfuerzo determinado P, que se consigue con presión de aire. Por el contrario, en una membrana con curvatura anticlástica, podemos conseguir el equilibrio sin más que generar tensiones T_1 y T_2 que se contrarresten, en base a la mencionada «pretensión». Entonces, podemos considerar P = 0 y la fórmula nos queda:

$$\frac{T_1}{R_1} = \frac{T_2}{R_2}$$

que es la que podemos utilizar para el cálculo del estado tensional en reposo en nuestro caso.

De la misma fórmula ya se deduce la importancia que adquiere el radio de curvatura correspondiente a cada línea tensional. Si el radio es pequeño, la tensión también disminuye para mantener el cociente y, por tanto, el equilibrio de fuerzas. Por el contrario, a mayor radio de curvatura, mayor será la tensión según esa línea.

En este sentido, algunos autores (Malinowsky, entre ellos) recomiendan no superar radios de curvatura de 20 m, en general, en cubiertas simples, para no entrar en altas tensiones.

El problema, en algunos casos, será determinar cuáles son los radios de curvatura principales. Ello depende de cada caso. En las formas generadas por líneas directriz y generatriz, no hay duda de que esas son las direcciones principales en las que hay que considerar los radios. Cuando la forma la generamos mediante mallas de barras ortogonales, ésas nos darán también las direcciones a considerar. En los otros casos, deberemos estudiarlo individualmente y para ello nos puede ayudar la maqueta de trabajo, considerando, sobre todo, los puntos de anclaje y los bordes.

A la vista de estas consideraciones de las membranas en reposo, veamos su funcionamiento estructural en los tipos básicos.

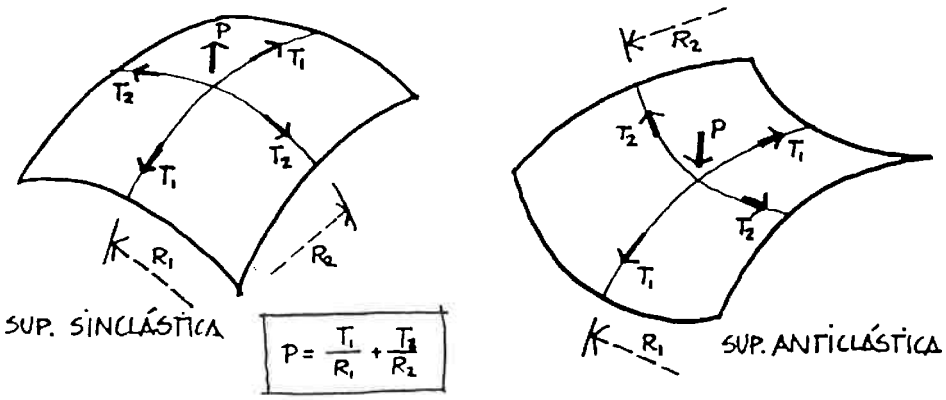


Figura 3.1 Estabilización de una membrana en función de los esfuerzos exteriores «P» y las tensiones tangenciales «T».

3.2. PARABOLOIDES DE REVOLUCION O CONOIDES

Si a la membrana del ejemplo utilizado en el capítulo anterior le elevamos un punto central (Fig. 3.2) tenderá a adquirir la forma de una paraboloide de revolución, que presentará curvatura anticlástica en todos sus puntos, ya que si elegimos uno cualquiera y lo cortamos por dos planos perpendiculares, uno vertical y otro horizontal, tendremos dos curvas de distinto sentido; parábola hacia arriba en el vertical, y circunferencia hacia adentro en el horizontal que nos permitirán conferir la estabilidad necesaria, ya que son consecuencia de la tensión que se genera en la membrana al someterla a una deformación fuera de su plano vertical.

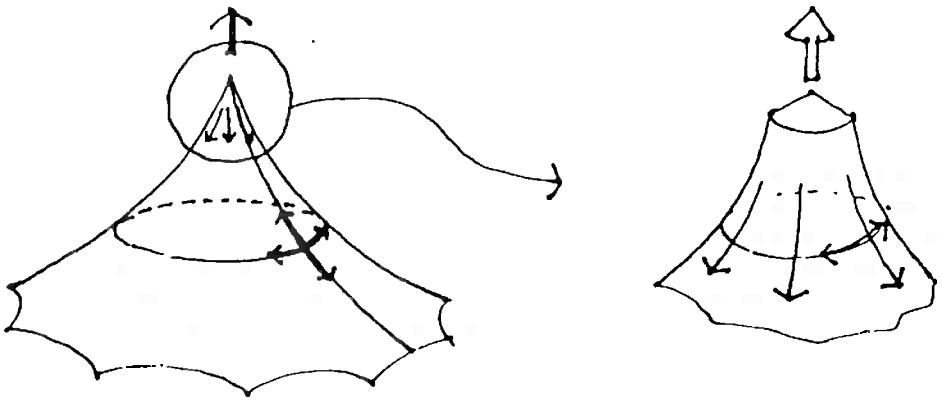


Figura 3.2. Tensiones en un conoide de revolución.

Cualquier corte que realicemos en cualquier punto nos dará curvaturas de sentidos opuestos, unas hacia arriba y otras hacia abajo, con distintos radios (más cerradas o más abiertas) y, por tanto, con distintos valores de las tensiones que en ellas se generen. Está claro que en el vértice superior, se concentrarán tensiones hacia abajo en las curvaturas contenidas en los planos verticales, como reacción al esfuerzo hacia arriba puntual que hemos necesitado para deformar la membrana.

En los planos horizontales próximos a este vértice, sin embargo, las tensiones que aparezcan serán muy pequeñas al ser la curvatura muy pronunciada, con el peligro, incluso, de que desaparezcan las tracciones y surjan compresiones, resultando arrugas verticales, lo que nos obligará a asegurar la pretensión en estas zonas disminuyendo, como veremos, la dimensión de la membrana en este sentido.

A medida que vamos bajando en los cortes horizontales, el radio de curvatura aumenta y así las tensiones en estos planos, hasta llegar a la proximidades del borde inferior, donde las tensiones horizontales son máximas y las contenidas en los planos verticales radiales van disminuyendo, al repartir en una superficie más amplia el esfuerzo originado por la deformación de la membrana. Sin embargo, en el borde mismo, el panorama de las tensiones sufre variaciones para adaptarse al sistema de anclaje perimetral que, en cualquier caso, conviene analizar.

En primer lugar, la superficie en el borde es la que tiene los radios de curvatura más grandes en todos los sentidos, por lo que la anticlasticidad disminuye

y así también la estabilidad de la zona. En definitiva, la tela permanece ahí más plana y, por tanto, más deformable ante esfuerzos perpendiculares.

Esto exige, para esta zona, con carácter general, un estudio específico de su situación tensional, pudiendo llegar, bien a introducir curvaturas complementarias, bien a aumentar la pretensión de montaje, directamente o por reducción de la cantidad de tela.

Por otra parte, la situación será distinta en función del tipo de borde y del tipo de anclaje.

3.2.1. Conoides de base circular

Si partimos de una membrana circular y la deformación puntual se produce en el centro geométrico del círculo de un modo perpendicular, es evidente que las deformaciones serán simétricas alrededor de ese eje y, por tanto, también lo serán las tensiones radiales y tangenciales concéntricas que se produzcan (Fig. 3.3).

Por otro lado, para que se mantenga el borde circular debemos mantenerlo sujeto en toda su longitud, es decir, el anclaje del borde deberá ser continuo. Siendo así, las tensiones concéntricas en los planos horizontales irán progresivamente aumentando desde el vértice hasta el borde, aunque al llegar a éste se producirá una disminución de la tensión hasta anularla en el borde mismo, ya que las tensiones correspondientes a este último plano serán absorbidas por el propio anclaje, dejando la membrana liberada de las mismas.

En esta franja perimetral, pueden aparecer arrugas perpendiculares al perímetro por falta de tensión de tracción, arrugas que sólo podrán anularse en base a la tracción previa (pretensión) que le incorporemos en el anclaje.

Si este anclaje perimetral lo llevamos a cabo por puntos repartidos en la circunferencia de borde a distancias iguales, nos aparecerán unas deformaciones

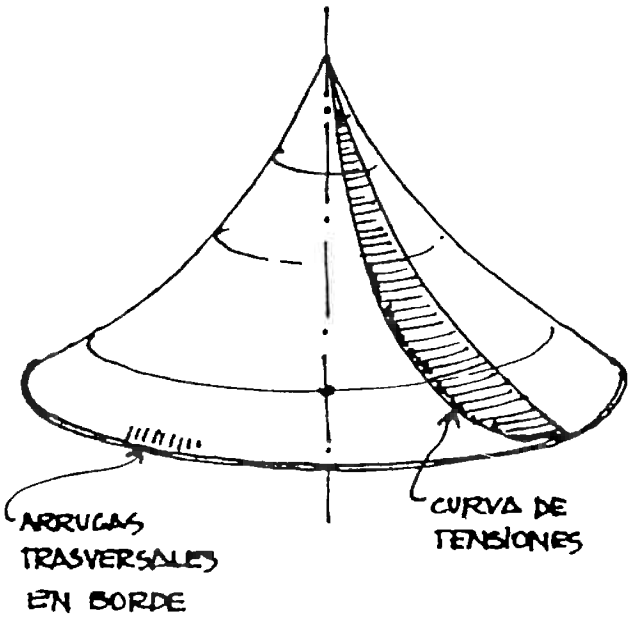


Figura 3.3 Conoide de base circular con anclaje perimetral continuo.

repetidas en los mismos que nos llevan a concentrar las tensiones, tanto horizontales como verticales, en los puntos de anclaje («puños») en donde todavía se podrán producir arrugas radiales por falta de tensión en los planos horizontales. Sin embargo, en las zonas entre anclajes (catenarias) esta tensión se mantiene lo suficientemente alta como para anular las posibles arrugas, aunque, en cualquier caso, en la misma línea de borde, existe una absorción de la tensión por ésta («la relinga») que puede provocar la aparición de «micro arrugas» perpendiculares a dicho borde (Fig. 3.4).

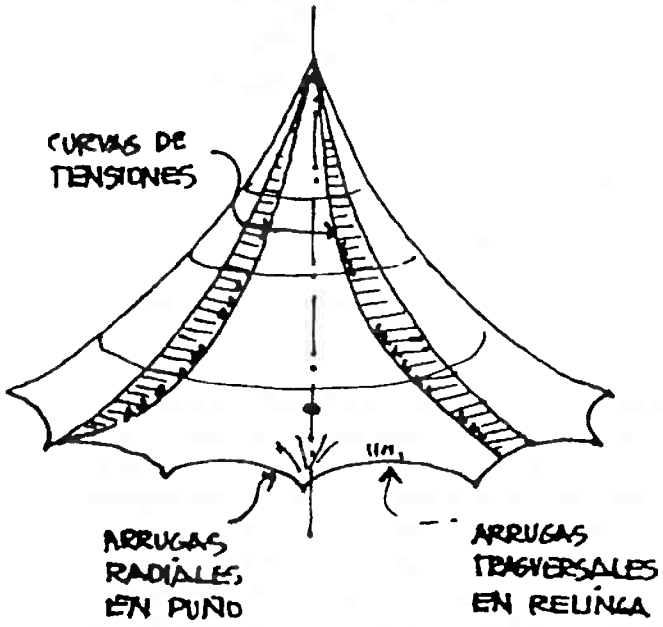


Figura 3.4. Conoide con anclaje perimetral por puntos.

3.2.2. Conoides piramidales o de base cuadrada

Si, ahora (Fig. 3.5), partimos de una membrana cuadrada y realizamos la misma operación de deformación puntal y perpendicular en el centro geométrico, en el vértice, el estado de deformaciones y tensiones será sensiblemente igual al que hemos visto en el caso anterior. Sin embargo, a medida que vamos bajando, la sección horizontal va dejando de ser una circunferencia para ir pasando al cuadrado de la base, por lo que, al perderse la simetría radial, las tensiones, tanto horizontales como verticales, dejan de ser uniformes de un modo radial y se concentran del siguiente modo:

Las de dirección radial (contenidas en los planos radiales verticales) tienden a concentrarse en las líneas parabólicas que unen el vértice central con las cuatro esquinas, ya que la curvatura de dichas parábolas es mayor al estar los puntos de anclajes más lejanos.

Las concéntricas, por el contrario, son mayores en las zonas entre esquinas, ya que en ellas la curvatura horizontal es mayor, y, en cualquier caso, va aumentando a medida que vamos bajando, ya que se va perdiendo curvatura hasta llegar a la base cuadrada.

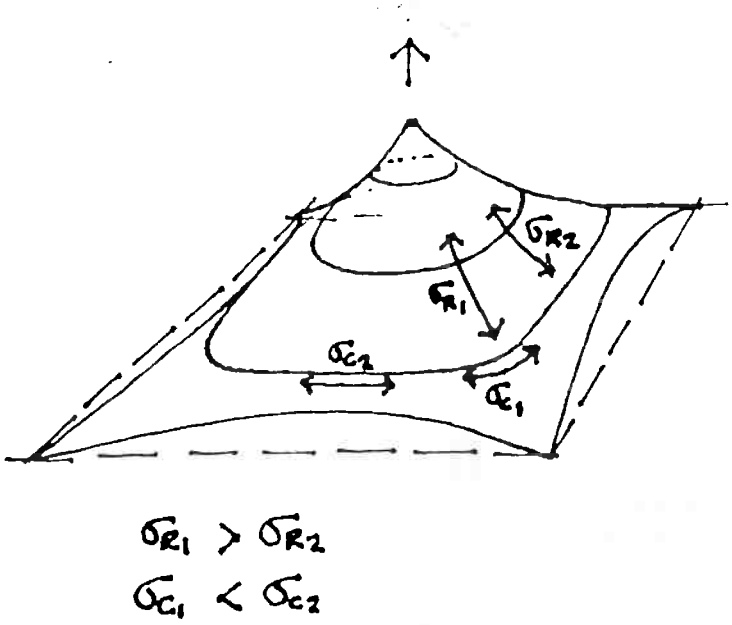


Figura 3.5. Conoide de base poligonal con anclaje puntual.

Si el anclaje de dicha base es continuo, con la suficiente rigidez en el borde, nos encontramos con un problema parecido al de base circular, pero más pronunciado en lo que se refiere a la planidad de la zona próxima a los lados del cuadrado, en contraste con la fuerte curvatura de las esquinas. Esto hará que puedan aparecer arrugas horizontales, paralelas a la base, en los lados rectilíneos, acompañadas de otras radiales en los vértices. Para eliminarlas, no tendremos más remedio que recurrir a aumentar la pretensión de un modo directo (activo) o indirecto, a base de disminuir la cantidad de tela en los lados rectilíneos (Fig. 3.6) lo que comentaremos al hablar de la confección.

Si el anclaje es por puntos (Fig. 3.7) aparece una deformación del borde de la membrana hacia el centro, hasta formar catenarias similares a las de base circular en función del número de anclajes. Suponiendo que éstos están sólo en los ángulos, dichas catenarias tienden a estar contenidas en el plano que forma el lado de la base con esos ángulos, por lo que la membrana en su

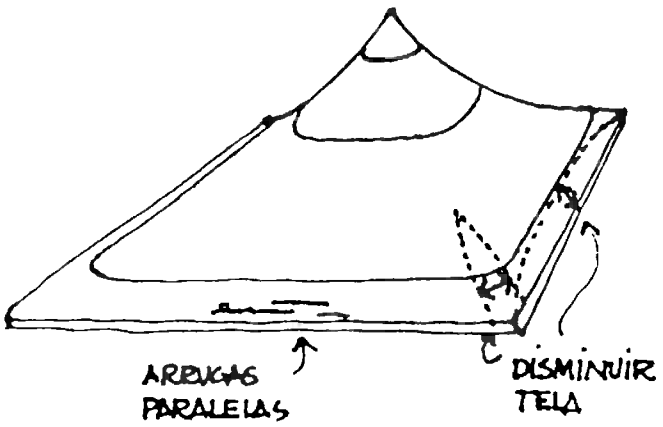


Figura 3.6. Conoide de base poligonal con anclaje continuo.

entorno tiende también al plano, aunque mantenga algo de curvatura en una sección horizontal, mayor cuanto más pronunciada sea la deformación, por encontrarnos más cerca del vértice central.

También nos podrán aparecer microarrugas perpendiculares al borde, a lo largo de la relinga, y otras radiales en los puños de anclajes, arrugas para las que debemos recurrir, como refuerzo, al aumento de la pretensión.

Lo analizado para la membrana de base cuadrada es igualmente válido para bases poligonales de distintos números de lados y distintas simetrías o asimetrías, con las posibles concentraciones desiguales de esfuerzos en función de éstas.

Asimismo, tanto para conoides de base circular, como para los de base cuadrada o poligonal, el estudio esbozado es extrapolable a los casos en que la deformación fuera del plano no se realiza en el centro de la base o no es perpendicular a la misma. Lógicamente en estos casos la concentración de tensiones varía en función de los diferentes condicionantes formales, aunque manteniéndose los criterios básicos establecidos más arriba.

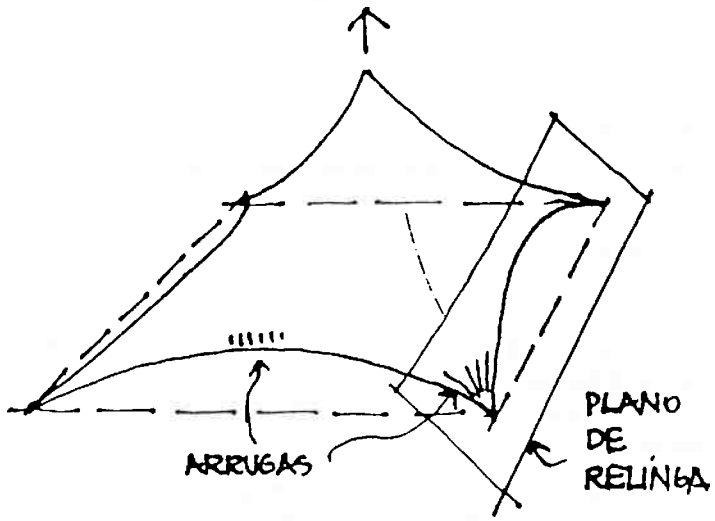


Figura 3.7. Deformaciones en el anclaje puntual.

3.2.3. Conoides de vértice lineal

Este título, que parece un contrasentido, pretende englobar todos aquellos casos en que la deformación de la membrana del ejemplo se lleva a cabo, no mediante puntos, sino por líneas (Fig. 3.8).

El estado tensional del conjunto no varía en el perímetro, pero sí lo hace en la línea elevada. Esta puede ser rectilínea (mediante un dintel) o curvilínea (mediante un arco positivo). Los casos en que la curva tenga forma de catenaria se asemejará a la unión de dos conoides, que veremos más adelante.

En cualquier caso, el estado tensional de la membrana en la parte alta dependerá de dos factores: la forma de la línea de apoyo y el sistema de fijación de la membrana en ella; veamos.

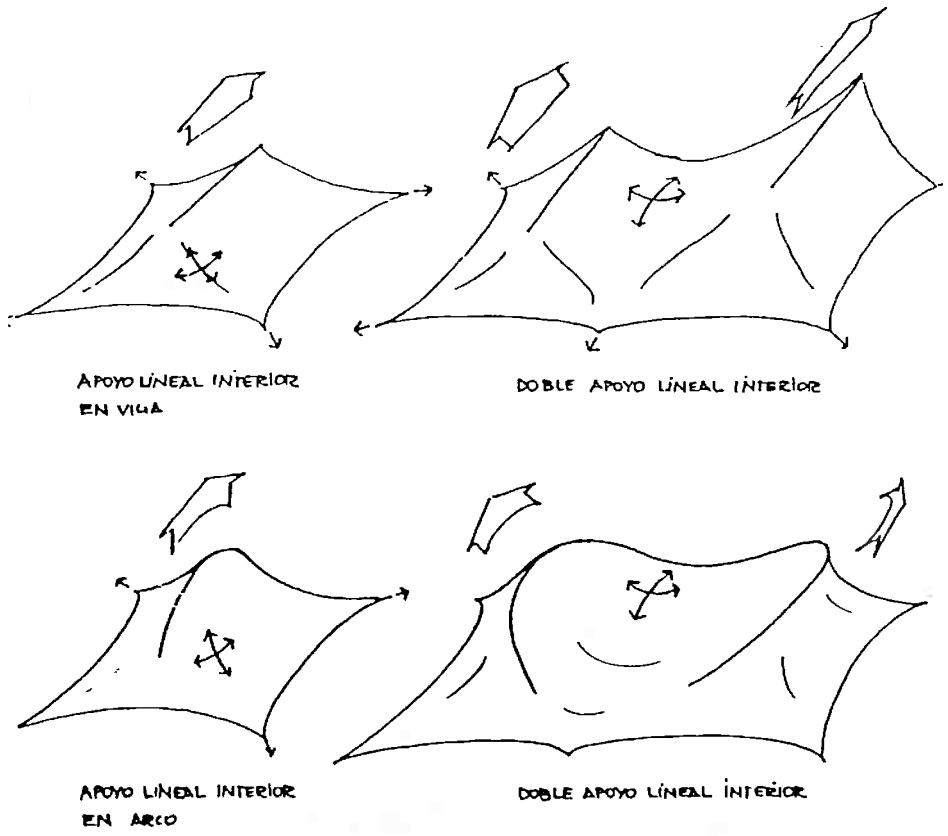


Figura 3.8. Conoides de vértice lineal (tiendas adinteladas y en arco).

Si se trata de apoyo libre, la tensión que aparece en la dirección de la línea se puede absorber por la deformación de la tela en la dirección de ésta, con lo cual no aparecerá concentración de esfuerzos en ella ni, por tanto, arrugas en el sentido perpendicular.

Si, por el contrario, se trata de anclaje fijo, existe peligro de arrugas que debemos resolver con la pretensión adecuada antes de la fijación, tal como hemos visto en otros casos de borde.

Por otro lado, si el apoyo es rectilíneo, aparecerá una peligrosa concentración de esfuerzos en los extremos del dintel, que actuarán casi como vértices de conoide, además de una planidad sinclástica en la línea, que podrá producir también arrugas independientes del sistema de fijación, radiales en los extremos y perpendiculares en el centro (Fig. 3.9).

Estos problemas desaparecen al utilizar líneas curvas, ya que no tendremos concentración de esfuerzos en los extremos, ni planidad en el centro. Por ello, parece que, en caso de apoyos lineales, éstas son las más indicadas.

3.3. PARABOLOIDES HIPERBOLICOS

Si, ahora, a la misma membrana de base cuadrada la deformamos a base de sacar del plano uno de los cuatro vértices (Fig. 3.10) nos aparecerá, como ya vimos, una superficie muy próxima al paraboloide hiperbólico en la que también obtenemos curvatura anticlástica en todos sus puntos y, por tanto, con la

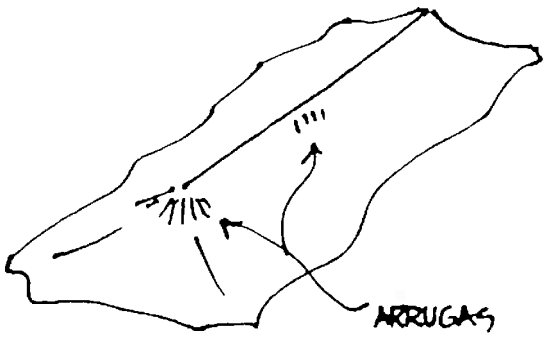


Figura 3.9. Deformación en el apoyo en dintel.

posibilidad de suficiente estabilidad en toda la membrana, aunque en alguno de los planos de corte la sección tiende a la línea recta (curvatura = ∞) al ser el p.h. una superficie reglada. Ello no es óbice, sin embargo, para mantener la estabilidad de la tela.

Si llevamos a cabo un breve análisis de las tensiones que se generan ante esta deformación (pretensiones) al igual que hemos hecho en el punto anterior, vemos que, ante una sección vertical, la curvatura es prácticamente igual en todos los puntos, lo que generará, asimismo, tensiones también similares en esta dirección (Fig. 3.11).

La otra dirección de corte más lógica será la comprendida en planos perpendiculares a la línea que une el extremo más elevado con su opuesto en diagonal, encontrándonos también con una curvatura similar en todos los puntos y de sentido inverso a la anterior. En definitiva, suponiendo unas condiciones de anclaje perimetral similares en todo el contorno, la forma final nos resulta de una gran uniformidad en cuanto al estado tensional de toda su superficie, muy al contrario de lo que hemos visto en el caso de los conoides del punto 3.2.1.

No obstante, también en este caso el sistema de anclaje perimetral puede introducir variaciones importantes en el estado tensional y, por tanto, en la estabilidad de la membrana, siempre que no sea uniforme. Veamos los casos más claros dentro de los muchos posibles.

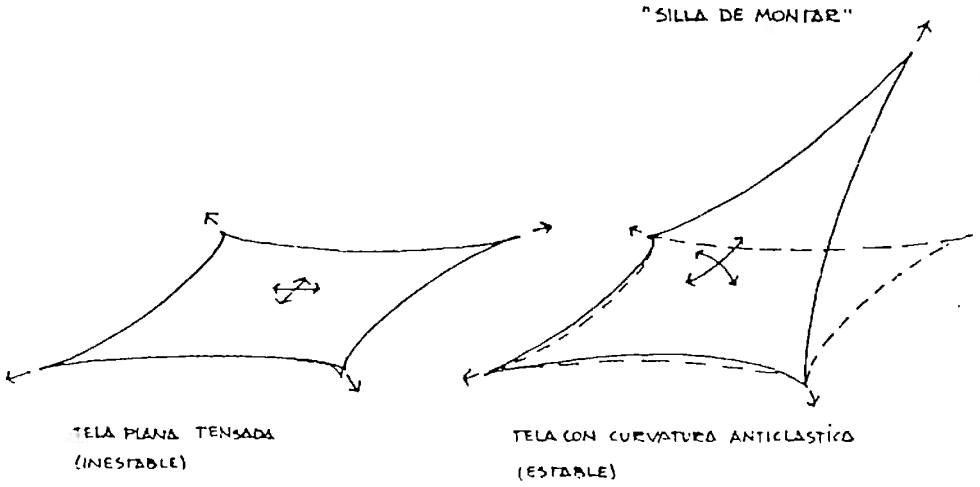


Figura 3.10 Formacion de paraboloide hiperbolico.

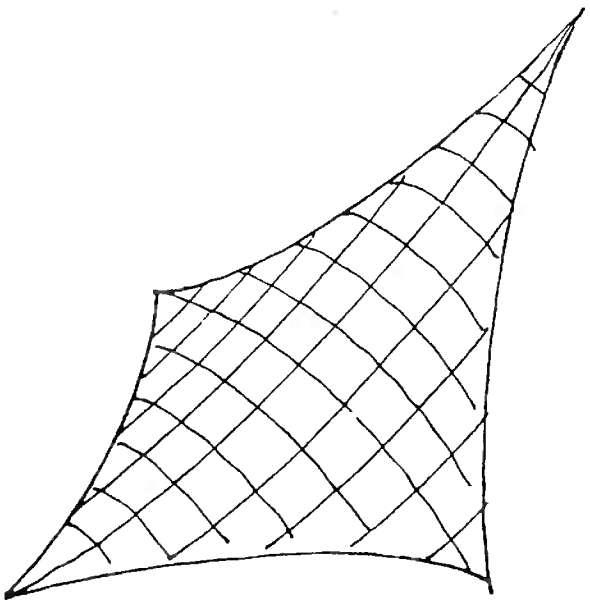


Figura 3.11. Curvaturas según secciones verticales en un paraboloide hiperbólico.

3.3.1. Anclaje en los vértices

Es el caso más general e implica la introducción de relingas de borde entre vértices para absorber las tensiones de la membrana que llegan hasta los lados. Estos, al quedar libres, sufren una deformación hacia el interior de la membrana, adoptado una forma del tipo de la catenaria, al tener que contrarrestar las tensiones que llegan hasta dichos bordes. A su vez, esta deformación convierte esas tensiones en otra principal según la dirección de la relinga que la transmite a los anclajes. Al ser la relinga de un material menos deformable que la tela de la membrana (normalmente un cable metálico) pueden aparecer, de nuevo, las microarrugas que veíamos en los casos anteriores, y su eliminación seguirá un proceso similar al de aquéllos. Sin embargo, el hecho de que la catenaria no esté contenida en un plano, sino que, a su vez, tenga también curvatura en el otro sentido, como consecuencia de estar integrada en la superficie del p.h., nos ayuda a favorecer la estabilidad del borde y nos permite reducir las arrugas al mínimo.

En cualquier caso, este tipo de anclajes en los cuatro vértices nos da como resultado unas tensiones concentradas en los mismos, de un modo similar al que veíamos en el vértice superior de los conoides, con posibilidad, incluso, de arrugas radiales en ellos, arrugas que suelen predominar en los que ayudan a mantener la «tensión hacia arriba» (los más elevados) mientras que son más fáciles de eliminar en los que mantienen la «tensión hacia abajo», como consecuencia, sobre todo, de tener éstos una menor curvatura o, lo que es lo mismo, una curvatura más similar en ambos sentidos (Fig. 3.12).

3.3.2. Anclaje continuo

El anclaje continuo en todo el perímetro puede ser, básicamente, de tres tipos: Por prensa, por acordonado y por puntos (Fig. 3.13).

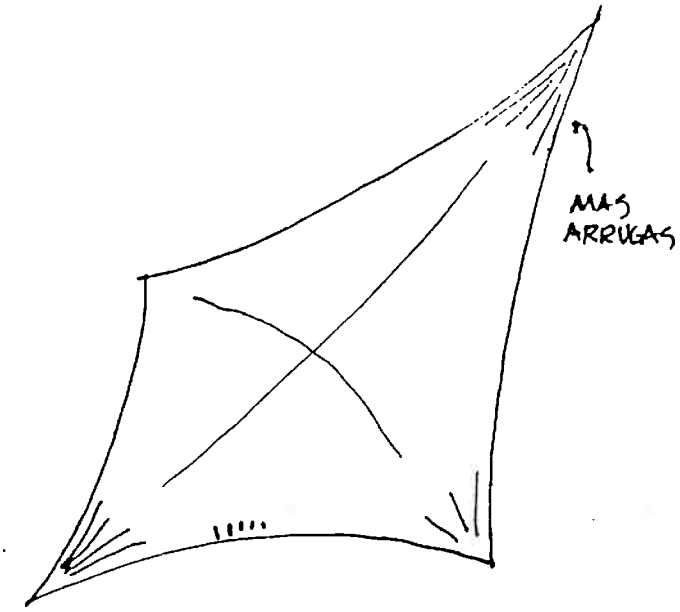


Figura 3.12. Situación tensional en los vértices del PH.

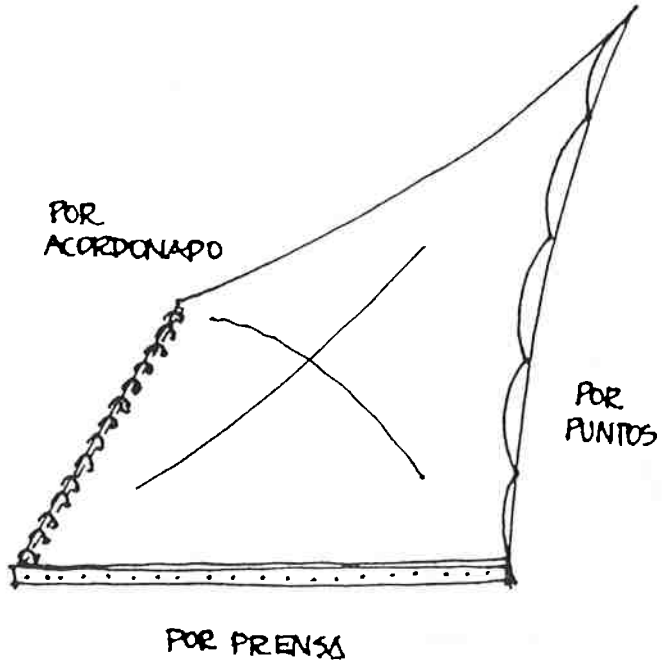


Figura 3.13 PH con anclaje continuo perimetral (variantes).

En cualquiera de los casos, la tensión, como hemos visto, es más uniforme en todos los puntos de la superficie, aunque en los bordes lleguemos a una línea recta y, por tanto, perdamos en ellos la curvatura anticlástica, al igual que nos ocurría en los conoides de base poligonal. En este sentido, perderemos la posibilidad de asegurar la tensión en las dos direcciones ayudados con la «anticlasticidad», por lo que deberemos recurrir a la pretensión especial en la propia membrana.

Esta pretensión es relativamente fácil de introducir en los casos de anclajes acordonados o por puntos, ya que la relinga tiene cierta libertad y a través de ella podemos transportar el esfuerzo longitudinal hasta los vértices. Incluso en el anclaje por puntos, hay una cierta inflexión en las catenarias que se forman entre puntos, en función de la separación entre ellos, al igual que vimos en la base de los conoides, lo que quita, en parte, la planidad, facilitando, sin embargo, la aparición de arrugas radiales en los anclajes perimetrales.

Por el contrario, si el anclaje es por prensa, una vez ejecutado es prácticamente imposible aumentar la tensión en el sentido longitudinal, por lo que la pretensión deberá tener lugar siempre antes de la fijación a fin de evitar la concentración especial de esfuerzos en las esquinas, pudiendo quedar éstos repartidos uniformemente en todo el perímetro.

3.3.3. Anclaje mixto

Nos lo encontramos en aquellos casos en que los laterales más bajos tienen anclaje continuo mientras que los elevados están anclados exclusivamente en su vértice (Fig. 3.14). No es ciertamente un caso muy corriente, excepto cuando se trata de una continuación de distintos p.p.h.h. unidos entre sí por la propia tela (caso más corriente) qué veremos más adelante.

La disposición de esfuerzos resulta, naturalmente, la combinada de los dos puntos anteriores y la dificultad, o anomalía, surge en los vértices intermedios

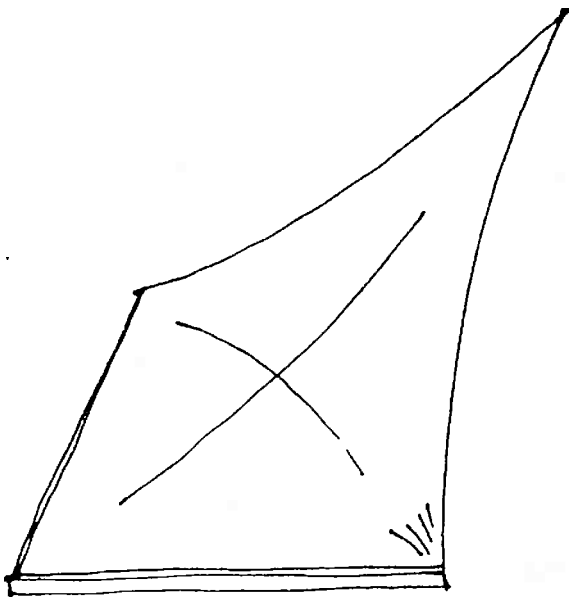


Figura 3.14. PH con anclaje perimetral mixto

en los que, por un lado, sufre una concentración de esfuerzos importante (la del lado libre) mientras que por el otro, la concentración es menor e, incluso, nula, por lo que podrán aparecer arrugas radiales en el lateral de anclaje continuo, cerca del vértice que, como siempre, podremos eliminar por disminución de la superficie de la tela.

3.4. SUPERFICIES COMBINADAS

Como también vimos en el capítulo anterior, a partir de estos tipos de superficies simples (paraboloides de revolución —p.r.— y paraboloides hiperbólicos —p.h.—) podemos obtener una gran variedad de superficies compuestas sin más que combinarlas:

— p.r. - p.r.

— p.r. - p.h.

— p.h. - p.h.

Podemos, además, variar, por una parte, el número de elementos simples a unir, por otra, el sentido de su deformación y, por último, sus tamaños por lo que el número de soluciones distintas para unas mismas condiciones funcionales es muy elevado, sobre todo si también consideramos la posibilidad de utilizar formas parciales, simples o combinadas.

En cualquier caso, nos interesa ver el funcionamiento estructural y las condiciones de estabilidad de las combinaciones más elementales que después podremos extrapolar a otros casos.

3.4.1. Conoides en el mismo sentido

El caso más simple, y suficiente para su compresión, es el de los conoides yuxtapuestos. Es una solución muy corriente y equivale a partir de la misma membrana plana del ejemplo y deformarla por dos puntos a la vez (Fig. 3.15).

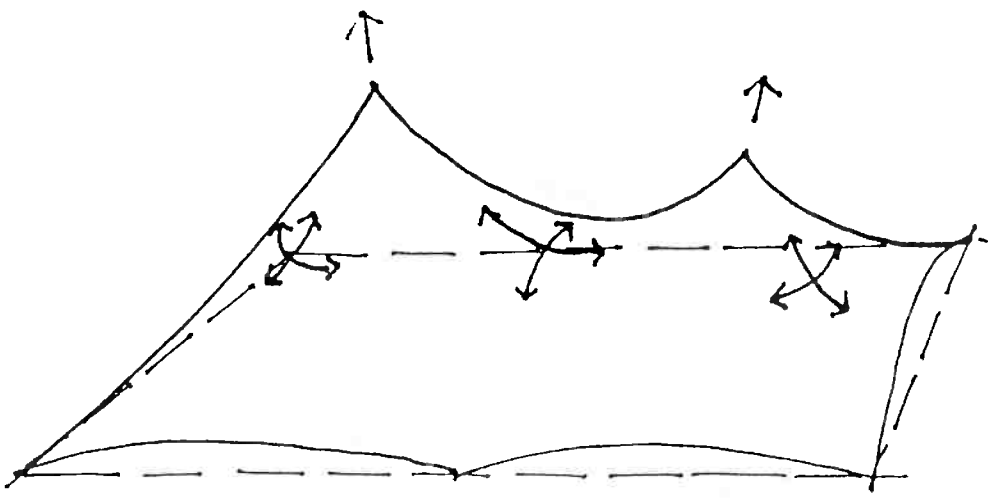


Figura 3.15. Conoides combinados en el mismo sentido.

El encuentro entre dos conoides estará formado por una superficie también anticlástica, con curvatura hacia arriba en la dirección que une los dos vértices elevados y curvatura hacia abajo en la dirección perpendicular.

De hecho, si abstraemos la franja del encuentro nos encontraremos con una superficie muy similar al p.h. (Fig. 3.16).

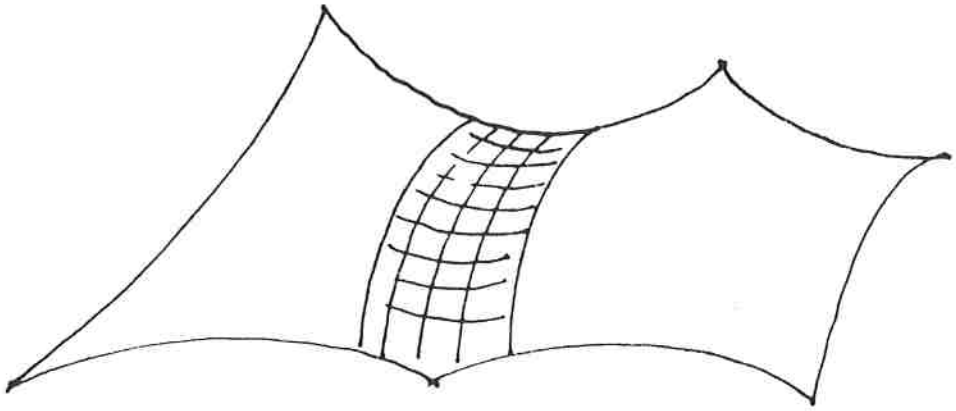


Figura 3.16. Unión entre conoides por PH.

En realidad, por facilidad de diseño y ejecución de patrones, como veremos más adelante, este encuentro se suele materializar mediante una arista o cable atirantado hacia abajo, para contrarrestar el esfuerzo hacia arriba que provocan los vértices elevados (Fig. 3.17). Así, esta intersección se convierte en un borde común de los dos conoides yuxtapuestos con unas condiciones de estabilidad bastante mejores que en los bordes restantes. En efecto, nos encontramos con un borde que, por una parte, tiene la inflexión necesaria para conferir la anticlasticidad conveniente a la membrana de su entorno para alcanzar estabilidad tensional, en contraposición a lo que les ocurre al resto de los bordes, según vimos más arriba. Por otra, resulta una relinga de un anclaje continuo similar a los prensados, pero con la ventaja sobre éstos de estar «libre» en todos los sentidos. Por últimos, resulta un anclaje al que se le puede

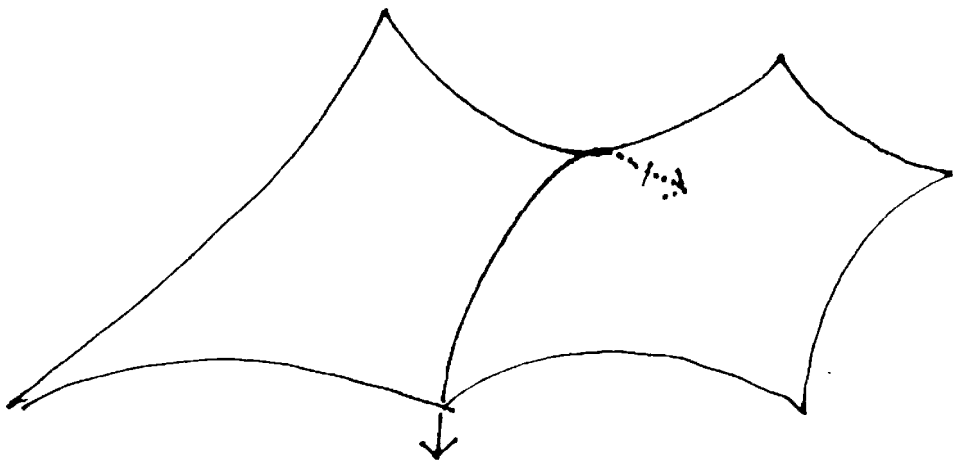


Figura 3.17. Unión entre conoides por aristas (cable atirantado hacia abajo).

aumentar o disminuir la pretensión a voluntad, en función de las necesidades que presente el resto de la membrana. Unicamente deberemos cuidar el modo de introducir esta tensión, ya que si lo hacemos mediante cable superpuesto, estaríamos liberando tracciones a la propia tela en esa dirección, apareciendo de inmediato arrugas perpendiculares al cable.

En el conjunto de la cubierta, parece elemental el que las direcciones de deformación de los dos vértices formen ángulo abierto hacia arriba (Fig. 3.18) para contrarrestarse mutuamente y facilitar así la estabilidad de la zona central en función del anclaje perimetral. Este deberá considerar el de la arista de inflexión intermedia, que normalmente estará contenida en un plano sensiblemente perpendicular a la línea imaginaria que une los vértices de los conoides.

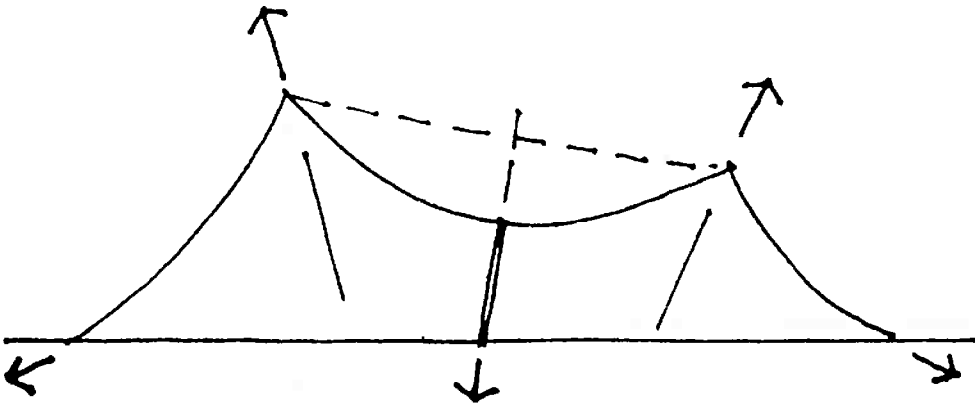


Figura 3.18. Esquema de esfuerzos hacia arriba y esfuerzos hacia abajo en una combinación de conoides.

3.4.2. Conoides de sentidos opuestos

Si a la membrana del ejemplo le elevamos tres o más puntos en un mismo sentido, nos aparece una zona central sin posibilidad de curvatura anticlástica a menos que le introduzcamos una nueva deformación puntual en el sentido opuesto (Fig. 3.19). Es decir, tenemos que provocar un conoide interior en sentido inverso a los otros. En realidad, es como si uniéramos dos a dos los conoides positivos haciendo coincidir los anclajes de las aristas de intersección en un mismo punto bajo que resultaría el vértice del conoide negativo; o lo que es lo mismo, como si antes de elevar los conoides positivos, dejaramos fijo un punto central, que se convertirá en el conoide negativo. En este caso, no tiene por qué existir solución de continuidad entre las bases de los conoides positivos y el negativo ya que la inflexión es muy suave. Quedan sólo las uniones entre conoides del mismo sentido, que ya vimos en el punto anterior. Por tanto, las situaciones tensionales en todos los puntos de la superficie resultante son ya conocidas y únicamente vale la pena comentar que el vértice negativo se convierte en un anclaje importante de los esfuerzos hacia arriba, con una concentración considerable, en el que, por lo tanto, hay que tener en cuenta lo comentado más arriba, tanto para vértices elevados, como para anclajes puntuales perimetrales.

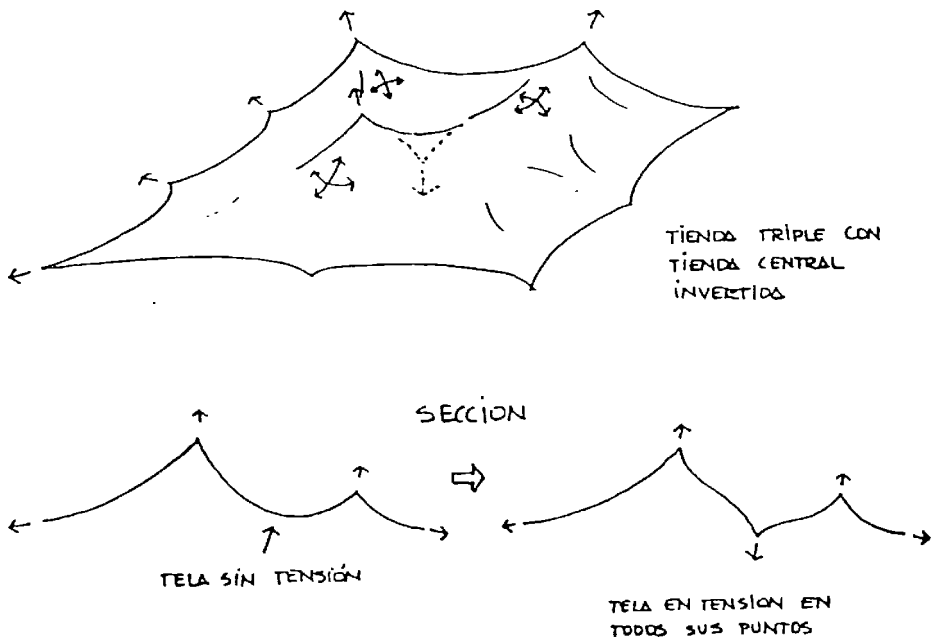


Figura 3.19. Conoide invertido.

3.4.3. Conoides con paraboloides hiperbólicos

La combinación de estas formas aparece de un modo simple cuando, en la misma membrana del ejemplo, además de introducir una deformación puntual en el interior, elevamos, en el mismo sentido, un punto perimetral (Fig. 3.20).

La situación tensional resultante es una combinación de las que ofrecen las dos formas simples y la unión entre ellas resulta prácticamente la misma que la que se ha visto entre conoides. Sin embargo, en este caso no es corriente que las dos formas se unan por medio de una arista viva, sino con una banda sin solución de continuidad, como si el p.h. fuese una continuación del sector de faldón del p.r., habiendo elevado uno o varios puntos perimetrales.

En este caso, el estado tensional resulta más continuo y también existe la posibilidad de regular la tensión de esta franja intermedia, variando la de los anclajes de los puntos donde empieza a subir el borde. No obstante, también

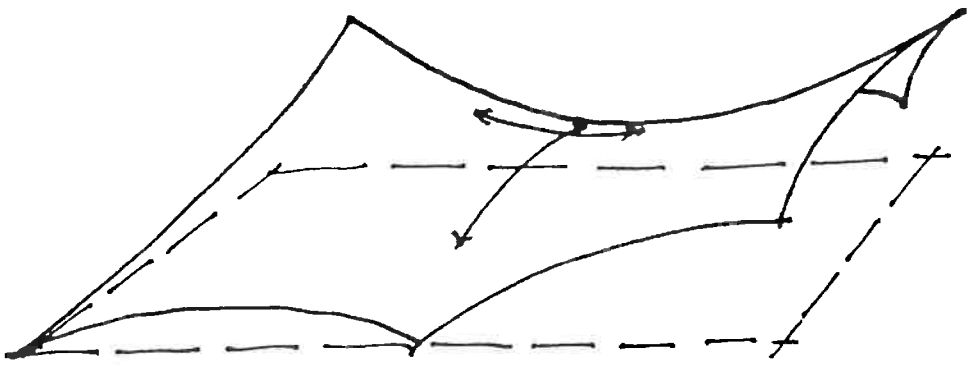


Figura 3.20. Combinacion de conoide con paraboloide.

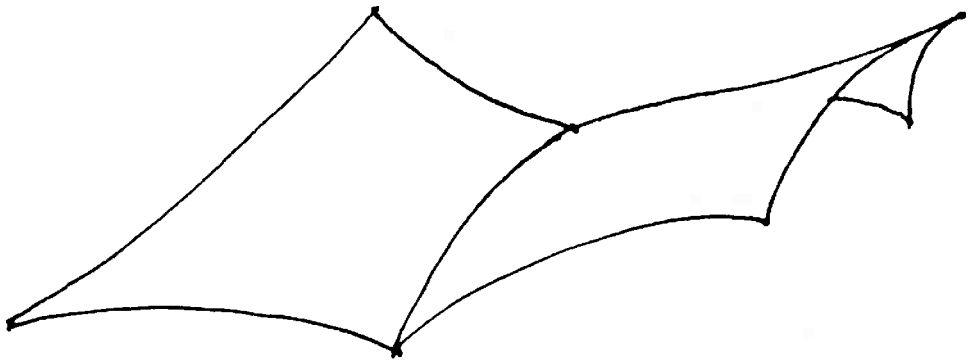


Figura 3.21. Unión por arista, con cable atirantado hacia abajo.

es posible utilizar un cable de refuerzo en la unión de las dos formas e, incluso, diseñar los patrones para producir ahí una arista viva con tención hacia abajo (Fig. 3.21). Los problemas tensionales y los peligros de arrugas en los diferentes puntos de la cubierta son los mismos que hemos visto más arriba.

3.4.4. Paraboloides adosados

Resulta una solución muy corriente cuando deformamos la membrana por sus bordes elevando más de dos puntos (Fig. 3.22). Por lo general, se trata de formas simétricas con respecto a un centro, aunque la simetría no es fundamental para su estabilidad y funcionalidad.

El estado tensional de los bordes perimetrales no varía con respecto a lo comentado para la forma simple y sólo dependerá del sistema de anclaje de borde elegido. El de la unión entre paraboloides es similar a la que hemos visto en el caso de p.r. + p.h., es decir el encuentro se puede realizar sin solución de continuidad o con arista viva o con esfuerzo de cable atirantado hacia abajo, en función de la inflexión. También dependerá del tamaño y

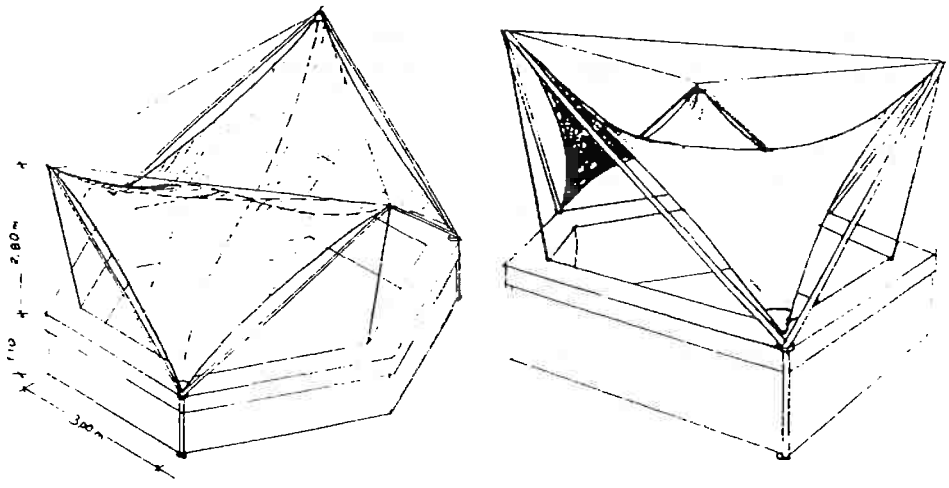


Figura 3.22. Paraboloides adosados (base exagonal).

proximidad de las formas simples y, en definitiva, de las tensiones que ahí aparezcan, pero, en cualquier caso, es un tipo de encuentro que permite, con relativa facilidad, la eliminación de tensiones de compresión transversales al mismo y, por tanto, de las arrugas.

3.4.5. Conoides y paraboloides parciales

Como última variación elemental, debemos mencionar las formas parciales, simples o combinadas, es decir medios conoides, medios paraboloides hiperbólicos y sus combinaciones (Fig. 3.23).

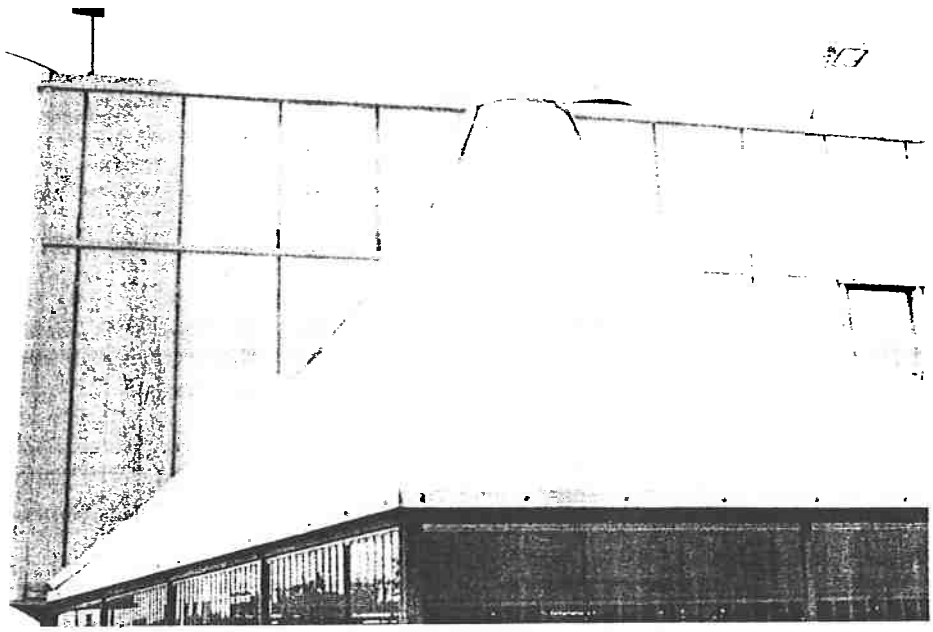


Figura 3.23. Conoide parcial.

En cualquiera de los casos, la única novedad tensional que nos aparece es el borde seccionado en el que se interrumpe la continuidad de la membrana y, por tanto, se concentran los esfuerzos.

En estos casos, lo importante, para que el resto de la tela siga en las condiciones de estabilidad planteadas para las formas completas, es que se mantenga la curvatura de la sección que le correspondería a la superficie entera (Fig. 3.24).

De ser así, la superficie mantiene su anticlasticidad y, por tanto, los esfuerzos perpendiculares al borde no sufren variación. En cuanto a los longitudinales, tenemos que prever la tensión de estabilidad necesaria, y la forma de introducirla, en función del sistema de anclaje, sea por prensa, acordonado, o por puntos.

En cualquier caso, es importante que dicho anclaje sea del tipo contínuo para mantener la forma original. De lo contrario, probablemente pasaríamos a una forma anticlástica nueva, con otro estado tensional.

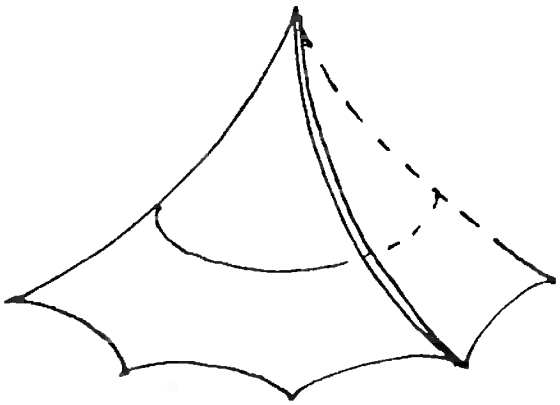


Figura 3.24. Mantenimiento de la curvatura del corte del conoide.

3.5. ESTRUCTURAS AUXILIARES

Vistas las superficies anticlásticas más usuales y su funcionamiento tensional, conviene dedicar unos párrafos a los diferentes tipos de estructuras auxiliares precisas para obtener esas formas anticlásticas, aunque en el capítulo 7.º volvamos sobre ellas para analizar su ejecución.

Para ello, recordemos que el estado tensional de estabilización de la cubierta se puede agrupar en los «esfuerzos hacia arriba» y «esfuerzos hacia abajo». Partiendo de esta base, comprendemos que las estructuras auxiliares serán también de dos tipos, las que elevan puntos de la membrana y absorben, por tanto, los esfuerzos hacia abajo, y las que los sujetan al «suelo», absorbiendo los esfuerzos hacia arriba.

3.5.1. Puntos elevados

3.5.1.1. Mástiles

Los más usuales son los mástiles (Fig. 3.25) simples o pareados, situados en el interior de la superficie o en su borde.

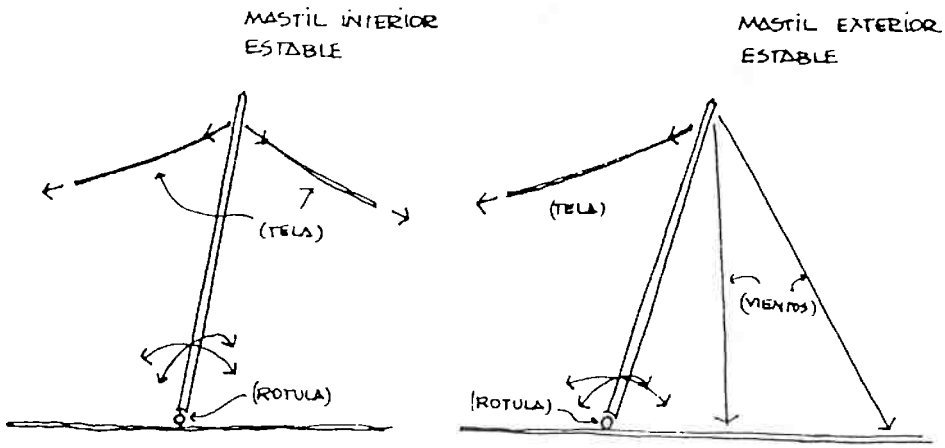


Figura 3.25. Mástiles tipo, interior y exterior.

En cualquiera de los casos, una premisa fundamental es su apoyo articulado para facilitar la adaptación de su inclinación a las deformaciones de la membrana en función de los esfuerzos a los que esté sometida en cada momento. De hecho, la falta de esta articulación ha sido el origen de muchos colapsos en cubiertas poco elaboradas.

En los casos de los mástiles simples, lo ideal es una rótula que permita su movilidad en todas las direcciones, sobre todo cuando el único sistema de sujeción del mástil es la propia tela. De ese modo conseguiremos aprovechar la deformabilidad de ésta para absorber parte de las tensiones, sobre todo ante esfuerzos cambiantes (viento). Por otra parte, transmitiremos sólo compresiones en la base.

Sólo en los casos en que el mástil esté sujeto por su cabeza mediante un sistema de, por lo menos, tres cables totalmente ajenos a la membrana, podremos prescindir de la articulación o rótula en la base; entonces sólo nos debemos preocupar del pandeo en función de su esbeltez.

Aquellos casos en que se trate de un elemento vertical en ménsula, convenientemente dimensionado para los esfuerzos a los que va a estar sometido, no podemos hablar propiamente del mástil, sino de punto fijo elevado, que comentaremos más adelante.

Los *mástiles de borde* necesitan un sistema de anclaje (normalmente doble) para contrarrestar el esfuerzo que les transmite la tela. En este caso, dicho esfuerzo tiene una dirección dominante y, por tanto, podemos pensar en una articulación alrededor de un eje perpendicular al plano que contiene el esfuerzo. Aun así, pueden aparecer esfuerzos en otras direcciones poco desviadas de la principal que, en algún caso, pueden ser absorbidas por la propia deformabilidad del mástil, en función de su esbeltez y rigidez (Fig. 3.26).

Si vamos a los mástiles pareados, o en V invertida, la articulación de la base sólo podrá realizarse con un giro alrededor del eje que une los dos puntos de apoyo. Esta condición ya nos advierte que este tipo de mástiles son adecuados cuando el esfuerzo se da básicamente en una dirección, que es el caso de los de borde del párrafo anterior y de los interiores colocados según algún eje longitudinal (Fig. 3.27). Lo evidente es que el propio mástil tiene una mayor estabilidad para su manipulación, sobre todo para montaje, y consigue la transmisión de esfuerzos de compresión o tracción en su base ya que en el propio plano funciona como sistema estructural triangulado.

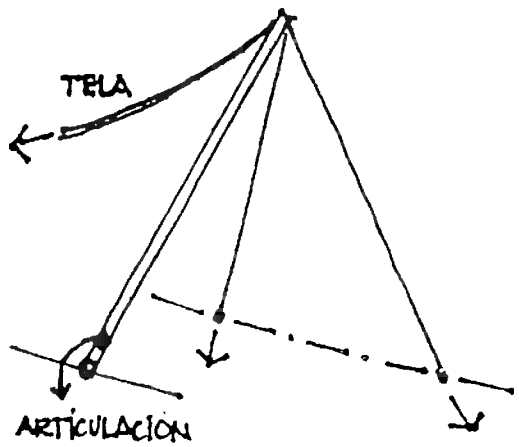


Figura 3.26 Mástil de borde

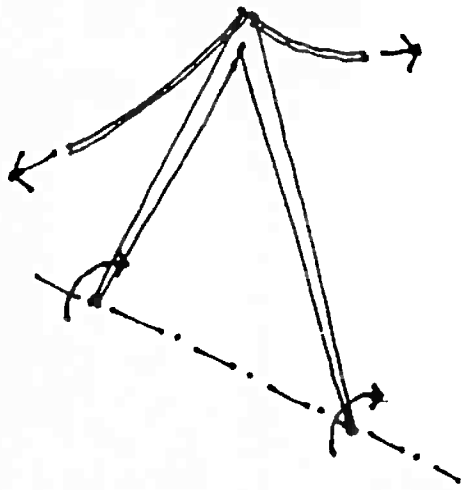


Figura 3.27. Mástil pareado.

3.5.1.2. Pórticos

El paso siguiente en la evolución del mástil pareado es el pórtico para aquellos casos en los que el apoyo interior pasa a ser lineal, tal como hemos visto en 3.2.3. En este caso, el funcionamiento estructural es similar al de aquél, es decir, los dos puntos de apoyo deben estar articulados alrededor del eje horizontal contenido en el plano del pórtico de modo que sólo les lleguen compresiones o tracciones (Fig. 3.28).

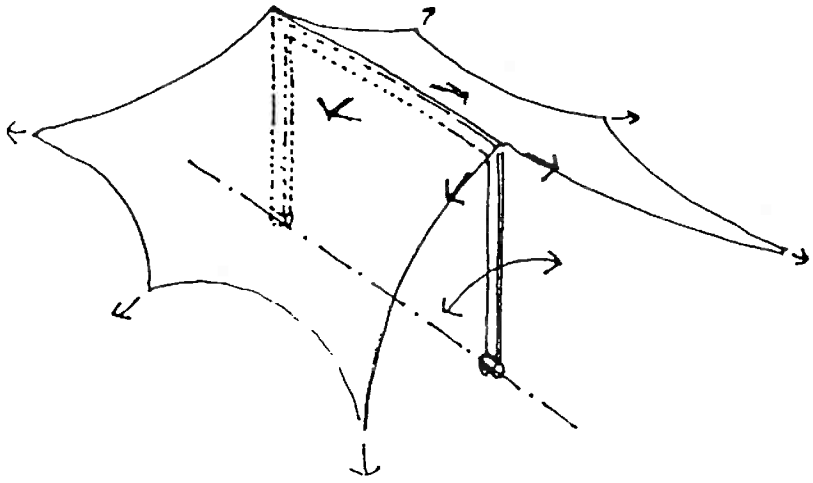


Figura 3.28. Pórtico adintelado.

En cuanto al pórtico en sí, normalmente se tratará de arcos por dos razones básicas. Por un lado, van a sufrir esfuerzos de compresión, ya que deben absorber los esfuerzos hacia abajo; la forma más adecuada es la del arco. Por otro, como hemos visto en su momento, el apoyo lineal supone una arista importante en la cubierta, es decir un borde común de dos superficies yuxtapuestas, y su forma preferente es la curva con objeto de mantener la anticlasticidad necesaria en dichos bordes (Fig. 3.29).

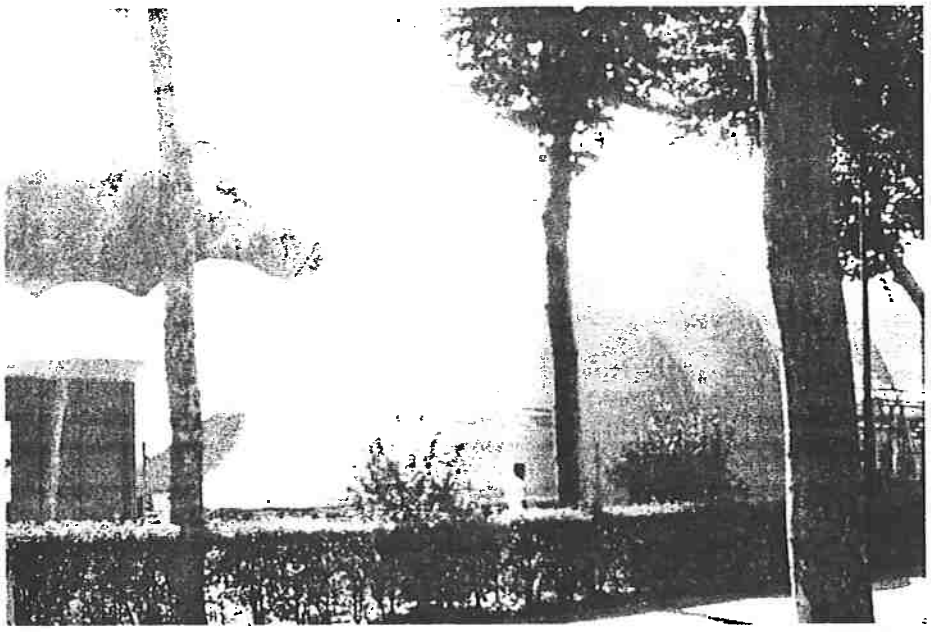


Figura 3.29. Pórticos en arco.

Si, por alguna razón el pórtico está empotrado en su base, estaríamos en realidad ante una estructura fija. Si, entonces la tela es pasante, su deformabilidad y adaptabilidad ante esfuerzos cambiantes haría que hubiera un deslizamiento sobre la arista del pórtico, con el consiguiente rozamiento, peligroso para su integridad. Si, por el contrario, la tela se fija a lo largo de la línea, el pórtico debe ser capaz de soportar estos esfuerzos.

Un caso muy común es el de los pórticos cruzados o el de los mástiles de tres o cuatro pies (Fig. 1.8). En ellos, lo que se persigue es la fijación de la estructura soporte que es útil, sobre todo, para el montaje de la cubierta. En estos casos estaríamos ante estructuras fijas interiores y como tales las consideraremos.

Por último, los pórticos lineales tienen un funcionamiento estructural igual frente a la cubierta, y sólo varía el estado tensional propio de dintel frente al arco, además de los problemas de falta de anticlasticidad ya comentados.

3.5.1.3. Estructuras fijas

Se refiere a todas aquellas que forman parte de una edificación a la que se acopla o superpone la cubierta textil y que, normalmente, se utilizarán como anclajes perimetrales de la tela.

Pero también debemos considerar en este apartado todas aquellas posibilidades que se han ido mencionando en los casos anteriores en los que, tanto puntos elevados como líneas, pasaban a ser fijos debido a un sistema triangulado o empotrado en su estructura soporte. Suelen ser apoyos interiores, aunque también pueden serlo de borde (Fig. 3.30).

En cualquier caso, si se trata de estructuras exteriores para anclajes de borde, la única condición a cumplir es la de ser capaces de soportar los esfuerzos a los que puedan estar sometidos en un momento determinado, y ser capaces

Figura 3.30. Anclaje continuo de borde para un semiconoide.

de recibir el anclaje, sea éste lineal o puntual, según los diferentes sistemas constructivos que veremos más adelante.

Si, por el contrario, estamos ante anclajes interiores, además de la condición anterior, debemos resolver el encuentro tela-estructura que, como ya se ha apuntado, puede hacerse de dos maneras tensionalmente distintas. Con *anclaje solidario*, de modo que toda la tensión transmitida por la tela, una vez deformada, la absorbe la estructura, o con *apoyo libre*, en el que la tela desliza sobre la estructura, con el consiguiente peligro de desgaste, pero sólo se transmiten compresiones sobre aquélla, y no esfuerzos tangenciales a la tela.

Por lo demás, el hecho de que el anclaje sobre esas estructuras sea puntual o lineal, recto o curvo, no introduce más variaciones en el funcionamiento del conjunto que las propias del borde de la membrana, ya analizadas, o las de la estructura en sí.

3.5.1.4. Cables aéreos

Consideramos dentro de este apartado, aquellos anclajes de esfuerzos hacia abajo resueltos mediante cables que cuelgan, de algunos de los tipos de estructura vistos anteriormente, y de los que, a su vez, cuelga la membrana de cubierta (Fig. 3.31).

El cable suele colgar, no obstante, de puntos estructurales fijos, y se aprovecha su propia deformabilidad para absorber parte de los esfuerzos que le transmite la tela.

Estos pueden llegar por puntos o por líneas continuas. Si por puntos, el cable adquiere una línea triangular o poligonal. Si, por el contrario, el cuelgue es continuo, la curva resultante es una catenaria. En este caso, el cable se convierte en una arista viva de la superficie de la cubierta y actúa, por tanto, como «relinga compartida» de las dos formas yuxtapuestas, con todas las condiciones tensionales ya comentadas.

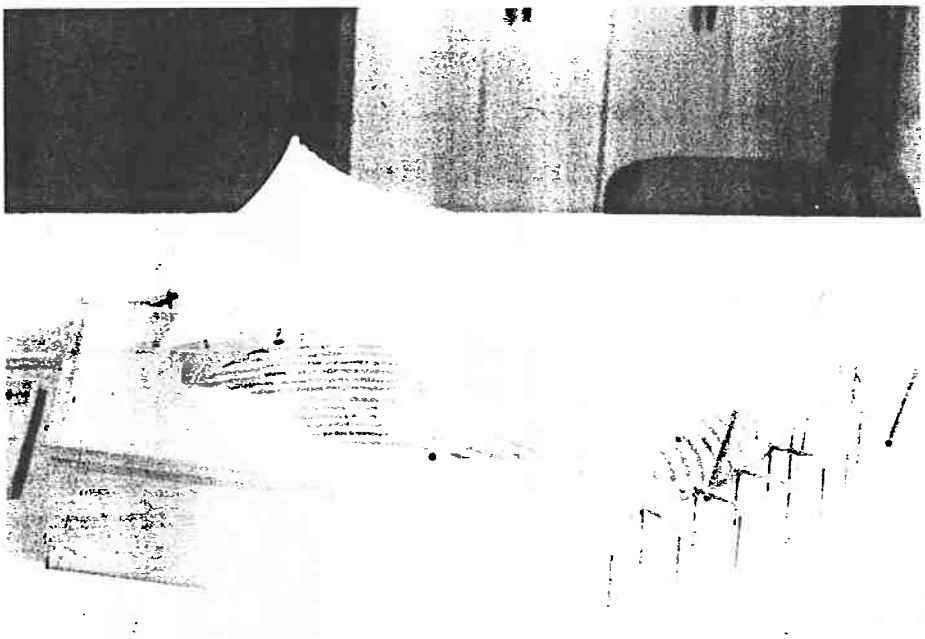


Figura 3.31. Cable entre dos mástiles del que cuelga la cubierta.

Tanto las necesidades del cable en sí como las de los distintos anclajes de la tela las veremos en el capítulo correspondiente.

3.5.2. Anclajes negativos

Se trata de todos aquellos que necesitamos para absorber los esfuerzos hacia arriba que nos han surgido como consecuencia de los puntos elevados obtenidos con las estructuras anteriores (Fig. 3.32).

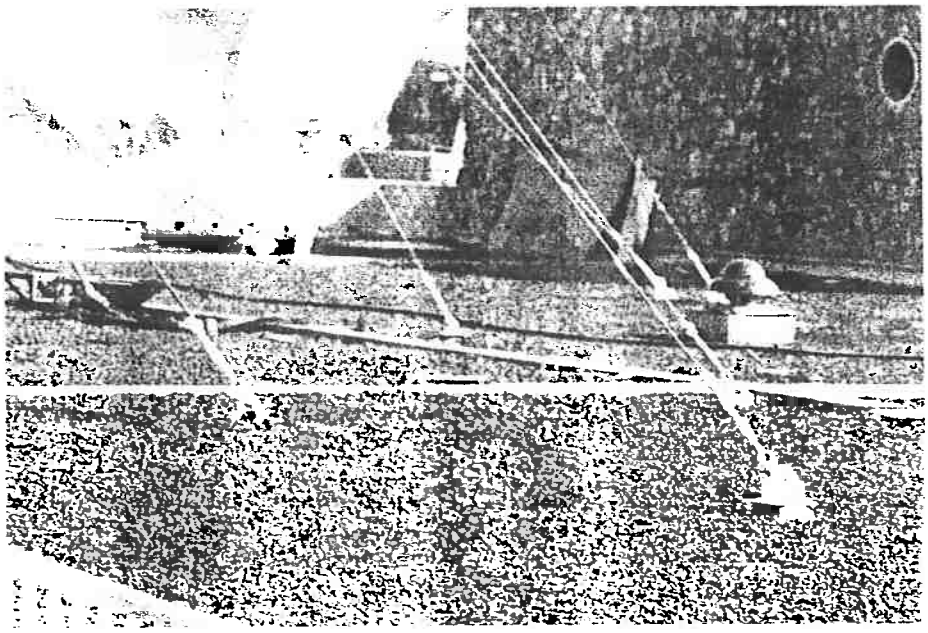


Figura 3.32. Anclaje puntual negativo.

Pueden ser de dos tipos, fundamentalmente. Bien simples anclajes de borde o interiores, puntuales o lineales, según hemos ido indicando al hablar de las distintas formas anticlásticas, bien cables de curvatura catenaria hacia arriba, anclados en sus extremos, y que constituyen aristas de intersección de superficies simples, también mencionadas en puntos anteriores.

De todo ello hablaremos al analizar las soluciones constructivas de estas cubiertas. Baste decir aquí que, en cualquier caso, se tratará de absorber esfuerzos de tracción y permitir la deformabilidad sucesiva para que, por un lado, la tela se adapte a los esfuerzos puntuales y, por otro, para que se absorban parte de las tensiones originadas en los bordes de la membrana.

Capítulo 4

La tela como material de construcción

Apuntadas, de un lado, las respuestas funcionales de la Arquitectura textil y vistas, de otro, sus amplias y justificadas posibilidades formales, en función de las características propias de la tela como membrana y de su necesaria estabilidad estructural, debemos entrar ya en el estudio de su tecnología; tecnología que tiene su base en la industria textil, por una parte, en su funcionalidad arquitectónica, por otra, y en su respuesta estructural, como colofón. Se trata, en definitiva, de disponer de los conocimientos técnicos necesarios, como herramienta de diseño, para perder el lógico miedo que toda novedad supone en un sector (especialmente el de la edificación) y tener la libertad que da el conocimiento para acometer los nuevos diseños sin el «handicap» de la ignorancia.

Para ello, iniciamos en este capítulo el estudio de la tela como material de construcción y sus características físicas y mecánicas, para continuar, en los siguientes, con la tecnología de la confección, uniones, bordes y anclajes, haciendo especial hincapié en el diseño de «patrones», como paso fundamental para obtener las formas finales, funcionalmente adecuadas y formalmente necesarias para la estabilidad del conjunto.

4.1. LA TELA

La *tela* está constituida básicamente por un tejido o entramado de fibras y una protección que la impermeabiliza y mejora sus características físico-mecánicas.

4.1.1. El tejido

Aunque puede ser de muchos tipos, tiene un entramado normalmente ortogonal de trama y urdimbre con una separación entre fibras que varía según las exigencias resistentes y de transparencia. Las fibras usadas pueden ser orgánicas, minerales, sintéticas o metálicas, aunque dominan, por sus características, las sintéticas y, más concretamente, las de poliéster y las de poliamidas. Las orgánicas (lana, algodón, cáñamo, etc.) suelen presentar problemas de durabilidad, y las minerales (fibra de vidrio) de falta de elasticidad, mientras que las metálicas tienen problemas de durabilidad (oxidación) y precio. No obstante, como veremos, la fibra de vidrio está alcanzando un lugar privilegiado como consecuencia de los avances en tratamientos y protectores.

Mirando hacia el pasado, según W. I. Liddell, la ya larga historia de los tejidos con uso estructural ha estado dominada por las fibras naturales, fibras vegetales, de celulosa y de algodón y fibras animales, como la lana y la seda. Las estructuras hechas con esas fibras, tales como velas, tiendas, carpas o simples cuerdas, resultaban de pequeñas dimensiones y de corta vida útil al estar su-

jetas sus fibras a la rotura, o a la degradación por humedad, rayos ultravioletas, etc. De hecho, las superficies más grandes eran las velas de los barcos, que requerían una gran cantidad de mano de obra (la tripulación) para su manipulación y mantenimiento.

Gracias al desarrollo de dirigibles y aeroplanos a principios de siglo, se estimuló la investigación de las propiedades físico-químicas de los tejidos, lo que llevó a muchos estudios sobre su comportamiento ante esfuerzos de todo tipo, sobre todo tracciones lineales y biaxiales.

En el mundo de la Arquitectura, los tejidos se han utilizado, sobre todo, para tiendas y carpas, tal como se ha comentado en el capítulo 1, con el objetivo principal de su fácil movilización (transporte, montaje y desmontaje). Pero para conseguir estructuras textiles estables y de confianza ha habido que esperar a las últimas décadas en las que el uso, por una parte, de fibras artificiales (sintéticas) el empleo, por otra, de protecciones que evitan la degradación físico-química de las telas y el diseño, por último, de formas generales y detalles constructivos que permitan aprovechar al máximo el potencial estructural de esos materiales, nos ha permitido su plena consideración arquitectónica.

Para obtener estas membranas estructurales se pueden utilizar, desde mallas de cuerdas o cables, hasta tejidos con la adecuada protección contra los agentes atmosféricos, pasando por láminas de materiales plásticos o metálicos. Sin embargo, lo más generalizado, sin ninguna duda, es el caso de los tejidos con protección, que estamos comentando.

Conviene, pues, conocer los tipos de tejidos y fibras más corrientes. La tabla 4.1 recoge los tipos de fibras empleadas actualmente, agrupadas en *naturales, sintéticas, metálicas* y *minerales*. Más adelante veremos sus diferentes características, tanto físicas como mecánicas.

Veamos ahora la constitución física del tejido para tener un mejor conocimiento de su comportamiento, partiendo de la base, como queda dicho, que las fibras más comunes, son el poliéster y la fibra de vidrio.

La fibra pasa primero por el proceso de obtención del filamento hilado y después se procede al entrelazado de los hilos o tejido.

Tabla 4.1. Tipos de fibras empleadas actualmente para la confección de tejidos

Fibras naturales	— Algodón
	— Lino
Fibras sintéticas	— Polietileno
	— Poliéster
	— Poliamida
	— Acrílicos
	— Aramida
	— Polietileno de cadena alargada
Fibras metálicas	— Acero
	— Acero inoxidable
	— Aleaciones de cobre
Fibras minerales	— Fibra de vidrio
	— Fibras de carbón

El hilo consiste en una especie de madeja contínua de fibras retorcidas entre sí. El giro de las fibras y la combinación de los hilos permite ir variando las propiedades físico-mecánicas del tejido.

El tipo de tejido más corriente es el ortogonal, entrelazado en función de las exigencias mecánicas de la tela. Para resistencias altas, se busca el tejido «Panamá» con madejas de dos, tres o hasta cuatro hilos juntos. Con ello se consigue, además, una superficie más plana y continua para aplicar la protección.

El tejido ortogonal, entrelazado por el sistema de telar, resulta con la trama recta y la urdimbre ondulada. Por ello, cuando se introduce una tensión en la dirección de la urdimbre, se cambia la situación quedando estos hilos rectos y los de la trama ondulados. Es lo que se conoce como «cambio de onda». Por esta razón, si sometemos la tela a una tensión biaxial de hasta el 5 % de la tensión admisible en cada dirección, sufrirá una deformación inelástica produciendo un alargamiento irrecuperable. Es lo que se conoce también como «deformación de construcción». (Ver tabla 4.2 de W. I. Liddell.)

Tabla 4.2. Deformación de construcción normal de un tejido al someterlo al 5 % de la tensión admisible

	Tipo de tejido	Tensión de deformación (N/5 cm.)	Deformación %	
			Trama	Urdimbre
Poliéster	1 × 1	3.000	0	2
	2 × 2	4.500	0	0,81
	3 × 3	9.000	−0,5	3,5
Fibra de vidrio	1 × 1	4.000	de 0,5 a −0,5	de 2 a 4
	2 × 2	7.000	de 0,8 a −0,3	de 4 a 6

Algunos fabricantes han intentado obtener telas con una deformación de construcción uniforme en toda la superficie. El problema está en mantener la deformación estable. En cualquier caso, los tejidos fabricados con una tensión alta en la trama durante su protección posterior, nos darán la deformación más estable y, además, no suele haber problema en introducir también deformación en la urdimbre.

En Estados Unidos se usa también un tejido con los hilos de trama y urdimbre sin entrelazar, atados en sus puntos de encuentro, lo cual tiene la ventaja, en principio, de eliminar la ondulación inicial de la urdimbre y, por tanto, el «cambio de onda». En Europa, al parecer, existe el temor de que las dos tramas se separen al romperse el atado, aunque no se tiene noticia de que eso haya ocurrido nunca.

Según Kenneth V. Lambert este tejido, conocido como WIWK (Weft Inserted Warp Knit) tiene intersticios lo suficientemente abiertos como para permitir una buena adhesión, tanto mecánica como química, entre tejido y protección. Además, al estar ambos hilos (trama y urdimbre) rectos, frente a la ondulación de uno de ellos (urdimbre) en el tejido entrelazado, se evitan las tensiones que aparecen al entrar en carga y deformarse («cambio de onda»).

Este hecho influye, además, en las uniones, sobre todo las soldadas, ya que la deformación previsible en la banda soldada introduce tensiones puntuales

internas y difíciles de controlar en la unión, que requieren mayor nivel de adherencia.

Por otra parte, este tipo de tejidos presenta un menor espesor que los entrelazados (2 capas de hilos frente a tres, Fig. 4.1) lo que implica menor cantidad de material de protección y, por tanto, menor peso, para las mismas características mecánicas.

Por último, se han realizado algunas pruebas con tejidos triaxiales, a base de tres hilos cruzados a 60° entre sí. Parece evidente que este tipo de tela mejoraría la resistencia al desgarro. Sin embargo, la deformación ante cargas triaxiales tiene que ser difícil de medir y ante una deformación de construcción alta, podrían aparecer problemas con tensiones desiguales, ya que esfuerzos en dos de las direcciones del tejido introducirían esfuerzos en la tercera, que nos deformarían el resultado.

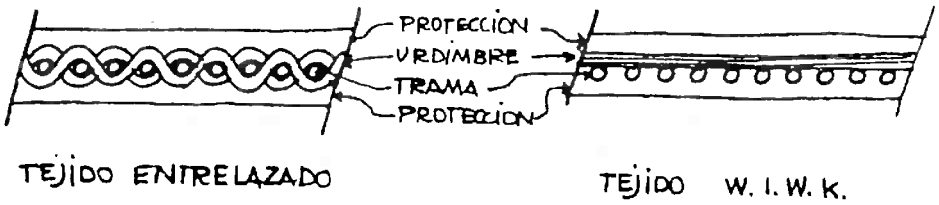


Figura 4.1. Tipos de telas en sección. Entrelazada y WIWK.

4.1.2. La protección

Puede ser variada, desde la más sencilla y opaca, como la goma y el bitumen, hasta la más transparente, como el poliéster, el PVC y el polietileno (estos últimos los más usuales) llegando en la actualidad al *politetrafluoretileno* (PTFE) de excelentes características, y a las siliconas, de gran transparencia. En cualquier caso, es importante el proceso de aplicación de estas películas, por su contribución a las resistencias mecánicas de la tela, como veremos, y son fundamentales sus características de protección, tanto a los rayos ultravioletas exteriores, como al posible fuego interior.

Debemos considerar dos tipos de adherencia entre el tejido y la protección: *mecánica* y *química*.

La mecánica está basada en la penetración del producto protector entre los intersticios del tejido, cuando aquél es líquido. La química se produce cuando se utilizan imprimaciones y adhesivos que producen una unión molecular entre la fibra y la protección. Lo ideal es utilizar los dos tipos de adherencia, pero en tejidos de fibras muy apretadas sólo es posible la química. Así, pues, el nivel de adhesión depende de varios factores tales como, tipo de tejido y separación entre fibras, composición química de la protección, tratamiento previo de la fibra, proceso de aplicación, etc. En cualquier caso, es importante que el sistema de unión de patrones no dañe la protección.

La tabla 4.3 nos da una relación de los protectores más comunes. Es importante mencionar el hecho de que no se deben usar indiscriminadamente las protecciones con cualquier tejido base. Por ejemplo, el PTEF y el FEP tienen puntos de fusión muy altos y, por tanto, sólo deben aplicarse sobre fibras con resistencia de temperatura elevada. Por otro lado, el neopreno y la goma se adhieren mejor al nylon. Asimismo, el polietileno de cadena abierta, nueva

Tabla 4.3. Materiales usados para la protección de tejidos (por importancia)

— P.V.C. (cloruro de polivinilo).
— P.U. (poliuretano).
— Neopreno.
— Goma natural.
— Hypalón.
— P.T.E.F. (politetrafluoretileno).
— F.E.P. (fluoretileno-propileno).
— P.V.F. (fluoruro de polivinilo).
— Silicona.

fibra de alta resistencia, no parece adecuado para tejidos protegidos ya que sus características disminuyen rápidamente por encima de los 125° C, temperatura fácil de alcanzar en la aplicación de la protección.

La protección más usada es, probablemente, el PVC sobre fibra de poliéster, debido a su bajo coste, aunque está sometido al «secreto de fabricación» en cada caso, ya que el PVC plastificado se obtiene de una mezcla de diferentes materiales. Al tener cada fabricante su propia receta, el producto resultante tiene también un comportamiento distinto en cada caso, por lo que resulta difícil realizar una comparación correcta de los diferentes productos del mercado.

La durabilidad del PVC protector se puede mejorar añadiendo una nueva capa de algún compuesto acrílico o del mismo PVC con un plastificante polimérico. Hay también una alta variedad de posibilidades sometidas, asimismo, al «secreto de fabricación».

Se han dado muchos casos de problemas relacionados con este tipo de protección, tales como pérdida o variación del color o exudación pegajosa. Su incidencia en el funcionamiento de la tela es baja, pero no deja de suponer un inconveniente para su uso.

En cualquier caso, los revestimientos de PVC suelen tener un espesor de 0,2 mm sobre el punto de cruce de los hilos y pueden pigmentarse para reducir la transparencia con polvo de carbón o de aluminio, o, simplemente, mejorando con adición de absorbentes cuando se quiere alcanzar una mayor transparencia.

Para hacer frente a los problemas presentados por el PVC se desarrolló, hace unos 15 años, la fibra de vidrio protegida con teflón que, por otra parte, resultaba más resistente al fuego. La protección, en este caso, es, principalmente, a base de PTFE.

Los ensayos de envejecimiento realizados con este material resultan muy satisfactorios con respecto a su durabilidad. El único problema es la aparición de rotura de los hilos del tejido como consecuencia de rozamientos internos en los puntos de pliegue y corte o de abrasión externa. Por otra parte, su coste resulta todavía elevado.

Quizás el material de protección más moderno sea la silicona aplicada sobre fibra de vidrio.

Por último, los revestimientos de goma (engomados) suelen conferir, por el contrario, una mayor resitencia a la tela, aunque pierden transparencia.

En definitiva, la tela compuesta por tejido y protección resulta una membrana de características mecánicas anisotrópicas, debido al entramado, que le con-

fiere mayor resistencia en sus direcciones, aunque la capa de protección puede contribuir a que el material se aproxime a la isotropía al repartir los esfuerzos entre las dos familias de tejidos, según sus propias características. De hecho, en muchas ocasiones, cuando las tensiones a las que va a estar sometida la tela no son excesivas, se calcula como si el material fuese isótropo, lo que facilita, como veremos, su confección. De hecho, en el proceso textil, como hemos visto, se alargan más los hilos de la urdimbre que los de la trama, pudiendo llegar a quedar incluso planos, lo que hace que ésta tenga una mayor elasticidad en servicio y, por tanto, una mayor capacidad de deformación y absorción de tensiones.

La tabla 4.4 nos da una relación de las telas (tejido y protección) más empleados en la actualidad, con datos comparativos de precios y propiedades. Dicha tabla está tomada de W. L. Liddell.

Tabla 4.4. Telas más usadas en Arquitectura textil

Material	Coste aprox. (pts./m^2)	Deformación (%)	Durabilidad (años)	Transparencia (%)	Resistencia al fuego
Lámina de P.V.C.	300	> 400	< 10	90	No resiste
Lámina de poliéster	1.000	> 400	10 - 15	95	No resiste
Lámina de F.E.P.	2.000	> 200	> 25	95	Resistente a la llama
Tejido de poliéster protegido con P.V.C.	de 500 a 1.500	16	10 - 15	8 - 30	Res. a la llama con aditivos especiales
Tejido de nylon protegido con P.V.C.	de 500 a 1.500	20	10 - 15	0 - 30	Res. a la llama con aditivos especiales
Tejido de poliéster protegido con hypalón	de 1.700 a 5.000	16	15 - 20	0 - 25	No resiste
Tejido de poliéster con P.V.F. y protegido con P.V.C.	de 700 a 1.800	16	15 - 20	7 - 20	Res. a la llama con aditivos especiales
Tejido de fibra de vidrio protegido con P.T.P.E.	de 6.000 a 10.000	6	> 25	5 - 15	Incombustible
Tejido de fibra de vidrio protegido con silicona	5.000	6	20 - 25	20 - 50	Res. a la llama con aditivos especiales

4.2. CARACTERISTICAS MECANICAS

Las *características mecánicas* que más nos interesan son dos: la *resistencia a la tracción* y la resistencia a la *propagación del rasgado*.

4.2.1. Resistencia a tracción

Como quiera que para la estabilidad general, la tela debe estar sometida permanentemente a una bitensión de tracción, está será la característica más importante que deberemos tener en cuenta. De ella, nos interesará, sobre todo, la máxima tensión de tracción que pueda soportar. Para ello, lo más corriente en este tipo de materiales preparados para resistir tracciones, es medir el *alargamiento por tracción;* concretamente se mide el alargamiento al cual se rompe un hilo que cuelga verticalmente, con lo cual el tamaño y la sección del mismo no son importantes, sino sólo su peso específico y su resistencia a tracción. Comprenderemos que en el caso textil esto es lo más adecuado ya que la sección de un hilo es difícil de medir. En cualquier caso, el alargamiento por tracción es específico para cada material y se expresa en términos de resistencia a la rotura y peso específico según la fórmula:

$$R = \frac{\sigma}{\varsigma}$$

donde,

R = alargamiento de rotura en cm.
σ = tensión de rotura en kg/cm^2
ς = peso específico en kg/cm^3

De ahí se deduce que el alargamiento de una fibra es directamente proporcional a su capacidad de tensión e inversamente proporcional a su peso específico, por lo que cobran importancia las fibras sintéticas para estas soluciones textiles, frente a las metálicas.

Pero la resistencia y el alargamiento de uno de los hilos no es característica suficiente. A nosotros nos interesa el comportamiento de la tela en su conjunto. Ello, sin embargo, no es sencillo, por lo que la normativa técnica (en España, UNE-53.243.74, en Alemania, la DIN 53354, en Inglaterra, la BS-3424 y la BS-3900 (F3) para ensayo bajo envejecimiento acelerado, en EE.UU. la ASTM-D1682) se refiere a la resistencia a tracción de las telas en kp/5 cm, así como a la medida de su deformación. Para ello se ensayan probetas de tela de 50 mm de ancho y 300 mm de longitud libre de fijación. La resistencia final de tracción depende del hilo, del número de ellos y, en cierta medida, del material de protección. Para tener una idea, las telas del mercado actual varían desde resistencias de 200 kp/5 cm, para espesores de 0,52 mm y pesos de 540 gr/m^2, hasta los 2.000 kp/5 cm, para espesores de 3,5 mm, y pesos de 3.200 gr/m^2, pudiendo considerarse una tela intermedia la que tuviera una resistencia de 400 kp/5 cm, un espesor de 0,9 mm y un peso de 1.000 gr/m^2.

La figura 4.2 representa un gráfico, en el que se indica la tensión de rotura de diversas fibras sintéticas en comparación con el alargamiento.

La tensión de rotura de algunas fibras poliméricas, como el nylon o el poliéster, se reduce (la fibra pierde elasticidad) si se someten a una pretensión en calor durante el proceso de hilado; calentándolas de nuevo durante el proceso de fabricación de la tela, recuperan su condición inicial.

En cualquier caso, la resistencia a tracción de una fibra puede verse afectada por diversos factores tales como la temperatura y la duración de la carga y, particularmente, en el caso de la fibra de vidrio, por la humedad ambiente y el plegado.

Por último, existe un ensayo de la resistencia a tracción de la tela, menos utilizado, que emplea tiras de 10 cms de ancho, en las que se introduce la

de rasgadura; de ahí que, en ocasiones, se sustituya esta característica por la «resistencia al pelado», es decir, al arrancamiento de la capa protectora.

La resistencia al rasgado (a su propagación) se mide directamente en kp y suele variar entre los 20 kp y los 300 kp, independientemente de su resistencia a tracción, aunque con carácter general se puede considerar que está entre un 10 % y un 30 % de ésta. En cualquier caso, depende, no sólo de las capas de protección, sino, y sobre todo, de la forma y tipo de tejido, apareciendo la menor resistencia cuando cada hilo se rasga independientemente y éstos permanecen separados unos de otros.

Para comprobar la resistencia a la propagación de rasgado se puede usar la norma española UNE-53326, la alemana DIN 53356, o la norteamericana ASTMD 624-73, o la que comprueba la adherencia del revestimiento, DIN 53357.

Por otra parte, existen otros tipos de ensayos para medir el rasgado, que conviene también mencionar.

El ensayo más general, consiste en realizar una división en una banda de tela y tirar de los extremos mediante dos mordazas que se van abriendo con una velocidad variable entre 30 y 100 mm/min.

El método especificado en ASTM 5134 es similar a éste, pero con un solo corte en la tela antes de someterla a tracción. En cualquiera de ellos, se mide la tensión que es capaz de resistir la tela antes de empezar a propagarse el rasgado.

Otro método, conocido como «ensayo trapezoidal», viene indicado en ASTM 5134 y en DIN 53363. En él, se parte de una pieza triangular y se colocan las mordazas en dos de los vértices.

La dimensión de la incisión en estos métodos suele variar entre 25 y 80 mm y la pieza a ensayar, entre 100 y 200 mm.

En Buro Happold (Inglaterra) se lleva a cabo este ensayo mediante muestras más grandes (800 × 400 mm) y se realiza una incisión de 40 mm, y han llegado a la conclusión de que en la mayoría de las telas la propagación del rasgado se produce al 25 % de la tensión de tracción.

Como conclusión de estas características mecánicas, la tabla 4.5 ofrece una comparación de las correspondientes a tres clases de telas y está tomada de Kenneth V. Lambert.

4.2.4. Influencia de la humedad y la temperatura

Ambas resistencias, tanto la de rotura como la de rasgado, varían según las condiciones ambientes de humedad y temperatura y, asimismo, según la duración del período de carga.

Por lo general, cuando aumenta la temperatura, disminuye la resistencia a tracción, incrementándose, sin embargo, la capacidad de deformación. Lo contrario ocurre cuando la temperatura baja. No obstante, la mayoría de los autores admiten que las características mecánicas no sufren una alteración sensible entre temperaturas de −25° C y +70° C. También influyen en este aspecto los revestimientos, de tal manera que, por ejemplo, un vulcanizado permite un mejor comportamiento ante altas temperaturas (+180° C) que un PVC.

Tabla 4.5. Comparación entre las características de 3 telas

Características	Unidad	Tipo de tela		
		Euro Class IV PVC Polyester 3 × *Panama*	**Shel-Rithe 9032 PVC Polyester** *WIWK*	**Sheerfill II Teflon Glass** *Normal*
Peso del tejido	gms	490	340	—
Peso de la tela	gms	1.300	1.090	1.530
Resistencia a la tracción	N/50 mm	7.450/6.400	5.700/5.700	7.010/6.135 *
ASTM 5102	KN/m	149/128	114/114	140/123 *
DIN 53354	LBF/in	850/730	650/650	800/700 *
Resistencia al rasgado				
ASTM 5134 Tongue	N	N/A	1.334/1.334	267/356
BS 3424 (7C)	LBF	N/A	300/300	60/80
Rasgado trapezoidal				
ASTM 5136	N	1.100/1.400	623/623	N/A
DIN 53363	LBF	247/315	140/140	N/A
Adherencia	N/50 mm	150	87,5	87,5
ASTM 5970	KN/m	3,0	1,75	1,75
DIN 53357	LBF/in	17,1	10	10

* Reducción del 12-15 % por plegado.

En cuanto a la humedad, afecta a la estabilidad dimensional de los hilos del tejido en función de su recubrimiento y del propio hilo. Concretamente, está comprobado que la fibra de poliéster es más estable ante este agente que la de poliamida, por lo que su uso es más general; ésta muestra una tendencia al estiramiento. En cualquier caso, se puede afirmar, con carácter general, que los tejidos se alargan con la humedad y se contraen con ambiente seco.

4.3. CARACTERISTICAS FISICAS

Al actuar la tela, no sólo como estructura, sino también como cerramiento, cobran importancia otras características físicas que cabe considerar; concretamente, su *durabilidad*, sus *coeficientes de aislamiento térmico y acústico* y su *coeficiente de transparencia* luminosa.

4.3.1. Durabilidad

El tiempo es uno de los «agentes» más agresivos para cualquier material de construcción, sobre todo si se usa en cerramientos exteriores: tiempo que debe considerarse siempre en relación con los agentes climáticos, temperatura, humedad y radiación solar, fundamentalmente. Ya hemos visto cómo la humedad y la temperatura afectan a las características mecánicas de la tela y cómo las radiaciones ultravioletas pueden perjudicar a las de la fibra, concretamente. El conjunto de estos factores (material de la fibra, tipo de tejido, tipo de protección, etc.) nos dará la durabilidad de la tela.

La mayoría de los fabricantes garantizan una vida útil de la tela de 20 años, siempre que esté sometida a las condiciones físicas previstas, aunque podemos considerar que la resistencia a tracción tiende a disminuir aproximadamente un 20 % en los 10 primeros años para después mantenerse casi constante. La tabla 4.6 muestra las curvas de disminución de la resistencia de una tela con el tiempo, según su fabricante.

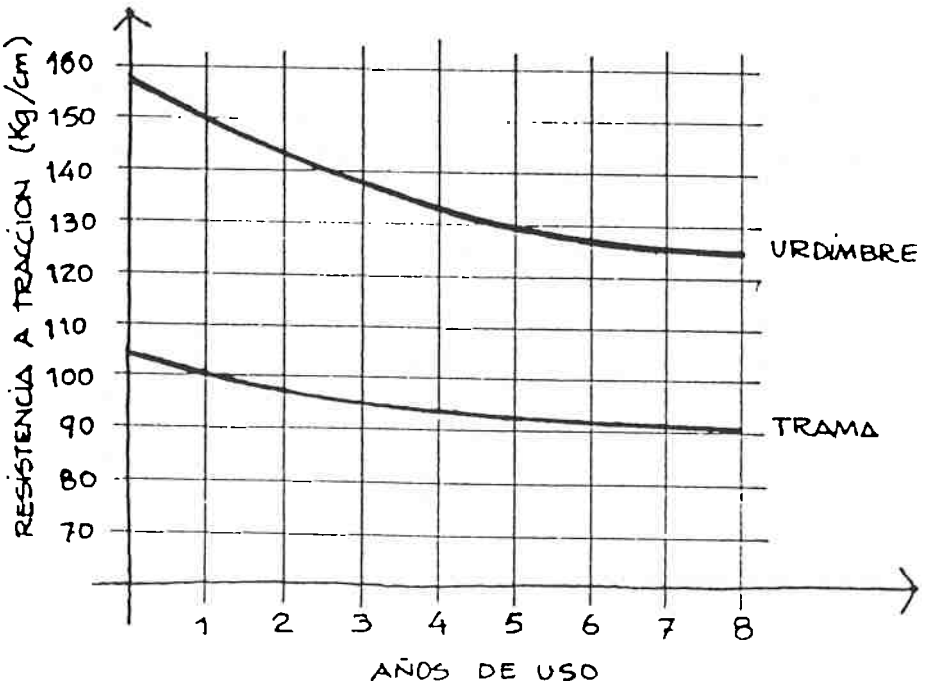
En una serie de estudios realizados por Martin Ansell en la Universidad de Bath (Inglaterra) sobre los dos tipos de telas más usuales, fibra de poliéster protegida con PVC y fibra de vidrio protegida con PTFE, se han alcanzado algunas conclusiones que conviene mencionar:

La protección de PVC se endurece y fisura ante la acción continuada de los rayos ultravioletas y la acción del agua hirviendo (altas temperaturas) lo que, evidentemente, deja las fibras expuestas a la intemperie con el consiguiente peligro. Además, la fibra de poliéster se vuelve quebradiza después de 6 semanas sometida al agua hirviendo.

Por el contrario, la protección de PTFE parece más efectiva. Sin embargo, la fibra de vidrio pierde un 40 % de su resistencia al someterla a 6 meses de inmersión en agua, por lo que resulta fundamental que la protección elimine totalmente el agua. Ello resulta esencial en los puntos de cruce de los hilos, en donde la capa de PTFE es más delgada y puede sufrir pequeñas incisiones exteriores que dejen la fibra sin protección, o simples fisuras como consecuencia de la deformación de la tela, bien por la tensión de trabajo, bien por la deformación propia de la construcción (cambio de onda).

La experiencia recogida en la práctica se refiere, sobre todo, a cubiertas hinchables con tejido de poliéster protegido con PVC y nos dice que la tela ha mantenido, en general, sus características mecánicas, aunque su aspecto ha sufrido envejecimiento debido, en la mayoría de los casos, a falta de mante-

Tabla 4.6. Evolución de la resistencia a tracción con el tiempo



nimiento o a uso inadecuado. De hecho, existen estructuras hinchables con más de 15 años de servicio, fabricadas con esta tela, en perfecto estado.

La protección de PTFE no tiene todavía la experiencia suficiente, y la más moderna de silicona tampoco, aunque se conocen sus excelentes resistencias a los rayos ultravioletas.

Por otra parte, en los bordes de la tela se puede producir un fenómeno de absorción de agua por parte de los extremos de las fibras, agua que puede ascender por capilaridad a lo largo de las mismas.

Este agua puede transportar microorganismos que se pueden establecer y desarrollar entre la fibra y la protección produciendo manchas incontroladas y, en los casos de protecciones plastificadas, pueden consumir el plastificante haciendo quebradiza la protección, con el consiguiente peligro de degradación de las fibras del tejido.

Para evitar este fenómeno de capilaridad, bastará sellar con la misma protección los bordes de la tela una vez cortada y cosida. Para comprobarlo, según Lambert, bastará someter el borde de la tela a una inmersión de 24 horas en agua tintada y ver si ésta asciende por las fibras.

Pero hay otros agentes que pueden condicionar la durabilidad de las telas y que dependen de su uso. El más importante, y a la vez más analizado, es el *fuego*. Como quiera que es un agente muy estudiado y condicionado por la normativa en la mayoría de los países, los fabricantes se han preocupado de su protección. En Alemania Federal se suele exigir, cuando se trata de espacios cerrados, que cumplan las normas DIN 4102, de combustión en cámara, y DIN 53906 y 53907, de resistencia al fuego de textiles con probetas sostenidas horizontal y verticalmente, resultando positivas para la mayoría de las telas usadas para grandes cubiertas.

En realidad todas las telas que se usan en este tipo de estructuras acaban coonsumiéndose por el fuego, con la diferencia, entre unas y otras, que las membranas poliméricas, se consumen al alcanzar temperaturas entre 160 y 250° C. En cualquier caso, el agujero que se produce en la tela, facilita la ventilación, por lo que reduce el peligro de asfixia de los ocupantes y, además, el fuego suele limitarse a la zona en que se origina al quedar muy limitada la propagación por las características de los materiales y a su autoextinción.

En EE.UU. suelen pasar satisfactoriamente los ensayos indicados en las normas ASTM-84, 108 y 136 sobre combustibilidad e inflamabilidad. En definitiva, se puede decir que estos tipos de telas están, o deben estar, compuestas de un tejido incombustible, con una protección resistente a la llama que, en cualquier caso, debe ser capaz de resistir al fuego el tiempo que determine la normativa al caso, según el uso que se le quiera dar. En este sentido, deberemos distinguir, sobre todo, entre telas como cerramiento y telas como toldos. En las primeras las exigencias serán, obviamente, mayores.

En nuestro país y de acuerdo con la norma NBE-CPI de condiciones de protección contra incendios, debemos obtener, en primer lugar, una clasificación del material por su reacción contra el fuego según UNE 23-727-80. A continuación, los anejos del 1 al 10 de la norma, nos darán la resistencia al fuego del cerramiento exigida según el uso del edificio.

4.3.2. Estabilidad dimensional

Como hemos visto al hablar de la constitución del tejido y de las características mecánicas de la tela, ésta se deforma ante esfuerzos de tracción, bien sea por

el llamado «cambio de onda», que produce una primera «deformación de construcción», o por la propia deformabilidad de las fibras antes de llegar a la tensión de rotura. Esta deformación es importante en el funcionamiento estructural del conjunto, ya que permite a la membrana absorber parte de la tensión a la que se ve sometida en su funcionamiento, tanto la tensión de estabilización o pretensión, como la debida a los esfuerzos exteriores.

En cualquier caso, esta deformación inicial obliga a una revisión periódica del estado tensional de la membrana, sobre todo en los primeros meses de su vida, aunque esto también depende del tipo de tela y de las condiciones ambientales a las que esté sometida. Los tejidos entrelazados de poliéster necesitan una «postensión» antes de los 6 meses de su montaje, mientras que los de fibra de vidrio se suelen revisar al año, al tener una menor deformación. También es menor la necesidad en los casos de los tejidos no entrelazados (atados) al no darse el «cambio de onda».

Además de esta deformación por tensión, hemos visto que se producen variaciones dimensionales como consecuencia de los cambios de humedad y temperatura, sin embargo, éstos son menores que los introducidos por la pretensión, aunque no despreciables. De hecho, en los tejidos de poliéster, alrededor del 50 % de la pretensión puede perderse debido a las dilataciones, lo que obliga a vigilar el estado tensional en función de las variaciones de humedad y temperatura.

4.3.3. Aislamiento térmico y acústico

No cabe duda que la tela como material de construcción de un cerramiento no puede presentar grandes coeficientes de aislamiento debido a su poco peso y espesor, por lo que las condiciones térmicas y acústicas del espacio encerrado habrá que obtenerlas por vía del diseño. Ya hemos mencionado los efectos invernadero y sombrilla para el ambiente térmico y algo similar habrá que buscar para el acústico. No obstante, conviene mencionar, aunque sea esquemáticamente, las características físicas más destacadas en estos sentidos.

El coeficiente de transmisión térmica, K, puede variar entre 6,2 y 4,1 kcal/h m^2 ° C, para una tela simple. Sin embargo, si colocamos dos telas paralelas, podemos aprovechar el efecto invernadero que se forma entre ellas

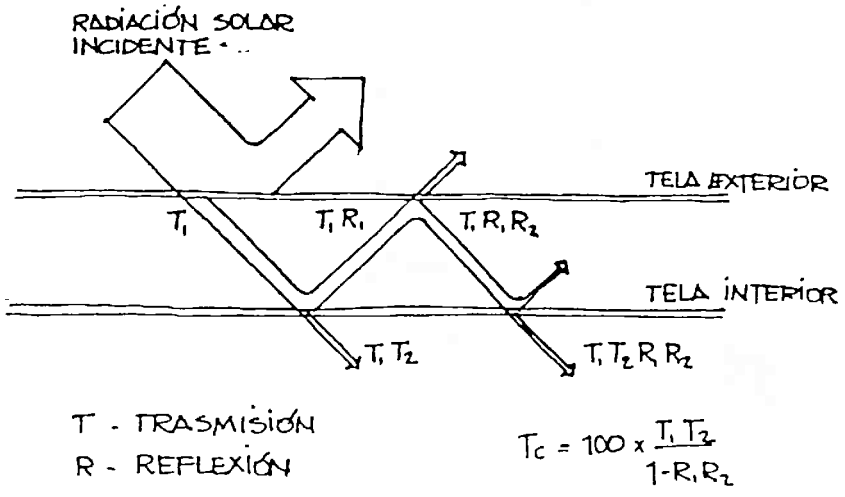


Figura 4.3. Calentamiento por doble tela.

(fig. 4.3) y disminuir considerablemente el coeficiente de transmisión a valores del orden de 2 kcal/h m^2 ° C. Si seguimos añadiendo hojas de tela (3 hojas es relativamente fácil) podremos disminuir todavía más el coeficiente de transmisión térmica. Unicamente habrá que considerar la relación precio-aislamiento.

También se puede mejorar el aislamiento térmico introduciendo una capa de espuma. Esta puede ser, bien como parte de la tela (de protección) como hace una empresa italiana, bien como un elemento adicional. En cualquier caso hay que tener en cuenta el problema de la condensación superficial interior, como consecuencia del poco aislamiento, que aporta una humedad en la superificie interior de la tela que, como vimos, hay que asegurar que no llegue a la fibra.

En cuando al acústico, en este tipo de cubiertas el aspecto más importante no es el aislamiento del ruido exterior, para el que las telas suponen una barrera muy débil, sino, sobre todo, el acondicionamiento interior, es decir, la disminución de las reflexiones interiores. Como quiera que la superficie resultante es muy lisa, la absorción de reflexiones deberá basarse en la adición de algún tipo de rugosidad o de material absorbente. Para la rugosidad es bastante corriente el añadir unas bandas a la superficie de la tela, que tienen la misión de «romper» las reflexiones (fig. 4.4). Es una solución empleada, sobre todo, en grandes cubiertas soportadas por aire, donde la curvatura cóncava hacia el interior facilita la concentración de las reflexiones en el ambiente que cubre, aumentando, por tanto, el nivel acústico interior.

En cuanto a materiales más absorbentes, la mayoría de los fabricantes producen unos tipos de tejidos especiales, con un alto poder de absorción por su estructura y porosidad, para su uso en el ambiente interior. Estos tejidos pueden colocarse, bien en bandas perpendiculares, como queda mencionado en el párrafo anterior, bien en una hoja de tela adosada a la estructural, solución que puede ser empleada fácilmente en las cubiertas colgadas y puede alcanzar un coeficiente de reducción de la reflexión del 0,65 en cubiertas integrales.

También aumenta el coeficiente de absorción la doble membrana indicada para mejorar el aislamiento térmico.

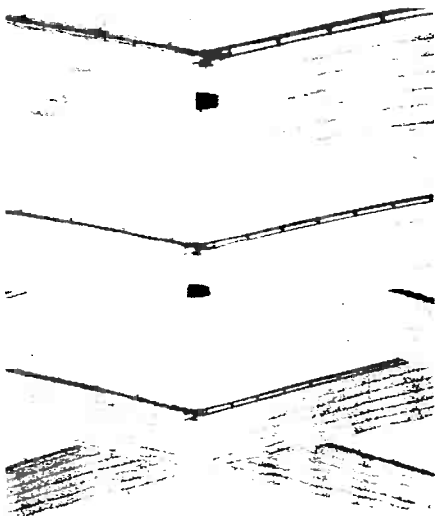


Figura 4.4 Acondicionamiento acústico por bandas colgadas.

En cuanto a la resistencia al paso del sonido aéreo, un estudio realizado por Moulder y Merrill en 1982 sobre tres tipos de telas de diferente peso, dio como resultado que las más pesadas (de 1.270 a 1.500 gr/m^2) alcanzan una resistencia acústica de 10 dB para bajas frecuencias (250 Hz) y 20 dB para frecuencias altas (2.000 Hz) mientras que las ligeras (400 gr/m^2) ofrecen sólo una resistencia acústica entre 5 y 10 dB.

Por otra parte, si añadimos una segunda tela, conseguimos un aumento de resistencia de 5 dB. Si, además, incluimos un aislante intermedio de 50 mm de espesor, podemos llegar, con las membranas más pesadas, hasta resistencias de 15 dB para bajas frecuencias y 34 dB para altas frecuencias.

4.3.4. Transparencia

Es, quizás, la característica física de la tela que resulta más aprovechable para lograr un ambiente interior atractivo, además de la propia cubierta como protección de la lluvia y del sol. En efecto, la transparencia implícita en la tela le confiere un carácter de foco de luz difusa suficientemente alta como para lograr unos niveles de luminancia interior muy agradables y adecuados para todo tipo de actividades y suficientemente matizado con respecto al soleamiento directo como para no necesitar ningún tipo de protección adicional. Pero, además, la gran ventaja de estas telas es que en su fabricación se puede incidir en su coeficiente de transparencia, consiguiéndolo mayor o menos según las necesidades de luminancia interior.

Con carácter general la figura 4.5 representa el funcionamiento de una tela frente a la radiación solar en la que vemos que, como término medio, de la

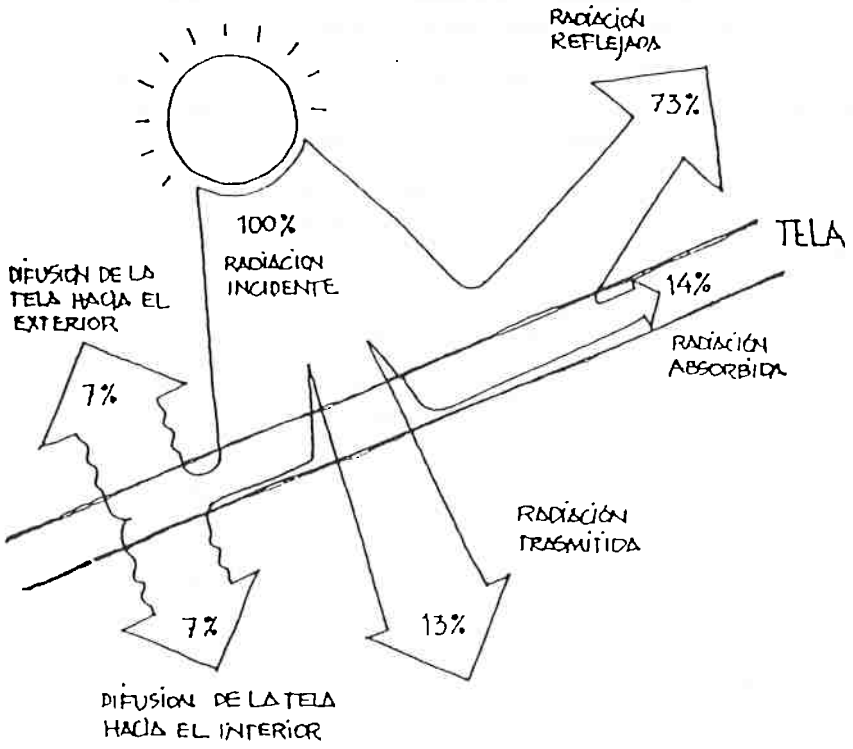


Figura 4.5. Distribución de la radiación solar en una tela del mercado.

radiación total incidente (suma de la directa del sol más la difusa de la atmósfera) alrededor de un 70 % es reflejada directamente mientras que un 15 % pasa, también directamente, al interior, y otro 15 % es absorbida, en un principio, por la tela que, en consecuencia, actúa como nuevo foco difusor de energía, reflejando la mitad hacia el exterior e introduciendo la otra mitad hacia el ambiente interior en forma de energía calorífica. En definitiva, resulta un coeficiente de transparencia luminosa muy próximo al 25 % con carácter general, lo que indica que si consideramos, por ejemplo, un cielo tipo CIE en el exterior de 5.000 lux, la luminosidad que pasa al interior será de 750 lux, que es muy adecuada, incluso para actividades de precisión. Pero, además, el foco de iluminación que tendríamos sería toda la superficie de la tela, lo que resulta sumamente agradable, pues supone un tipo de fuente luminosa muy homogénea, sin contrastes excesivos ni deslumbramientos, y con una gran uniformidad de iluminación al llegar la luz desde todas las direcciones.

Las telas actuales en el mercado, como se puede ver en la tabla 4.7, presentan una gama de transparencias que suele variar entre el 5 % (para las telas muy opacas, poca necesidad de iluminación) y el 50 % (telas muy transparentes, mayor necesidad de iluminación) lo que nos permite adaptarnos a diversas situaciones exteriores, así como a diferentes necesidades ambientales interiores. Cuando sea necesaria oscuridad total, se pueden utilizar telas opacas, con un coeficiente de transparencia de 0 %.

Este funcionamiento de la tela frente a la radiación solar incidente, nos da idea de su posible aprovechamiento para el ambiente térmico interior, tanto para conseguir el efecto invernadero, como para el efecto sombrilla que mencionábamos en el capítulo 1, jugando con las exigencias del ambiente interior, las características reflectantes de la tela y el diseño de la cubierta.

Tabla 4.7. Coeficiente de transmisión luminosa de tres tipos de tela actuales en el mercado, según sus fabricantes

Tipo de tela	Composición		Coeficiente de transmisión en %
	Tejido	Protección	
TYGAFLOR 267AF/38T de Fothergill & Harvey plc.	Fibra de vidrio	Teflon, fluorocarbono, polímeros y cargas	entre 7,1 y 12
SOFTGLASS TM 602 de Dow Corning	Fibra de vidrio	Elastómeros de silicona y resinas	25
SOFTGLASS TM 300 de Dow Corning	Fibra de vidrio	Elastómeros de silicona y resinas	50
DURASKIN (Varios) de Verseidag-Industrie Textilien GMBH	Fibra de poliéster	PVC	entre 5 y 40

4.3.5. Mantenimiento

Resulta un capítulo importante en cualquier sistema constructivo, pero muy especialmente en éste, en el que la tela como estructura y cerramiento está

aprovechada al máximo de sus posibilidades y, por tanto, es fundamental mantener sus características fisicoquímicas iniciales a lo largo de la vida de la cubierta.

En este sentido, ya hemos hablado de la importancia de mantener la pretensión adecuada para su estabilidad a base de revisiones periódicas y, sobre todo, cuando se dan variaciones de humedad o de temperatura.

En cuanto a las características físicas de la tela, debemos considerar su limpieza y las posibilidades de reparación. La primera, tanto para mantener la transparencia y aspectos adecuados, como para evitar posibles ataques químicos de la contaminación atmosférica y urbana a sus materiales constituyentes. La reparación, para mantener su integridad.

En cuanto a la *limpieza*, las protecciones a base de plastificantes tienen una importante electricidad estática que atrae las partículas en suspensión en la atmósfera, por lo que algunos fabricantes les añaden productos autolimpiadores que tienden a evitar los efectos foréticos. Ello implica, naturalmente, mayores costes. Como siempre, el PTFE presenta un mejor comportamiento que el PVC ante este problema.

En cualquier caso, hay que prever limpiezas periódicas de la superficie exterior de la cubierta con agua y jabón.

En cuanto a las *reparaciones*, el PVC ofrece mayor facilidad mediante adhesivos o soldadura «in situ». El PTFE sobre fibra de vidrio es también reparable, pero implica un mayor cuidado debido a la menor resistencia al desgaste y a la mayor fragilidad del tejido. No obstante, cualquiera de estas reparaciones es más llamativa (se notan más) cuanto más transparente es la tela.

En general, una de las consideraciones básicas para evitar el tener que llegar a la reparación, es el cuidado en la manipulación de la tela durante el montaje, a lo que hay que añadir su defensa de la aproximación de personas durante su vida.

Capítulo 5

Confección

Una vez vistas las propiedades fisicoquímicas de la tela como material base para la construcción de la Arquitectura textil, veamos su *ejecución*, que en este caso llamaremos *confección* por estar inmersos en el campo textil. Se trata, en realidad, de una «prefabricación» de la cubierta en cuestión, toda vez que la llevamos a cabo en taller, partiendo de un material y unos procedimientos de unión, y basándonos en unas formas geométricas determinadas de los elementos componentes (los patrones) para conseguir un elemento constructivo final (la cubierta) de unas dimensiones que nos den la forma y estabilidad buscadas.

De hecho la tela, como material industrial, se suministra en bobinas de anchos relativamente reducidos que varían entre 1,20 y 2,0 m como término medio, aunque algunas firmas comerciales sean capaces de suministrar bobinas de hasta 5 m de ancho.

No obstante, éstas son dimensiones que no suelen ser suficientes para las superficies que queremos cubrir, por lo que es necesario ir a la unión de una serie de piezas de tela para conseguir la superficie total necesaria. Por otro lado, esta superficie necesita un remate de borde que nos asegure su integridad y que nos permita su unión a la estructura que la va a sustentar o anclar. Veamos los aspectos más importantes de este proceso.

En cualquier caso, para obtener la superficie total que necesitamos mediante la unión de trozos de tela de tamaño reducido, el primer paso será fijar la forma y dimensión de estos trozos, al igual que hace cualquier sastre para la confección de un traje de vestir. Precisamente por esta analogía, a esos trozos de tela con forma definida les podemos llamar «patrones». Su diseño será fundamental para obtener, con el mínimo de tela imprescindible, la forma y la curvatura total buscadas sin que aparezcan tensiones diferenciales en las uniones de los patrones, bien por falta de tela en alguno de ellos (aparecen tensiones excesivas) o por exceso de material (aparecen arrugas). Esta es una operación relativamente complicada y requiere especialistas para su desarrollo. Por ello vale la pena que nos detengamos algo en su análisis y lo haremos en el siguiente capítulo. En éste, nos centraremos en la unión de estos patrones y en el remate perimetral para obtener una superficie total íntegra y de características fisicomecánicas uniformes y adecuadas en toda su superficie.

5.1. UNIONES

Una vez obtenidos los patrones, hay que unirlos entre sí para obtener la superficie total deseada. Estas uniones tienen que ser tales que no se distingan del resto de la tela en su función. Es decir, no son uniones funcionalmente necesarias, sino que, una vez realizadas, tienen que desaparecer como tales y actuar como parte de todo el conjunto. En definitiva, a las uniones les tenemos

que exigir, por lo menos, las mismas características mecánicas y físicas que al resto de la tela. No obstante, sabemos que no vamos a poder evitar que al ser uniones lineales, se concentren a lo largo de su directriz algunas de las tensiones de las que actúan sobre las telas adyacentes, por lo que necesitaremos establecer tratamientos especiales que permitan su correcto funcionamiento. Debemos conseguir, por tanto, una correcta actuación ante las siguientes acciones:

— *Mecánicas.*

— Tensiones según su directriz.

— Tensiones perpendiculares.

— Elasticidad diferente a la de las telas adyacentes.

— *Físicas.*

— Estanquidad.

— Impermeabilidad.

— Resistencia al fuego.

— *Químicas.*

— Resistencia a rayos ultravioleta de los materiales aportados en la junta.

Teniendo en cuenta todos esos extremos, veamos los distintos tipos de juntas más usuales y sus materiales constitutivos.

5.1.1. Juntas cosidas

Son las más tradicionales y consisten, básicamente, en la unión de los bordes de las dos telas contiguas mediante su costura.

Aparecen varios tipos según el sistema de solape que se utilice (Fig. 5.1). Así tenemos juntas con *solape simple*, con *solape mixto* (doble en una de las telas

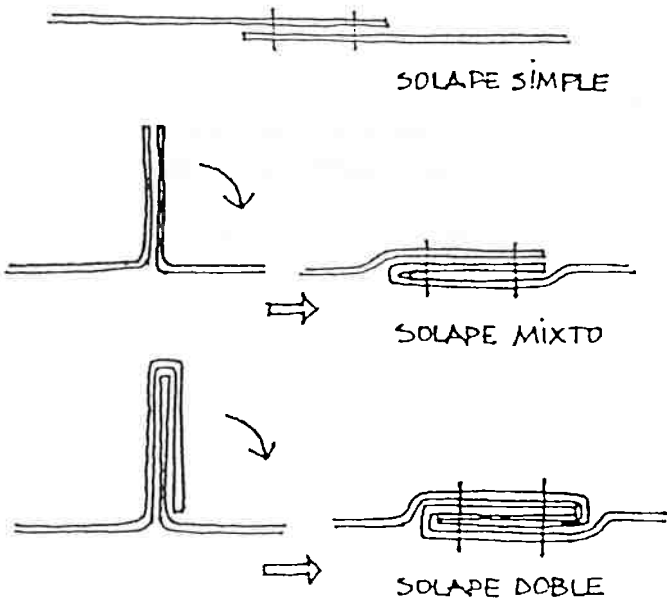


Figura 5.1. Tipos de juntas cosidas

y sencillo en la otra) y con *solape doble* en cada una de las telas. Naturalmente, cuanto más compleja, más segura e impermeable, pero exige mayor cantidad de tela perdida en los bordes y adquiere mayor rigidez.

En cualquiera de los casos, existe una aportación de un nuevo material en la ejecución de la junta —el hilo y la costura— y éste, unido a la sucesión de perforaciones, son los factores que puedan introducir problemas en el funcionamiento de la unión. Por una parte, tenemos el peligro del ataque de los rayos ultravioleta, ya que el hilo está, en principio, desprotegido; por ello resulta importante aplicar un barniz de composición similar al que constituye la protección de la misma tela. Por otra parte, aparece la posibilidad de rasgados, bien de la tela, por los agujeros de paso del hilo, bien por rotura del propio hilo si no tiene la resistencia suficiente, debidos, en cualquier caso, a la concentración de tensiones en la junta.

Analicemos brevemente esas tensiones.

Por un lado, está la *tensión en la propia dirección* (Fig. 5.2) que no introduce, en principio, ninguna acción anómala, si exceptuamos el hecho de que, al tener en una misma franja lineal más de una capa de tela unidas entre sí, el módulo de elasticidad del conjunto es mayor que el de la membrana simple adyacente en cada uno de los lados y, por tanto, su deformabilidad ante una misma tensión es menor. Como quiera que la tensión inicial según la línea de la unión es la misma en ella que en las zonas adyacentes, se producirá un fenómeno de deformación diferencial entre la junta y las telas que ahí se unen al deformarse más éstas que aquélla, lo que puede fomentar la aparición de arrugas perpendiculares a la unión. Cuanto mayor sea el número de capas de tela de la junta, más diferencia existirá entre la deformabilidad de ambas zonas y, por tanto, mayor será la posibilidad de arrugas perpendiculares.

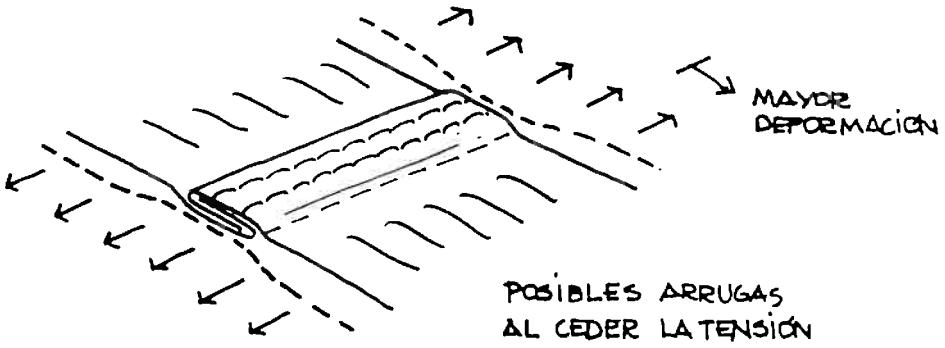


Figura 5.2. Tensiones longitudinales en una junta cosida

No obstante, este fenómeno se puede ver compensado, por un lado, con la confluencia de tensiones en otras direcciones que tienden a anular la aparición de arrugas y, por otro, procurando disminuir la diferencia de deformaciones en base al cálculo de tensiones.

Por otra parte, debemos considerar las *tensiones perpendiculares* a la propia unión, en las que se resumen los efectos de todas las que no coinciden con la dirección de la misma (Fig. 5.3). En este caso, podemos ver unas pequeñas deformaciones entre las puntadas, que estarán en función de la propia tela (su rigidez) de la separación entre puntadas y de la disposición de las costuras.

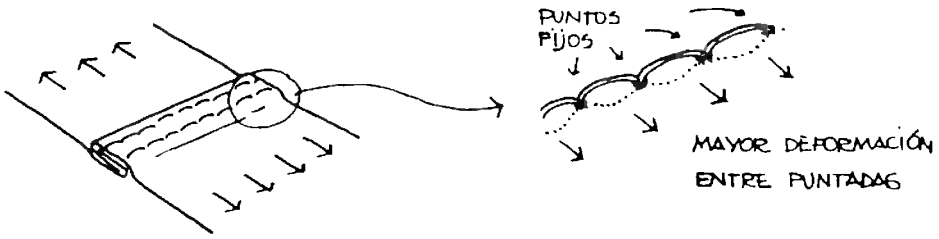


Figura 5.3. Tensiones transversales en una junta cosida

En efecto, las puntadas funcionan como puntos fijos ante las tensiones perpendiculares, ya que actúan como transmisores puntuales de las tensiones entre una tela y otra a ambos lados de la unión. En consecuencia, la parte de la tela entre puntadas sufre una pequeña deformación en forma de catenaria que introduce unas concentraciones tensionales en las mismas que, por otra parte, pueden facilitar el fenómeno del rasgado.

Estas deformaciones pueden anularse, o por lo menos reducirse, con el sistema de costura. Básicamente podemos contemplar dos sistemas (Fig. 5.4): *doble costura de puntada alternada*, que introduce puntos fijos de transmisión al tresbolillo que tienden a contrarrestar la deformación antes mencionada, y *costura en zig-zag* que produce, en definitiva, el mismo efecto. Ambas costuras se pueden llevar acabo con una sola «pasada» de la unión por la máquina y su funcionamiento es similar, aunque en la segunda se puede considerar que existe una «triangulación» de la costura que facilita la transmisión de los esfuerzos que aparecen en la junta.

En cualquier caso, la separación entre puntadas se debe decidir en función de las tensiones transversales a las que va a estar sometida la junta ya que, si no hay otro elemento de unión, éstas son las que tienen que ser capaces de resistir los esfuerzos basados en la resistencia a cortante y a tracción del propio hilo y del rozamiento entre telas.

En cuanto al hilo, debe tenerse en cuenta su resistencia y su composición físicoquímica. Su resistencia estará en función de las tensiones y de la separación entre puntadas indicadas más arriba. Su composición deberá ser, en principio, la misma que la de las telas que se unen, por «afinidad constructiva», siempre que se asegure su resistencia a los elementos atmosféricos, sobre todo a los rayos UV tal como se ha mencionado. Por otra parte, hay que tener en cuenta que el tipo de hilo y el de costura influirán también en el módulo de elasticidad de la junta que, como se vio, influye en su comportamiento y en la posibilidad de arrugas perpendiculares en la misma.

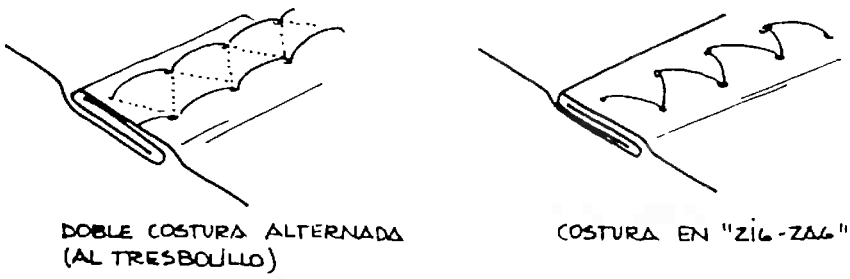


Figura 5.4. Alternativas de costura de juntas

5.1.2. Juntas pegadas

Son juntas de fácil y rápida ejecución y, por tanto, muy indicadas para las reparaciones de telas utilizadas, incluso realizadas «in situ».

Pueden considerarse también varios tipos según el sistema de solape (Fig. 5.5). Así tenemos, de nuevo, las de *solape simple*, con el pegamento entre medias, las de *banda auxiliar simple* y las de *banda auxiliar doble*, que es la de mayor resistencia y estanquidad. En estas dos últimas, además, puede conseguirse un pequeño ahorro de tela, ya que los bordes de los patrones adyacentes quedan a tope, siempre que se consiga hacer las bandas auxiliares mediante retales.

Como material de pegamento es recomendable utilizar el mismo que se ha empleado para proteger el tejido de la tela, con lo que la adherencia de la unión es muy resistente, incluso superior a la que existe entre la protección y el tejido. Existe, no obstante, y según el pegamento que se utilice, el peligro de que las altas temperaturas le afecten y, por difusión plástica, pierda resistencia, apareciendo el rasgado por la propia junta.

✳ Es el sistema normalmente utilizado en las telas protegidas con silicona por las características poco soldables de ésta.

Un factor a considerar en este tipo de juntas es el borde cortado, tanto de las telas a unir como de las bandas auxiliares, ya que en ellos los hilos del tejido quedan a la intemperie. En estos casos, no habrá más remedio que aplicar «a posteriori» una protección.

En cuanto a la situación tensional en la junta, al ser la unión continua no aparecen los problemas que se planteaban en las juntas cosidas, excepto el de deformación diferencial ante tensiones en la dirección de la unión. En este sentido, las uniones con bandas auxiliares implicarán mayor rigidez longitudinal.

5.1.3. Juntas soldadas

Son las juntas más modernas, y a la vez, más efectivas. Consisten en aprovechar la capacidad de reblandecimiento y fusión de los materiales termoplásti-

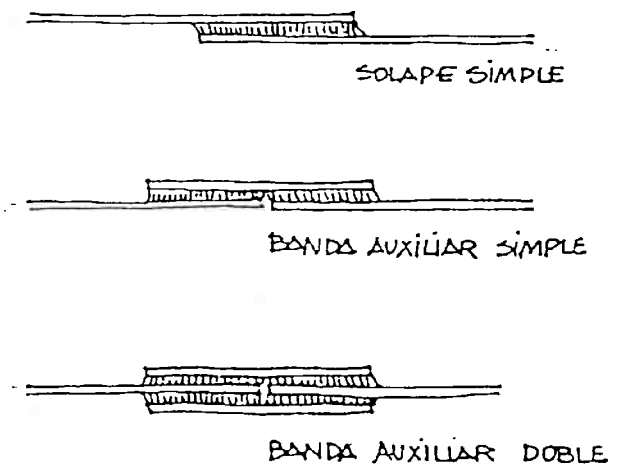


Figura 5.5. Tipos de juntas pegadas y soldadas

cos que constituyen la protección de las telas. Para su ejecución bastará calentar por algún procedimiento los bordes a unir, solaparlos y someterlos a presión hasta que se solidaricen.

Los procecimientos de calentamiento son variados, desde el contacto con herramientas calientes, hasta las altas frecuencias.

La presión se suele conseguir mediante unos rodillos que avanzan sobre la unión a velocidades entre 3 y 5 m/min., lo que permiten una ejecución más rápida. En cualquier caso, es fundamental que la capa de protección de material termoplástico esté repartida en partes iguales a ambos lados de la tela y que el calentamiento no afecte al tejido.

Los tipos de juntas según el sistema de solape son los mismos que veíamos para juntas pegadas.

Las telas con protección de PVC se suelen soldar mediante calentamiento por emisión de altas frecuencias hasta que el PVC se funde y suelda la unión en función de su adherencia al tejido, lo que da una junta muy eficaz.

En las telas protegidas con PTFE la soldadura se lleva a cabo usando un aditivo de fluoretileno-propileno (FEP) que se calienta directamente y se funde al alcanzar los 350° C. Cuando la protección tiene la suficiente cantidad de FEP bastará con calentar la unión por cualquier procedimiento convencional.

Uno de los principales problemas de este tipo de uniones son las temperaturas que se alcanzan en la superficie exterior, que pueden afectar a la integridad de la soldadura. Dependiendo del color de la tela y de la zona climática, pueden alcanzar los 70° C, por ello, se ha desarrollado un ensayo de carga para uniones soldadas a altas temperaturas. En él, se aplica la carga a la unión soldada durante 4 horas a una temperatura de 70° C, y se va uniendo dicha carga hasta el fallo de la unión o el despegue de la protección. El ensayo puede aplicarse hasta una duración de 24 horas para casos de condiciones extremas.

En lo que se refiere a la situación tensional en la junta, es aplicable lo indicado para las juntas pegadas, con la ventaja, incluso, de poder ser más uniforme el módulo de elasticidad, ya que no introducimos ningún producto adicional que pueda variar dicho módulo.

En cualquier caso, conviene analizar esquemáticamente el funcionamiento tensional (Fig. 5.6). Básicamente, la capacidad resistente ante tensiones perpendiculares a la junta (las longitudinales no difieren de las cosidas) depende de

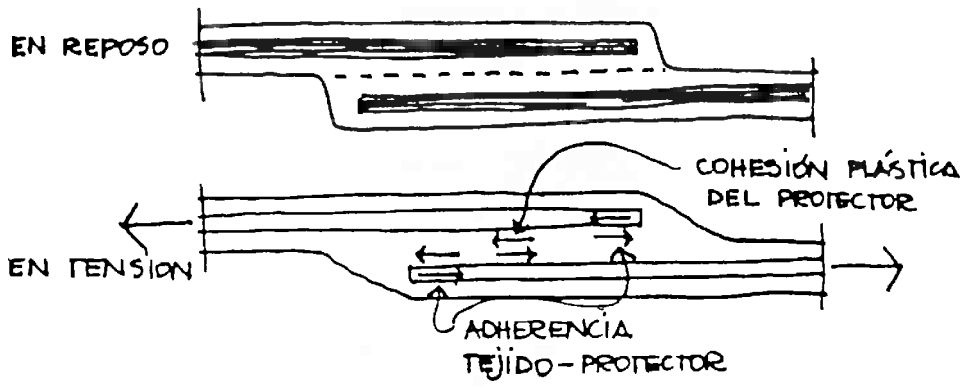


Figura 5.6. Esquema tensional en las juntas soldadas y pegadas

la adherencia entre la protección y los dos tejidos unidos, así como de la resistencia a la tensión de la propia masa del protector. De hecho nos aparece un par de fuerzas de sentidos opuestos que introduce un esfuerzo rasante en la unión, que lleva a una deformación del material intermedio fundido que, en definitiva, tiene que ser absorbido, por una parte, por la coesión plástica del producto de adición (el protector) y, por otra, por su adherencia con el tejido. Todo ello condicionará la dimensión del solape entre los bordes de las telas contiguas, que a veces tiene que ser importante, sobre todo para evitar una deformación excesiva.

5.1.4. Juntas mixtas

Con el objeto de cubrir los posibles defectos de los tipos de junta vistos (sobre todo, cosidas y soldadas) es práctica corriente recurrir a las juntas mixtas en las que, además de soldar, se introduce un cosido, bien con dos costuras paralelas y alternadas, bien con una costura en zig-zag. De ese modo aseguramos, por un lado, la integridad de la unión en todos los sentidos y, por otro, su estanquidad.

5.1.5. Juntas grapadas

Es un tipo de unión menos estanco, impermeable y resistente que cualquiera de los anteriores, por lo que su uso debe limitarse a casos con niveles de exigencias menores.

El grapado puede ser de varios tipos según la herramienta y grapa que se usen y según el tipo de solape (Fig. 5.7). Así tenemos el *grapado simple*, el grapado con *doble solape*, grapados en un solo lado que dejan el solape perpendicular a la tela, y el grapado con *solape paralelo* a la superficie textil.

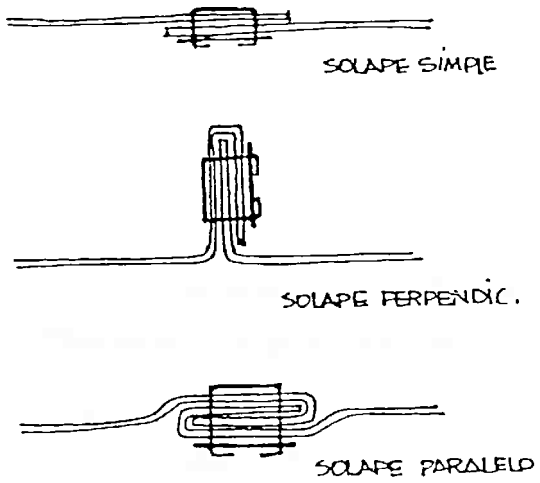


Figura 5.7. Tipos de juntas grapadas

También son variados los tipos de grapas, desde las similares a las que se usan para los papeles, con dos perforaciones o con una sola, hasta los remaches automáticos, pasando por los atornillados. (Estos dos últimos pueden combi-

narse con una pletina metálica longitudinal que refuerza la unión en su conjunto.)

Otro aspecto peyorativo para este tipo de uniones es el daño que se produce en la tela al ser las perforaciones mucho más importantes que en las juntas cosidas. Si se trata de grapas, a pesar de ser perforaciones pequeñas, las puntas de sus extremos pueden cortar los hilos del tejido en lugar de simplemente «abrirlos» como ocurre con las costuras. Si se trata de remaches o tornillos, el corte de los hilos es inevitable, y sólo la cohesión entre tejido y protector impide que la rasgadura sea segura.

En algunas soluciones provisionales para cubiertas hinchables con membranas de polietileno, se han utilizado estas juntas con éxito, incluso con posibles refuerzos lineales (Fig. 5.8).

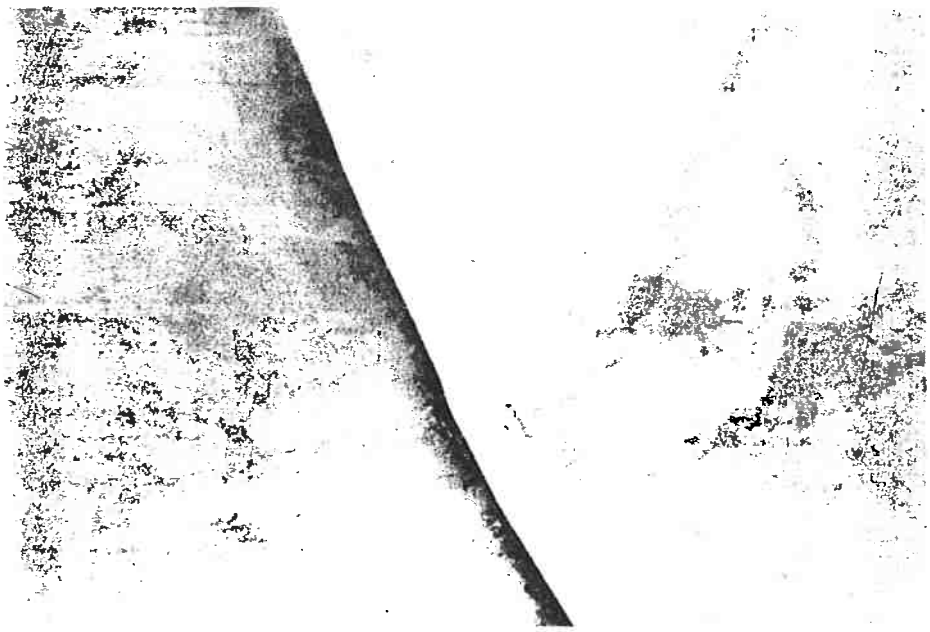


Figura 5.8. Junta con grapado manual

5.1.6. Juntas practicables

Los tipos de uniones vistas hasta aquí pueden considerarse como uniones permanentes por su sistema de ejecución. Sin embargo, hay ocasiones en que, para la utilización, e incluso montaje, puede ser conveniente dividir la superficie total en varios tramos que se tienen que poder unir y separar con relativa facilidad. Aparece entonces la necesidad de las uniones practicables.

Las exigencias sobre ellas pueden ser muy variables según su localización y, por tanto, esfuerzo mecánico que vayan a soportar o agentes físicos que vayan a sufrir. Por ello aparecen varios tipos a considerar (Fig. 5.9)

Cremalleras

Son las más sencillas de manejo y las que presentan menor posibilidad de arrugas, así como mayor estanquidad al agua, aunque sea conveniente colocar

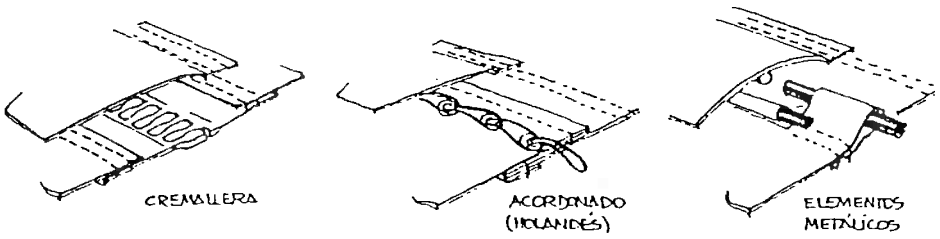


Figura 5.9. Algunos tipos de juntas practicables

encima una banda auxiliar de protección. Exigen, sin embargo, un mantenimiento cuidado para evitar la apertura de algunos de los eslabones, lo que produciría el rasgado de la unión.

Acordonados

Son también sencillas de manejo aunque más lentas de ejecutar (hacer y deshacer). Uno de los tipos consiste en unir los bordes de la junta mediante unos lazos colocados en uno de ellos, que pasan por unos ollaos ejecutados en el otro y que se enganchan entre sí. Otro tipo corriente se realiza con un cordón, continuo o por tramos, que ata los dos bordes haciéndolo pasar por los ollaos practicados en ambos. En general, presentan poca seguridad y es conveniente también una banda auxiliar de protección. Por su sistema de ejecución y por la cantidad de puntos de rozamiento no presenta una gran durabilidad.

Elementos metálicos

Existen multitud de tipos y se basan en el uso de diferentes elementos metálicos que se conectan entre sí procurando siempre el suficiente solape de los bordes de la tela. Son uniones por puntos, como la anterior, por lo que sus resistencias, tanto mecánicas como físicas, no son muy elevadas.

Un aspecto importante común a todas estas uniones, es la gran incidencia del módulo de elasticidad de las mismas, mucho menor que el de las telas que unen. Ello obliga a considerarlo en el cálculo de un modo especial; asimismo, produce una concentración de esfuerzos longitudinales en la propia unión, debido a la mayor deformación de las telas adyacentes, que, además de facilitar la producción de arrugas perpendiculares a la junta al variar las tensiones, implica asegurar que la misma es capaz de absorber esta sobretensión.

5.2. BORDES

Uno de los puntos débiles de cualquier membrana es su borde, puesto que en él tienden a concentrarse las tensiones que la membrana está soportando en todas las direcciones en cualquier punto de su superficie. En efecto, al aparecer una interrupción de la membrana, las tensiones de tracción, cuya dirección se ve interrumpida, se transforman en nuevas tensiones que tienden a acumularse en la dirección del corte para contrarrestar las que quedan en el lado de la membrana que permanece, suponiendo que este borde quede suelto. Si se fijase de un modo continuo, las tensiones se transmitirían al sistema de fijación

(Fig. 5.10). Por ello, resulta importante prestar atención a la ejecución del borde en las telas colgadas que estamos analizando.

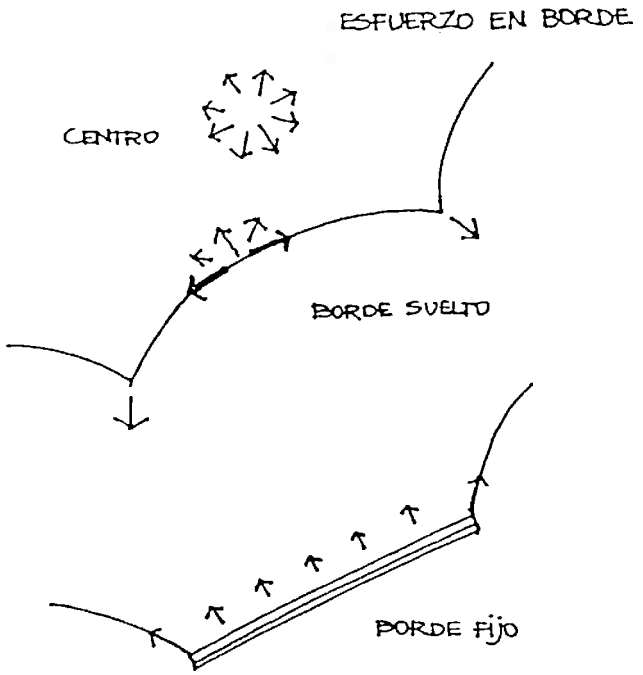


Figura 5.10. Esfuerzos en bordes

5.2.1. Borde perimetral

En dicho borde debemos considerar dos aspectos fundamentales desde el punto de vista constructivo, es decir, de confección. Por un lado, la *integridad* de la propia tela, ya que al tener que cortarse, resultan seccionadas las fibras del tejido y sometidos sus extremos a la acción directa de los agentes atmosféricos. Por otro, la *resistencia* de esta línea perimetral a los esfuerzos lineales mencionados en el párrafo anterior.

El primer aspecto tiene una solución tradicional en el mundo textil: el *dobladillo*, es decir, un pliegue del borde que vuelve hacia adentro el extremo lineal seccionado, uniéndolo al resto de la tela por costura. Esta unión puede llevarse a cabo por cualquiera de las juntas fijas analizadas más arriba y tener el mismo tratamiento físico y mecánico, pues, de hecho, va a sufrir los mismos esfuerzos (tensiones longitudinales y transversales, agentes atmosféricos, etc.).

En cuanto al segundo aspecto, el resistente, merece un análisis especial, ya que entramos en el campo de la estructura soporte de la cubierta, lo que lleva a unas soluciones constructivas específicas, que también estudiaremos en el capítulo 7.

En cualquier caso, por similitud con las soluciones textiles de la navegación podemos denominar *relinga* a este borde que, por todo lo anterior, consistirá en un elemento de resfuerzo que sea capaz de absorber las tensiones de tracción longitudinales que se acumulen en el borde entre los puntos de fijación o anclajes. Tensiones longitudinales que, como ya vimos, introducen tensiones

perpendiculares al borde, que también tiene que ser capaz de resistir. Puede resolverse constructivamente de varias formas que, en cualquier caso, deberá encajar en cada uno de los binomios siguientes:

Flexible - Rígida.

Interior - Exterior (Fig. 5.11).

En el capítulo correspondiente, como queda dicho, analizaremos las soluciones constructivas.

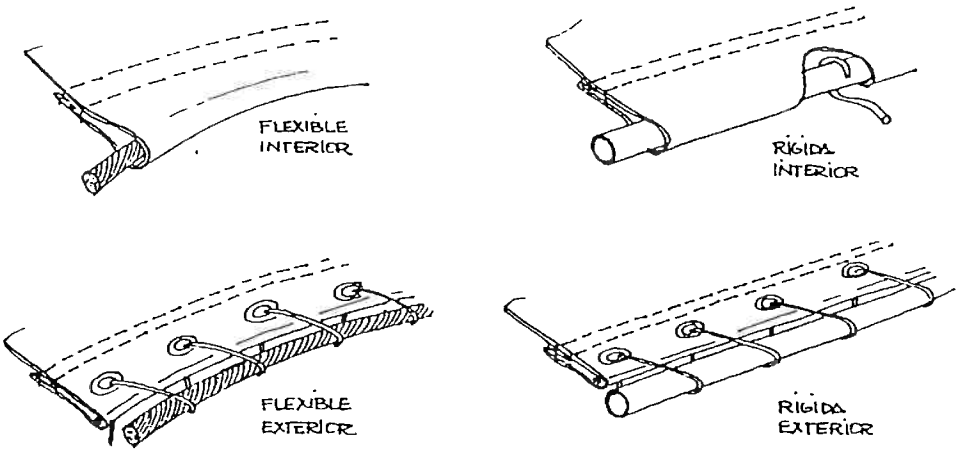


Figura 5.11. Tipos de relingas

5.2.2. Inflexión interior

Cuando la cubierta textil sufre una inflexión brusca por su diseño, la línea de dicha inflexión recibe una acumulación parcial de tensiones por las mismas razones expuestas anteriormente, por lo que, a los efectos mecánicos, deberá actuar y resolverse como una relinga. La solución puede consistir en un refuerzo longitudinal mediante cordón o cable sujeto a la tela y colocado por un lado u otro de la superficie y perfectamente protegido. Si se coloca en la parte convexa, puede ser simplemente apoyado sobre la tela, incluso sin proteger, aunque convendría, por lo menos, fijarla a fin de que el roce con la tela, por movimiento relativo de ambos, no la dañe. Si lo colocamos en la parte cóncava, habrá que «colgarlo» de la tela, bien mediante banda continua, bien por puntos (Fig. 5.12).

Es el caso, bastante corriente, de los cables de refuerzo colocados en zonas intermedias de las cubiertas tensadas para absorber lo que hemos llamado «esfuerzos hacia arriba» y «esfuerzos hacia abajo». Suelen adquirir la forma de catenarias positivas o negativas y nos permite reducir las tensiones a resistir por la propia tela.

En estos casos, es fundamental la consideración en el cálculo de los módulos de elasticidad de estos refuerzos a los efectos de su deformabilidad ante las tensiones (sobre todo, las pretensiones) para evitar arrugas perpendiculares.

También es importante no olvidar el problema de los posibles desplazamientos relativos, ya comentados. Sobre todo ello volveremos en el capítulo 7 al hablar de anclajes interiores.

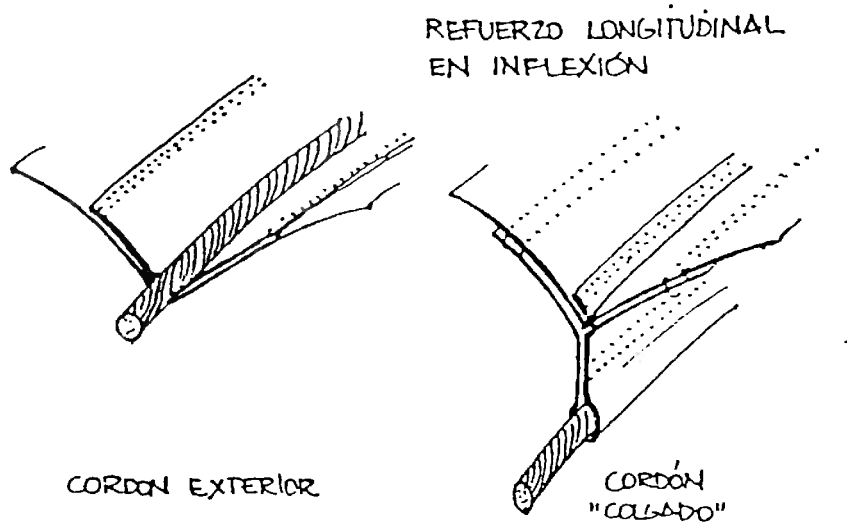


Figura 5.12. Refuerzo longitudinal en inflexión

En cualquier caso, como quiera que la acumulación de tensiones de estos puntos es siempre compleja, se puede suavizar, sustituyendo la arista viva, y por tanto el refuerzo lineal, por una banda de tela continua que convierte la arista en una nueva superficie anticlástica, tensionada en ambas direcciones, que trabaja del mismo modo que el resto de la tela. En estos casos, cuanto más ancha sea la banda, menor será la curvatura transversal en cualquier punto y, por tanto, la distribución de tensiones será más uniforme y, por ende, menos peligrosa (Fig. 5.13). No obstante, este sistema de unión no es todavía muy corriente.

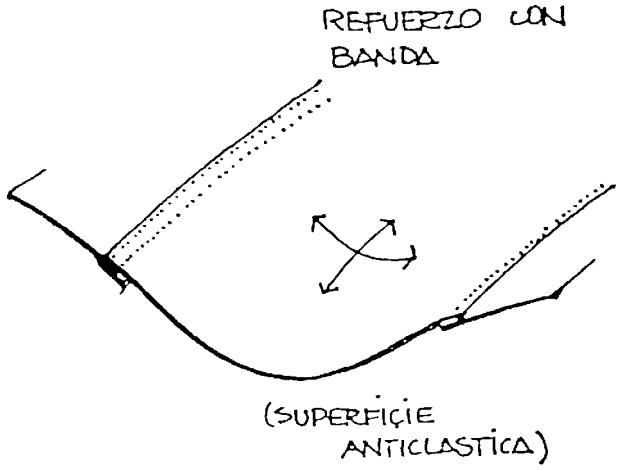


Figura 5.13. Refuerzo con banda

Capítulo 6

Diseño de patrones

Según quedó mencionado en el capítulo anterior, la superficie total de la cubierta la debemos obtener por adición de «trozos» de tela de la forma adecuada a los que llamaremos «patrones». Su diseño deberá ser tal que se consigan a la vez los siguientes extremos:

— Obtener la *forma* adecuada de la superficie de la cubierta, teniendo en cuenta, sobre todo, la anticlasticidad necesaria para mantener la estabilidad del conjunto.

— Conseguir el *aspecto estético* deseado, en función de la linealidad del los patrones y del diseño de sus despieces.

— Asegurar la *ausencia de arrugas* entre patrones, debidas a la excesiva tensión de la unión por falta de coincidencia de la telas adyacentes.

— Obtener la *economía* adecuada en base al uso del mínimo de tela para la superficie perseguida, lo que depende del diseño del despiece y el sistema de corte de los patrones en la bobina.

— Obtener el máximo *rendimiento tensional* de la tela orientando sus fibras (trama y urdimbre) según los esfuerzos principales de la cubierta.

En definitiva, se tratará de dos pasos claves. Por un lado, definir el *despiece de los patrones* que se ajusten al aspecto estético, a la forma de la superficie y a su situación tensional, y, por otro, realizar el *corte* de dichos patrones, aprovechando al máximo la tela de la bobina y su resistencia, y siendo lo suficientemente precisos para que exista coincidencia en los patrones adyacentes.

El primero de los pasos afecta directamente al diseño constructivo de la cubierta y, por tanto, debemos analizarlo en este capítulo.

El segundo, se refiere a la fabricación en taller y, en todo caso, al montaje de la cubierta, por lo que hablaremos de ello más adelante.

6.1. DESPIECE DE PATRONES

Se trata de descomponer una superficie, con una extensión y una curvatura determinadas, en trozos que se puedan obtener de una bobina de un ancho limitado y que, una vez unidos, reproduzcan fielmente la superficie proyectada.

Es un proceso aditivo que nos recuerda las «construcciones recortables» y que implica un proceso muy cuidado del diseño geométrico de cada uno de los «pedazos».

En la práctica, podemos utilizar diversos métodos para llegar a ese despiece, desde los puramente manuales, basados en la experiencia y en la «prueba-e-

rror» (es el sistema tradicional en la confección de vestidos) hasta los más sofisticados por diseño geométrico-analítico en ordenador.

En cualquier caso, incluso en estos últimos, es recomendable hacer comprobaciones sobre maqueta, para asegurar el resultado formal y, en todo caso, corregir.

No obstante, antes de entrar en el análisis de cada uno de esos métodos, conviene realizar una aproximación empírica al problema que, al igual que hacíamos al hablar de la tipología, nos ayudará a comprenderlo mejor.

De hecho, si nosotros queremos obtener una superficie plana y cuadrada, no hay duda que la manera más fácil será unir en paralelo tiras de tela del ancho de la bobina que nos suministre la industria para conseguir un máximo aprovechamiento de la misma dentro de esas características geométricas. Si la superficie, en lugar de ser rectangular, es poligonal de cualquier tipo, bastará partir del lado mayor como referencia y resultarán trozos de tela paralelos de forma trapezoidal en el que únicamente nos preocupará el máximo aprovechamiento de la tela (Fig. 6.1). Sin embargo, sabemos que una de las condiciones fundamentales para las estructuras de tela es la curvatura de la superficie resultante, por lo que la confección se complica algo.

Si la curvatura fuera simple (un cilindro, por ejemplo) su solución seguiría siendo fácil ya que un cilindro resulta una superficie «desenrollable» y, por tanto, convertible en otra superficie plana, y entonces nos encontramos en el caso anterior. Pero no sólo hemos exigido curvatura, sino doble curvatura en cada punto, por lo que el proceso de confección se complica algo más.

Si la doble curvatura pudiera ser sinclástica, como en el caso de las cubiertas hinchadas por aire, podríamos tratar de asimilar cada sector de la cubierta a un casquete esférico que, por ser figura geométrica primaria y muy estudiada, tiene la descomposición de su superficie resuelta de varias formas, todas ellas posibles de traducción en trozos de tela (por meridianos, por paralelos, icosaédrica, etc.; ver Fig. 6.2). Pero para las cubiertas colgadas y en tensión, hemos exigido una curvatura anticlástica en cada uno de los puntos de la

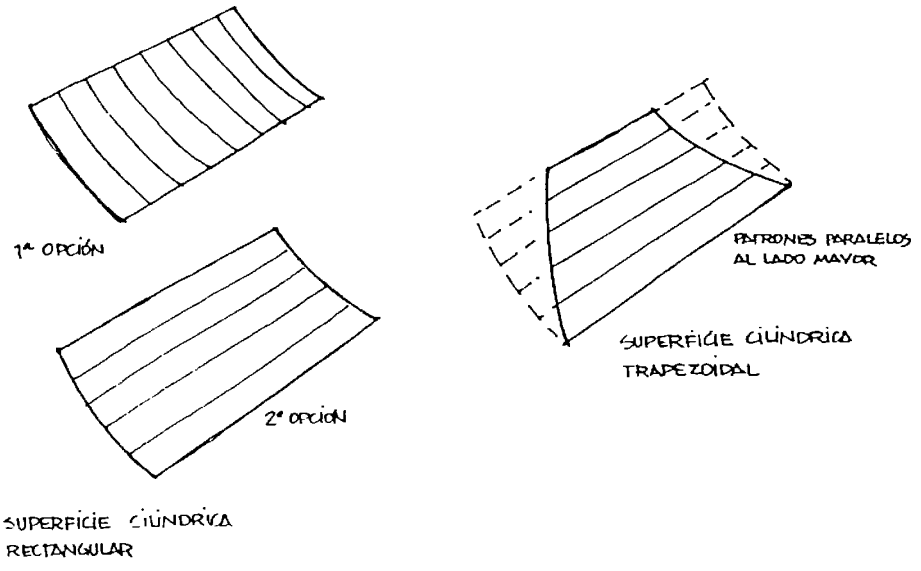


Figura 6.1. Despiece de patrones planos

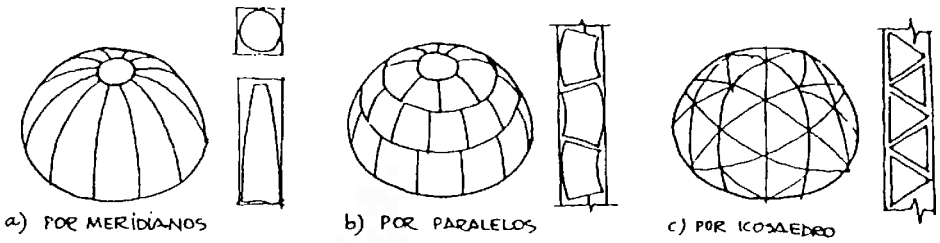


Figura 6.2. Despiece de patrones de superficie esférica

superficie, por lo que la complicación es definitiva. No obstante, la solución es posible y la prueba son todas las cubiertas existentes.

Uno de los sistemas más fácil y práctico, aunque aproximado, consiste en realizar maquetas a una escala precisa, con la forma que queremos obtener y dibujar sobre ella los patrones, de acuerdo con los anchos de tela comerciales que, una vez unidos, nos reproducirán la misma superficie.

Quizá el sistema más exacto sea mediante el uso de ordenadores, por medio de un programa de dibujo en el que podamos introducir la geometría de la cubierta (algo relativamente fácil, sobre todo con un programa de cálculo previo como el que veremos más adelante). Una vez introducida la geometría, se puede «desenrollar» o «aplanar» la superficie por un sistema de triangulación hasta conseguir situar en un plano las dimensiones reales de los patrones colocados sobre la superficie alabeada anticlástica.

Otra solución posible, es aprovechar el hecho de que algunas superficies de doble curvatura son superficies regladas, lo que permite confeccionarlas a base de trozos de tela paralelos.

Así, pues, tenemos varios métodos para el diseño de patrones, sin embargo, antes de entrar en el análisis de los mismos, conviene realizar un breve repaso de los tipos de despieces posibles y las condiciones para su selección.

6.2. TIPOS DE DESPIECES

Dada una superficie de cubierta, el primer paso que tendremos que dar para su confección será elegir el tipo de despiece. Para ello deberemos considerar dos aspectos básicos, ya mencionados, a saber:

— La definición estética del conjunto.

— El máximo aprovechamiento de la bobina.

— La coincidencia de tensiones y fibras.

En cuanto a la definición estética, hay que pensar que la orientación de los patrones (normalmente alargados) marcan una linealidad en la cubierta, sobre todo cuando se ve al trasluz (Fig. 6.3) que condiciona el aspecto general, por lo que es importante considerarlo en el diseño.

No obstante, cada forma geométrica tiene un despiece que parece más adecuado: así, los conoides «piden» despieces radiales, mientras que los paraboloides hiperbólicos los «piden» paralelos a uno de sus laterales. Sin embargo se han desarrollado despieces de tipos diferentes para ambas, aunque ello suponga problemas de confección y de estabilidad general.

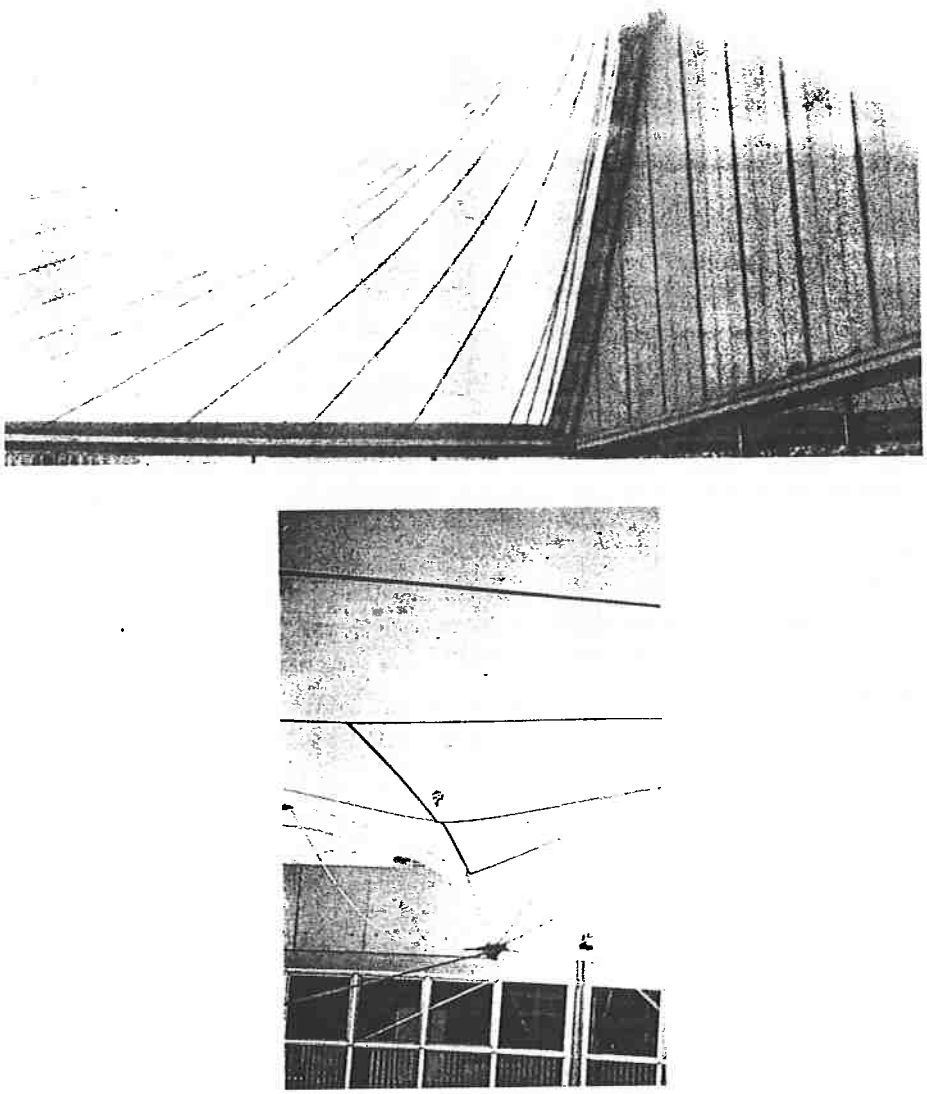


Figura 6.3. Importancia del efecto visual del despiece

6.2.1. Despiece de conoides

El *despiece radial* en un conoide (Fig. 6.4) marca la propia forma geométrica reforzando la fuga del punto de apoyo interior, tanto si es elevado como si se trata de un conoide «negativo».

Por otra parte, dicho despiece, a base de triángulos mixtilíneos, nos permite su obtención alternada de la bobina, con un aprovechamiento de la tela bastante racional, partiendo del ancho máximo para la base de cada triángulo.

Sin embargo, presenta el inconveniente de la acumulación de juntas en el vértice, lo que implica una modificación de las características mecánicas de la

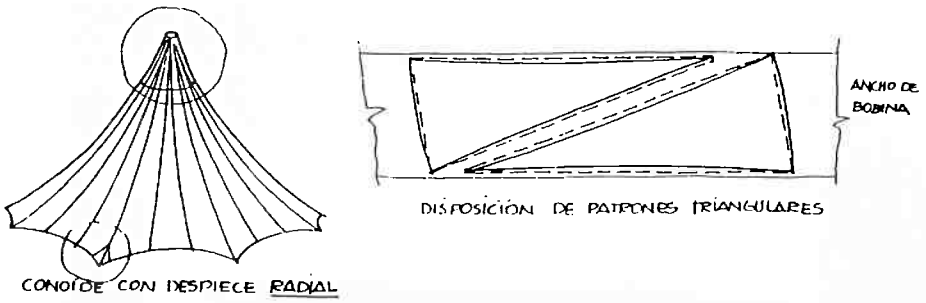


Figura 6.4. Despiece radial de conoide

tela en esa zona, con una proporción tela-junta muy distinta al resto y, por tanto, con mayor rigidez, aparte de los inevitables problemas de confección originados por la proximidad entre costuras.

Ello se suele obviar con cambios de despiece en la zona próxima al vértice a partir de una determinada distancia entre juntas (unos 20 cms) eliminando patrones, es decir, disminuyendo el número de juntas (Fig. 6.5).

Del mismo modo, en el perímetro de la superficie se suele requerir la adición de piezas especiales, como cuñas, para simplificar los patrones, ya que cuando el perímetro se ensancha mucho, si cogemos la parte baja de cada patrón como límite de su ancho (el máximo de la bobina) el número de patrones se multiplica. Por el contrario, si aplicamos el ancho máximo en un punto más alto, aunque próximo al borde (donde se produzca alguna inflexión o donde podamos inscribir un círculo en la cubierta) disminuiremos el número de patrones y podremos resolver la superficie con las mencionadas cuñas (Fig. 6.5).

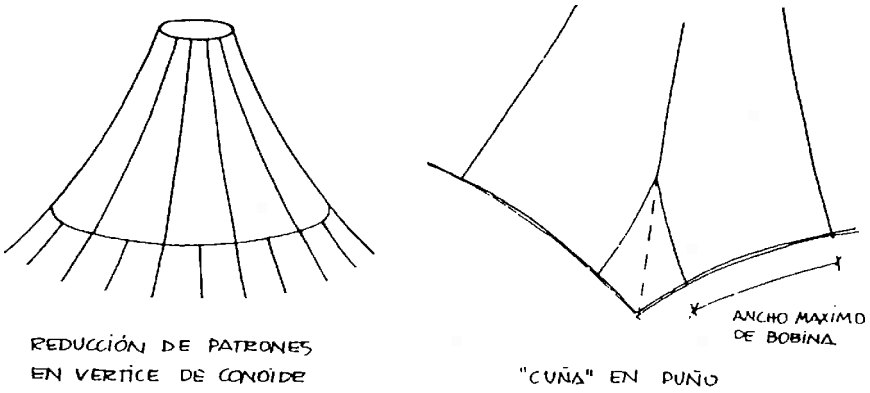


Figura 6.5. Variaciones del despiece en vértice y puños

En general, cuanto mayor sea el ancho de la bobina, menor será el número de patrones, sin embargo, aparecerá una tendencia a marcarse las juntas entre ellos con una pequeña inflexión, consecuencia del menor módulo de elasticidad en dichas juntas (Fig. 6.6).

Podemos considerar, también, el *despiece radial mixto* obtenido a base de grandes patrones radiales, descompuestos, a su vez, en patrones paralelos colocados también en sentido radial (Fig. 6.7).

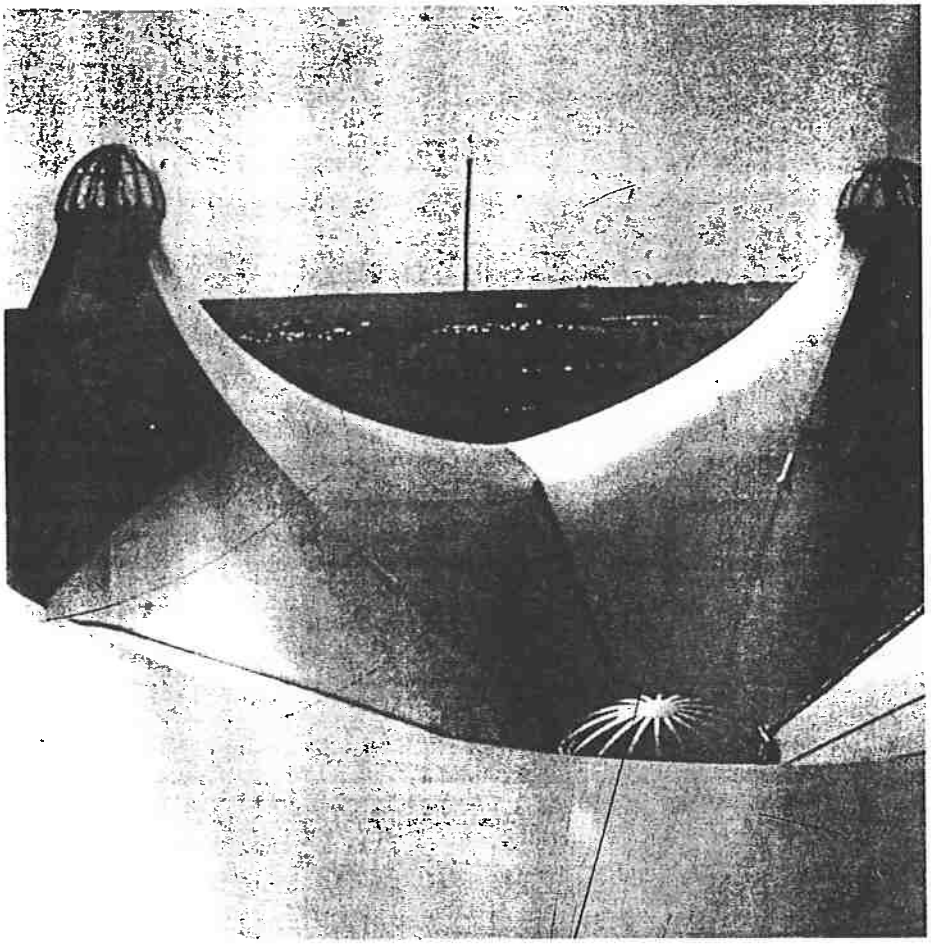


Figura 6.6. Solución de conoides con patrones de gran ancho

En este caso, simplificamos el diseño de cada patrón, ya que podemos partir de la unión de bandas sensiblemente paralelas para confeccionar cada uno de los grandes patrones radiales, con un buen aprovechamiento de la bobina. Dichas bandas pueden llegar a ser, incluso, totalmente rectangulares en el caso de patrones no excesivamente grandes o cuando no nos preocupe la inflexión de las juntas radiales entre ellos. En el fondo, se trataría de asimilar este despiece con el radial puro a base de patrones obtenidos de bobinas de gran ancho donde, como vimos, se podrán producir inflexiones en las juntas.

Si queremos eliminar al máximo dichas inflexiones, deberemos darle la curvatura adecuada a cada uno de los patrones principales, lo que nos obligará a que la bandas no sean rectangulares, sino que tengan lados también mixtilíneos.

De una o de otra manera, el patrón principal debe tener la forma adecuada en su lados para obtener la curvatura final.

Los *despieces circulares* en los conoides son muy poco usuales y podríamos distinguir dos tipos básicos, los *circulares puros*, a base de trapecios mixtilíneos, y los *circulares mixtos o poligonales*, a base de patrones radiales resueltos, cada uno de ellos, mediante patrones transversales.

Los primeros suponen un aprovechamiento poco regular de la bobina (Fig. 6.8) con aparición de juntas radiales intermedias alternadas que pueden producir

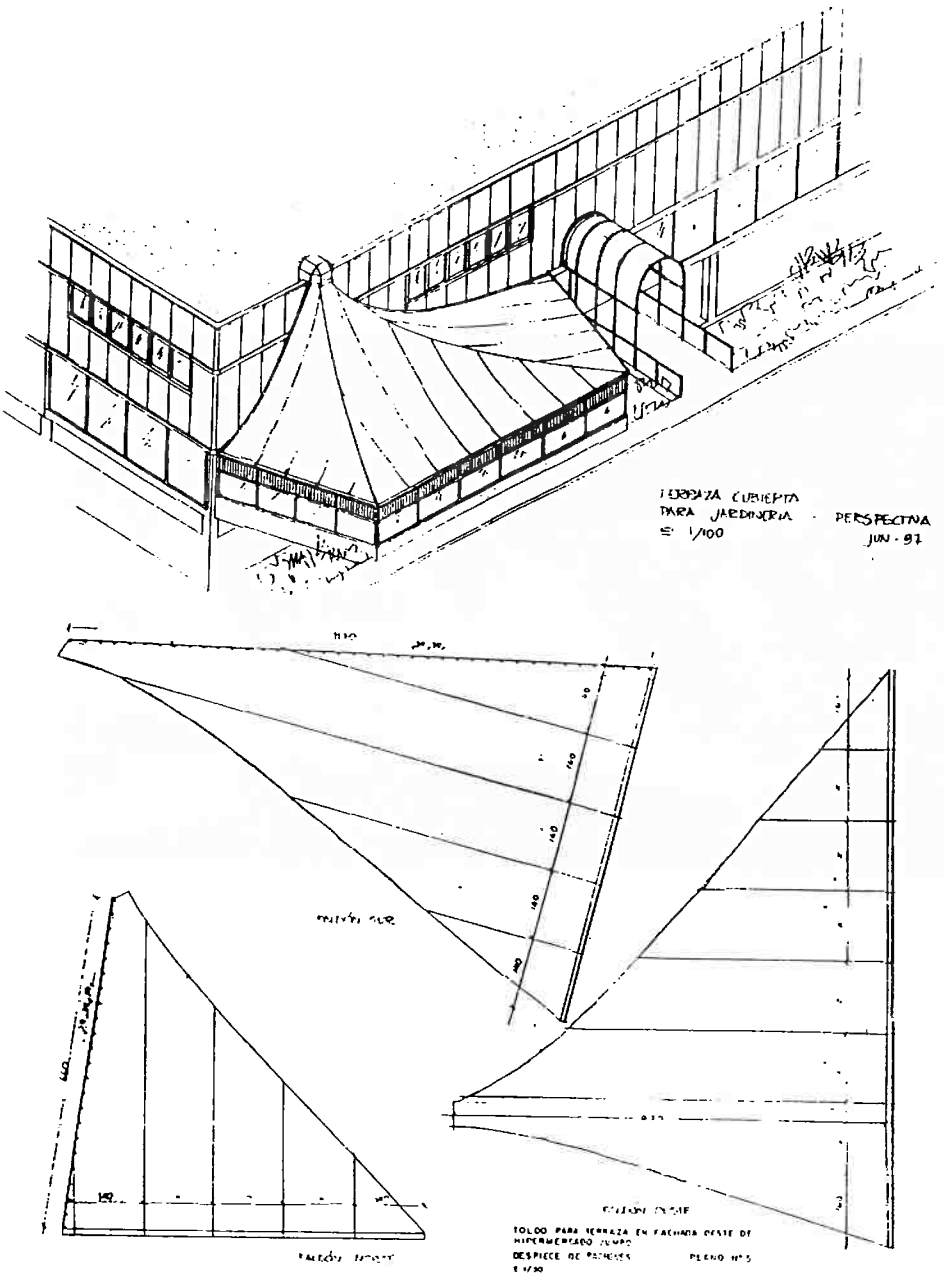


Figura 6.7. Semiconoide descompuesto en 3 patrones radiales mixtos

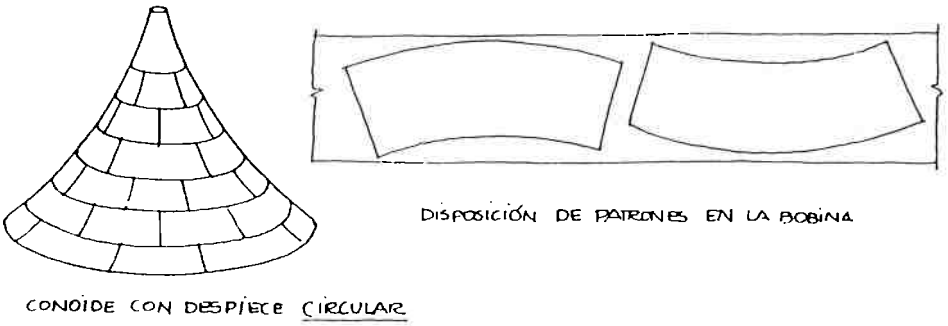


Figura 6.8. Despiece circular en conoide

cierta confusión estética. En este caso, la longitud de cada patrón vendrá marcada por la curvatura del mismo (condicionada, a su vez, por la pendiente del conoide) y por el ancho de la bobina. Cuanto más estrecha sea ésta, más corto será el patrón y mayor será la profusión de juntas radiales alternadas.

Los segundos (Fig. 6.9) permiten mayor aprovechamiento de la bobina al ser los patrones más rectilíneos, resultando casi paralelos y, por tanto, asimilables a los que veremos para los paraboloides hiperbólicos, o a los que ya mencionamos en el despiece radial mixto.

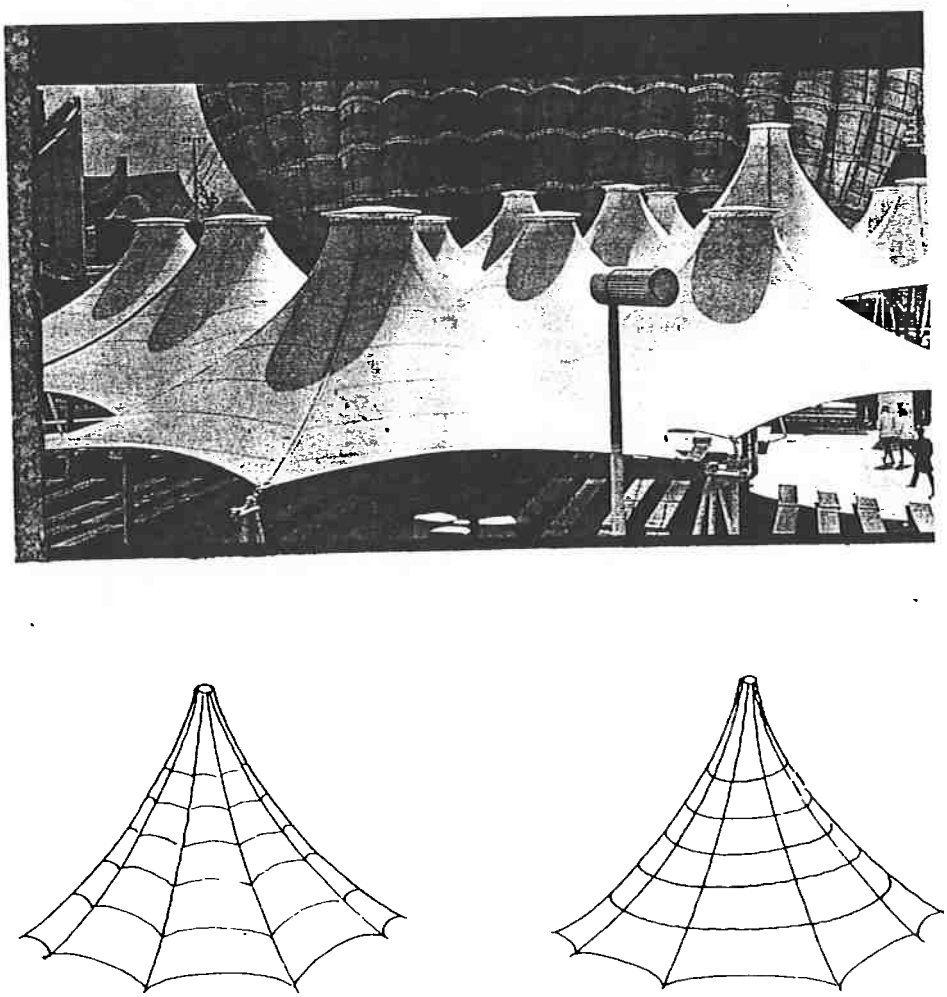


Figura 6.9. Despieces circulares mixtos

Podríamos considerar también un tipo de *despiece alternado* como una variante de los que hemos llamado mixtos (Fig. 6.10) en el que la composición de cada uno de los patrones principales es a base de bandas paralelas a uno de sus lados radiales.

También aparece un aprovechamiento de la bobina bastante aceptable, y surge de nuevo el inconveniente de la posible inflexión en las juntas principales, inflexión tanto más pronunciada, cuanto más plano sea el patrón principal y, por tanto, más aprovechada esté la bobina.

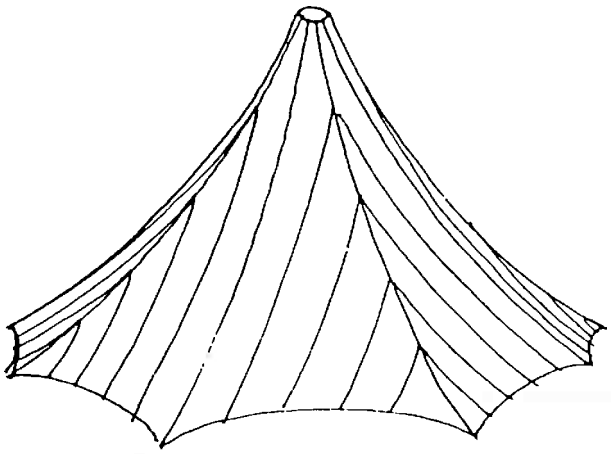


Figura 6.10. Despiece alternado en conoide

Una variante de este despiece es el que podríamos denominar *romboidal* (Fig. 6.11), en el que se parte de rombos como patrones básicos para obtener los principales.

De nuevo aparece la dualidad entre patrón principal plano o curvo en función de los rombos de partida. Si éstos son todos iguales, aquéllos resultan planos y aparece la inflexión en las juntas radiales a costa del mayor aprovechamiento de la tela.

Si buscamos curvatura en los principales, deberemos ir variando la forma y dimensión de los rombos, complicando la confección.

No obstante, el despiece romboidal da una mayor versatilidad de la superficie y un mejor aprovechamiento de la tela, a costa de un mayor trabajo de confección (recordemos la historia del Arlequín). Sin embargo, el mayor problema en estos casos es la profusión de juntas que, por una parte confiere mayor rigidez a la cubierta y, por otra, aumenta el número de puntos débiles en la tela.

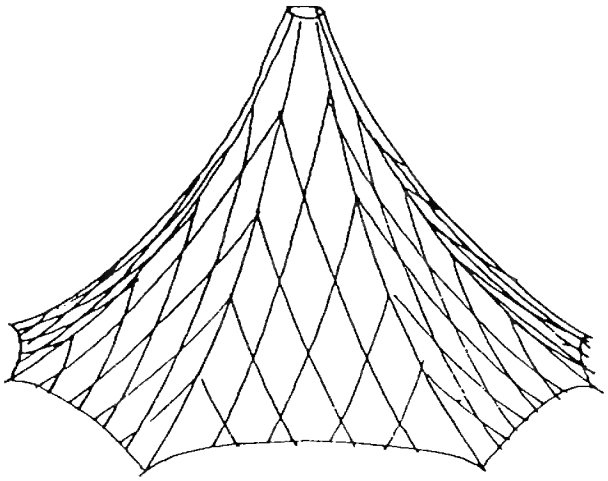


Figura 6.11. Despiece romboidal en conoide

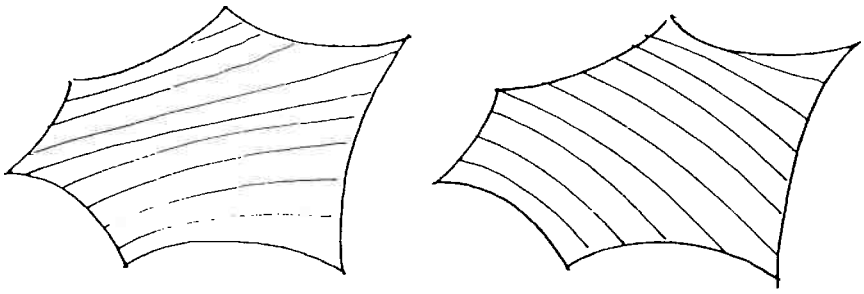


Figura 6.12. Despiece paralelo en paraboloides

6.2.2. Despiece de paraboloides

Es, básicamente, un despiece paralelo (Fig. 6.12). No obstante, podemos considerar también el radial.

El *despiece paralelo* tiene, en principio, un mejor aprovechamiento de la tela, y las bandas se pueden disponer de varios modos, en función de la forma general y de la curvatura del paraboloide en cuestión. Así, en un paraboloide hiperbólico simple, de base cuadrada (Fig. 6.13) se pueden distinguir tres despieces básicos.

— Bandas paralelas a uno de los lados, en cualquiera de las dos direcciones posibles, ya que el resultado es el mismo.

— Bandas paralelas diagonales en la dirección de la curvatura cóncava hacia arriba, es decir, con los esfuerzos hacia arriba en la dirección de la banda.

— Bandas paralelas en la dirección de la curvatura cóncava hacia abajo y, por tanto, con los esfuerzos hacia arriba, transversales a las propias bandas.

En estos dos últimos casos, se cumpliría el principio mencionado de la coincidencia de la trama y la urdimbre con los esfuerzos principales. No tanto así

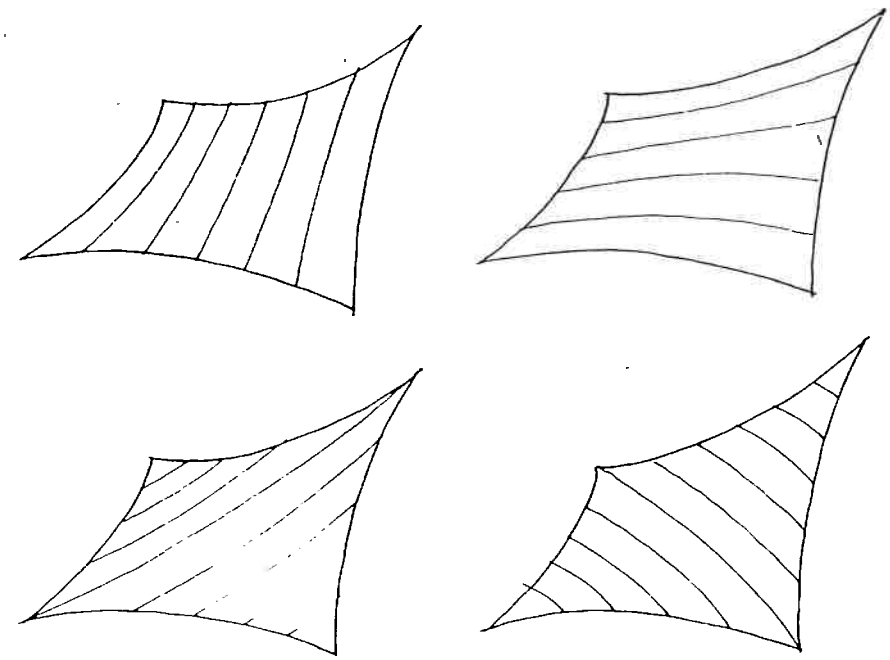


Figura 6.13. Despieces en paraboloide de base cuadrada

en el primero. Sin embargo, no siempre los esfuerzos tienen una dirección tan clara como el del ejemplo, por lo que siguen siendo válidas las tres variantes de despiece.

Si combinamos los dos posibles despieces del primer caso (paralelos a cada uno de los lados) obtenemos, también aquí, un despiece «romboidal», más uniforme que en los conoides en lo que se refiere a tamaño y forma de los patrones.

Cuando entramos en el elevado número de formas posibles asimilables a los paraboloides hiperbólicos (según vimos al hablar de la tipología) comprendemos que es imposible fijar unas reglas para determinar la orientación de las bandas paralelas, si no son la generales mencionadas al principio del capítulo. No obstante podemos apuntar algunas soluciones más corrientes, además del paraboloide hiperbólico simple de base cuadrada utilizado como ejemplo.

Así, cuando se trate de un paraboloide definido entre líneas curvas (Fig. 6.14) podemos utilizar, tanto las bandas longitudinales (concavidad hacia arriba) como las transversales (concavidad hacia abajo).

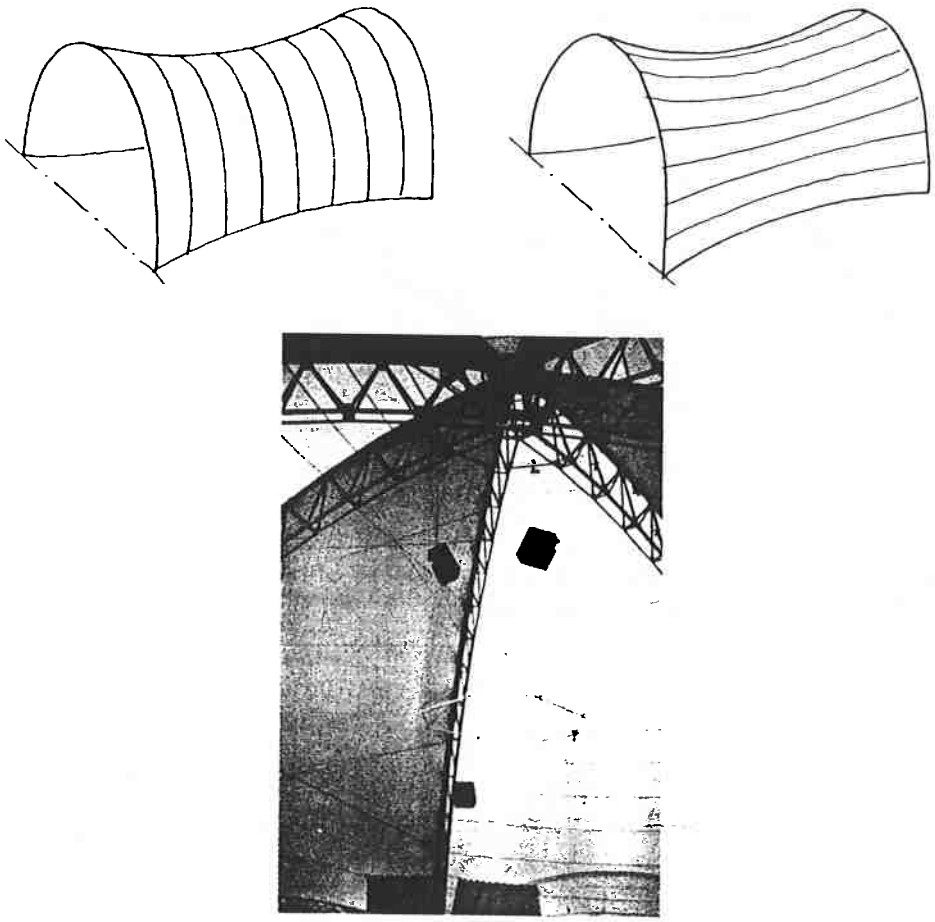


Figura 6.14. Despieces en paraboloides sobre arcos

Cuando los paraboloides se obtengan por alternancia de líneas hacia arriba y líneas hacia abajo (Fig. 6.15) el despiece más corriente es el transversal, aunque también resulta posible el diagonal.

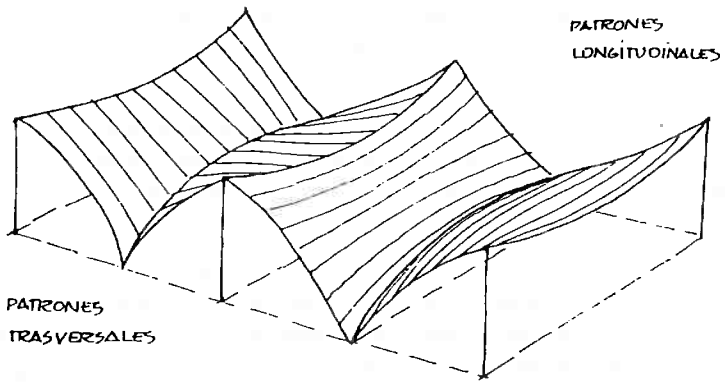


Figura 6.15. Despieces en paraboloides combinados

Cuando estén definidos por una línea curva central, bien en arco, bien como catenaria, y el resto de la cubierta atirantada en sus bordes (Fig. 6.16) más adecuado es definir las bandas perpendiculares a la línea estructural central, soportando así los esfuerzos principales en la dirección de las bandas.

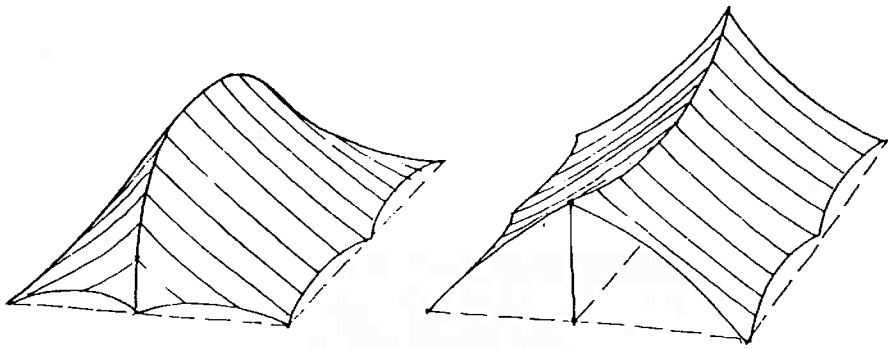


Figura 6.16. Despieces en conoides lineales

Cuando, por fin, la superficie sea difícil de definir geométricamente como una de las anteriores, el despiece se asimilará a alguna de ellas (Fig. 6.17).

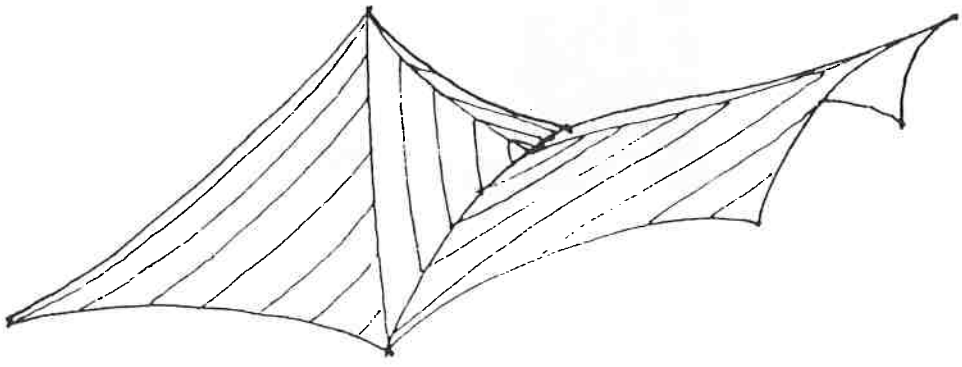


Figura 6.17 Despieces varios

El *despiece radial* en los paraboloides es muy poco común y, en todo caso, resulta una asimilación a un sector de conoide. En general, pues, se dará en casos muy simples con paraboloides de base rectangular o romboidal, tomando como centro del despiece uno de los extremos longitudinales de la cubierta. (Fig. 6.18).

Figura 6.18. Despiece radial en paraboloide

6.3. METODOS DE DEFINICION DE PATRONES

Una vez seleccionado el despiece elegido según el apartado anterior, debemos pasar a la definición precisa de cada uno de los patrones. Para ello, como quedó dicho al comienzo del capítulo, existen diversos métodos. Veamos los más utilizados.

6.3.1. Métodos geométricos

Consiste en definir geométricamente la superficie diseñada y, sobre ella, dibujar los patrones en función del despiece elegido.

Según sea el sistema que utilicemos para la definición geométrica podemos distinguir varios métodos.

6.3.1.1. Método geométrico-gráfico

Cuando la superficie se puede representar gráficamente, por alguno de los procedimientos que enseña la Geometría Descriptiva, sobre la misma representación se podrán dibujar los patrones. Una vez hecho esto, se tratará de independizar cada uno de ellos para poder «desarrollarlo» y representarlo en un plano (aplanarlo) con las cotas reales, para que el dibujo sirva como base para su obtención de la bobina. Veamos un ejemplo sencillo (Fig. 6.19).

Si tomamos un conoide de revolución con una parábola por generatriz y una circunferencia por directriz, podemos representarlo en planta y sección de una forma elemental.

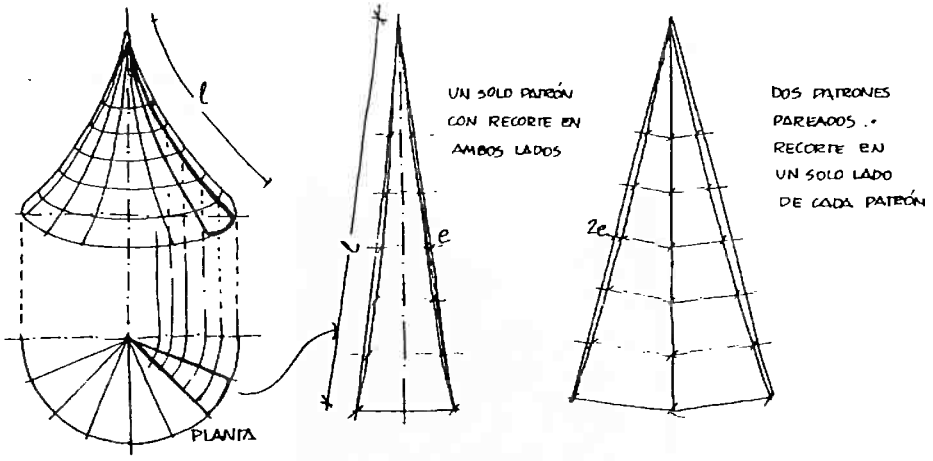


Figura 6.19. Diseño de patrón radial de conoide por el método geométrico-gráfico

En la planta, dibujamos el despiece radial que hayamos elegido, tomando el ancho máximo de la bobina en la base del patrón radial. Al ser la directriz una circunferencia, todos los patrones van a resultar iguales, por lo que basta con definir uno de ellos.

Ahora, obtenemos sobre la sección, la longitud total del patrón y representamos un triángulo isósceles cuya base sea la máxima del patrón y cuya altura sea su longitud total. A partir de dicho triángulo, podemos obtener el patrón que resultará inscrito en él. Para ello, damos unos cortes horizontales al conoide, que se reflejarán como círculos concéntricos en la planta y como líneas horizontales en la sección. En esta última, medimos la separación entre ellas (preferentemente equidistante) y lo indicamos en el triángulo isósceles mediante líneas paralelas a su base. A continuación, en la planta, medimos la longitud del segmento de circunferencia de cada una de las secciones que corresponde al patrón. Trasladamos esta longitud al triángulo isósceles. Uniendo los extremos de estas medidas obtendremos unos lados poligonales que, integrados gráficamente, nos darán el triángulo isósceles mixtilíneo que define el patrón.

A las dimensiones obtenidas gráficamente, hay que introducirles la reducción correspondiente a la deformación de la tela en función de la tensión a la que va a estar sometida, que será mayor cuanto más grande sea el radio de curvatura y que dependerá del módulo de elasticidad de la misma.

Como quiera que la ejecución de este patrón implica dos cortes curvos (uno para cada lado) se puede introducir una simplificación que no altera el resultado final y que consiste en medir las longitudes de las secciones transversales a partir de uno de los lados del triángulo isósceles inicial, con lo que resulta inflexión en uno solo de los lados del patrón. Ello facilita, tanto el corte de los patrones de la bobina, como su confección al realizar juntas rectas. En el fondo lo que estamos haciendo es confeccionar patrones de ancho doble sin modificar el resultado final. Por ello, esta simplificación nos indica la posibilidad de diseñar patrones de ancho doble de la bobina y cortarlos por la mitad en el dibujo según la mediana del triángulo isósceles de partida.

Otro ejemplo, también sencillo, relativo a despiece paralelo, sería el de un paraboloide hiperbólico entre dos arcos paralelos en forma de semicircunferencia (Fig. 6.20).

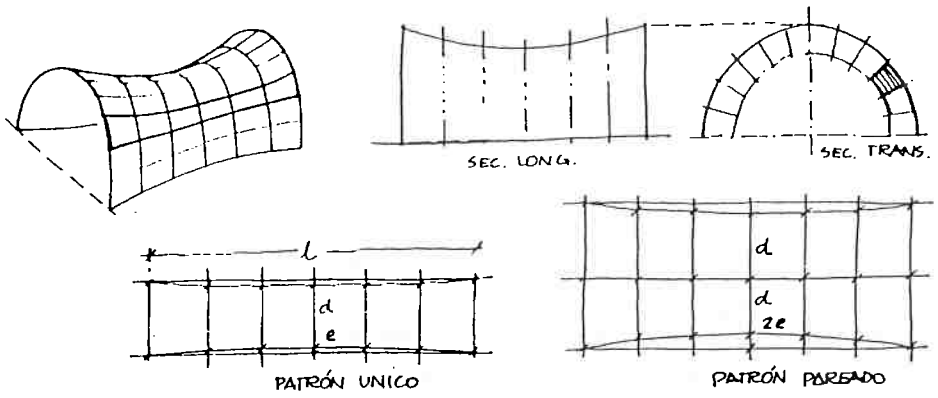


Figura 6.20. Diseño de patrón rectangular por el método geométrico-gráfico

Supongamos que el despiece tiene el sentido longitudinal de la figura. Entonces partimos de un patrón base en forma de rectángulo al que le damos el ancho máximo de la bobina (corresponderá a los extremos) y la longitud que nos dé la sección longitudinal de la cubierta, en la que podemos suponer un segmento de circunferencia.

A partir de ahí, las secciones transversales del paraboloide, en forma de semicircunferencias, nos darán los segmentos que corresponden a los anchos de los patrones en los puntos intermedios. Ellos, debidamente trasladados al rectángulo de partida, nos darán la forma y dimensión definitivas del patrón buscado.

Una vez obtenido el patrón, conviene comprobarlo y, en su caso, corregirlo (Fig. 6.21). Para ello, se puede proceder a recortarlo (tantos como sean los que componen el conoide o el paraboloide completo) en papel, a una escala fácil de manejar (1/50 ó 1/20 en función del tamaño de cubierta). Cuanto mayor sea la escala, mayor será también la precisión del resultado final.

Una vez recortados, se pegan por su borde. Para ello, bien se deja un solape y se utiliza éste para la unión, bien se unen a tope y se utilizan tiras de papeles adhesivos.

Con este montaje de «recortables», se comprueba, con relativa facilidad la precisión en el dibujo de los patrones que dependerá, básicamente, de:

— Coincidencia de la longitud de los lados de los patrones adyacentes.

— Obtención de la curvatura anticlástica deseada.

— Obtención de la forma final diseñada.

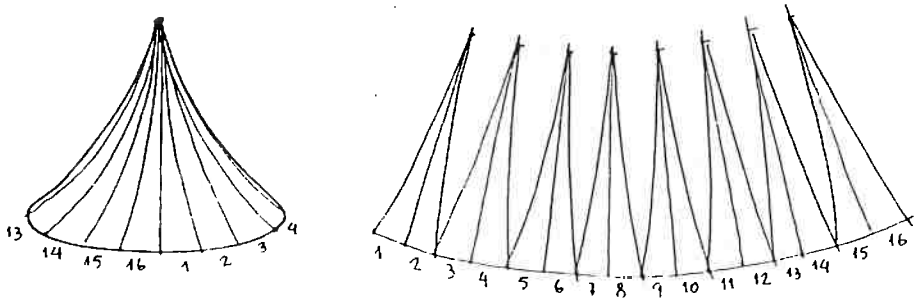


Figura 6.21. Patrones de comprobación en un conoide

En caso de que falle alguno de esos aspectos, se procederá a marcar las correcciones necesarias que consistirán, básicamente, en aumentar o disminuir la inflexión de la curvatura de los lados mixtilíneos del triángulo que constituye el patrón. Una vez corregido, habrá que «probar» de nuevo, y así sucesivamente hasta obtener la forma deseada siguiendo, por tanto, el viejo sistema de la «prueba-error».

En esta comprobación, no hay que introducir la corrección debida a la deformación de la tela por tensión, sino que hay que utilizar los patrones obtenidos directamente por geometría. La mencionada corrección hay que introducirla, una vez comprobados los patrones gráficos. De lo contrario, existiría un error difícil de comprender, ya que el papel no sufre deformación por tensión.

En general, este procedimiento gráfico, que parece más indicado para superficies de cubiertas simples, puede hacerse extensible a todas aquellas cubiertas que, aunque compuestas, puedan obtener una definición gráfica fiable.

6.3.1.2. Método geométrico-experimental

Consiste, básicamente, en la ejecución de una maqueta de la cubierta a construir y, en base a ella, obtener una representación gráfica de los patrones que nos permita definirlos con precisión.

La maqueta es, en cualquier caso, una herramienta prácticamente imprescindible para el diseño de este tipo de cubiertas, por lo que este método no exige nada especial, y, además, nos facilita la comprobación por el sistema de «prueba-error» antes mencionado.

En cualquier caso, aquí estamos hablando de una maqueta que nos permita obtener la forma exacta de la cubierta, es decir, la herramienta básica de diseño. Por ello es importante el tipo de material que utilicemos, que tiene que ser tal que tenga unas propiedades elásticas que permitan conferirle las formas anticlásticas necesarias mediante la aplicación de tensiones manuales.

En el último capítulo hablaremos de este tema. Ahora, partimos de la suposición de que hemos utilizado una membrana elástica que nos ha reproducido la forma deseada. Una vez obtenida, debemos rigidizarla para poder trabajar sobre ella dibujando los patrones. Para ello debemos seguir dos pasos (Fig. 6.22).

En primer lugar, y una vez elegido el tipo de despiece, dibujarlo sobre la cubierta rígida. Para ello podemos servirnos de líneas-guía (listones o hilos tensados) que nos aseguren una proyección recta del despiece buscado, sea radial o paralelo. Deberemos asegurarnos que el ancho máximo de los patrones entra dentro de la bobina comercial, pensando, no obstante, que siempre podemos recurrir a la inclusión de «cuñas» en las zonas donde, puntualmente, se sobrepase ese ancho.

A continuación, debemos pasar estos patrones a papel plano (aplanarlos). Para ello, podemos seguir dos procedimientos.

A) *Retícula* (Fig. 6.23) que consistirá en utilizar la geometría descriptiva, como hacíamos en el primer método, obteniendo los datos directamente de la cubierta.

Para ello debemos dibujar secciones verticales de la cubierta en dos direcciones; una, la de los patrones (radiales o paralelos) otra, la perpendicular.

Los datos gráficos de las curvas de esas secciones los obtenemos directamente de la maqueta a escala, interpolando las cotas entre sí.

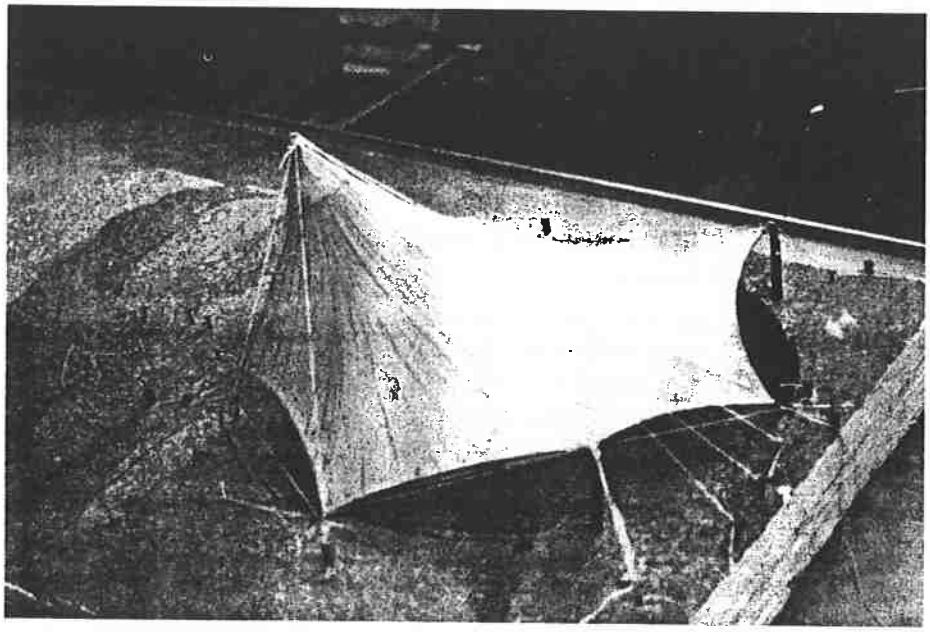


Figura 6.22. Comprobación de patrones sobre maqueta

Estos mismos datos, los reflejamos en planta y obtendremos una malla reticular que nos permitirá independizar cada una de las tiras correspondientes a cada patrón y definir sus medidas en un plano, con lo que lo habremos definido geométricamente.

Este método es más útil para despieces paralelos, pero puede aplicarse también a despieces radiales, dibujando mallas concéntricas alrededor de los vértices.

También aquí podemos introducir la simplificación mencionada en el apartado anterior y obtener los datos gráficos del patrón doble para, posteriormente, dividirlo por la mitad.

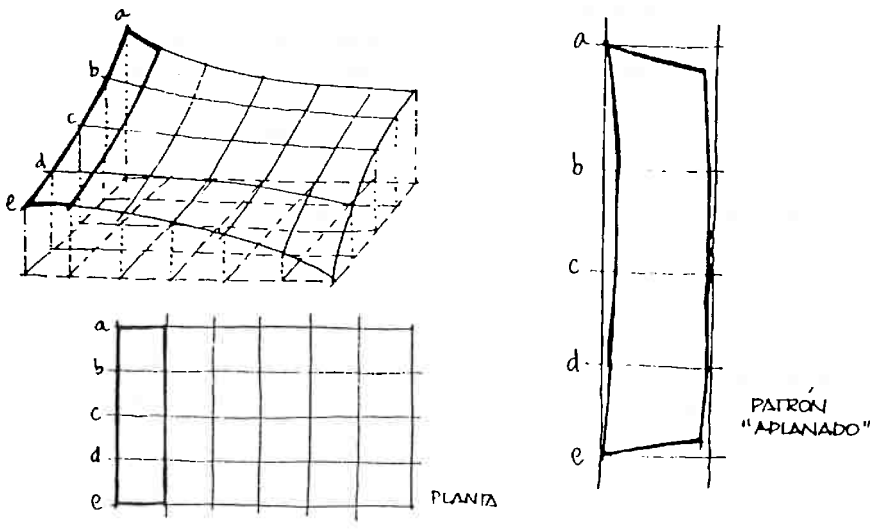


Figura 6.23. Diseño de patrón por el método geométrico-experimental

Una vez obtenidos los patrones, deberemos proceder a la comprobación por el mismo procedimiento de «pruebas» que hemos visto antes, ayudados ahora por la propia maqueta, que nos servirá de soporte de los patrones recortados en papel, por lo que los bordes podrán estar recortados a tope y adheridos a la propia maqueta, sin necesidad de dejar solapes. Las rectificaciones serán necesarias cuando, bien se produzca solape entre los patrones (sobre tela), bien falte papel entre ellos (falta tela).

Una vez comprobado cada patrón, habrá que introducir las correcciones debidas a la deformación por tensión.

B) *Triangulación* (Fig. 6.24). En aquellos casos en que la retícula ortogonal del capítulo anterior no sea suficientemente precisa, o en la mayoría de casos de despieces radiales, podemos recurrir a una retícula triangular que, ante la dificultad de su representación geométrica en plantas y secciones, se presenta exclusivamente sobre la maqueta endurecida. Entonces, el dibujo individualizado de los patrones sobre papel plano se basará en la toma de medidas directas, sobre la maqueta, de los diferentes triángulos que componen un patrón. Cada uno de los triángulos, si es suficientemente pequeño, en función de la curvatura, se puede considerar como un plano definido por sus tres vértices, lo que facilita el «aplanado» del patrón, como yuxtaposición de triángulos. Ello nos dará el patrón con lados poligonales que, convenientemente interpolados, nos permitirá obtener la forma definitiva.

A continuación, y como siempre, procederemos a la comprobación mediante las pruebas correspondientes de los patrones recortados de papel, sobre la maqueta, hasta su corrección definitiva, y a la corrección por deformación de la tela.

6.4. METODO ANALITICO

Estos procedimientos vistos hasta ahora tienen, todos ellos, el problema de la falta de precisión y la consiguiente necesidad de la prueba-error, sobre todo en cubiertas con grandes tensiones y, por tanto, con unas deformaciones de la tela importantes.

Con la aparición de los programas de diseño asistido (C.A.D.) tenemos la posibilidad de utilizar la geometría analítica de un modo relativamente sencillo, con lo que resulta fácil abordar la geometría y, por tanto, el despiece y definición de patrones de cualquier superficie de cubierta, tanto si se trata de una forma simple, como si estamos ante una superficie compleja, múltiple y de difícil definición geométrica.

Naturalmente, habrá que diseñar los programas adecuados para poder llegar a esa definición de los patrones, lo que implicará una definición geométrico-analítica previa de la superficie de la cubierta. Ello habrá que hacerlo, además, en consonancia con el funcionamiento estructural del conjunto y el tensional de la membrama que, como sabemos, condiciona la forma definitiva. Por dicha razón, los programas geométrico-analíticos para definir la forma de las cubiertas textiles tensadas tienen cierta complicación y no vamos a entrar aquí en su análisis.

Algo hablaremos de las condiciones generales, tanto en este capítulo como en el relativo a diseño y cálculo, pero el lector interesado deberá acudir a la literatura especilizada contenida en la bibliografía.

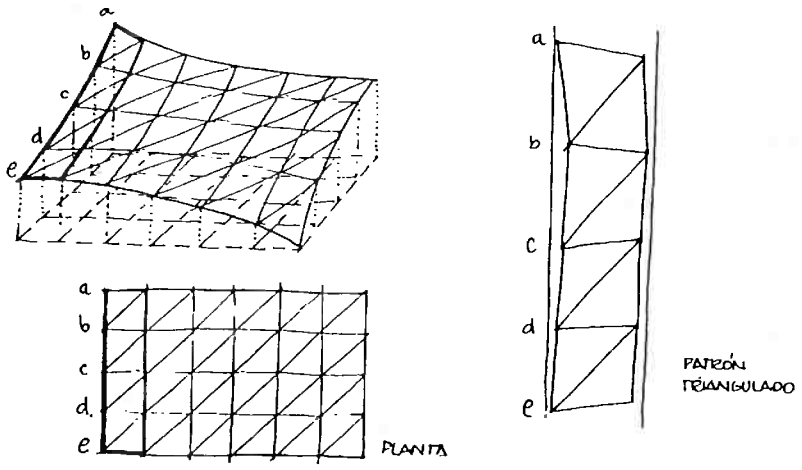
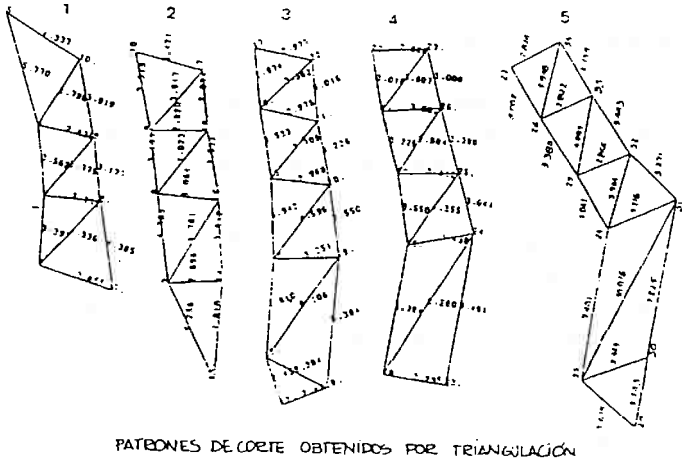


Figura 6.24. Diseño de patrón por triangulación por el método de triangulación geométrico-experimental



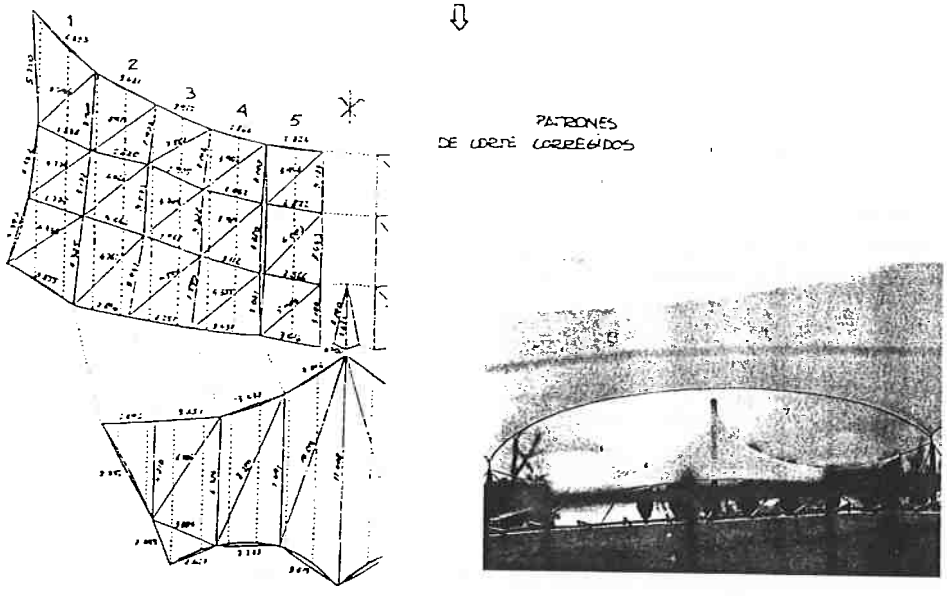


Figura 6.24'. Triangulación de patrones con ayuda de un programa diseñado por Felix Scrig

En lo que se refiere, pues, al diseño de patrones, existen diversos programas en funcionamiento en los distintos países más avanzados en este campo. Aunque las bases de todos ellos son similares, para la mejor comprensión de la problemática general, considero que lo más adecuado es analizar en particular algunos de ellos. En concreto, parece interesante describir las bases de dos programas pertenecientes a un mismo autor (Lothar Gründig) publicados en 1986 y en 1990 y que pueden entenderse, por los tanto, como una evolución del sistema.

6.4.1. Memcut

El primero de ellos recibe el nombre de MEMCUT y fue presentado por el autor, junto con Ulriche Hangleiter, como miembros del Instituto de Geodésica Aplicada de la Universidad de Stuttgart, en agosto de 1986 en Sidney con motivo de la L.S.A.-86.

En él, se describe, sucintamente, el método en sucesivos pasos, como sigue.

a) *Descripción geométrica de la superficie de la membrana estructural*

Es el primer paso en el que, paralelamente, se pueden introducir los datos relativos a las pretensiones de estabilización, a las características mecánicas del material, según la dirección de sus fibras y los anchos de bobinas disponibles, aunque, todos ellos son susceptibles de modificación posterior.

La geometría, en sí, se introduce a base de dar las coordenadas de puntos clave representativos de la superficie, tales como puntos de apoyo o de anclaje. Dichas coordenadas pueden obtenerse directamente de la maqueta, si hemos utilizado el tipo de membrana adecuada, o pasadas por un programa previo de «obtención de formas estáticas» (FASNET) por relajación dinámica o por el procedimiento de la superficie mínima (MINIX) o, incluso, por algún sistema de elementos finitos.

También se pueden utilizar métodos fotogramétricos partiendo de la misma maqueta y llegar a una definición precisa de la superficie con fotos estereoscópicas.

b) *Descripción tipológica de la superficie*

Una vez definidos los puntos debemos unirlos entre sí para que la superficie tome su forma. Para ello el programa utiliza elementos triangulares (elementos finitos) cuyos lados constituyen las líneas que definen la tipología de la superficie.

Si se ha partido de una malla rectangular, entonces recurre al método de triangulación de Delauney que establece los triángulos mínimos tales que ninguno se superpone sobre otro, resultando líneas continuas.

Esta triangulación resulta fácil, además, para la definición de los patrones y su «aplanamiento».

En esta etapa, el programa permite introducir variaciones geométricas, incluso de los puntos básicos de partida, posibilitando la variación formal del conjunto en caso de que se considere necesario para el diseño de los despieces.

c) *Despiece de patrones*

Dado que se consideran condicionantes fundamentales, por una parte, que los patrones sean lo más rectos posibles para el mejor aprovechaniento de la bobina y, por otra, que exista la menor distorsión de bordes al pasar de la superficie anticlástica al plano, con objeto de que no aparezca variación de tensiones en los bordes que produzcan arrugas, el programa selecciona los patrones según las líneas geodésicas de la superficie, partiendo de uno de los lados, en los casos de paraboloides hiperbólicos.

d) *Definición de patrones*

El programa individualiza a continuación cada uno de los patrones en función del ancho máximo de la bobina y del despiece seleccionado en el punto anterior, definiéndolos geométricamente, pudiendo recurrir a la triangulación de los mismos por el citado método de Delauney.

f) *Aplanado de patrones*

Por último, el programa define el patrón en un plano para poder ser obtenido de la bobina. El problema está en la inevitable distorsión de la forma del patrón al pasar de la superficie anticlástica al plano, así como las variaciones de la misma debida a las tensiones. Se trata, pues, de disminuir al máximo esas distorsiones, lo que se consigue mediante la minimización de la energía potencial del patrón.

En definitiva, el esquema del programa queda descrito en la figura 6.25 tomada del trabajo presentado por Ulrich Hangleiter y Lothar Gründig al Congreso de 1986.

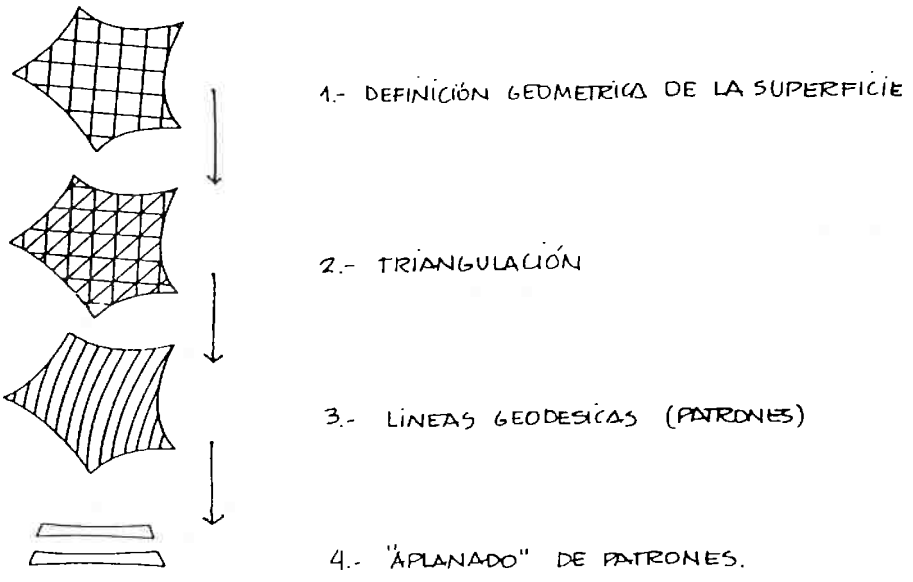


Figura 6.25. Esquema de los pasos gráficos del programa MENCUT-1

Asimismo, la figura 6.26, de los mismos autores, nos muestra los tres pasos correspondientes al despiece y definición de patrones según líneas geodésicas, empezando por la simulación de una malla ortogonal y siguiendo por una triangulación de los patrones rectangulares para poder «aplanarlos». Se muestran dos tendencias; una con patrones anchos, donde aparecen grandes distorsiones de los bordes (marcadas por círculos) debidas a la curvatura, y otra, con patrones más estrechos, donde se consigue minimizar dichas distorsiones. Finalmente, se muestra la cubierta con todos los patrones definidos.

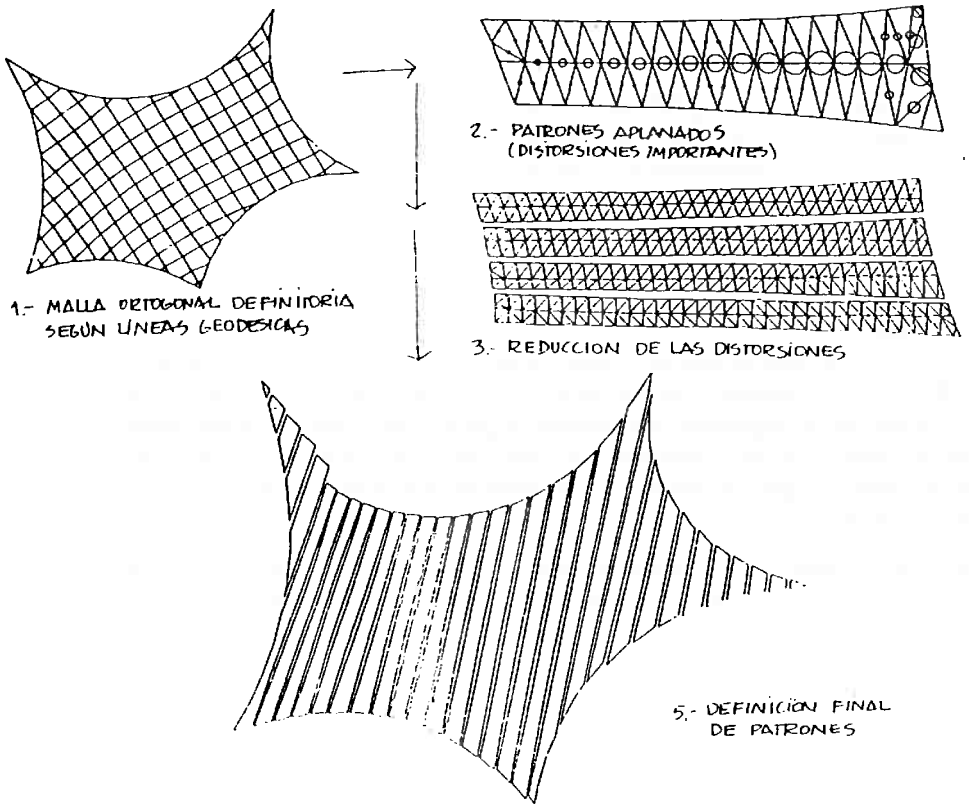


Figura 6.26. Esquema de los pasos gráficos del programa MENCUT-II

6.4.2. Easycut

El segundo de los programas mencionados, ha sido presentado por L. Gründig y J. Bäverle del «Institut für Geodäsie und Photogrammetrie» de la Universidad Técnica de Berlín, en julio de 1990, en el Simposio Internacional organizado en Lyon por FITAT, y le han dado el nombre de EASYCUT.

El programa muestra evidentes mejoras sobre el anterior, aunque las líneas básicas son las mismas. Los pasos dados son los siguientes:

a) *Definición gráfica de la superficie*, en base a una malla de cables, mediante la solución de un sistema de ecuaciones lineales de equilibrio de fuerzas.

b) *Triangulación de la superficie*, para dar una mejor definición gráfica de la misma.

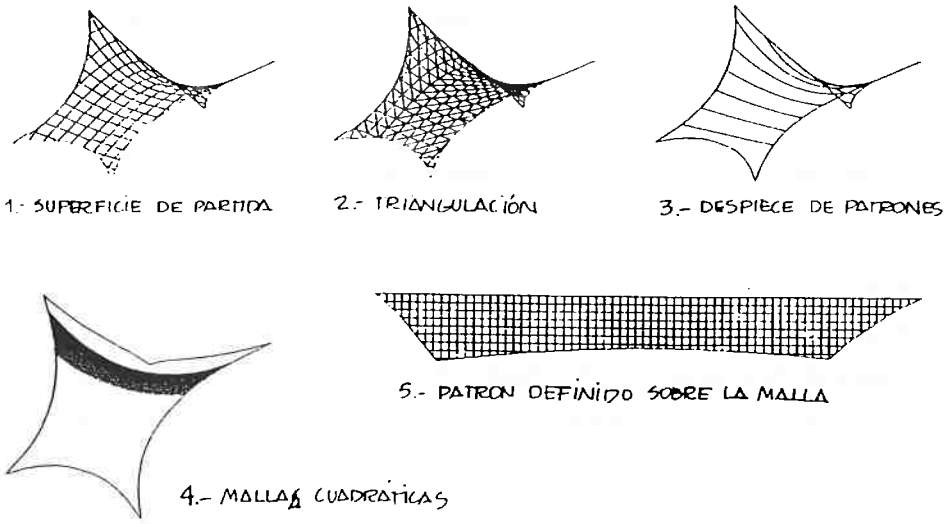


Figura 6.27. Esquema de los pasos del programa EASYCUT-I.

c) *Definición de los bordes*, en base a la triangulación, marcando los lados de los triángulos que no tienen «vecino». Ello es muy útil, sobre todo, en la posterior definición de los patrones.

d) *Selección del despiece*, bien marcando las líneas geodésicas que nos dan los patrones más rectos, bien buscando las secciones producidas por planos verticales paralelos o radiales.

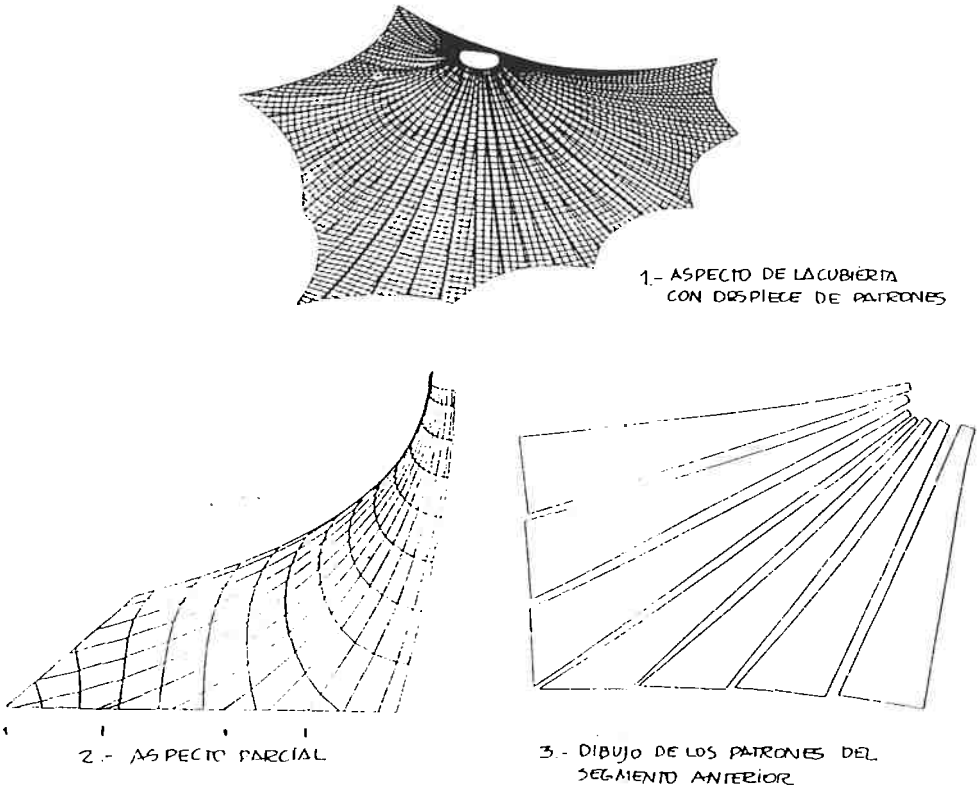


Figura 6.28. Esquema de los pasos del programa EASYCUT-II.

e) *Generación de patrones*, a partir del despiece elegido, con dos pasos sucesivos:

— Definición de una malla ortogonal a partir de una de las líneas de despiece seleccionadas.

— Definición de cada uno de los patrones y su diseño en el plano a partir de esa nueva malla ortogonal.

f) *Comprobación de los patrones* ya definidos, lo que se lleva a cabo en 5 etapas:

— Eliminación de la malla ortogonal del patrón una vez aplanado.

— Ajuste de la longitudes de los bordes de cada patrón.

— Comparación de las longitudes de borde de los patrones adyacentes al comprobado.

— Corrección de las dimensiones por la deformación debida a las pretensiones.

— Listado de patrones con sus correspondientes medidas.

La figura 6.27, tomada del artículo de los autores recogido en las actas del mencionado simposio, muestra el proceso explicativo en varias viñetas, desde la definición de la superficie hasta la del patrón, para una cubierta tipo paraboloide hiperbólico. La figura 6.28 nos muestra lo mismo, con algo más de detalle, para una cubierta de tipo conoide.

Capítulo 7

Técnica constructiva; bordes y anclajes

Una vez confecionada la tela tenemos que colocarla en su situación definitiva (montarla-izarla) debiendo adquirir entonces la forma (dimensión y curvatura) con la que se ha diseñado y que le permitirá obtener la estabilidad necesaria para su integridad funcional. En este momento adquiere importancia su perímetro y, en general, todos los puntos de contacto con la estructura que la soporta o sujeta, ya que a través de ellos introduciremos las tensiones previas de estabilización y la mantendremos en posición ante los esfuerzos exteriores.

La construcción de este conjunto de puntos de conexión de la cubierta con la estructura soporte es lo que analizaremos en este capítulo, para lo que los agruparemos en dos tipos: *bordes y anclajes.*

7.1. BORDES

En el capítulo 6 ya hemos hablado de los bordes al estudiar la confección, y lo hacíamos con el sentido del «remate» de la tela para conferirle la integridad fisicoquímica necesaria a la membrana textil. Ahora tenemos que ver al borde de la cubierta como un elemento mecánico que es capaz de transmitir los esfuerzos que se generan entre dicha cubierta y la estructura soporte. Por ello, aunque en muchas ocasiones el elemento físico es el mismo, la misión constructiva que le encomendamos es distinta.

De hecho, el borde del que ahora hablamos es un elemento lineal capaz de absorber las tensiones que se transmiten entre el perímetro de la propia tela y los puntos de anclajes exteriores. Es la «relinga» como elemento constructivamente independiente aunque unido a la tela.

Según su sistema constructivo y su funcionamiento mecánico debemos distinguir entre *flexible* y *rígidas.*

7.1.1. Relinga flexible

La flexible (que podemos considerar como relinga propiamente dicha) se suele anclar por puntos y entre ellos se deforma hacia el interior, según las tensiones de la tela, hasta equilibrarlas con la suya propia (Fig. 7.1). Si es *interior*, suele consistir en un cordón de fibra, similar al utilizado para confeccionar el tejido, que se introduce en el dobladillo practicado en el borde de la tela. También puede utilizarse un cable metálico para tensiones muy fuertes y limitaciones de la deformación en su sentido; hay que cuidar, entonces, la acumulación de agua en el interior del dobladillo, lo que podría provocar la corrosión del cable y su rotura.

Si es *exterior*, consiste en un cable que se une al borde de la tela mediante un cordón que pasa por unos ollaos previstos en aquél. Este cordón suele ser

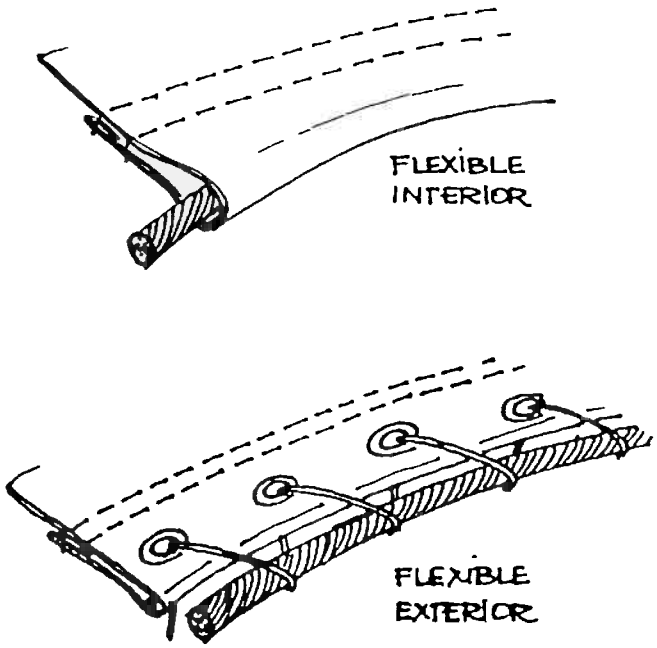


Figura 7.1. Relinga flexible.

continuo aunque en ocasiones puede limitarse a lazos o presillas puntuales. En cualquier caso, la tela debe tener algún tipo de refuerzo de borde, aunque sólo sea el simple dobladillo, para que los ollaos no produzcan rasgaduras, por lo que el cable exterior constituye una especie de relinga de refuerzo que tiende a absorber la mayor parte de las tensiones. Es importante cuidar el cordón de atado del cable a la tela, pues su rotura provocaría el despegue de ésta e, incluso, su posible colapso al perder el refuerzo del borde.

Un aspecto importante en las relingas flexibles es, de nuevo, la variación de su módulo de elasticidad con respecto al de la tela. Ello puede fomentar, si no se considera adecuadamente en el cálculo, una acumulación de tensiones en las mismas y la aparición de arrugas transversales.

También hay que tener en cuenta el posible desplazamiento de la tela respecto al cable de borde (relinga) por simple deslizamiento, lo que ha provocado más de un colapso. Es importante que este deslizamiento no tenga lugar, con el objeto, por un lado, de que la colaboración mecánica entre la tela y su borde sea continua, y, por otro, que no se produzcan acumulaciones de tela en unos puntos que, además de provocar arrugas, facilita la concentración excesiva de tensiones.

Para ello, se utilizan diversos tipos de «pinzas» que evitan ese deslizamiento (Fig. 7.2) tanto para relingas interiores, como para las exteriores.

En cuanto a la transmisión de esfuerzos entre la relinga y la tela, debemos considerar los dos casos planteados, según que la relinga sea interior o exterior.

Si es interior, la transmisión se basa en el rozamiento entre relinga y tela, y en la unión del dobladillo ya comentada. La tela, como se dijo, sufre los dos tipos de esfuerzos generales de todas las juntas, los longitudinales, suavizados si está presente un cable o cordón, que se lleva la mayor parte por tener menor deformabilidad, y los transversales, que en este caso son los más importantes y tienden a ser perpendiculares al borde.

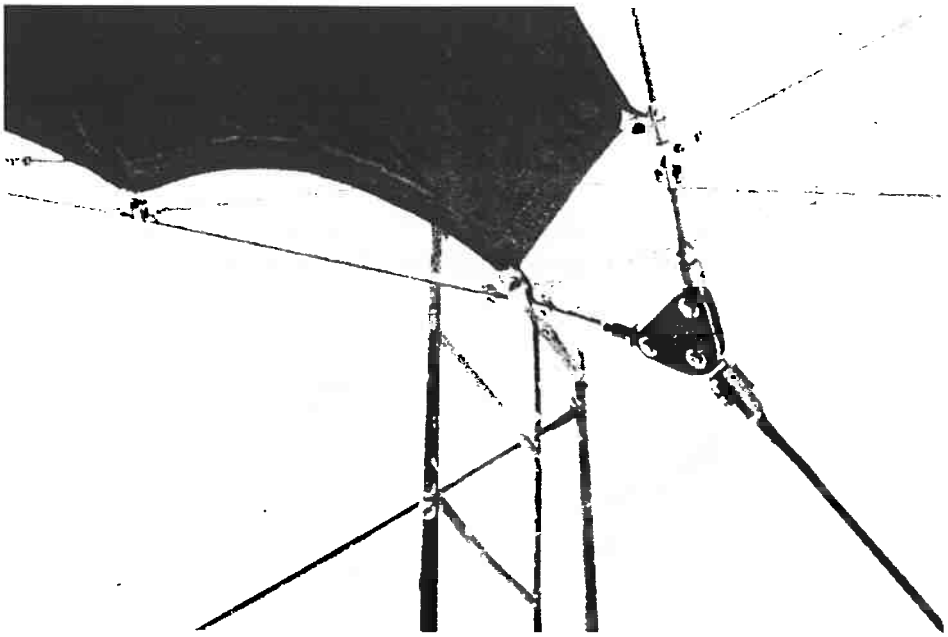


Figura 7.2. Sujeción puntual de relingas.

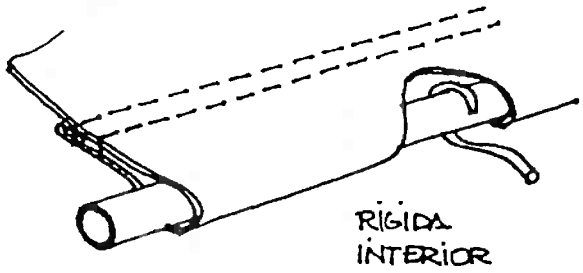
Si la relinga es exterior, los esfuerzos longitudinales se absorben igual que en el caso anterior, aunque quizá aquí le corresponda una mayor proporción a la propia tela, dada la independencia entre tela y relinga. En cuanto a los transversales, sin embargo, aparece un elemento constructivo nuevo, el cordón de unión, que puede ser continuo o puntual. En cualquier caso, deberá tener la sección suficiente para absorber la tensión que le corresponda, así como la resistencia al esfuerzo de aplastamiento que sufre, tanto en contacto con la propia relinga como en su paso por el ollao donde, si es necesario, se puede introducir algún tipo de protección o «guardacabos» (Fig. 7.3).

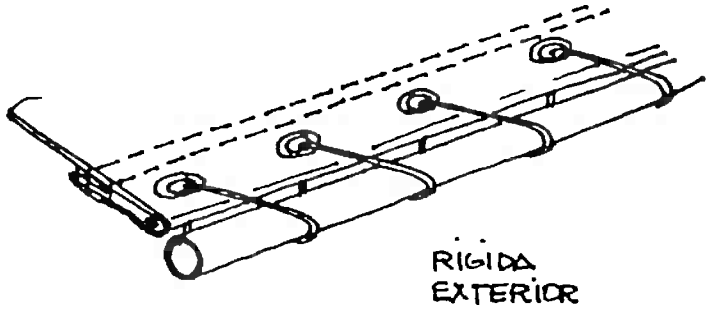
Figura 7.3. Ollaos de anclaje de la relinga.

7.1.2. Relinga rígida

La *relinga rígida* supone un paso intermedio entre la flexible y la fijación perimetral contínua. En efecto, está constituida por un elemento de borde rígido, fijado por puntos a la estructura exterior soporte, que está sometido principalmente a flexión, ya que entre los puntos de fijación recibe el esfuerzo de la tela a la que se une.

También puede ser interior y exterior (Fig. 7.4). Si *interior*, se suele resolver con un tubo metálico circular introducido en el dobladillo del borde, que deja





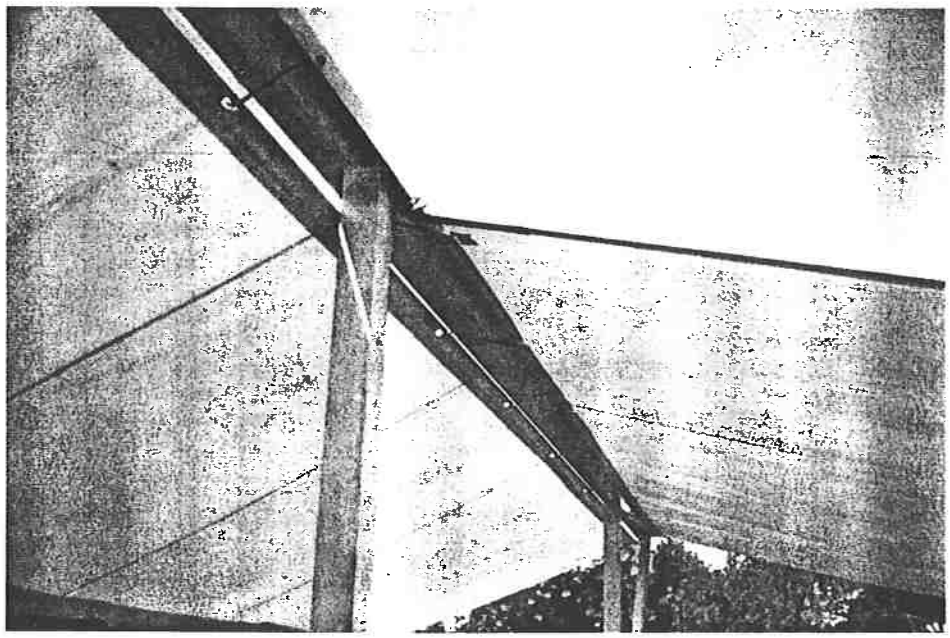


Figura 7.4. Relinga rígida

unos puntos abiertos para que se pueda introducir el anclaje de la relinga. Si *exterior*, su unión a la tela se realizará por el mismo sistema de cordón y ollaos que veíamos antes y su anclaje puede ser en cualquier punto. En ambos casos las distancias entre anclajes dependerá de la inercia del perfil metálico empleado, con objeto de que su deformación no sobrepase los límites permitidos y no introduzca a la tela esfuerzos adicionales que podrían producir arrugas.

El funcionamiento tensional de este tipo de relinga difiere del anterior en que aquí tienen preponderancia las tensiones transversales frente a las longitudinales debido a la falta de curvatura. Ello hace que no suelan aparecer problemas de deslizamiento en sus extremos. Por lo demás, tanto en las interiores como en las exteriores, son aplicables las mismas consideraciones indicadas más arriba.

7.2. ANCLAJES

Como hemos dicho, para conferir estabilidad y poder introducir y mantener las tensiones necesarias, hay que fijar la tela en una serie de puntos. A éstos, les podemos llamar «anclajes». En ellos, como resulta evidente, se van a concentrar también las tensiones, pues van a suponer siempre interrupciones de la tela o cambios de su curvatura. Por ello, resulta importante analizarlos y resolverlos correctamente.

Podemos distinguir, en primer lugar, dos tipos claramente diferenciados, *interiores* y *exteriores* o perimetrales, que coinciden con las clasificaciones morfológicas que hemos establecido en apartados anteriores.

Podríamos, en principio, distinguir también entre puntuales y lineales para seguir con la misma analogía, sin embargo los anclajes lineales son, a su vez, asimilables a las relingas, por lo que concentraremos nuestra atención en los puntuales, si bien mencionaremos algún tipo especial de anclaje lineal, sobre todo, los interiores.

En cualquier caso, tanto unos como otros, podrán ser *positivos* o *negativos*, es decir suponer un esfuerzo hacia arriba (estar «colgada» la tela) o un esfuerzo hacia abajo (estar «atirantada»).

7.2.1. Anclajes interiores

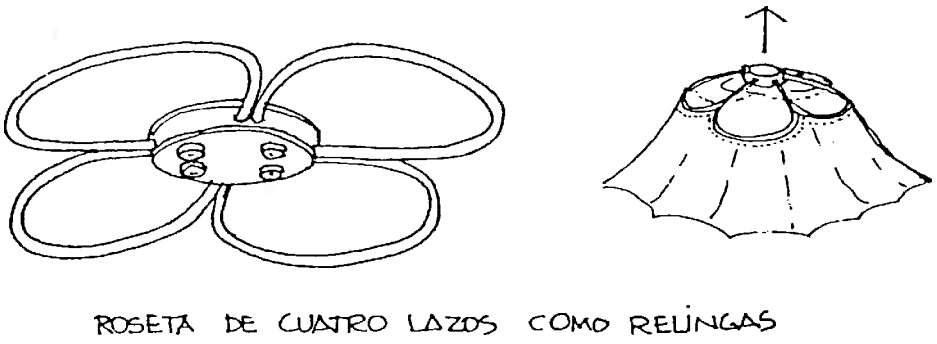
Nos permiten sujetar la cubierta en la zona central, cuando las dimensiones son importantes, por lo que supondrán, bien un anclaje «hacia arriba» (un apoyo), que absorbe esfuerzos «hacia abajo», bien un anclaje «hacia abajo» (negativo), absorbiendo esfuerzos hacia arriba, tanto puntual como linealmente.

7.2.1.1. *Los anclajes interiores puntuales* pueden resolverse, básicamente, de dos maneras, buscando siempre la solución de la concentración de los esfuerzos mecánicos, por una parte, y de la de su función básica, por otra, tanto si son positivos como negativos.

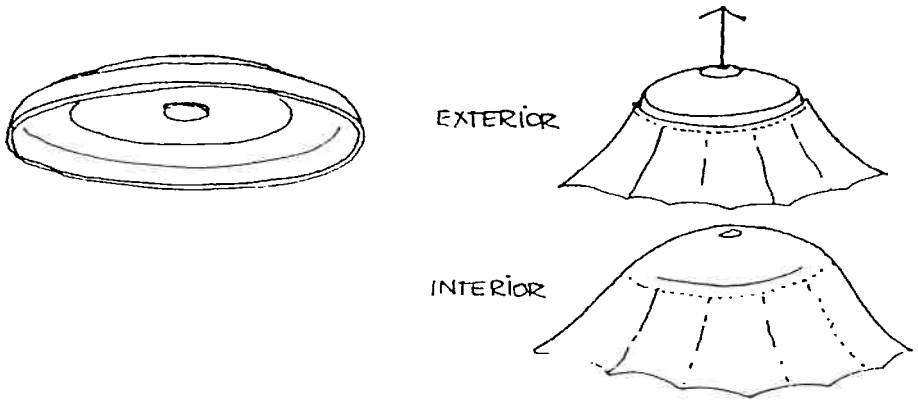
Uno de los tipos de soluciones consistirá en establecer un apoyo que sea capaz de levantar, o bajar, la tela sin producirle incisiones que pudieran ser origen de rasgaduras. Para ello, lo más adecuado será recurrir a casquetes esféricos o cónicos, más o menos grandes, que empujan la tela sin introducirle cambios bruscos de curvatura. Dichos casquetes se podrán obtener, bien a base de un

elemento superficial, bien a base de lazos, en forma de rosetas, que mantengan la curvatura (Fig. 7.5).

En ambos casos el casquete podrá «empujarse» desde la parte cóncava de la tela o «engancharse» desde la parte convexa, lo que nos da idea de la versatilidad de estas soluciones. En cualquier caso, necesitarmos una estructura para fijar el casquete, que se obtendrá mediante mástiles, cables colgados, etc., si se trata de anclajes positivos. Si son negativos, los anclajes irán directamente a la estructura soporte (suelo, edificio, etc.) o indirectamente por medio de un cable atirantado hacia abajo.



ROSETA DE CUATRO LAZOS COMO RELINGAS



CASQUETE ESFERICO DE APOYO

Figura 7.5. Formas de anclaje puntual interior.

Por otra parte, habrá que resolver la inevitable acumulación de tensiones en la tela alrededor del punto de cuelgue. La solución más sencilla consistirá en suplementar la tela base con nuevas hojas, correctamente unidas a aquélla, según la tensión que se produzca.

El otro tipo de soluciones para apoyos interiores será la relinga circular alrededor del punto de cuelgue. Dicha relinga podrá ser, de nuevo, rígida o flexible. Las rígidas, constituyen simplemente un anillo metálico que sujeta el borde de la tela y que absorbe las tensiones que se acumulan en el punto de apoyo (Fig. 7.6). Las flexibles necesitan el cuelgue desde varios puntos (Fig. 7.7).

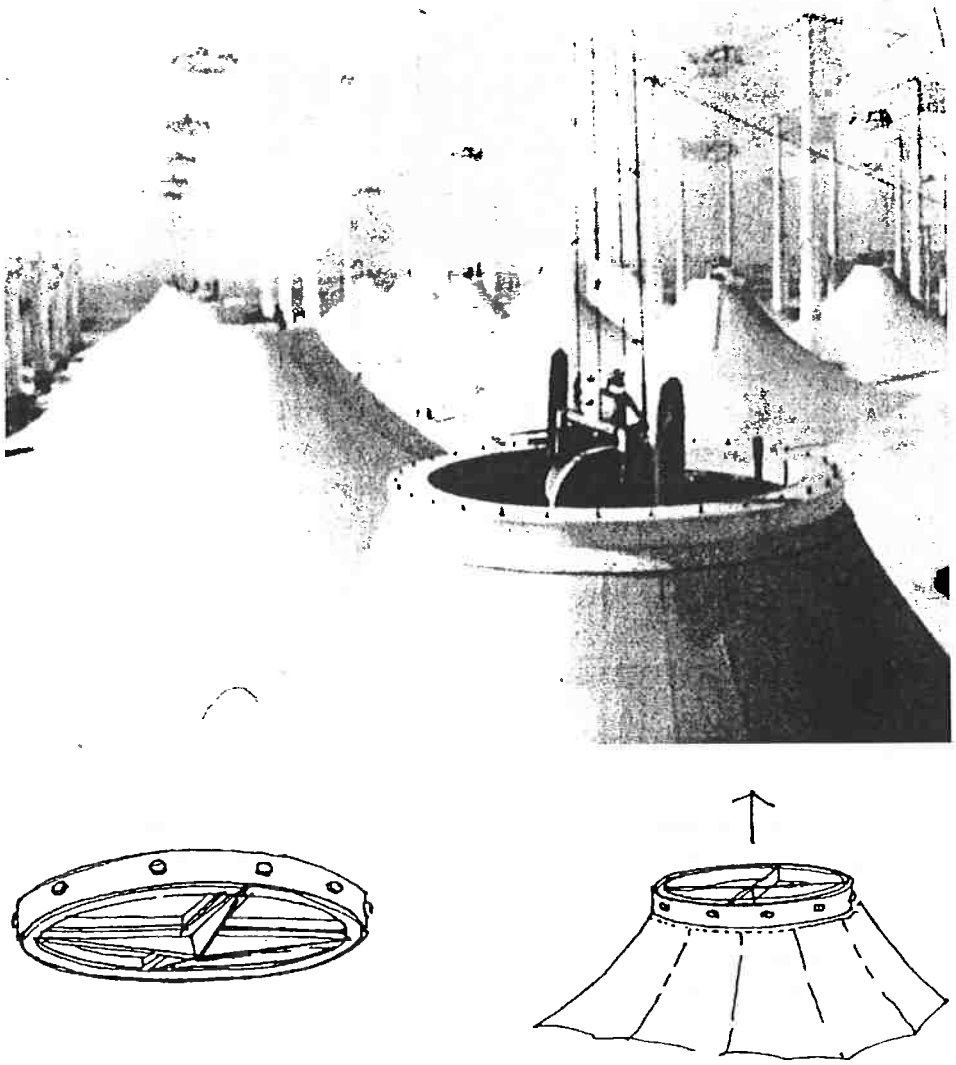


Figura 7.6. Relinga rígida circular.

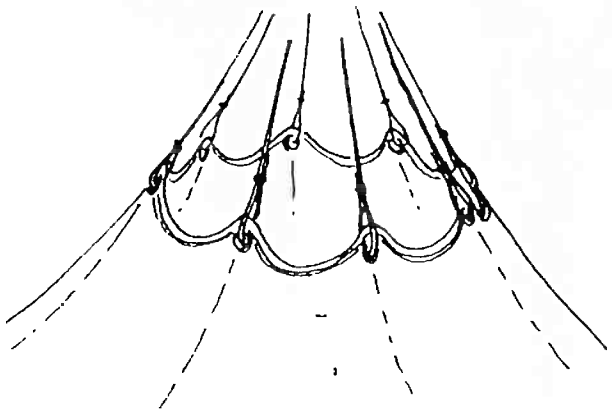


Figura 7.7. Relinga flexible circular.

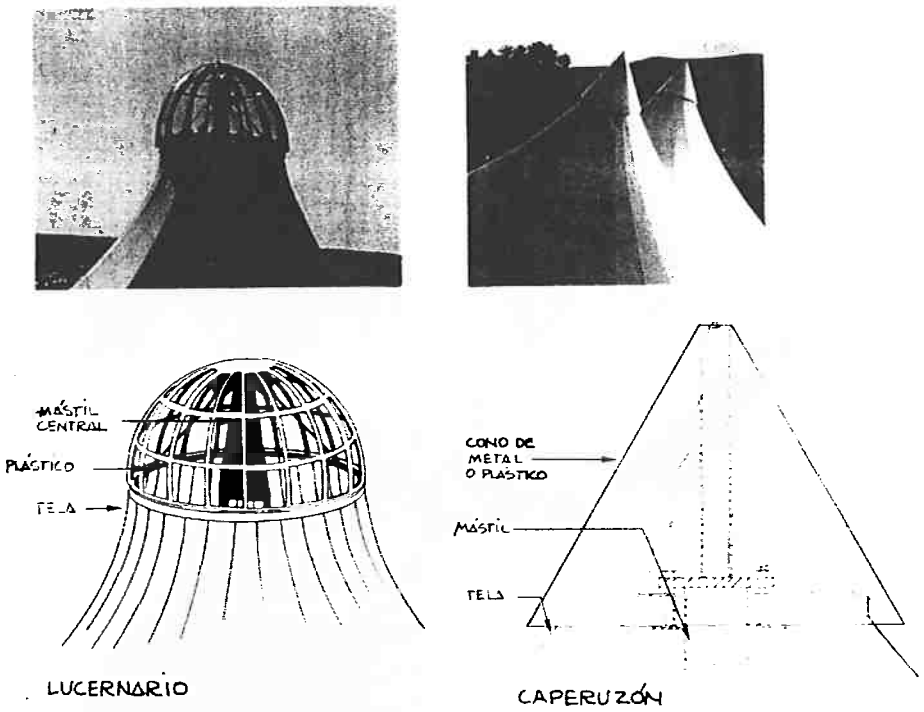


Figura 7.8. Conos protectores en conoides.

En ambos casos se suele producir un «agujero» en la tela (el círculo interior a la relinga) que es necesario cubrir si queremos soluciones impermeables (Fig. 7.8). Por otra parte, necesitaremos refuerzos en la tela pues, aunque la relinga absorba los que llegan al borde, en la superficie próxima a él existe también concentración de tensiones. Como antes, se podrá resolver con hojas de tela adicionales perfectamente unidas a la original (Fig. 7.9).

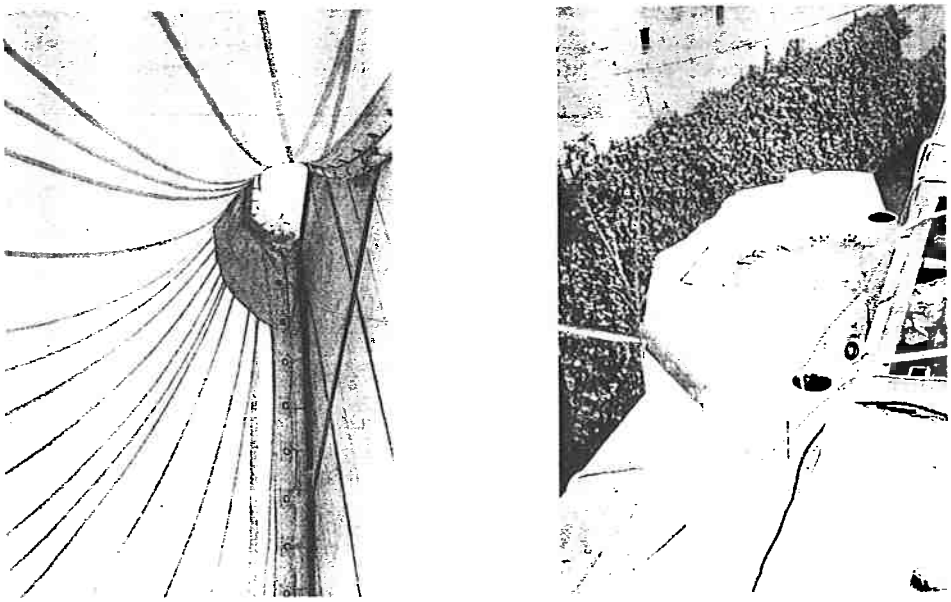


Figura 7.9. Refuerzo de cono superior en semiconoide

Las flexibles suponen una variante de las «rosetas» que hemos mencionado más arriba. En definitiva, consiste en introducir una relinga flexible en el borde del «agujero» del remate del conoide que se produce, relinga que, a su vez, se atiranta desde una serie de puntos hacia el vértice teórico (Fig. 7.10). Dicho atirantamiento introduce unas fuertes deformaciones en la relinga, que pueden suponer esfuerzos especiales en la tela si no se diseña ésta correctamente. Estas deformaciones son las que, extrapoladas, dan forma a la roseta que veíamos más arriba, y que resultan imprescindibles cuando se trata de orificios de pequeño tamaño.

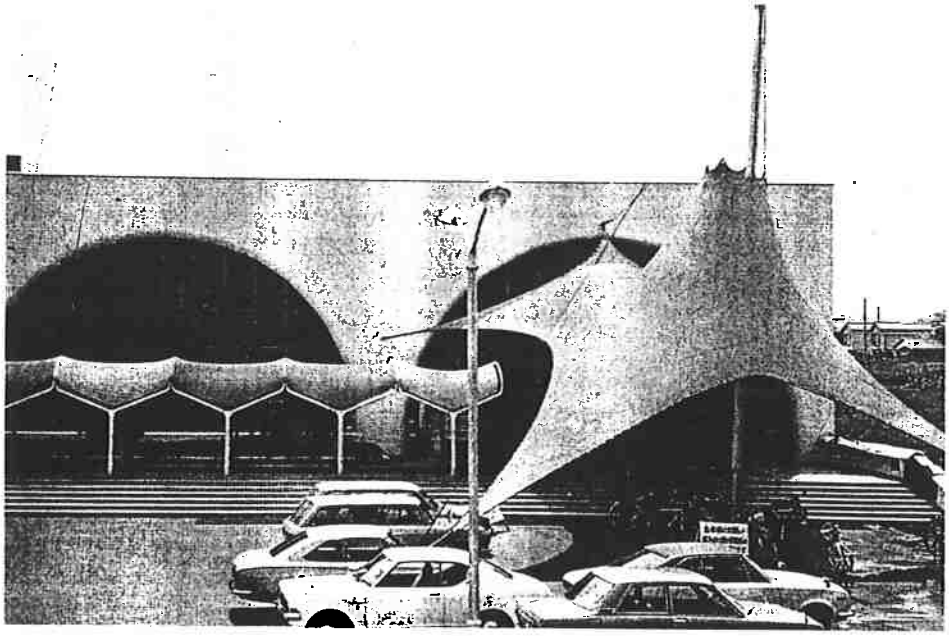


Figura 7.10. Relinga flexible en vértice de conoide.

7.2.1.2. Los anclajes interiores lineales pueden ser también positivos o negativos. Son, normalmente flexibles, aunque también podemos utilizar «apoyos» o «anclajes» rígidos que, si son rectos, dificultan la obtención de la curvatura anticlástica en su proximidad, al igual que vimos en los bordes.

Si se trata de *apoyos lineales rígidos*, la solución pueder ser doble. Podemos, simplemente, «apoyar» la tela sobre la estructura (vigas o arcos) sin más que establecer un refuerzo en la línea de contacto, tanto para evitar rotura por roce, como para absorber la acumulación de tensiones. Podrá ser conveniente, además, establecer una sujeción de la tela a la estructura para evitar movimientos diferenciales peligrosos (Fig. 7.11).

Si la concentración de esfuerzos es importante o el tamaño de la cubierta lo requiere, podemos interrumpir la tela en la línea de apoyo y convertir ésta en dos anclajes perimetrales continuos, similares a los que veremos más adelante (Fig. 7.5) con lo que deberemos atender lo que allí expongamos.

Si estamos ante un *anclaje lineal rígido* (poco corriente) el elemento estructural suele estar por debajo de la tela, con objeto de protegerlo de la humedad directa. Entonces se hace necesario un sistema de atado de la tela al elemento lineal (normalmente un perfil tubular). Dicho atado suele llevarse a cabo di-

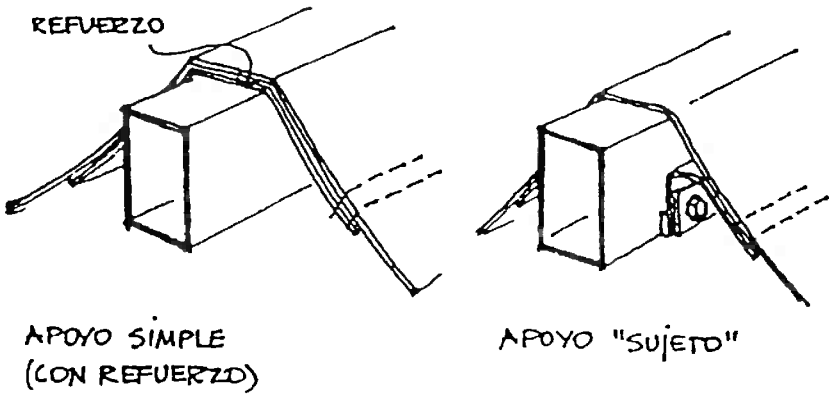


Figura 7.11. Apoyo lineal rígido interior.

rectamente con la misma tela unida al perfil por medio de un acordonado o por prensa (Fig. 7.12).

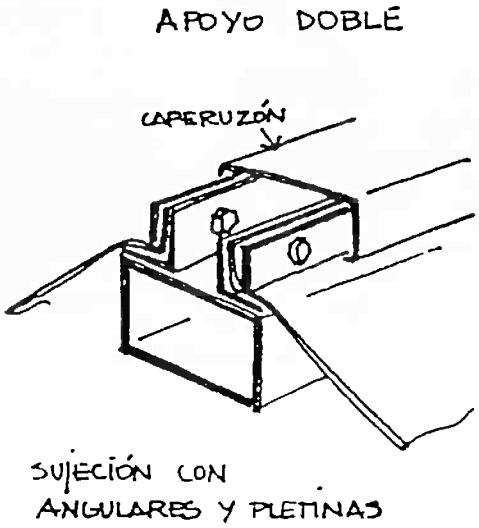


Figura 7.12. Anclaje lineal rígido.

En algún caso, puede pensarse en un anclaje directo por prensa metálica que sujeta la tela al perfil (Fig. 7.13), aunque esta solución suele conllevar problemas de acumulación de humedad y suciedad.

Cuando se trate de *«cuelgues» lineales flexibles*, nos encontraremos ante cables sujetos a puntos elevados, que absorben los esfuerzos hacia abajo de la tela. Existe un roce inevitable entre ambos elementos que debemos considerar. La solución suele ser un refuerzo de la tela en la zona de roce, similar al de los apoyos rígidos.

Cuando, por el contrario, se trata de *anclajes interiores para «esfuerzos hacia arriba»* utilizaremos normalmente cables (anclajes lineales flexibles) cuya solución constructiva puede ser también doble como ya vimos en el apartado 5.2.2: es decir, colocar el cable por el exterior, reforzando con una banda

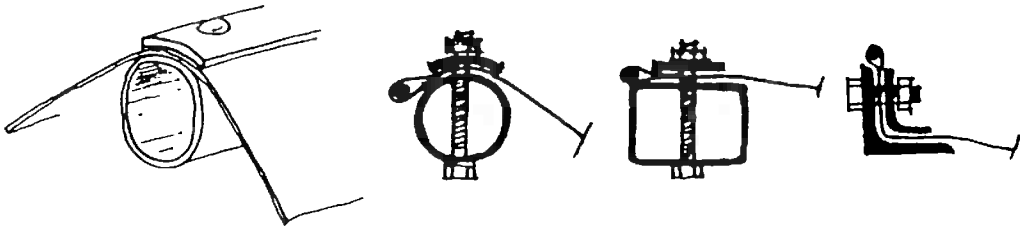


Figura 7.13. Anclaje lineal directo.

de protección, con el consiguiente peligro adicional de acumulación de humedad, o colocar el cable por el interior, por medio de una pieza añadida de la misma tela, unida al resto (Fig. 7.14).

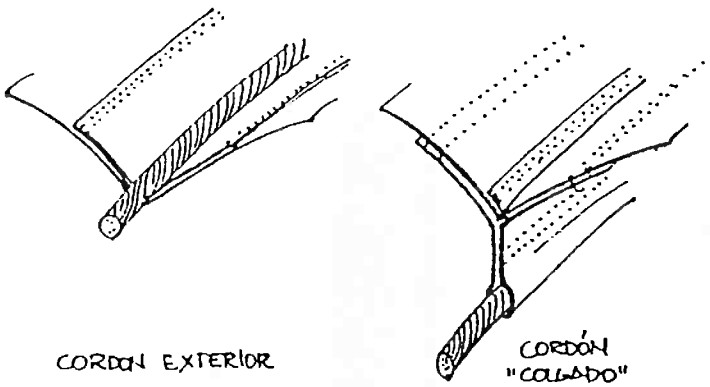


Figura 7.14. Anclaje interior flexible para esfuerzo hacia arriba.

En este caso, también podemos interrumpir la membrana en la línea de anclaje y convertir ésta en una relinga exterior flexible común a las dos telas que en ella confluyen, con la consiguiente protección posterior a efectos de estanquidad de la cubierta (Fig. 7.15).

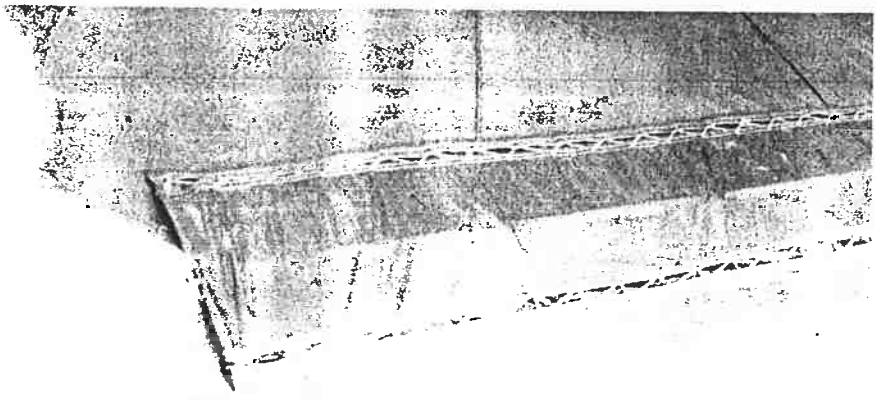


Figura 7.15. Anclaje flexible a dos relingas paralelas.

7.2.2. Anclajes exteriores

Los *anclajes exteriores* son, en principio, más sencillos de resolver constructivamente, aunque la concentración de tensiones en la tela que llega a ellos sea, evidentemente, mucho mayor que en los interiores, ya que la superficie textil queda muy reducida.

Al igual que en el punto anterior, podemos distinguir entre puntuales y lineales.

Los *anclajes exteriores puntuales* tienen, normalmente, formas triangulares. Por analogía, de nuevo, con las soluciones textiles de la navegación a vela, podemos hablar aquí de «puños», por lo menos cuando nos refiramos a los refuerzos que van a ser necesarios en estos puntos.

Si se trata de cubiertas de pequeño tamaño, con tensiones reducidas, la relinga del borde de la cubierta puede ser continua a los dos lados del puño y, entonces, la solución constructiva se puede tomar de las velas de los barcos, tanto para ángulos obtusos como para los agudos. Nos encontramos, así, con distintas soluciones (Fig. 7.16):

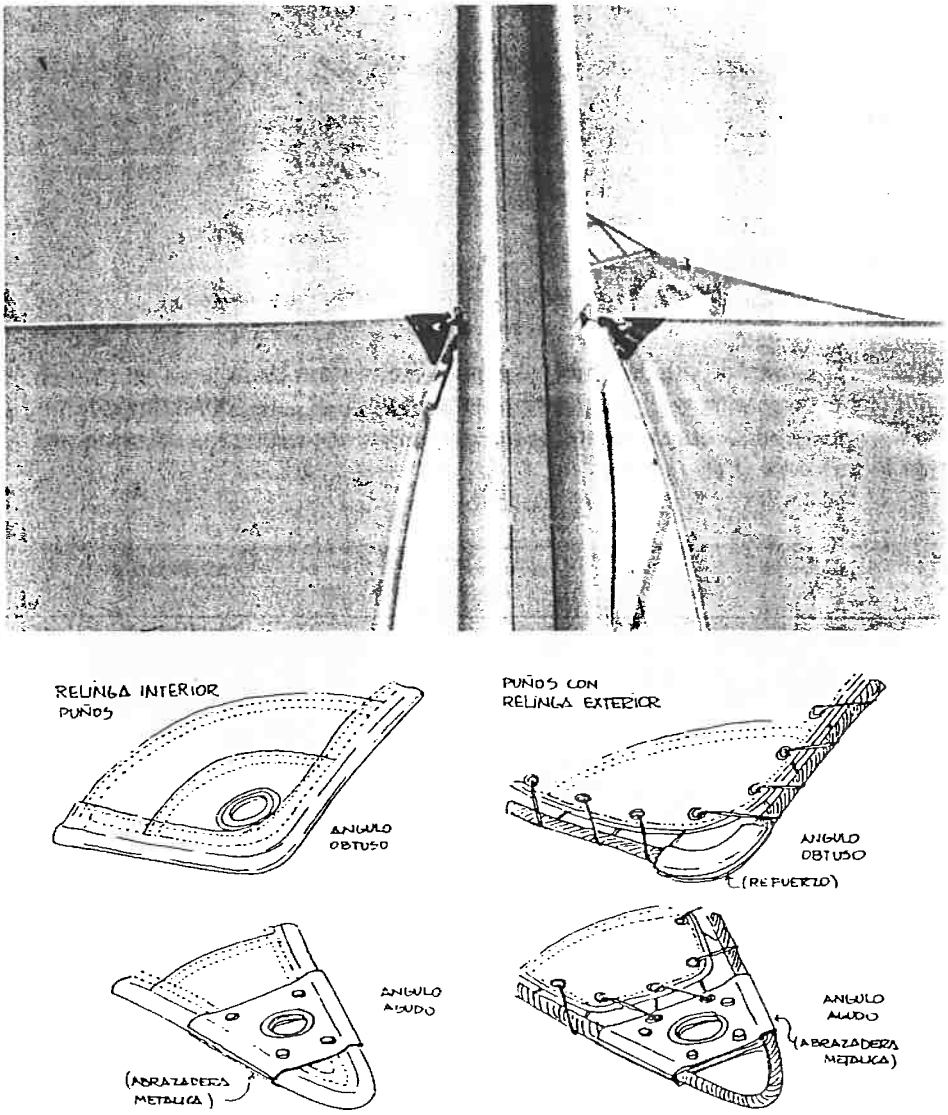


Figura 7.16. Anclajes exteriores puntuales para esfuerzos pequeños.

Si la *relinga es interior* y el ángulo obtuso, la solución más corriente será establecer un ollao en el punto de inflexión suficientemente reforzado. Además, habrá que reforzar el puño con hojas de tela unidas a la de base (estas hojas pueden ser múltiples y decrecientes para una mejor eficacia de la tela). Si, por el contrario, el ángulo es muy agudo, podemos llegar a sustituir el ollao por una pieza metálica que constituye propiamente un puño. Suele ser una pieza doble que abraza la tela por los dos lados y puede ir sujeta a la relinga para mayor efectividad. Esta última solución requiere, también como complemento, el refuerzo de la tela hasta donde sea necesario, según las tensiones previstas.

Cuando las tensiones son importantes, o si la *relinga es exterior*, y con el objetivo principal de facilitar la confección y, sobre todo, la colocación de la religna, se recurre a la solución de «puño independiente», en la que se utiliza una pieza metálica especial a la que se anclan las relingas que llegan de cada uno de los lados de la tela, así como el cable de anclaje del puño y los posibles tensores de esfuerzo de la propia tela (Fig. 7.17). Esta pieza metálica puede ser cualquiera que cumpla la función, siendo las más corrientes de forma triangular (equilátero) o anular.

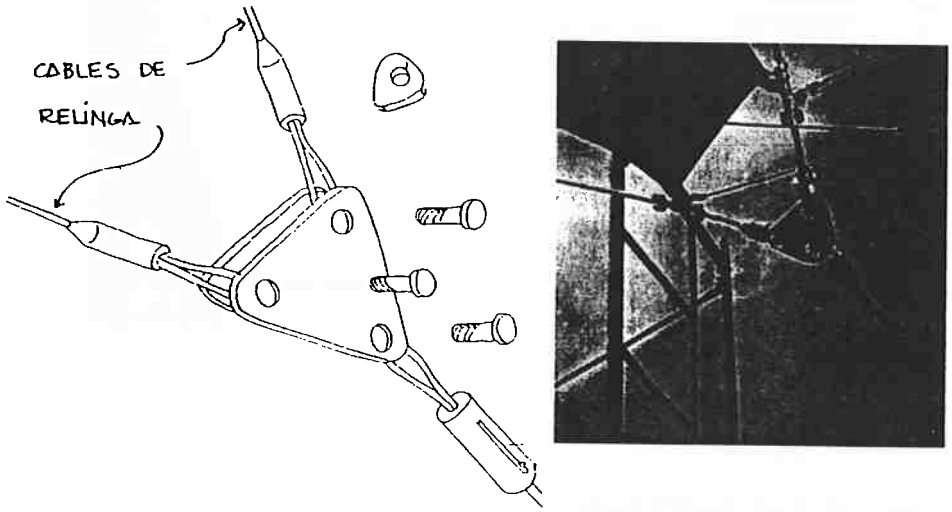


Figura 7.17. Pieza triangular para anclaje puntual perimetral.

Con estos tipos de piezas facilitamos, por un lado, el montaje de la cubierta al ser las relingas de borde, independientes para cada tramo entre anclajes puntuales, y, por otro el mantenimiento y regulación de la tensión, al poder variar esta en su unión a cada anclaje por medio de tensores ajustables.

Asimismo, nos permite sujetar el borde de la tela de un modo independiente, evitando su desplazamieto relativo, que nos llevaría a un desgarro seguro.

La pieza del puño tiene que anclarse, posteriormente, a la estructura soporte, lo que se realiza, normalmente, por medio de otro cable en el que se puede intercalar un tensor para regular la tensión del conjunto, y un muelle elástico, que ayude a absorber parte de los esfuerzos momentáneos, por una parte, y nos permita mantener la tensión de la cubierta de un modo constante, por otra.

Por último, los *anclajes exteriores lineales* son asimilables a la relinga rigida exterior ya comentada, pues consiste en una estructura lineal a la que se sujeta

la tela de un modo continuo, lo que se puede hacer mediante ollaos y acordonado. Sin embargo, cuando se trata de tensiones importantes, o debemos asegurar la estanqueidad de la unión, se utiliza la sujeción por prensa, vista ya en párrafos anteriores. En ella, se sujeta la tela por medio de una pletina atada al perfil de anclaje por pernos que atraviesan la tela (Fig. 7.18). En estos casos hay que cuidar especialmente el encuentro de la membrana con el perfil y la pletina para evitar incisiones de éstos sobre aquélla, que podrían producir el rasgado. Para ello se suelen usar perfiles curvos (circulares) haciendo que la tela entre tangente a los mismos.

Asimismo, conviene tener en cuenta el correcto drenaje de la cubierta para evitar acumulaciones de agua y suciedad en las piezas metálicas.

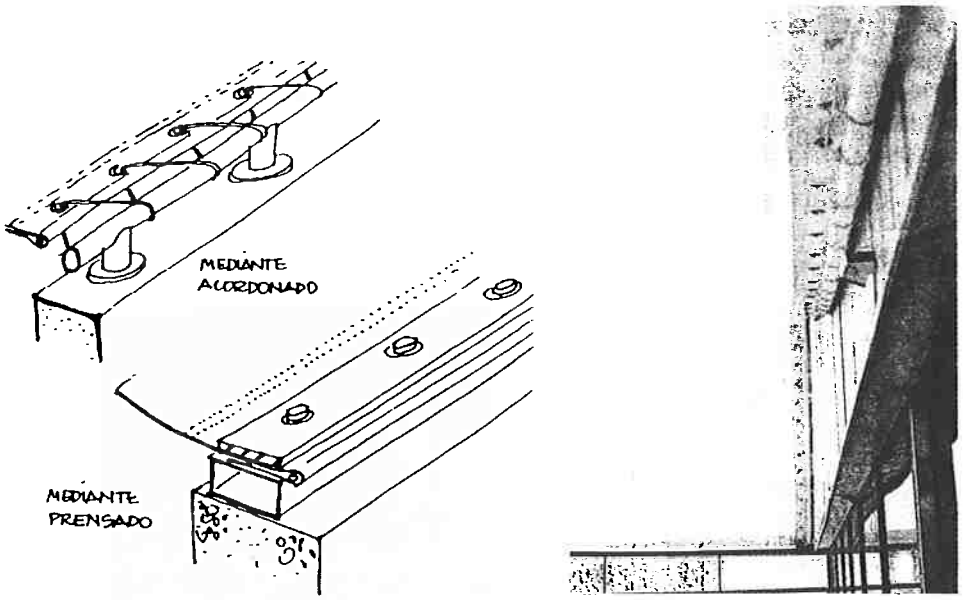


Figura 7.18. Anclaje perimetral rígido.

7.3. ESTRUCTURAS AUXILIARES

Hasta aquí los anclajes que se refieren a la tela propiamente dicha. Pero en muchos de ellos, y sobre todo en los puntuales, los anclajes vistos hasta ahora son simplemente «intermedios» pues se realizan a una estructura auxiliar que, a su vez, tiene que estar anclada a una estructura definitiva o al propio terreno, ya que esta «estructura auxiliar» suele tener unas características de ligereza y movilidad que la hacen inestable de por sí.

En este sentido, conviene analizar, brevemente, los casos más corrientes, que podemos agrupar en *mástiles, pórticos*, y *anclajes fijos*, como complemento constructivo a su funcionamiento, que quedó visto en el capítulo 3.

7.3.1. Mástiles

Son elementos lineales rígidos que permiten elevar puntos de la membrana, e introducir en ella los esfuerzos hacia arriba necesarios para que adquiera la

forma estable alcanzada en el diseño. En consecuencia, recibirán, fundamentalmente, esfuerzos de compresión, que deberán transmitir a la estructura fija (suelo o estructura previa).

Según la situación, podemos distinguir entre *interiores* y *exteriores*, en ambos casos, con situaciones constructivas análogas. Según su funcionamiento estructural, distinguiremos entre *articulados* y *empotrados*, aunque estos últimos se alejen algo del concepto original de mástil.

7.3.1.1. Mástiles articulados

Consiste en un elemento lineal rígido sometido únicamente a compresión gracias a la articulación en sus dos extremos (Fig. 7.19).

La articulación de la base debe ser, teóricamente, una rótula, con el objeto de permitir su movilidad en todas las direcciones, y no coartar los movimientos de la membrana debidos a los esfuerzos exteriores. No obstante, si en el diseño aparece una dirección con movilidad dominante sobre las otras, se puede resolver la base del mástil con una articulación según esa dirección principal,

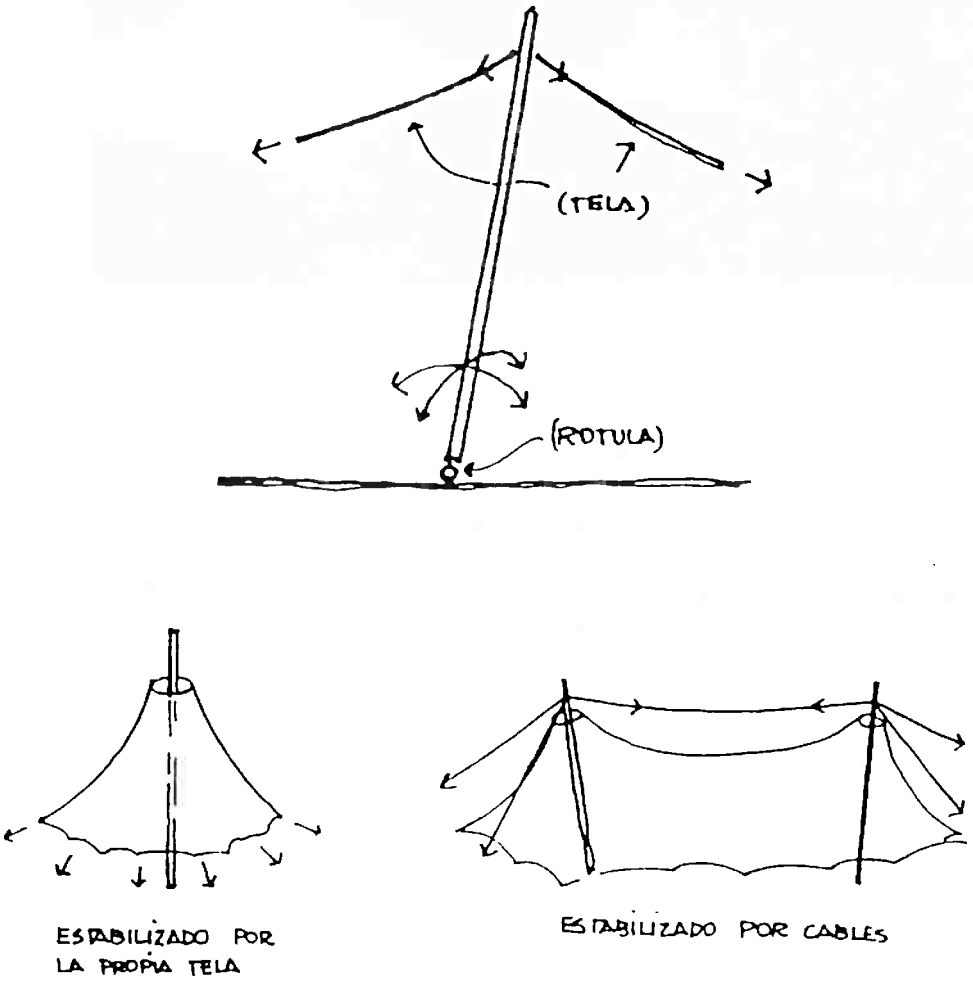


Figura 7.19. Mástil articulado.

dejando la movilidad en las otras direcciones a la propia deformabilidad del mástil.

En definitiva, el mástil funciona como una biela con un extremo fijo (la base) y el otro móvil (el anclaje de la cubierta). Dicho anclaje, por otra parte, tiene que mantener el mástil estable, tanto en situación de reposo, como ante esfuerzos exteriores.

En este sentido, cuando el mástil es interior, suele ser suficiente con la propia membrana de la cubierta que, al estar tensada, mantiene estable la cabeza del mástil, y cuando sufre alguna deformación en un sentido, debida a acciones exteriores, aparece inmediatamente la reacción en el sentido contrario, de la otra parte de la membrana, que estabiliza el conjunto. No obstante, en muchas ocasiones, y con el objetivo principal de facilitar el montaje, manteniendo el mástil erguido antes de izar la tela, se atiranta la cabeza del mismo mediante cables (3, por lo menos), normalmente por encima de la cubierta (Fig. 7.20).

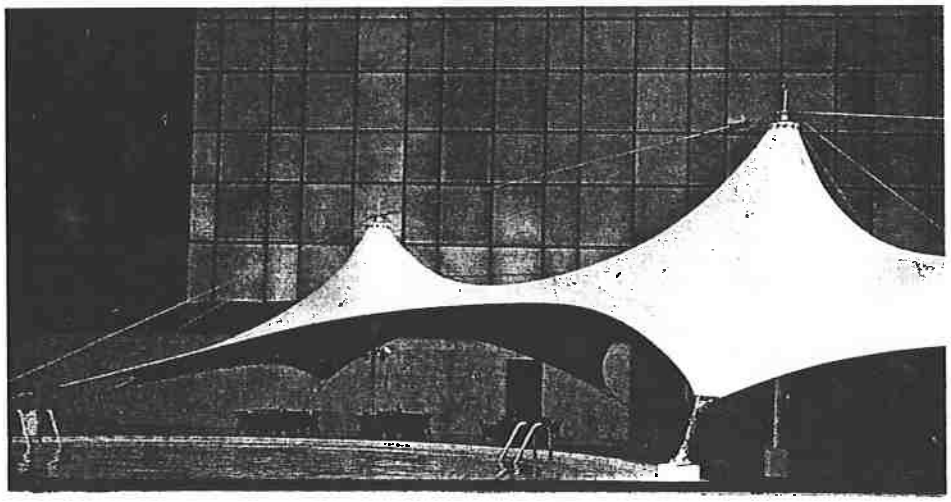


Figura 7.20. Mastiles estabilizados por cables.

Hay que tener en cuenta que esta solución rigidiza algo la cabeza del mástil, coartando sus posibilidades de deformación (en función del módulo de elasticidad de los tirantes), lo que puede introducir disfunciones en el conjunto de la cubierta, si no se considera adecuadamente en el cálculo.

Si el mástil es exterior (de borde) el esfuerzo que introduce la tela es forzosamente lateral, por lo que se necesita contrarrestarlo mediante tirantes que lo rigidizan en el otro sentido. Suelen ser dos tirantes formando un ángulo cuya bisectriz es la resultante del esfuerzo introducido por la cubierta (Fig. 7.21).

Existe un tipo de mástil exterior que no es de borde, sino que actúa como «grúa» permitiendo el cuelgue interior de la cubierta desde su extremo (Fig. 7.22).

En estos casos, para su arriostramiento se sigue contemplando como mástil de borde y necesita, por tanto, doble tirante. En cualquier caso, se trata de una

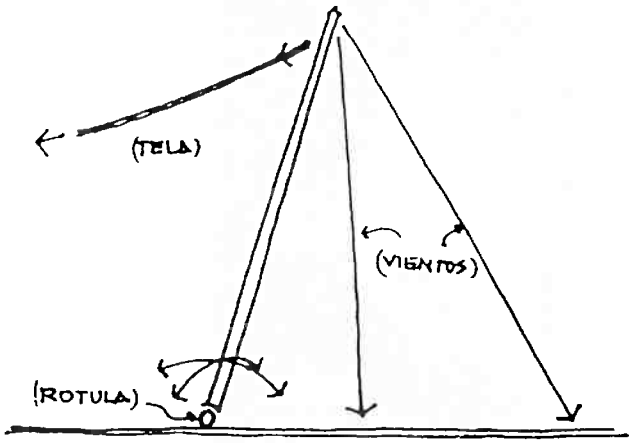


Figura 7.21. Mástil articulado de borde.

solución en la que el mástil cobra mucha importancia visual, ya que al tener que ir por encima de la cubierta, le obliga a disponer de un brazo muy largo y, por tanto, una gran rigidez, que lo complica estructuralmente. Por el contrario, ofrece la posibilidad de un interior diáfano.

Los *tirantes* se resuelven, en general, mediante cables de acero, tanto por su resistencia como por su manejabilidad. No obstante, en el caso de los mástiles de borde, y para dimensiones reducidas, se pueden utilizar barras rígidas que permiten mantener el mástil estable aun sin el esfuerzo de la membrana (Fig. 7.23).

Las sujeciones de dichos cables, tanto a la cubierta como a la estructura fija, se pueden llevar a cabo de varios modos, aunque predominan dos de ellos:

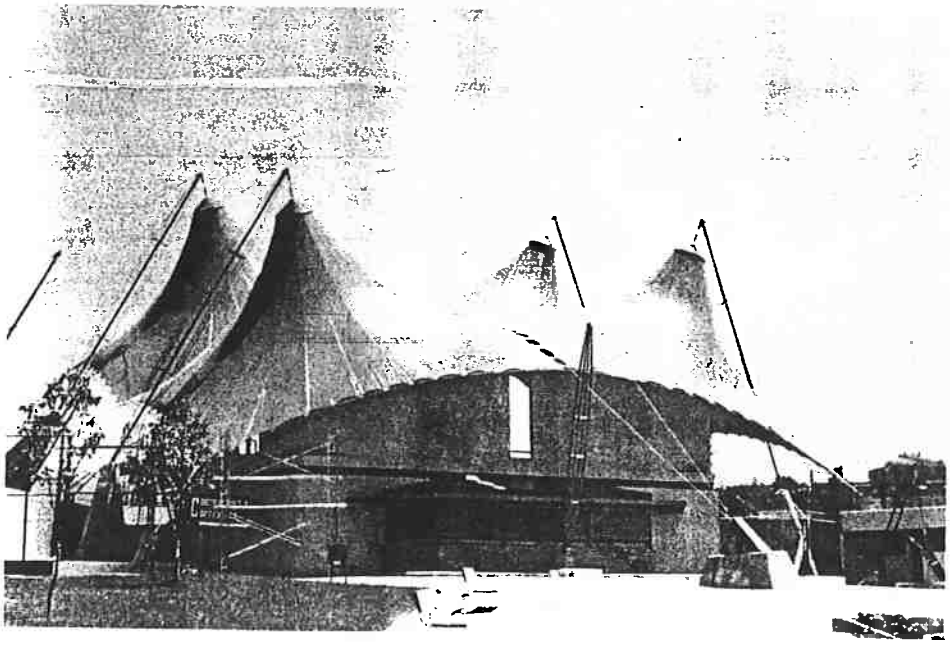


Figura 7.22. Mástil exterior tipo grúa.

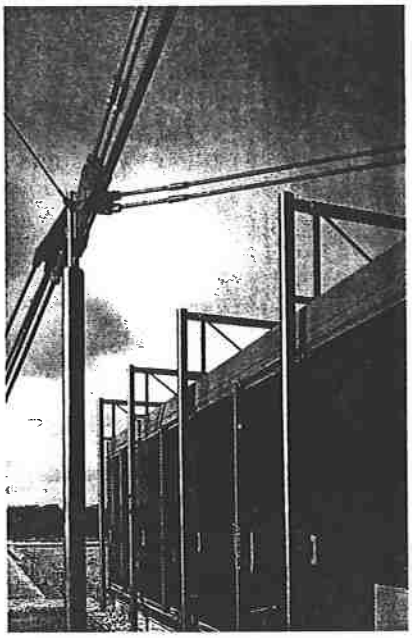


Figura 7.23. Mástil de borde estabilizado con tirantes rígidos.

El más sencillo es a base de piezas «guardacabos», que permiten que el cable dé la vuelta alrededor, sin introducir problemas de cizallamiento, y «presillas» para sujetar los extremos y evitar el deslizamiento (Fig. 7.24).

Para tensiones importantes, se recurre al uso de «mazarotas» y de anclajes cónicos (Fig. 7.25), unidos normalmente a pernos roscados que permiten la regularización de la tensión y, por tanto, la entrada en carga.

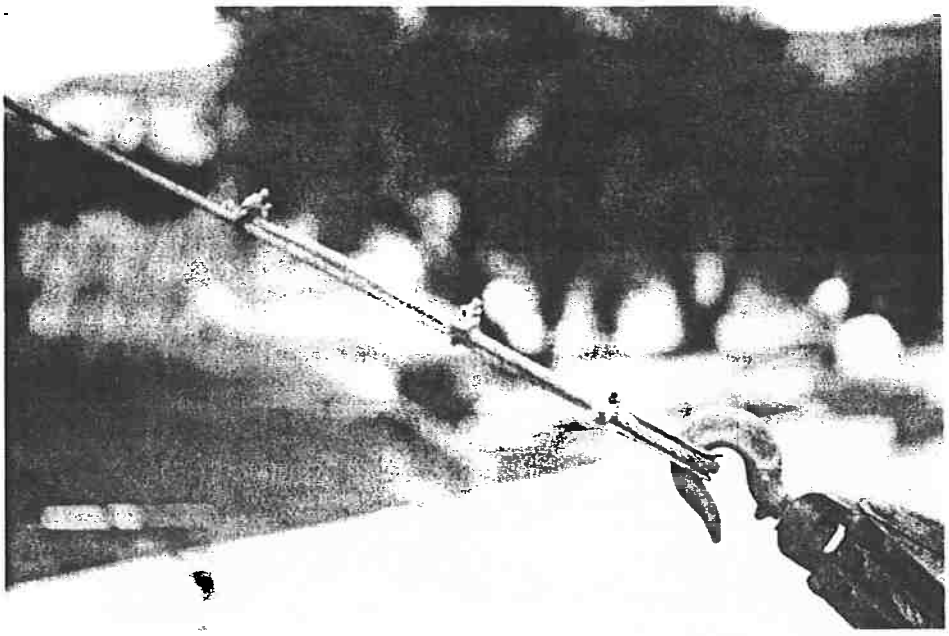


Figura 7.24. Protectores para cables de anclaje.

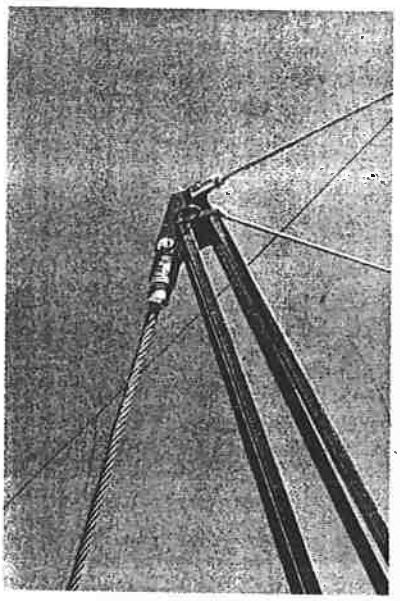


Figura 7.25. Anclaje por mazarotas.

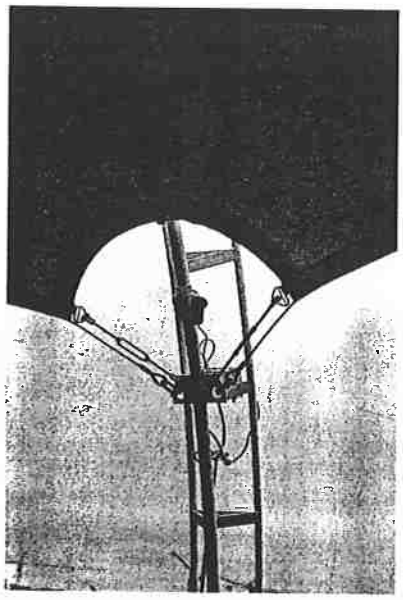


Figura 7.26. Tensor telescópico.

En cualquiera de los casos, el tirante, además de soportar la tensión que le transmite la cubierta, tiene que permitir las manipulaciones propias del montaje y del mantenimiento, que consisten, básicamente, en la puesta en tensión de la tela y la comprobación y regulación de la misma a lo largo de su vida. Para ello, se recurre a los «tensores», de los que existen diversos tipos y que, en general, permitan regular la dimensión del tirante y, por tanto, variar su tensión.

Los más corrientes son los tensores telescópicos, de doble tornillo y abrazadera intermedia (Fig. 7.26), que tienen el inconveniente de que alcanzan dimensiones exageradas cuando se trata de altas tensiones.

Figura 7.27. Regulación del anclaje por tornillo roscado. Solución de J. M. Prada Poole.

Se puede recurrir, también, a tornillos roscados unidos a mazarotas en el extremo del tirante, que permite su regulación desde el mismo anclaje (Fig. 7.27) aunque quizá los más usados para tensiones elevadas sean los tensores de doble tornillo paralelo, que amplía su capacidad resistente y sirve también como pieza de anclaje (Fig. 7.28).

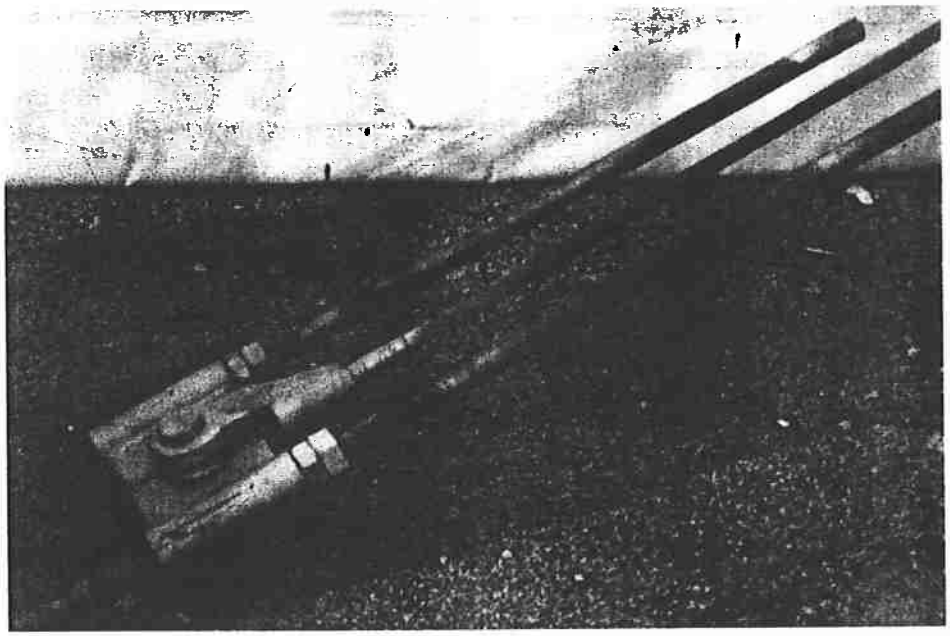


Figura 7.28. Tensor de doble tornillo.

Además de la regulación directa de la tensión por medio de la variación dimensional, podemos pensar también en una «regulación automática» en función de las solicitaciones a las que esté sometida la membrana en cada mo-

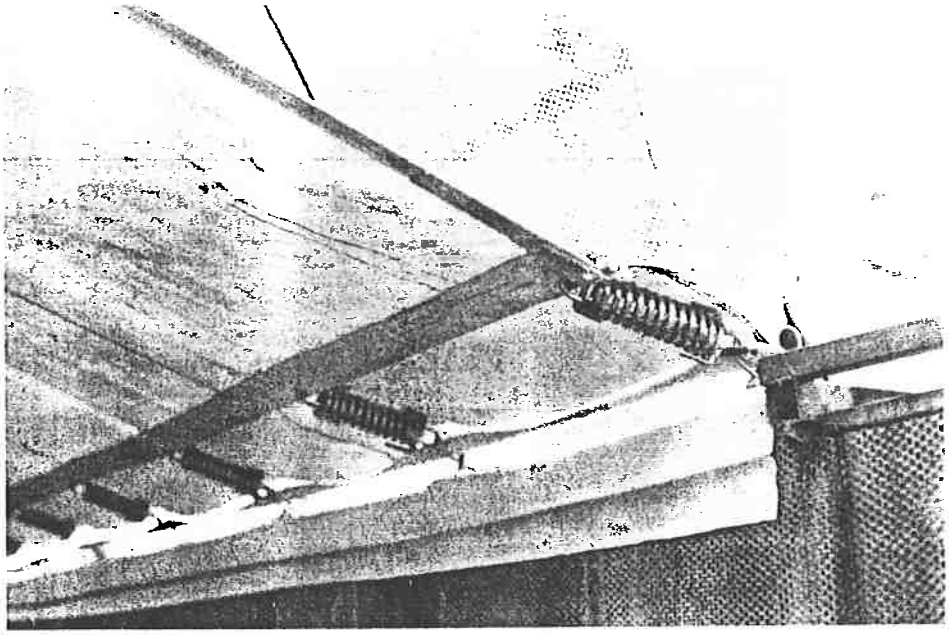


Figura 7.29. Muelle para regulación de la tensión en anclaje.

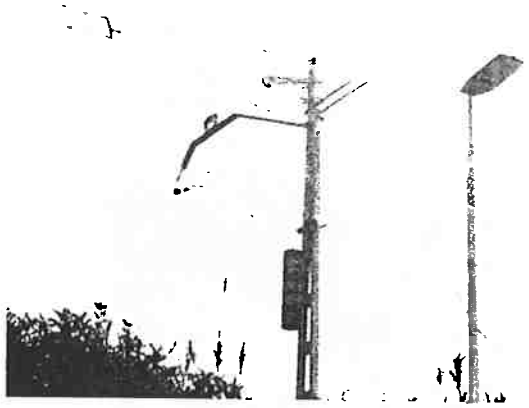


Figura 7.30. Regulación de la tensión por contrapeso.

mento que, como sabemos, varían en función de los agentes atmosféricos (viento y nieve). Para ello, resultan útiles dos tipos de mecanismos. Por un lado, los muelles, tanto a tracción, como a compresión, aunque estos últimos ofrecen mayor seguridad por menos peligro de rotura (Fig. 7.29). Por otro, los contrapesos, muy comunes en los tendidos eléctricos de los ferrocarriles (Fig. 7.30).

En ambos casos, se trata de que la energía potencial de recuperación que existe en los dos mecanismos mantenga la tensión necesaria en el tirante y, por tanto, en la tela de la cubierta, o ceda algo en la misma, en función de las solicitaciones de la membrana, de tal modo que en todo momento tenga ésta la tensión suficiente para mantener su estabilidad.

Por lo que se refiere al *mástil,* propiamente dicho, su construcción es la convencional para una barra que va a estar sometida fundamentalmente a compresión, dependiendo, básicamente, del esfuerzo axil y de su longitud, por el problema del pandeo.

Para los menos solicitados, será suficiente un perfil tubular, que puede incrementar de sección en la zona central (Fig. 7.31), lo que facilita la ejecución y permite resolver su discreción estética.

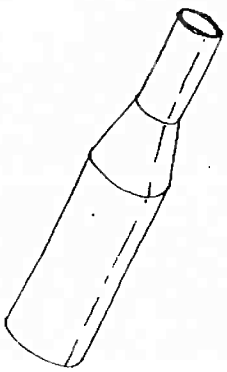


Figura 7.31. Mástil de sección tubular simple.

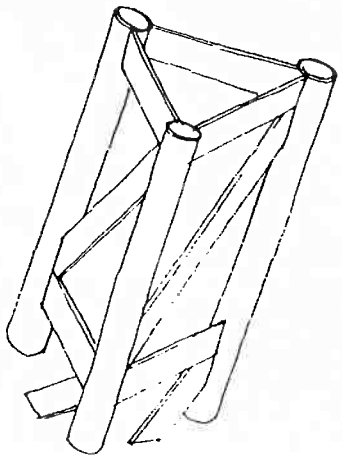


Figura 7.32. Mástil triangulado

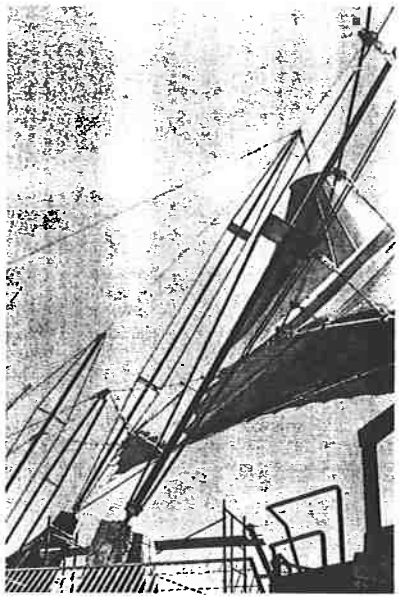


Figura 7.33. Mástil estabilizado contra pandeo. Solución de J. M. Prada Poole.

Cuando los esfuerzos y tamaños son importantes, podemos recurrir a la triangulación del mástil con secciones triangulares o cuadradas más o menos conocidas (Fig. 7.32).

En cualquier caso, podemos alcanzar diseños más o menos elaborados, buscando la mayor eficacia constructiva del elemento, mientras quede resuelta la solicitación axil y se contrarreste el pandeo (Fig. 7.33).

En el mástil, además del fuste, son importantes otros dos puntos; la articulación de la base y los anclajes de la cabeza.

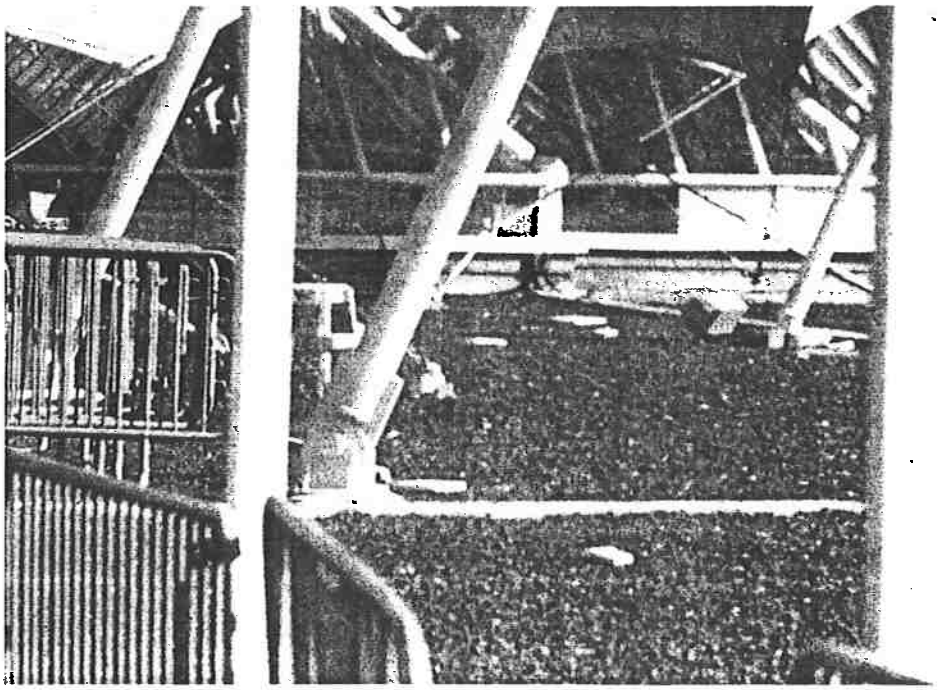


Figura 7.34. Articulación en base de mástil.

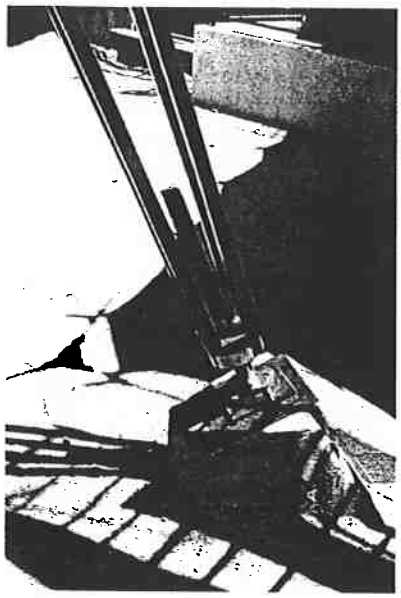


Figura 7.35. Rótula en base de mástil. Solución de J. M. Prada Poole.

La articulación se suele resolver por medio de cartelas y pasadores, cuando se realiza el giro según un solo eje (Fig. 7.34). La rótula completa no es muy corriente, por su dificultad, aunque existen soluciones sustitutivas interesantes como la de la figura 7.35.

Los anclajes de cabeza se resuelven normalmente por cartelas, bien longitudinales, bien transversales, con multitud de posibilidades en función del tipo y número de anclajes que lleguen. En cualquier caso, habrá que asegura que su resistencia es adecuada al esfuerzo que va a recibir (Fig. 7.36).

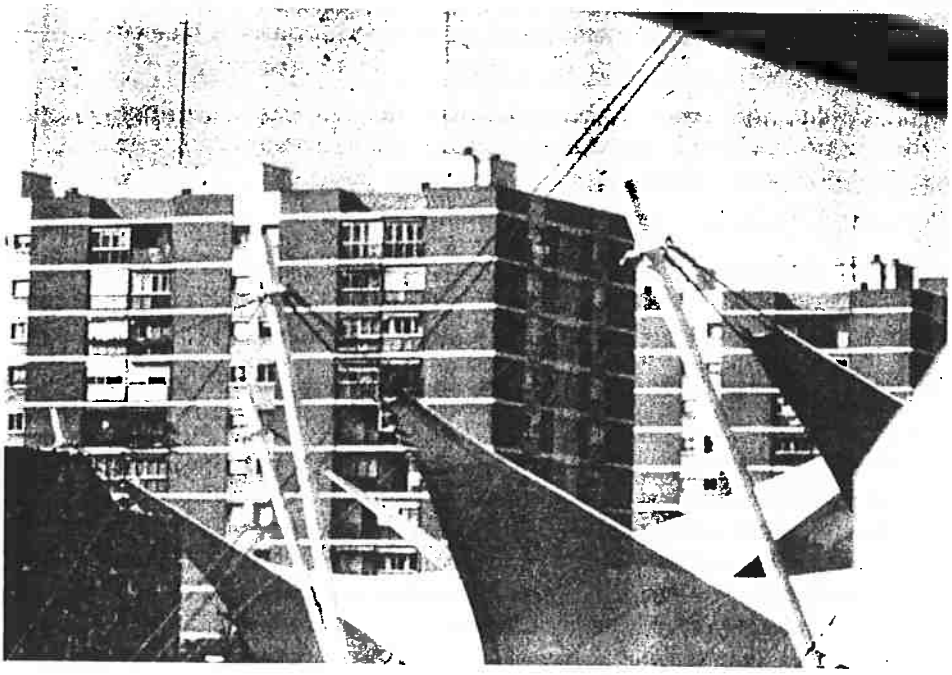


Figura 7.36. Cartelas de anclaje en mástil.

7.3.1.2. Mástiles empotrados

Los mástiles articulados del punto anterior requerían de un número determinado de tirantes que, en ocasiones, resultan incómodos, visual y funcionalmente, y en otras, son irrealizables por falta material de espacio. Entonces se puede recurrir a los mástiles empotrados, cuyo funcionamiento estructural es, evidentemente, muy distinto. Se trata, ahora, de un elemento lineal rígido, empotrado por un extermo a una estructura fija (normalmente el propio terreno) y que recibe, por el otro, el cuelgue de la cubierta por medio de anclajes (Fig. 7.37).

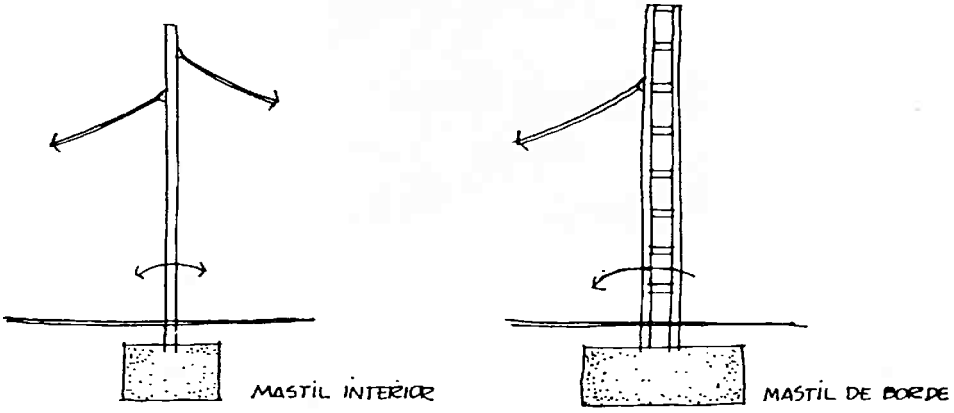


Figura 7.37. Mástil empotrado.

Si el mástil articulado podía considerarse como parte de una estructura de geometría variable en función de las solicitaciones exteriores, capaz de absorber parte de los esfuerzos en base a su propia deformabilidad, ahora, por el contrario, la variabilidad de la estructura se queda reducida a la membrana (la tela) y el mástil pasa a ser parte de la estructura exterior fija.

Así entendido, comprendemos que los esfuerzos que recibe el mástil no son sólo los de compresión, sino, sobre todo, los de flexión, actuando como ménsula, susceptible de recibir momentos en varias direcciones, en función de su situación relativa y de la variación de las acciones exteriores a la cubierta.

En este sentido, podemos distinguir entre *interiores* y *exteriores*.

Los *interiores* deberán estar preparados para recibir esfuerzos en varias direcciones o, por lo menos, en los dos sentidos de una dirección.

Los *exteriores* o perimetrales, normalmente sólo recibirán los esfuerzos por uno de los lados, por donde reciben el anclaje de la tela.

Para su ejecución, pesa mucho esta situación. Así, los exteriores suelen necesitar algún tipo de refuerzo en su sección, ya que el esfuerzo, además de ser permanente, es más importante (ellos son el único contrarresto a la resultante de los esfuerzos de la cubierta) y casi exclusivo de flexión (Fig. 7.38). Por el contrario, en los interiores empieza a predominar la compresión sobre la flexión y, en cualquier caso, los esfuerzos de anclaje de la cubierta se ven, en parte, compensados por la propia membrana, por lo que su sección puede disminuir considerablemente (Fig. 1.1).

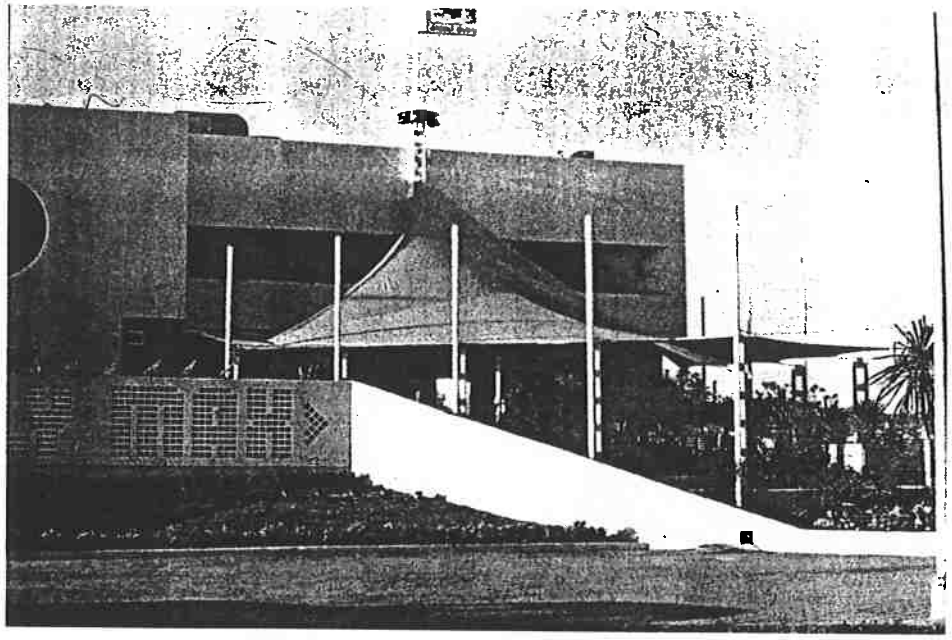


Figura 7.38. Mástil empotrado de borde.

En cualquier caso, la base del mástil es un empotramiento, normalmente en cimentación, calculado, sobre todo, a vuelco.

El extremo superior que recibe los anclajes de la membrana, no varía con respecto a los mástiles articulados, por lo que siguen siendo válidas las mismas soluciones.

7.3.2. Pórticos

Cuando no se trata de elevar puntos aislados, sino líneas (apoyos lineales) aparecen los pórticos como estructura auxiliar, pórticos que pueden servir, además, para puntos aislados o sucesiones de ellos. Dada la gran variedad de apoyos lineales, así como las distintas formas y situaciones relativas de los pórticos, nos aparecen muchos tipos, que podemos agrupar, básicamente, en los siguientes (Fig. 7.39).

Según su funcionamiento estructural, tendremos los dos tipos del apartado anterior, es decir, *articulados* y *empotrados*.

Según su situación relativa, tendremos *interiores*, *exteriores* y *de borde*.

Según su forma, nos aparecen *curvos* (con distintos tipos de arco) *adintelados* y *apuntados*.

Por seguir la misma línea del apartado anterior, hagamos un breve análisis según su funcionamiento estructural.

7.3.2.1. Pórticos articulados

Esquemáticamente tienen el mismo funcionamiento de biela del mástil articulado, aunque su movimiento queda limitado a un sola dirección, girando alre-

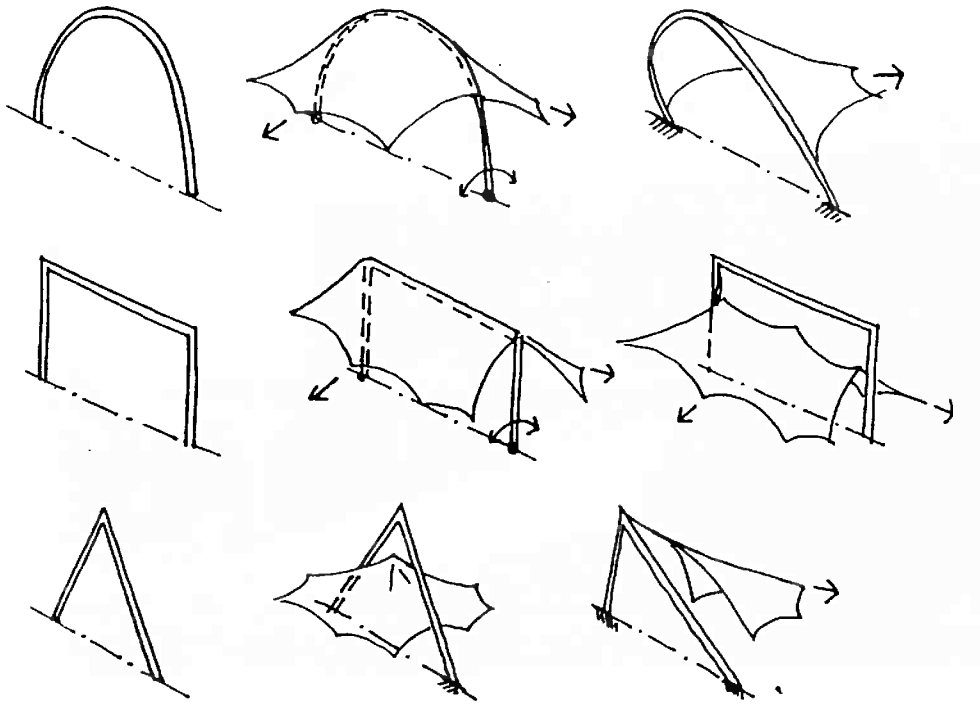


Figura 7.39. Pórticos.

dedor del eje que une sus apoyos (Fig. 7.40) por lo que la deformabilidad del conjunto de la cubierta queda también limitada.

Su estabilidad depende de su anclaje a la cubierta por lo que, para su montaje, requiere también tirantes adicionales que, según su posición relativa, pueden quedar como permanentes.

Cuando son interiores, reciben el apoyo de la membrana, que suele ser continua, y tienen forma curva, recibiendo básicamente compresiones según su directriz (Fig. 7.41).

Si son exteriores, la membrana cuelga de ellos, y lo puede hacer también de un modo continuo, o por puntos (Fig. 7.42). En este caso pueden ser curvos o adintelados.

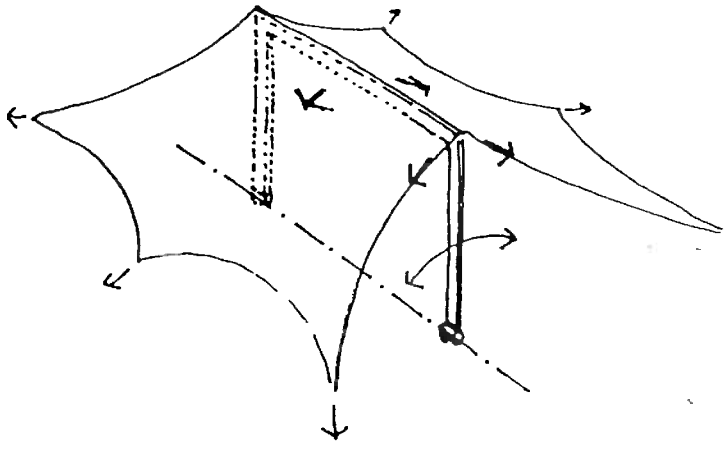


Figura 7.40. Pórtico interior articulado.

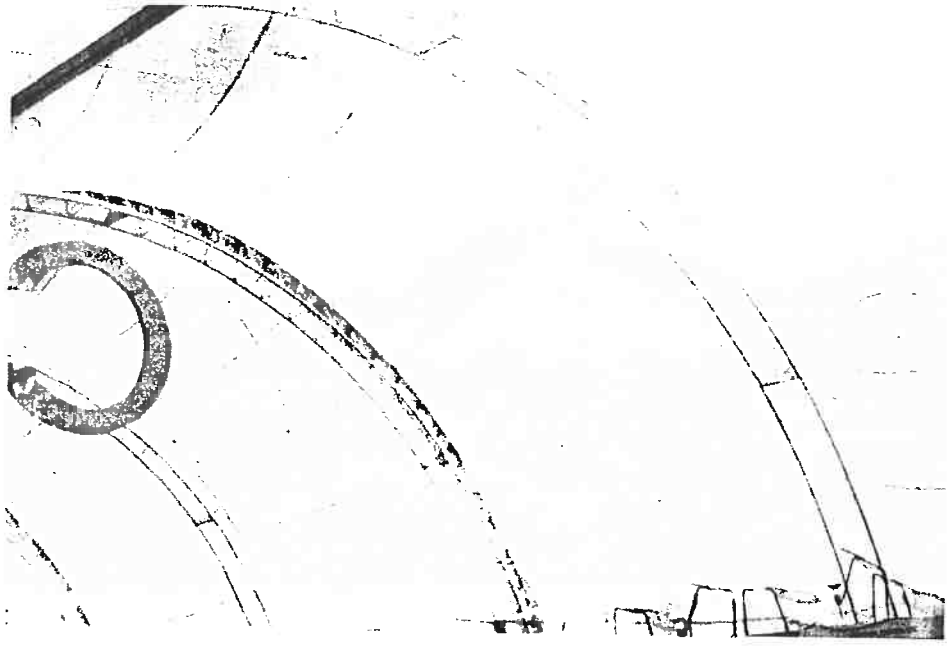


Figura 7.41. Pórtico interior en arco.

Si están situados en el borde, necesitan estar atirantados en el sentido contrario al del esfuerzo de la membrana (Fig. 7.43).

Constructivamente suelen resolverse mediante directriz triangulada de sección plana rectangular o en triángulo, y para casos de pequeñas dimensiones, pueden ser simplemente tubulares.

Sus apoyos son simples articulaciones mediante cartela y pasador u otra solución similar (Fig. 7.44).

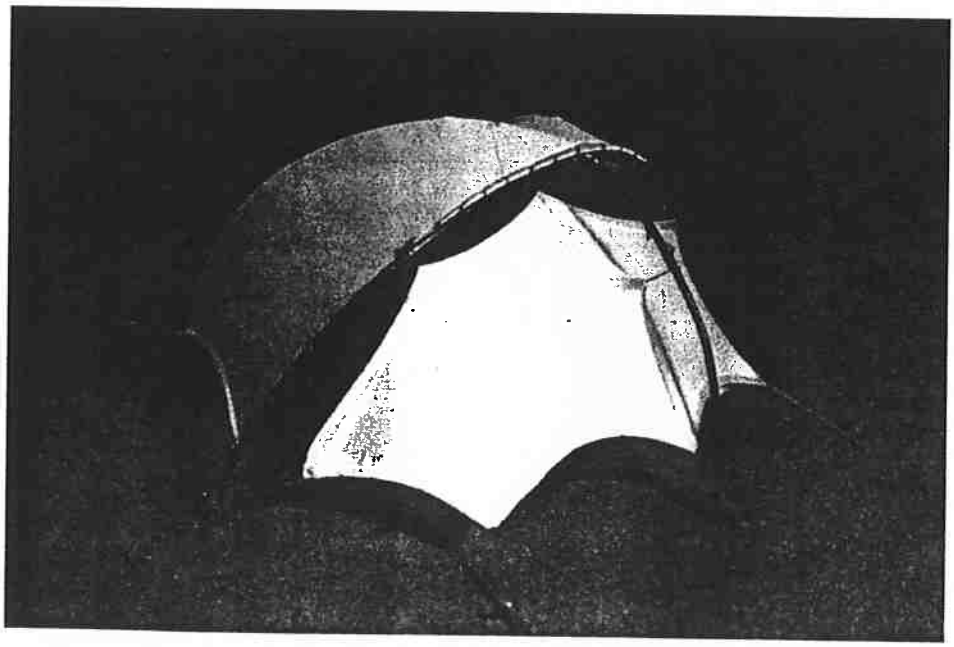


Figura 7.42. Pórtico de borde empotrado.

Figura 7.43. Pórtico articulado de borde.

Si se trata de *pórticos apuntados,* hacen el mismo papel que el mástil articulado (apoyo puntual), con giro alrededor de un solo eje. Pueden ser también interiores y exteriores, y en este segundo caso pueden recibir más de un anclaje (Fig. 7.45). Su construcción puede ser, de nuevo, triangular o de perfil tubular, al igual que los mástiles.

7.3.2.2. *Pórticos empotrados*

Resultan lo más parecido posible a una estructura fija a la que se ancla la cubierta. El funcionamiento estructural se basa en la resistencia de esfuerzos

Figura 7.44. Articulacion de base a portico.

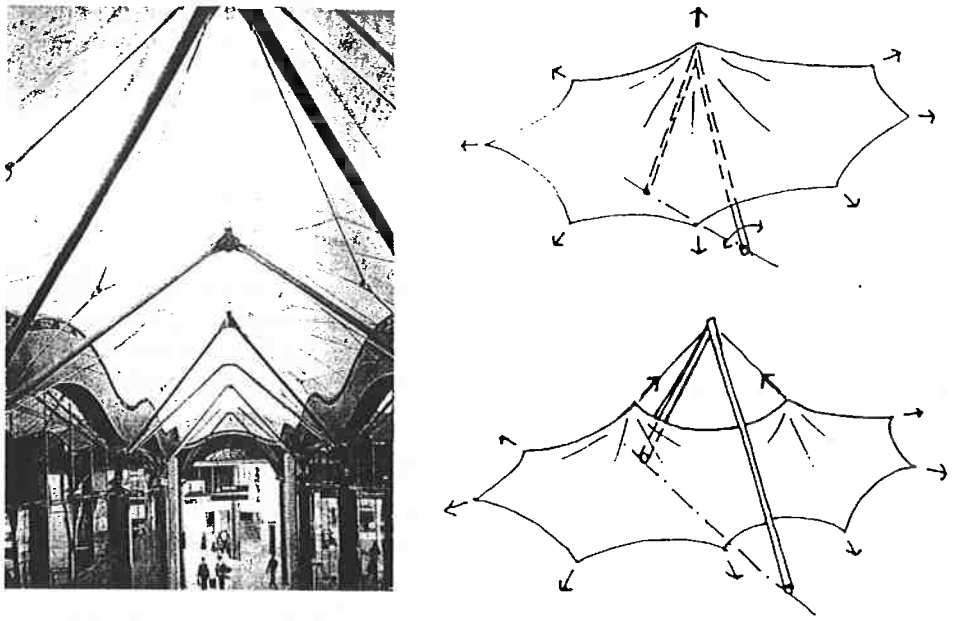


Figura 7.45. Pórticos apuntados.

de flexión, lo que permite eliminar los cables de atirantamiento. Ese esfuerzo, se resume, principalmente en la dirección perpendicular al plano del pórtico. Si es central, la resultante del esfuerzo es menor al quedar compensados ambos sentidos. Si es de borde, el esfuerzo final resulta mayor. En cualquier caso, los centrales deben calcularse teniendo en cuenta que en la fase de montaje pueden verse sometidos, temporalmente, a esfuerzos en un solo sentido.

En cuanto a su forma, situación y diseño constructivo, se repiten todas las variaciones mencionadas anteriormente, por lo que no vale la pena detenerse en ello.

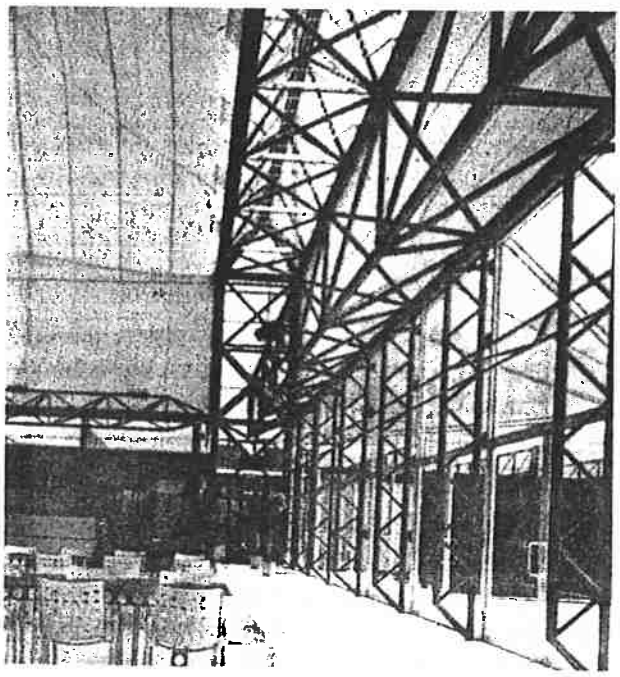


Figura 7.46. Pórtico adintelado empotrado.

En algunos casos, la sección triangulada del pórtico permite el aprovechamiento de su espesor para la entrada de luz y ventilación, anclando la membrana a ambos lados (Fig. 7.46).

Su anclaje al terreno se basa, naturalmente, en una cimentación resistente a la compresión y al vuelco según el giro previsto.

7.3.3. Trípodes

Una nueva solución para evitar a la vez el engorroso complejo de cables estabilizadores (tirantes) y los esfuerzos de flexión, es el de los trípodes. Consisten en estructuras de tres o más puntos de apoyo que permiten articular éstos en su base, estabilizando el conjunto de por sí y transmitiendo exclusivamente compresiones.

Podemos considerar varios tipos según su forma, que se pueden resumir en:

Trípodes o tetrápodos de barras rectas, que elevan un punto fijo al que se pueden sujetar uno o varios anclajes de la membrana, interiores o de borde (Fig. 7.47).

Arcos cruzados, con brazos curvos y apoyos articulados, incluso posible articulación en la clave, funcionando entonces como un arco de tres articulaciones con cuatro apoyos (Fig. 1.8).

La situación de estas estructuras auxiliares puede ser la triple de siempre (interior, exterior, de borde) pues en realidad lo que obtenemos es una estructura fija a la que anclar la membrana de nuestra cubierta.

7.3.4. Puntos fijos

Por último, dentro del sistema de las estructuras auxiliares cabe mencionar los puntos fijos, o anclajes directos de la tela a la estructura final a la que va anclada la cubierta, sea ésta el propio terreno o la estructura del edificio al que se une.

Dicho anclaje está basado en los cables y los enganches propiamente dichos.

Los cables ya los hemos analizado al hablar de los mástiles articulados en el punto 7.3.1.1., y sirva aquí todo lo allí mencionado, incluso los sistemas de regulación de la tensión, tanto directa (tensores) como automática (muelles y contrapesos).

Resta, pues, hablar de los enganches, lo que haré brevemente, por ser soluciones convencionales.

Estos, si son al terreno, consiste, normalmente, en cimentaciones que actúan por contrapeso y rozamiento, de las que sobresale alguna pieza metálica, más o menos sofisticada, que permite el anclaje del cable en cuestión (Fig. 7.48).

Si se trata de soluciones temporales, podemos recurrir a anclajes directos al terreno mediante rezones y piezas helicoidales que aumentan el rozamiento.

Si el enganche se realiza sobre una estructura existente, la solución está en las placas metálicas ancladas por diversos medios (pastillas embebidas, pernos mecánicos o químicos, abrazaderas, etc.) capaces de resistir la tracción que la membrana les introduce (Fig. 3.32). En algún caso, incluso, habrá que reforzar la estructura con tirantes o arriostramientos para asegurar su estabilidad.

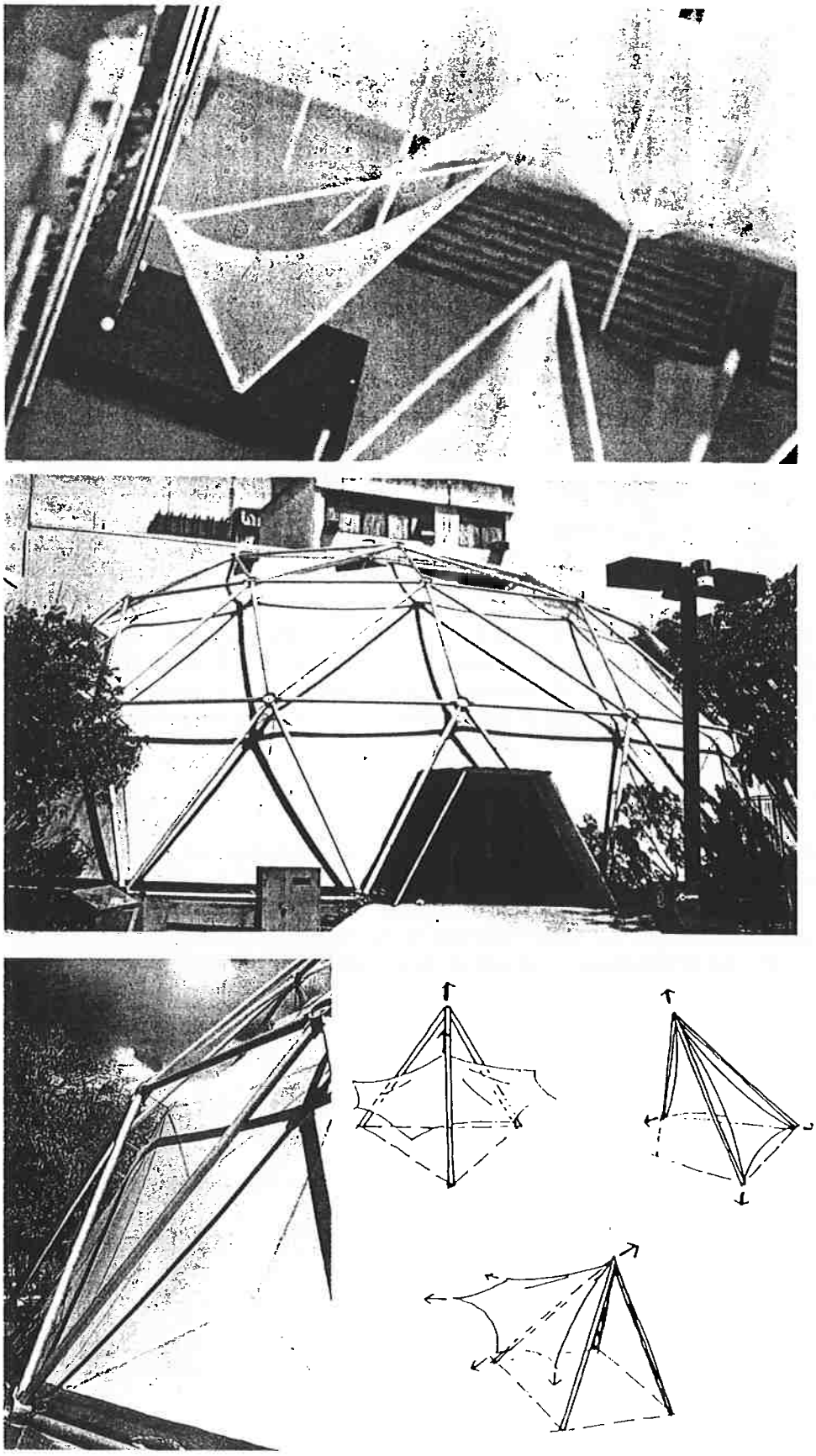


Figura 7.47. Trípodes de anclaje.

Figura 7.48. Anclaje a suelo por gravedad

Si el anclaje es lineal, estamos ante un problema similar, en cuanto al terreno o a la estructura, y la solución constructiva del enganche en sí, no difiere de lo ya comentado al hablar de relingas rígidas (punto 7.1.2) o anclajes exteriores lineales (punto 7.2.2) por lo que podemos remitirmos a lo comentado allí.

7.4. CABLES

Como quiera que resulta un elemento constructivo básico en la estructura auxiliar de las cubiertas textiles, no quiero dejar de mencionarlos, aunque al ser un material común en las construcciones flexibles y colgadas, en general, y, por tanto, no ser un tema exclusivo de la Arquitectura textil, será mejor recurrir a las publicaciones específicas mencionadas en la bibliografía.

Capítulo 8

Diseño y montaje

Hasta aquí hemos llevado a cabo un sucinto recorrido por los aspectos más importantes, tanto funcionales como constructivos, de la Arquitectura textil en su solución de «cubiertas colgadas». Debemos tratar, ahora, de resumir todos los conocimientos, en lo que sería el proceso constructivo de una de esas cubiertas, entendiendo como tal el conjunto de fases que van desde su concepción hasta su uso y mantenimiento.

Para ello podemos considerar tres etapas claras, a saber, DISEÑO, CONFECCION y MONTAJE, haciendo hincapié, sobre todo, en la de diseño.

8.1. DISEÑO

Enfrentarse con cualquier diseño arquitectónico requiere una base importante de conocimientos, tanto funcionales como técnicos. Ello nos permitirá, por una parte, dadas las necesidades arquitectónicas del problema concreto, establecer las funciones preferenciales que vayan a tener lugar y seleccionar los sistemas, elementos y materiales constructivos que mejor las satisfagan. Por otra, aplicar nuestro conocimiento técnico al diseño adecuado de dichos sistemas constructivos, para que el resultado arquitectónico final cumpla la triada vitrubiana, es decir, sea *duradero, útil* y *bello.*

En el caso de la Arquitectura textil, como quiera que, tanto la estabilidad de las membranas como su forma, dependen de su correcta solución técnica, este conocimiento, complementario del funcional, es totalmente imprescindible. También lo es en cualquier sistema constructivo de los tradicionalmente utilizados en Arquitectura, pero su experiencia y su historia facilitan su uso. Por el contrario, en esta nueva arquitectura, la tecnología viene de otros campos industriales y se presenta todavía algo ajena a los profesionales del sector, por lo que resulta necesario hacer hincapié en ella en estas primera etapas de su empleo.

Todo ello hace que en esta fase del proceso, las consideraciones tecnológicas deban ser fundamentales, es decir, concretamente, la curvatura anticlástica en todos sus puntos, y la posibilidad de una pretensión inicial que pueda introducir, tanto los esfuerzos hacia arriba, como los correspondientes hacia abajo.

En cualquier caso, podemos distinguir los siguientes pasos:

— Prediseño

— Confección de maquetas

— Cálculo

— Despiece de patrones

— Diseño de bordes y anclajes.

Veamos cada uno de ellos.

8.1.1. Prediseño

Antes de tratar de buscar las formas definitivas en la maqueta, debemos tener una idea aproximada de lo que queremos obtener, idea en la que deberían conjugarse, por un lado, las necesidades funcionales y, por otro, las técnicas relativas a la estabilidad.

Así, deberemos haber pensado en el *uso* que se le va a dar; si va a ser permanente o temporal, si abierto o cerrado (efecto sombrilla o efecto invernadero) si con gran altura libre o con poca, si muy diáfano en el interior o con posibles apoyos o anclajes, si va a ser exenta o va a estar adosada a otros edificios, etc. etc.

Por otra parte, debemos analizar su posible *aspecto* y pensar si debe tener formas llamativas o suaves, es decir, apoyos puntuales formando conoides, o apoyos continuos en forma de arcos; si queremos módulos repetitivos o, por el contrario, formas de las que hemos llamado orgánicas, etc., haciendo, por tanto, un recorrido mental a la tipología morfológica vista en el capítulo 2.

Asimismo, deberemos ir pensando en cómo vamos a introducir los *esfuerzos de pretensión* y cómo vamos a irlos transmitiendo hasta puntos fijos del terreno o de otras edificaciones, viendo las posibilidades de introducir mástiles para contrarrestar los esfuerzos hacia bajo o si, por el contrario, los vamos a absorber con cables colgados, o con arcos o pórticos apoyados. Lo mismo habrá que hacer con los esfuerzos hacia arriba y pensar en los posibles anclajes.

Todo ello puede hacerse a nivel de croquis (Fig. 8.1) como preparación para ir dando pasos definitivos.

8.1.2. Maquetas

Llegamos aquí a la herramienta clave del proceso de diseño en Arquitectura textil, por lo que considero necesario un análisis con cierto detalle.

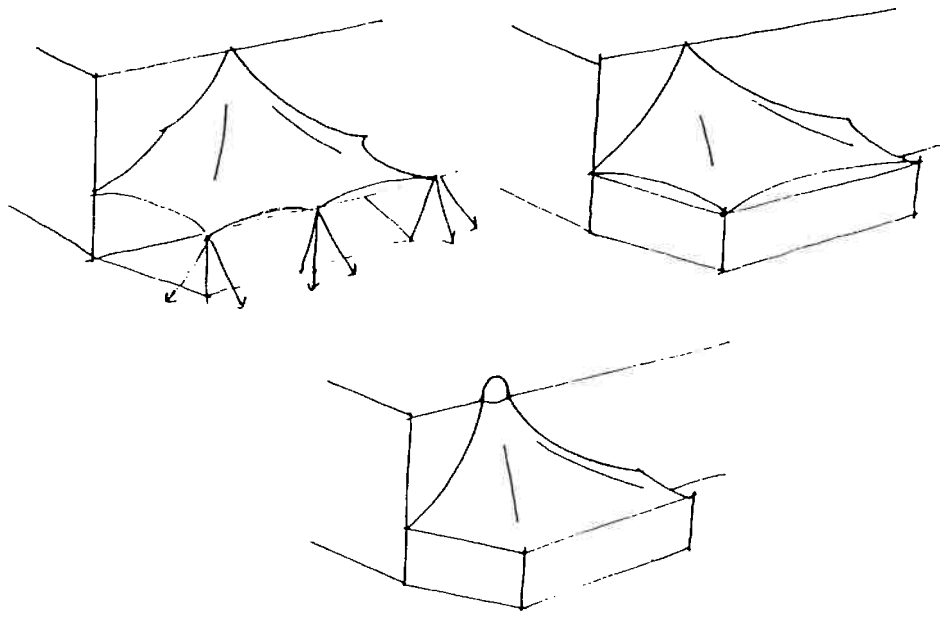


Figura 8.1. Croquis previo.

8.1.2.1. Operatividad

Hasta la puesta en funcionamiento de los sistemas de diseño asistido por ordenador, la única posibilidad de poder apreciar los volúmenes y formas de un objeto desde otros puntos de vista que no fuesen los planos, eran las perspectivas o las maquetas, y aun aquéllas eran útiles sólo cuando las formas eran sencillas. Cuando se trata de curvaturas anticlásticas, el mejor dibujo es siempre menos claro que la peor maqueta. Así pues, incluso los gráficos que se pueden obtener con un programa «C.A.D.» resultan insuficientes para la buena comprensión de una cubierta tensada.

Cuando se trata de estudiar diversas soluciones formales y volumétricas hasta dar con la que mejor cumple las expectativas, se precisa una gran agilidad, no sólo de visualización, sino, sobre todo, de variación de dichas formas, y para eso, los programas «C.A.D.» fácilmente asequibles en el mercado, resultan todavía insuficientes.

Sin embargo, las maquetas resueltas con materiales elásticos nos ofrecen esta herramienta, suficientemente flexible y ágil como para ir variando formas y volúmenes así como sistemas de apoyo y anclaje. Al mismo tiempo, confeccionadas a escala conveniente, son útiles también, como ya se ha indicado, para el despiece y la definición de patrones, así como para ser utilizadas como objeto representativo de la solución alcanzada, fin primordial de las maquetas en los proyectos con sistemas constructivos tradicionales.

Para todo ello, es necesario utilizar los materiales adecuados e ir dando los pasos con secuencia correcta.

8.1.2.2. Materiales

El material a utilizar para reflejar la membrana de la cubierta textil es la base de la maqueta, ya que nos debe permitir alcanzar las superficies anticlásticas necesarias para su estabilización. Por ello, debemos utilizar un material con la elasticidad suficiente como para reproducir el proceso de obtención de formas estabilizadas que seguíamos al analizar la tipología formal en el capítulo 2, por el método que hemos llamado de la «vía tensional». En realidad, es lo más parecido posible a los sistemas de generación de formas estabilizadas de los programas de cálculo de ordenador por «masa mínima» y equilibrio de fuerzas, que mencionaré más adelante.

En efecto, si conseguimos una membrana de gran elasticidad ($\geq$ 1.000 %) podremos introducir deformaciones en planos perpendiculares a su superficie con relativa facilidad. Al recibir dicha deformación, la propia membrana tiende a recuperar su situación inicial, provocando mayor esfuerzo de reacción en los puntos que han sufrido mayor deformación, y haciéndolo en todos los sentidos alrededor de cada punto.

Al ocurrir este fenómeno, la propia membrana elástica genera las formas anticlásticas correspondientes a su situación geométrica de estabilización tensional. Es decir, la deformación provoca una reacción en la membrana que genera una serie de tensiones hasta alcanzar el equilibrio de fuerzas. En realidad, se han creado unas pretensiones que mantienen estable la membrana, obligándola a adoptar las curvaturas anticlásticas en su superficie que son consecuencia de las tensiones en sentidos y planos opuestos para cada punto de la superficie, que hacen que los mismos se mantengan estables, incluso ante nuevas

acciones exteriores. Esta es, precisamente, la situación de equilibrio que nosotros queremos para nuestra cubierta.

Dos son los tipoos de materiales que tenemos en el mercado de fácil adquisición para reflejar esa situación tensional: los tejidos elásticos y las membranas de goma.

En cuanto a los *tejidos elásticos*, existe una cierta variedad en el mercado, aunque sus características elásticas no sean exactamente iguales. En todo caso, lo importante es que presenten igual elasticidad en la dos direcciones del tejido, lo que elimina a muchos de ellos.

En realidad, los más útiles son aquellos confeccionados con hilos a base de cordones de caucho recubiertos (enrollados) con fibra sintética. Concretamente estoy hablando del tejido tipo «lycra», con dos variantes más comúnmente empleadas. Por un lado, las mallas ligeras utilizadas en la confección de medias de señora, muy adecuadas para las primeras pruebas, por su ligereza y su transparencia. Por otro, el empleado para prendas de vestir ajustadas, de similares características al anterior, pero de más consistencia, por lo que resulta más útil para las maquetas definitivas y con mayor tamaño (Fig. 8.2).

En cuanto a las *membranas de goma,* se requiere que sean de muy poco espesor para su facilidad de manejo, y las más adecuadas suelen ser las de caucho, similares a las que se utilizan para los globos de los niños, variando su espesor en función del tamaño y escala de la maqueta.

Es importante tener en cuenta que las membranas de caucho tienen una reacción elástica más importante que la que puedan presentar los tejidos mencionados antes, por su propia constitución, por lo que su trabajabilidad resulta considerablemente disminuida.

Por otra parte, en el proceso de selección de posibles formas, nos vemos obligados a sujetar la membrana por diversos puntos y tirar de ella, lo que puede producir fácilmente desgarros en el caucho, que no se suelen presentar

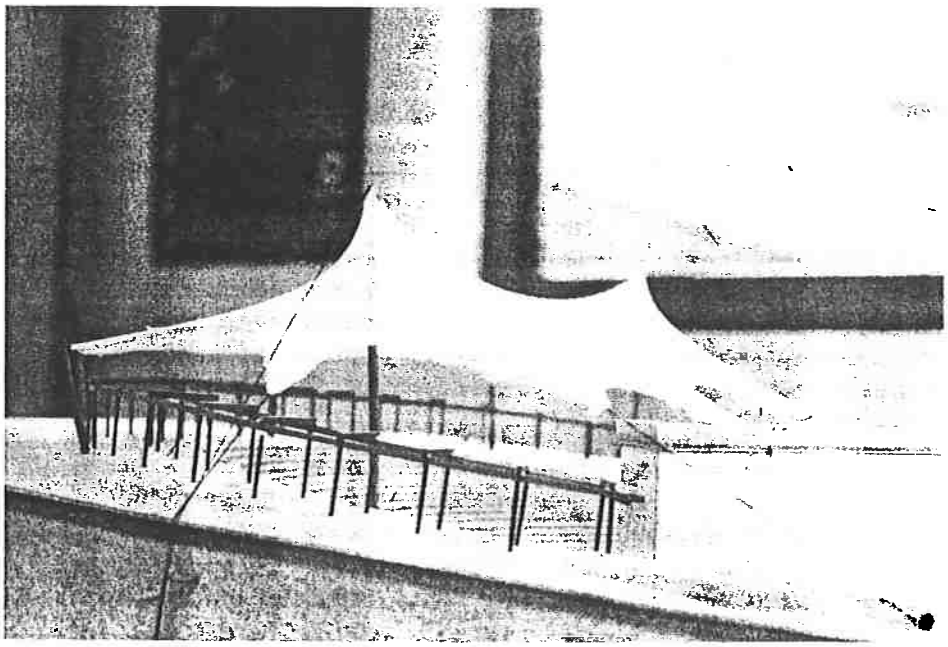


Figura 8.2. Maquetas de estudio.

en los tejidos anteriores por su propia factura. Todo ello hace que la preferencia esté en estos últimos, sobre todo en la fase de estudio, por la facilidad general del manejo. Para la fase final de presentación y de estudio de patrones, la goma se muestra, a veces, más adecuada.

Es importante, también, tener en consideración la elasticidad del material que estemos manejando para saber el nivel de deformación que le podamos infligir y, por tanto, la respuesta elástica que nos vaya a dar. En efecto, debemos procurar que la deformación produzca tensiones similares en toda la superficie, ya que acciones de distinta intensidad nos darán deformaciones diferentes, que pueden no responder a la ley de equilibrio de fuerzas. De hecho, si una zona resulta más tensada que otra, la curvatura tenderá a ser menor (mayor radio de curvatura) que la menos tensada. En cuanto variemos la tensión, comprobaremos que varía el radio de curvatura y, sin embargo, la superficie cubierta sigue siendo la misma, aunque sí haya variado la superficie de la membrana.

En la realidad, a excepción hecha de las membranas fotoelásticas, de difícil manejo, no disponemos de medios precisos para comprobar la elasticidad de la membrana sobre la que estamos trabajando, y sólo lo podremos percibir en función de su transparencia. En efecto, a mayor tensión, mayor será también dicha transparencia. En la goma, porque al estirarse disminuye su espesor. En el tejido, porque se abren más los espacios de la trama.

Cuando nos aparezca una diferencia de tensiones importante, debemos procurar corregirla, normalmente a base de aumentar la tensión en las zonas más relajadas, reduciendo la cantidad de tela en las mismas.

Al alcanzar una forma más o menos definitiva, debemos procurar que la tensión en la membrana sea relativamente intensa para conseguir dos objetivos. Por una parte, que la membrana de la maqueta, resulte lo más estable posible (a mayor tensión, mayor estabilidad). Por otra, que la superficie final tenga unos radios de curvatura razonables (no muy pequeños) para que, en la situación real, la precisión del despiece sea mayor. Por ello, para la maqueta final, será más recomendable la membrana de caucho o el tejido de más consistencia. (Fig. 8.3).

8.1.2.3. Proceso

Por todo lo anterior, y por la importancia que puede tener la maqueta, tanto en la obtención de la forma definitiva, como en el cálculo de tensiones y en el diseño de patrones, resulta fundamental cuidar mucho su ejecución. De ahí que debamos detenernos algo en los pasos a dar para su confección.

Para ello, entiendo que lo mejor será describir la propia experiencia.

El *primer paso* (Fig. 8.4) es, naturalmente, reproducir la ubicación de la futura cubierta, tanto si ésta se apoya en una estructura o edificio ya existente (se reproducen éstos) como si se trata de un emplazamiento libre. En este último caso, habrá que representar los elementos arquitectónicos y paisajísticos del entorno inmediato, que puedan influir en el diseño funcional y formal de la cubierta.

Como quedó dicho más arriba, la escala a elegir estará en función del tamaño real y de las posibilidades de trabajo previo. Ya dijimos que cuanto mayor sea la escala, más fiable será la maqueta como herramienta de diseño. No obstante, hay ocasiones en que las dificultades de tamaño o de espacio, hacen

Figura 8.3. Maqueta de presentación.

aconsejable la elección de una escala más reducida en este primer paso (1/100) para alcanzar la forma del conjunto, y el cambio a una escala mayor en el siguiente paso, bien para reproducir toda la cubierta, bien para hacerlo de uno de sus módulos o partes, en caso de que sea susceptible de división o modulación.

El *segundo paso* (Fig. 8.5) será el uso de esta maqueta para buscar la forma a base de aplicar trozos de tejido, estudiando la variedad morfológica que nos permite cumplir las exigencias funcionales y formales planteadas.

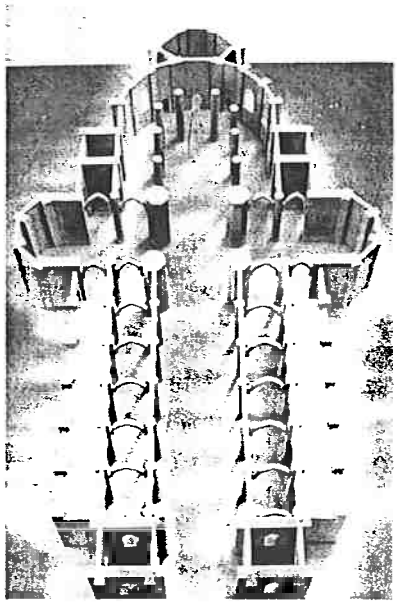


Figura 8.4. Maqueta base.

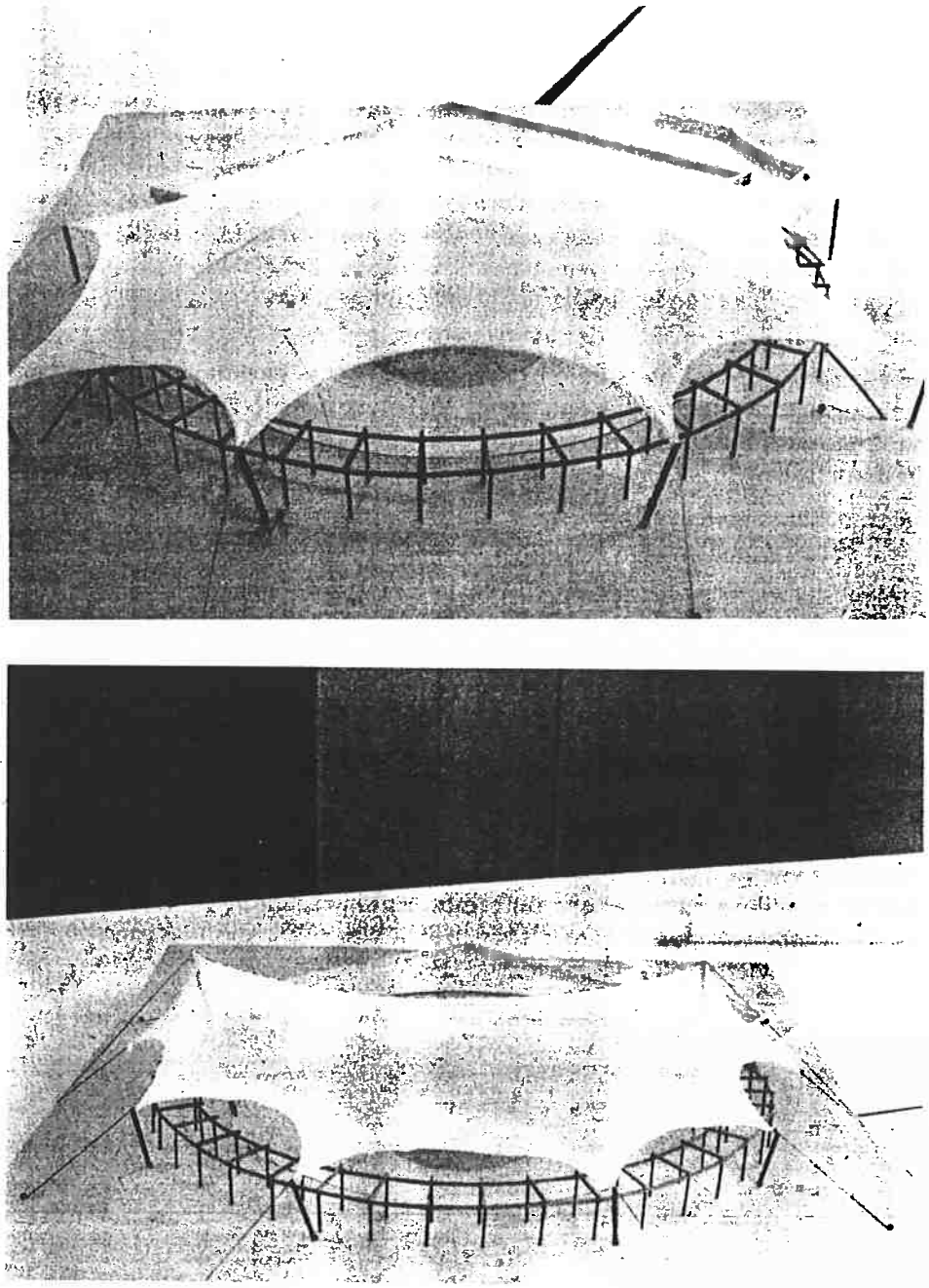


Figura 8.5. Variaciones sobre maqueta.

Naturalmente, partiremos de las ideas establecidas en la etapa que hemos llamado de «prediseño», tratando de agotar todas las posibilidades formales a nuestro alcance. Ello implicará distintos tipos de estructuras soporte y de anclaje que iremos probando, y aceptando o rechazando.

Para ello, y con objeto de facilitar el trabajo, podremos utilizar diversos materiales: varillas de madera para construir mástiles de todas dimensiones, cortándolas a la medida necesaria; alambre maleable de 2 ó 3 milímetros de sección, para reproducir arcos y pórticos de apoyo; hilo y aguja para formar cables de cuelgue o de anclaje (lo que nos facilita el materializar los anclajes) y, en general, cualquier objeto que nos permita reproducir fácilmente los es-

fuerzos hacia arriba y hacia abajo que, convenientemente introducidos, le confieran al tejido de la maqueta las formas anticlásticas que buscamos.

De hecho, aunque partamos de una idea formal más o menos preconcebida, esta fase nos permite recorrer un número elevado de formas que cumplen las exigencias funcionales y que nos facilitan la elección con cierta holgura. Lo importante es que, cuando lleguemos a esa elección, tengamos la seguridad de haber analizado todas (o casi todas) las posibilidades formales. Sólo entonces daremos el paso siguiente. En este paso, y con estas necesidades, es donde resulta favorable el uso de tejidos de malla muy sutiles y elásticos, que facilitan su manejo.

El *tercer paso* (Fig. 8.6) consistirá en reproducir la forma elegida de un modo más definitivo y resistente, y a una escala mayor, si cabe (mínimo de 1/50) para que pueda ser utilizada la maqueta como posible base de cálculo y de diseño de patrones.

Para ello, deberemos tener en cuenta los dos aspectos mencionados más arriba, como condicionantes de la fiabilidad de la «herramienta», a saber.

Por un lado, la *uniformidad tensional*, que permita reproducir las formas anticlásticas más adecuadas, correspondientes a un equilibrio real de fuerzas en la membrana.

Por otro, la *mayor consistencia* de la membrana, que permita la toma de medidas directas a escala, o el dibujo sobre ella, con la máxima precisión posible.

Entonces resulta más recomendable la lámina de caucho o el tejido más consistente. En cualquier caso, no debemos «tener prisa» en esta etapa, y realizar pruebas sucesivas hasta, asegurarnos de que la forma alcanzada es la más adecuada al equilibrio tensional que buscamos. Entonces tendremos la maqueta, parcial o total, adecuada para las siguientes etapas de diseño, concretamente el cálculo y el diseño de patrones.

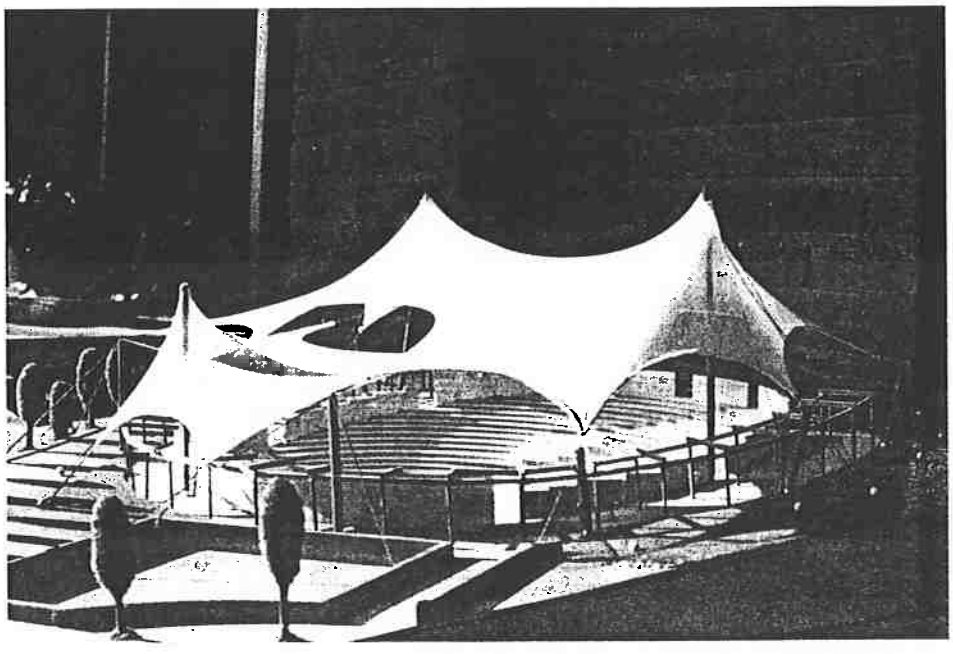


Figura 8.6. Solución adoptada.

En el caso de las maquetas de tejido, una vez alcanzada la forma se puede proceder a una «rigidización». Lo podemos hacer a base de aerosoles. Primero, una laca de pelo que le da cierta consistencia: después, una pintura proyectada, más o menos dura, hasta obtener la rigidez deseada.

8.1.3. Cálculo de tensiones

Una vez que hayamos alcanzado la forma definitiva que nos satisface, tanto desde el punto de vista funcional como formal, el siguiente paso en el proceso de diseño será comprobar su estado tensional. Con ello perseguiremos varios objetivos.

En primer lugar, confirmar la forma elegida o, por el contrario, entrar en un proceso de revisión, en caso de que nos aparezcan concentraciones excesivas de tensiones, que dificulten o encarezcan excesivamente la ejecución de la cubierta, o, por el contrario, zonas de desaparición de tracciones, que hagan peligrar la estabilidad del conjunto y produzcan arrugas no deseadas.

En segundo lugar, conocer las pretensiones necesarias para conseguir la estabilidad de la cubierta, incluso ante los esfuerzos exteriores.

En tercer lugar, saber el valor de las tensiones de servicio en todos los puntos de la cubierta (por lo menos en los de unión con la estructura soporte) para poder dimensionar la membrana, tanto en lo que se refiere a su confección (tela, uniones y bordes) como en su sistema de anclaje, como, por último, conocer los esfuerzos que la cubierta transmite a la estructura que la soporta, con el fin de poderla dimensionar o, en caso de que ya exista, comprobar su adecuación.

Para todo ello, los especialistas en el tema han diseñado una serie de herramientas (programas de ordenador) relativamente complejas, en cuya descripción y justificación no vamos a entrar, por considerarlo muy específico del ámbito del cálculo y, por lo tanto, algo ajeno a este trabajo de introducción al tema. No obstante, sí considero necesario mencionar los fundamentos generales en los que se basan dichos programas y hacer mención a las consideraciones básicas para el cálculo de estas estructuras.

Previo a ello veamos cuáles son las acciones exteriores a considerar en nuestro cálculo, una vez que hayamos introducido las pretensiones de estabilización inicial.

8.1.3.1. Acciones exteriores

Una vez que hayamos conseguido la situación tensional de equilibrio, debemos tener en cuenta que, en la realidad, la cubierta va a estar sometida, además de a las pretensiones, a las acciones exteriores, en este caso, la *nieve*, como carga vertical, y el *viento*, como carga horizontal. El conjunto de dichas cargas, tomado como acción exterior (P) tiene que quedar equilibrado por las tensiones de estabilización. Entonces volvemos a la fórmula original vista en el capítulo 3.

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R^2} = P$$

Lógicamente, ello nos puede variar las pretensiones de estabilización introducidas en la fase de reposo, aumentando o disminuyendo unas u otras.

El objetivo final, en cualquier caso, es que, supuesta la situación más desfavorable, se mantenga el equilibrio y, además, no exista el peligro de que aparezcan compresiones en ningún punto, en ninguna de sus direcciones principales.

Veamos, someramente, las acciones y reacciones que producen estas cargas.

La nieve constituye una carga vertical, perfectamente definida en la Norma NBE-MV-101, que afecta, sobre todo, en las zonas frías y a las partes horizontales de la superficie de cubierta, introduciendo una mayor tensión en la tela y sus anclajes y apoyos. Habrá que comprobar, por tanto, que la tensión en la tela no sobrepase la máxima admisible, así como en sus bordes (relinga y puños) donde, como sabemos, se concentra (casos se han dado en los que la acumulación de nieve ha producido el rasgado a partir de puños mal diseñados).

Dado que al buscar curvatura y tensión en la tela se obtienen formas con inclinaciones importantes, la acumulación de la nieve no es tan fácil. No obstante es posible, por lo que habrá que considerarla en todas aquellas partes de la tela con pendiente inferior a 45° (100 %) por lo menos.

El viento introduce un estado de cargas mucho más complejo. También la Norma NBE-MV-101 nos da la presión que supone el viento según la zona climática, el nivel de exposición y la inclinación de la superficie de la cubierta. No obstante, cuando ésta tiene formas geométricas complejas y, sobre todo, cuando es deformable ante el viento, el conocimiento del estado tensional debido a esta carga es más complejo. En estos casos, se convierte, de hecho, en la carga más importante, y el cálculo tensional gira alrededor del viento. Sin afán de entrar en el análisis matemático de este estado tensional, sí podemos realizar una primera aproximación al comportamiento de estas cubiertas de tela ante el agente viento, lo que nos puede dar las pautas para vislumbrar la solución estructural de cada caso concreto.

Aunque ya hemos adelantado algo al hablar de los fundamentos tecnológicos, recordemos que el viento es una corriente básicamente horizontal que, al chocar con un obstáculo, en este caso la tela de cubierta, se transforma en una presión o succión perpendicular a la superficie de la misma y uniforme en todos los puntos de igual geometría. Podemos considerar que la succión comienza a partir de una inclinación próxima a los 45° (Fig. 8.7) por lo que en un principio, y amén de los cambios de dirección y remolinos que puedan producirse como consecuencia de diversos obstáculos o de la propia geometría de la cubierta, podremos conocer con relativa facilidad el estado de las cargas producidas por el viento. En cualquier caso, y para un conocimiento más

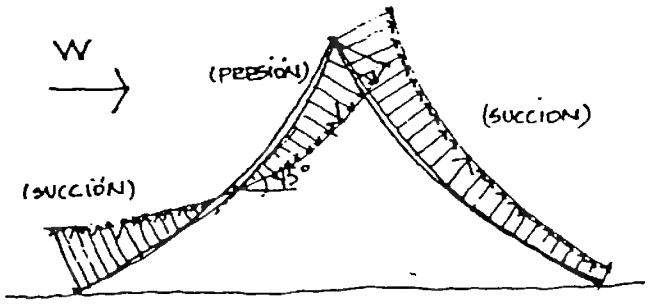


Figura 8.7. Efectos del viento en una sección de conoide.

preciso, podremos recurrir a ensayar una maqueta de la solución a escala en un túnel de viento. Es un recurso muy utilizado, sobre todo en el estudio de grandes cubiertas textiles.

Los diferentes esfuerzos producidos por el viento en un momento determinado (el inicial) deberán ser absorbidos por la cubierta, iniciándose su estado tensional. En este caso, y dadas las características elásticas del material (la tela) la absorción del esfuerzo se realiza en dos pasos sucesivos; se produce, en primer lugar, una deformación de la superficie, tanto dentro de su geometría como fuera de ella, es decir, alargándose hasta reducir la tensión a una nueva de equilibrio, por una parte, y cambiando su geometría hasta adquirir otra forma que recibe una carga distinta, por otra (Fig. 8.8). Una vez deformada la superficie a una nueva geometría, que podríamos llamar «de equilibrio», si sigue habiendo aumento de la tensión, ésta debe ser absorbida por la capacidad mecánica (resistente a la tracción) del propio material (la tela) que lo hará hasta alcanzar la de rotura.

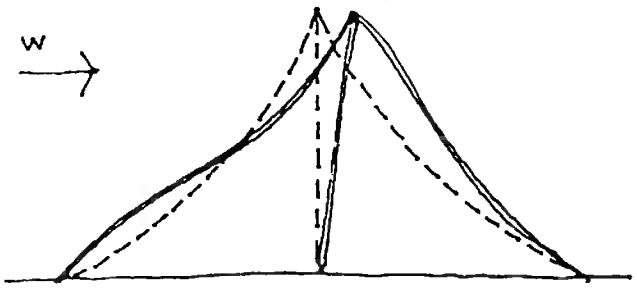


Figura 8.8. Deformación de equilibrio ante viento.

Ante esta previsión de actuación, en el diseño, además de dimensionar la tela y todos los anclajes para que sean capaces de absorber las tensiones que puedan alcanzarse en este segundo paso, al igual que hacíamos ante la carga de nieve, deberemos pensar en la posibilidad de deformación de la cubierta para que se adapte, en el primer paso, a la forma que hemos llamado «de equilibrio». Para ello, podemos jugar con la propia tela y su coeficiente de alargamiento que, como hemos visto, varía alrededor del 20 %. Pero ésto puede no ser suficiente, por lo que tendremos que recurrir a otros mecanismos de los que ya se ha hablado en el apartado anterior y que permiten moverse a los apoyos y anclajes. Concretamente, tenemos, por una parte, la articulación en rótula de las bases de los mástiles de apoyos centrales elevados, sean puntuales o lineales; por otra parte, los muelles y contrapesos en anclajes que deberán dimensionarse de acuerdo con la deformabilidad necesaria y la tensión esperada. Asimismo, estos mecanismos nos permitirán mantener la tensión mínima necesaria en la tela para su estabilidad, frente a cambios de signo en la presión del viento (de presión o succión) estabilidad, como sabemos, necesaria para el conjunto de la cubierta y para la no aparición de arrugas.

En definitiva, pues, la solución estructural que alcancemos, que incluye sistemas de apoyo y anclaje, deberá estar en consonancia, no sólo con el estado de cargas y tensiones previsibles, sino también con la solución formal.

8.1.3.2. Programas de cálculo. Fundamentos

Una vez alcanzada la solución formal y establecidos los considerados mencionados hasta aquí, debemos acometer el cálculo de las tensiones que se generan en cada punto de la cubierta y, por tanto, los que se transmitan a los puntos de apoyo y anclaje. Para ello, como hemos venido comentando, debemos recurrir a programas de ordenador específicos.

Por el alcance de este trabajo no voy a entrar en su descripción, sino en una simple enumeración de sus fundamentos y de las variantes actuales. En todas ellas, los pasos a dar serán esquemáticamente:

1. Definir la geometría inicial de la cubierta.

2. Calcular las tensiones que se generan, tanto por esfuerzos de pretensión, como por acciones externas, en membrana y anclajes.

3. Definir la geometría final y diseñar los patrones.

Los dos primeros pasos deben seguir un proceso iterativo a fin de obtener forma y tensiones por sucesivas aproximaciones, hasta alcanzar la situación de equilibrio; equilibrio que nunca puede ser definitivo, dado el carácter deformable de la membrana y variable de las acciones externas. Por ello se tiende a crear un estado tensional de equilibrio «en reposo», sólo con los esfuerzos de pretensión, que sea capaz de enfrentarse a las acciones exteriores más desfavorables sin perder la situación tensional de estabilidad.

Para todo este proceso iterativo que persigue la forma final estable, es fundamental introducir en el programa las características elásticas de la tela, es decir, su deformabilidad (módulo de elasticidad, módulo de deformación y rigidez) teniendo en cuenta la variación de dicha deformabilidad en las líneas reforzadas por cables (relingas, líneas de cuelgue interiores, etc.) en las uniones de posibles patrones, sobre todo cuando dichas uniones quedan muy próximas, y en refuerzos de tela en puños y bordes. Asimismo, los anclajes lineales fijos son líneas de máxima rigidez que también deben considerarse.

Para seguir este proceso iterativo, se están utilizando, básicamente, dos sistemas. El más antiguo, basado en una malla de barras (ortogonal, primero y triangular, después) en las que se resume la tela. Se trata de una malla en la que definimos los bordes y los puntos interiores fijos (apoyos de mástiles, puntos de cuelgue, etc.) con coordenadas, dando a cada barra las características elásticas correspondientes a la superficie de tela que representa. Al introducir los esfuerzos de pretensión a través de los puntos de anclaje, la malla se va deformando, y por el proceso iterativo (por ejemplo del tipo Newton-Raphson) se llega a la geometría de equilibrio. En función del número de barras (proximidad entre ellas) y del número de veces que repitamos la operación, el equilibrio final será más preciso, aunque es inevitable que nos queden esfuerzos residuales, normalmente despreciables.

A continuación se le aplican las acciones exteriores directamente sobre los nudos, con los que la membrana se deforma de nuevo. Se sigue el mismo método iterativo hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio tensional y, por tanto, formal, procurando que no aparezcan zonas demasiado planas y, sobre todo, bolsas ante sobrecargas de nieve, lo que podría introducir peligro funcional y estructural.

La deformación de la malla, hasta alcanzar la situación de equilibrio, se obtiene por el método elaborado por Schek en 1974, denominado de la «densidad de fuerzas», en el que las ecuaciones de equilibrio buscan éste en cada nudo

de la malla, considerando la densidad de fuerzas de cada barra como el cociente entre el esfuerzo axial y la longitud de la misma. La figura 8.9 muestra los resultados gráficos del proceso seguido con la maqueta de la figura 8.6.

El otro sistema más moderno consiste en descomponer la superficie en elementos finitos, que pueden ser cuadrangulares o triangulares, acompañados, o no, de otros lineales en forma de barras que constituyen una malla en los bordes de los cuadrados o triángulos.

A estos elementos finitos se les aplican las características elásticas de la tela y se procede al mismo proceso iterativo mencionado antes, en la dos etapas correspondientes al equilibrio inicial (sólo pretensiones) y al final, con acciones exteriores, hasta conseguir la forma definitiva.

En cualquier caso, tanto si se utilizan modelos de barras como de elementos finitos superficiales, es necesario que la formulación utilizada en el desarrollo de los elementos tenga en cuenta la no linealidad de tipo geométrico. Esto se traduce en la formulación matricial en la aparición de unas matrices de tensiones iniciales y de grandes desplazamientos, descritas en la literatura especializada (*).

Tanto las pretensiones como las acciones exteriores, se introducen desde los mismos puntos en ambos sistemas y parece razonable considerar este segundo sistema como más fiable, ya que los elementos finitos superficiales resultan más representativos de la membrana que los lineales de la malla de barras, mientras que los elementos finitos lineales complementarios pueden ser representativos de todos los elementos lineales más rígidos (uniones, relingas, refuerzos, etc.)

En definitiva, con estos pasos o cualquier otro proceso de cálculo, las tensiones de tracción o compresión en soportes y anclajes nos darán las dimensiones resistentes necesarias, tanto de los mástiles (a compresión) como de los cables y anclajes (a tracción). En cuanto a la tela, la tensión previsible nos determinará su resistencia, lo mismo que la de las relingas. En estos casos, es importante considerar la concentración de tensiones en puños y cambios de superficies, vistas en apartados anteriores. Esta concentración exigirá mayor sección en esas zonas, lo que se puede resolver fácilmente mediante refuerzos sucesivos (Fig. 8.10) de un modo similar a como se resuelve en las velas de navegación. Sin embargo, no parece que ésta sea una práctica muy común en la Arquitectura textil, por lo menos hasta el momento, lo que puede deberse a los problemas de confección que implica en superficies tan grandes. El avance de la tecnología puede ir resolviendo este problema. Mientras, al no poder realizar este refuerzo adicional, no queda más remedio que utilizar una tela que sea capaz de resistir la tensión de los puntos más conflictivos, lo que implica una infrautilización en el resto de la superficie, donde la tensión será siempre menor.

8.2. CONFECCION DE LA MEMBRANA

Dentro del proceso constructivo general, después de la etapa de diseño, entramos en la de ejecución. Según quedó mencionado en el capítulo 5, por estar

(*) — PRZEMIENCKI, S. J., *Theory of Matrix Structural Analysis*, Mac. Graw Hill - 1968.
— ZIENKIEWICZ, O. C., *El método de elementos finitos*, Ed. Reverte - 1980.

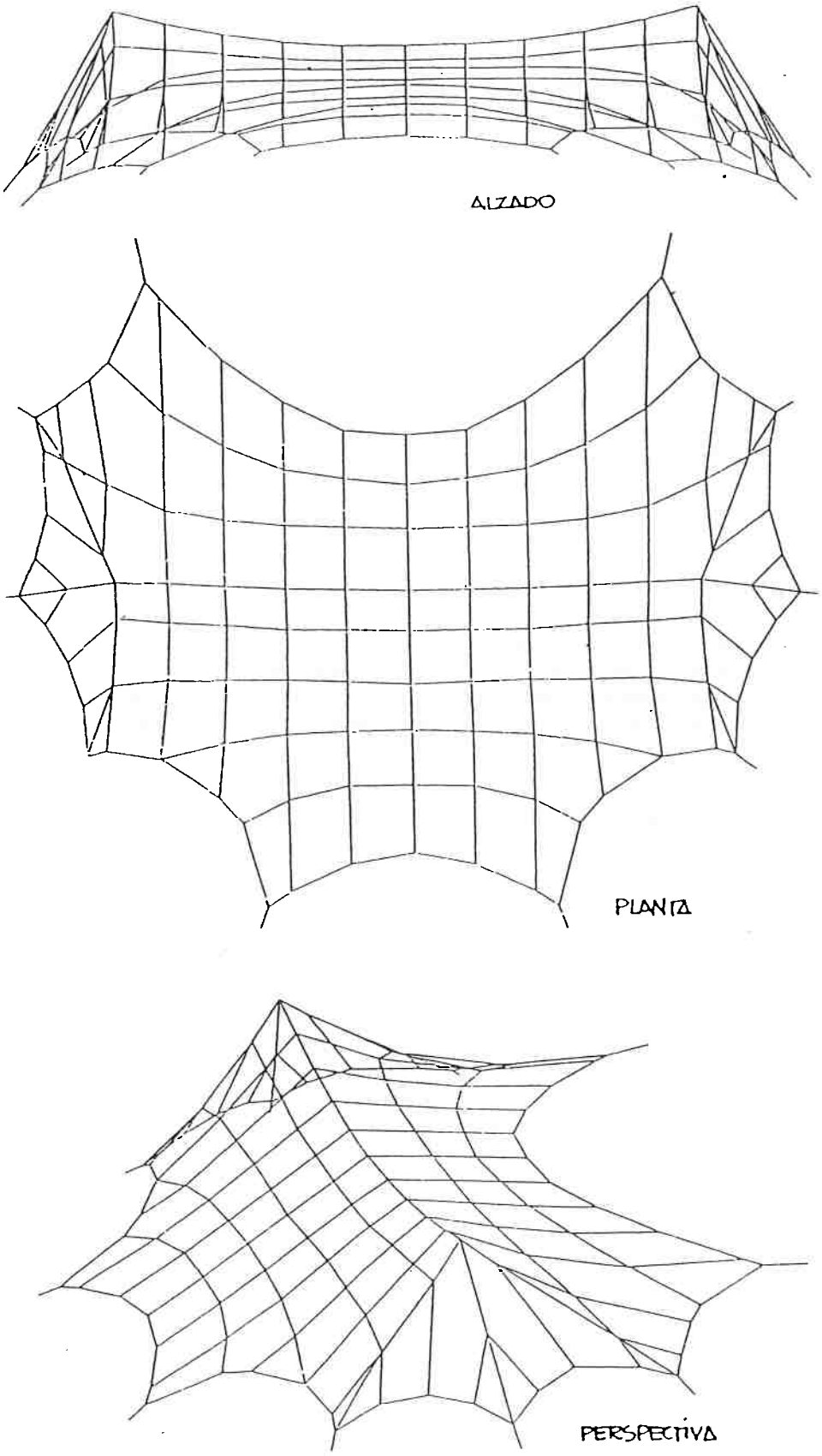


Figura 8.9. Estudio previo de tensiones con descomposición en malla de barras ortogonales, por F. Serig.

en el mundo textil hablaremos de «confección» en lugar de ejecución. En realidad, la confección estará constituida, como sabemos, por dos fases.

— Diseño y corte de patrones.

— Unión de patrones y realización de bordes.

Una vez «prefabricada» la cubierta, o sus partes, procederemos a su montaje, normalmente con sucesivas «pruebas».

8.2.1. Diseño y corte de patrones

En el capítulo 6 han quedado vistos los distintos procedimientos posibles para la definición del despiece y el diseño de los patrones.

También vimos la importancia que tiene la disposición de los mismos sobre la banda de la bobina, a los efectos de transmitir los esfuerzos a lo largo de las direcciones de trama y urdimbre.

Una vez marcados sobre la tela, su corte se suele realizar con máquinas especiales programadas por ordenador, o por métodos manuales a base de tijera o cuchilla, siguiendo las líneas marcada mediante reglas lineales elásticas que nos permiten definir las curvas integrales que recogen los puntos medidos.

8.2.2. Unión de patrones y realización de bordes

También en el capítulo 5 quedaron definidos los distintos tipos de juntas entre patrones y en el capítulo 6 hablamos de la ejecución de los bordes. De este modo la cubierta queda predefinida y lista para su montaje.

Cuando sea posible su descomposición en partes, bien por su tamaño y dificultad de movilización, bien por el propio diseño de estructura soporte y membrana, queda por especificar los bordes que servirán de unión de las membranas.

Normalmente la unión entre los distintos módulos se realiza mediante un elemento estructural intermedio, sea rígido, sea flexible (Fig. 1.9). No obstante, también se dan casos de lo que hemos llamado uniones practicables que, como vimos, disponen, además, de algún faldón o elemento protector para asegurar su estanquidad (Fig. 7.15).

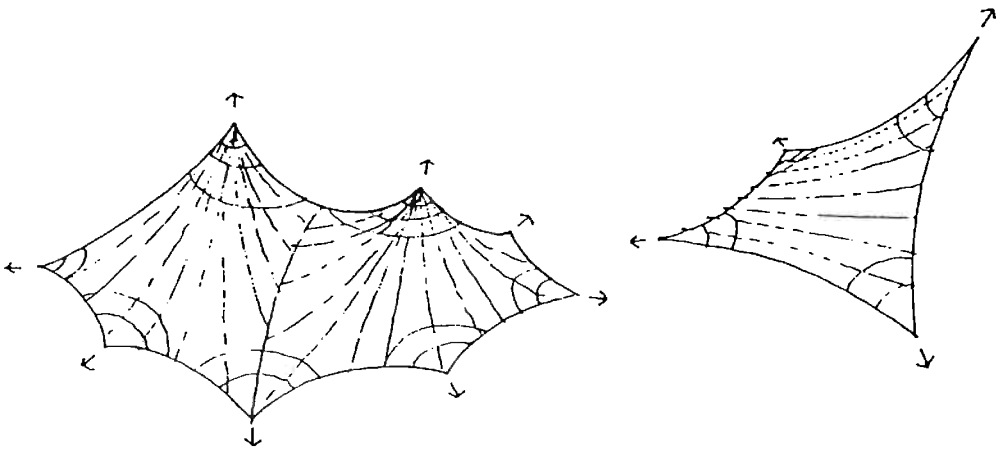


Figura 8.10. Refuerzos en puños y vértices.

8.3. MONTAJE

Constituye la última fase del proceso de ejecución y resulta crucial en el mismo, porque en ella se debe introducir la «pretensión» calculada como base de la estabilización de la membrana en estado de reposo y de la obtención de la forma diseñada. Si no se introducen las pretensiones de un modo adecuado, puede resultar difícil el alcance de la forma final e, incluso, la estabilización de la membrana, con peligro de rotura previa como consecuencia de concentración puntual de tensiones.

Lo ideal es que las pretensiones se introduzcan de un modo gradual y uniforme a toda la superficie de la cubierta o a cada uno de sus módulos, si son estructuralmente independientes. Para ello, en el diseño de la cubierta, y en su confección, hay que prever el sistema de pretensión, junto con el sistema de anclaje, del mismo modo que en una pieza prefabricada de hormigón dejamos previstos los elementos de cuelgue para su manipulación. Podemos distinguir diversos procedimientos en función de tipo de cubierta, su forma y sus anclajes.

8.3.1 Borde libre

Cuando la mayor parte del perímetro de la tela es libre, y su andaje en él es por puntos (puños) la pretensión se puede introducir en ellos, si hemos fijado previamente los puntos de cuelgue centrales. En el caso de un conoide tipo (Fig. 8.11) se tratarà de elevar el mástil central, sujetándolo provisionalmente por su cabeza. A continuación, se cuelga la tela del punto superior y se tensa por el perímetro tirando de los puntos de anclaje radialmente. Esta operación implica una primera puesta en tensión manual o mecánica, en función del tamaño de la cubierta, y un ajuste de dicha tensión mediante tensores telescópicos o tuercas sobre barras roscadas, hasta alcanzar la tensión de estabilización prevista en cada punto.

La introducción de esta tensión radial debe ser uniforme en todo el perímetro, lo que exige la participación de varias personas a la vez. Normalmente, tantas como puntos de anclaje divididos por dos, de tal modo que se pueda ir introduciendo la tensión de un modo alternado.

En cualquier caso, para introducir la tensión, usamos el mismo borde de la tela a través de sus puños, y los mismos cables que van a servir de anclaje, en los que introducimos un tensor que nos va a permitir mantener regulada la tensión de la membrana a lo largo de su vida útil. En definitiva, no necesitamos elementos de anclaje provisional.

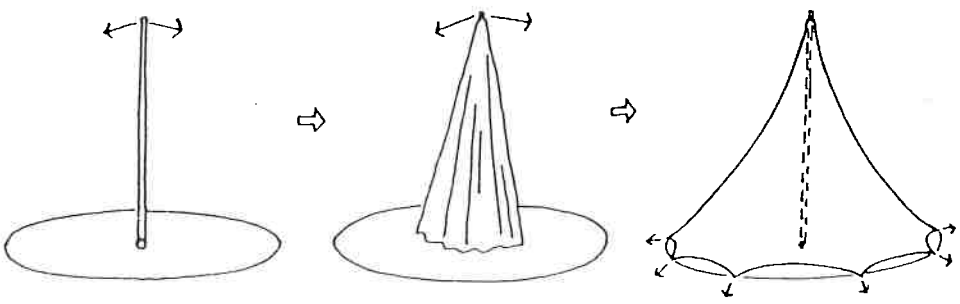
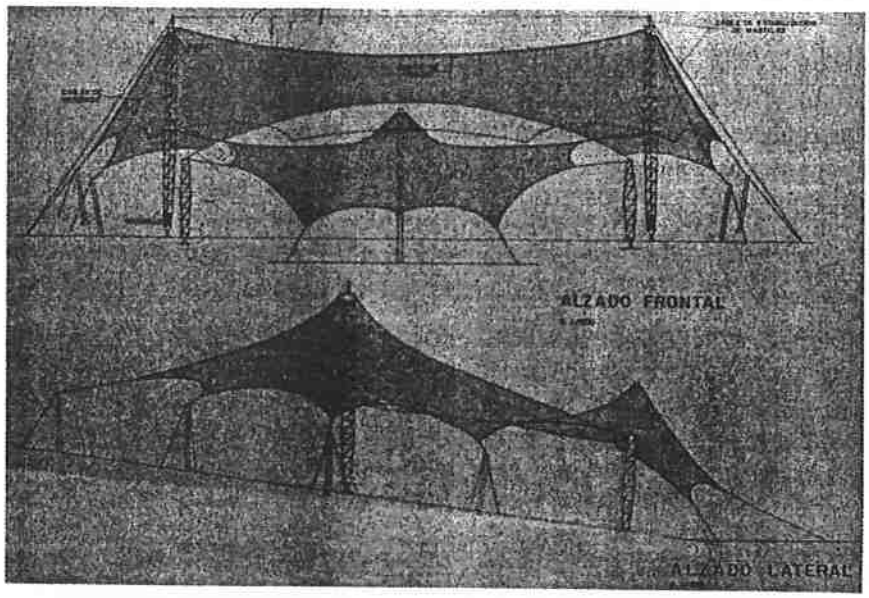


Figura 8.11. Montaje de un conoide simple.

Cuando la cubierta es algo complicada, se puede recurrir a la solución de introducir el ajuste de la segunda etapa por elevación del mástil central, lo que permite obtener la entrada en tensión uniforme de toda la cubierta. Ello se puede conseguir mediante pernos roscados en la base del mástil, que permitan elevarlo por giro de la tuerca (Fig. 7.35) o por inclusión de sistemas hidráulicos de elevación.

Un caso particular, interesante de mencionar, es el de la cubierta modular del aeropuerto de Haj en Jeddah, Arabia Saudita. En ella, cada módulo es un conoide cuyo vértice va colgado de los cuatro mástiles situados en las esquinas. En ese caso, la introducción de la tensión se realizó izando dicho vértice (en



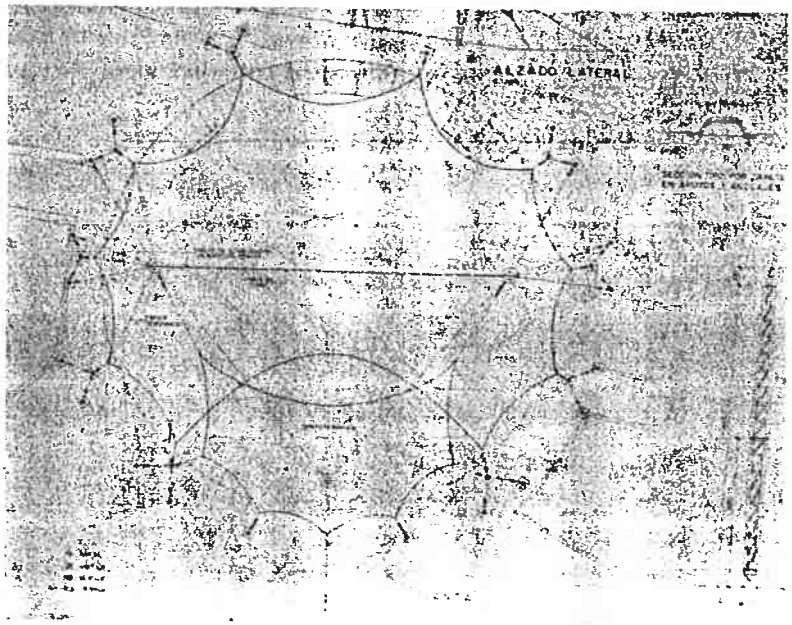


Figura 8.12. Esquema de izado de cubierta de la figura 8.6. Planta y alzado.

realidad un anillo metálico de unos 3 metros de diámetro), habiendo fijado previamente el perímetro inferior (Fig. 7.6).

Del mismo modo, cuando el elemento central de cuelgue es un cable, la introducción de tensión en éste produce la pretensión de la tela. Un ejemplo de esta solución es la de la figura 8.12, en la que una cubierta formada por dos conoides sin solución de continuidad, se ponía en tensión por elevación del cable central tendido entre los dos mástiles, tirando de sus extremos inferiores mediante maquinillos eléctricos alojados en las bases de ambos mástiles. En realidad se realizaba una operación de «izado» de la cubierta, como si de una vela se tratara.

En cualquiera de los casos, además de introducir la tensión, tenemos que comprobarla y mantenerla. Para ello son útiles distintos tipos de dinamómetros que nos permiten conocer la tensión del cable de anclaje y, por tanto, saber si la pretensión introducida es la adecuada. Asimismo, debemos dejar tensores en todos los puntos donde hemos introducido la pretensión para poder corregirla y mantenerla a lo largo de la vida de la cubierta.

Para ello, puede ser útil un sistema de muelles en los puntos de anclaje que, convenientemente colocados, mantienen la tensión inicial a pesar de las distintas deformaciones reológicas que, como hemos visto, pueden sufrir los materiales de la membrana. Los muelles pueden recuperar la tensión por acortamiento o aproximación de sus volutas, cuando cede la tensión en el cable en el que están incluidos. Naturalmente, en su cálculo habrá que tener en cuenta su capacidad de carga máxima.

La posible disposición de muelles recuperadores de tensión y la necesidad de conocer ésta, ha inducido a diseñar al autor un dinamómetro a base de un muelle con camisa calibrada, que nos permite conocer, en cada momento, la tensión a la que está sometido y, por tanto, corregirla en caso de necesidad con la ayuda del tensor situado en el mismo cable (Fig. 8.13).

8.3.2. Borde rígido

En aquellas cubiertas con borde rígido, normalmente acopladas a una edificación existente, la introducción de la pretensión se complica algo.

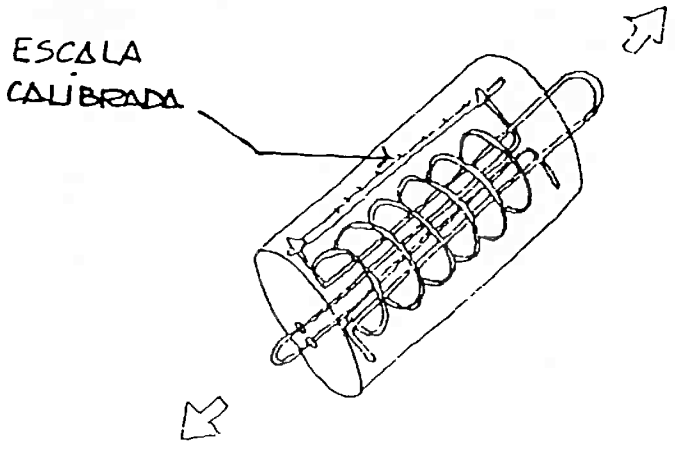


Figura 8.13. Esquema de dinamómetro.

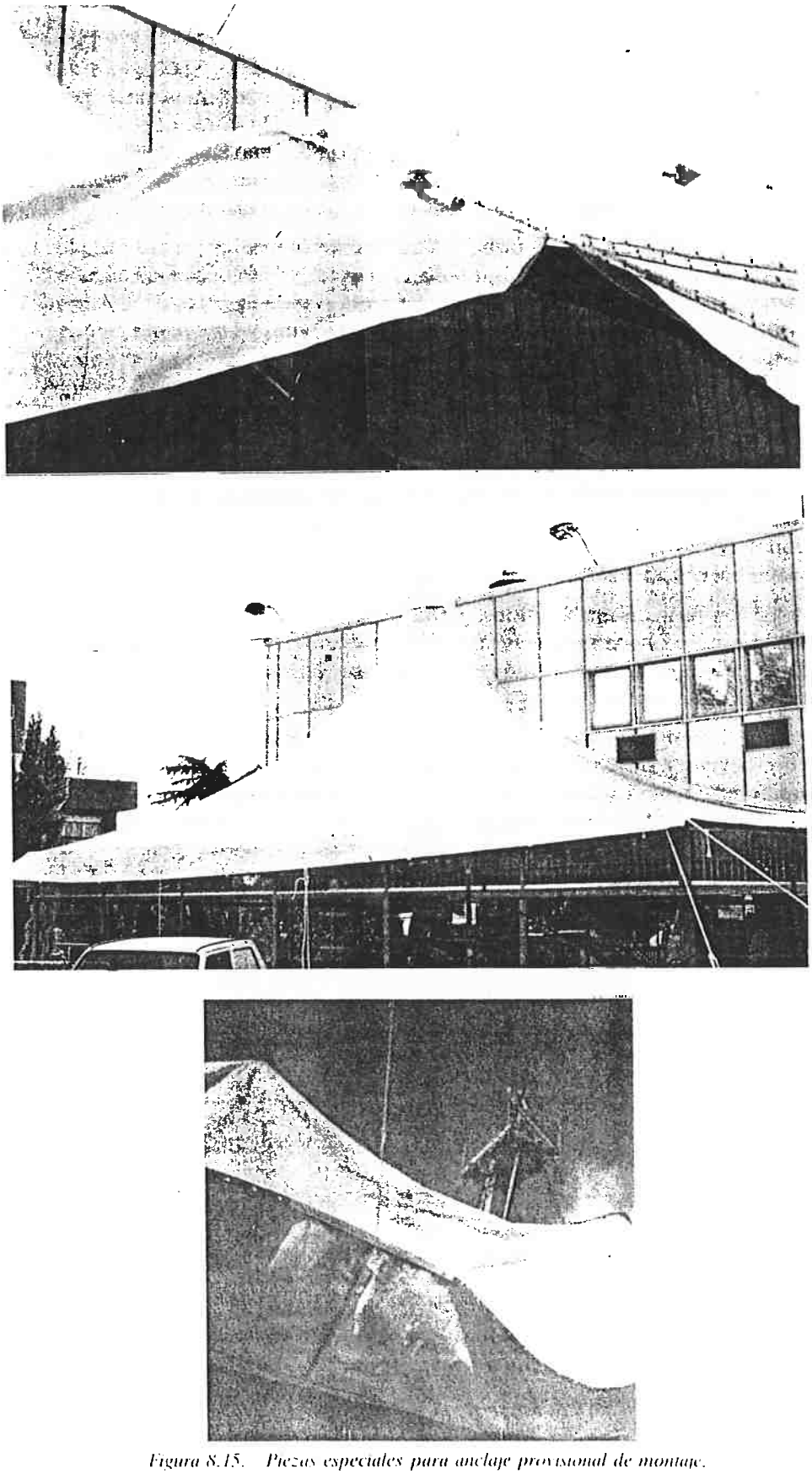


Figura 8.15. Piezas especiales para anclaje provisional de montaje.

En efecto, en dicho borde lineal rígido debemos considerar, por una parte, la tensión en la dirección del borde y, por otra, la perpendicular al mismo.

Esta última es relativamente fácil de conseguir, siempre que dispongamos de algún punto libre en el otro lado de la membrana, ya que podemos tensar por él. De lo contrario, nos cabe el recurso de movilizar todo el elemento lineal rígido para introducir la tensión (Fig. 8.14). Por último, también es corriente la unión del borde de la cubierta a las líneas rígidas por medio de acordonados, lo que permite ir introduciendo la tensión de un modo paulatino.

Sin embargo, la tensión en la misma dirección del borde es más difícil de introducir y exige, normalmente, el uso de elementos provisionales de anclaje que nos permitan darle la tensión a la tela en esa dirección antes de su sujeción, sobre todo si ésta se realiza por el sistema de «prensa», mediante pletina atornillada, por ejemplo (Fig. 8.15).

Cuando se trata de módulos unidos a otros por bordes continuos, estamos con un problema parecido, y depende de si la unión es rígida o flexible.

Si es flexible, mediante cable, se puede terminar de introducir la tensión a través del cable de unión, para lo que hace falta que quede cierta holgura en sus extremos. Es el caso de la cubierta de Jeddah en la que, una vez tensado cada conoide, por izado de sus vértices, como hemos visto, todavía quedaba una posible regularización de la tensión desde abajo, a través del cable de unión.

Si, por el contrario, dicha unión es rígida, la tensión debe quedar resuelta antes, a menos que podamos desplazar el elemento rígido de la unión, y este desplazamiento nos permita introducir o aumentar la tensión de los módulos de tela adyacentes.

En general, se tiende a dejar alguna parte del borde de la cubierta con cierto grado de libertad, a fin de poder regularizar la tensión de la misma, tanto para su montaje, como para su corrección posterior o adaptación, si cabe, a distintas situaciones climáticas o de esfuerzos exteriores.

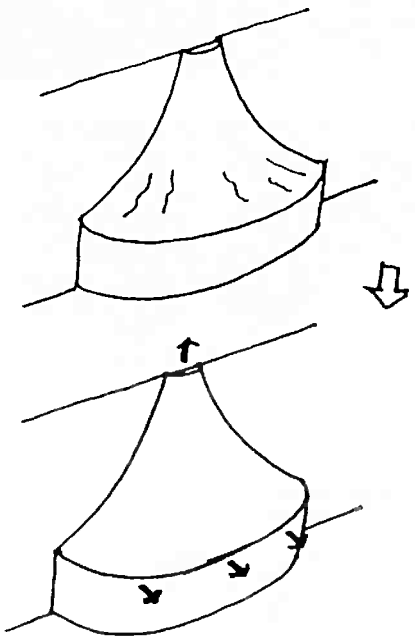


Figura 8.14. Puesta en tensión por desplazamiento de anclaje rígido.

8.4. MANTENIMIENTO

Cabe recordar aquí, simplemente, lo indicado en el capítulo 4 (3.5) en lo que se refiere a la tela.

En cuanto a la estructura soporte y de anclaje, se ve afectada por las reglas generales de mantenimiento de la construcción y, sobre todo, de elementos metálicos (protección anticorrosiva, limpieza, etc.).

Bibliografía

1. CIRCUS TENTS IN AUSTRALIA
   Eve Picker
   LSRU (Lightweight Structures Research Unit)
   University of New South Wales - 1981

2. CONSTRUCCIONES NEUMATICAS. Manual de Arquitectura hinchable
   Thomas Herzog
   Ed. Gustavo Gili, 1977

3. THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHT WEIGHT STRUCTURES IN ARCHITECTURE. PROCEEDINGS 1, 2 y 3
   LSA-86 (Lightweight structures in Architecture)
   Sidney, Australia - 24-29 August 1986

4. INTERNATIONAL TECHTEXTIL SYMPOSIUM 1989 2.3 y 2.4
   TECHTEXTIL 1989

5. MEMBRANE STRUCTURES
   Vinzenz Sedlak, Editor
   The University of New South Wales - 1982

6. MEMBRANE STRUCTURES IN AUSTRALIA
   Eve Picker and Vinzenz Sedlak
   The University of New South Wales - 1982

7. RECOMENDATIONS FOR AIR-SUPPORTED STRUCTURES
   IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) 1985

8. TEXTILE COMPOSITES IN BUILDING CONSTRUCTION
   PART. 2. ARCHITECTURE AND TENSILE COMPOSITE STRUCTURES
   Fitat - 1990

9. 10 YEARS OF PROGRESS IN SHELL AND SPATIAL ESTRUCTURES.
   VOLUME 3
   IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) 1985