

sistemas de estructuras

Heinrich Engel

MATERIAL DE CONSULTA

H. BLUME EDICIONES

Prólogo de Ralph Rapson

Con el alcance y la complejidad rápidamente crecientes de la práctica arquitectónica, al arquitecto actual se le plantea el problema, más arduo que en ninguna otra época histórica, de asimilar los múltiples avances científicos y tecnológicos al arte de la Arquitectura. Un aspecto principal de este problema consiste en la integración de una estructura creadora, imaginativa y pura, desde el punto de vista económico, en el proceso del proyecto.

En este libro, madurado y provocador, el Arquitecto Heinrich Engel expone este problema, tan eminentemente crítico, y propone un atrevido y único camino para salvar la brecha existente entre la teoría y la realidad de las estructuras.

El libro se ocupa de los sistemas estructurales arquitectónicos y se halla claramente determinada la razón primordial para estos sistemas: la creación de la forma y del espacio arquitectónicos. Explicando los mecanismos de las estructuras arquitectónicas, principalmente por medios gráficos, y sugiriendo su vasto potencial para el proyecto arquitectónico, se pone al alcance de la mentalidad del arquitecto, efectivamente, un complejo factor de los múltiples que configuran el ambiente, así como se enfoca claramente un exhaustivo acervo de conocimientos capaces de excitar su imaginación creadora.

Tal es la significación de este libro y en ella pueden reconocerse las directrices y el programa arquitectónicos de la Universidad de Minnesota, que ha desarrollado Heinrich Engel en los pasados años y para los cuales ha prestado una importante y duradera aportación durante su tarea de ocho años como profesor extraordinario.

Dejar sentados los anteriores conceptos no significa otra cosa que encauzar al libro en la perspectiva adecuada y definir el ambiente intelectual, en el cual la idea del presente libro fue concebida y se establecieron sus fundamentos.

Proyecto: síntesis creadora

Un proyecto arquitectónico es un arte y, a la vez, el acto que resuelve el conflicto entre el hombre y su ambiente. Proyectar constituye un complejo e intrincado proceso, pero en lo profundo de cualquier situación ambiental radica una solución natural u orgánica. Existen varios factores o componentes, tales como continuidad histórica, condiciones de ubicación regionales y específicas, necesidades físicas y psicológicas de la sociedad, innovaciones estructurales y ventajas tecnológicas, forma expresiva y espacio creador, los cuales configuran nuestro entorno. Solamente por medio de un

análisis juicioso y detallado, así como de una comprobación diligente en todos los factores inherentes a la estructura mental de nuestro tiempo, puede desarrollarse la síntesis creadora.

Las exigencias y responsabilidades multifacéticas de un proyecto de configuración total requieren hoy día, por parte del arquitecto, una comprensión nunca imaginada hasta el presente. Si aquél espera producir soluciones relevantes, a medida del gran potencial de nuestro tiempo, ha de reconocer que la Arquitectura, siendo ante todo un arte, se ha convertido en una ciencia extremadamente precisa, basada en la aplicación coordinada de los más variados ámbitos del conocimiento.

Hoy día, cualquier situación ambiental es capaz de envolver al arquitecto en una gama amplia de actividades —desde la promoción y programación hasta la investigación y la evaluación estadística, desde la vasta escala urbana y la planificación regional al diseño y la supervisión de la construcción—. Se pretende del arquitecto que sea, a la vez, universal y especialista, o, al menos, que deba estar suficientemente versado en economía, sociología, estética, ingeniería, planificación y diseño, para que sea capaz de integrar todos estos conocimientos en una síntesis creadora.

Práctica: diversidad de talentos

En la realidad de la práctica arquitectónica, sin embargo, una tal integración se consigue raramente en un individuo. Lo más frecuente es que esa tarea abrumadora se realice en varios grados por un esfuerzo de equipo coordinado. Esto no implica necesariamente que el proyecto se realice a base de comisiones sin un mando definido, ya que, aunque varios participen activamente en el proceso del proyecto, debe existir, a mi juicio, solamente una autoridad central.

Esto quiere decir que existen arquitectos de diverso talento e interés que pueden realizar una labor eficaz si se les encaja en su capacidad específica. En efecto, será útil, e incluso necesario, un alto grado de especialización en la práctica del proyecto; pero introducir esta vasta especificación en la educación y formación escolar del individuo es algo muy distinto. Durante esta última, la evolución de la mente del joven arquitecto no se halla lo suficientemente avanzada para poder determinar en dónde reside su principal talento. La educación no puede moldear todos sus productos conforme a formas fijamente predeterminadas. Se sigue de ello, pues, que lo general ha de preceder a lo específico, en o que se refiere a principios básicos y procedimientos.

Educación: preocupación por el individuo

La educación formal del arquitecto es un doble proceso. Por un lado es necesario poseer una formación amplia y madura —un concepto y una convicción arquitectónicas— propia de las aspiraciones y capacidades de nuestro tiempo, y, por otra parte, es preciso desarrollar los múltiples métodos y herramientas —el conocimiento técnico y detallado— necesarios para llevar a cabo el producto coordinado.

Lo fundamental para la educación es comprender que no podemos poseer una seguridad total en la finalidad de cualquier conocimiento o hecho, y que no existen respuestas absolutas para cualquier pregunta. La Arquitectura, motivada por los problemas de la Humanidad y vinculada a éstos, proporciona muy raras veces una solución blanco-negro para una situación ambiental. Antes bien, se consigue aquella mediante la gran riqueza de toda la paleta de colores del arquitecto, limitada básicamente sólo por sus cualidades innatas y desarrolladas.

Fundamentalmente, la educación se refiere al individuo; ha de desarrollar la iniciativa y las potencias intelectuales de aquél, y existen tres amplias fases para este proceso: en primer lugar, la mente ha de aprender a analizar clara y lógicamente, así como a pensar de una manera creadora; en segundo lugar, ha de desarrollar su capacidad para emplear el conocimiento con criterio, o aplicarlo, también de un modo creador, y, en tercer lugar, ha de permanecer siempre alerta y fluida, con objeto de no perder la capacidad para inquirir y aprender.

La completa comprensión de este proceso del que aprende es esencial. El pensamiento creador no es un fenómeno místico ni aislado, y sólo puede ser el resultado de la adquisición ordenada del conocimiento de los hechos, que son básicos para el logro del objetivo en toda su extensión.

Esta disciplina es fundamental para la educación, aunque constituye una decisión crítica la cantidad o calidad del conocimiento de los hechos que hayan de ser seleccionados. Las prácticas y hábitos normales, así como las respuestas conocidas, no dejan frecuentemente lugar para dudas, y sin la duda no existe uno de los incentivos más poderosos para aprender. A medida que se adquiere más información y conocimiento de soluciones previamente acompañadas por el éxito aparece el peligro, siempre latente, de la atrofia de la imaginación.

La solidez es una característica básica necesaria al arquitecto; la educación ha de imbuir al estudiante la costumbre de in-

vestigar y una manera de proceder tales que le capaciten para adquirir más tarde todos los conocimientos y emplear sabiamente la información relativa a cada caso particular que se le plantee.

La síntesis creadora es, preeminentemente, la savia de la educación y práctica arquitectónicas. La habilidad para aplicar el conocimiento adquirido con imaginación y criterio es necesaria para todo arquitecto creador. Existe una confusión considerable y un escaso entendimiento real respecto al acto creador. En un sentido amplio, me parece que la acción creadora arquitectónica se basa en la habilidad para mantener una extensa y plena asociación mental dentro de la estructura del conocimiento adquirido.

La intuición o inspiración es un factor esencial en la creación arquitectónica. Sin embargo, la inspiración no es ocioso sueño como algunos imaginan; antes bien, es una tarea ardua, amada. La acción intuitiva, a veces sin una razón aparente, no se realiza nunca sin una guía, y esta guía la conoce el arquitecto por medio de una trama formada por educación, conocimientos adquiridos, solera familiar, gusto, entendimiento, convicciones y sentido ético.

Si poseer conocimientos es importante, la educación no consiste predominantemente en la adquisición de hechos y datos; antes bien, la educación debe excitar e inflamar la inteligencia, abrir horizontes y enseñar a pensar al individuo. A este fin constituye un imperativo que la educación estimule y nutra la mente, ya que gran parte de la calidad dinámica que deseamos infiltrar en ésta es el resultado de hacer del proceso de aprendizaje una aventura excitante —una continua búsqueda de lo nuevo y de lo desconocido— que culmine, para el arquitecto, en una síntesis creadora.

Como arquitecto practicante y educador de arquitectos, me he ocupado con la teoría y con la realidad. Hace mucho que he comprobado que los métodos normales para introducir y enseñar estructuras arquitectónicas al joven arquitecto están lejos de ser satisfactorios, son demasiado complicados y, generalmente, confusos y mal encauzados. No son aptos para establecer relaciones precisas para el acto total que constituye el proyecto arquitectónico y tampoco de un carácter que estimule la aplicación creadora de bases estructurales por parte del joven proyectista.

Convencido de que la participación activa en la construcción real impulsa considerablemente, en especial la docencia de cualquier materia específica de la Arquitectura, creo que el arquitecto en ejercicio, con mentalidad progresiva y con particular interés y talento para la especialidad elegida, es el más indicado para introducir dicha enseñanza específica al joven arquitecto.

Por tanto, en 1959 animé a Heinrich Engel, docente a la sazón en la Escuela de Arquitectura, para que desarrollara un curso sobre estructuras arquitectónicas, que aclarara los principios básicos para la creación y desarrollo de las estructuras y diera a conocer las posibilidades del proyecto de los sistemas estructurales.

Es de agradecer en grado sumo que la brillante labor desarrollada en el curso por Heinrich Engel haya proporcionado la base de esta aproximación, altamente creadora y original, para la comprensión y el empleo de las estructuras arquitectónicas.

Este libro interesará a todo aquel implicado en el proyecto de edificios: al estudiante y al profesor de Arquitectura, así como al arquitecto en ejercicio. Para el estudiante constituirá un método positivo, por medio del cual podrá adquirir rápidamente un conocimiento amplio y eficiente de todas las estructuras; al arquitecto le comunicará un estímulo y le mostrará nuevas posibilidades para el proyecto de sus edificios; al profesor le proporcionará, reunido, un material sobre temas tan ampliamente dispersos por la literatura técnica y le ayudará a programar sus investigaciones.

La obra desvanecerá la idea preconcebida de que una materia eminentemente técnica no puede tratarse con rigor y profundidad por medios gráficos. Refiriéndose solamente a sistemas y excluyendo los detalles que con demasiada frecuencia sólo contribuyen a oscurecer el problema básico, el libro es un prototipo en su género, y por ello puede constituir un estímulo para otros sistemas similares de investigación de otros sectores especializados que configuran el proyecto arquitectónico en nuestro tiempo.

Ralph Rapson

Perspectiva: dilema de la educación arquitectónica

El avance de la ciencia y de la tecnología ha ampliado y convertido en muy complejo el tema del proyecto de edificios y ciudades, así como el de la planificación de su desarrollo. Ya, incluso la concepción inicial de ideas formales para edificios singulares o para urbanizaciones, se ha convertido, más bien, en escrutinio y aplicación del extenso ámbito de datos científicos que colaboran a la realización del proyecto, y se manifiesta cada vez menos como el acto independiente de una mente creadora individual.

Este ámbito, que las ciencias de la construcción han hecho accesible, ha alcanzado entre tanto una extensión que ningún individuo —sea o no arquitecto— puede medirlo completamente ni aprovecharlo para su proyecto. Ello quiere decir que ninguna mente aislada puede realizar ya un proyecto que pueda ser llamado propiamente «contemporáneo»; es decir, un proyecto que se halle a nivel de esta era científica y tecnológica. Pues ningún ser humano, él por sí solo, es capaz de evaluar completamente las últimas aportaciones de la tecnología de la construcción contemporánea y del urbanismo o de utilizar e integrar en la edificación todos aquellos factores que la investigación científica ha demostrado hace ya mucho, y que influyen poderosamente en el bienestar material e individual del hombre.

Así, pues, el arquitecto y el urbanista, al proyectar edificios y ciudades contemporáneas, dependen de los argumentos e investigaciones de especialistas científicos. Lo poco que ellos saben sobre diversos campos del conocimiento no les capacita para enjuiciar diversos puntos de vista en conflicto y coordinar éstos, y aún menos para incorporarlos a su concepto de proyectar. Si el arquitecto es famoso, puede simplemente imponerse sobre los argumentos contrarios de los especialistas; si no lo es, estará a merced de aquellos.

Mientras este desarrollo de un ámbito de conocimientos sin cesar en aumento fuerza al ingeniero a concentrarse en una sola especialidad, confirmando así su existencia profesional, el mismo desarrollo pone en peligro la existencia de una profesión, cuya orientación ha de ser universal en vez de particular: el arquitecto. Porque le obliga a reducir continuamente su conocimiento y su práctica en cada uno de los campos especializados, de manera que pueda abarcarlos todos.

En vista de esta situación se ha avanzado la idea de que el arquitecto sea él mismo un especialista dentro de un equipo de especialistas que colaboran en el proyecto de edificios y ciudades, de que actúe como el especialista del espacio-forma en materias de construcción, tanto funcionales como estéticas. En realidad, en muchos casos de edificación compleja trabaja el arquitecto con ese carácter, garantizándose su papel directivo más por contrato que por calificación.

Sin embargo, de igual modo que cualquier proceso mental original no puede ser compartido por dos o más individuos —es la esencial soledad humana—, así también la idea para el proyecto de un ambiente físico, ya sea casa, vecindad, ciudad o paisaje, puede originarse solamente en una mente única; la idea no puede ser sólo la suma coordinada de varias mentes, luchando cada cual por la supremacía o la mayor parte.

Por otra parte, la mente individual sólo está capacitada para el juicio crítico si ejerce un mando sobre un conocimiento sólido acerca de cada sector científico por separado. El simple conocimiento de algunos pocos principios científicos podrá evitar grandes errores en la construcción, pero excluirá la utilización de ese poder que la búsqueda científica en la naturaleza del hombre y de las cosas ha inferido. Lo que se necesita es un conocimiento que capacite al arquitecto para interpretar hechos científicos de un modo creador y deducir de ellos ideas para su proyecto.

Tal es, pues, el dilema del arquitecto contemporáneo: la discrepancia existente entre la amplitud de los conocimientos exigidos, por una parte, y la limitación de una sola mente humana, por otra. Esta discrepancia se manifiesta ya en las raíces de los problemas en las actuales escuelas de Arquitectura, afectando vitalmente la posición del arquitecto en la sociedad científica de la época contemporánea. La siguiente cuestión es fundamental: ¿existen medios para resolver esta discrepancia, y, de existir, cuáles son?

La dificultad para encontrar respuesta a estas preguntas se manifiesta por la multiplicidad de factores implicados en la construcción contemporánea. Las técnicas de estructuras, electricidad, mecánica o acústica son factores tan integrados en la edificación moderna como las consideraciones financieras, económicas, sociológicas, higiénicas o psicológicas. Al proyectar un edificio no puede descartarse ninguna de esas materias sin correr el peligro de lastrarle con cargas que produzcan obsolescencia y le conviertan en ineficaz, aun antes de estar acabado.

Todo esto se ha reconocido por prácticos y teóricos, estando de acuerdo unánimemente en la necesidad de un conocimiento sólido de cada una de las diferentes ciencias que intervienen en la construcción. Sin embargo, hay diversos criterios en cuanto al método óptimo para adquirir este conocimiento y la amplitud en que debe poseerse.

Aquí se manifiesta una cuestión vital en la profesión de arquitecto:

- Definición del contenido y amplitud de lo que el arquitecto debe conocer sobre cada una de las ciencias de la construcción.
- Elección del método y medios óptimos por los cuales el arquitecto puede alcanzar este conocimiento.

Una tal decisión es urgente y fundamental, ya que decidirá el éxito o el fracaso

de los intentos para reforzar la débil influencia que el arquitecto ejerce hoy día entre los profesionales del mundo actual y para identificar, de un modo preciso, su imagen profesional en la era de la técnica.

Las estructuras en la construcción: nueva situación

De todos los elementos que componen una forma material rígida —casa, máquina, árbol o cualquier ser animado—, la estructura es el más esencial. Sin la estructura, la forma material no puede ser preservada, y sin preservar la forma, al organismo interior no le es posible funcionar. De aquí se infiere la imposibilidad de existencia de ningún organismo, animado o inanimado, al no haber estructura.

En cuanto a Arquitectura se refiere existen, desde luego, otros muchos elementos que integran un edificio; pero su presencia no es vital para su existencia. Un edificio, en efecto, puede existir sin pintura o sin calefacción, pero no puede existir sin estructura. Y aunque la mera estructura no supone todavía Arquitectura, la hace, sin embargo, posible. Y esto tanto en lo que se refiere a la primitiva choza como al moderno edificio de altura.

Por consiguiente, el conocimiento del origen estructural de la Arquitectura es básico para la profesión de arquitecto. Sin embargo, mientras que el antiguo maestro de obras podía tratar fácilmente de los escasos problemas estructurales de sus edificaciones, con un conocimiento suministrado por la experiencia y la tradición, el arquitecto avanzado se hallará frente a un campo tan extenso, al resolver los problemas estructurales de sus edificios que ningún ingeniero, por sí solo, podrá pretender dominar en todas sus facetas.

Lo más difícil para el arquitecto será alcanzar aquellos conocimientos referentes a la estática que lo capaciten para formular ideas estructurales y proponer siste-

mas de estructuras. Pues, para él, la estática es solamente una de las muchas disciplinas que ha de dominar. Para salvar esa dificultad, el único medio es concentrar el volumen de conocimientos sobre estructuras en un ámbito en el cual pueda ser dominado y abarcado por el arquitecto.

El camino tradicional para tales intentos es enseñar solamente la primera parte de lo que constituye un programa concebido por ingenieros y enseñado a ingenieros. Aunque este método puede aportar conocimientos sobre conceptos básicos del comportamiento estructural y dar reglas para calcular las estructuras más simples, no será suficiente para establecer relaciones precisas entre estructuras arquitectónicas y el espacio y la forma arquitectónicos. Podrá dar recetas de cómo analizar un determinado sistema estructural, pero no estimulará la facultad de concebir y desarrollar nuevos sistemas. Y el resultado de este método será un ingeniero aficionado, inseguro de sí mismo en materias de proyectos estructurales y con una actitud sobre el tema, mezcla del recelo y de la aversión que acompañan siempre a la ignorancia.

Se ha conseguido una mejora notable analizando la escasez e insuficiencia de conocimientos del arquitecto en ejercicio, respecto de las materias estructurales, y, en consecuencia, ampliando y enriqueciendo el temario convencional en la esperanza de remediar la situación actual. Sin embargo, una tal mejora, que se basa sólo en la observación de pequeñas deficiencias de la práctica cotidiana, no resolverá el dilema de la formación científica del arquitecto contemporáneo. Pues la función del proyecto estructural, dentro de la creación arquitectónica, no ha cambiado o se ha desarrollado simplemente, sino que es fundamentalmente nueva.

1. En el pasado, el vocabulario del proyecto estructural se hallaba reducido a relativamente pocos sistemas nor-

malizados y técnicas artesanas, los cuales limitaban las posibilidades de forma y luces y ejercían un saludable control.

En la actualidad, la ciencia de la imaginación y la técnica de la maquinaria han desplazado las barreras naturales de las posibilidades en el campo estructural. Casi todas las formas pueden construirse, y puede conseguirse que cualquier contradicción estructural pueda sostenerse, resistir y durar.

2. En el pasado, el conocimiento de una forma estructural correcta era empírica y vaga. Además, la técnica artesana favorecía la modificación personal de la forma normalizada.

En la actualidad, tanto la teoría matemática como la técnica artesana prescriben de un modo preciso la forma y expresión estructurales, permitiendo la desviación individualista solamente a expensas de la economía. Las formas estructurales se han convertido en absolutos e indispensables standards de la Arquitectura.

3. En el pasado, la falta de variedad en los sistemas estructurales bien conocidos coartó la libre realización de las ideas del arquitecto. Era inevitable un lapso entre la estructura posible y la forma arquitectónica, y escasa la economía.

En la actualidad, innumerables estructuras bien experimentadas permiten que cualquier espacio pueda ser sincronizado de un modo preciso con una forma estructural positiva que refuerce la idea arquitectónica. Forma estructural y espacio envolvente poseen una tolerancia muy reducida pudiendo incluso alcanzar la identidad.

4. En el pasado, el sistema estructural de un edificio desempeñaba sólo una parte menor e indirecta en la expe-

riencia estética de la Arquitectura. Una estructura sin ornamentar era raramente empleada como forma estética per se o experimentada como tal.

En la actualidad, el hombre deriva cada vez más la sensación estética de la pura comprensión intelectual de un sistema lógico, y de ahí que experimente la lógica de la forma estructural como fuente de sensación estética.

5. En el pasado, había pocos edificios importantes y, a causa de su importancia social, su proyecto estaba apenas ligado a consideraciones económicas y la elección de su esquema estructural no se hallaba limitado.

En la actualidad, la civilización masiva necesita una cantidad sin cesar en aumento de edificios de múltiples unidades y grandes proporciones, y habiendo de sujetarse su construcción a un presupuesto afinado, y necesitando una enorme resistencia estructural, el concepto estructural es de preeminente importancia para el espacio y la función del edificio; de aquí que se trate realmente de una cuestión primaria del proyecto arquitectónico.

Esta nueva significación de las estructuras para el edificio y su proyecto nos lleva a la necesidad de enfocar nuevamente y reconsiderar las cuestiones básicas que subrayan los conceptos «estructura arquitectónica» y «proyecto de estructura». El análisis de lo que es en esencia una estructura técnica y de la función que la estructura desempeña en la creación arquitectónica proporcionará una base sólida para proponer la cuestión: qué debe saber el arquitecto sobre estructuras y en qué grado.

Estructura técnica: medios de humanización

Todas las tareas del hombre —cuando son algo más que la mera aseguración de

la existencia, el incremento de la comodidad y la satisfacción egoísta— tienden a imponer la medida del hombre sobre el entorno de éste, de modo que armonice con su vida física y espiritual, refleje su imaginación y pueda elevar su existencia: humanización del ambiente.

Este ambiente comprende los elementos visibles e invisibles, los seres animados e inanimados, el mundo terrestre y el extraterrestre. El ambiente es también el prójimo. El hombre se halla constantemente en proceso de transformación, confiando en mejorar el ambiente existente mediante la agricultura, la construcción, los descubrimientos, la educación y la política, así como por medio de la explotación o el empleo de la fuerza. El hombre humaniza el ambiente y, cuando lo ha conseguido, trata de humanizarlo más todavía, hasta alcanzar altos niveles.

Toda humanización es, en esencia, una extensión de la estructura intelectual. El hombre, antes de intentar coordinar el ambiente con su propio ser, considera lo que es necesario realizar a tal propósito, y lo ordena según un sistema de interdependencias; configura una estructura intelectual para sus actos; en definitiva, se traza un plan, y una tal estructura intelectual, fundamentada en otra dada por la naturaleza, se convierte en una estructura técnica.

Por tanto, técnica es cualquier estructura del ambiente humanizado que produce y preserva una forma. Esto quiere decir que una estructura técnica debe considerarse no tanto como construcción material cuanto como estructura intelectual aplicada. Estructura técnica es lo que distingue el lenguaje del mero sonido y abre el camino a la poesía y a la música; estructura técnica es la que convierte el agua en energía y la materia en Arquitectura. Y técnica es también la estructura que soporta la existencia del hombre civilizado y la distingue de la del salvaje.

La estructura técnica, por tanto, no es sólo el instrumento esencial para huma-

nizar el ambiente total, sino también el criterio de cualquier forma humanizada.

El papel que la estructura técnica desempeña en la formación de la Arquitectura se halla asociado íntimamente con la función de ésta: la creación de espacio humanizado. Solamente mediante una estructura puede extenderse el espacio, de forma que se pueda desarrollar en él la vida del individuo, la familia o la sociedad; por medio de la estructura puede controlarse el espacio para que sea posible vivir a salvo, moverse y trabajar; y también por medio de la estructura este espacio puede enriquecerse y ser dotado de escala y de calidad estética. La estructura es, pues, algo instrumental e integral para el espacio arquitectónico.

Los primitivos edificios eran meras estructuras y el espacio estaba casi totalmente determinado por el sistema estructural. Pero, a lo largo de la historia, la contribución proporcional de la estructura dentro del conjunto de factores arquitectónicos ha sido sometida a interpretaciones muy diferentes. Algunas épocas subordinaron los sistemas estructurales a las ideas espacio-formales, hasta un punto en el que la estructura se hallaba sumergida en la abundancia de un volumen formalístico; otras épocas, de un modo indiscriminado, adoptaron la forma y el espacio que dictaba el sistema estructural, y, de nuevo, otras épocas hallaron placer en el empleo de formas seudoestructurales que servían solamente al sentido de la vista y no a la cobertura del espacio.

Pueden existir discrepancias respecto al modo de juzgar los méritos y deméritos de esos puntos de vista extremos considerando el papel que desempeña la estructura en la Arquitectura; pero no puede haber duda respecto a la comprobación que, a través de la historia, los ingenios o mecanismos encaminados a cubrir el espacio, es decir, los sistemas estructurales, estimularon a los arquitectos y constructores en sus creaciones e influyeron en la forma y en el espacio.

arquitectónico. Es incluso probable que fuese, frecuentemente, la necesidad de un nuevo sistema estructural lo que adujera nuevos conocimientos sobre la manipulación del espacio, y no es accidental que las características más destacadas del espacio y de la forma en la Arquitectura contemporánea sean un resultado, más bien de la ingeniería estructural que del proyecto arquitectónico.

Aquí se requiere una afirmación muy precisa: cierto que es la estructura calculada, tal como sucede en los puentes, puentes, autopistas o factorías industriales, la que se ha convertido en muchos casos en el producto final, es decir, en la construcción definitiva que controla el espacio en el que vive la sociedad; y, sin embargo, la función adecuada de la estructura es sólo medio, no fin: es instrumento y no producto. Si la Arquitectura es el ambiente material humanizado que, además de satisfacer las necesidades físicas del hombre, exige y protege la «humanitas» de éste, entonces, conseguir salvar una distancia mediante un puente, una cubierta o una carretera y obtener seguridad y economía, puede ser sólo un medio y no un fin.

Indudablemente, existen muchos edificios proyectados por ingenieros que pueden ser considerados ejemplos destacados de buena arquitectura. Pero la excelencia de esas construcciones no es debida a la calidad de su sistema estructural, sino a que han logrado el éxito engendrando un espacio arquitectónico. Y esos ingenieros proyectistas no sobresalen por su capacidad técnica específica, sino por su intuición arquitectónica, que les permite llevar sus ideas estructurales a una correcta dependencia respecto del objetivo arquitectónico.

Esas construcciones de ingeniería tan conseguidas confirman, a su modo, pero no por ello menos claramente, que la estructura arquitectónica adquiere una realidad y una significación por medio de la función que desempeña. Y esta función consiste en hacer posibles las

formas materiales que sirven para el ser físico y espiritual del hombre. Su mérito puede calibrarse exclusivamente según el acierto con que realicen esa función.

Necesidad de la estructura: conflicto de las direcciones

La estructura es una necesidad para la Arquitectura: sin estructura no hay Arquitectura. Sin embargo, la necesidad de la estructura tiene su propia y única causa y esta causa resulta de un conflicto de direcciones, o más bien de varios conflictos que han de ser resueltos para poder engendrar un espacio para la vida y el trabajo humanos.

Estos conflictos direccionales tienen una cosa en común: se hallan todos subordinados a un fenómeno que, si no existiera, haría superfluos los sistemas estructurales, o al menos se necesitarían otros esencialmente diferentes de los conocidos hasta el presente. Este fenómeno es el peso. El peso, por otra parte, no es sino una fuerza que es ejercida por la masa de la Tierra. La atracción terrestre, por tanto, es la razón final de los problemas del proyecto estructural. Y esta atracción es un elemento integral de la estructura en la Arquitectura.

Sin la presencia continua de la gravedad, las estructuras materiales, tales como las conocemos en la Tierra, las técnicas y las naturales, carecerían de sentido y muy probablemente no existirían. La acción continua de esta gravedad sobre el edificio, como sobre toda sustancia, no es de ningún modo una condición tan inevitable como parece. En la era de la aviación y de la intrusión del hombre en el espacio, una Arquitectura con estructuras no sujetas a la atracción terrestre entra de lleno en lo posible y razonable.

En la Tierra, sin embargo, toda sustancia posee un peso, y este peso se convierte en un problema en cualquier parte en donde la sustancia no se halla conectada con la Tierra directamente y del modo

más directo. Este es el caso cuando el espacio está cubierto horizontalmente por medios materiales o cuando se vacía una masa sólida para crear un espacio libre. Precisamente, ese espacio rodeado de materia es el objetivo de la edificación y la esencia de la Arquitectura.

De esto puede concluirse que no es solamente el peso lo que requiere sistemas estructurales para cubrir espacios, sino también el conflicto básico que existe entre las direcciones del movimiento del hombre y la gravedad terrestre. La constitución física del hombre, y también su sentido de la orientación, están dispuestos predominantemente para el movimiento horizontal. Su vida se desarrolla en un plano horizontal, entrando, por tanto, en conflicto con la dinámica vertical de toda sustancia.

También se produce un conflicto entre las direcciones de fuerzas por las acciones horizontales que actúan sobre el edificio, tales como el viento. Aquí la dirección de las fuerzas exteriores se halla en conflicto con la expansión vertical del espacio interior y con la dirección excéntrica de la resistencia que ofrece el anclaje. A partir de una determinada altura sobre la Tierra puede resultar ese conflicto direccional tan crítico que sus consecuencias estructurales pueden sobrepasar ampliamente las causadas por la gravedad, convirtiéndose la estabilidad lateral en el problema principal del proyecto estructural.

También pueden producirse conflictos por fenómenos, tales como la expansión térmica (y la contracción), el envejecimiento del material o el asiento de las cimentaciones. Naturalmente, esos cambios afectarán inevitablemente a cualquier sustancia material, pero se convierten en problemas estructurales cuando ocurren en una dirección que se halla en conflicto con la expansión del espacio o con la dirección de la fuerza resistente.

El proyecto estructural resuelve los conflictos direccionales obligando a

fuerzas a cambiar su dirección, de manera que el espacio para el movimiento humano quede sin obstruir en un amplio campo. En qué grado de imaginación se realiza este encauzamiento de las fuerzas y en qué grado la estructura es capaz de reforzar el concepto funcional, social y estético del espacio que cubre es lo que constituye la medida de la calidad de la estructura arquitectónica.

El proyecto estructural, por tanto, es no solamente un método para obligar a las fuerzas a cambiar de dirección, sino también un arte.

A través del proyecto estructural las acciones gravitatorias, las fuerzas exteriores y las tensiones internas son sometidas a control y canalizadas por caminos prescritos; la intención es introducir las en un sistema de acciones y reacciones interdependientes que establezca un equilibrio dentro de cada componente individual, así como en el sistema estructural, considerado en su totalidad. El proyecto estructural impide a estas fuerzas reunirse en una concentración destructiva, y las mantiene a raya.

El proyecto estructural es estrategia, es la planificación intelectual de un sistema dinámico para dominar un conjunto de fuerzas. La magnitud de las tensiones depende en alto grado de la clase de estrategia empleada; esto es válido también para las fuerzas resistentes que han de desarrollarse. En realidad, el proyectista, al plantear un sistema estructural se siente en el papel de un general que ha de hacer frente a las diversas fuerzas del enemigo, y tiene que concebir un plan estratégico para poder controlarlas. El modo de aniquilar las fuerzas adversarias, de emplear las propias, el ingenio del esquema táctico y el alcance que pueda tener para la acción conjunta, es lo que distingue al planificador mediocre del genial, ya sea de carácter militar o técnico.

La estrategia del proyecto estructural es polifacética, conforme al carácter específico que cada una de las estrategias par-

ticulares pueda expresar: las superficies curvadas, que distribuyen en su interior las fuerzas, de manera que la tensión se reduce hasta adquirir magnitudes inofensivas (láminas); los ligeros sistemas articulados que descomponen las fuerzas según diversas direcciones en las cuales pueden ser resistidas (cerchas); la flexible ligereza que dobla el camino natural de las fuerzas llevándolas hasta aquellos puntos en los cuales ya no pueden ser nocivas (cubiertas colgantes); la pesada masa que pone en acción el brazo de palanca de los materiales sólidos, modificando poderosamente la dirección de las fuerzas para alejarlas de todas las zonas críticas (estructuras flectadas). Fundamentalmente, todas son artilugios para controlar las fuerzas; pero la realidad es que se dan en la variedad, intensidad y universalidad de esas expresiones todos los requisitos necesarios para que sean también formas artísticas. Al final, sin embargo, todas esas fuerzas serán reducidas y conducidas al suelo; a esa aparente masa sólida de la Tierra donde no existirá ya conflicto de direcciones, ya que allí no hay espacio para el movimiento.

Conocimiento de la estructura: extensión y contenido

Sobre la base de los principios anteriormente expuestos, la cuestión de la extensión y del contenido de los conocimientos exigidos al arquitecto para proyectar estructuras puede ya contestarse de un modo preciso. Porque, ya que es sabido que la esencia del proyecto estructural consiste en el desarrollo de un sistema de forma material que desvía las fuerzas hacia determinadas direcciones y las lleva al suelo con la máxima eficiencia estética y material y con una mínima obstrucción del espacio, el conocimiento que ha de poseer el arquitecto sobre el tema deberá concentrarse preferentemente en:

— Conocimiento de los sistemas para cubrir espacios y resistir deformaciones.

Esta meta no solamente conduce a una sana limitación del vasto campo de la estática, sino que permite establecer también una organización simple y conveniente de los sistemas estructurales arquitectónicos:

1. Estructuras que actúan principalmente mediante su forma material:
 - sistemas de forma activa o sistemas estructurales en estado de tracción o compresión simples.
2. Estructuras que actúan principalmente mediante la colaboración de los miembros en compresión y tracción:
 - sistemas de vector activo o sistemas estructurales en estado de tracción y compresión, ejercidos simultáneamente.
3. Estructuras que actúan principalmente debido a la masa y continuidad de la materia:
 - sistemas de masa activa o sistemas estructurales en estado de flexión.
4. Estructuras que actúan principalmente mediante su continuidad superficial:
 - sistemas de superficie activa o sistemas estructurales en estado de tensión membrana.
5. Estructuras que actúan principalmente mediante transmisión vertical de las cargas:
 - sistemas estructurales verticales.

Apenas existe, sin embargo, un sistema estructural que actúe exclusivamente en razón de su característica más acusada. Un arco funicular, por ejemplo, aunque logre fundamentalmente su cualidad resistente mediante esfuerzos de forma activa, necesita disponer de una cierta cantidad de resistencia de masa activa

— Conocimiento del mecanismo que hace cambiar a las fuerzas de dirección.

para enfrentarse con las cargas móviles o asimétricas. Lo mismo sucederá con una estructura de superficie activa que no sólo requerirá resistencia de masa activa contra flexiones secundarias, sino que también deberá poseer mucho carácter de forma activa, sin el cual las fuerzas no podrían estar contenidas en su superficie media, requisito indispensable para este tipo de estructuras.

En realidad, en cada sistema estructural hay que hallar, al lado de su característica esencial, una combinación de cualidades distintivas de otros sistemas estructurales. Sin embargo, si se considera la principal acción resistente, esto es, el mecanismo dominante para la modificación de las direcciones de las fuerzas, cada estructura puede clasificarse fácilmente en una de esas cinco familias de sistemas estructurales. Esta clasificación tiene otra justificación, ya que la forma y el espacio se hallan menos influenciados por esas cualidades secundarias y alcanzan carácter y propiedad, predominantemente, por el sistema que consigue la mayor cobertura del espacio; aquellas cualidades secundarias pueden ser ignoradas en el concepto estructural inicial de un edificio, así como en la discusión teórica de los sistemas estructurales.

Esto posibilita también colocar las estructuras de edificios de altura en la categoría de sistemas estructurales verticales. Pues la misión primordial de esas estructuras es la conducción de las cargas verticales, viniendo dada su máxima diferenciación por los sistemas particulares de reunión y transmisión de fuerzas, así como por la estabilización lateral; prescindiendo de que esos sistemas han de emplear necesariamente, para encauzar las fuerzas, uno de los mecanismos pertenecientes a algunos de los cuatro sistemas anteriormente enumerados.

De acuerdo con estos esquemas, pueden hacerse accesibles al arquitecto las innumerables posibilidades estructurales y disponerlo para su completa comprensión. Ya que estos esquemas se hallan organi-

zados exclusivamente sobre la base de los principales sistemas que pueden hacer cambiar de dirección a las fuerzas, puede esperarse que el arquitecto sea experto precisamente en esta fase de la concepción estructural que, por su alta significación para el espacio arquitectónico que forma, no se refiere tanto al campo del ingeniero de estructuras cuanto al que pertenece a la función primaria del arquitecto. En realidad, el dejar o transferir esta función a otros llevaría al arquitecto a la necesidad de abandonar el proyecto totalmente.

Conocimiento de las estructuras: método y medios

La elección del método y medios de cómo pueden difundirse con mayor eficacia los conocimientos sobre sistemas estructurales se regirá por las características particulares de lo que se ha de difundir, y a quién. Entre estas características, las tres siguientes son obligadas:

- La naturaleza predominantemente gráfica del lenguaje del arquitecto.
- La esencia físico-mecánica del objeto considerado.
- La orientación de todos los esfuerzos arquitectónicos hacia la forma y el espacio.

Estas circunstancias han promovido el intento de presentar los rudimentos y el comportamiento de los sistemas estructurales por medio de esquemas y modelos fotográficos, limitando el texto a un mínimo. Sin duda alguna, un mecanismo que cubre el espacio y resiste deformaciones puede explicarse mejor por medios gráficos que por palabras o fórmulas matemáticas.

Hablando estrictamente, el proceso de proyectar un sistema estructural comprende las fases siguientes:

Delineación de la forma estructural básica, dimensionamiento global de sus componentes, introducción de rigidez lateral,

comprobación de los posibles efectos debidos a variaciones térmicas, asientos de cimentación, condicionamiento de las cargas y envejecimiento y, finalmente, elección del material de la estructura del método constructivo. Ninguno de estos pasos diferenciados para desarrollar un sistema estructural requiere el empleo de fórmulas matemáticas. Es decir, ninguna fase de la formulación de una idea estructural depende del empleo de las matemáticas. Solamente después de haber examinado todas las fases por separado y haber concebido, en consecuencia, el sistema estructural en sus elementos esenciales pueden y deben aplicarse fórmulas matemáticas para comprobar el sistema, dimensionar con precisión sus componentes y garantizar de ese modo su seguridad y economía.

Se ha reconocido que algunos rudimentos de los conceptos sobre estructuras, tales como resistencia, brazo de palanca, centro de gravedad, momento de inercia o equilibrio, pueden entenderse mejor si se emplea el álgebra elemental. Pero se discute si el conocimiento del análisis matemático estructural es requisito para poder adentrarse en el comportamiento de las estructuras o si tal conocimiento estimulará la aplicación creadora de los conceptos estructurales.

Concentración en lo sustantivo y eliminación de lo accidental constituyen otros requisitos para poner de manifiesto la verdadera esencia de un ramo del saber polifacético. En la representación gráfica de los sistemas estructurales abstractos, ambos requisitos pueden satisfacerse fácilmente. No sucede así en la reproducción fotográfica de los edificios actuales, ya que en la práctica arquitectónica se da pocas veces el caso de que la forma ideal del sistema estructural no necesite ser alterada y su potencial espacial no haya de ser restringido, con el fin de atender a los muchos problemas que la edificación plantea en la práctica.

Un camino preferible, por tanto, consiste en excluir la reproducción de los edificios



actuales y, en su lugar, presentar modelos de sistemas estructurales típicos. El principal objetivo de estos modelos es producir el potencial de los sistemas estructurales para la forma y el espacio arquitectónicos y establecer así un nexo directo con aquello que constituye la manifestación de la Arquitectura. Por esta razón los modelos no son modelos de ensayo, en el sentido ingenieril y de ahí que tampoco sean un sustitutivo para el análisis de modelos.

Esquema, maqueta y fotografía se sirven conscientemente, y en gran medida, de la abstracción, del mismo modo que lo hacen los objetos que representan. Pues cualquier representación de índole más realista dependería de toda una serie de condiciones definidas y así se sacrificaría parte de la validez universal del ejemplo. También la delineación detallada de una propuesta estructural podría coartar el empleo original de una estructura en manos de un arquitecto de talento creador. Y es más, se han introducido en algunos dibujos figuras humanas no para establecer una escala fija, sino con objeto de crear la ilusión de espacio y edificio.

Para comprender el mecanismo de un sistema estructural no es necesario el establecimiento de una escala absoluta. Lo mismo se aplica al material de cons-

trucción. El funcionamiento básico (aunque no la magnitud de los esfuerzos y el ámbito de las luces posibles y económicas) de un sistema estructural es independiente de su magnitud o del material que lo constituye. Los mecanismos para una cubierta de hormigón de 7,5 metros de luz son esencialmente los mismos que para una de plástico de 15 metros de luz. Cualquier delimitación entre luz de tramo a cubrir y material constructivo necesitaría datos de proyecto definido. Esto privaría a la maqueta o tal esquema de generalidad, individualizándolos, y no añadiría nada para el entendimiento básico.

Del mismo modo, los métodos de construcción, detalles de uniones y estructuras secundarias para la cimentación y envoltura del espacio (incluso la rigidización lateral cuando no constituye parte integral del mecanismo resistente) ejercen escasa influencia en la forma estructural básica. Solamente después de la concepción de un sistema estructural es cuando adquieren significación estos criterios secundarios de proyecto. Hay factores de desarrollo estructural y no de concepto estructural inicial o de idea estructural. Por ello pueden ser excluidos.

Un método tan exclusivo e intencionadamente unilateral conduce a una intensificación positiva y a una concentración

del material total existente sobre estructuras. Desligado de consideraciones prácticas permitirá a la libre imaginación y al talento creador traspasar los límites de las estructuras ya bien experimentadas (y conocidas) para deducir formas nuevas y no convencionales. Estas formas no representan ESTRUCTURAS que puedan incorporarse sin más ensayos a la planta o a la sección de un proyecto, pero son SISTEMAS estructurales. Las ESTRUCTURAS son ejemplos y, por ello, MODELOS de proyecto. Los SISTEMAS estructurales son ordenaciones y, por ello, PRINCIPIOS de diseño.

Como sistemas, los mecanismos para volver a encauzar las fuerzas se alzan por encima del individualismo de una estructura proyectada sólo para una tarea específica y se convierten en un principio ordenador. Como sistemas, no se hallan ligados al actual estado de conocimiento sobre materiales y construcción ni a las condiciones locales particulares, sino que mantienen su validez independientemente del tiempo y del espacio.

Como sistemas, finalmente, forman parte de un sistema de seguridad más amplio que el hombre ha creado para la conservación de su especie; tal como aquél, se halla embebido en ese otro sistema, al cual está subordinado tanto el movimiento de los astros como el del átomo.

Sistemas estructurales de forma activa

1

Una materia no rígida, flexible, con una determinada forma y asegurada mediante extremos fijos, puede sostenerse a sí misma y cubrir un espacio: sistemas estructurales de forma activa.

Son predecesores de los sistemas estructurales de forma activa el cable colgante vertical, que transmite la carga directamente al punto de suspensión, y la columna vertical, que, en dirección opuesta, transfiere la carga directamente a su pie.

La columna vertical y el cable colgante vertical son prototipos de sistemas estructurales de forma activa. Transmiten cargas solamente mediante simples tensiones normales; es decir, mediante compresión o tracción.

Dos cables con diferentes puntos de suspensión forman conjuntamente un sistema de suspensión, el cual puede extenderse por el libre espacio y transmitir las cargas lateralmente mediante puras tracciones.

Un cable de suspensión invertido forma un arco funicular. La forma ideal de un arco para unas condiciones de carga determinadas es el correspondiente funicular de tracción para las mismas cargas.

La característica de los sistemas estructurales de forma activa es, pues, que ellos vuelven a encauzar las fuerzas exteriores por medio de simples tensiones normales: el arco, por compresión; el cable colgante, por tracción.

Los sistemas estructurales de forma activa desarrollan esfuerzos horizontales en sus extremos. La recepción de esos esfuerzos constituye un problema esencial al proyectar estos sistemas.

El mecanismo resistente de los sistemas de forma activa descansa esencialmente en la forma material. La desviación de la forma correcta, si es posible, compromete la función del sistema o requiere mecanismos adicionales que compensen dicha desviación.

La forma de los sistemas estructurales de forma activa coincide, en el caso ideal, precisamente con el flujo de los esfuerzos, y estos sistemas son, por tanto, el camino «natural» de las fuerzas expresado en materia.

La trayectoria «natural» de los esfuerzos de un sistema de compresión de forma activa es el funicular de las compresiones y la de las de un sistema de tracción es el de las tracciones. La línea de compresiones y la de tracciones se hallan determinadas, de un lado, por las fuerzas que trabajan en el sistema, y de otro, por la flecha y la distancia de los extremos.

El funicular de los esfuerzos de compresión y el de los de tracción constituyen la segunda característica de los sistemas estructurales de forma activa.

Cualquier cambio en las condiciones de carga o sustentación afecta a la forma de la curva funicular y da origen a una nueva forma estructural. Mientras que el cable de las cargas, como un sistema que flexa bajo nuevas cargas, adopta el mismo una nueva línea de tracciones, el arco, como un sistema «resistente», ha de compensar la modificación de la línea de presiones mediante la correspondiente rigidez (mecanismos resistentes a flexión).

Ya que el cable colgante cambia su forma bajo las diferentes cargas, es siempre la curva funicular para la carga existente. Por otra parte, el arco, ya que no puede cambiar su forma, puede ser funicular solamente para un determinado condicionamiento del sistema de cargas.

Los sistemas estructurales de forma activa, a causa de su dependencia de las condiciones de carga, son gobernados estrictamente por la disciplina del flujo «natural» de las fuerzas, y por ello no pueden llegar a someterse al proyecto arbitrario y libre de la forma. La forma y el espacio arquitectónico son el resultado del mecanismo sustentante.

La ligereza del flexible cable colgante y la pesadez del arco rigidizado contra una

variedad de cargas adicionales son deméritos arquitectónicos de los sistemas estructurales de forma activa. Pueden ser eliminados en gran parte pretensando los sistemas.

Así como el cable colgante puede estabilizarse por el pretensado de tal manera que sea capaz de ser sometido a fuerzas adicionales que también estén dirigidas hacia arriba es igualmente posible precomprimir el arco hasta un grado tal que pueda volver a dirigir las cargas asimétricas sin experimentar flexiones críticas.

El arco y el cable colgante, a causa de ser solicitados exclusivamente por simple compresión o tracción, son los sistemas más económicos para cubrir un espacio, atendiendo a la relación peso-luz.

A causa de su identificación con el flujo «natural» de las fuerzas, los sistemas estructurales de forma activa son los mecanismos más convenientes para alcanzar grandes luces y configurar amplios espacios.

Puesto que los sistemas estructurales de forma activa conducen las cargas por el camino más directo posible son en efecto y en esencia, vigas lineales.

Esto es cierto también para las redes de cables, membranas o cúpulas de celosía, en las cuales las cargas, aun estando dispersas según más de un eje, se transmiten también en forma lineal a causa de carecer de mecanismo cortante.

Los elementos estructurales de forma activa pueden utilizarse para formar estructuras superficiales. Si ha de mantenerse la condición de estado simple de tensiones, característica de estos sistemas, también deberán someterse a las reglas del funicular de presiones o tracciones.

El arco y el cable colgante, sin embargo, no son solamente la esencia material de los sistemas estructurales de forma activa, sino la idea elemental para cualquier

mecanismo sustentante y, en consecuencia, el verdadero símbolo de la medida técnica del espacio realizada por el hombre.

Las cualidades de la forma activa pueden darse en cualquier otro sistema estructural. Especialmente en los sistemas estructurales de superficie activa constitu-

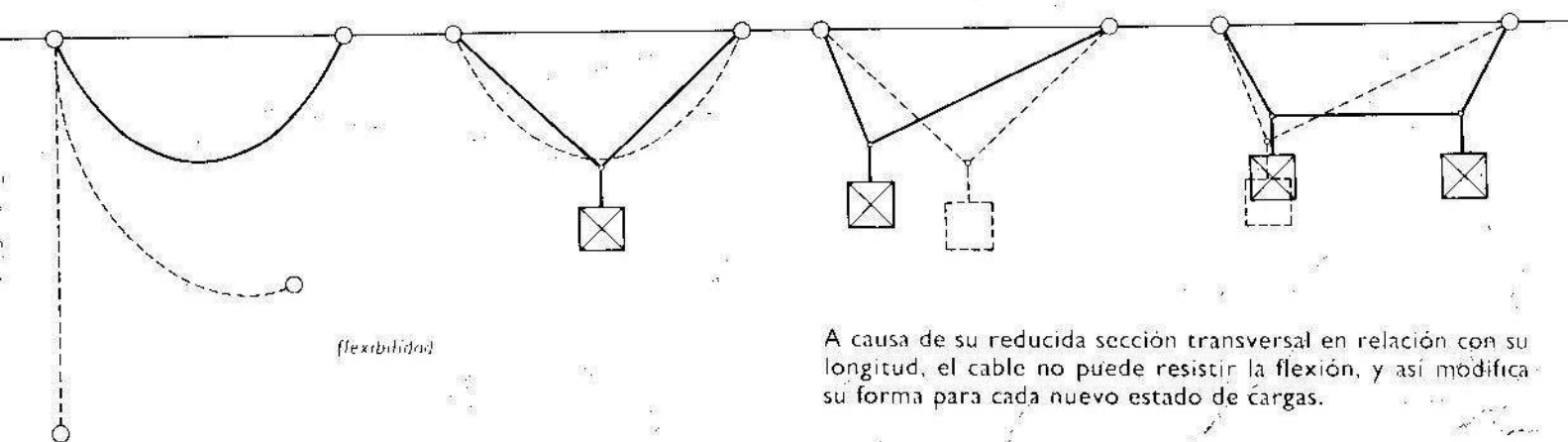
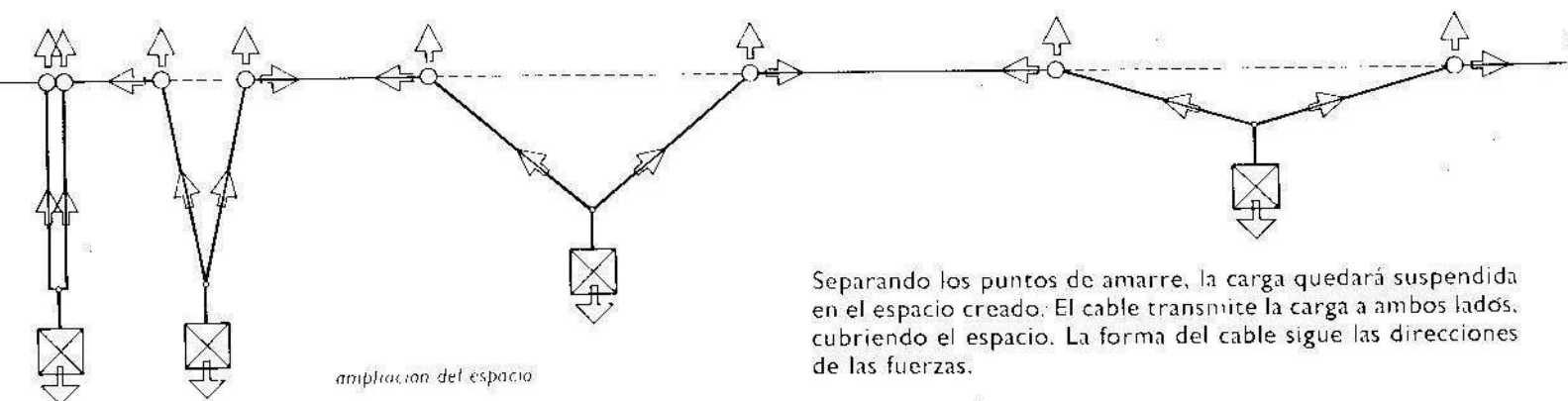
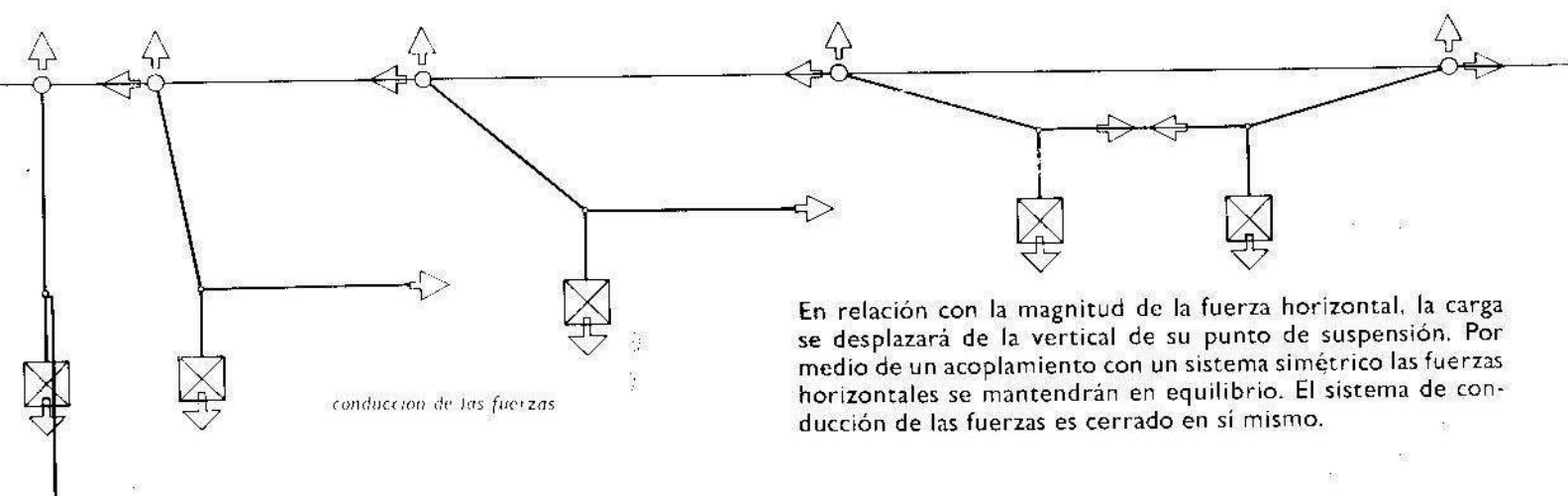
yen un elemento esencial para el funcionamiento del mecanismo sustentante.

Los sistemas estructurales de forma activa, a causa de su aptitud para cubrir espacios de luces considerables, adquieren un significado especial para una civilización de grandes masas que exige espacios de grandes dimensiones. Cons-

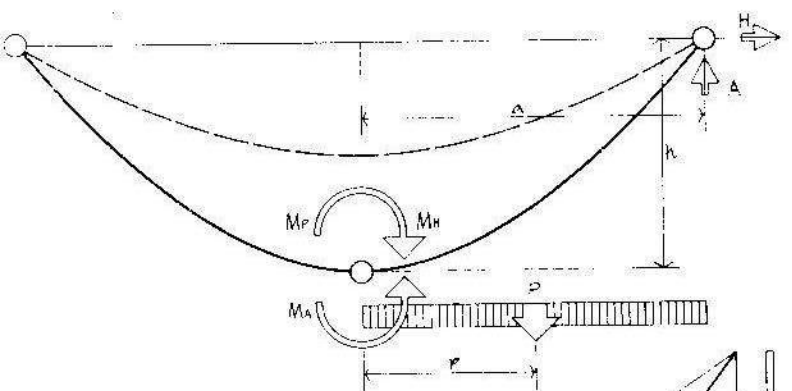
tituyen un potencial de formas estructurales para la edificación futura.

El conocimiento de las leyes de canalización de las fuerzas en las formas activas es requisito para el proyecto de cualquier sistema estructural y, por ello, esencial para el arquitecto que desee proyectar un edificio.

Relación entre la dirección de la fuerza y la forma estructural del cable

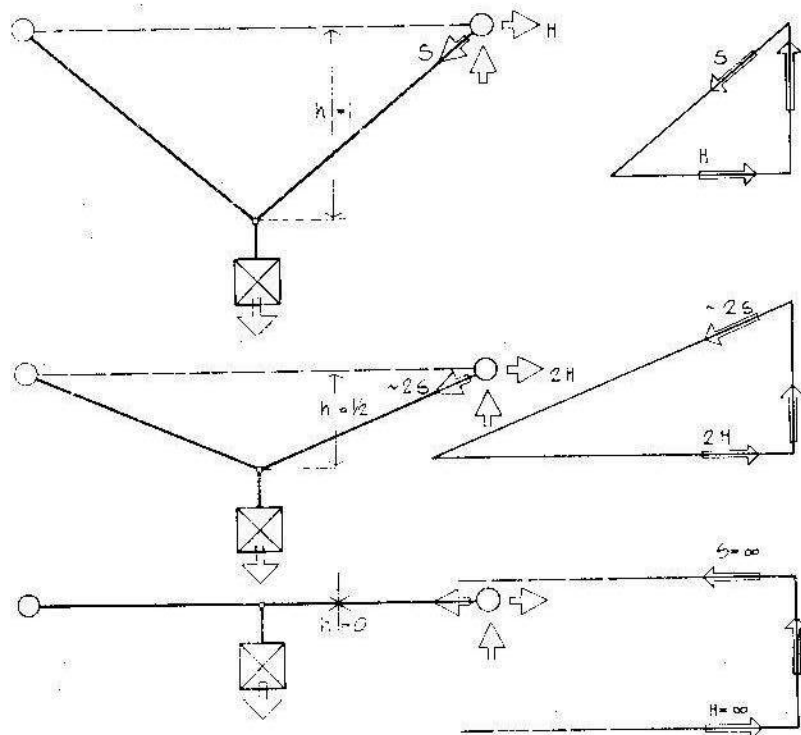


Mecanismo de palanca del cable colgante



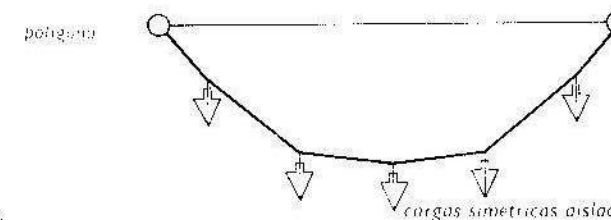
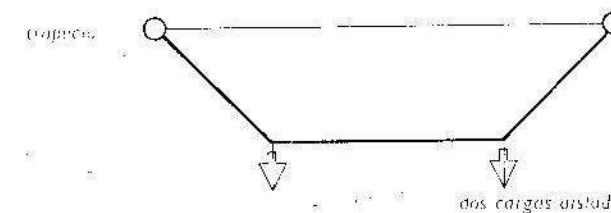
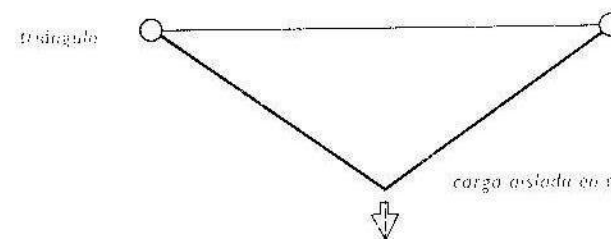
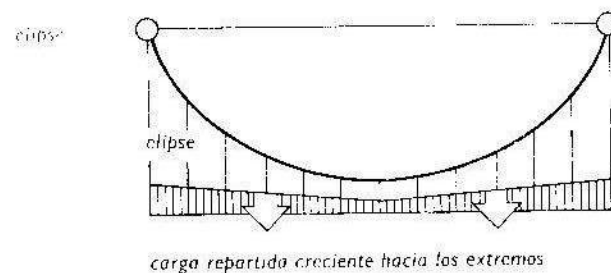
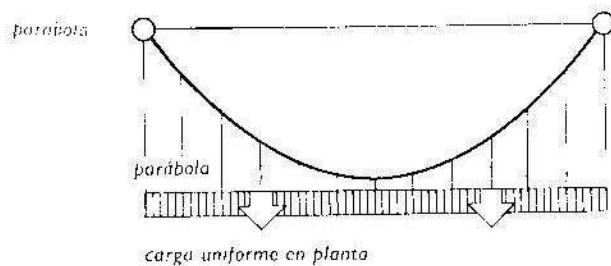
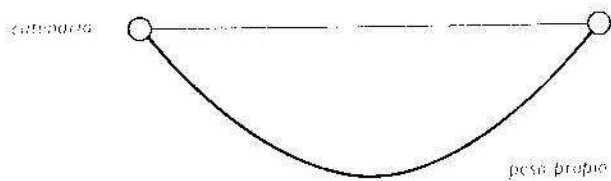
Debido al momento de la reacción horizontal M_H , se compensa la diferencia entre los momentos M_P y M_A , eliminándose la flexión.

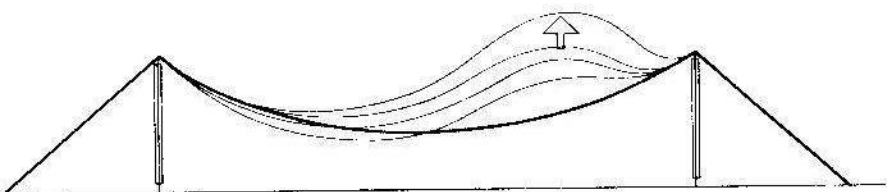
Influencia de la flecha en la distribución de esfuerzos



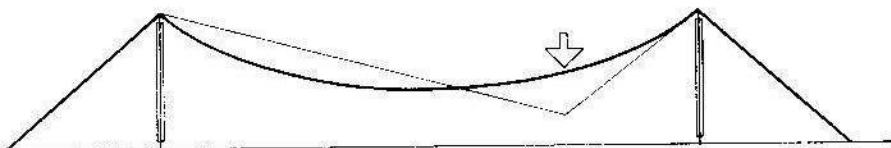
El esfuerzo S en el cable y la reacción horizontal H de un cable colgante son inversamente proporcionales a su flecha. Si la flecha es nula, el esfuerzo del cable y la reacción horizontal resultarán infinitos; es decir, el cable colgante no puede resistir la carga.

Forma geométrica del funicular

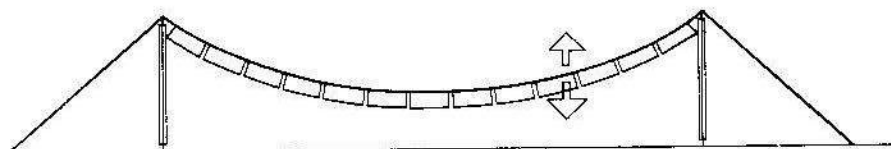




Deformaciones críticas del cable colgante

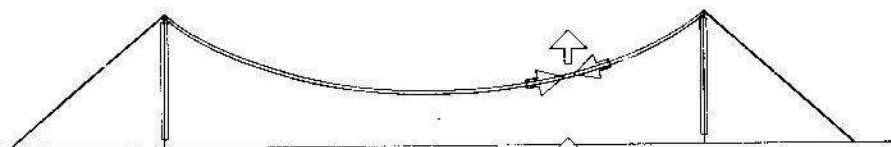


Debido a su reducido peso propio en relación a su luz, y a su flexibilidad, el cable colgante es muy susceptible a la succión del viento, a las vibraciones y a las cargas asimétricas y móviles.

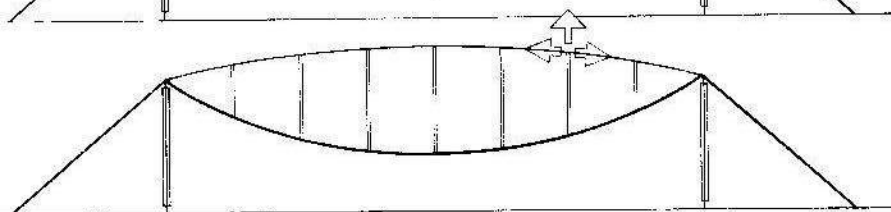


Estabilización del cable colgante

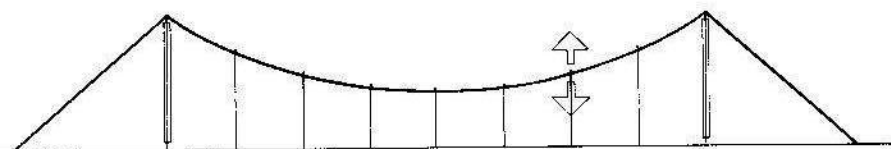
Incremento del peso propio.



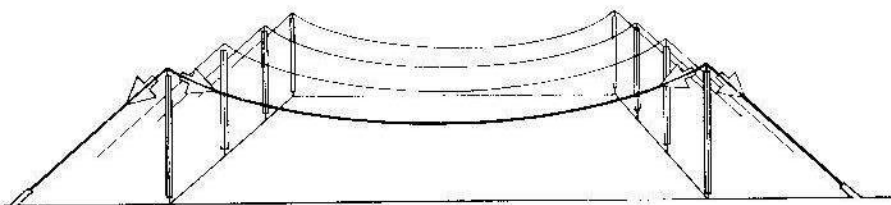
Rigidización mediante construcción como arco invertido (o lámina)



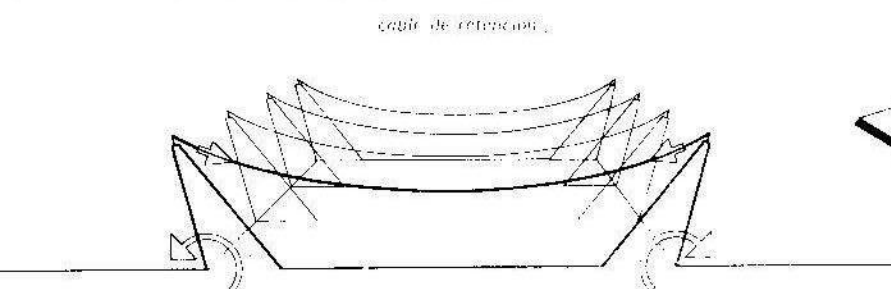
Tensado mediante un cable curvado en sentido opuesto.



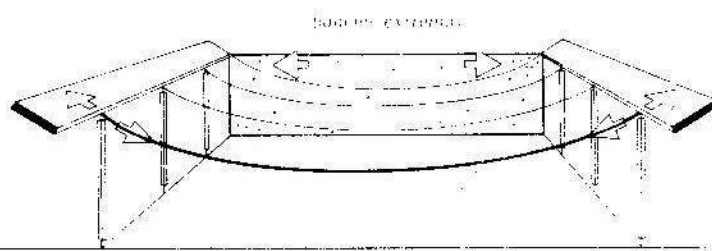
Tensado con cables transversales anclados al suelo.



Sistemas de retención para cables colgantes paralelos



cable de retención

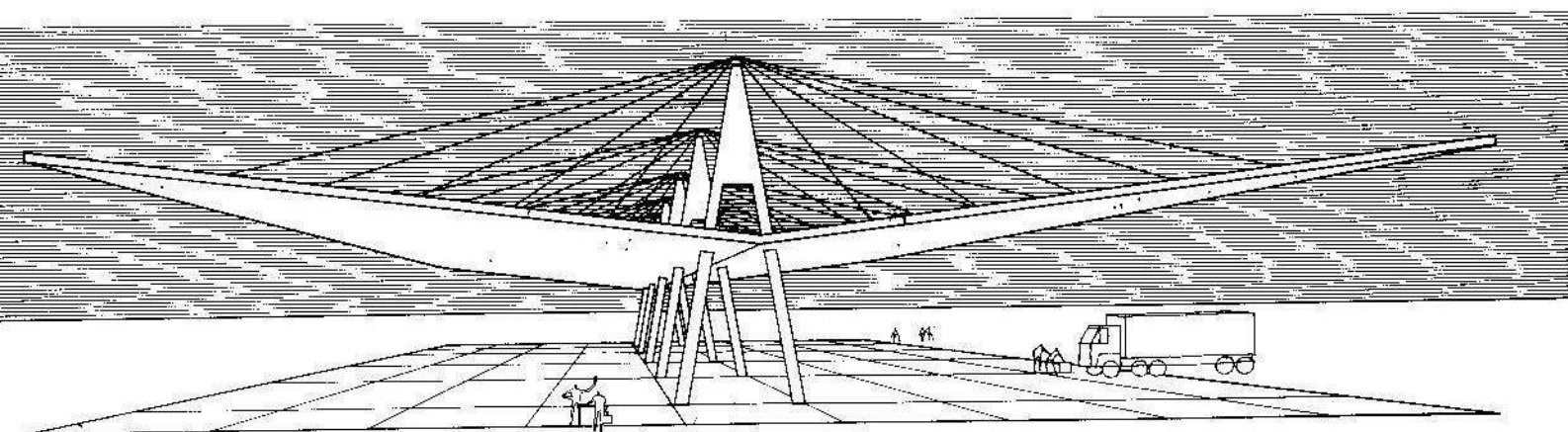


soportes extremos

soportes intermedios

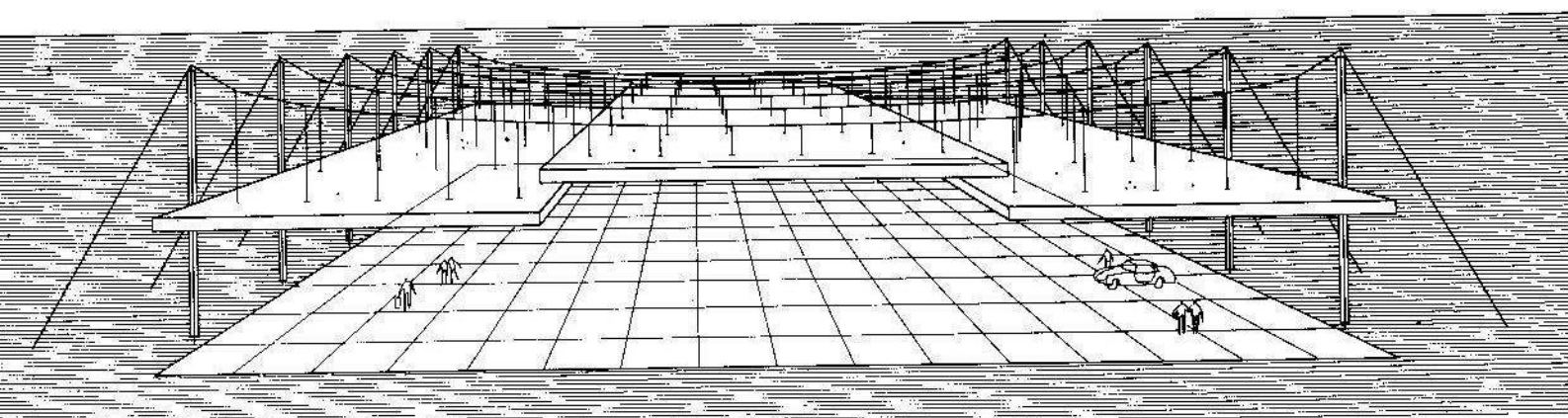
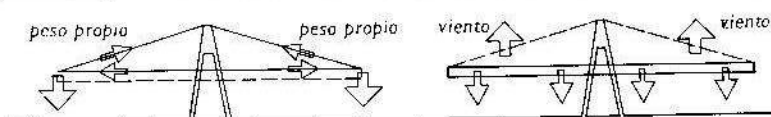
soportes intermedios

Sistemas simples paralelos, estabilizados mediante el peso de la cubierta



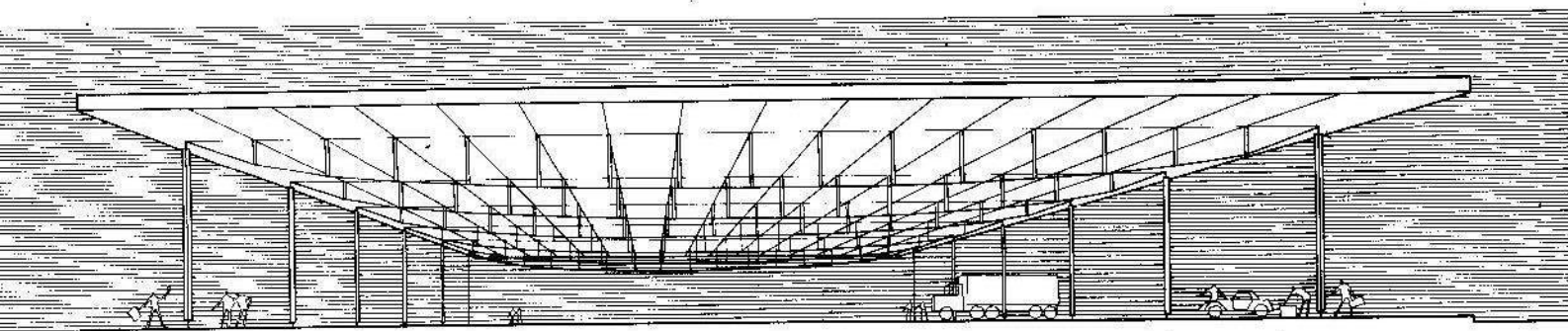
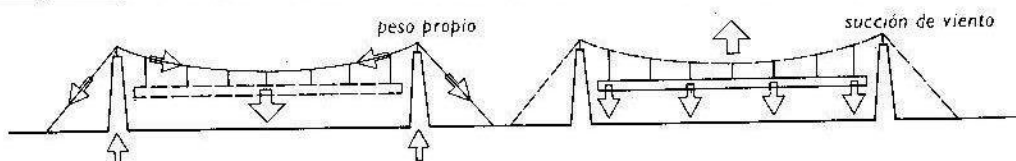
Suspensión directa desde el soporte central:

Mecanismo de suspensión y estabilización.



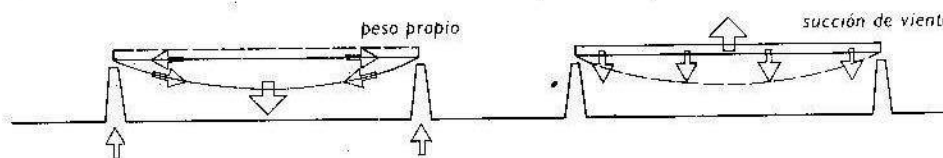
Cubierta suspendida del cable.

Mecanismo de suspensión y estabilización.



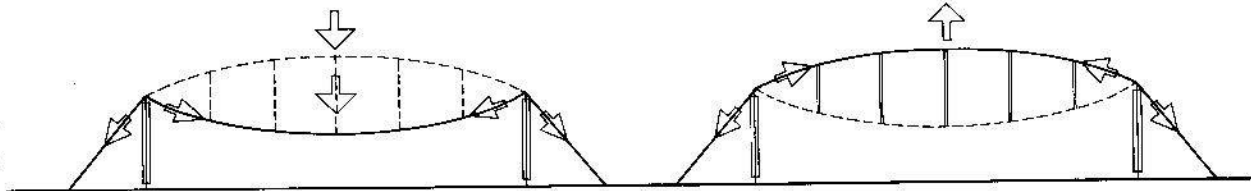
Cubierta apoyada en un cable colgante.

Mecanismo de suspensión y estabilización.

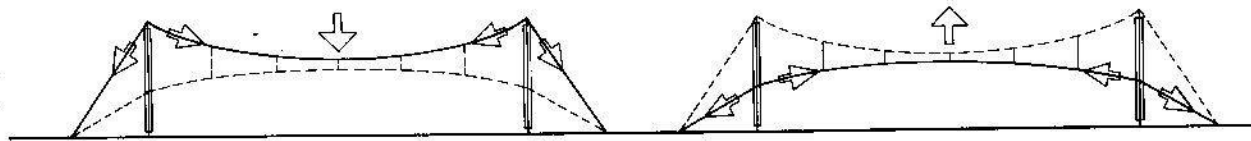


Mecanismo sustentante y estabilizador de los sistemas pretensados

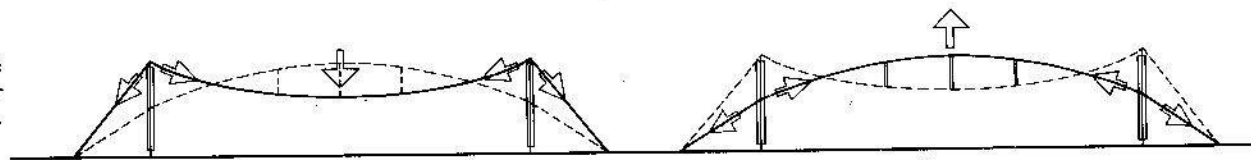
Cable portante por debajo del cable de estabilización.



Cable portante por encima del cable de estabilización.



Cable portante, parte por debajo y parte por encima del cable de estabilización.

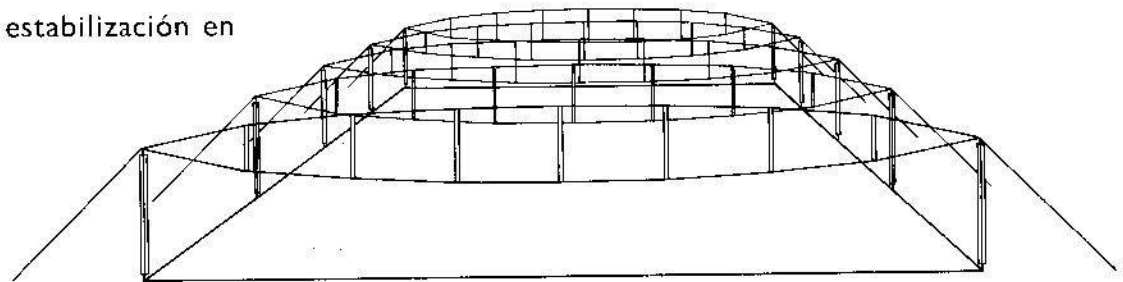


Mecanismo sustentante.

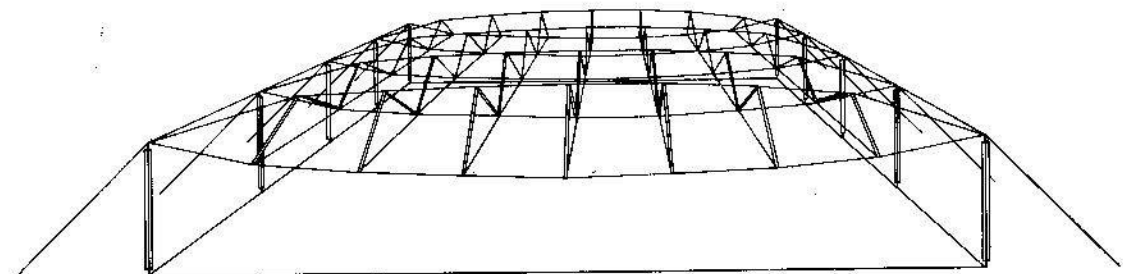
Mecanismo estabilizador.

Sistemas con suspensión y estabilización en una dirección

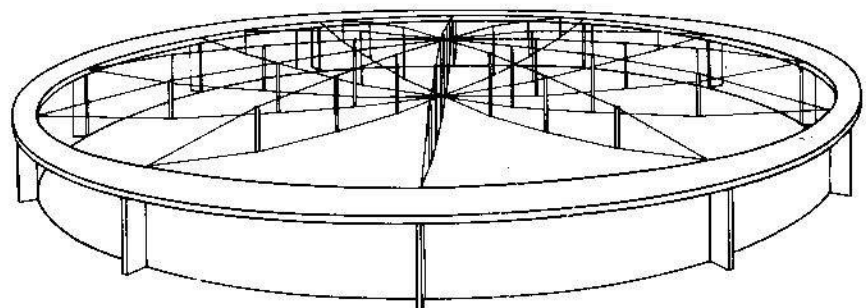
Sistema plano paralelo.



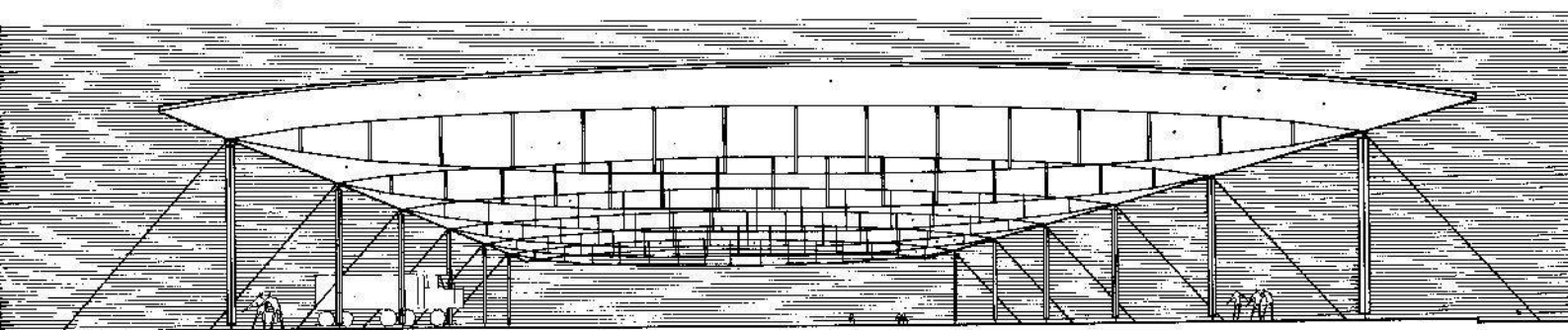
Sistema espacial paralelo.



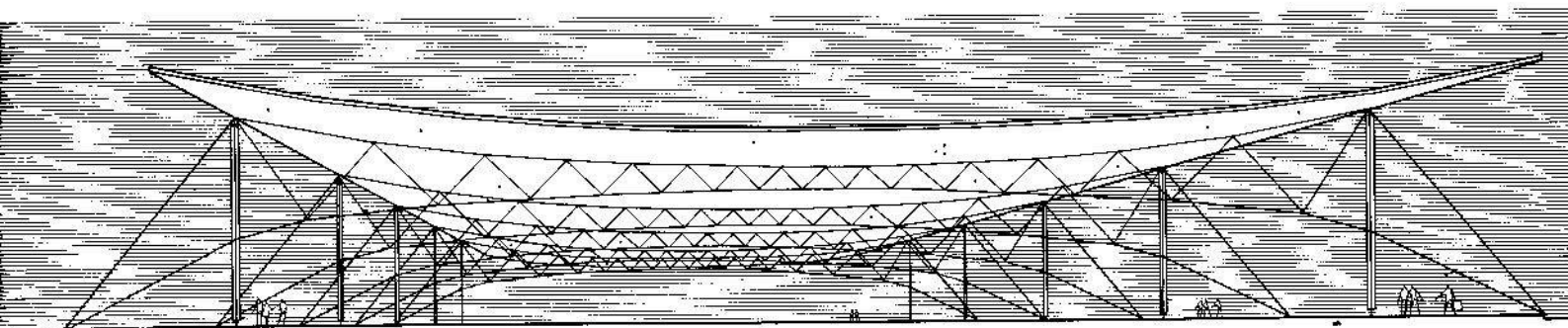
Sistema plano de revolución.



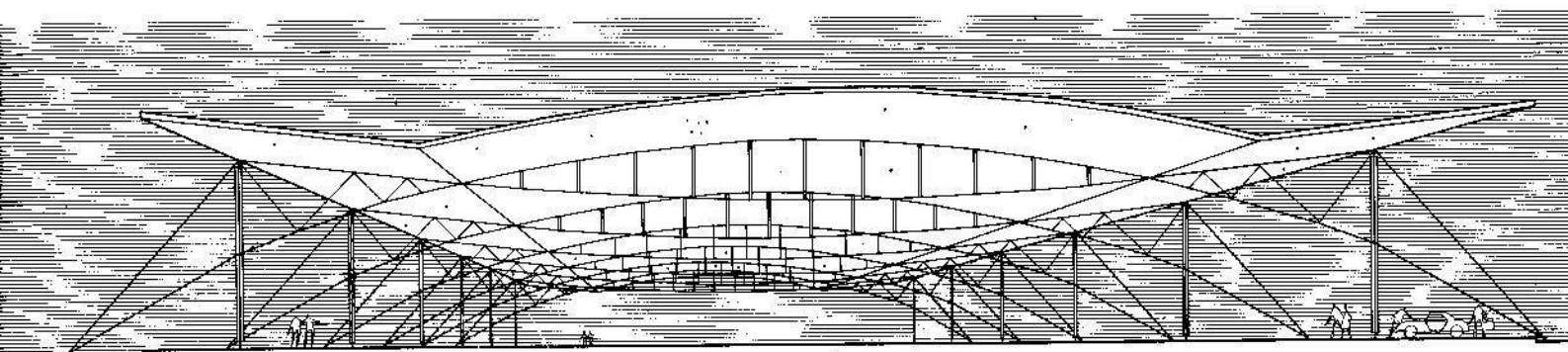
Sistemas planos paralelos estabilizados mediante cables de curvatura opuesta



Cable de estabilización bajo el cable portante.



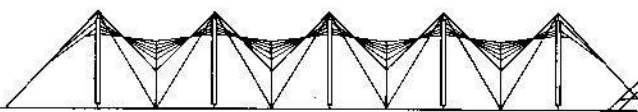
Cable de estabilización encima del cable portante.



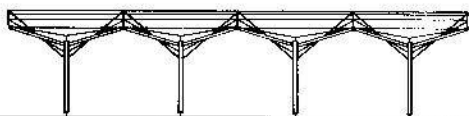
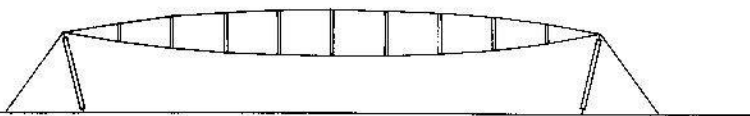
Cable de estabilización, parte por encima y parte por debajo del cable portante.

Sistemas planos con rigidización mediante cables de curvatura opuesta

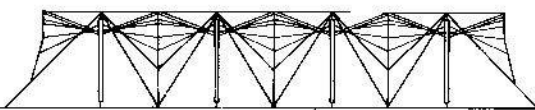
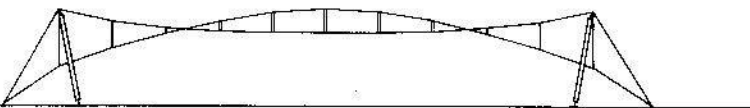
Efectos sustentantes y estabilizadores en planos diferentes



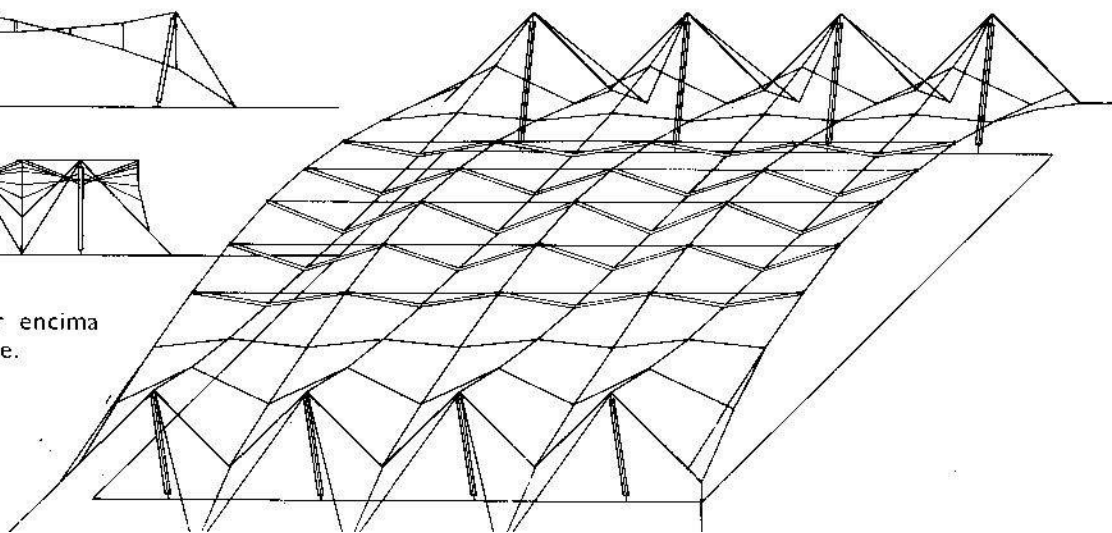
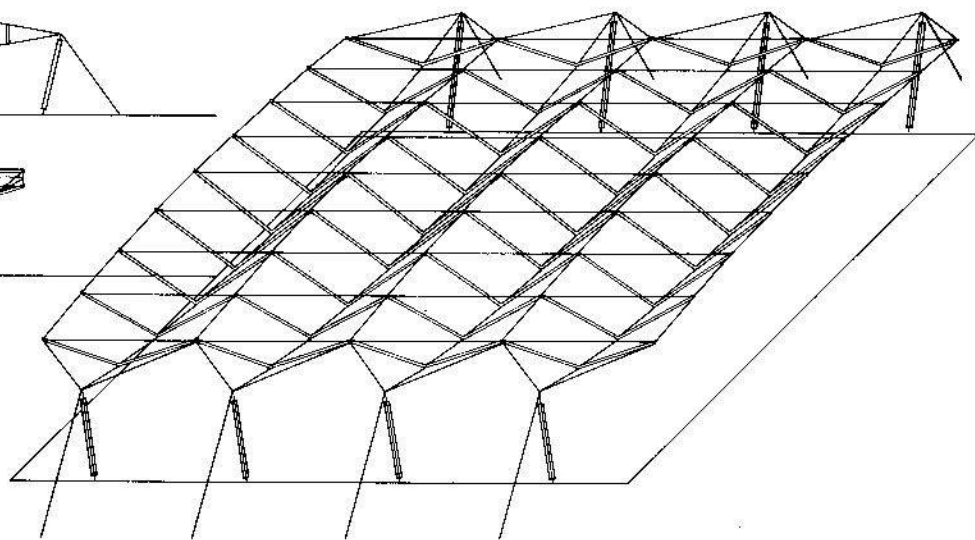
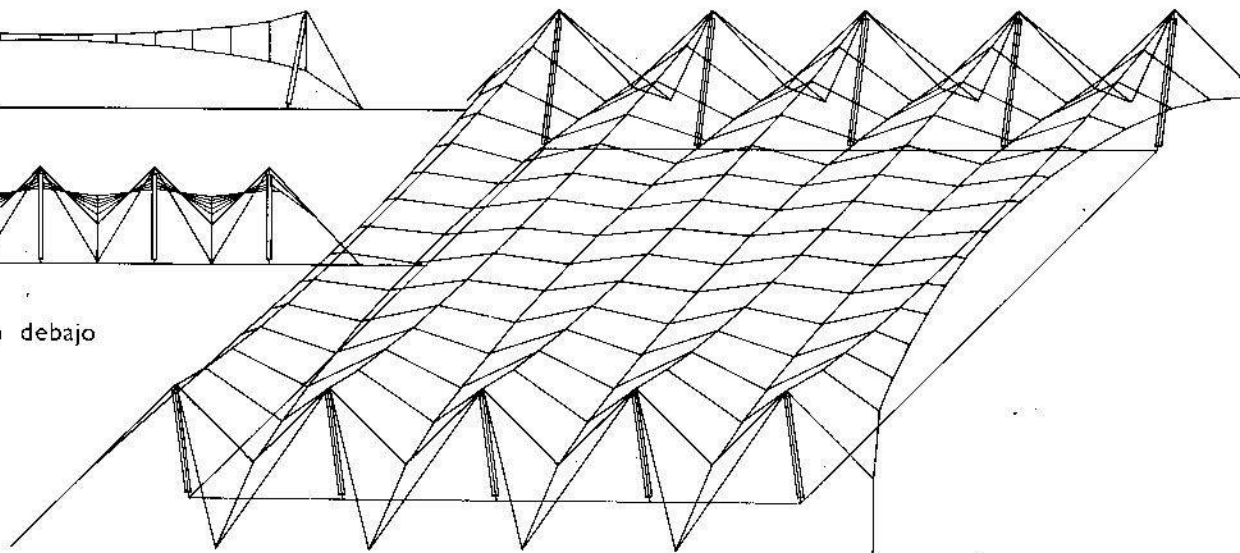
Cable de estabilización debajo del cable portante



Cable de estabilización encima del cable portante.

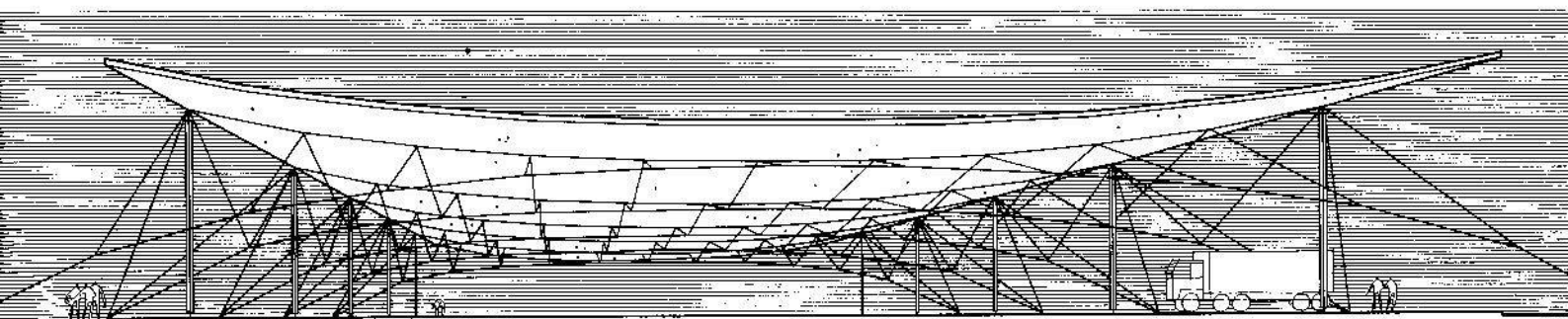


Cable de estabilización, parte por encima y parte por debajo del cable portante.

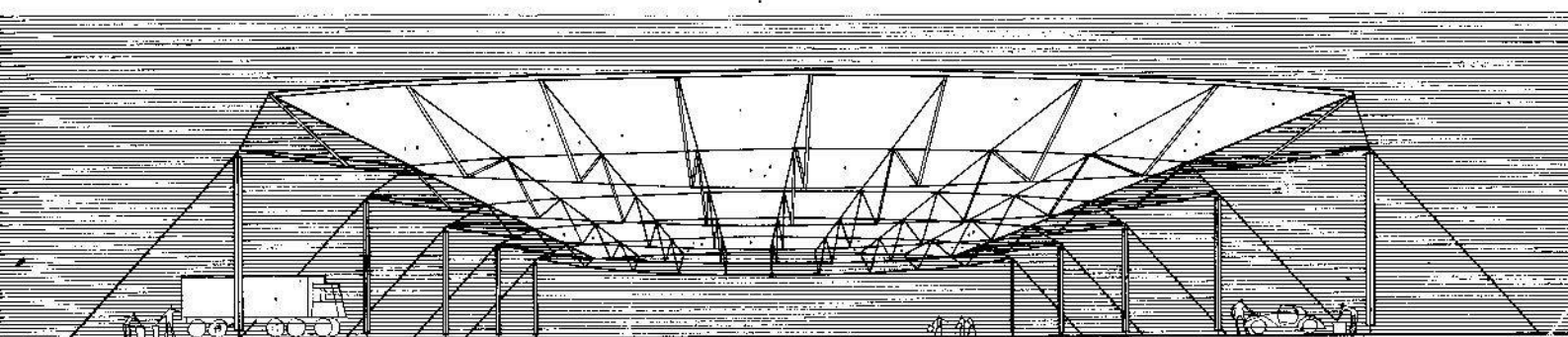


Sistemas espaciales paralelos con rigidización mediante cables de curvatura opuesta

Cable portante y cable de rigidización en diferentes planos

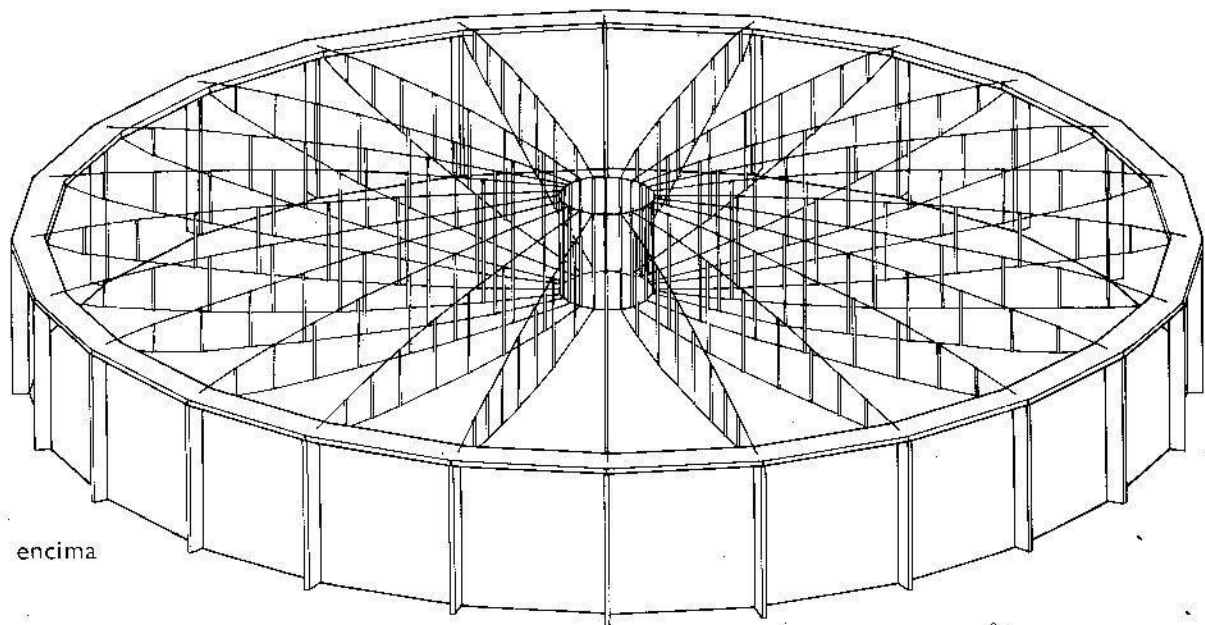


Cable de estabilización debajo del cable portante.



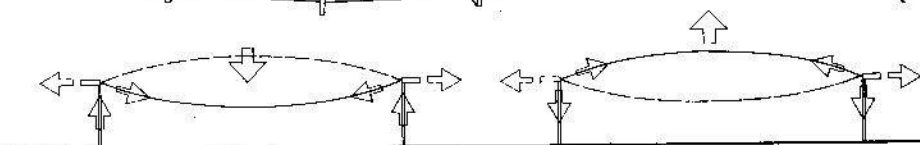
Cable de estabilización encima del cable portante.

Sistemas de revolución planos con rigidización mediante cables de curvatura opuesta



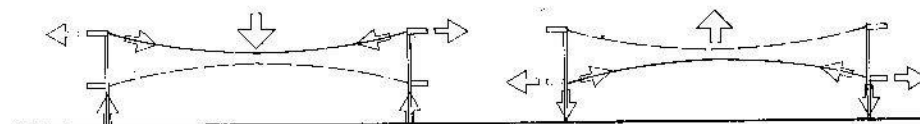
Cable de estabilización encima del cable portante.

Mecanismo de suspensión y estabilización.



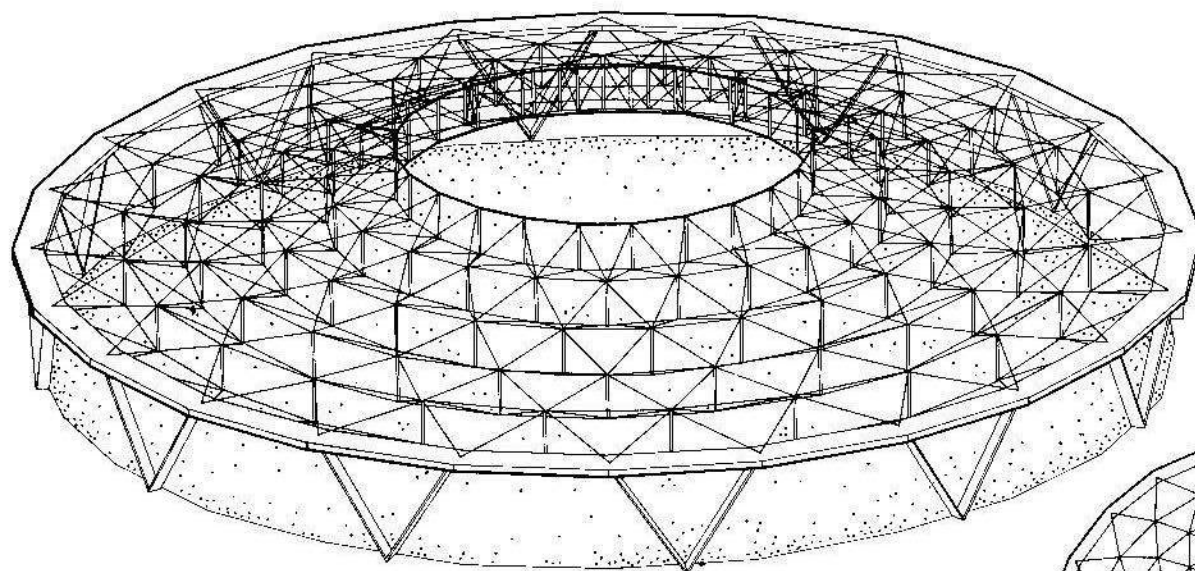
Cable de estabilización debajo del cable portante.

Mecanismo de suspensión y estabilización.

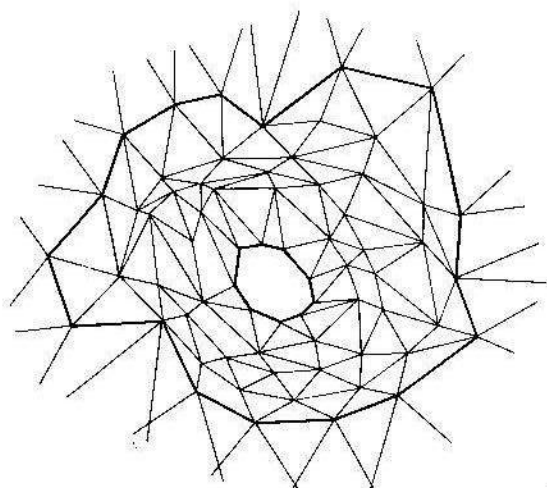
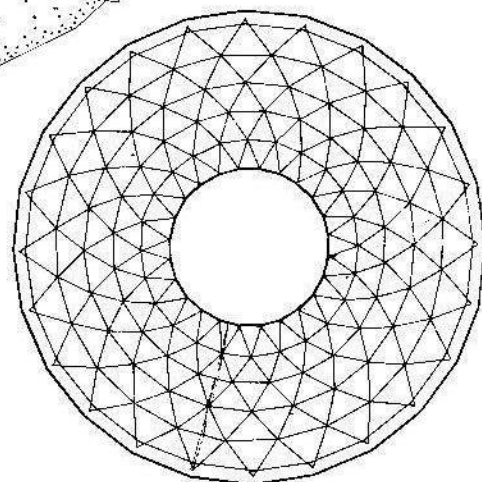




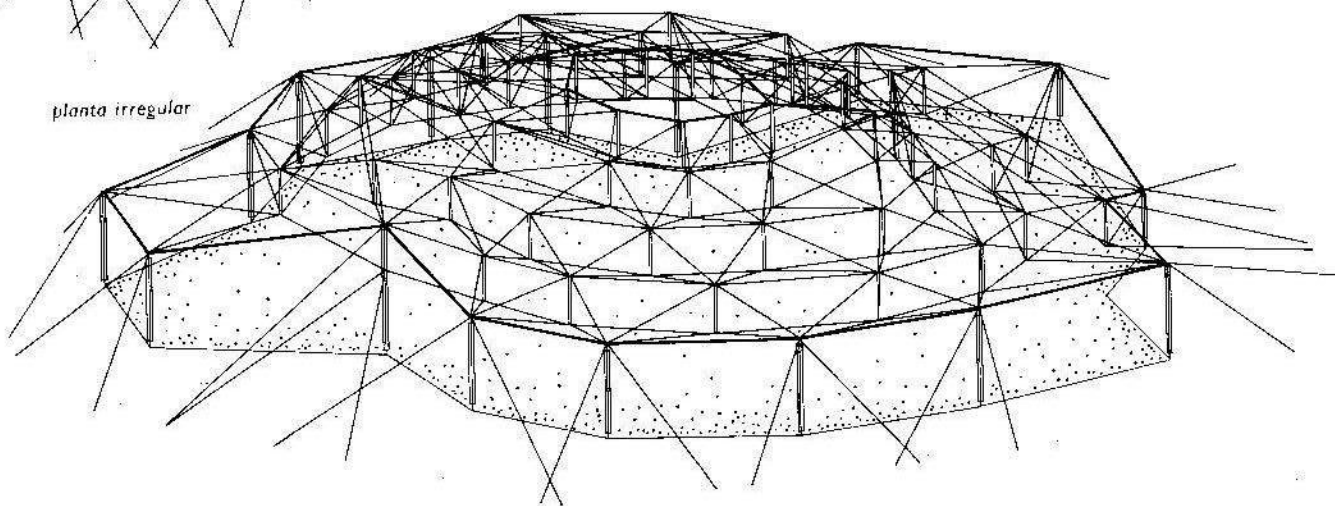
Sistema con entramado de tipo anular en dirección ascendente hacia el centro



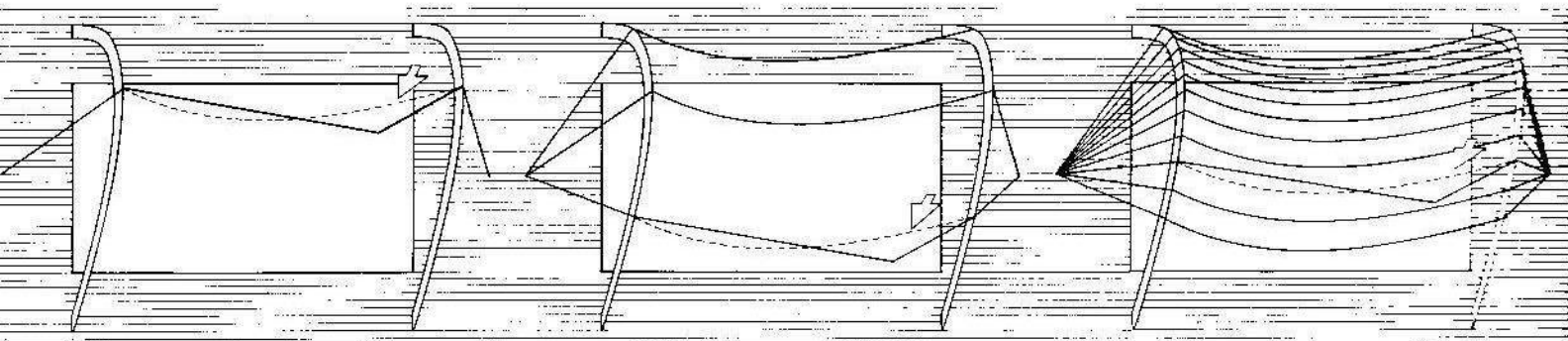
planta circular



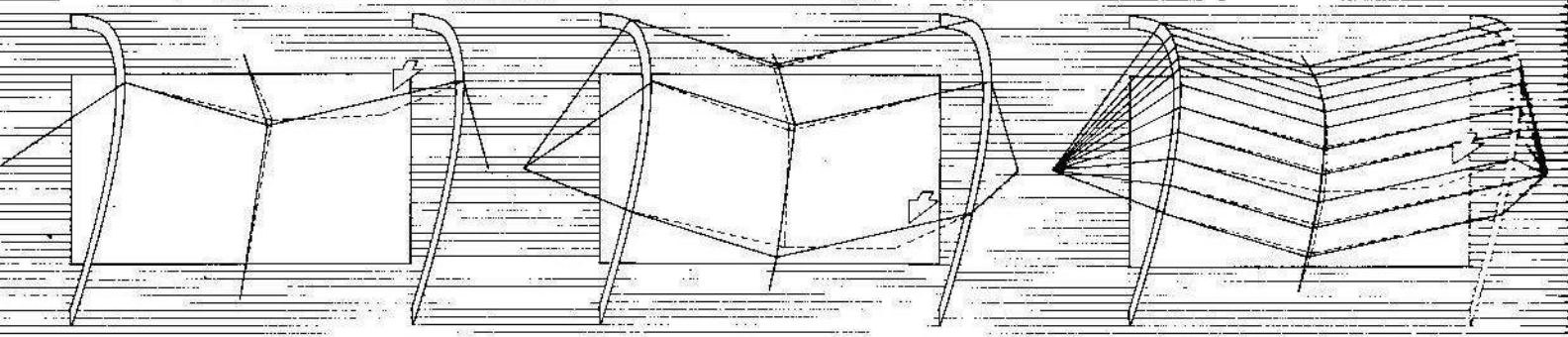
planta irregular



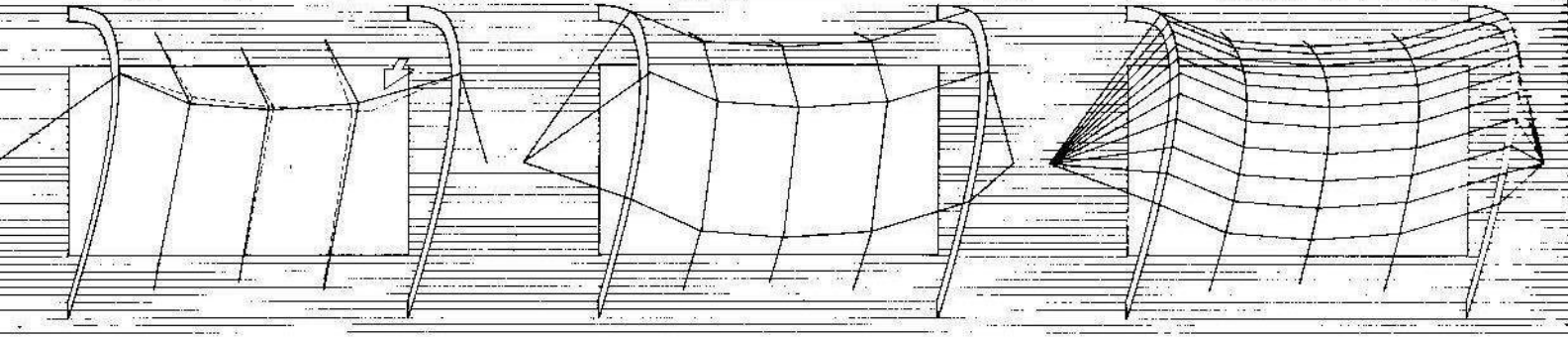
Sistemas pretensados con cables de estabilización transversales
Desarrollo desde el simple cable colgante hasta la red de cables con curvatura opuesta.



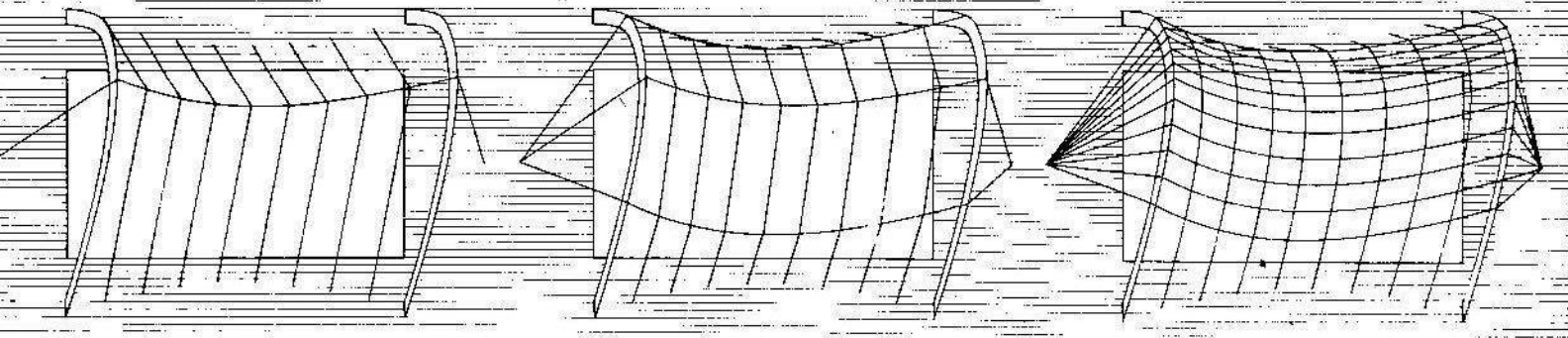
La carga aislada produce mayor deformación, que permanece localizada en el cable, bajo la carga.



El cable de estabilización transversal tensa el cable portante y amortigua la deformación.



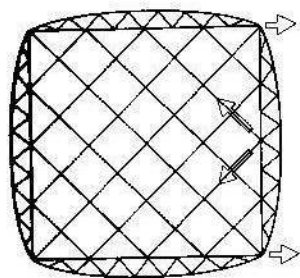
El incremento de cables estabilizadores aumenta la resistencia contra las cargas puntuales.



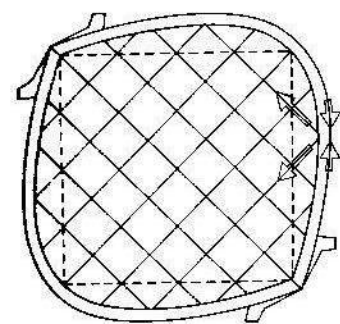
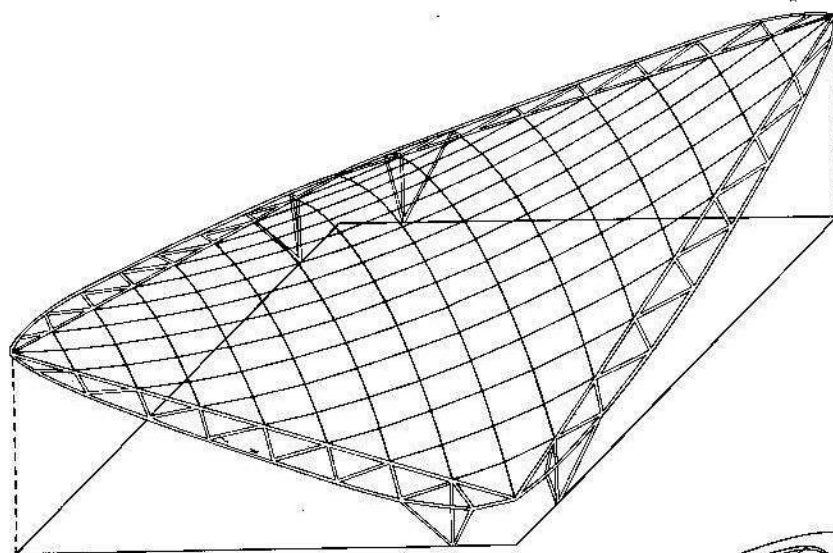
Todos los cables participan en el mecanismo para resistir la deformación debida a cargas aisladas.

Sistemas de bordes para redes de cables con curvaturas opuestas

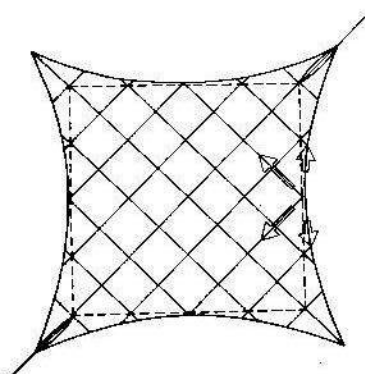
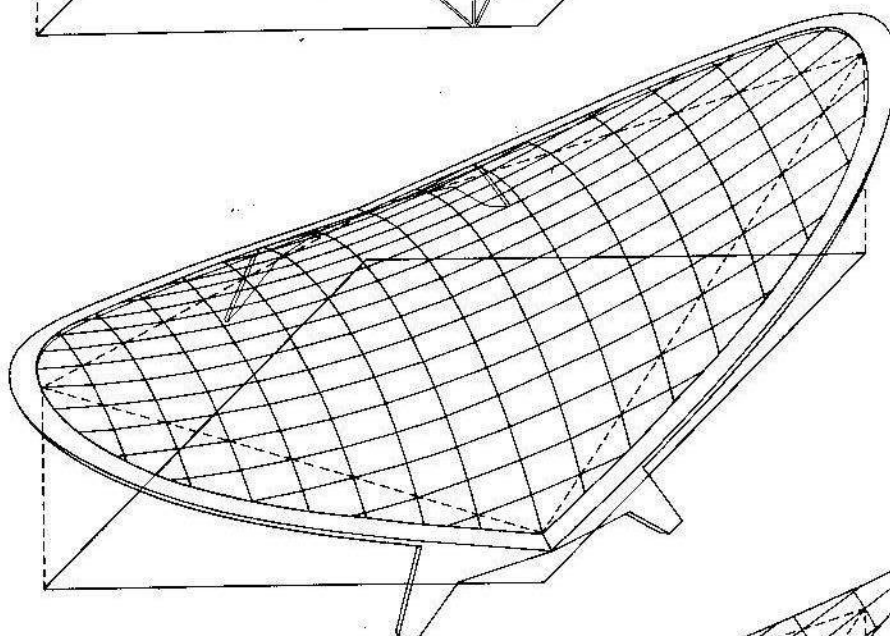
Derivación de la planta cuadrada.



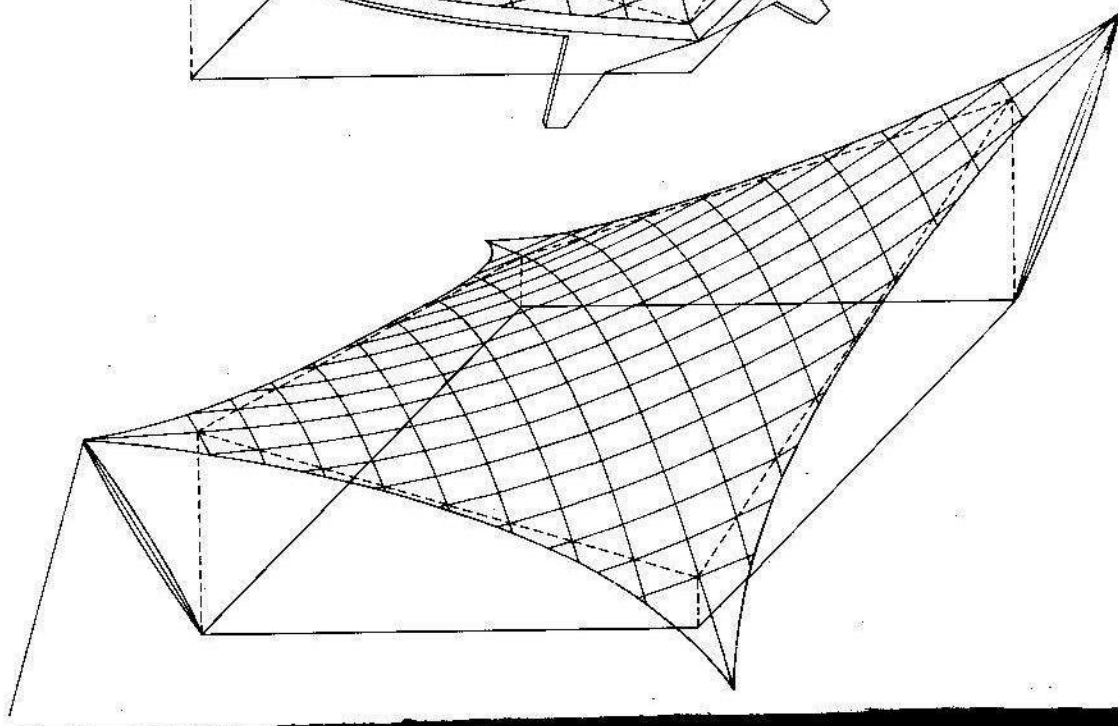
Cerchas perimetrales inclinadas sobre soportes.



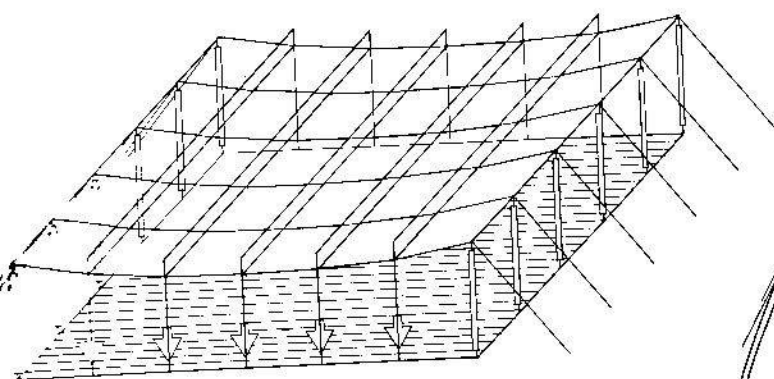
Arcos inclinados sobre bastidores.



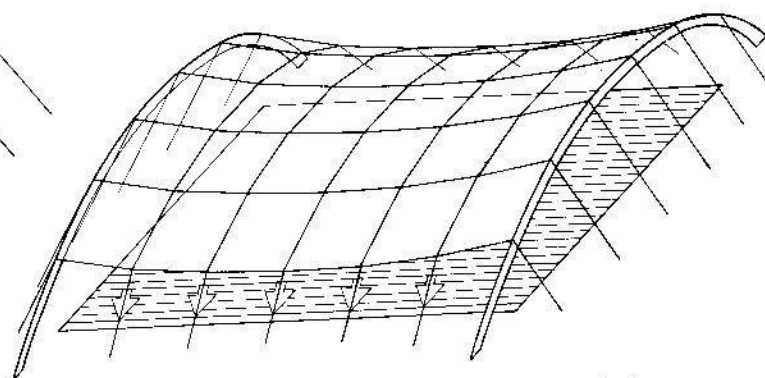
Cables de borde entre pilares venteados.



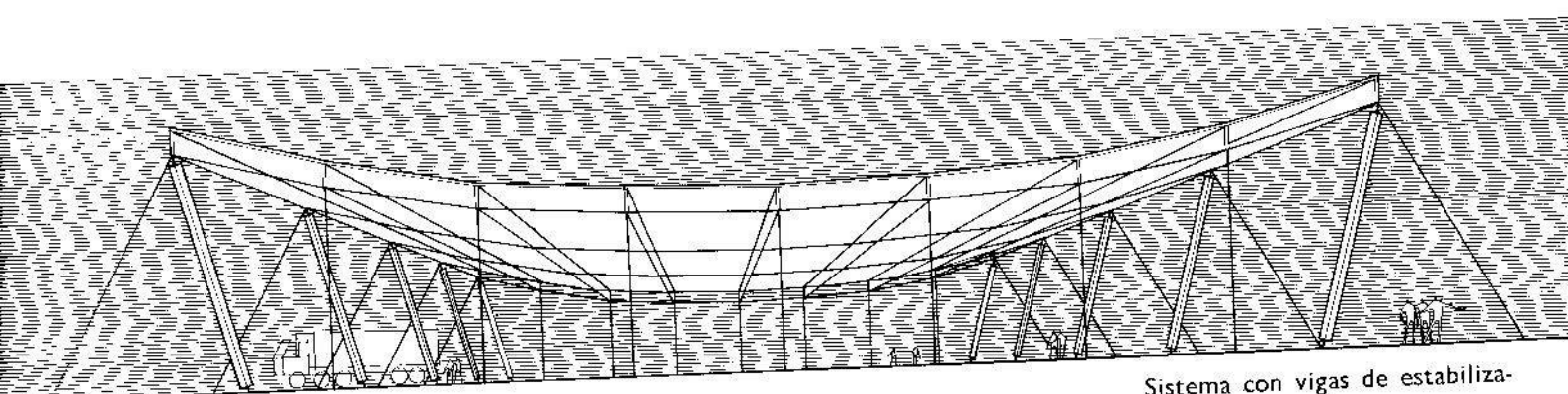
Sistemas pretensados con estabilización transversal



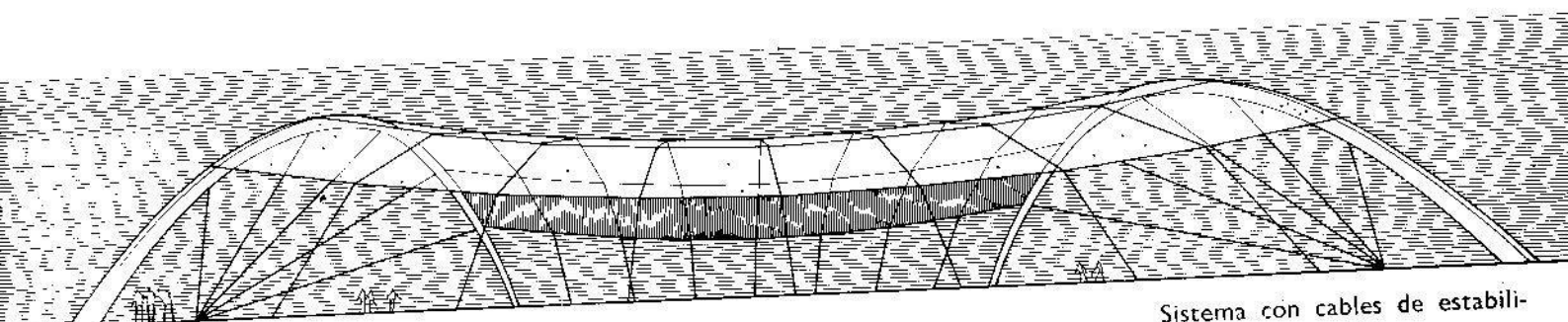
Estabilización mediante vigas transversales ancladas al suelo.



Estabilización mediante cables transversales anclados al suelo, con curvatura opuesta a la del cable portante.

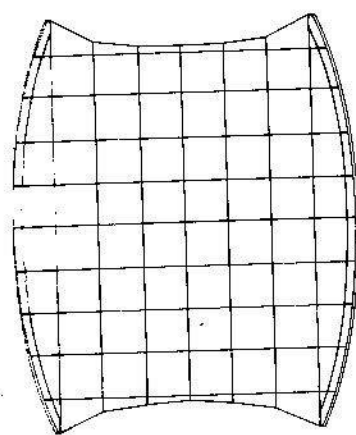
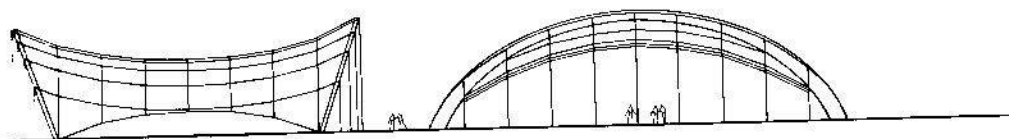


Sistema con vigas de estabilización transversales.

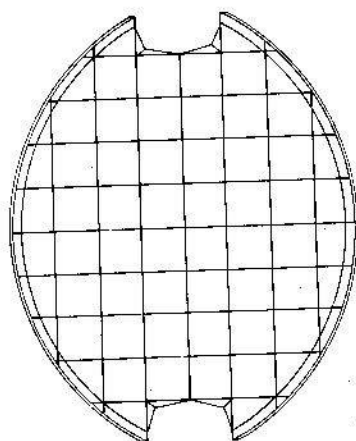
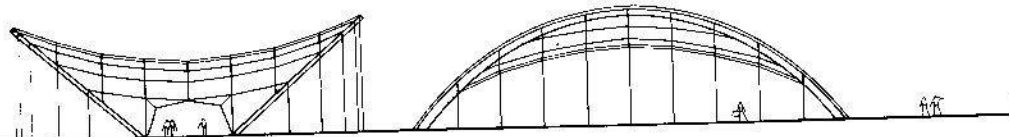
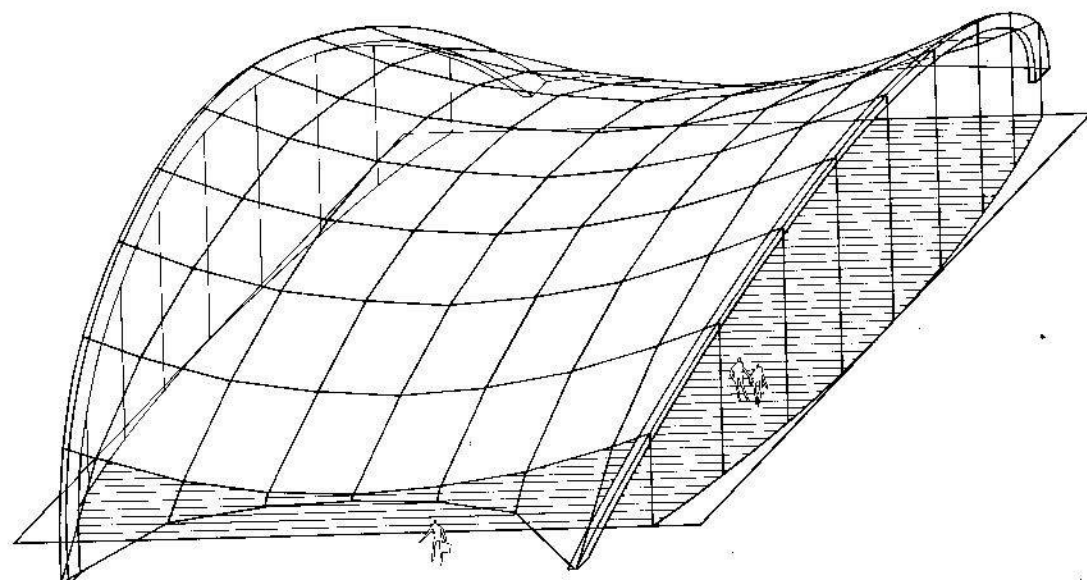


Sistema con cables de estabilización transversales.

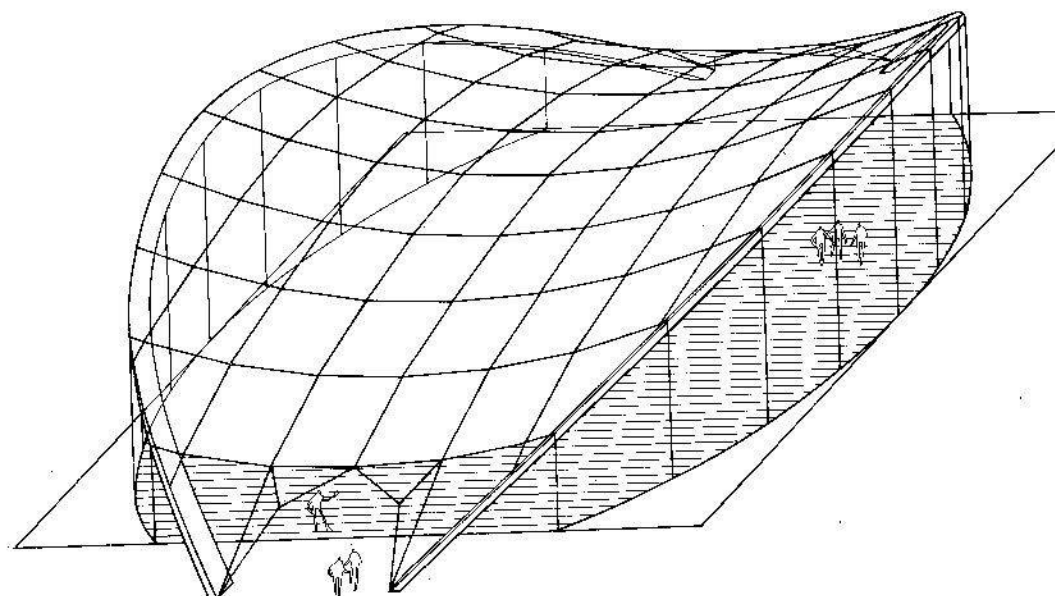
Sistemas de arcos para redes de cables con curvaturas opuestas



Arcos inclinados levemente hacia el exterior.

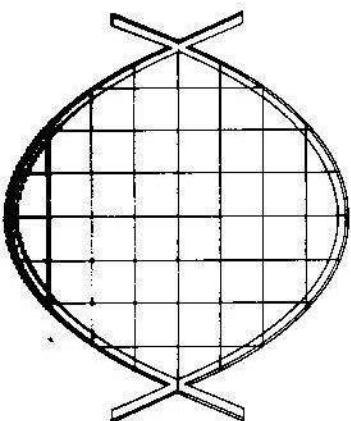


Apoyos de los arcos dispuestos hacia el interior.

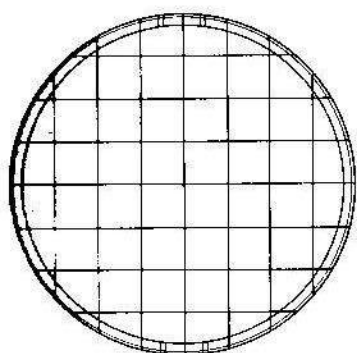
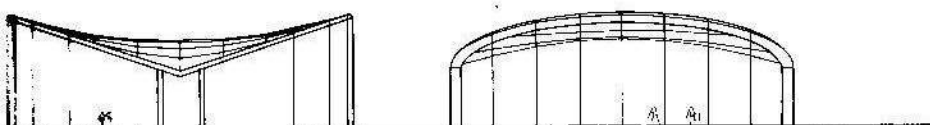
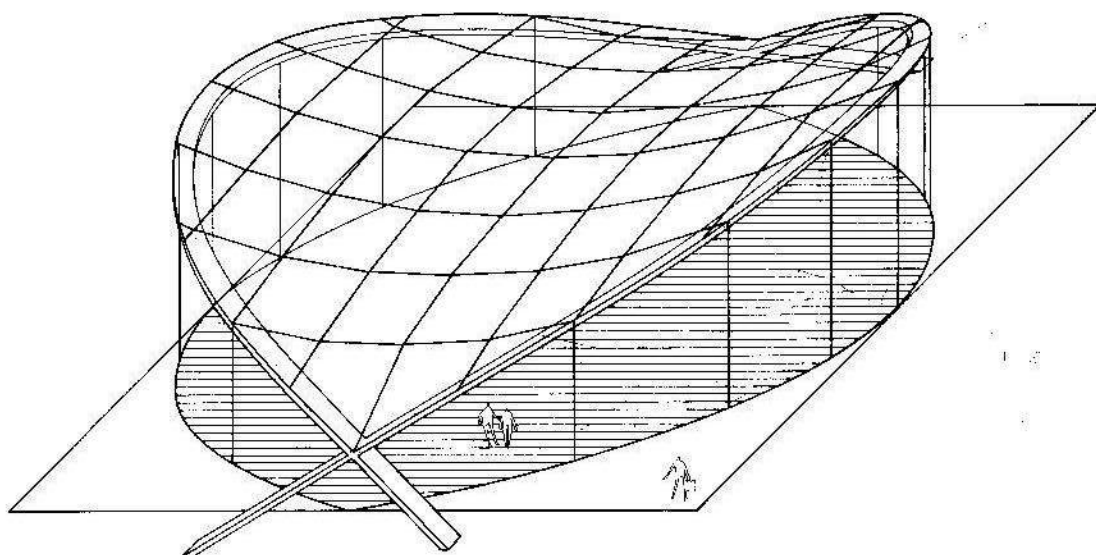


Sistemas de arcos para redes de cables con curvaturas opuestas

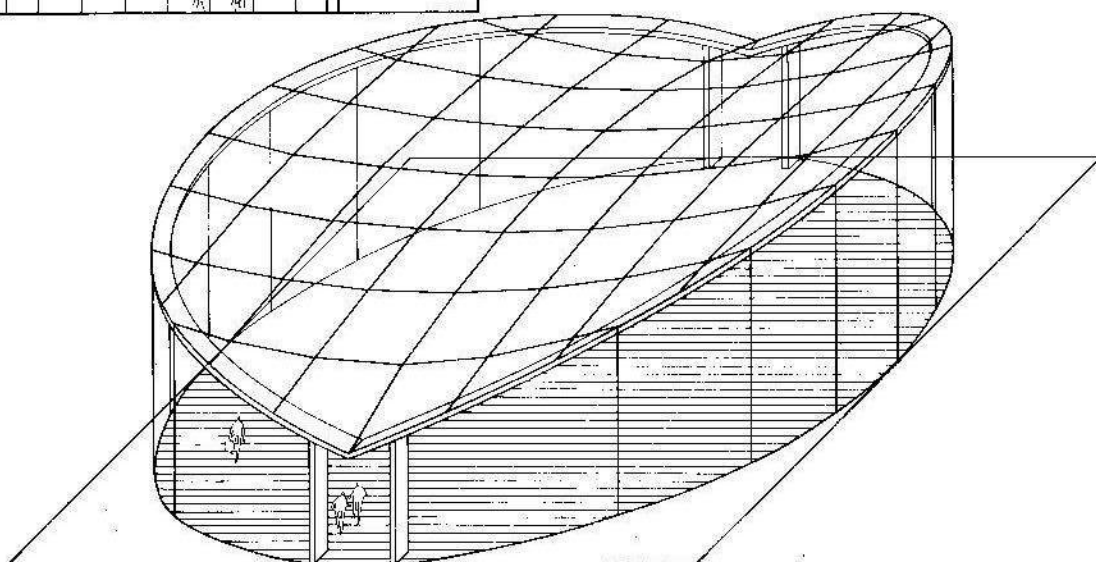
Transición desde el arco hasta el anillo soporte.



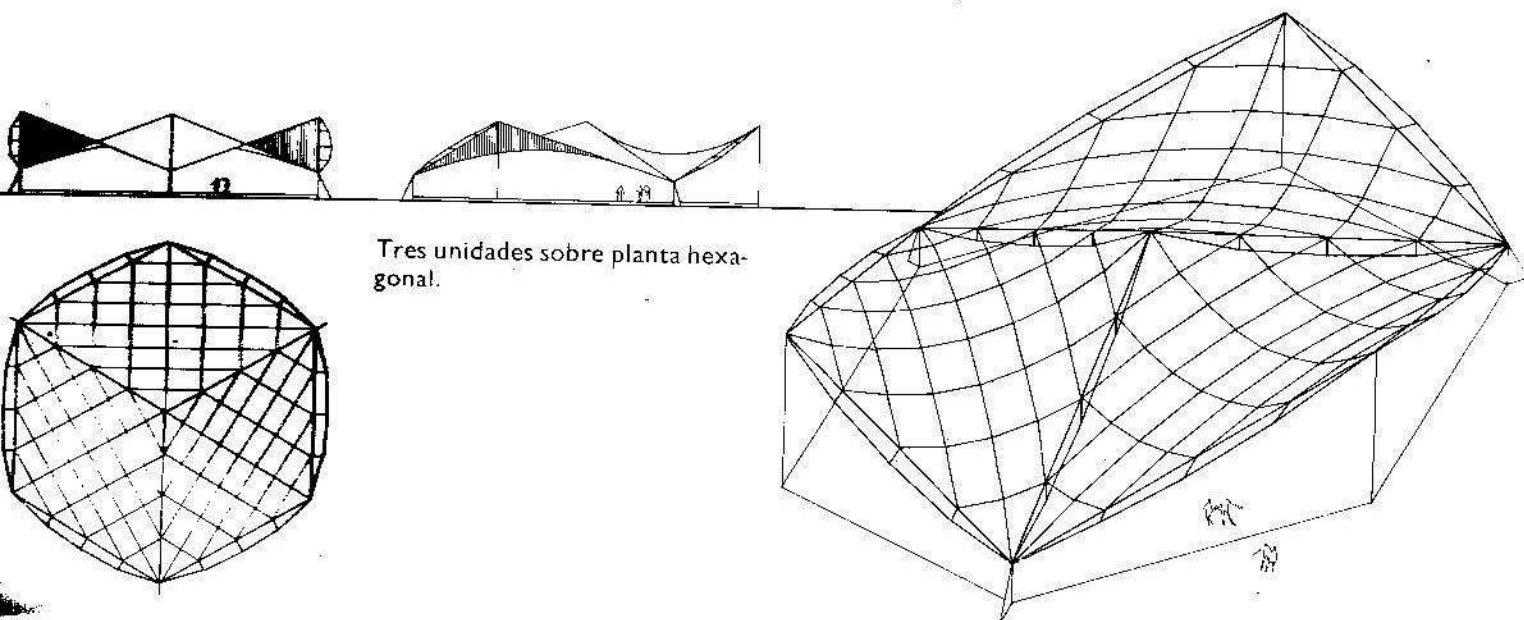
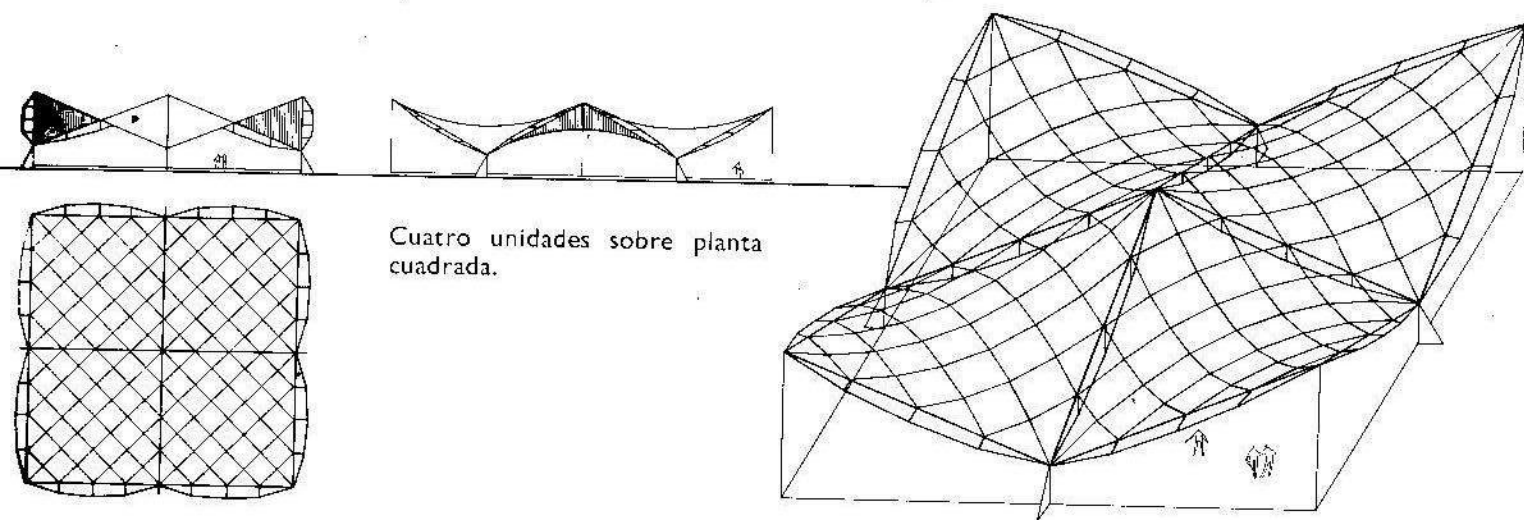
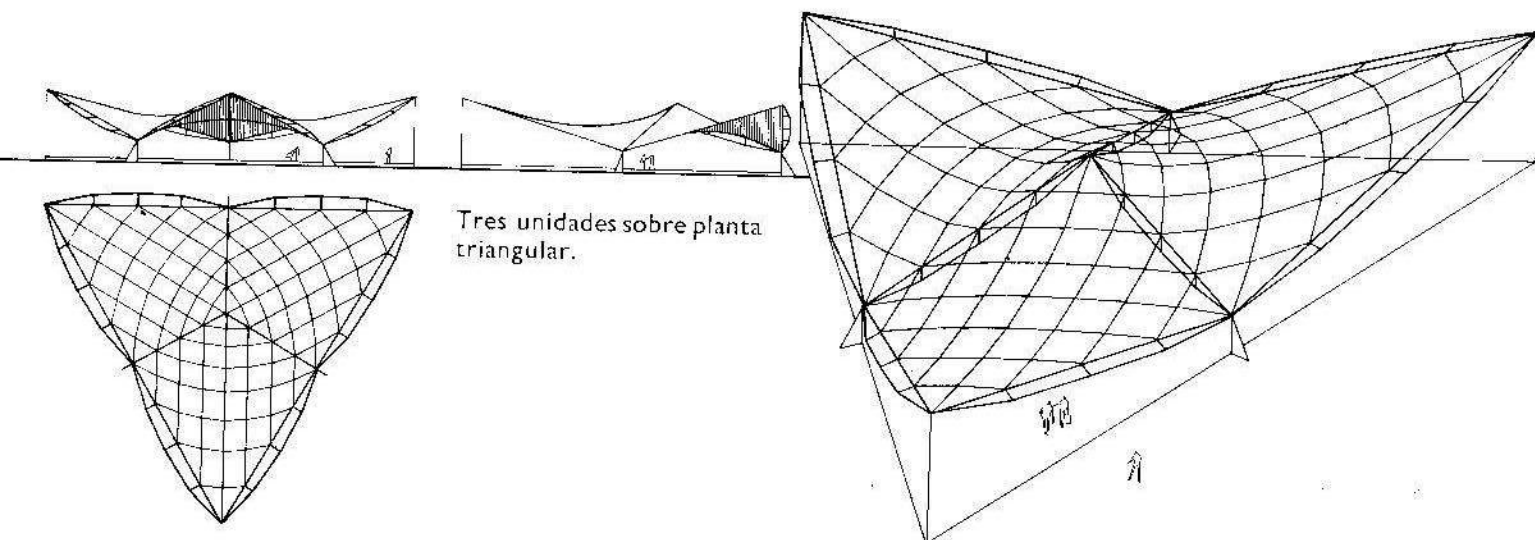
Arcos inclinados cruzándose entre sí por encima de sus apoyos.



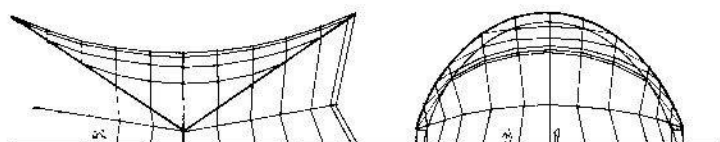
Anillo soporte inclinado, sobre soportes extremos.



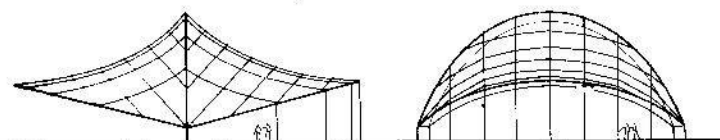
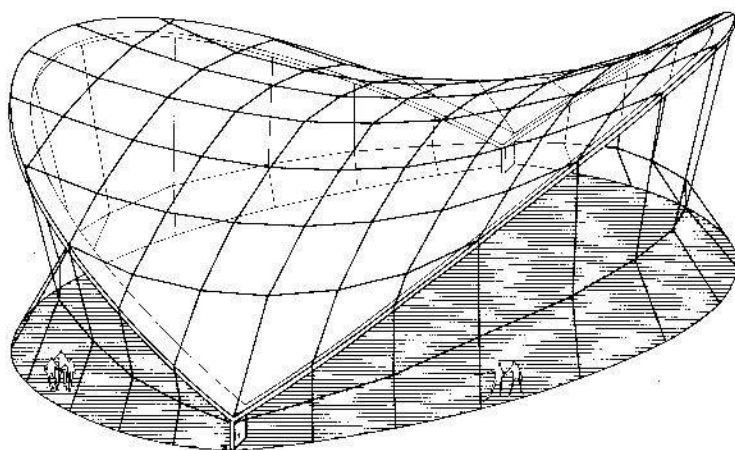
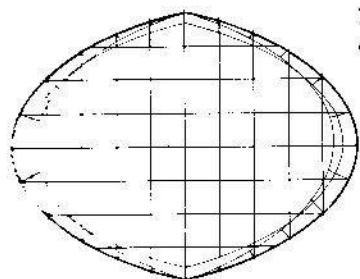
Combinación de redes de cables con curvaturas opuestas, con bordes rectos



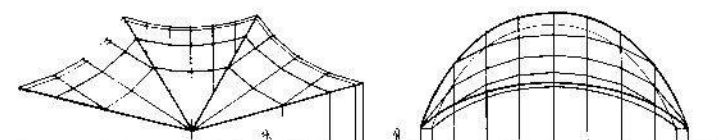
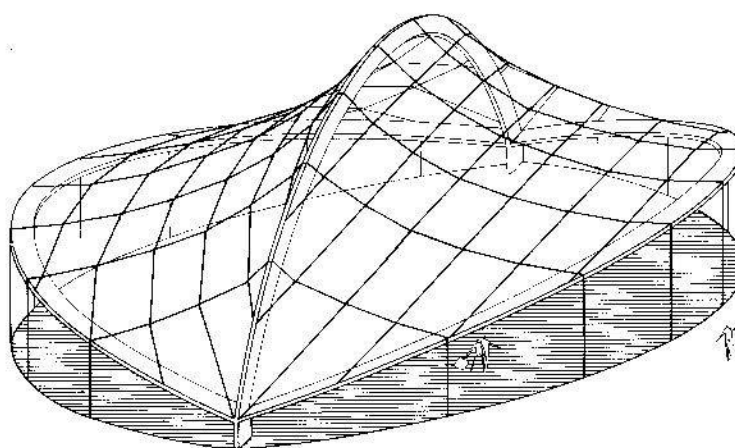
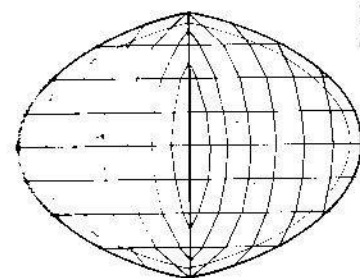
Combinación de redes de cables con curvaturas opuestas, con arcos de borde



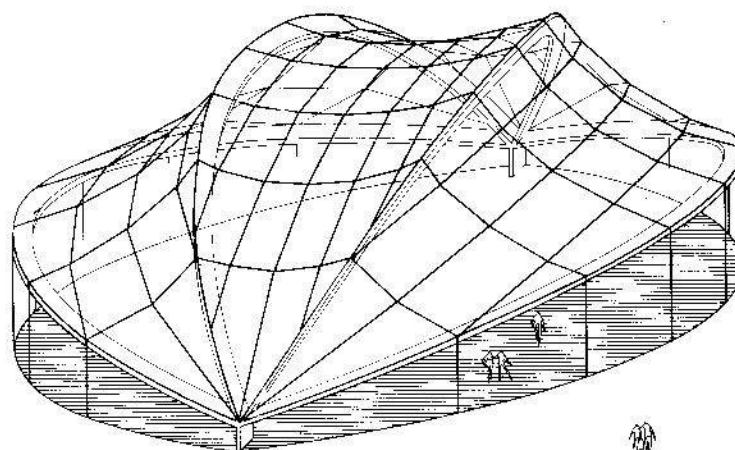
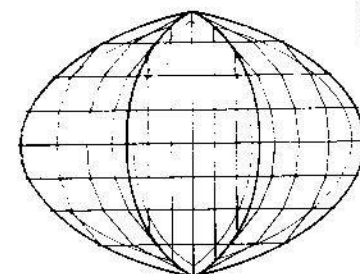
2 arcos de borde con apoyos comunes.



2 arcos de borde con un arco central.

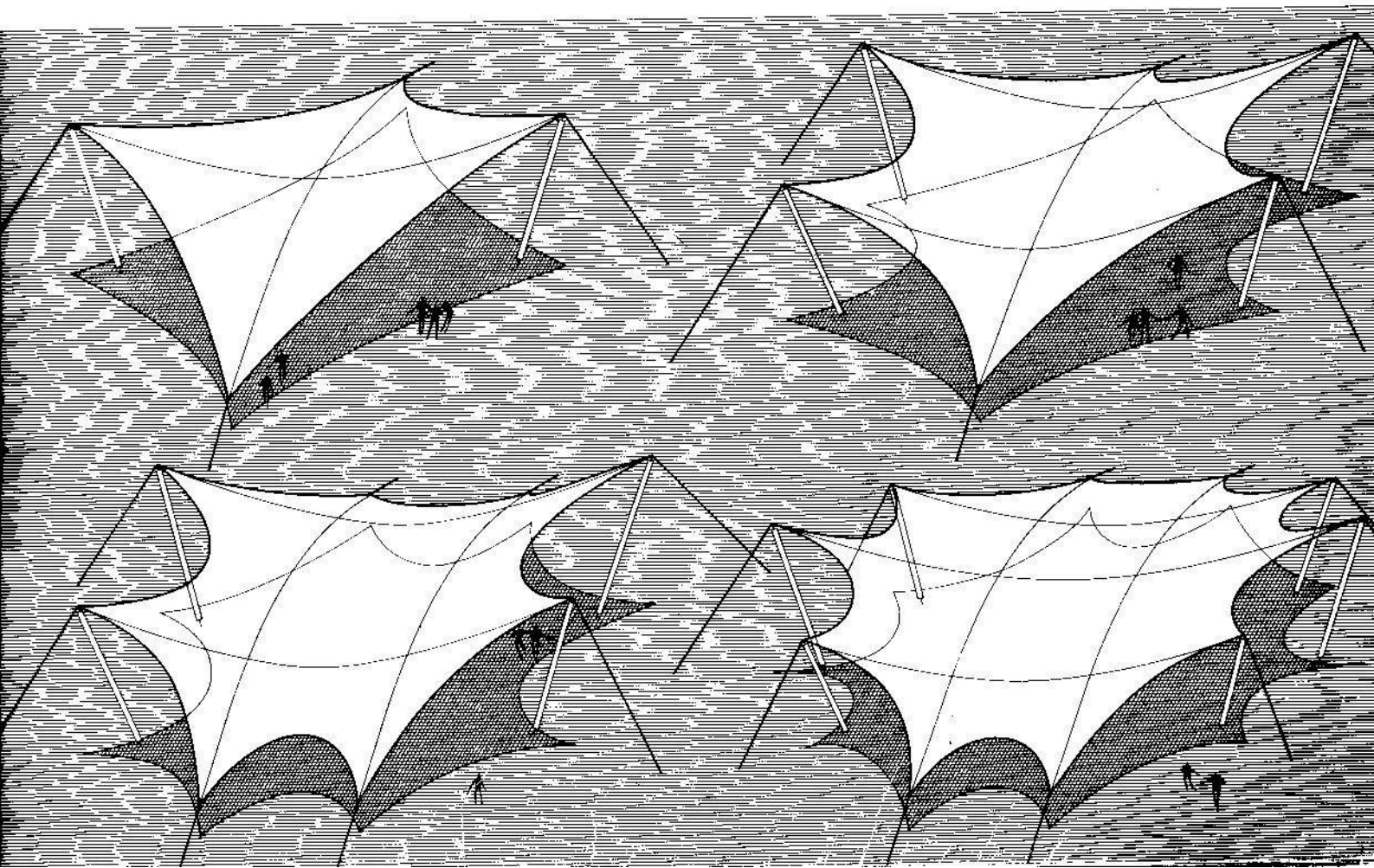
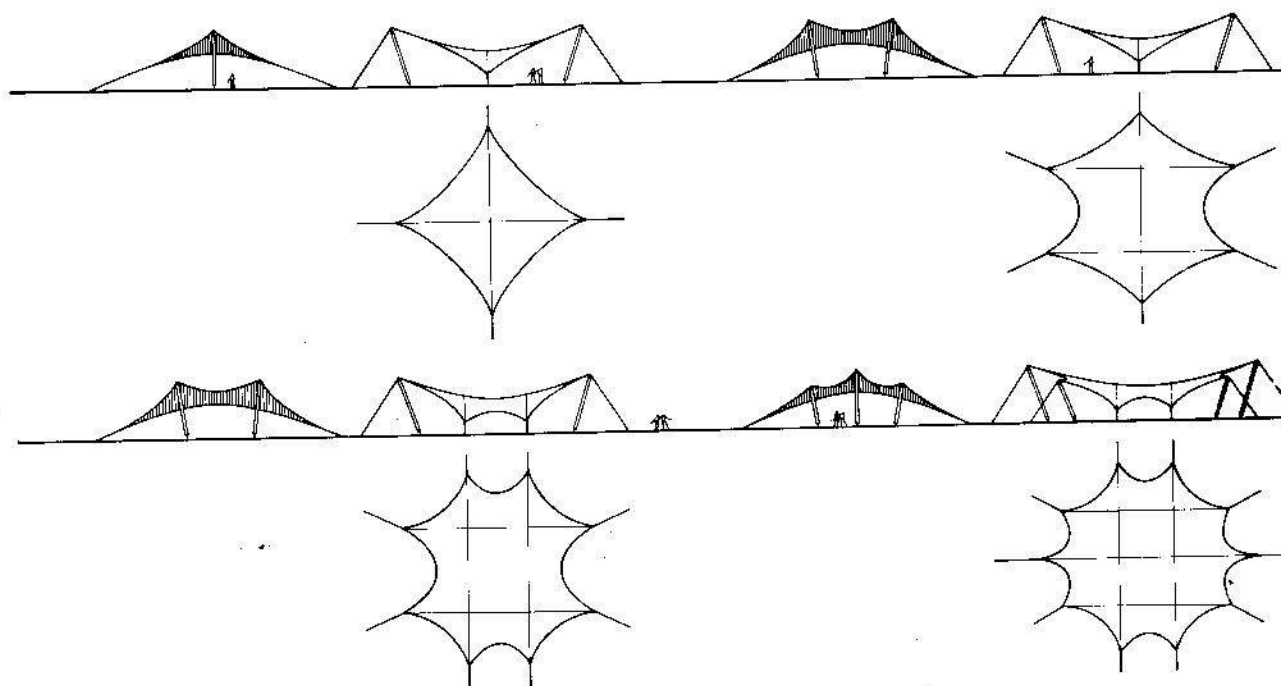


2 arcos de borde con 2 arcos intermedios.



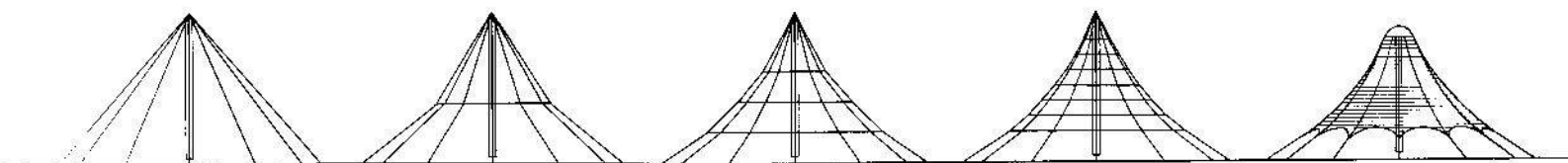
Sistemas en forma de tienda, con apoyo exterior
mediante elementos en compresión

Sistemas con superficies en
forma de silla de montar.



Sistemas en forma de tienda con apoyo interior mediante elementos de compresión

Sistemas de superficies peraltadas.



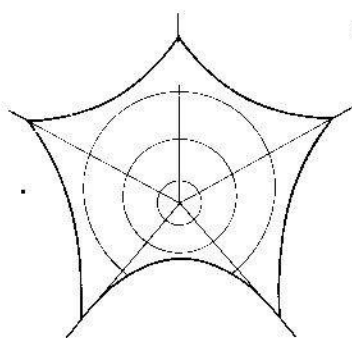
Derivación de la superficie peraltada a partir de la red de cables de forma cónica.

Mediante zunchado con cables anulares horizontales, se incrementa la resistencia contra las cargas asimétricas. De la condensación de los cables paralelos y meridianos resulta

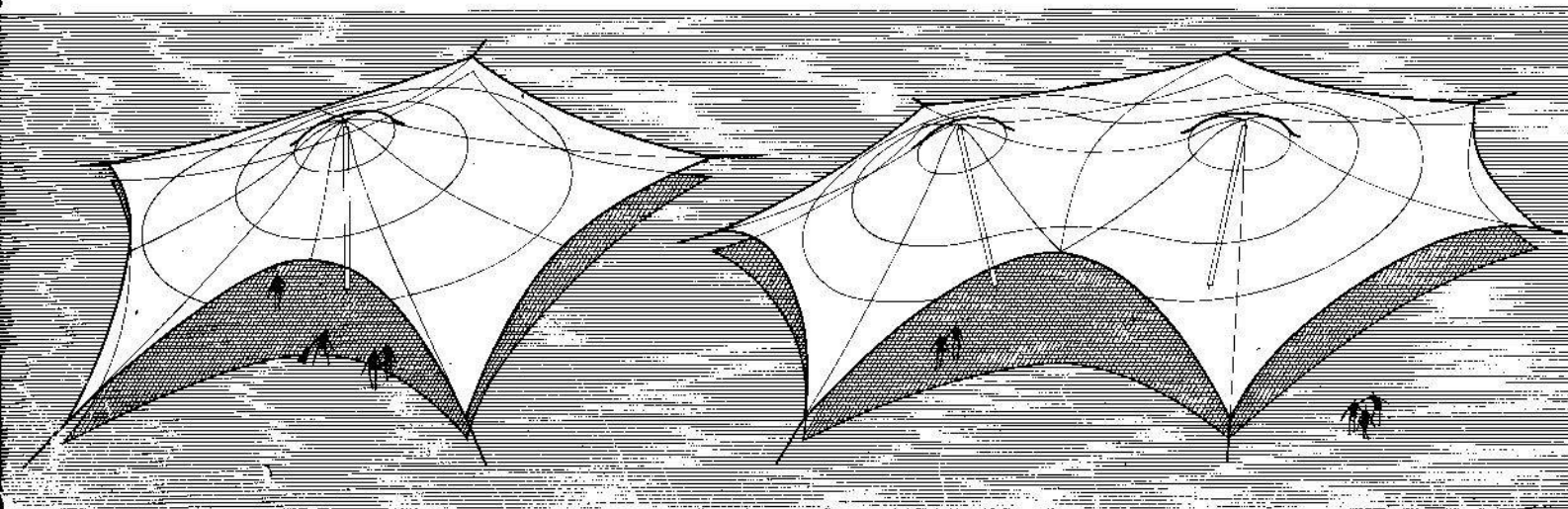
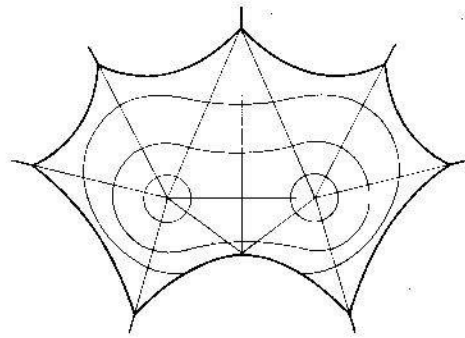
la membrana de la tienda. A causa de la concentración de las fuerzas en el vértice, ha de ensancharse la superficie de la cima. Se origina así la forma de giba.



Sistema con un punto alto.

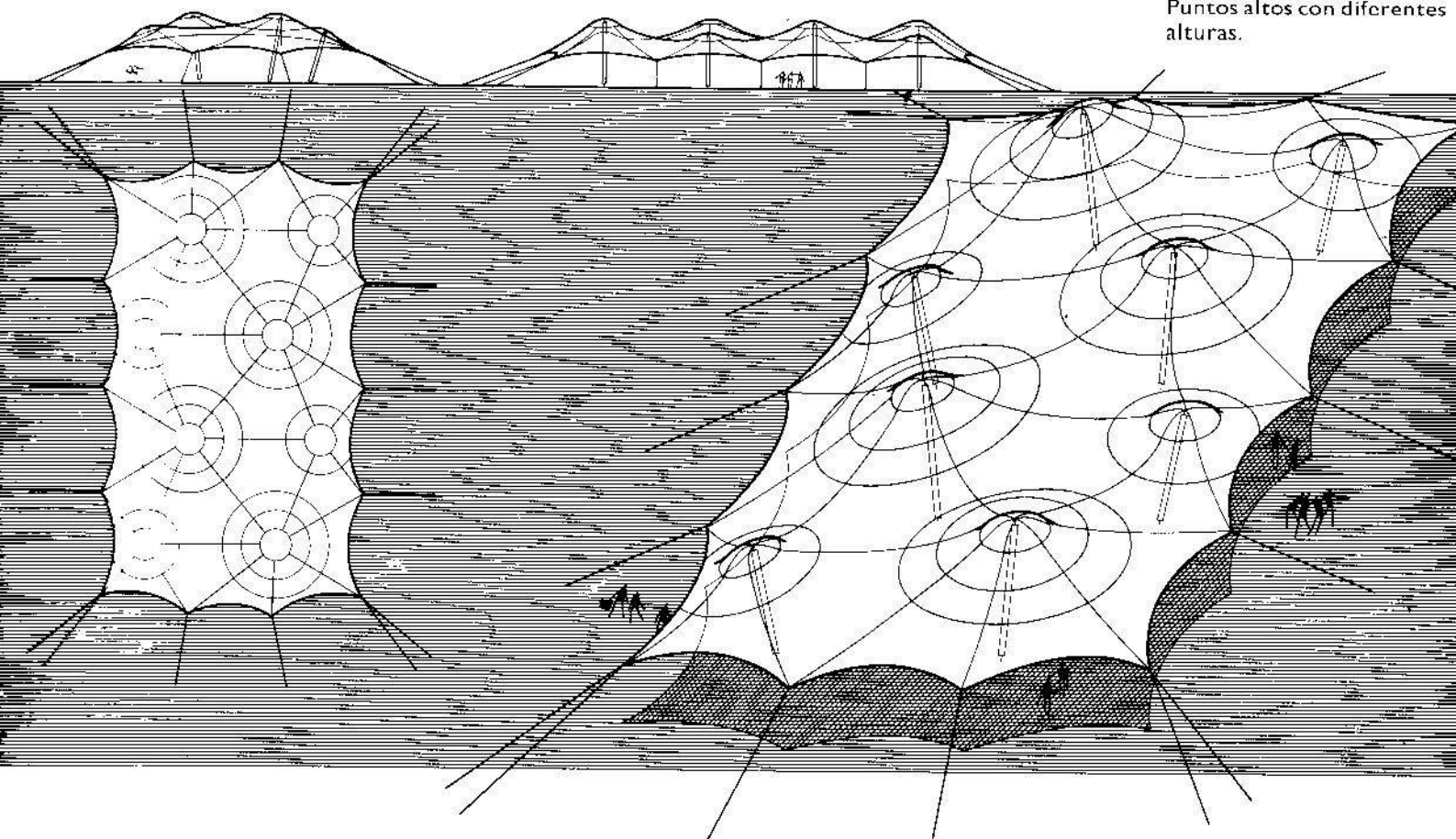


Sistema con dos puntos altos.

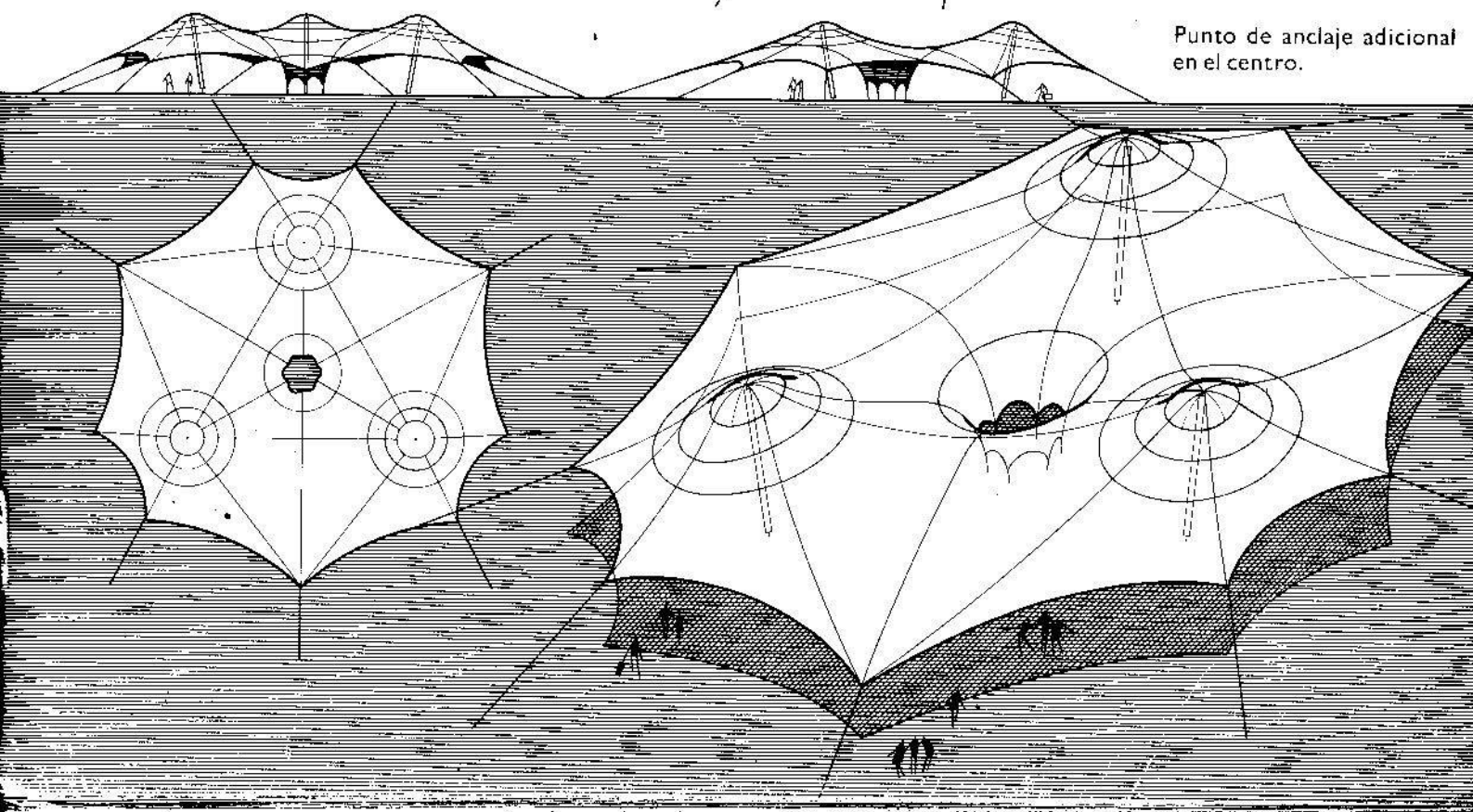


Sistemas en forma de tienda con apoyo interior
mediante elementos en compresión

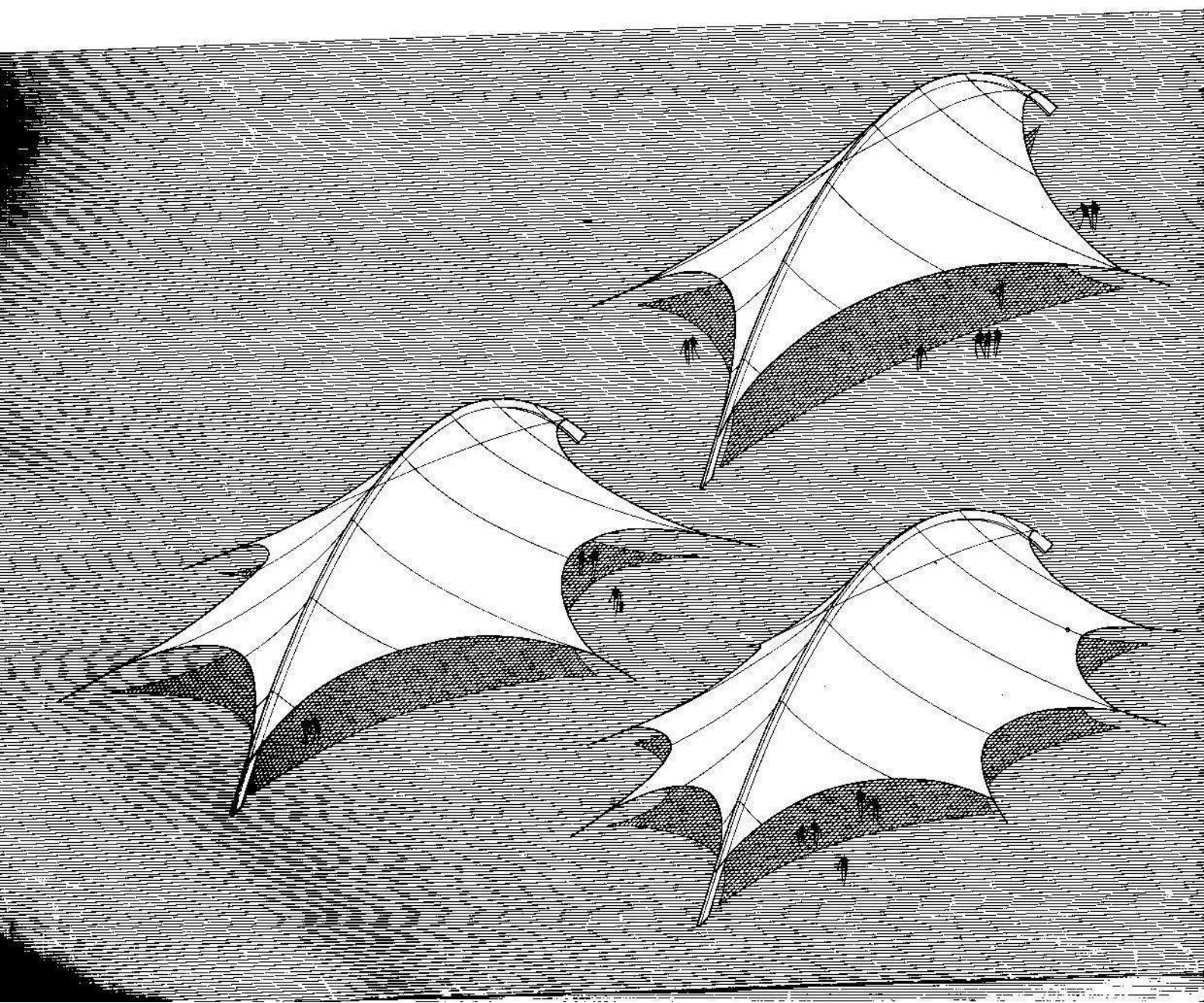
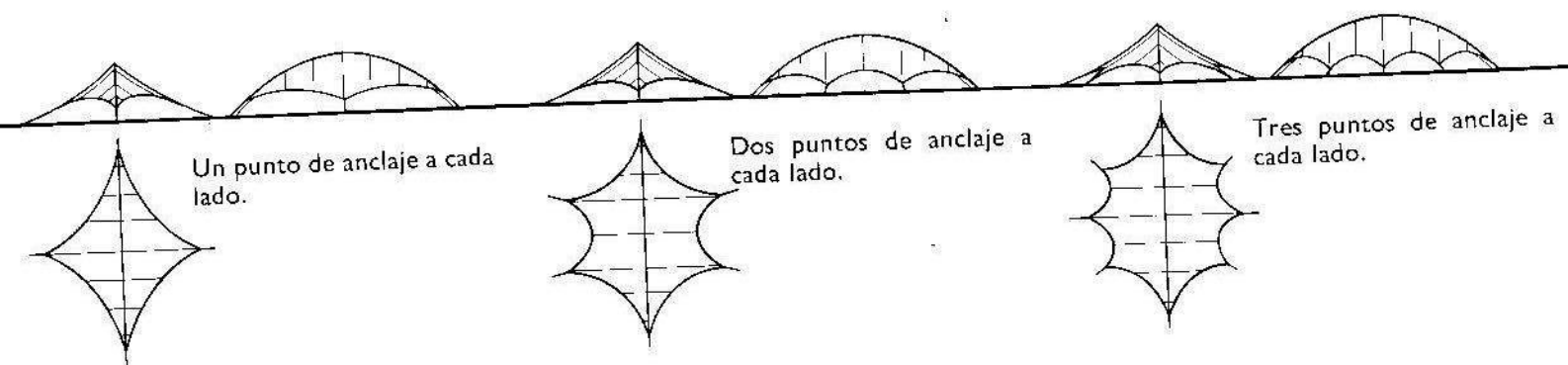
Puntos altos con diferentes
alturas.



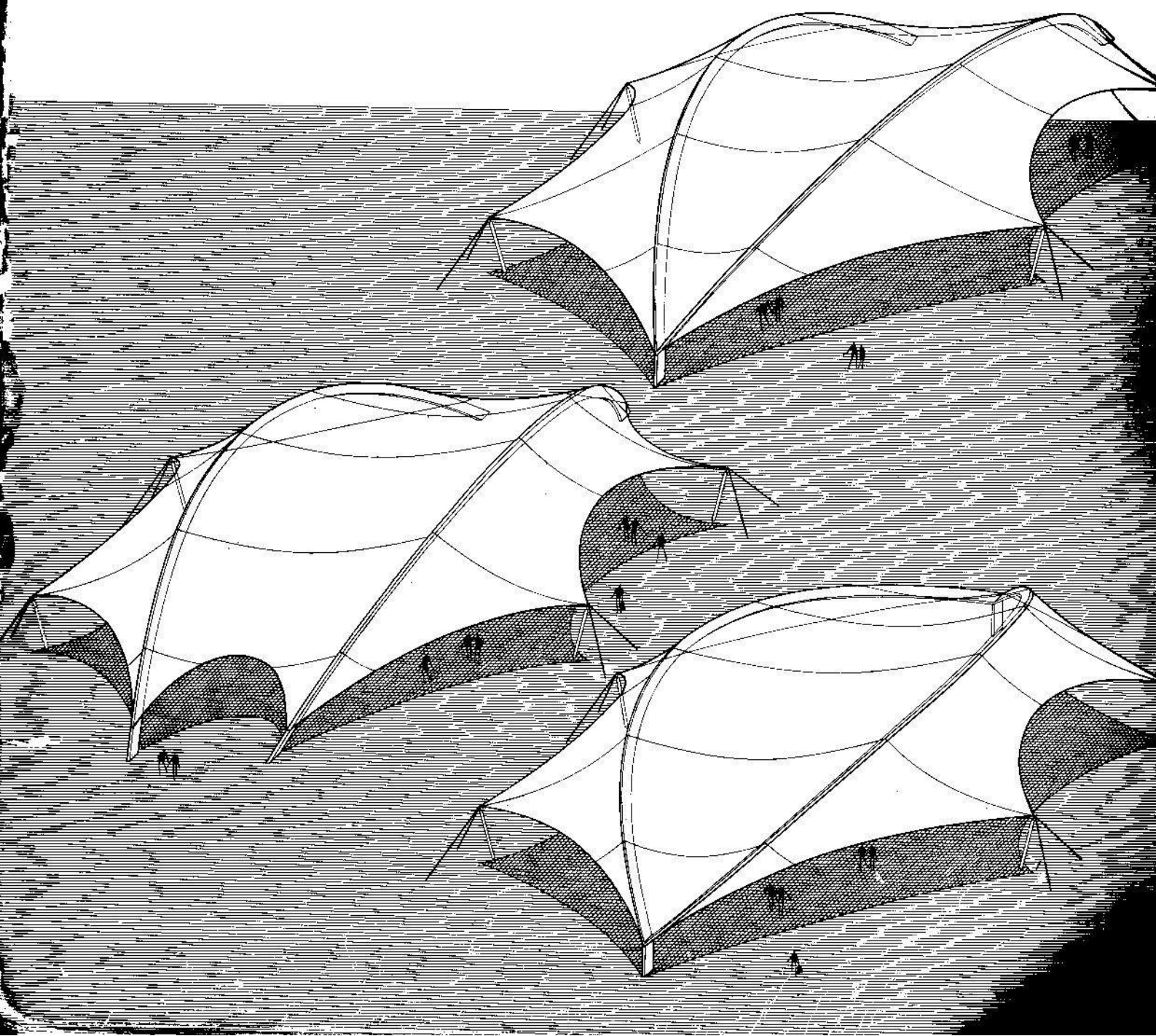
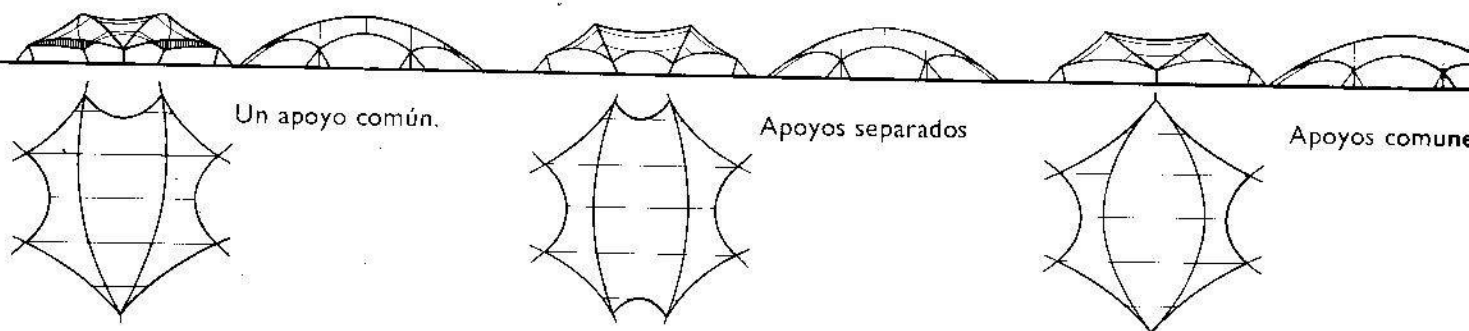
Punto de anclaje adicional
en el centro.



Sistemas en forma de tienda con arco interior para formar el punto alto



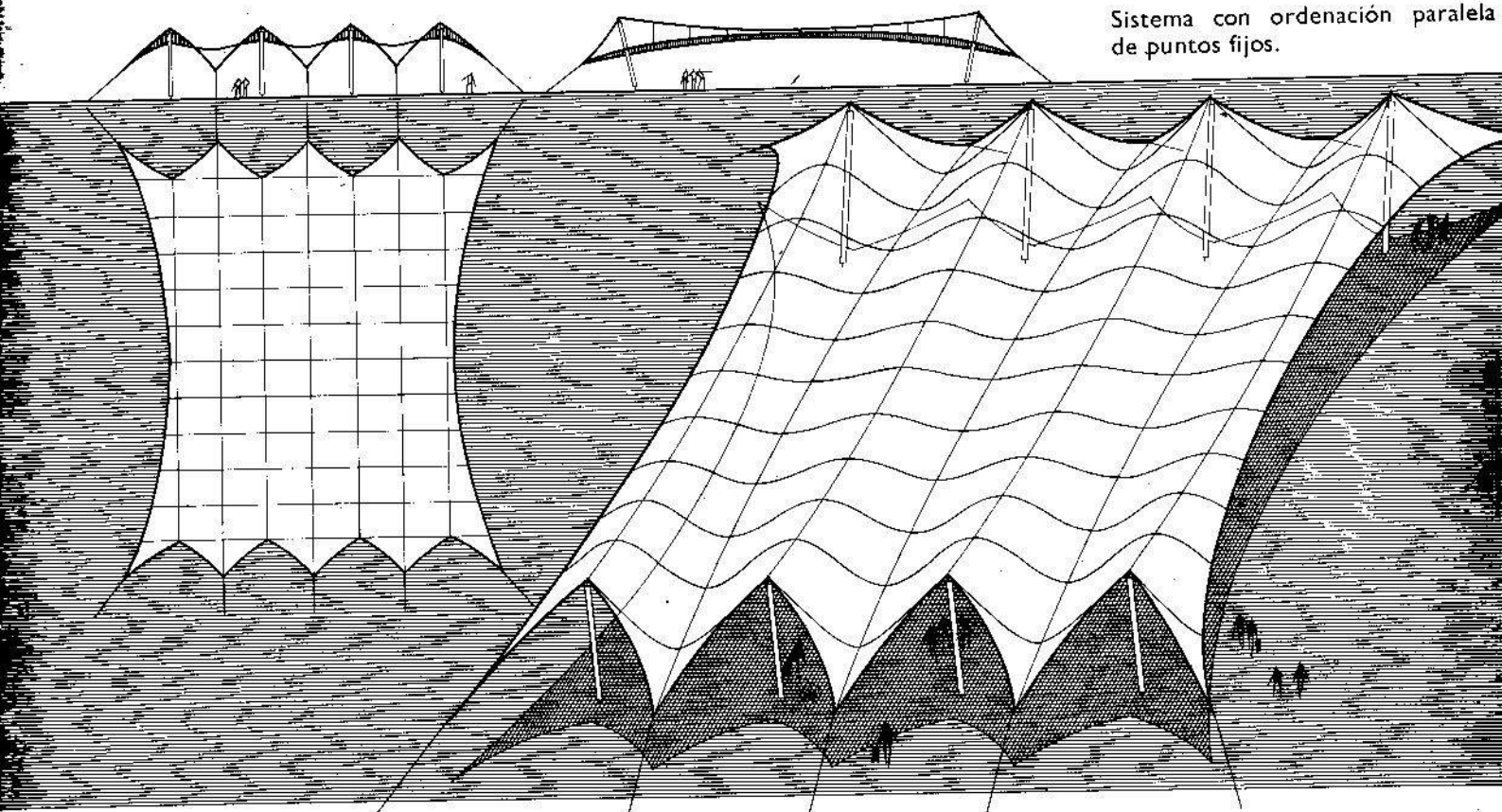
Sistemas en forma de tienda con dos arcos centrales para formar los puntos altos



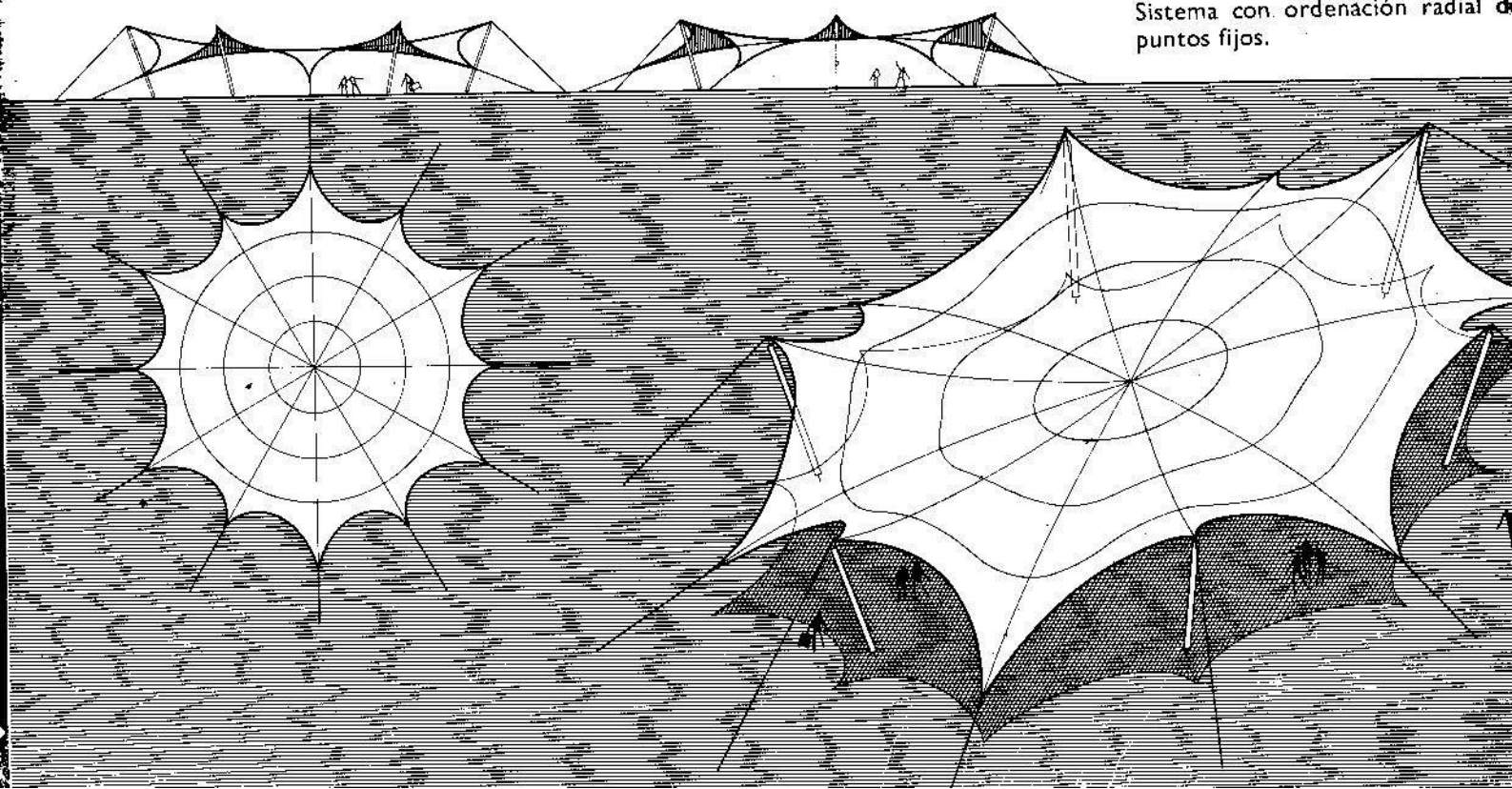
Sistemas en forma de tienda con soportes y puntos de anclaje alternados

Sistemas con superficies onduladas.

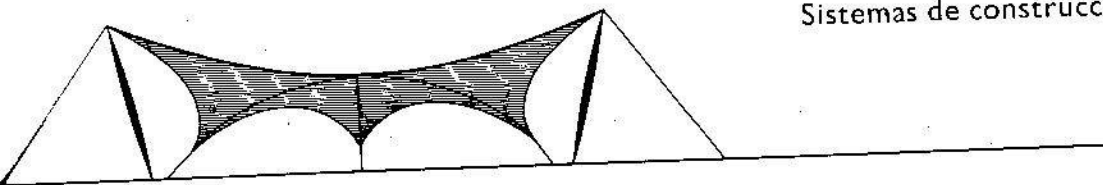
Sistema con ordenación paralela de puntos fijos.



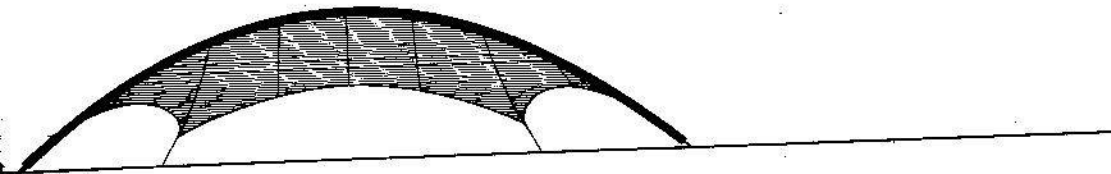
Sistema con ordenación radial de puntos fijos.



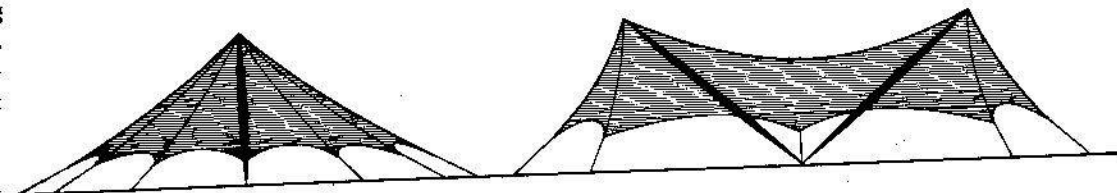
Sistemas de construcción directos para puntos altos



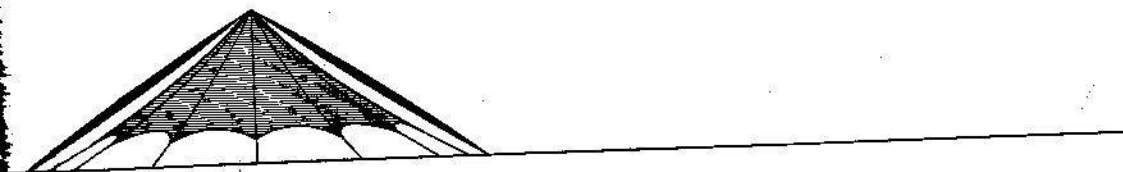
Soportes exteriores para puntos altos dispuestos periféricamente.



Arco interior para puntos altos dispuestos radialmente.

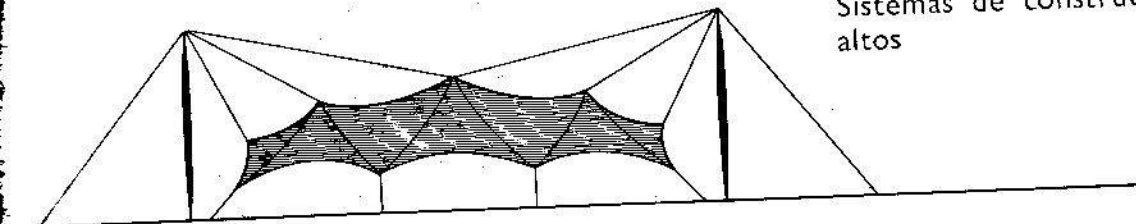


Soportes interiores para puntos altos dispuestos centralmente.

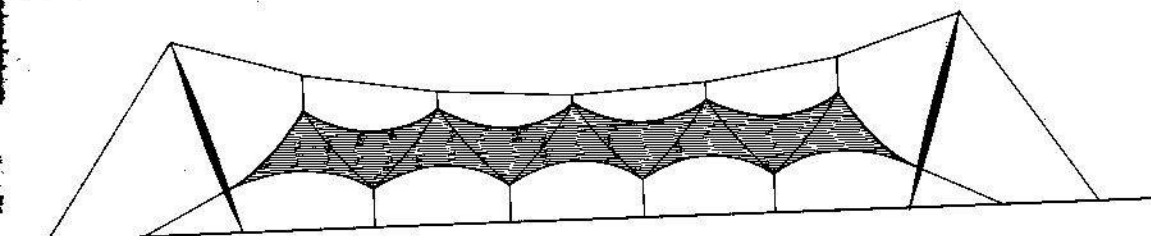


Soportes exteriores para puntos altos dispuestos centralmente.

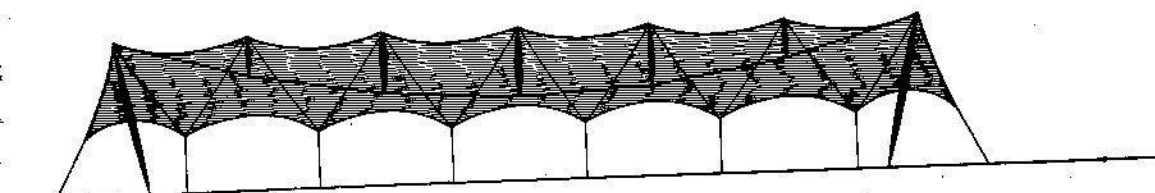
Sistemas de construcción indirectos para puntos altos



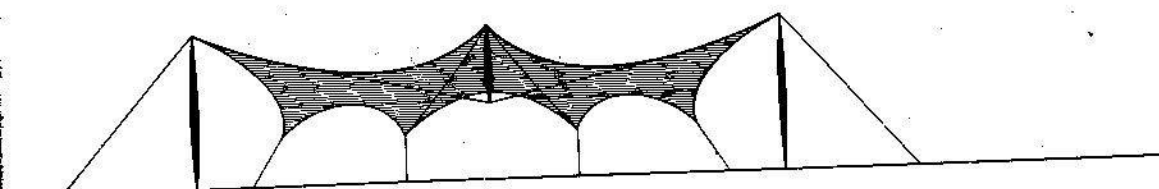
Soportes exteriores con cables de retención para puntos altos dispuestos centralmente.



Soportes exteriores con cable colgante para la suspensión de puntos altos dispuestos centralmente.



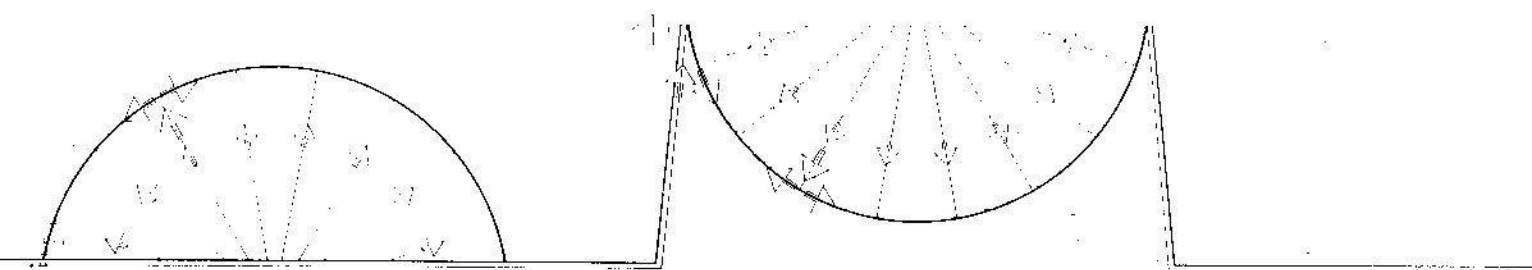
Soportes interiores con cable colgante para sustentación de puntos altos dispuestos centralmente.



Soportes exteriores para puntos altos periféricos con cable de retención para puntos altos adicionales dispuestos centralmente.

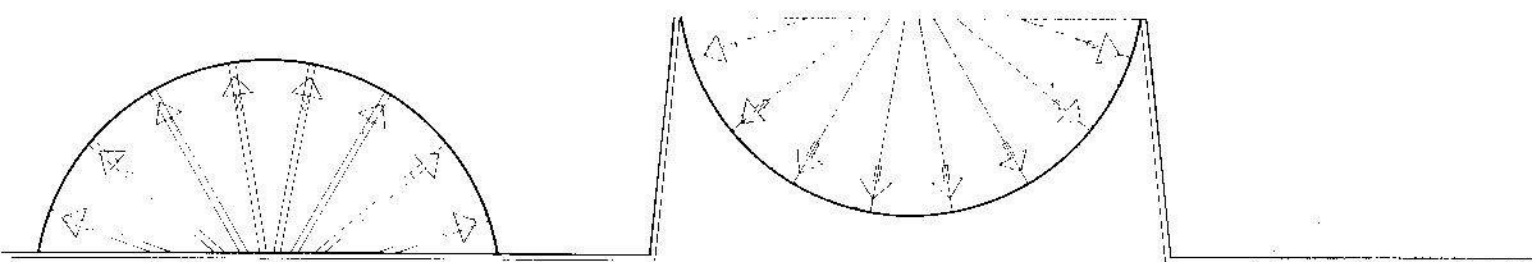
Mecanismos de estructuras neumáticas: comparación con los depósitos membrana

Sistemas estructurales soportados por aire.



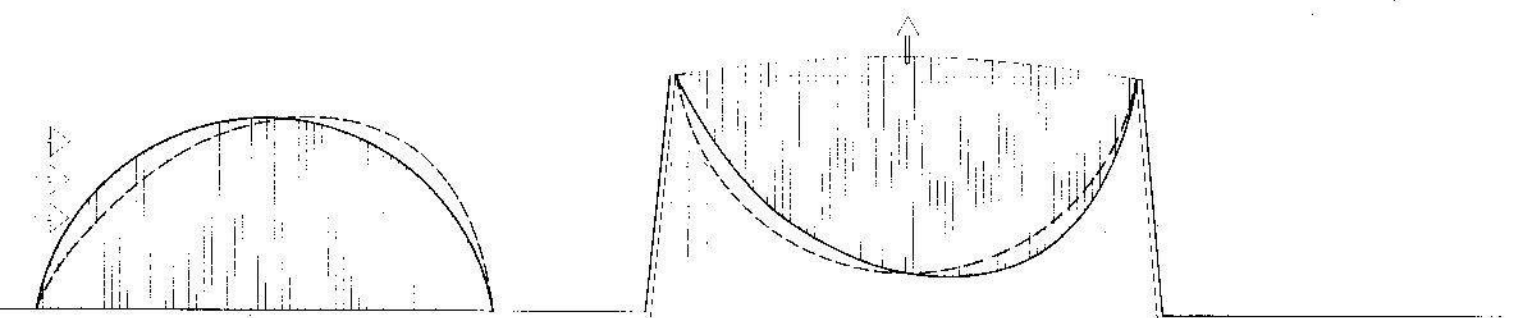
Mediante el incremento de la presión interior del aire, no solamente se compensa el peso propio de la envoltura del espacio, sino que la membrana es tensada también hasta un punto en el cual no puede ya ser deformada por cargas asimétricas.

La transmisión de las fuerzas por la membrana implica, por tanto, sólo resultantes centrífugas, de modo semejante a la acción de un depósito membrana sometido solamente a la presión de su contenido (líquidos, áridos, granulares).



La presión interior funciona como un soporte continuo y elástico de la membrana en cualquier punto. De un modo similar, la forma de un depósito membrana se estabiliza por la presión

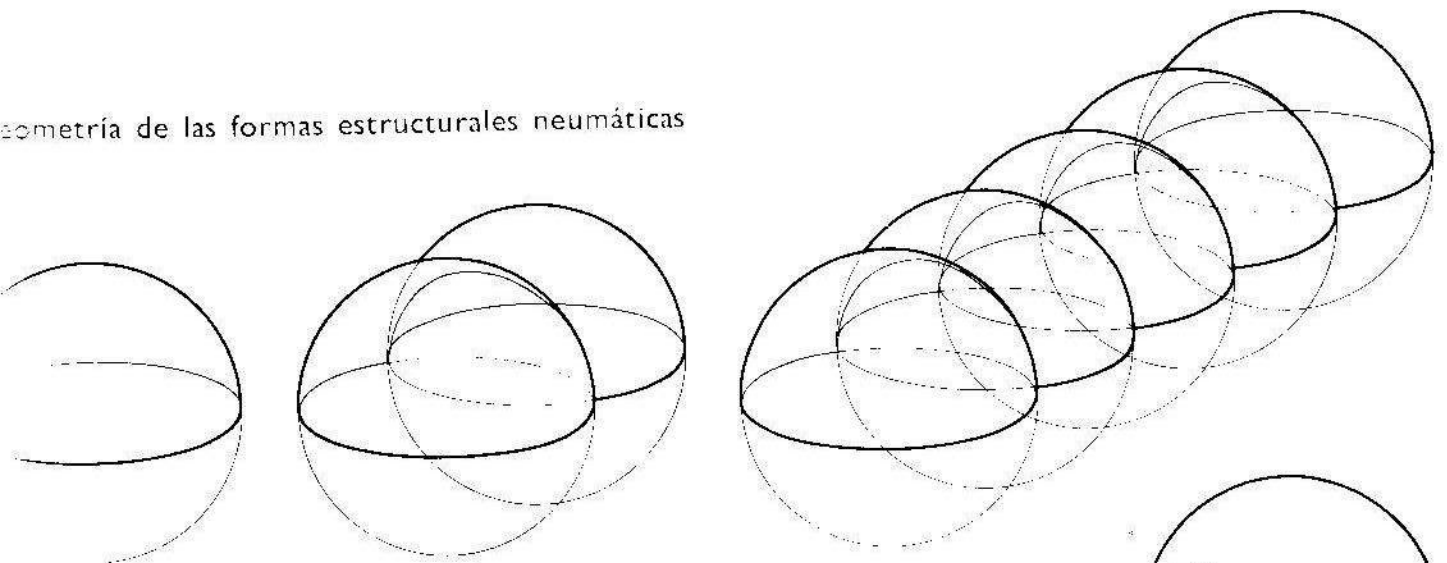
centrífuga de su contenido; la ventaja de un soporte neumático estriba en que no estorba la libre utilización del espacio.



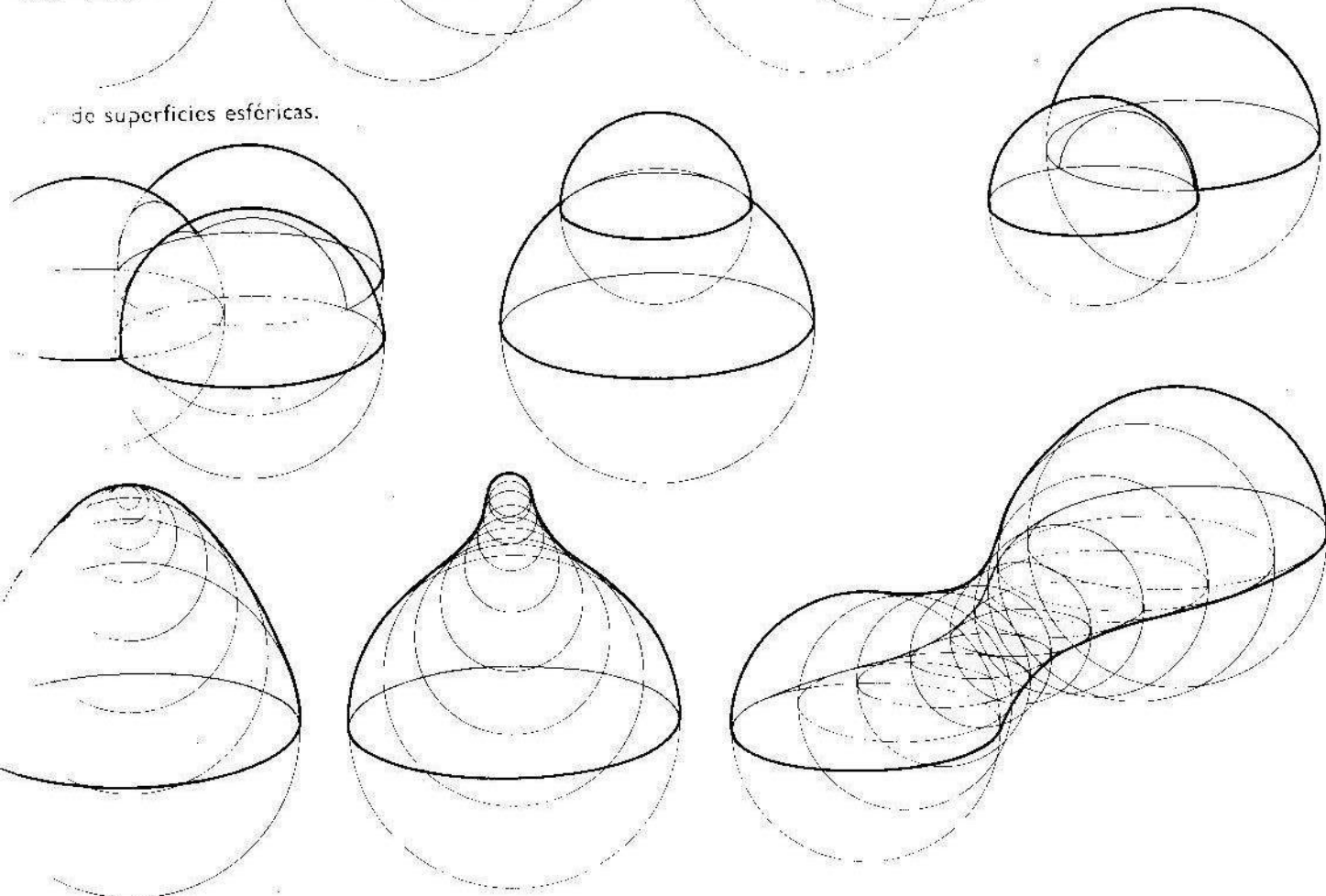
La resistencia a la deformación se consigue por la envoltura impermeable al aire y la tensión de tracción de la membrana. La forma estructural sólo puede deformarse como consecuencia de una pérdida de volumen o de un incremento de la

superficie, contrariamente al depósito membrana colgado en el cual el contenido puede escaparse por la parte abierta (superior), permitiendo así la deformación.

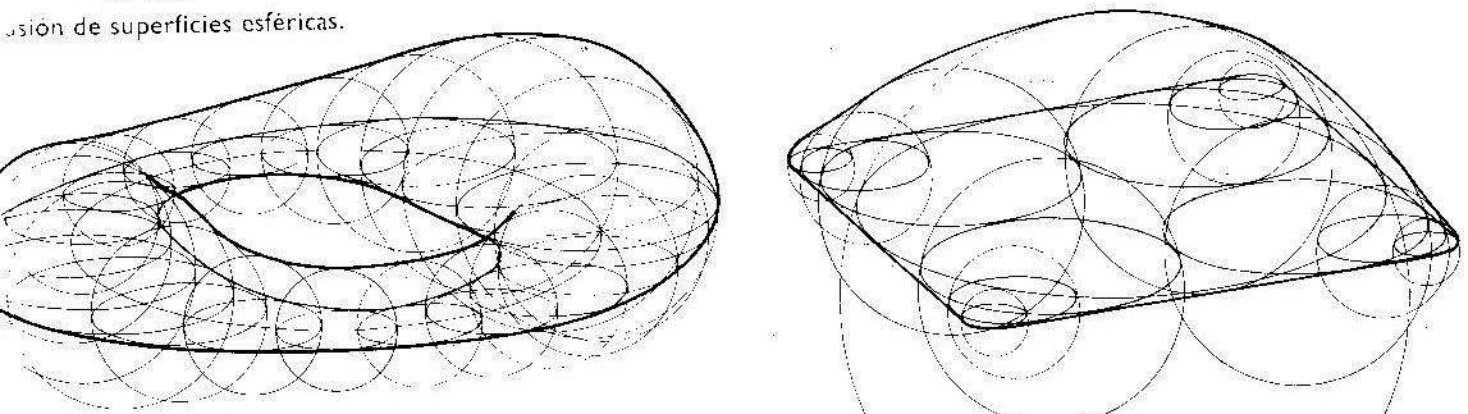
Geometría de las formas estructurales neumáticas



Adición de superficies esféricas.



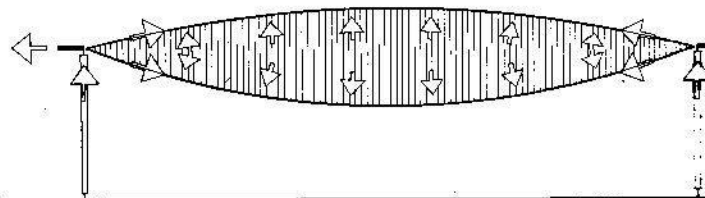
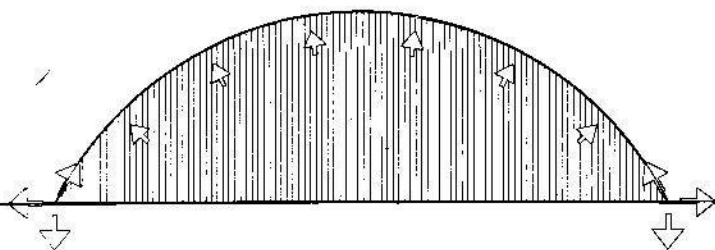
Fusión de superficies esféricas.



Punto de partida para todas las formas estructurales neumáticas es la esfera, para la cual las tensiones de la membrana sometida a presión interior uniforme son iguales en cualquier

punto. Otras formas estructurales pueden desarrollarse por adición o fusión de superficies esféricas.

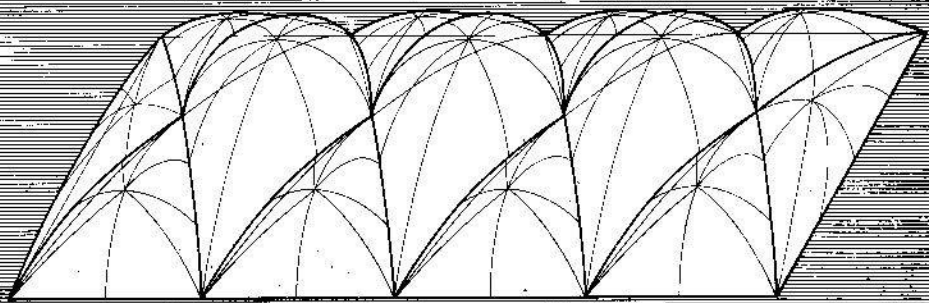
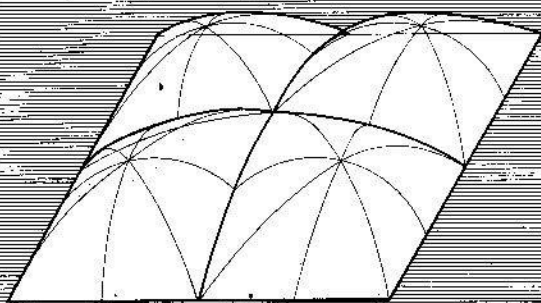
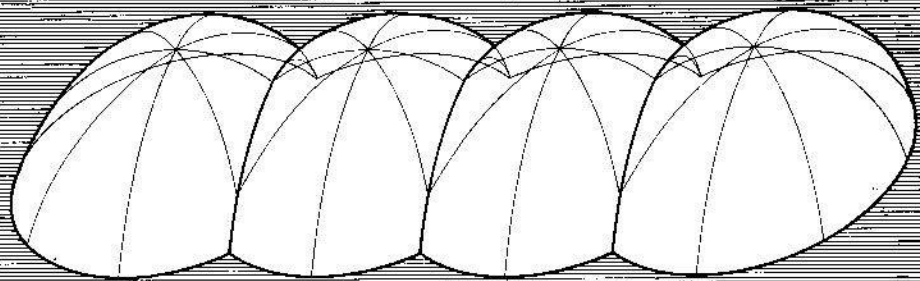
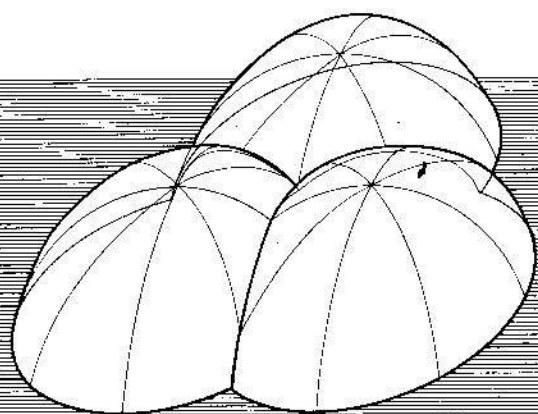
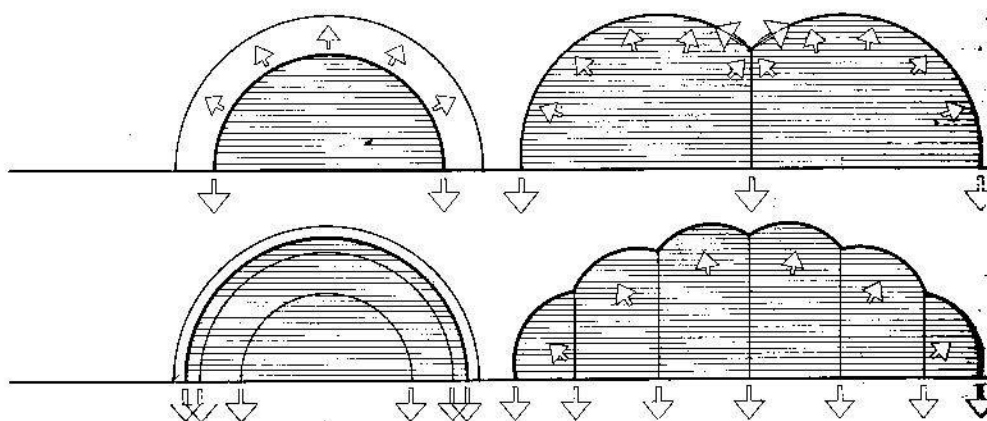
Tipos básicos de sistemas de estructuras neumáticas



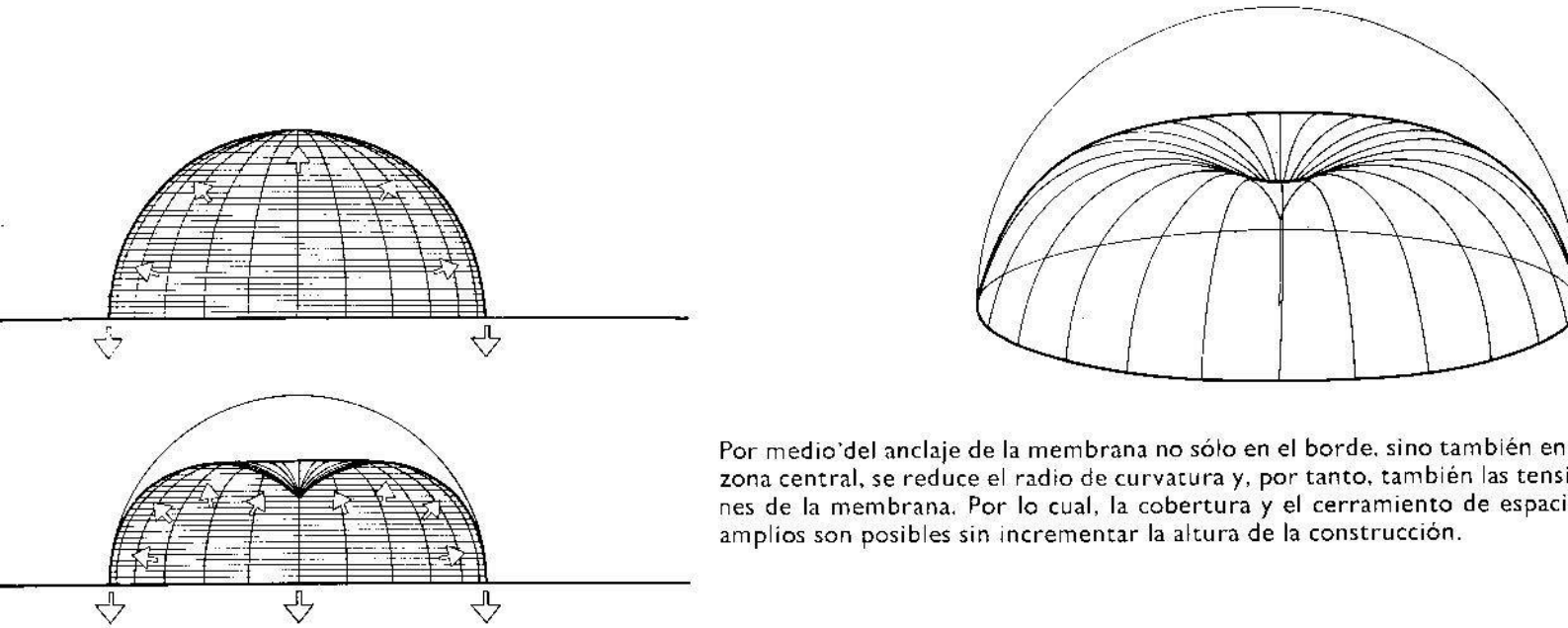
El aire sometido a presión en la «almohada» sirve solamente para estabilizar la membrana sustentante. El espacio cubierto permanece sin sobrepresión.

Sistemas de presión interior con transmisión principal de cargas mediante cables.

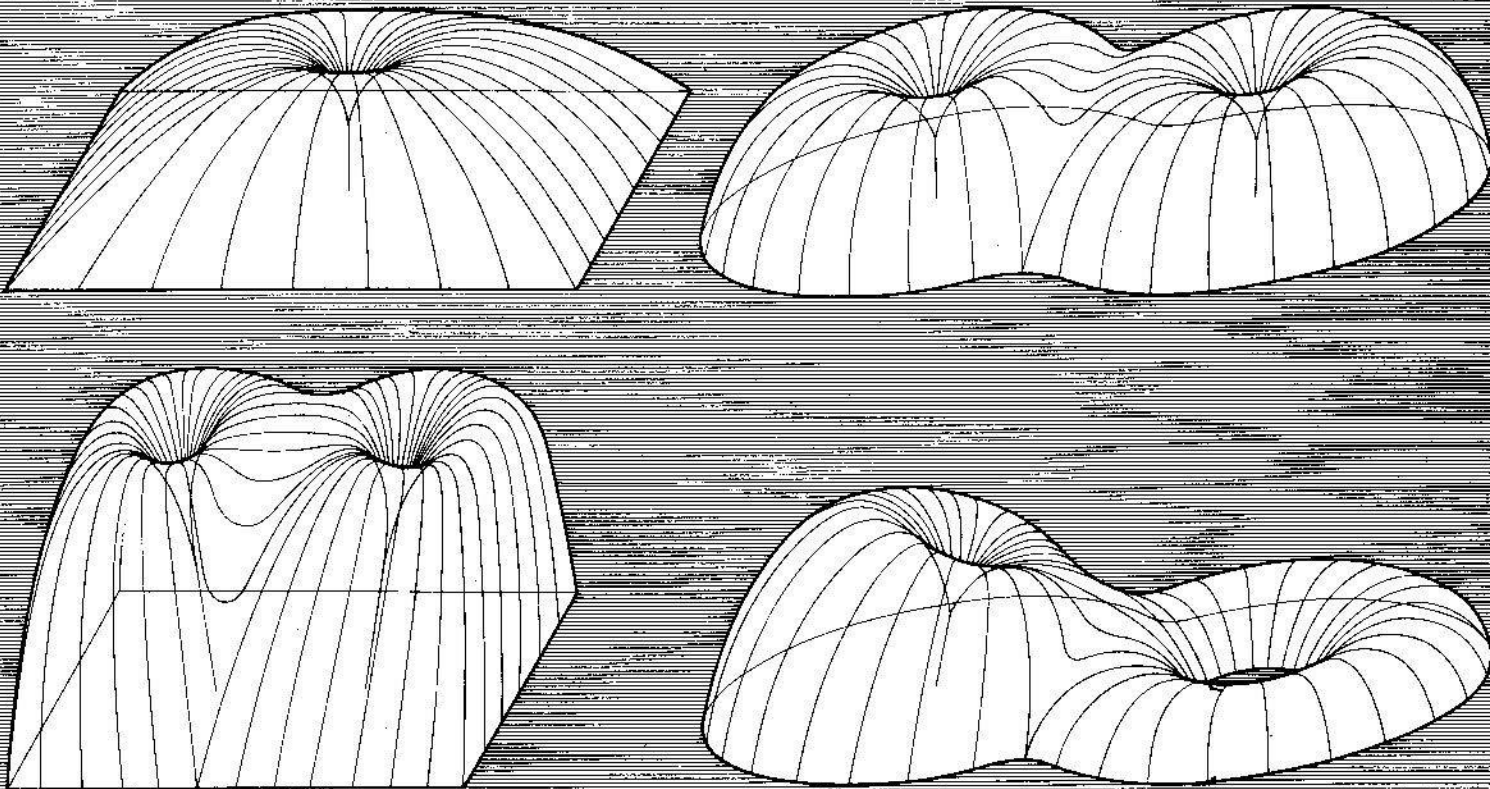
Mediante el tensado de cables aislados, la superficie esférica puede dividirse en secciones con menor radio de curvatura y, por tanto, menores tensiones de membrana. Los cables transmiten los esfuerzos principales, en tanto que la membrana ejerce la función de una estructura secundaria intermedia.

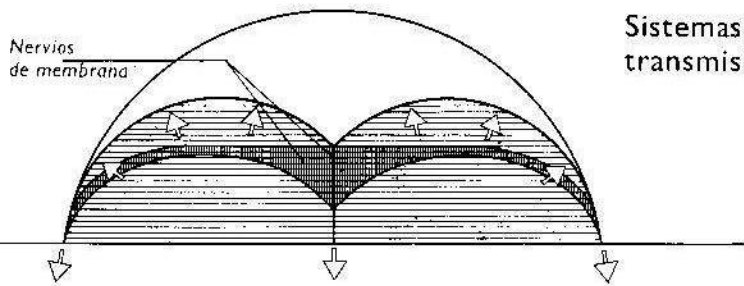


Sistemas de presión interior con puntos de anclaje interiores



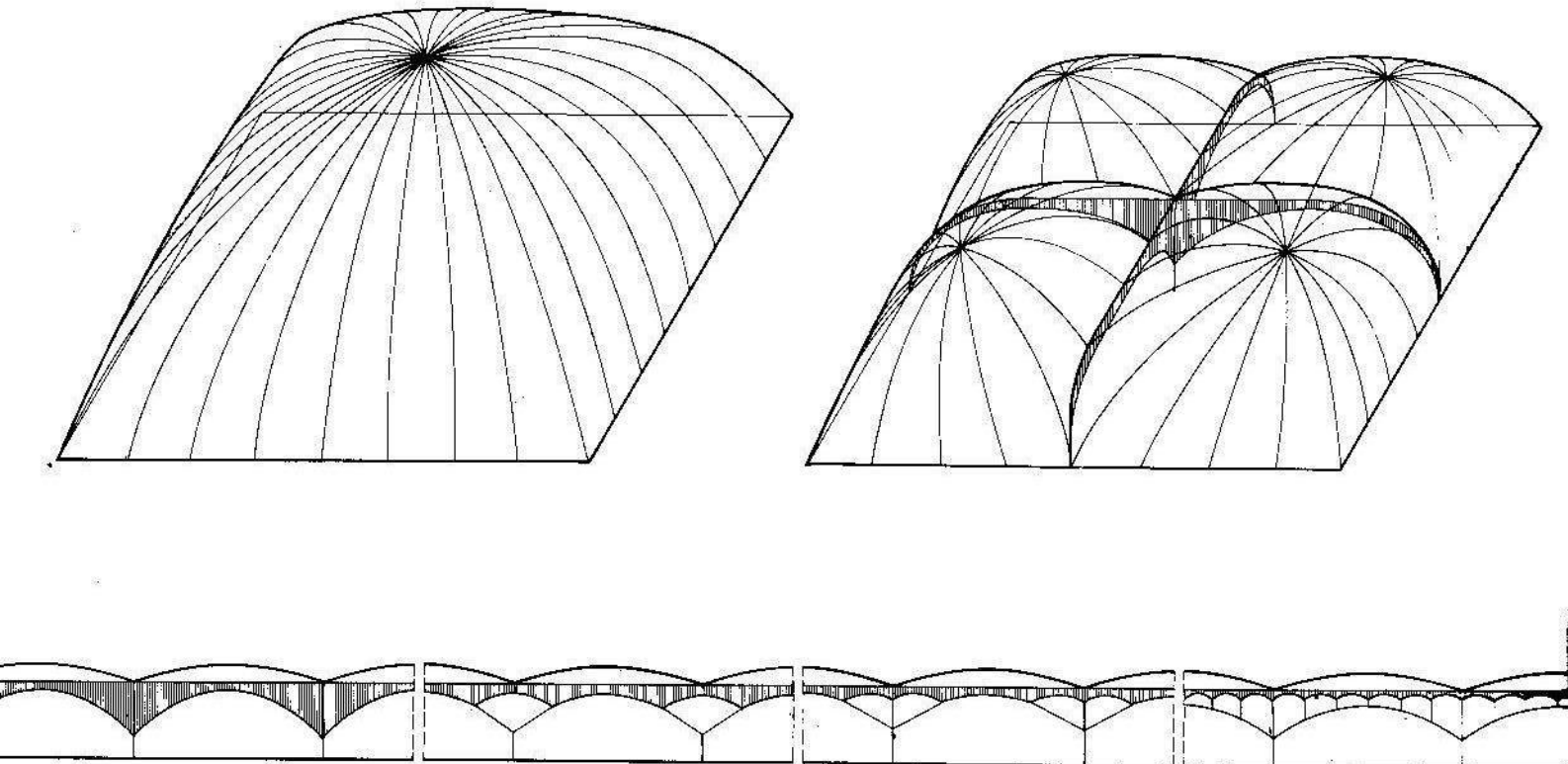
Por medio del anclaje de la membrana no sólo en el borde, sino también en zona central, se reduce el radio de curvatura y, por tanto, también las tensiones de la membrana. Por lo cual, la cobertura y el cerramiento de espacios amplios son posibles sin incrementar la altura de la construcción.



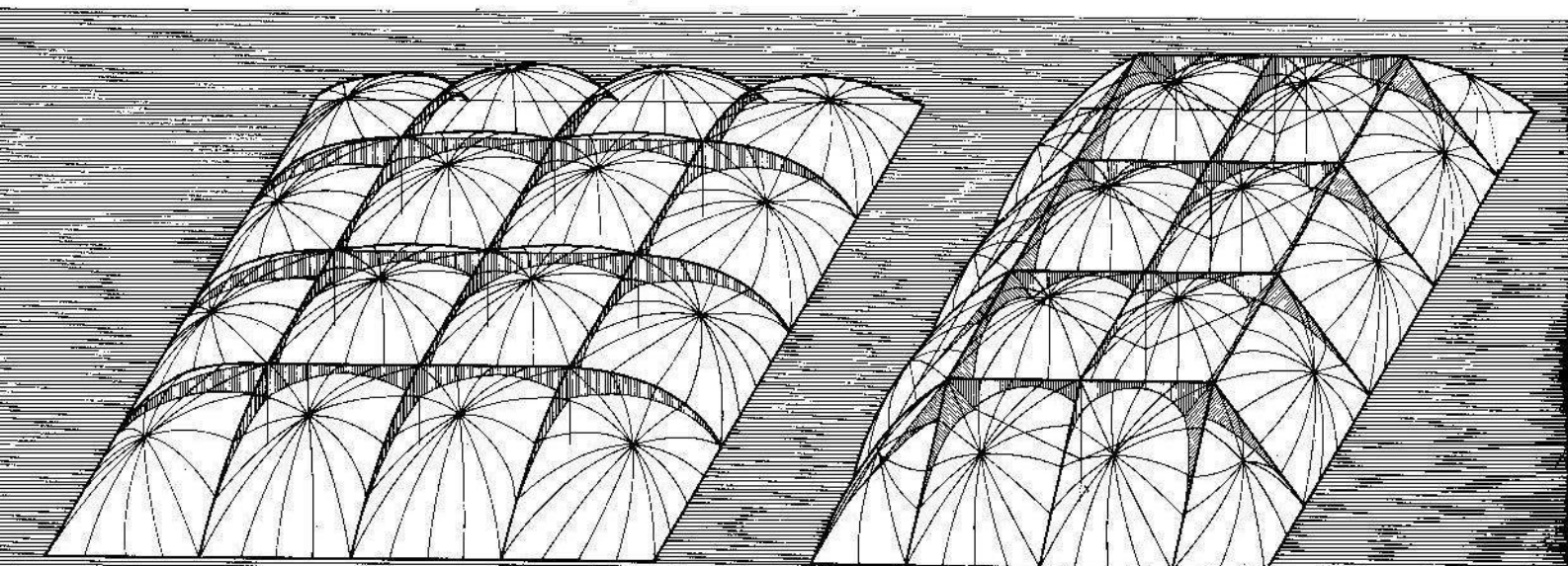


Sistemas neumáticos de presión interior con transmisión de cargas principales a través de nervios de membrana

No solamente mediante cables aislados, sino también mediante el empleo de membranas verticales (nervios de membrana) ancladas al suelo, puede la superficie esférica subdividirse en secciones más pequeñas con menor radio de curvatura y, por tanto, menores tensiones de membrana, ya que de este modo es posible formar limas rectilíneas y pueden cubrirse amplios arcos.



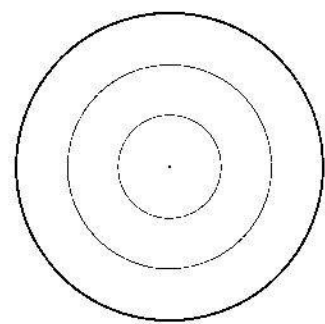
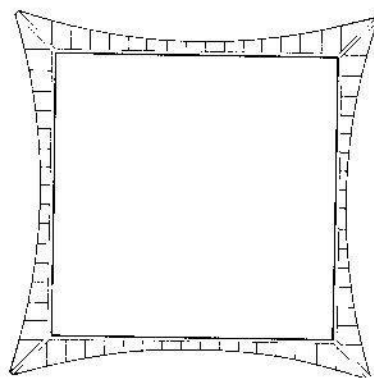
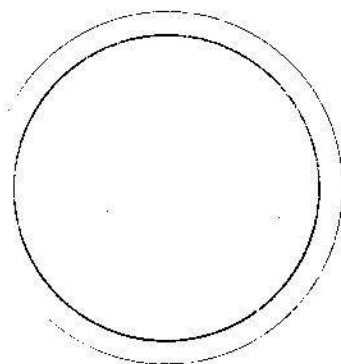
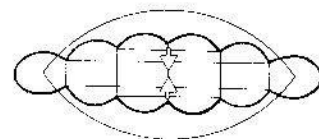
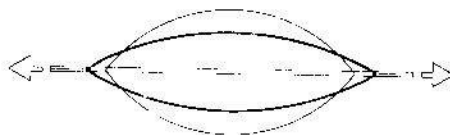
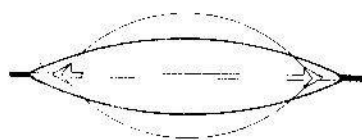
Esquema de nervios de membrana.



Sistemas de doble membrana

Mediante cerramiento inferior del aire presionado, por otra membrana (en lugar de incorporar el suelo), pueden tensarse espacios abiertos al exterior. Requisito previo para el mecanismo sustentante es que la membrana no pueda adoptar la forma esférica en su región media.

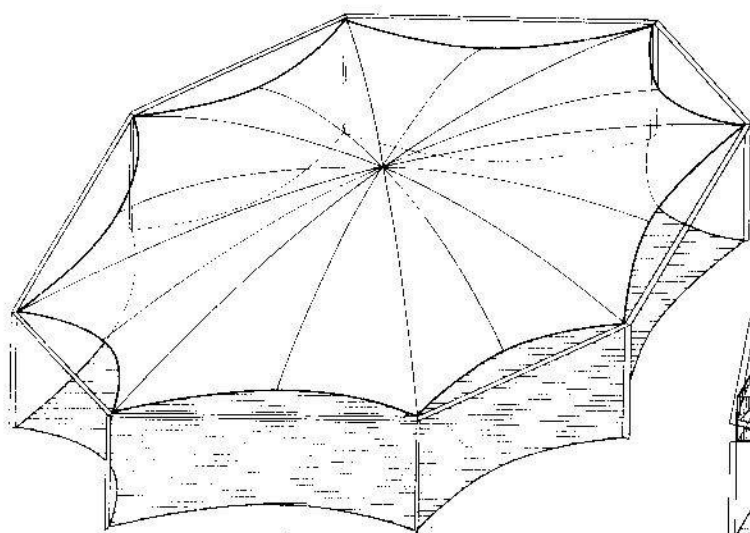
Sistemas de retención contra el abombamiento.



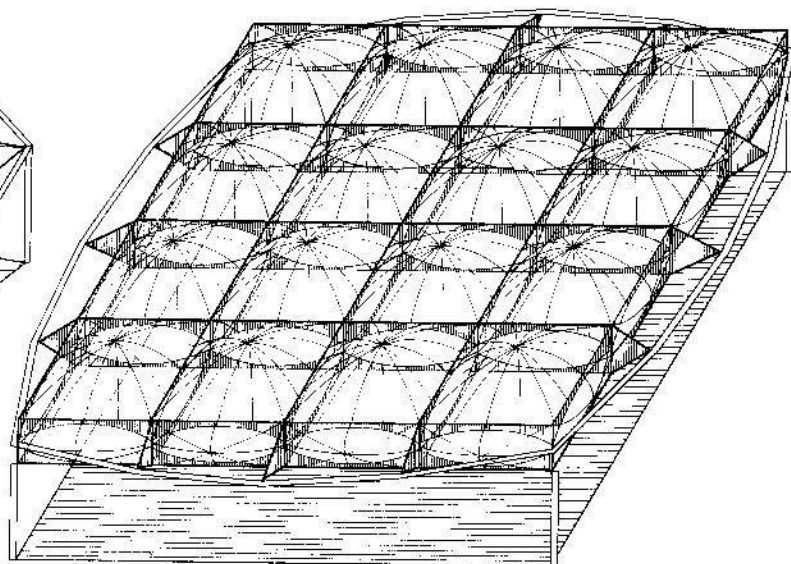
Rigidización de borde mediante anillo de compresión.

Rigidización del borde mediante elementos en compresión y cables en tracción.

Control de la altura con cables interiores o nervaduras.



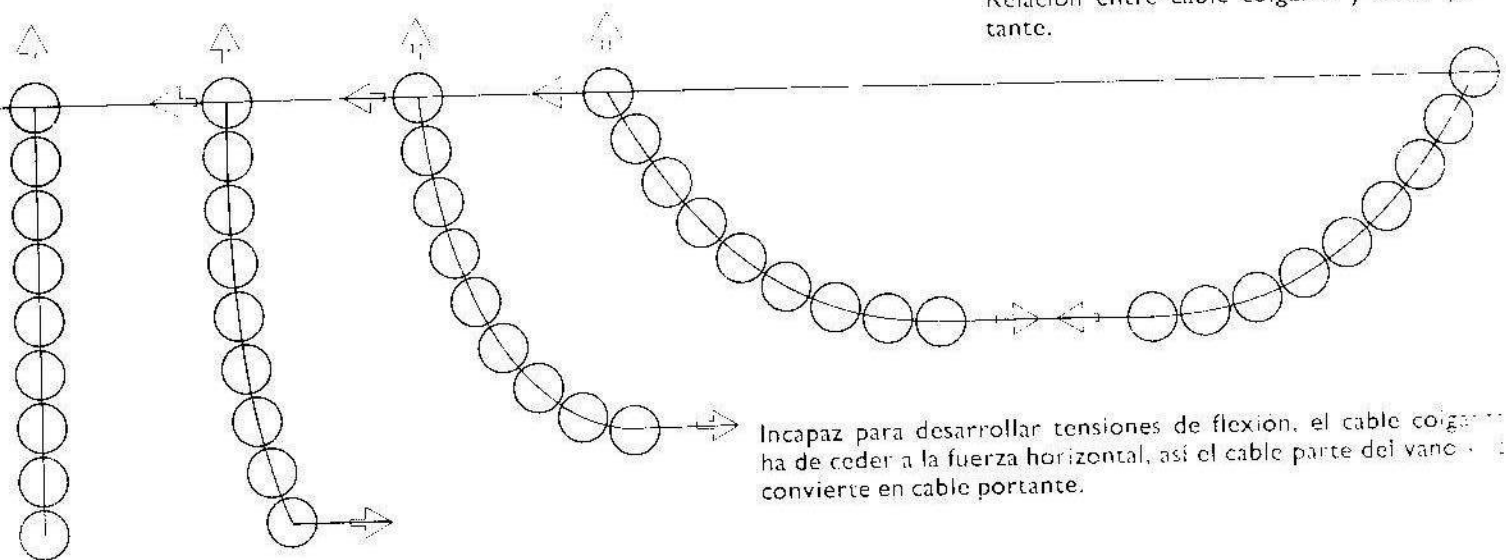
Sistema de cámara simple con anillo de compresión poligonal.



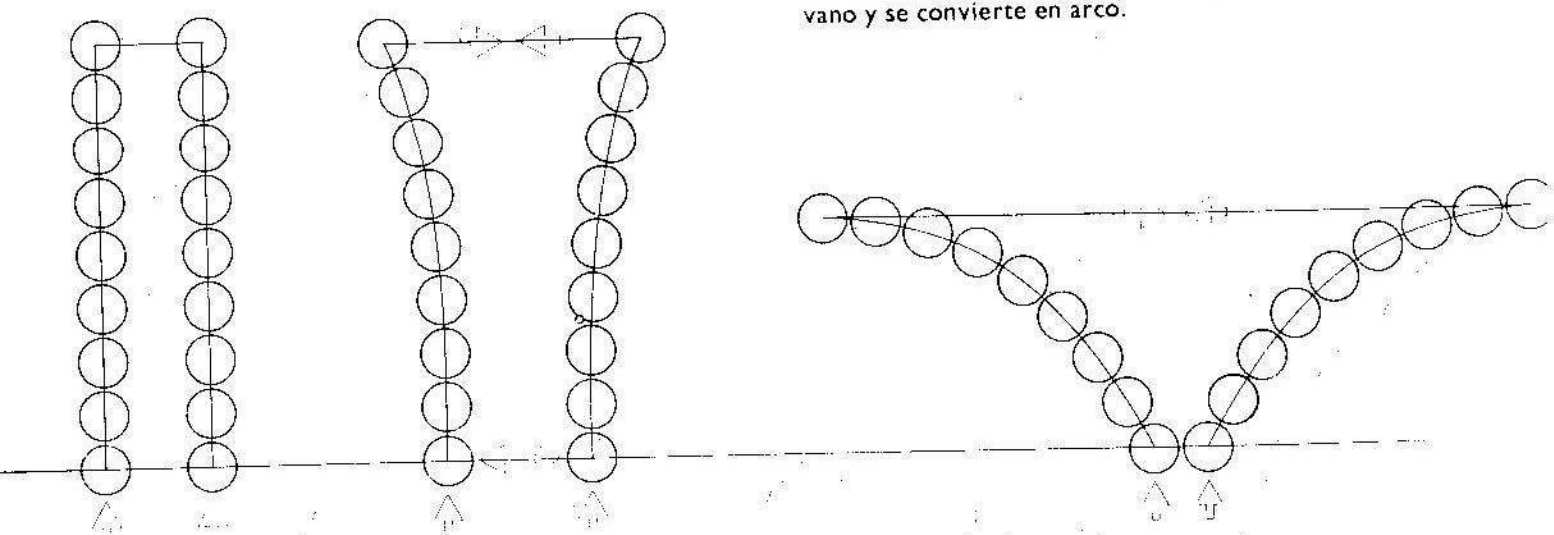
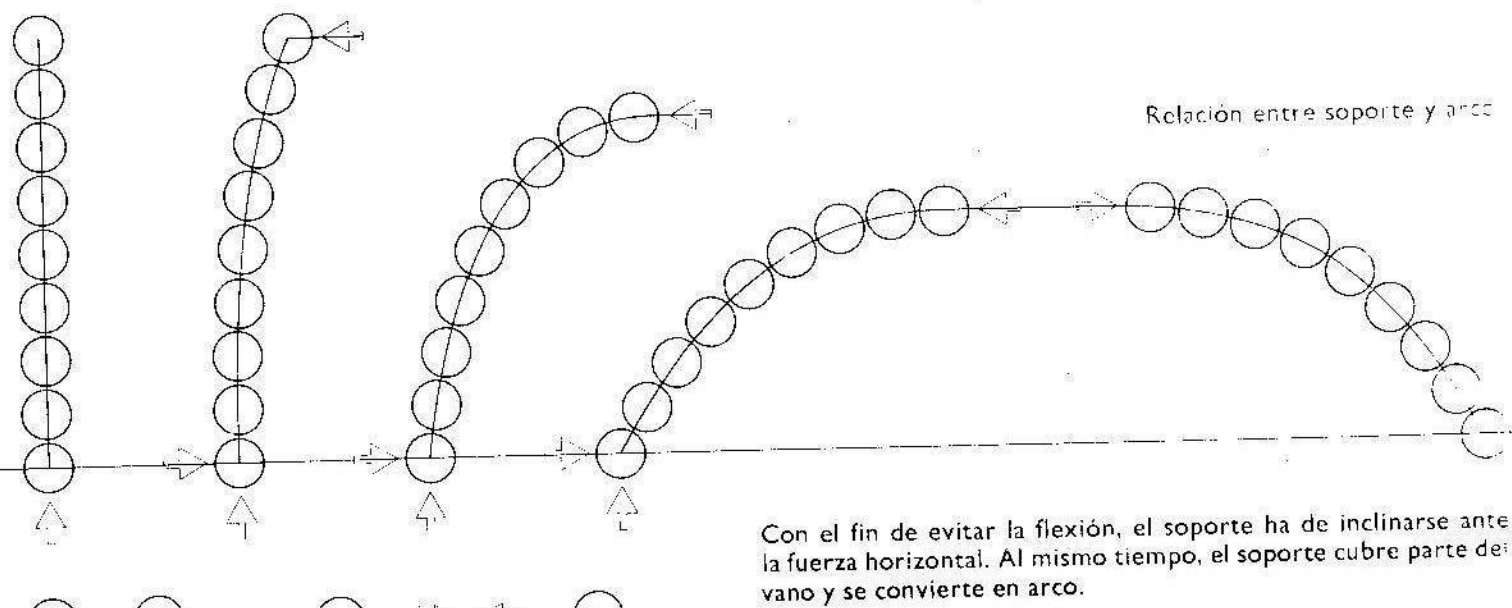
Sistema de cámaras múltiples con nervaduras de membrana y arcos comprimidos como mecanismo de retención.

Formas autosustentantes sometidas a compresión simple o a tracción

Relación entre cable colgante y cable portante.

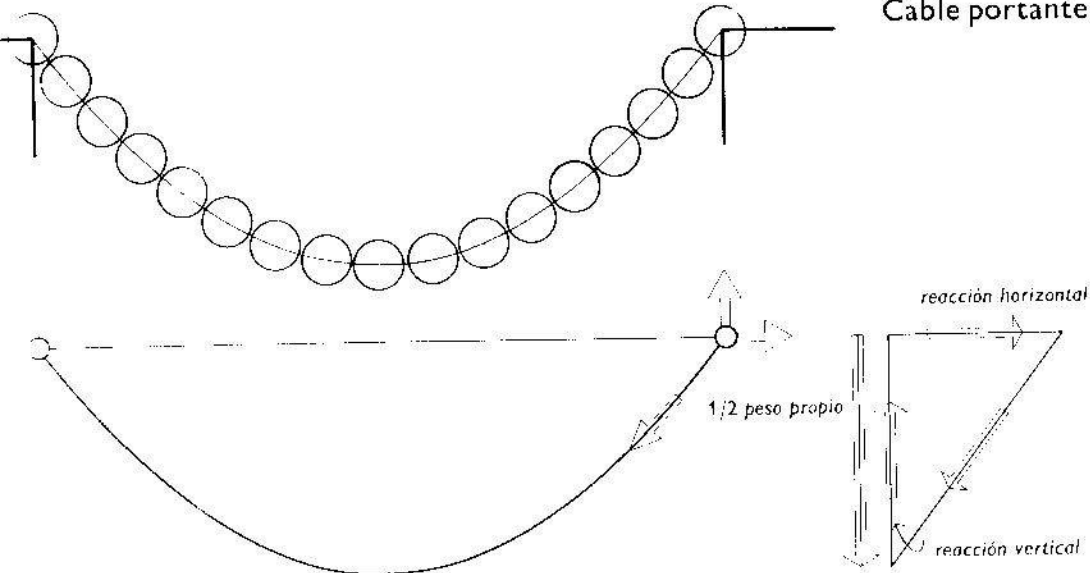


Relación entre soporte y arco.



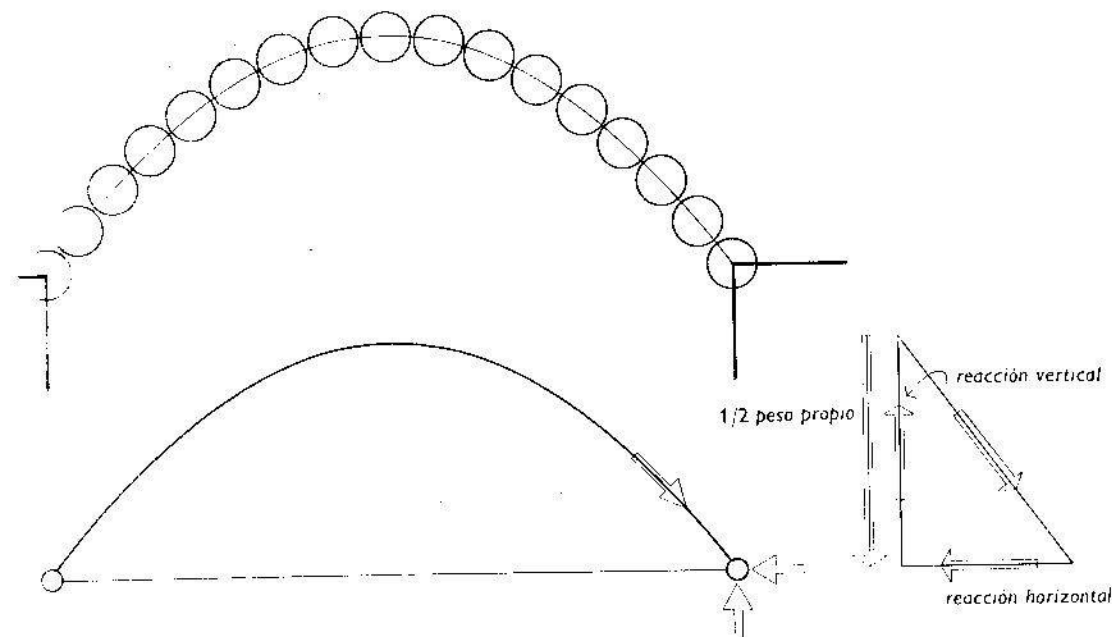
Cable portante y arco

mecanismo de sustentación



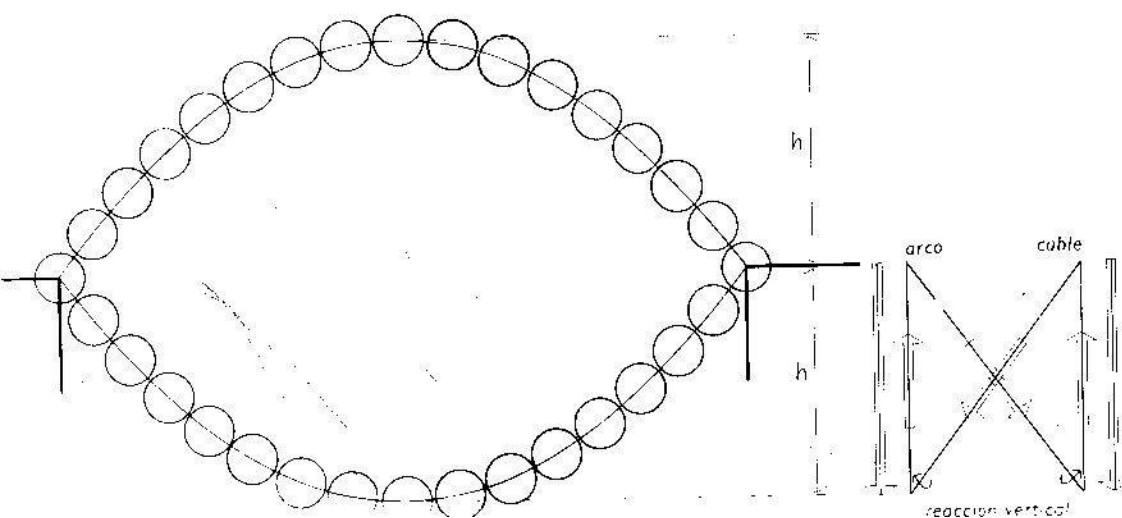
cable portante

El cable portante es capaz de desarrollar solamente tracciones. Bajo su propio peso, adopta la forma de una catenaria.



arco funicular

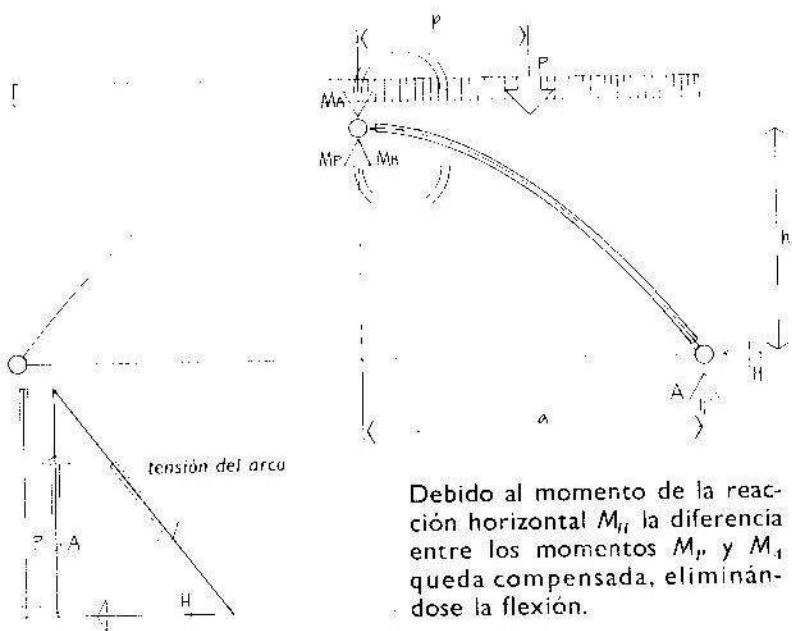
El cable invertido admite sólo compresiones de la misma magnitud que las tracciones en el cable. Así, la forma funicular de un arco sometido a su propio peso es una catenaria invertida.



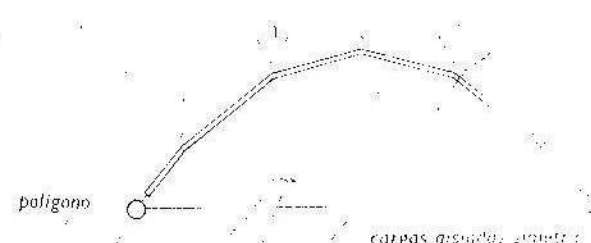
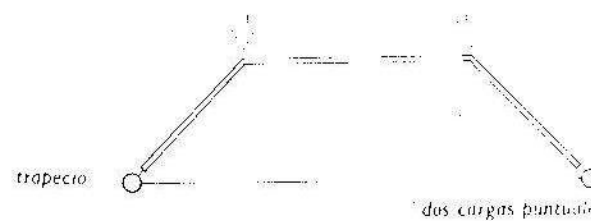
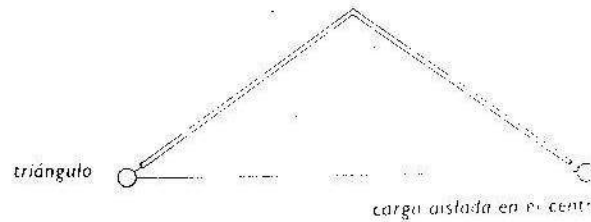
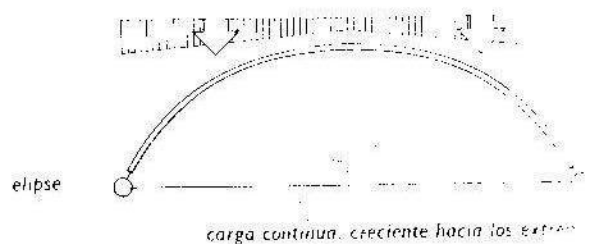
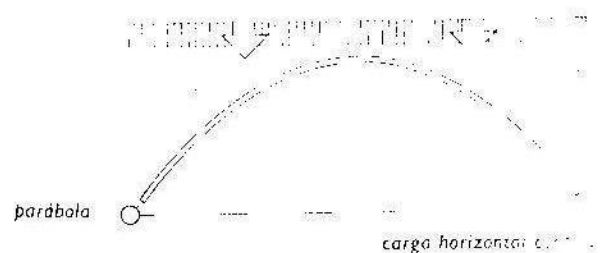
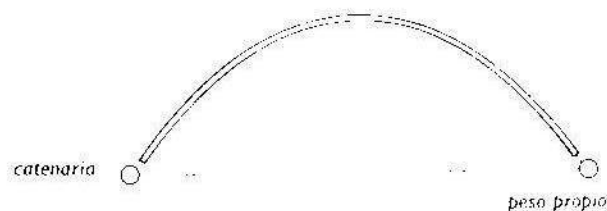
combinación de arco/cable portante

La combinación de cable portante y arco no produce ninguna reacción horizontal, ya que las componentes horizontales de ambos tienen direcciones opuestas y se anulan entre sí.

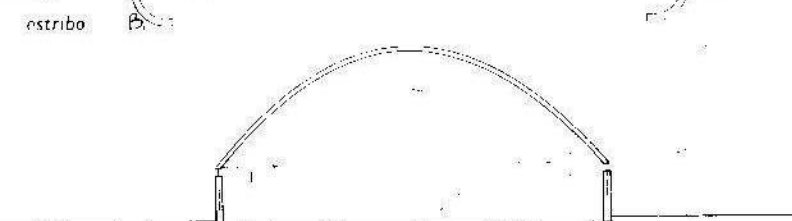
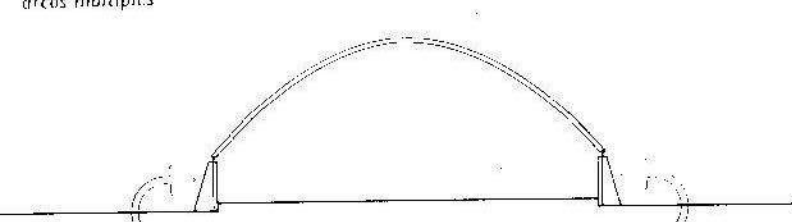
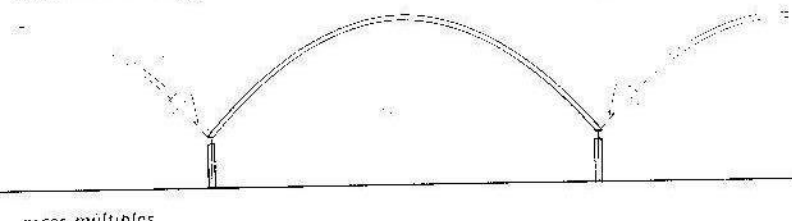
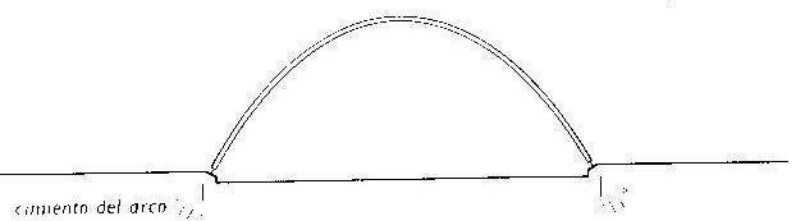
Mecanismo de palanca del arco funicular



Formas geométricas

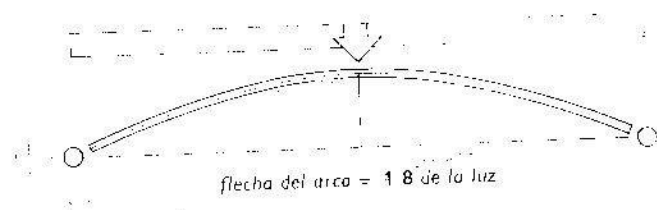
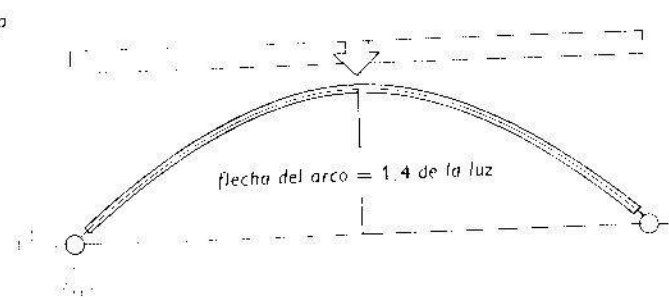
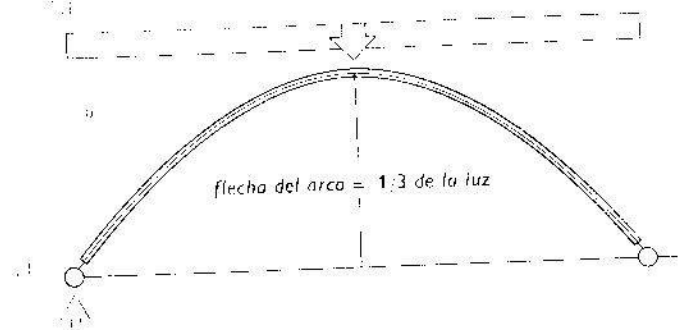
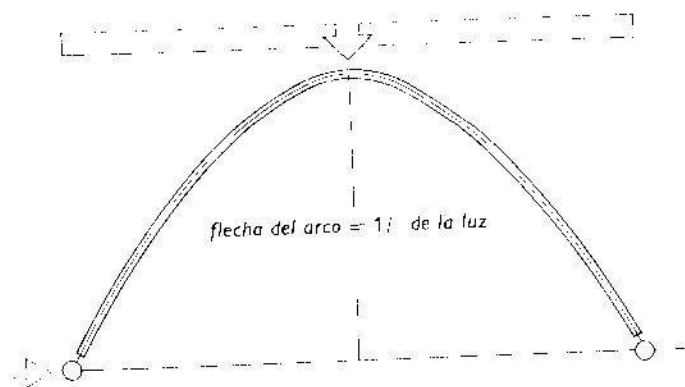
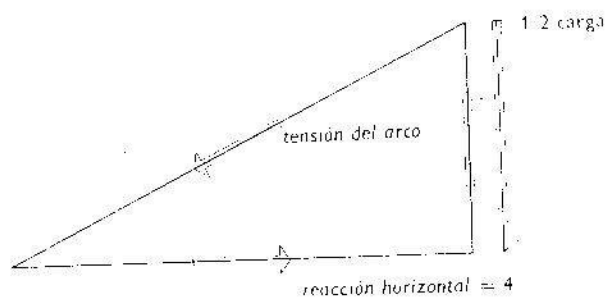
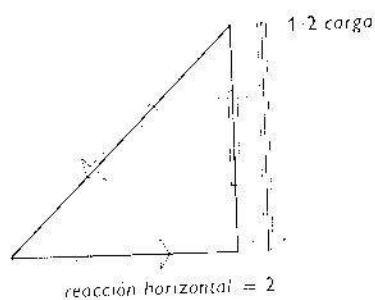
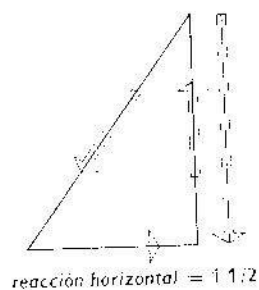
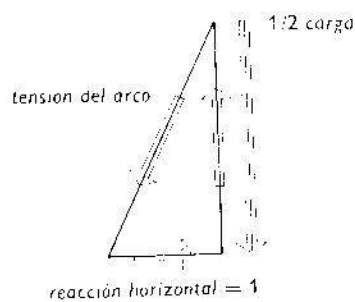


Sistemas de arcos caracterizados por la resistencia del empuje horizontal

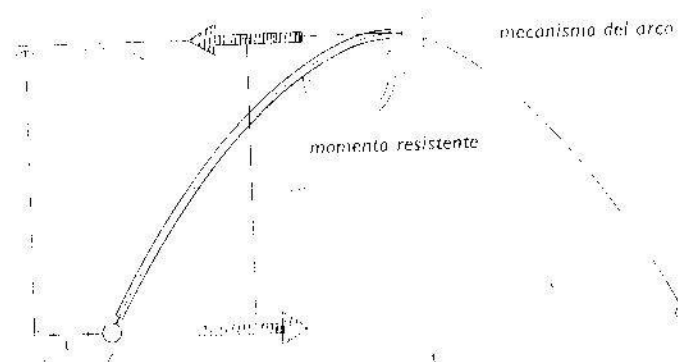
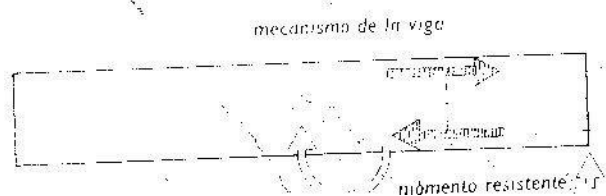


Influencia de la flecha del arco en los empujes en arranques

El empuje de un arco es inversamente proporcional a su flecha. Para reducir el empuje, la flecha del arco debe ser lo mayor posible.



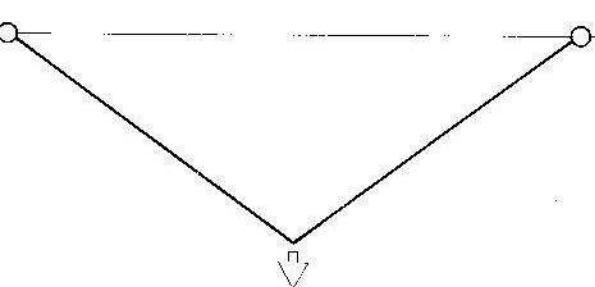
Comparación entre el mecanismo de la viga y el mecanismo del arco



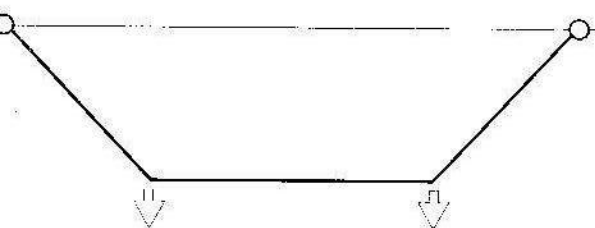
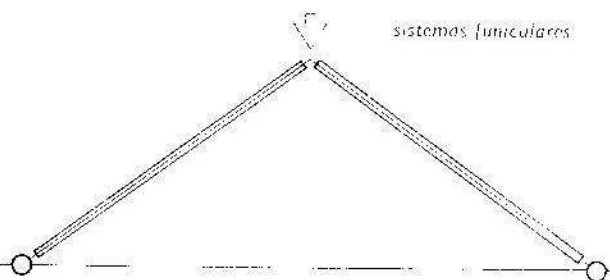
Relación entre el cable portante y el arco funicular

sistemas colgantes

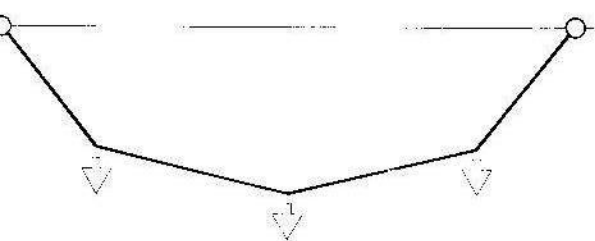
sistemas funiculares



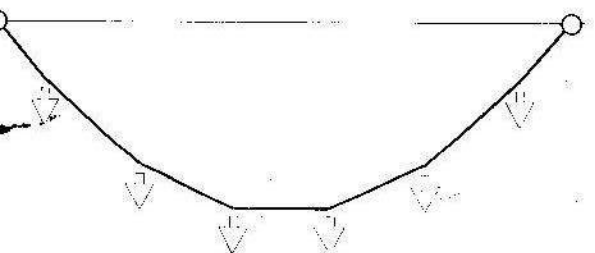
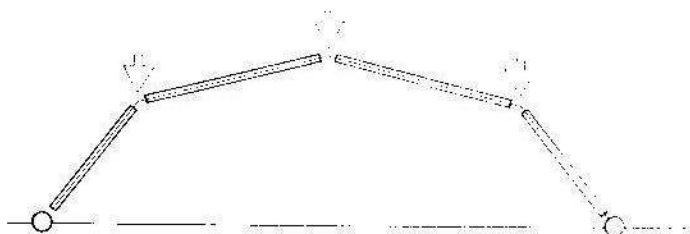
una carga puntual



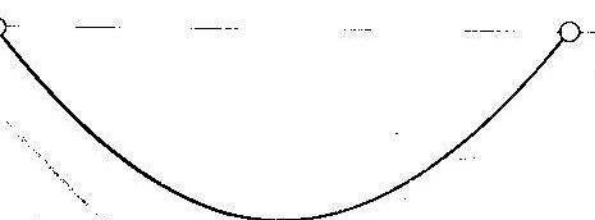
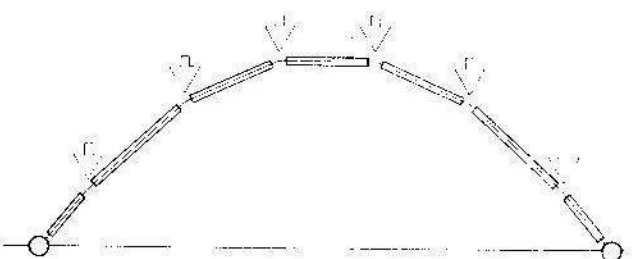
dos cargas puntuales



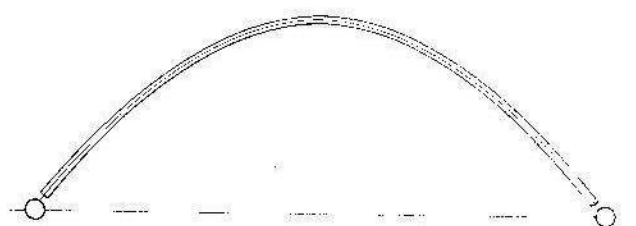
tres cargas puntuales



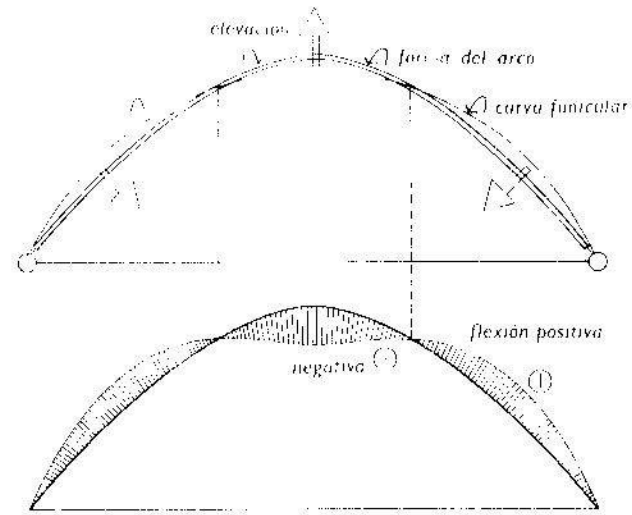
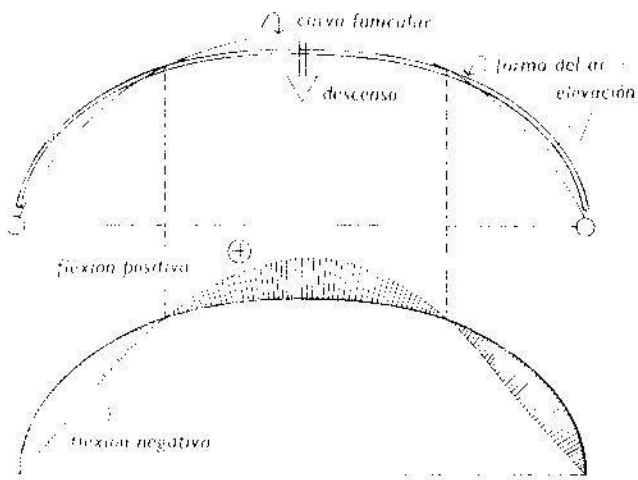
seis cargas puntuales



carga continua

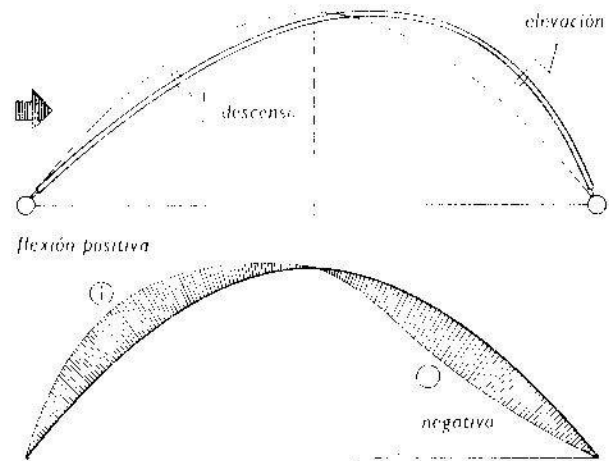
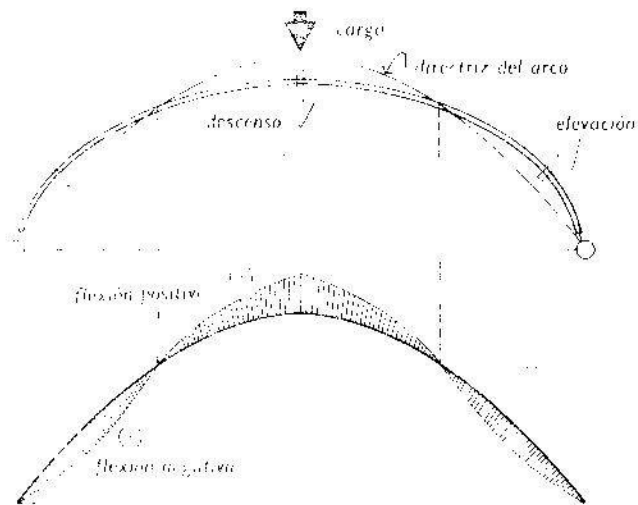


Flexión debida a la desviación de la directriz del



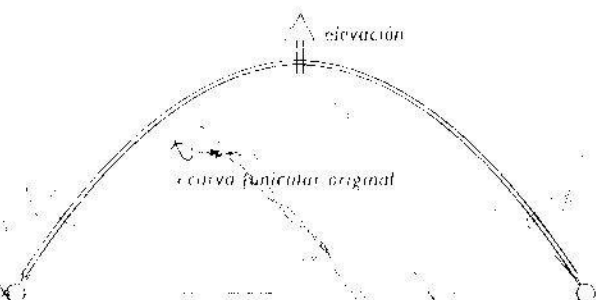
Cualquier desviación de la directriz del arco respecto de la curva funicular resultará, bien en una elevación o bien en un descenso de la curva funicular, originándose flexiones en ambos casos.

Flexión debida a una carga adicional, vertical u horizontal



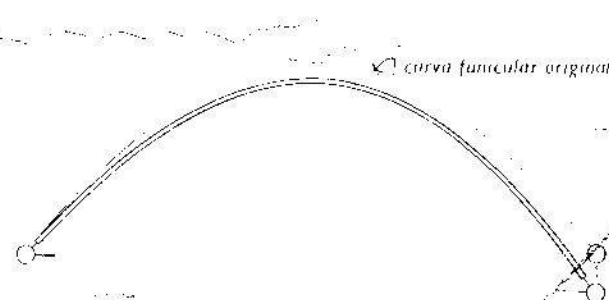
Cualquier carga adicional produciría una deformación del arco y por tanto, una desviación respecto de la curva funicular, produciéndose una flexión.

Variaciones térmicas



La dilatación (contracción) debida a variaciones térmicas introduce una flexión.

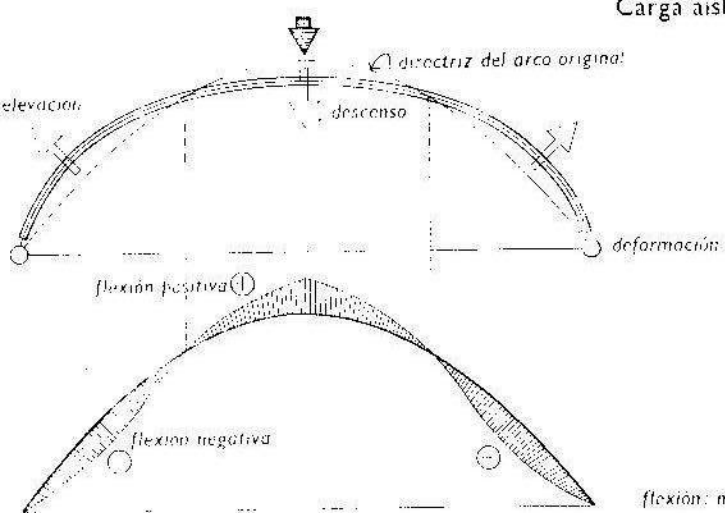
Asiento de apoyo



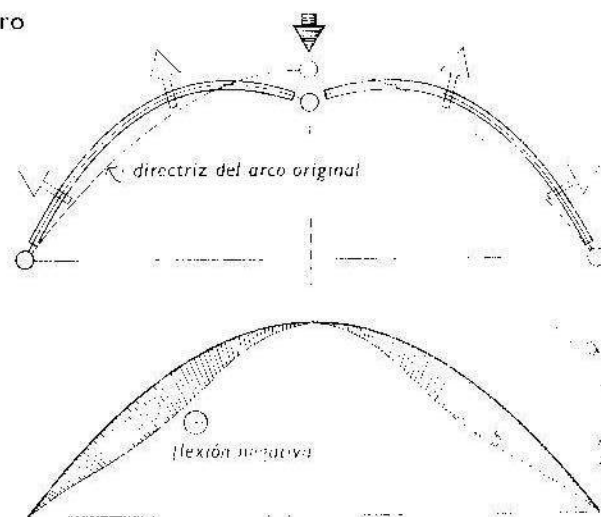
Una diferencia de cargas producida por asientos desiguales origina una flexión.

Comparación entre los arcos de dos y tres articulaciones

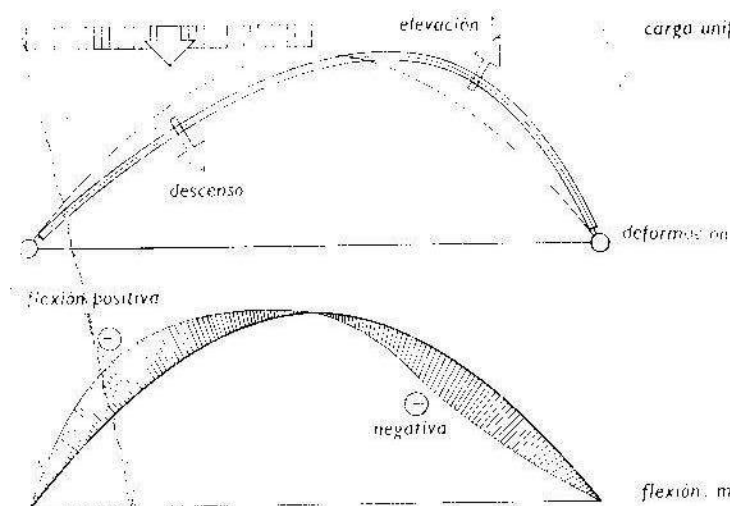
Carga aislada en el centro



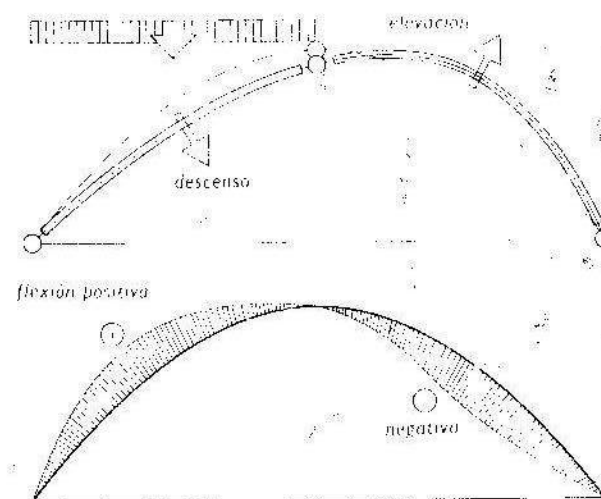
flexión: magnitud relativa



flexión: magnitud relativa

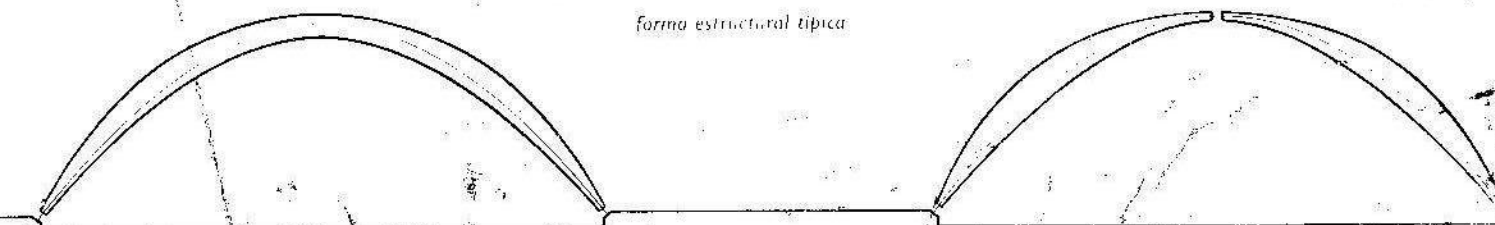


flexión: magnitud relativa

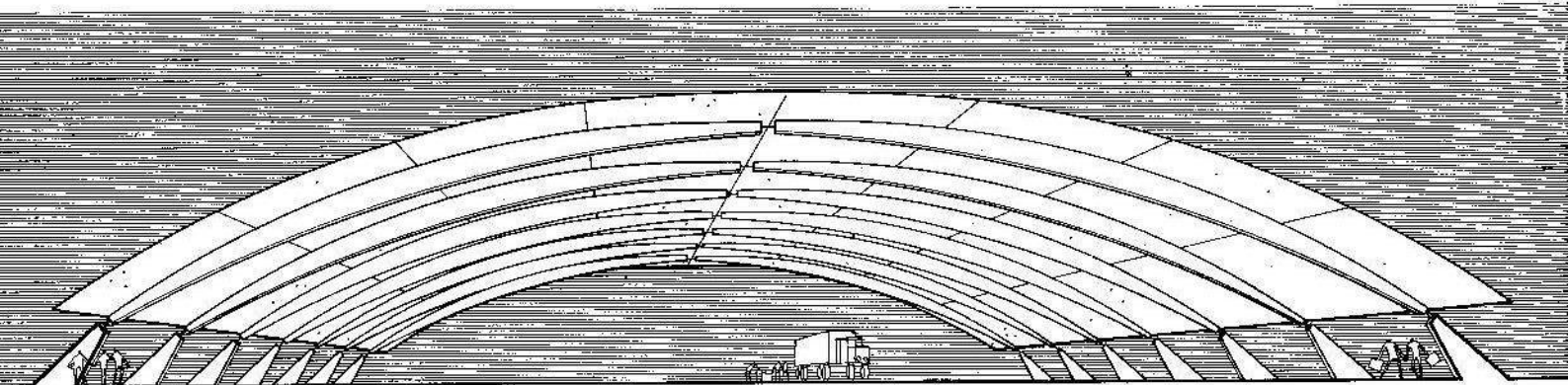


flexión: magnitud relativa

Forma estructural típica



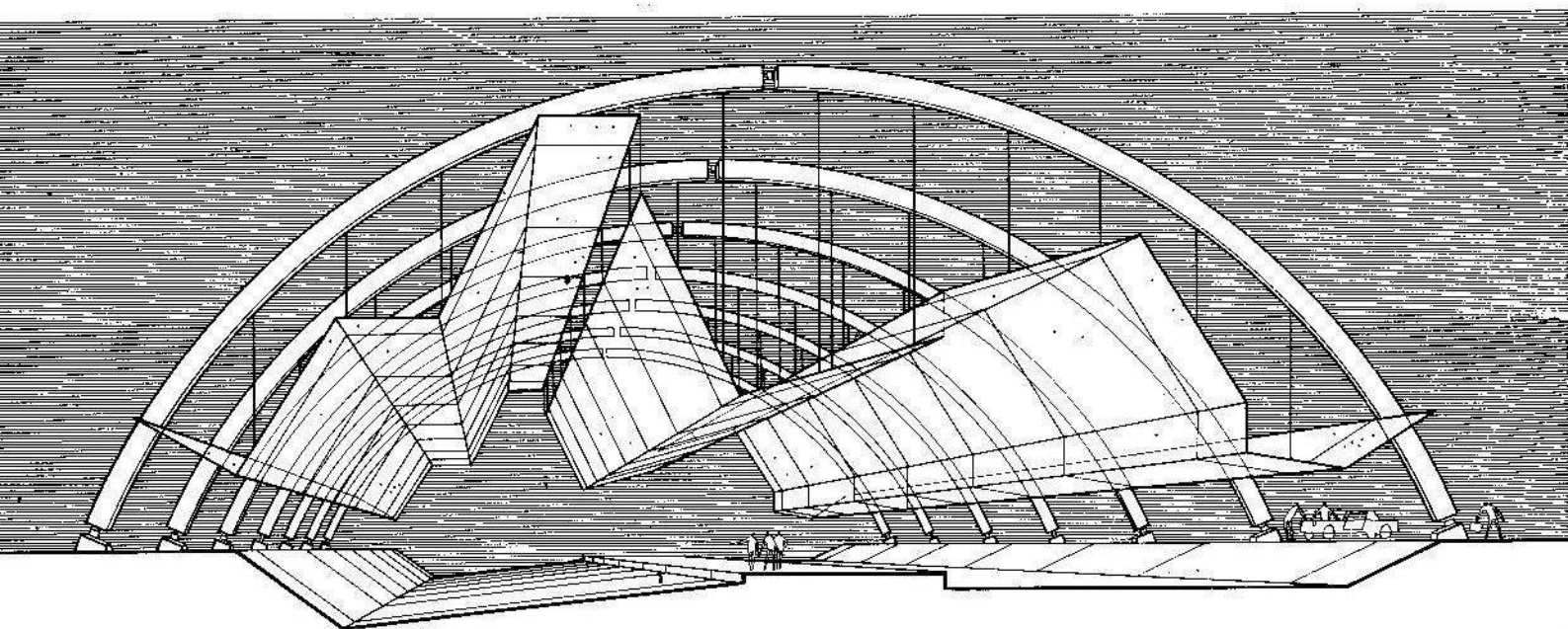
Sistemas estructurales de grandes luces, con arcos de tres articulaciones



Arcos con estribos con cubierta curva apoyada encima.

Curva funicular: catenaria.

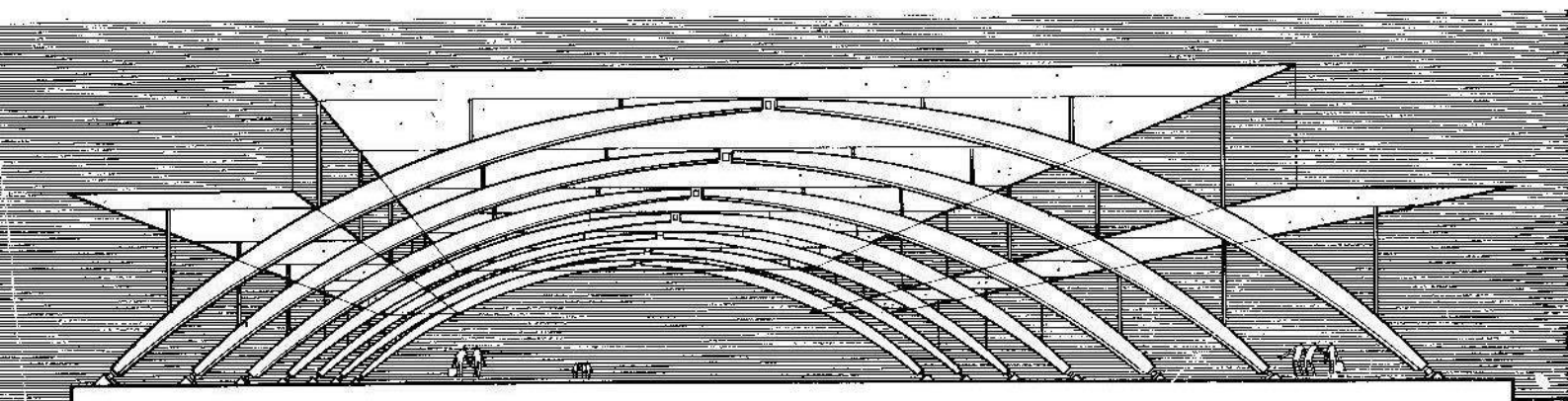
Ságita del arco = $\frac{1}{7}$ de la luz.



Arcos anclados al suelo en forma de segmentos, con cubierta colgante de forma libre.

Curva funicular: polígono irregular.

Ságita del arco = $\frac{1}{3}$ de la luz.



Arcos anclados al suelo, soportando una cubierta horizontal apoyada.

Curva funicular: polígono parabólico.

Ságita del arco = $\frac{1}{5}$ de la luz.

Sistemas estructurales de vector activo

2

Elementos cortos, sólidos y rectos, es decir, piezas lineales, son componentes estructurales, los cuales, debido a su reducida sección en relación con su longitud, pueden transmitir solamente esfuerzos en el sentido de ésta; es decir, tensiones normales (tracción y/o compresión), piezas comprimidas o extendidas.

Las piezas comprimidas o extendidas, ensambladas triangularmente, forman una composición estable y completa en sí misma que, si se sustenta convenientemente, es capaz de recibir cargas asimétricas y variables transmitiéndolas a los extremos.

Las piezas comprimidas y extendidas, dispuestas según una cierta forma y formando en conjunto un sistema con nudos articulados constituyen mecanismos que pueden dirigir las fuerzas y transmitir las cargas a grandes distancias sin soportes intermedios, sistemas estructurales activos vectorialmente.

Característica de los sistemas estructurales de vector activo es la disposición triangulada de las piezas rectas.

Los sistemas estructurales de vector activo efectúan el cambio de dirección de las fuerzas, descomponiendo las exteriores en varias direcciones por medio de dos o más miembros, mantenidos vectorialmente en equilibrio por las fuerzas opuestas convenientes.

La posición de las barras de las cerchas, en relación con la dirección del esfuerzo exterior, determina en el sistema estructural de vector activo la magnitud del vector tensión en las piezas. Es conveniente un ángulo comprendido entre 45° - 60° respecto de la dirección de la fuerza; consigue una desviación eficaz con vectores-fuerza relativamente pequeños.

Los sistemas estructurales de vector activo son sistemas de múltiples componentes, cuyo mecanismo estriba en la

acción concertada de cada una de las piezas comprimidas y extendidas.

El conocimiento de lo que pueden hacer las fuerzas para variar su dirección por medio de la descomposición vectorial, y de cómo puede controlarse la magnitud del vector-fuerza, es un requisito previo indispensable para la evolución de las ideas estructurales sobre una base vectorial.

Ya que la composición y descomposición de fuerzas constituye el fundamento de cualquier transformación físico-mecánica y, en consecuencia, la esencia del proyecto de cualquier mecanismo resistente, la importancia de los mecanismos de vector activo se refiere no solamente a las estructuras trianguladas, sino a cualquier otra forma imaginada que intente dirigir las fuerzas con el fin de crear un espacio abierto.

La dirección de las fuerzas mediante un mecanismo vectorial no ha de verificarse exclusivamente en un plano ni la distribución de las cargas sólo en un eje. La descomposición de las fuerzas puede llevarse a cabo también en superficies curvas o efectuarse en espacios tridimensionales.

Disponiendo las barras en superficies de simple o doble curvatura se sigue manteniendo la ventaja de la descomposición de las fuerzas de los sistemas de vector activo, y así se establece una transmisión coherente de las cargas y un mecanismo resistente: sistema triangulado curvo.

La combinación de vigas de celosía dispuestas según dos sistemas de planos conduce al emparrillado espacial o sistema reticulado de tres dimensiones.

El conocimiento de la geometría del espacio, de la sistemática de los poliedros y de las leyes de la trigonometría es requisito previo para la utilización de las múltiples posibilidades del proyecto de emparrillados espaciales.

El mecanismo de la descomposición de fuerzas de los sistemas de vector activo puede aplicarse también a otros tipos estructurales, en especial si éstos a causa del incremento de peso propio han alcanzado los límites de lo realizable. Así, arcos, pórticos o láminas pueden proyectarse también como sistemas reticulados.

Atendiendo a la distribución de tensiones, los sistemas estructurales de vector activo pueden asimilarse a otras estructuras compactas que posean la misma forma exterior; en una viga de celosía simplemente apoyada, con cordones paralelos, las tensiones de éstos, tanto en dirección como en magnitud relativa, son similares a las tensiones internas de una viga recta apoyada, análogamente, en sus dos extremos.

Puesto que las composiciones de vector activo son muy eficientes respecto a condiciones variables de las cargas, y ya que están compuestas por elementos de directriz recta de reducida longitud, son eminentemente aptas para formar sistemas estructurales verticales en edificios de gran altura.

Los sistemas de vector activo tienen grandes ventajas como sistemas estructurales verticales para edificios de gran altura. Compuestos de forma conveniente pueden combinar las funciones estructurales de agrupación lineal de las cargas, de transmisión directa de éstas y de estabilidad lateral contra el viento.

Los sistemas estructurales de vector activo, a causa de sus ilimitadas posibilidades de expansión en las tres dimensiones con elementos normalizados y con un mínimo de obstrucción del espacio, constituyen la forma estructural conveniente para las dinámicas ciudades del futuro.

Los sistemas estructurales de vector activo son requisito previo para una amplia intrusión del urbanismo en la tercera dimensión de la altura. Solamente mediante estructuras espaciales de vector activo

puede alcanzarse un dominio técnico del espacio tridimensional a escala urbana.

Por tanto, el conocimiento de los sistemas estructurales de vector activo es imprescindible no solamente para el proyectista de edificios de altura, sino también para el planificador de estructuras tridimensionales de ciudades.

Los sistemas estructurales de vector activo, en su transparencia esquelética, son

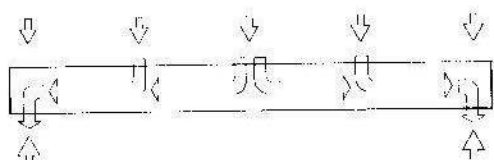
una expresión convincente del genio inventivo del hombre para manejar las fuerzas y dominar a la gravedad.

A causa del tratamiento puramente técnico de las estructuras hasta el presente, el potencial estético de los sistemas de vector activo no ha sido explotado todavía. El empleo de los sistemas estructurales de vector activo en la edificación se caracteriza, por tanto, por una ejecución de la estructura a un alto nivel, de una

parte, y por un refinamiento estético de bajo nivel, de otra.

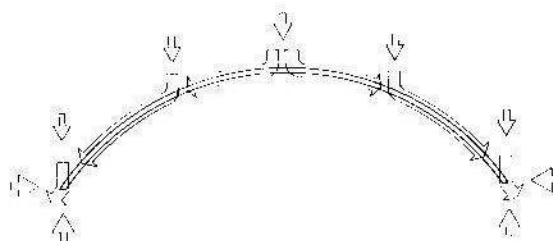
Con el desarrollo de nudos limpios y acusados y sencillas y esbeltas secciones de las piezas, las estructuras triangulares y los sistemas estructurales reticulados serán tratados también, en la edificación futura, en forma estética y desempeñarán esa función determinante de la forma que corresponde al potencial creador y a la calidad estructural.

Comparación con otros mecanismos de transmisión de fuerzas



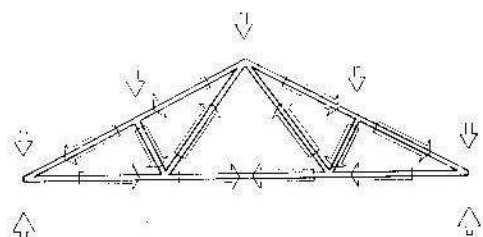
mecanismo de viga

Transmisión de las fuerzas exteriores mediante una sección material rígida.



mecanismo del arco

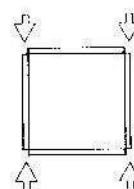
Transmisión de las fuerzas exteriores mediante forma material conveniente.



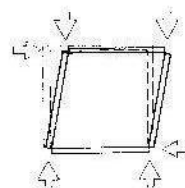
mecanismo de estructura triangulada

Transmisión de las fuerzas exteriores mediante una disposición conveniente de las barras.

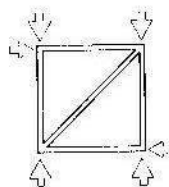
Rigidez de la retícula conseguida mediante triangulación de la estructura.



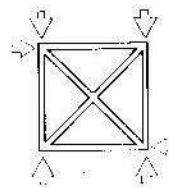
Un pórtico con cuatro nudos articulados se halla en equilibrio sólo teóricamente.



Bajo cargas asimétricas, el equilibrio del sistema se rompe en tanto los nudos permanezcan articulados.

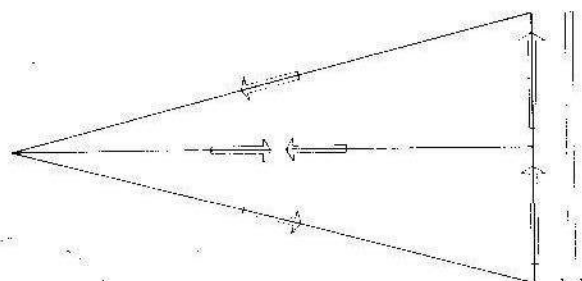
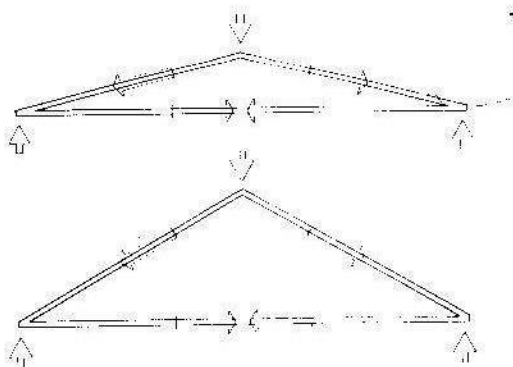


El elemento diagonal impide la deformación. El pórtico se convierte en estructura triangulada.

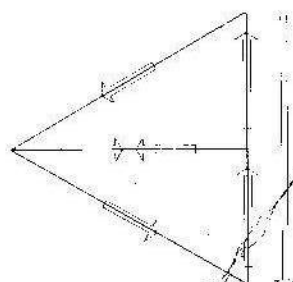


Una segunda diagonal incrementa la rigidez, pero no es necesaria para el efecto resistente.

sistema de transmisión vectorial



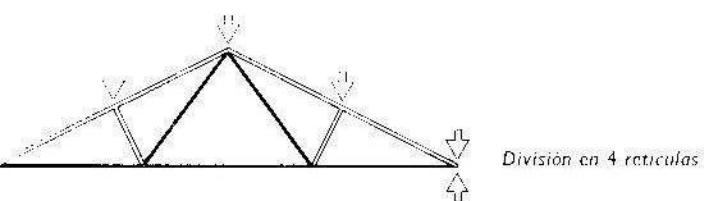
Altura reducida: los esfuerzos de las barras se incrementan porque su componente en la dirección de la fuerza exterior es pequeña y resulta poco eficaz.



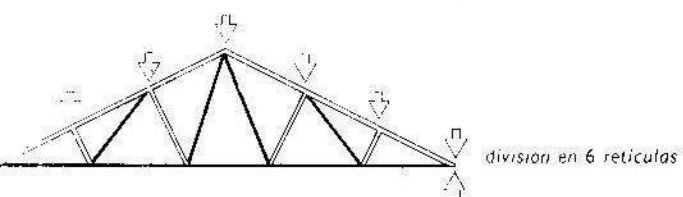
Altura aumentada: los esfuerzos en las barras decrecen porque su componente en dirección a la fuerza exterior es grande y resulta más eficaz.

Cada carga exterior es mantenida en equilibrio por dos o más vectores-fuerza.

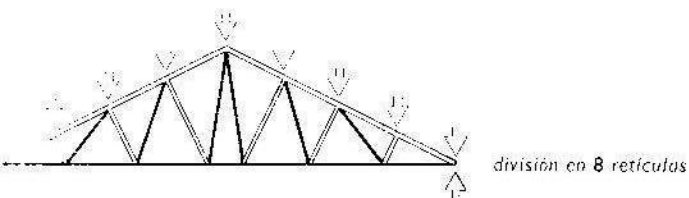
Influencia de la división del reticulado en la distribución de esfuerzos



División en 4 retículas

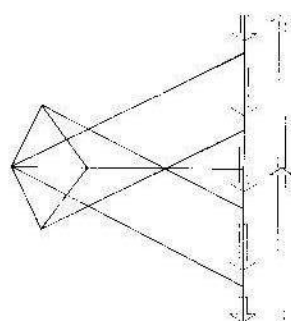
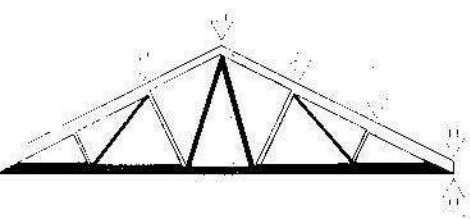


división en 6 retículas



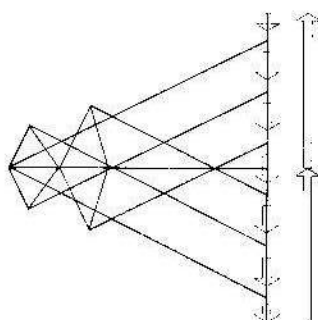
división en 8 retículas

Magnitudes comparativas de los esfuerzos en las barras



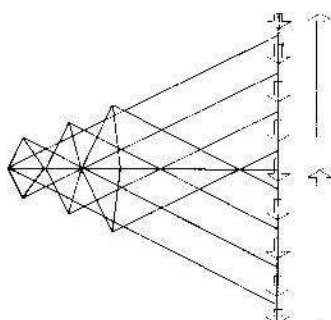
4 retículas

Esfuerzos mayores (compresión) en las barras superiores con longitudes de pandeo críticas.



6 retículas

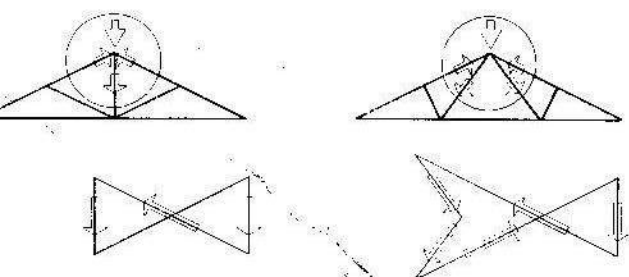
Considerable reducción de la longitud de pandeo en las barras superiores. Apreciable reducción de esfuerzos en los elementos diagonales.



8 retículas

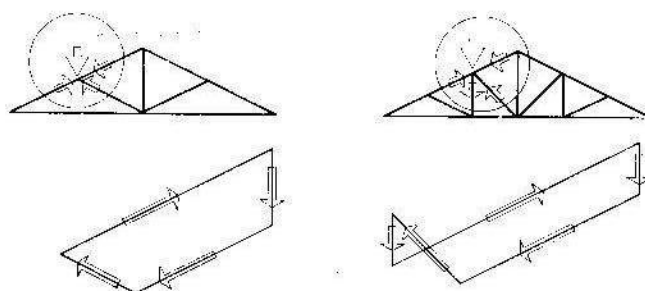
Reducción menor de la longitud de pandeo de las barras superiores. Escasa reducción de esfuerzos en los elementos diagonales.

Influencia de la configuración del entramado en la distribución de esfuerzos en los nudos



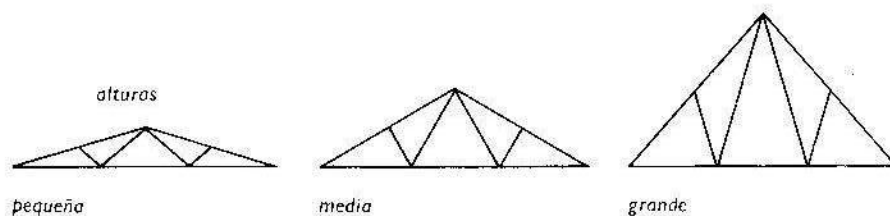
A pesar del aumento de retículas, los esfuerzos en las barras que concurren en el par disminuirán poco por el diferente ángulo que forman las barras.

Carga uniforme de la estructura.



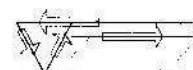
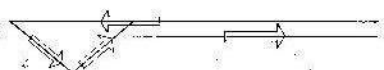
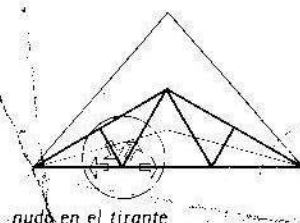
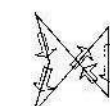
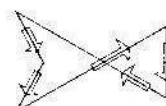
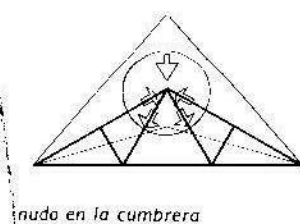
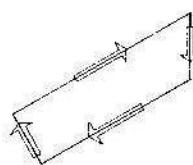
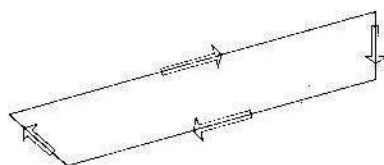
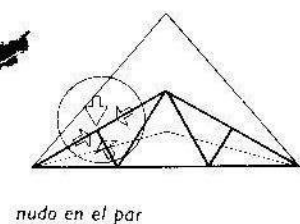
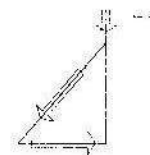
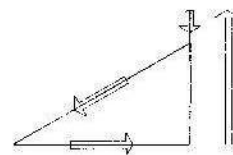
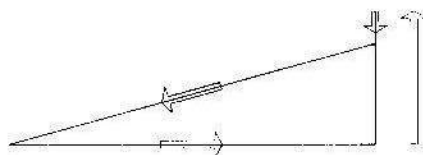
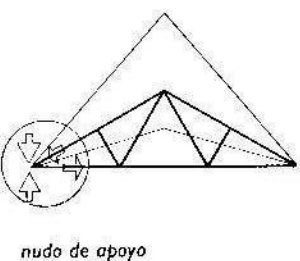
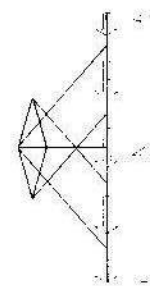
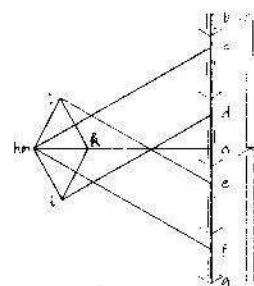
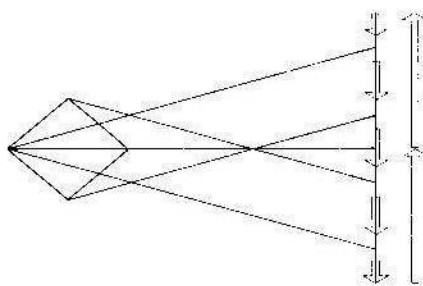
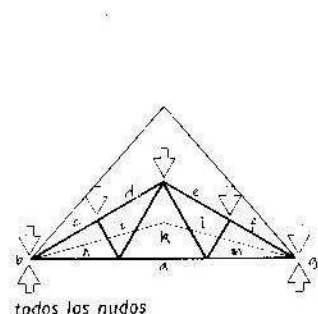
A pesar de la barra adicional, los esfuerzos en el par aumentarán a causa del ángulo menos eficaz que forman las barras.

Influencia de la altura de la cercha en los esfuerzos de las barras



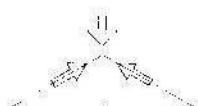
Nudos de análisis.

Vectores-fuerzas.

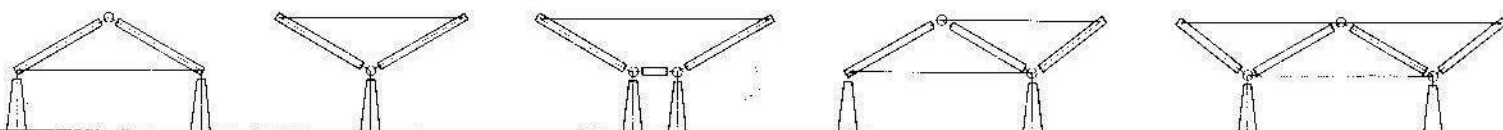


Derivación de formas básicas para simples cerchas bidimensionales

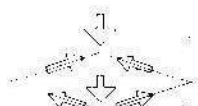
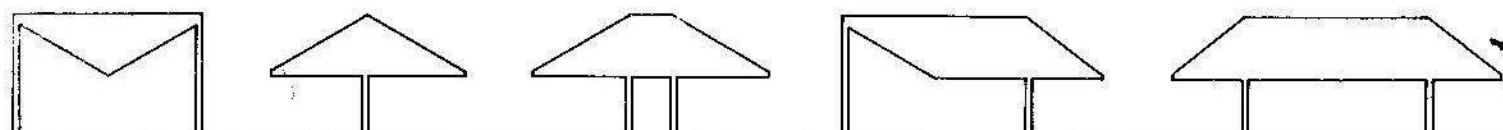
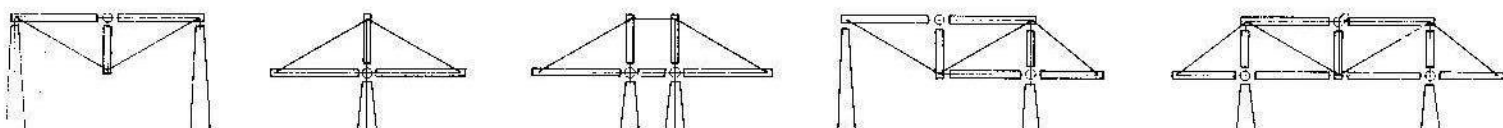
Influencia de las condiciones de apoyo en la forma estructural.



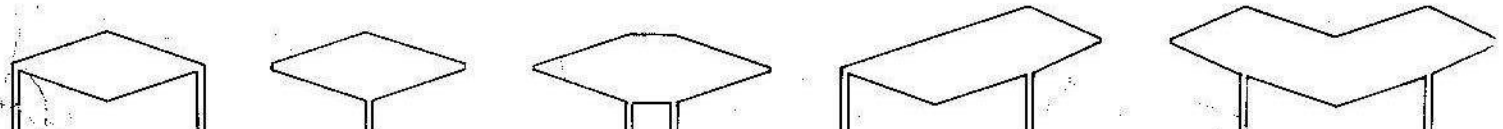
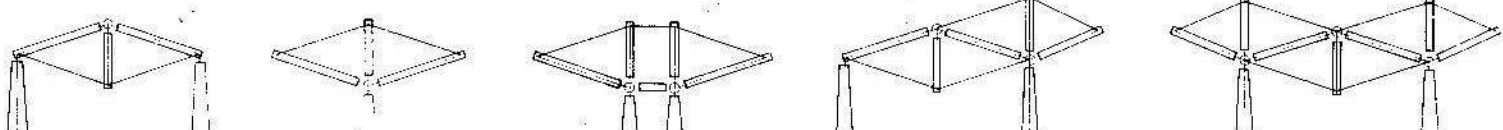
Acción vectorial mediante elementos comprimidos.



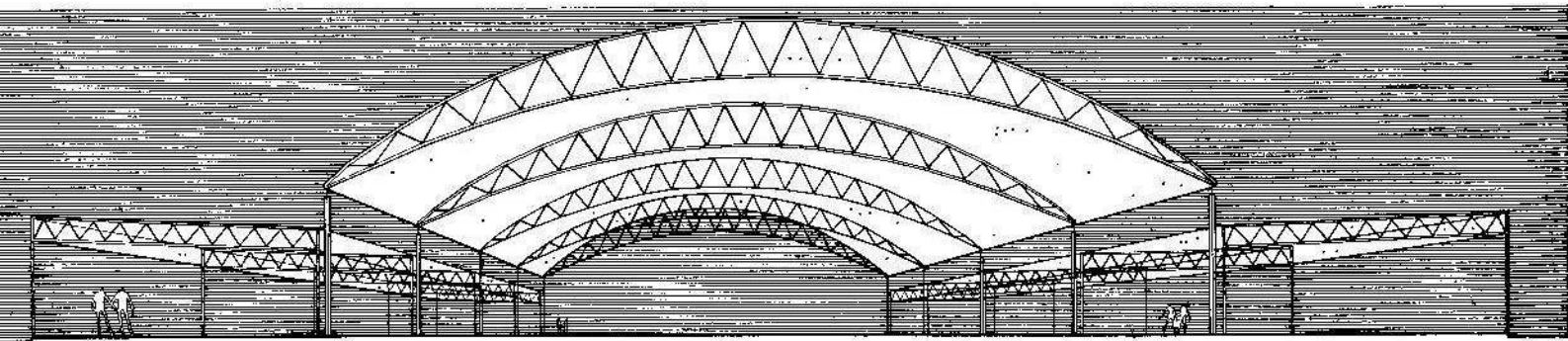
Acción vectorial mediante elementos en tracción.



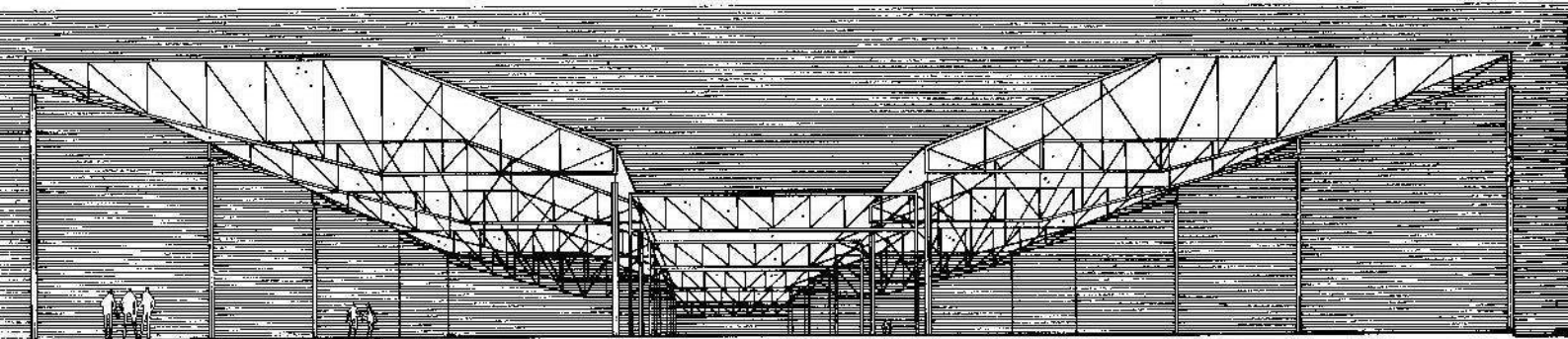
Acción vectorial mediante combinación de elementos en tracción y en compresión.



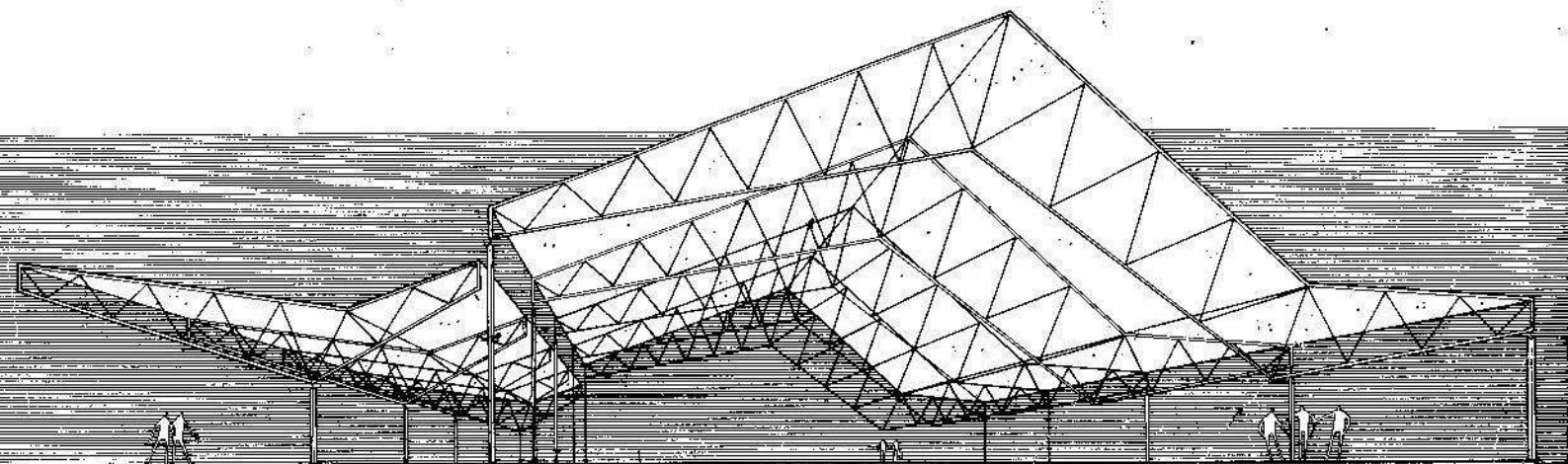
Composición de cerchas de pequeña y gran luz



Composición simétrica con cercha de gran luz en el centro.

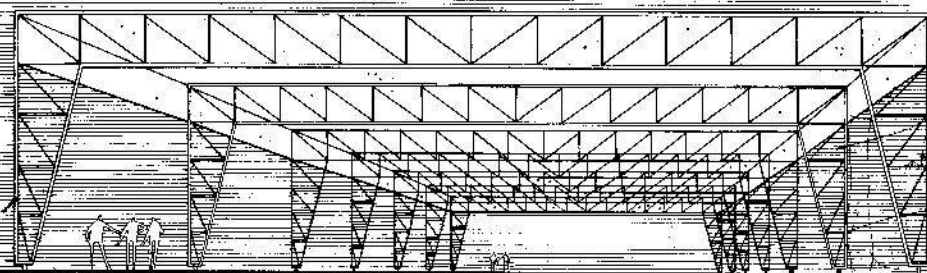


Composición simétrica con cerchas de gran luz a los lados.

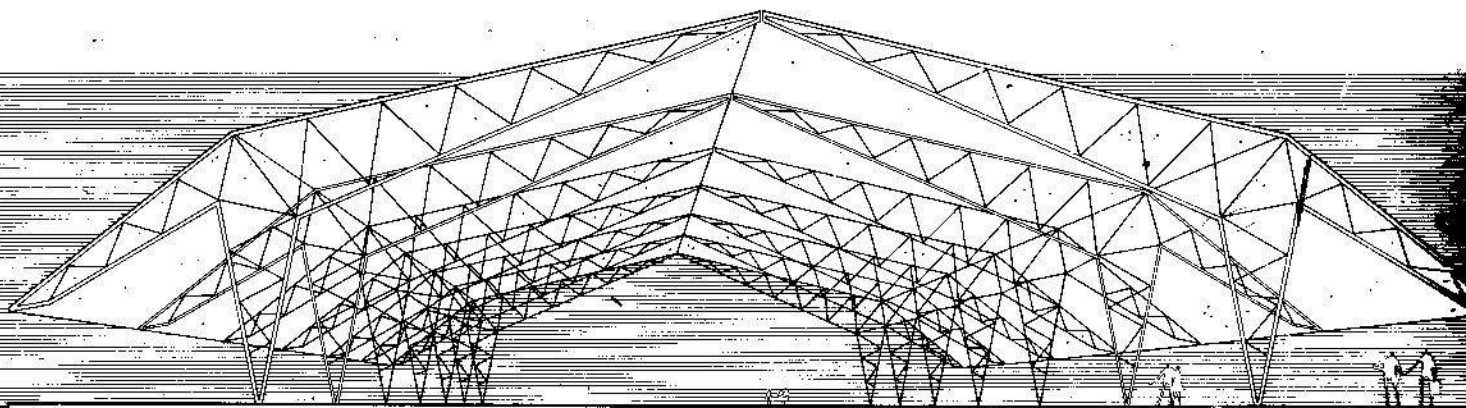


Composición asimétrica con cerchas de grande y pequeña luz.

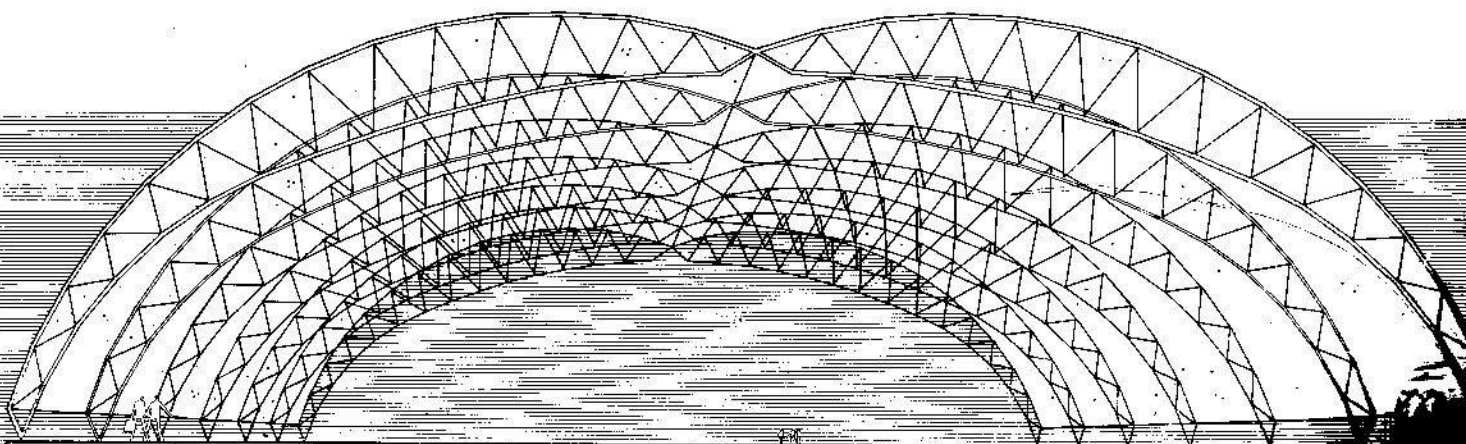
Aplicación del mecanismo de cercha para otros sistemas estructurales



Estructura de pórtico con
articulaciones.

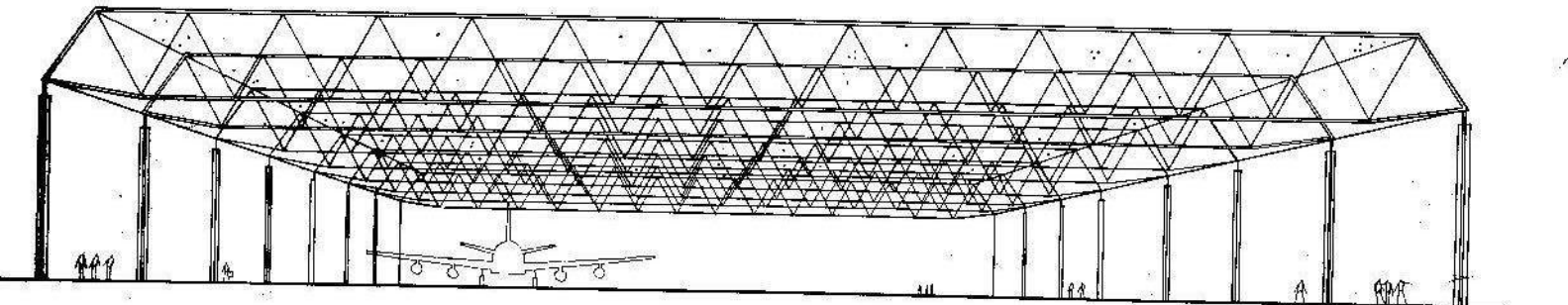


Estructura de pórtico con tre
articulaciones y voladizos.

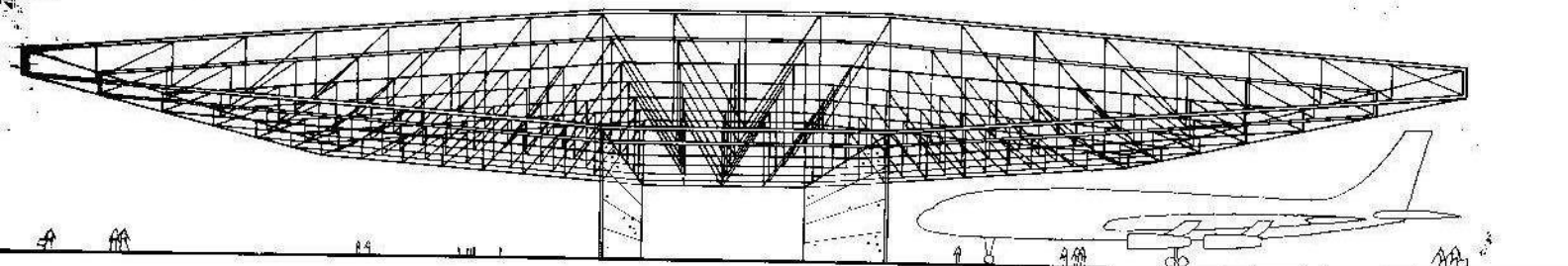


Arco reticulado con
aciones.

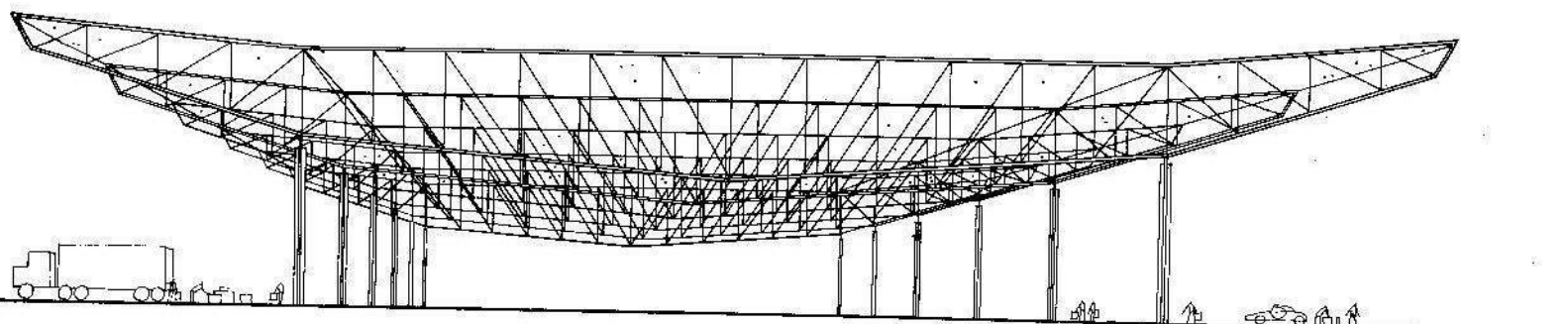
Cerchas de gran luz con diferentes condiciones de apoyo



Cerchas apoyadas en ambos extremos: estructura de luz libre.

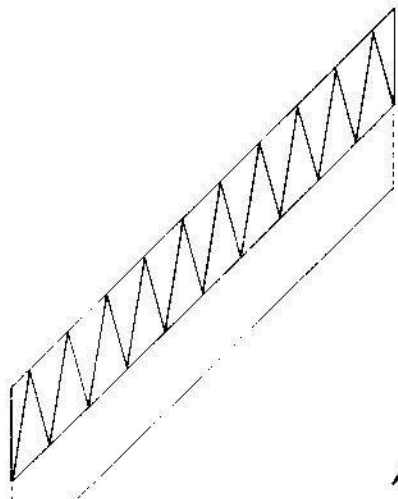


Cerchas con doble soporte en el centro: estructura en voladizo.

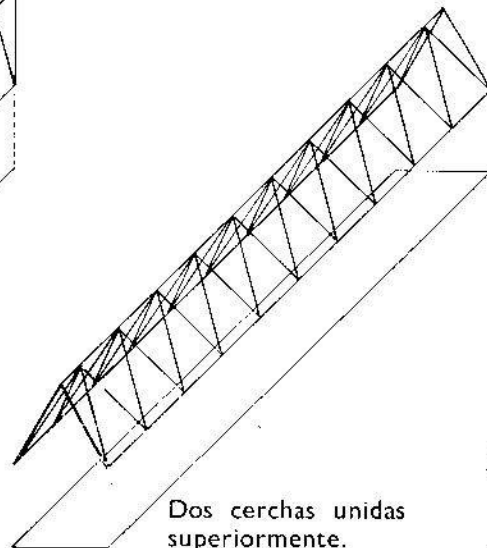


Cerchas con extremos en voladizo: estructura de luz libre, con voladizos.

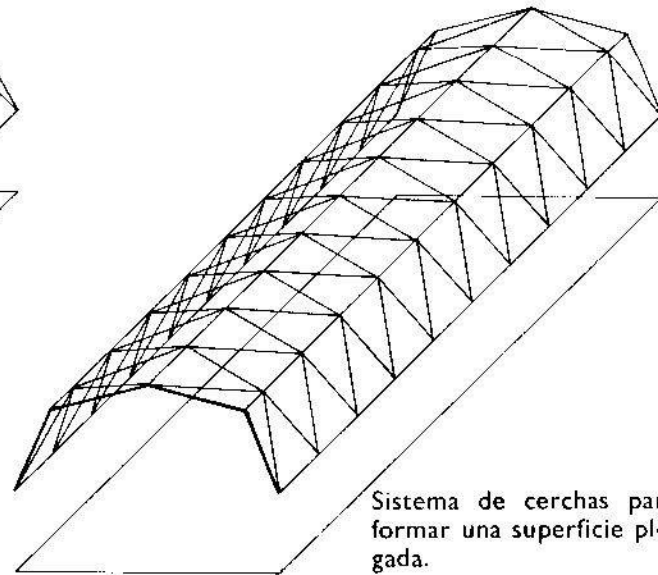
Combinación de cerchas planas para formar sistemas estructurales de superficies plegadas o curvas



Cercha plana simple.

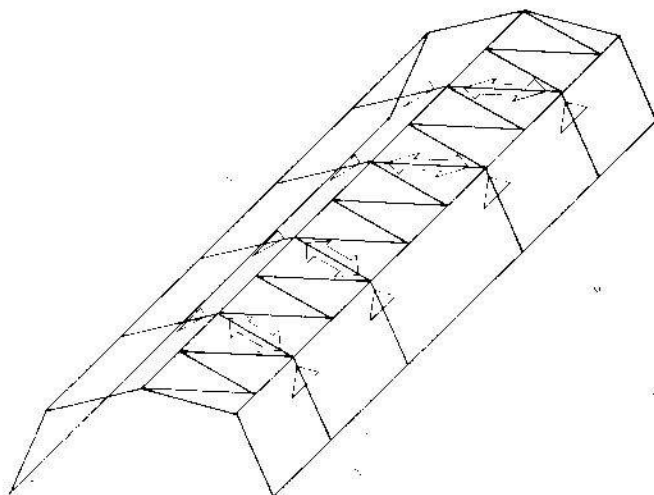


Dos cerchas unidas superiormente.

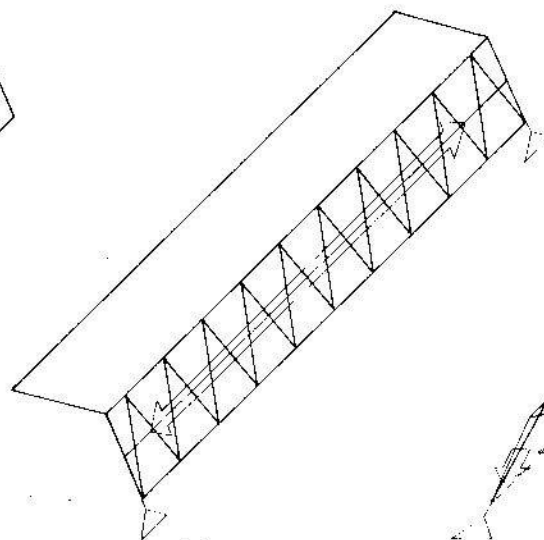


Sistema de cerchas para formar una superficie plegada.

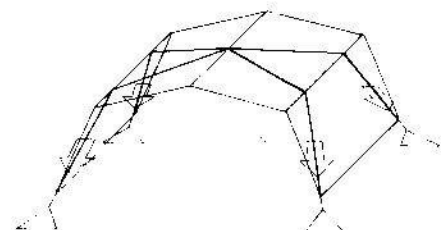
Triple acción resistente de un conjunto espacial de cerchas



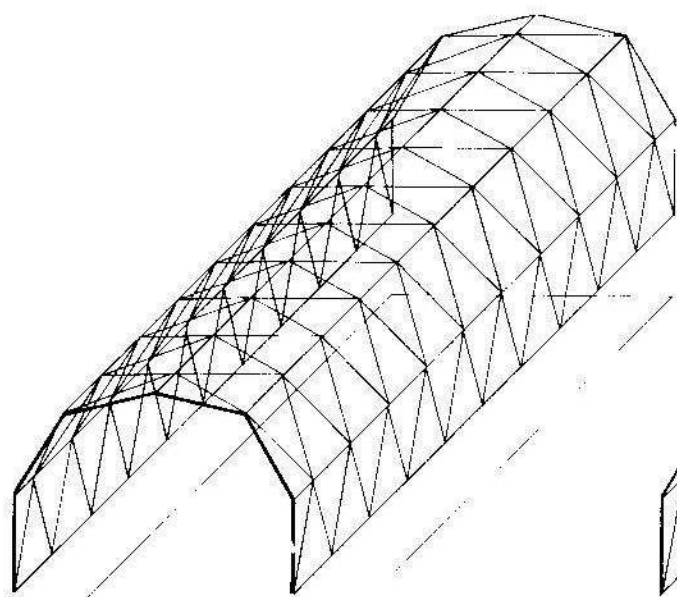
Acción resistente transversal entre cordones como vigas aisladas.



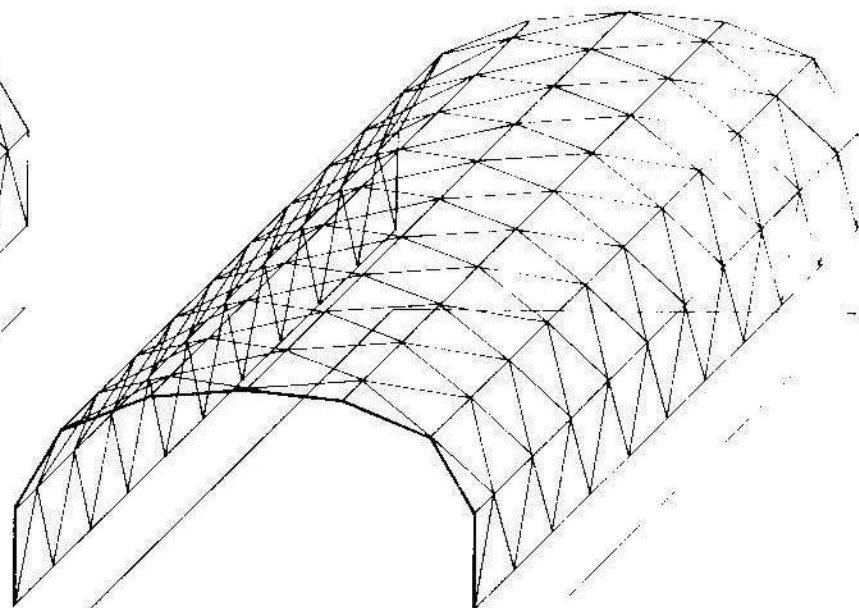
Acción resistente longitudinal como vigas aisladas.



Acción resistente transversal como pórticos diagonales.

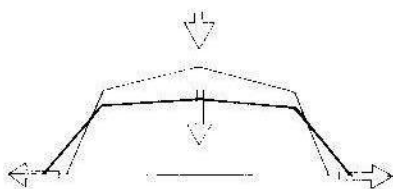


Sistema de perfil poligonal.

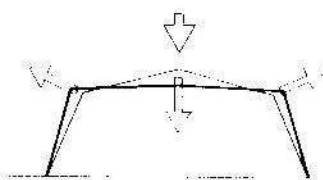


Aproximación a la forma cilíndrica.

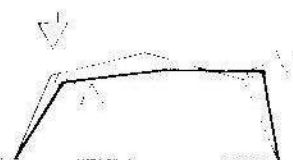
Deformación crítica del perfil transversal



Corrimiento lateral de los apoyos.



Descenso de la cumbrera.

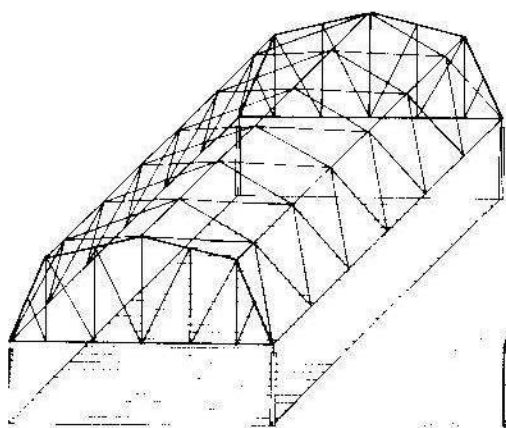


Variación de los ángulos en los nudos.

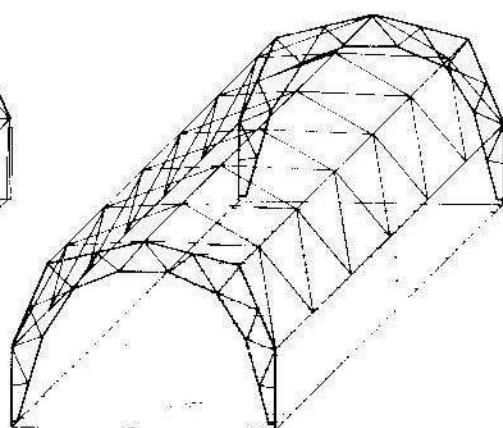


Flexión (pandeo) de barras.

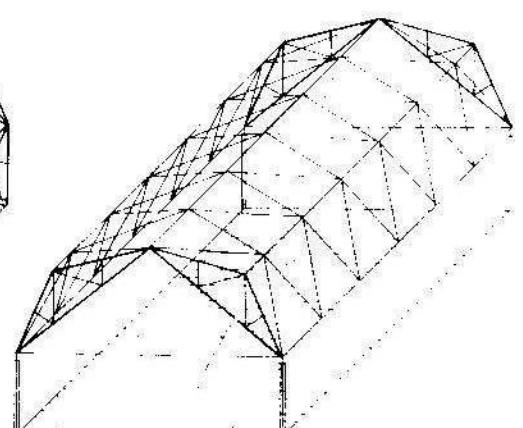
Formas típicas de rigidización transversal



Cerchas-diafragma sobre pilares.

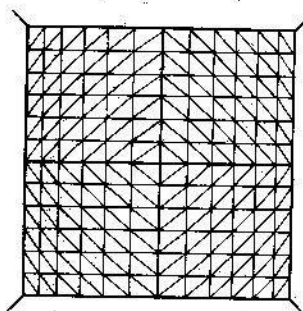
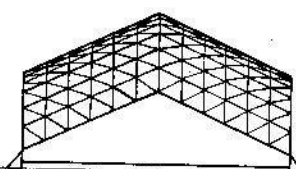
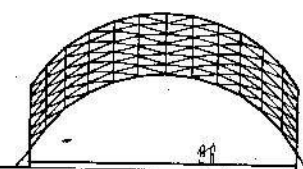


Pórtico reticulado, con dos articulaciones sobre cimientos.

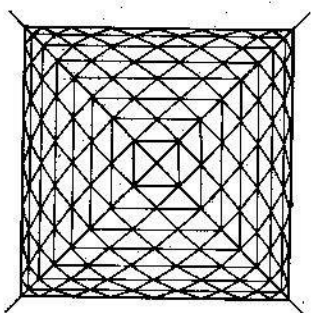
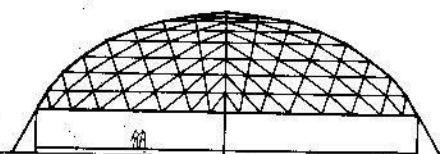
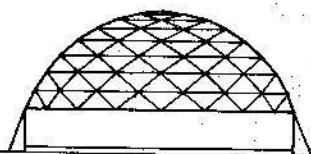
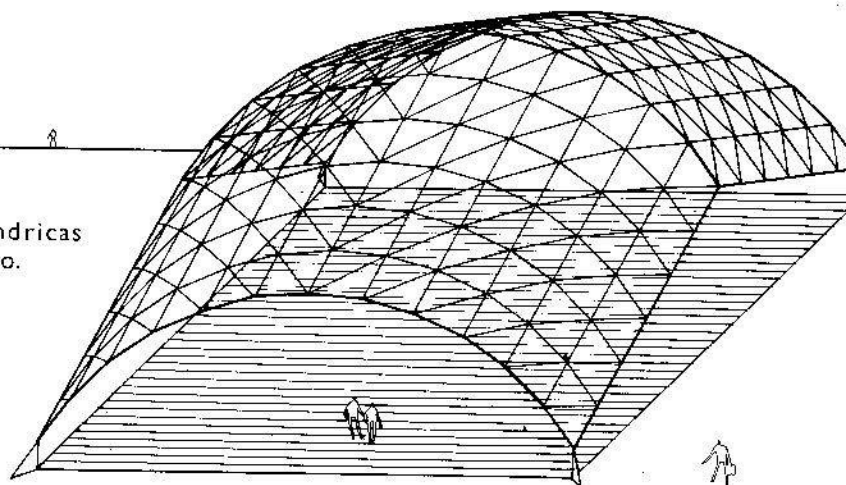


Cercha triarticulada, atirantada y sobre pilares.

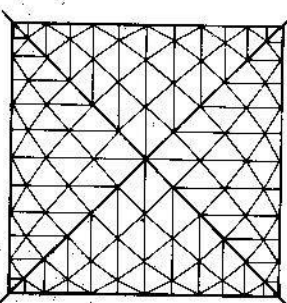
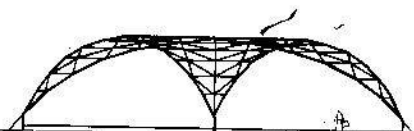
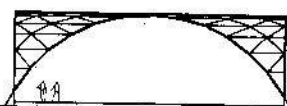
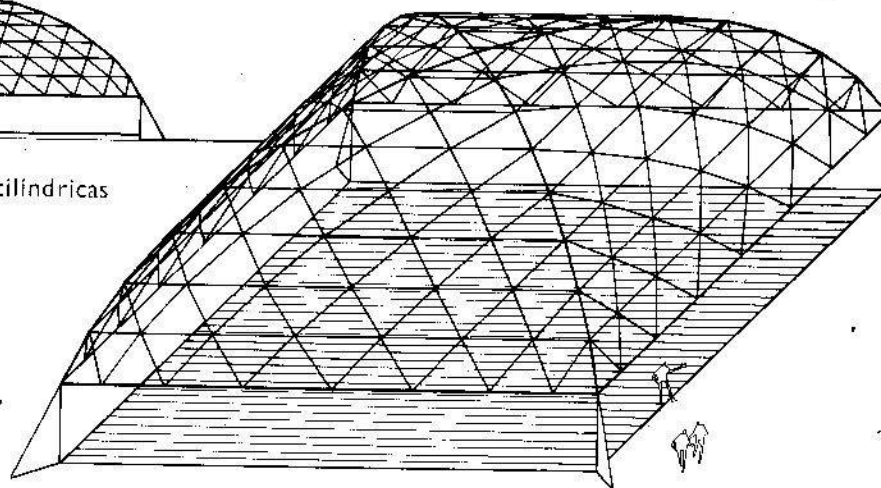
Sistemas de cerchas para superficie de curvatura simple



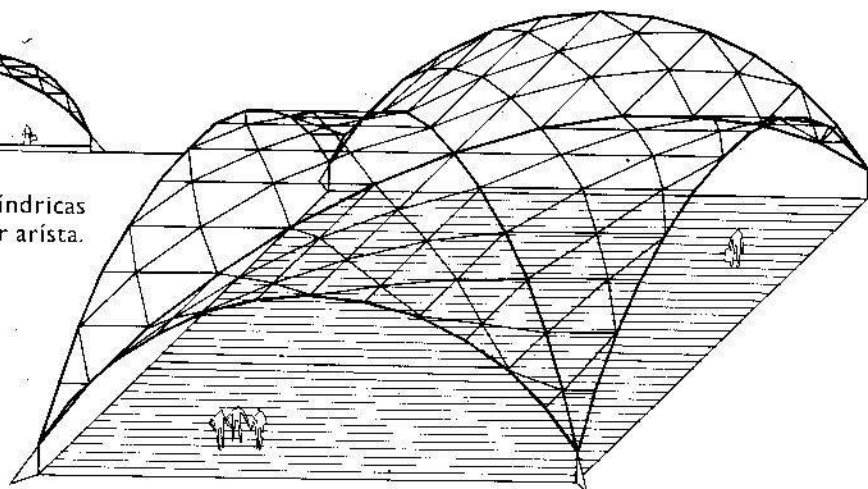
Dos superficies cilíndricas elevándose hacia el centro.



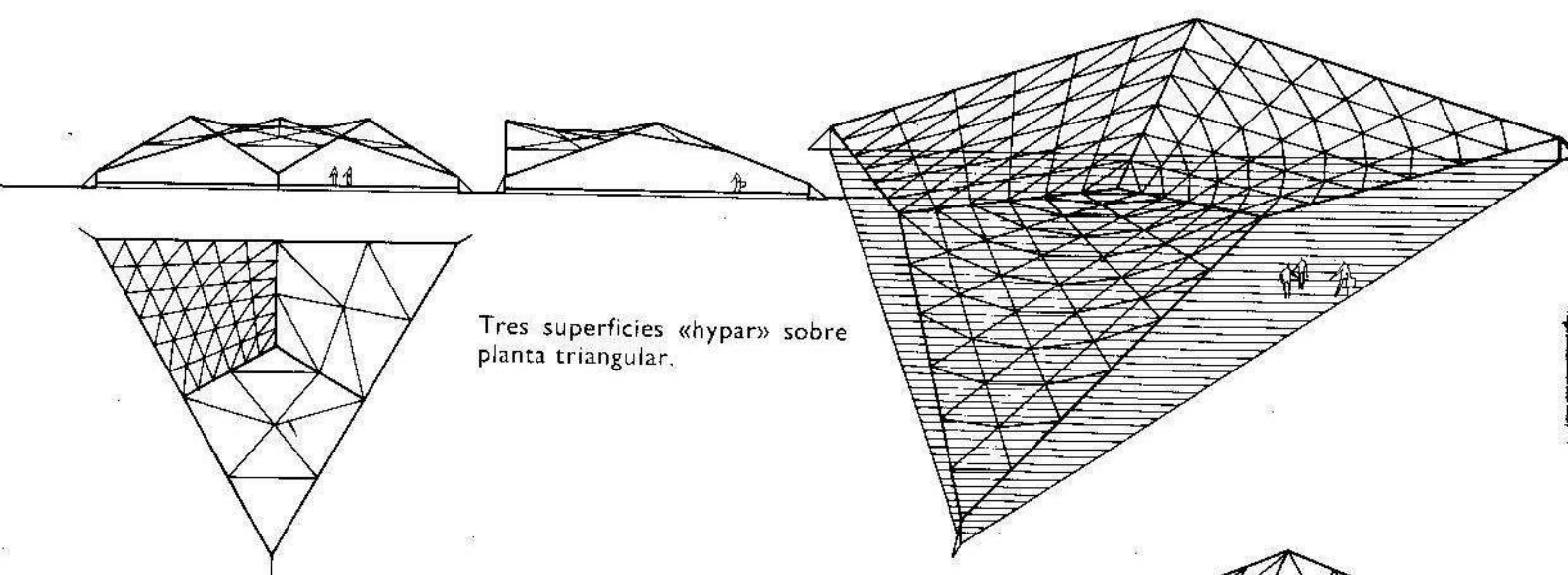
Cuatro superficies cilíndricas formando una cúpula.



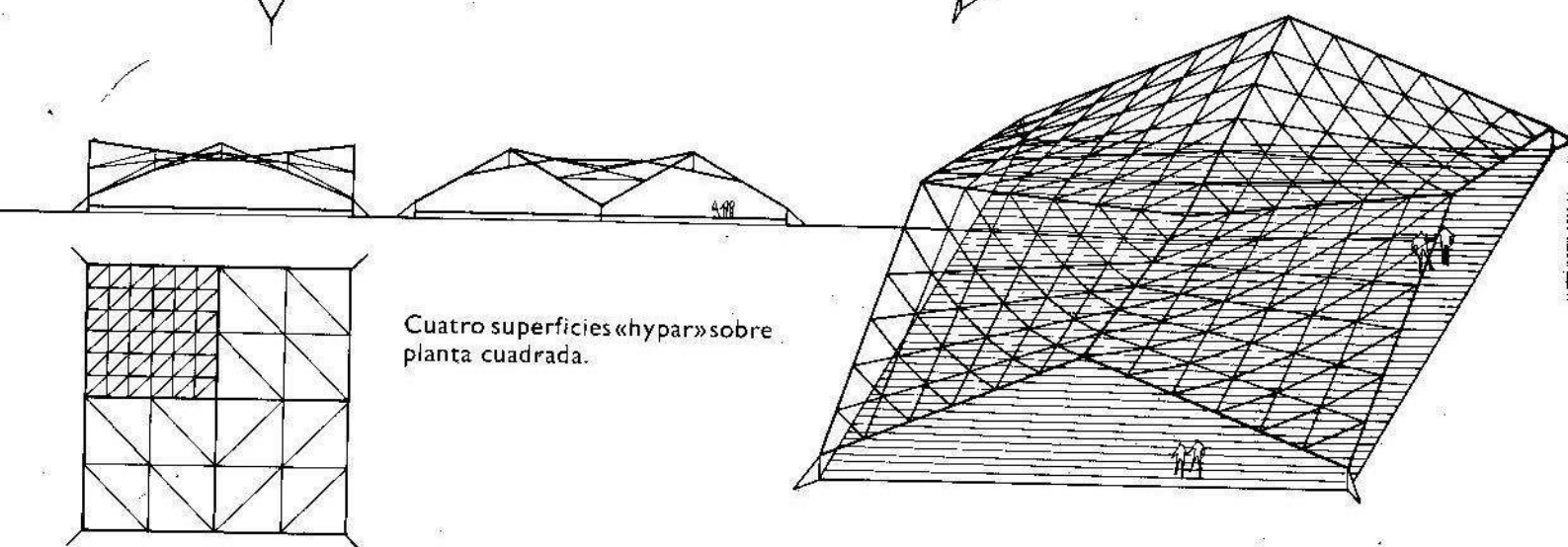
Cuatro superficies cilíndricas formando una bóveda por arista.



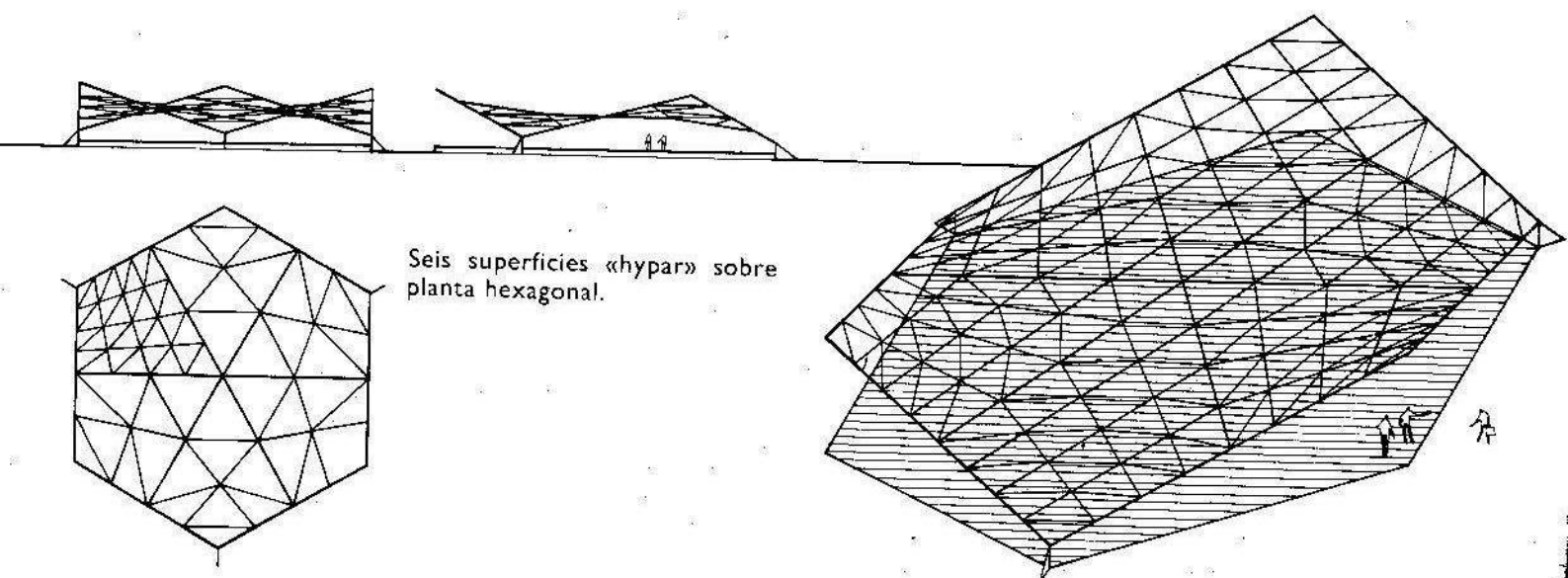
Sistemas de cerchas para superficies de doble curvatura



Tres superficies «hypar» sobre planta triangular.

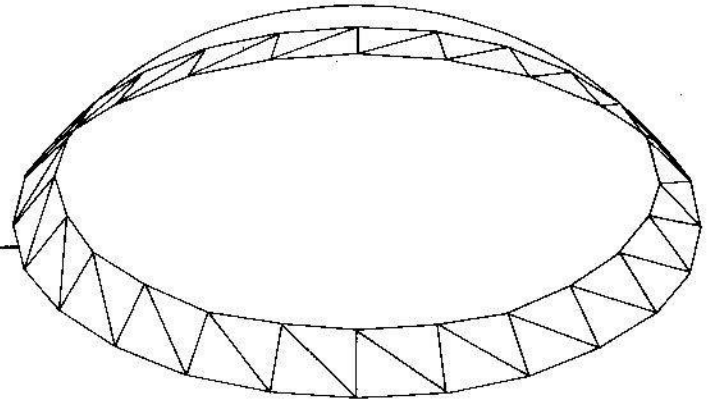
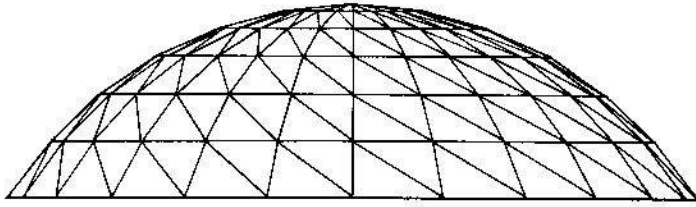


Cuatro superficies «hypar» sobre planta cuadrada.

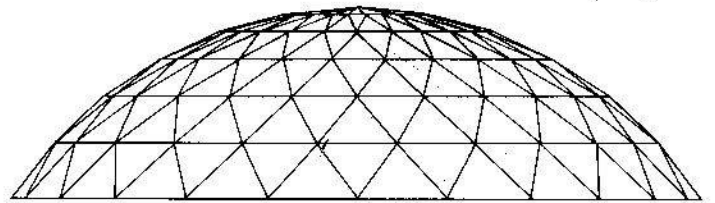
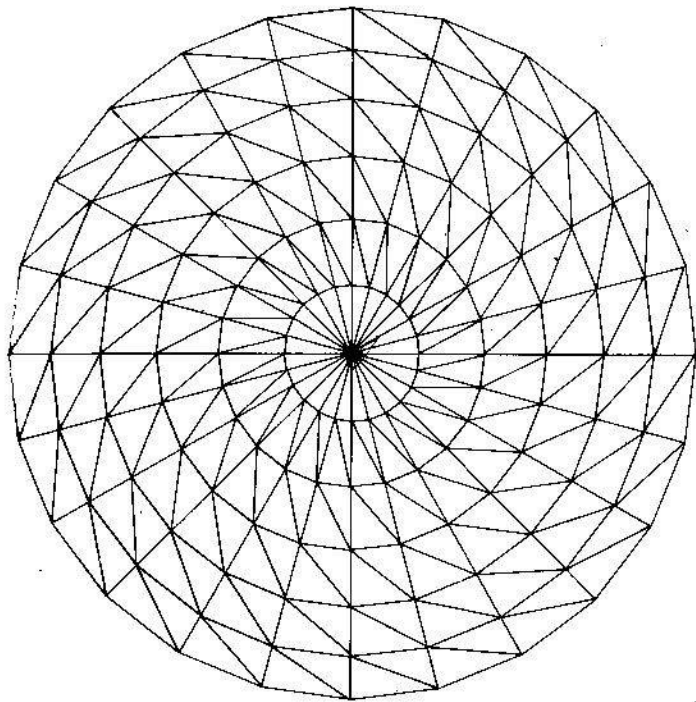


Seis superficies «hypar» sobre planta hexagonal.

Sistemas reticulados para superficies esféricas

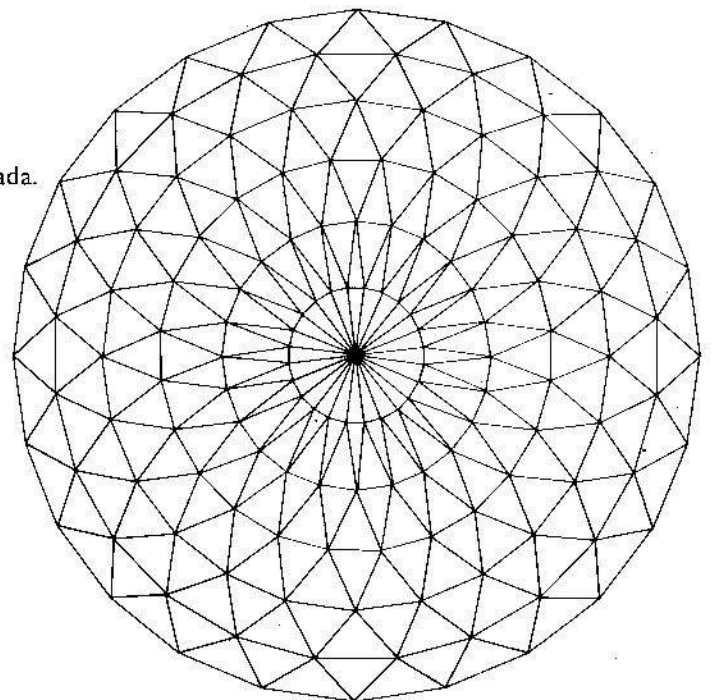
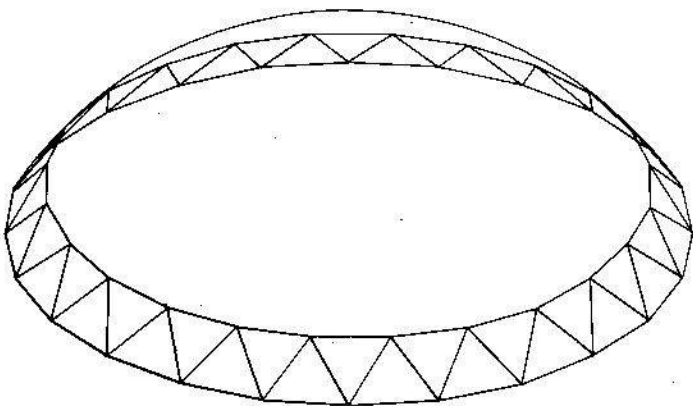


Anillo esférico con diagonales en N.

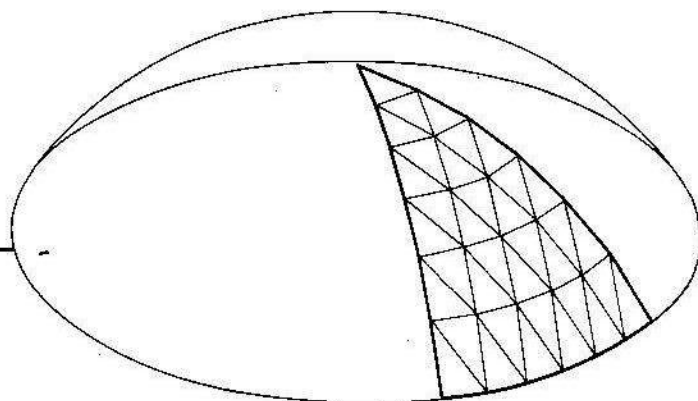
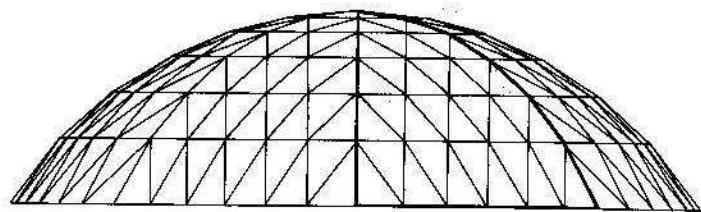


Anillo esférico con diagonales en V.

Cúpula reticulada.

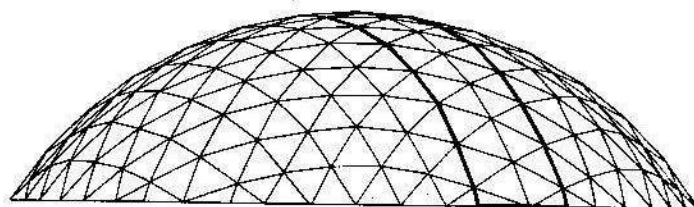
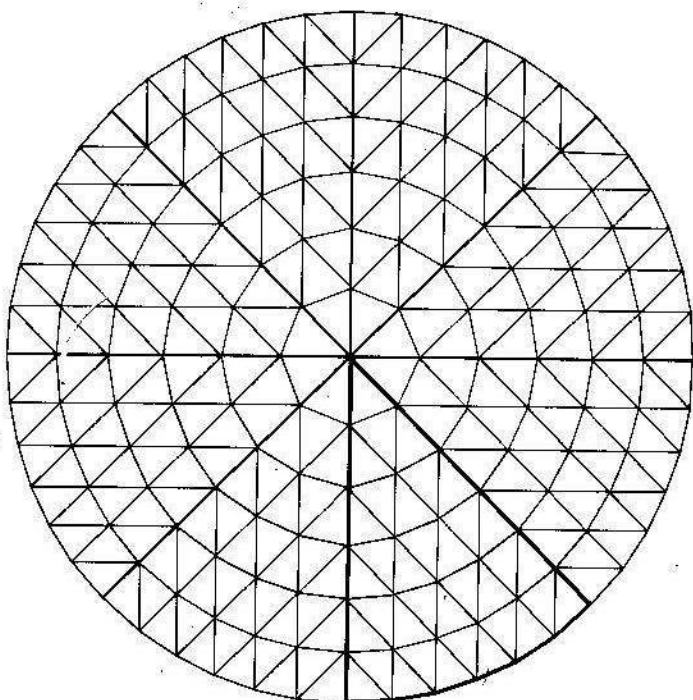


Sistemas reticulados para superficies esféricas



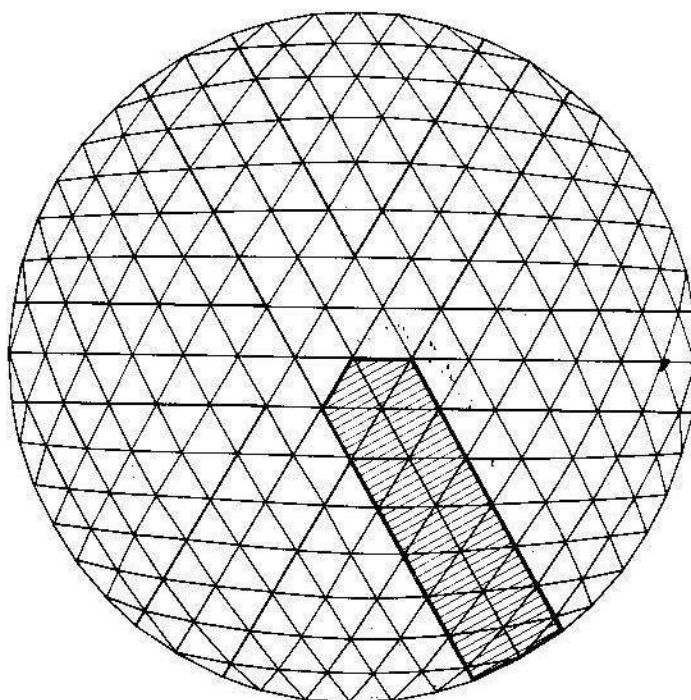
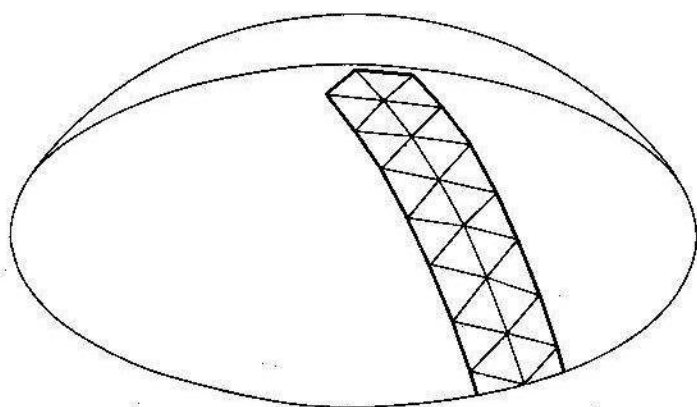
Segmentos esféricos con barras paralelas.

Cúpula reticulada con barras paralelas.

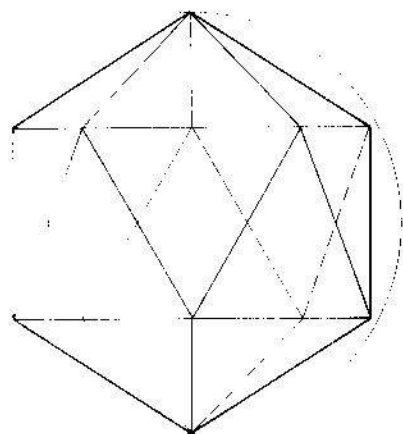


Bandas esféricas con reticulado hexagonal.

Cúpula de disposición hexagonal.

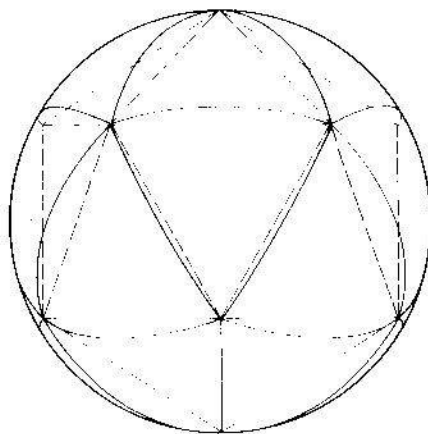


Derivación geométrica de la cúpula geodésica



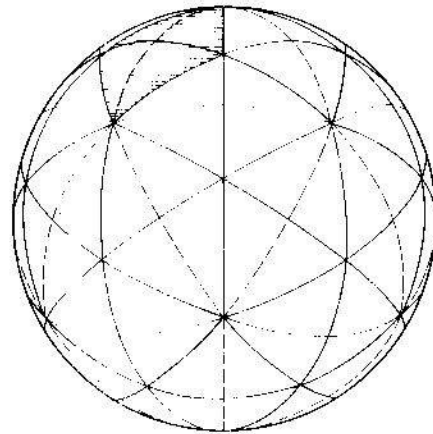
Icosaedro.

Veinte triángulos equiláteros idénticos.



Icosaedro esférico

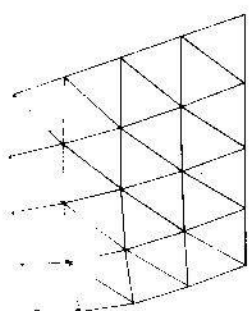
Veinte triángulos esféricos equiláteros idénticos.



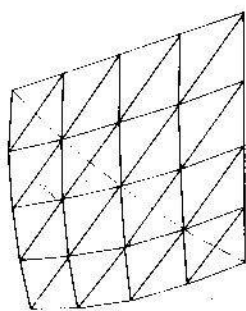
División angular.

Sesenta triángulos idénticos formados por quince círculos máximos.

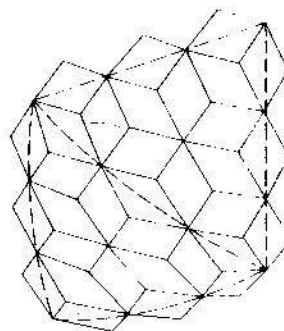
Formas reticulares típicas para cúpulas geodésicas



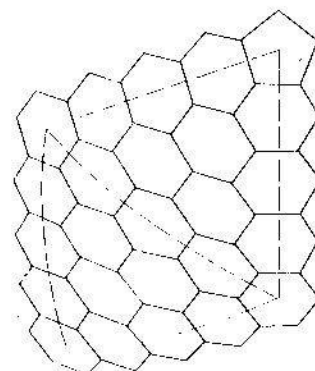
Triangular



Semi-rómbica.



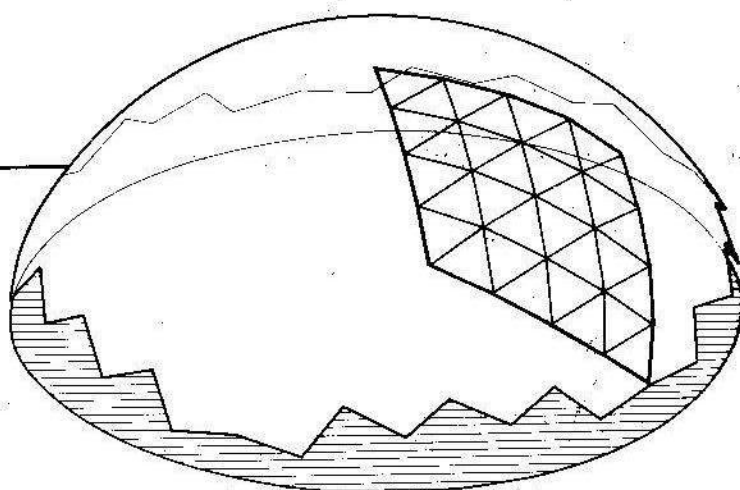
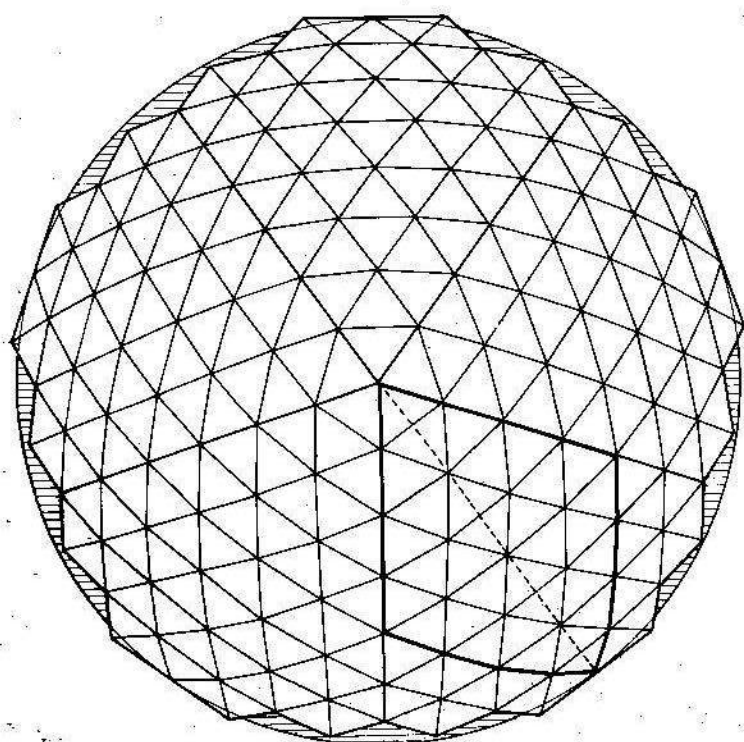
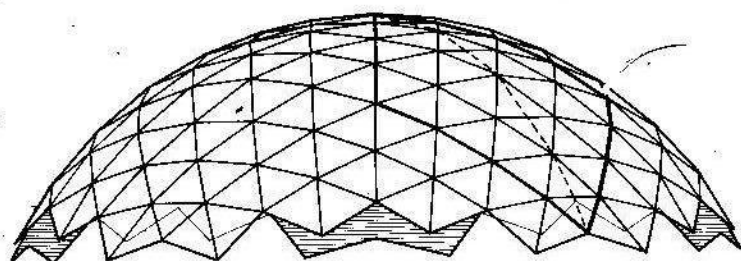
rómbica.



Exagonal.

sic domes

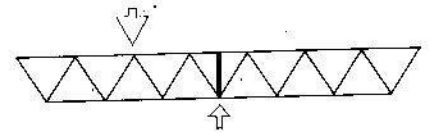
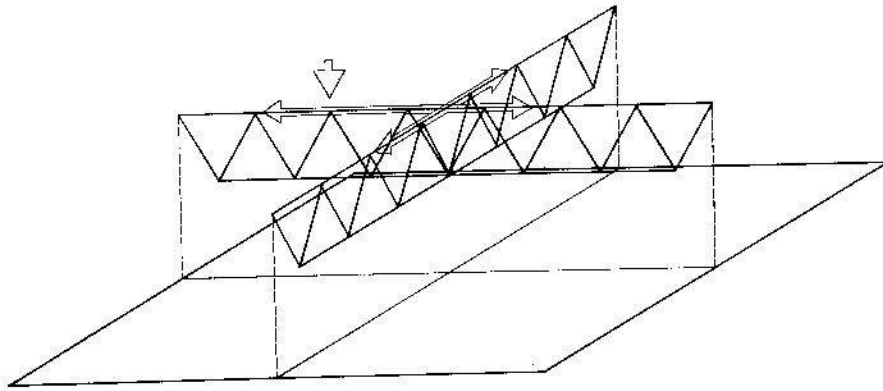
Sistemas reticulados para superficies esféricas



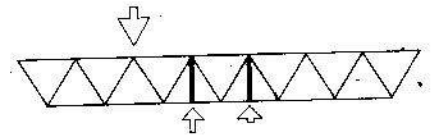
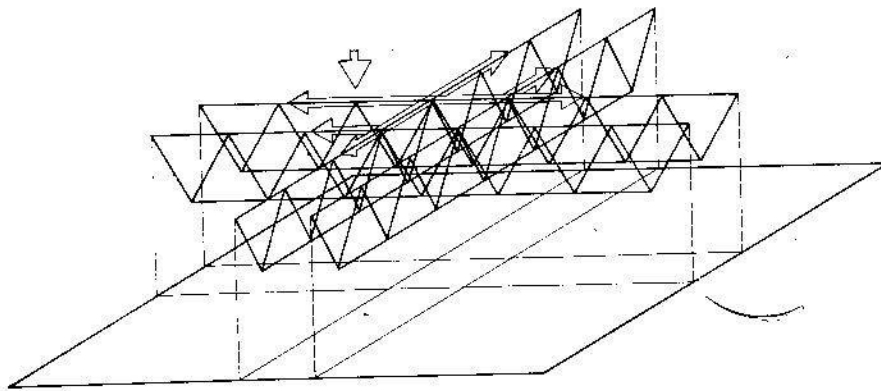
Icosaedro esférico con reticulado triangular.

Cúpula geodésica.

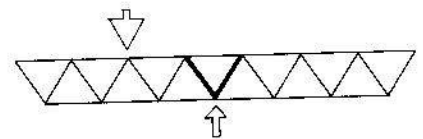
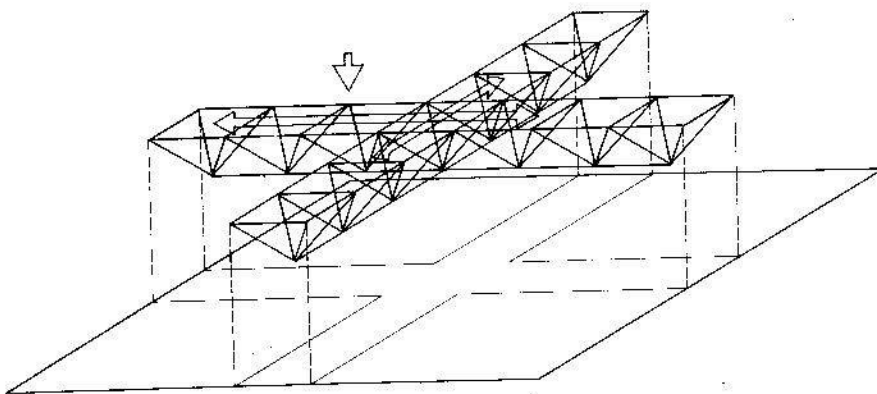
Mecanismo sustentante de los sistemas reticulados espaciales



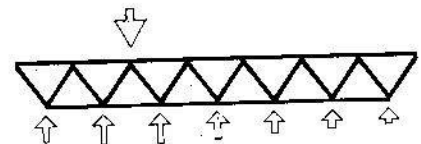
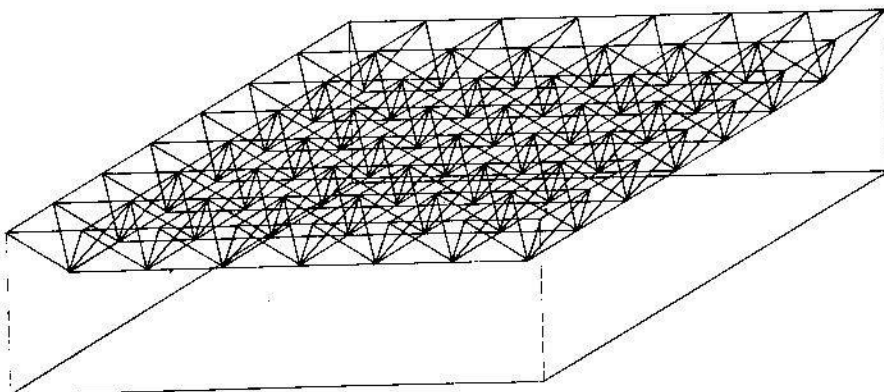
Participación de la cercha no cargada directamente, en la resistencia a la deformación.



Incremento de la eficacia mediante yuxtaposición de cerchas paralelas adicionales.

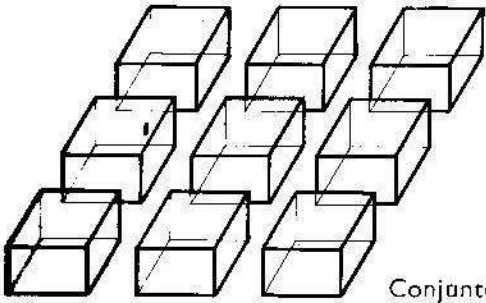


Mayor incremento de la eficacia mediante la combinación de cerchas paralelas.

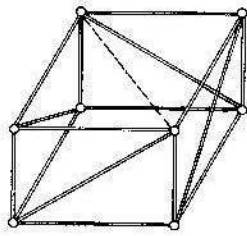


Optima eficacia mediante la continuidad en longitud y anchura.

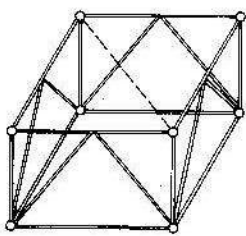
Sistemas reticulados espaciales compuestos por prismas rectangulares



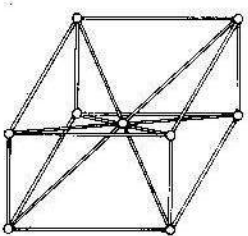
Conjunto de unidades.



tipo 1



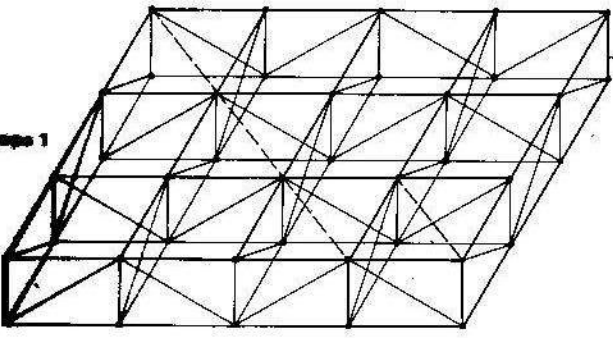
tipo 2



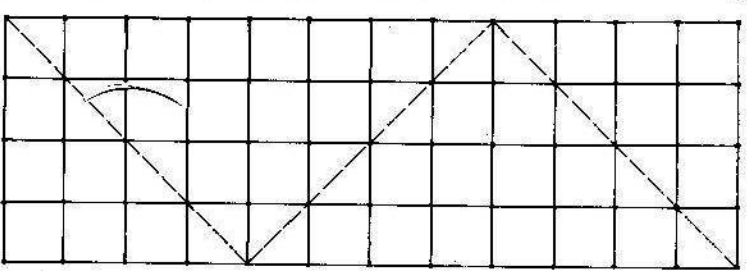
tipo 3

Unidades espaciales.

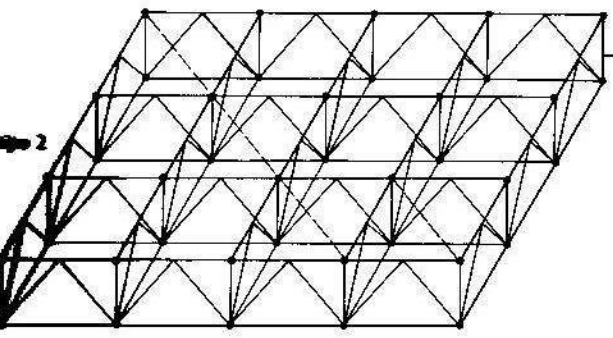
Sistema con simple reticulado en las caras de los prismas.



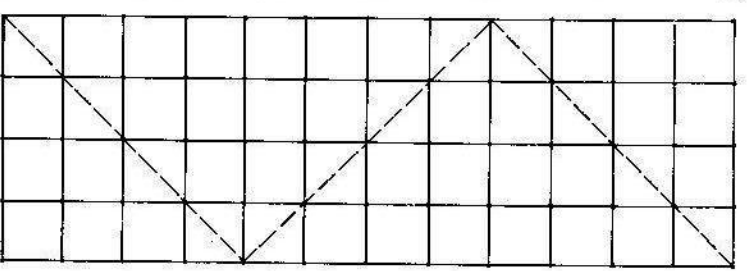
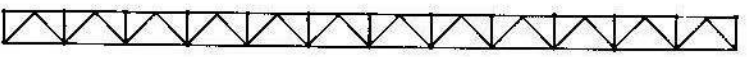
tipo 1



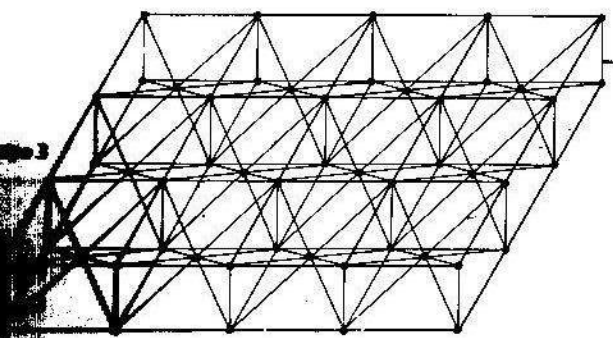
Sistema con doble reticulado en las caras de los prismas.



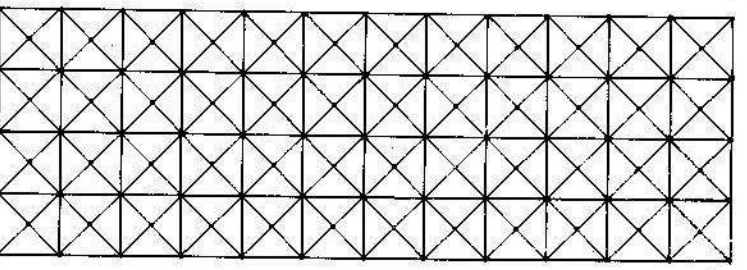
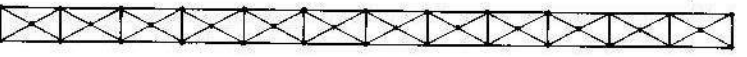
tipo 2



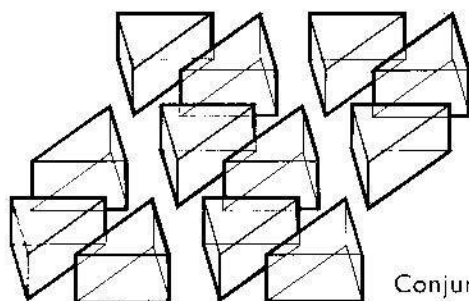
Sistema con reticulado diagonal en los prismas.



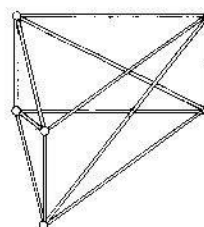
tipo 3



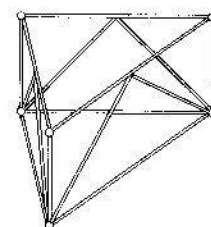
Sistemas reticulados espaciales compuestos por prismas triangulares



Conjunto de unidades.



tipo 1

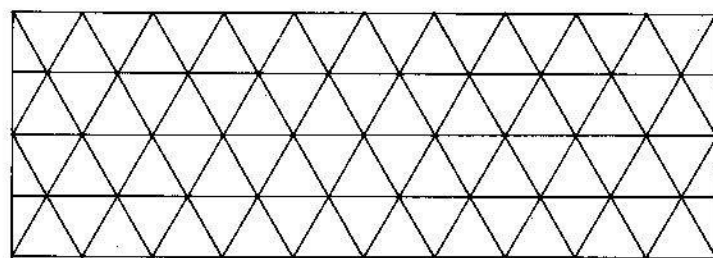
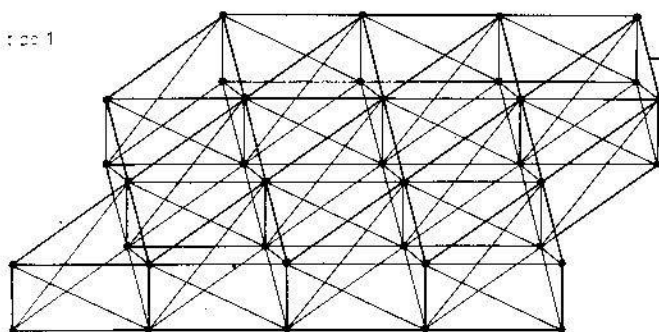


tipo 2

Unidades espaciales.

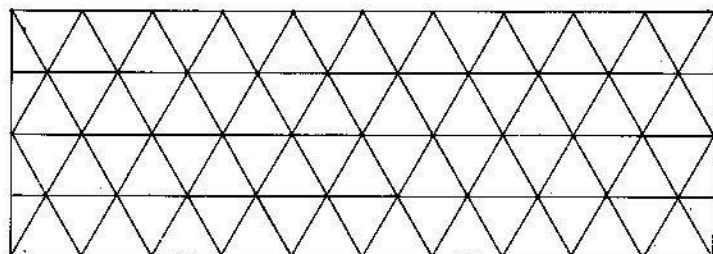
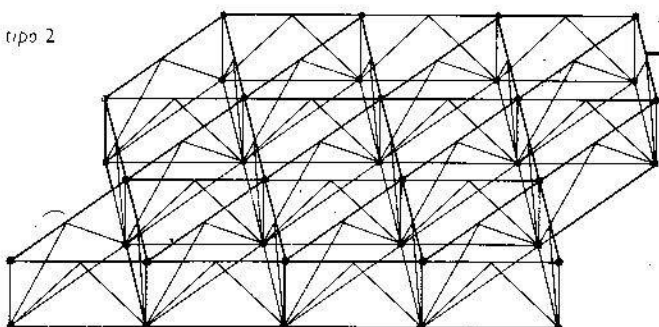
Sistema con simple reticulado en las caras de los prismas.

tipo 1

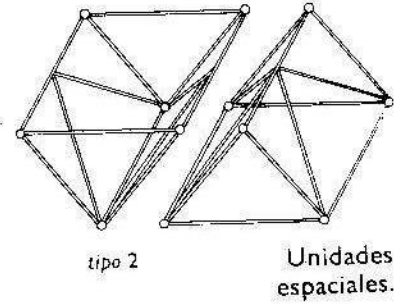
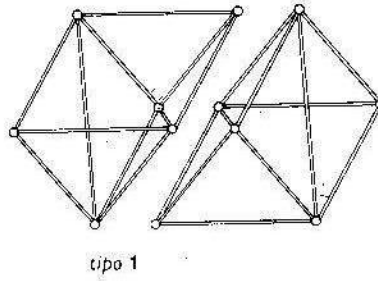
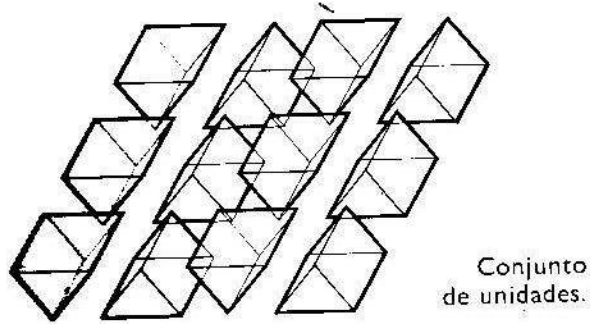


Sistema con doble reticulado en las caras de los prismas.

tipo 2

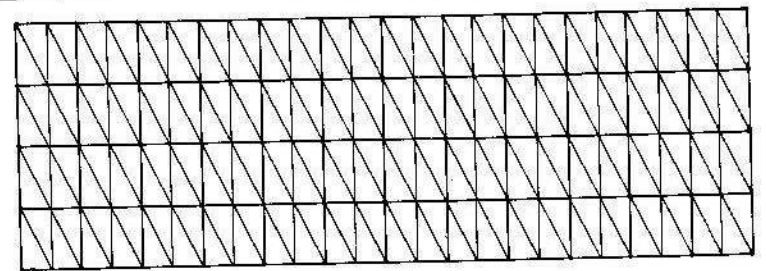
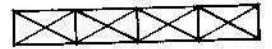
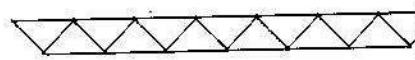
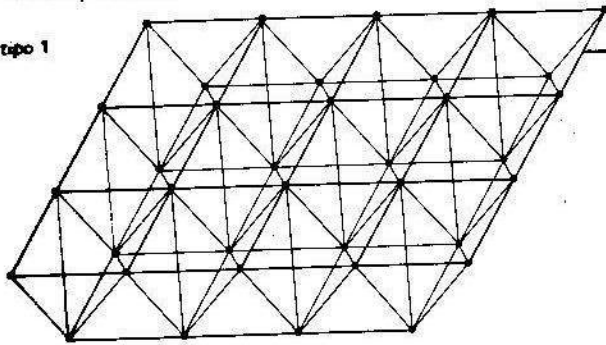


Sistemas reticulados espaciales compuestos por prismas triangulares



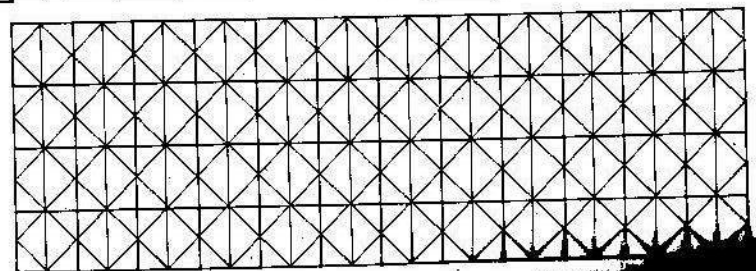
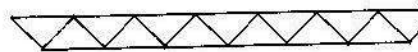
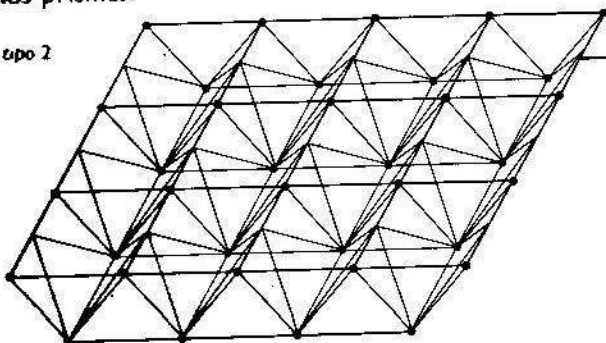
Sistema con simple reticulado en las caras de los prismas.

tipo 1

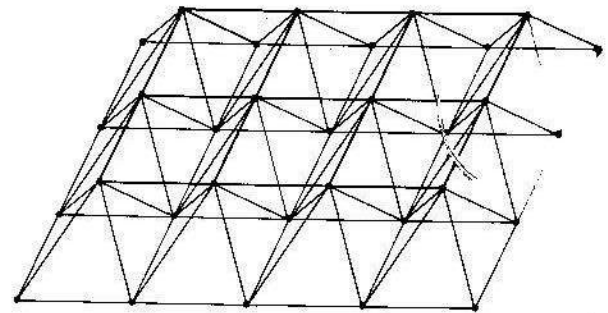
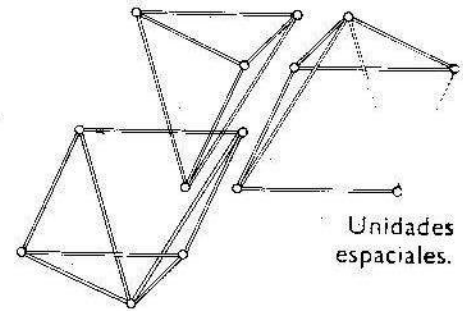
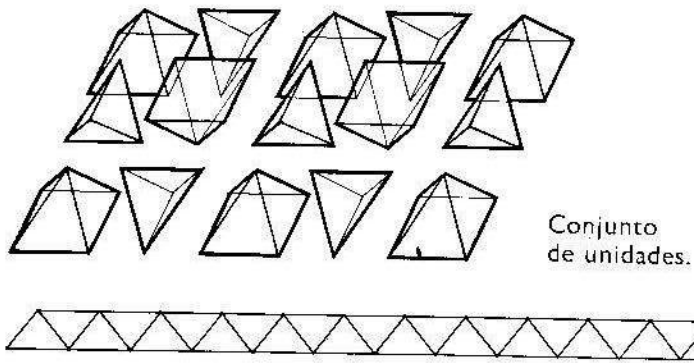


Sistema con doble reticulado en las caras de los prismas.

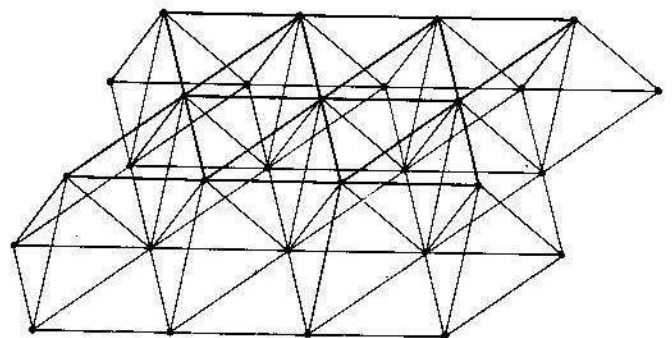
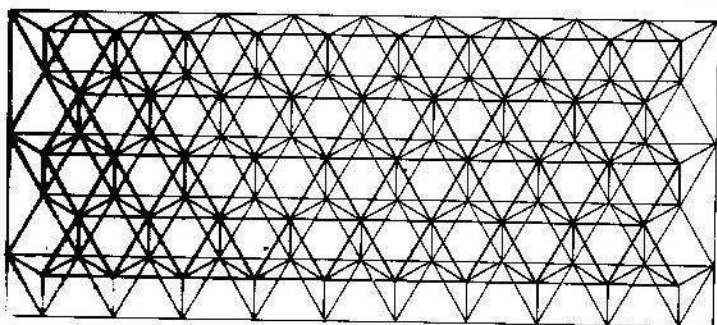
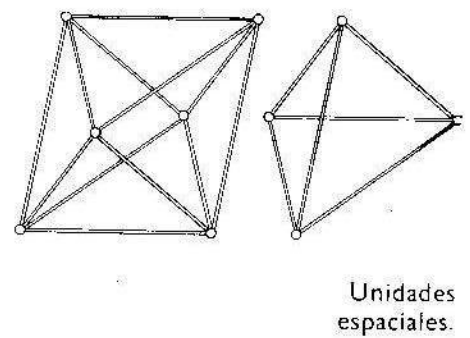
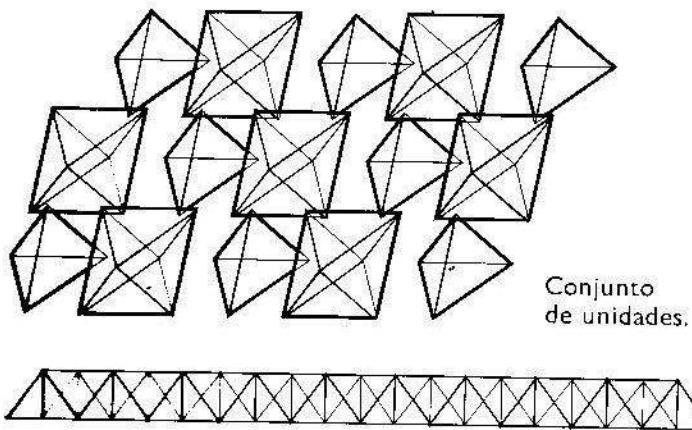
tipo 2



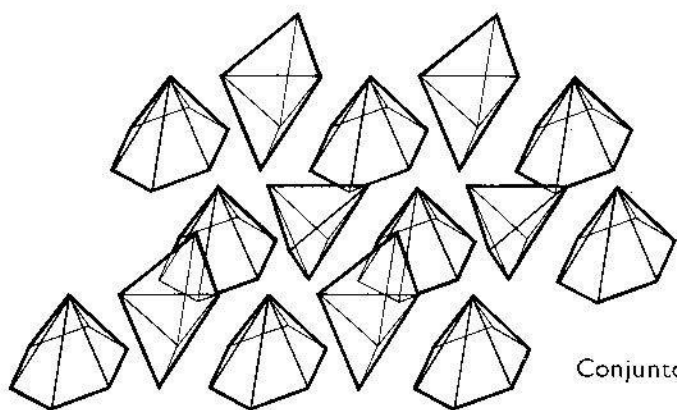
Sistemas reticulados espaciales compuestos por tetraedros y semi octaedros



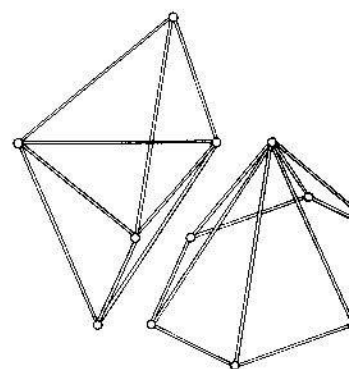
Sistemas reticulados espaciales compuestos por tetraedros y octaedros



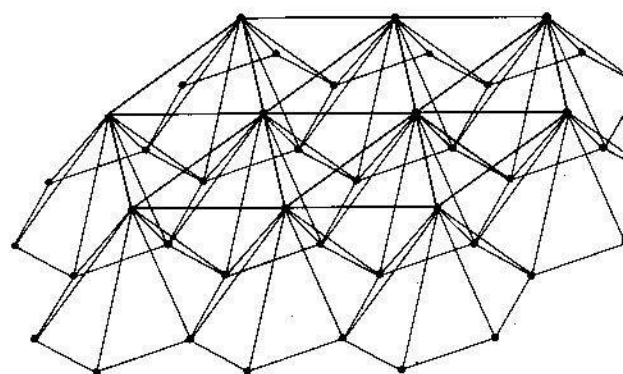
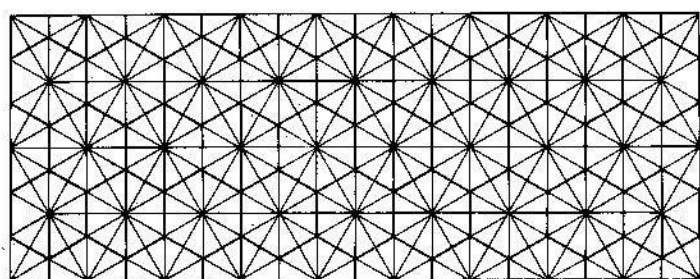
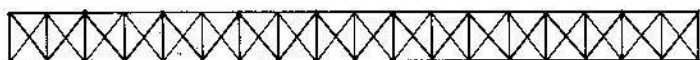
Sistemas reticulados basados en la pirámide hexagonal



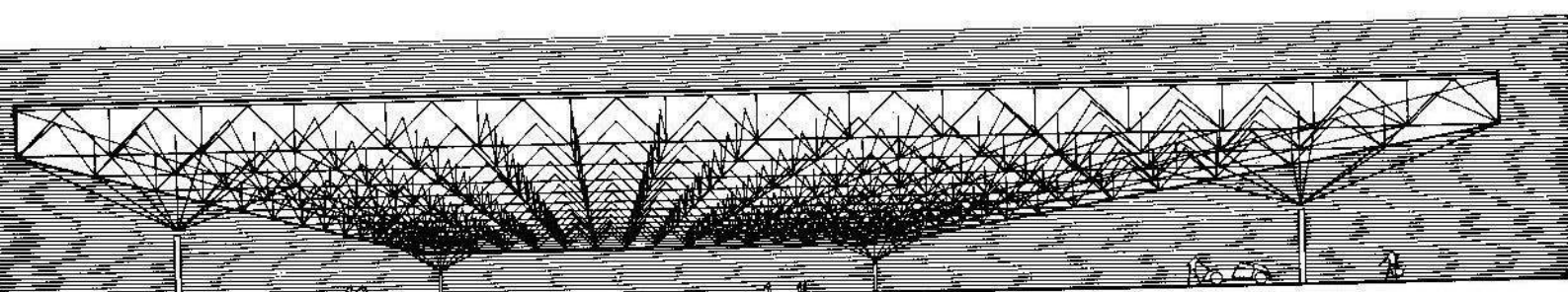
Conjunto de unidades.



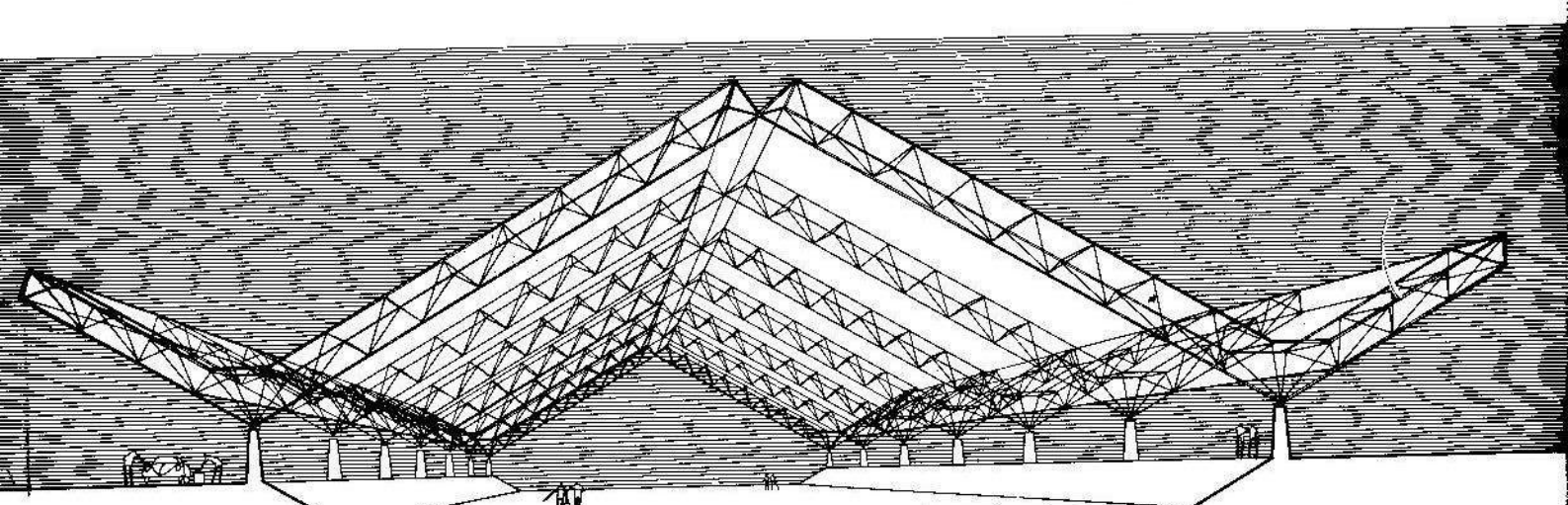
Unidades espaciales.



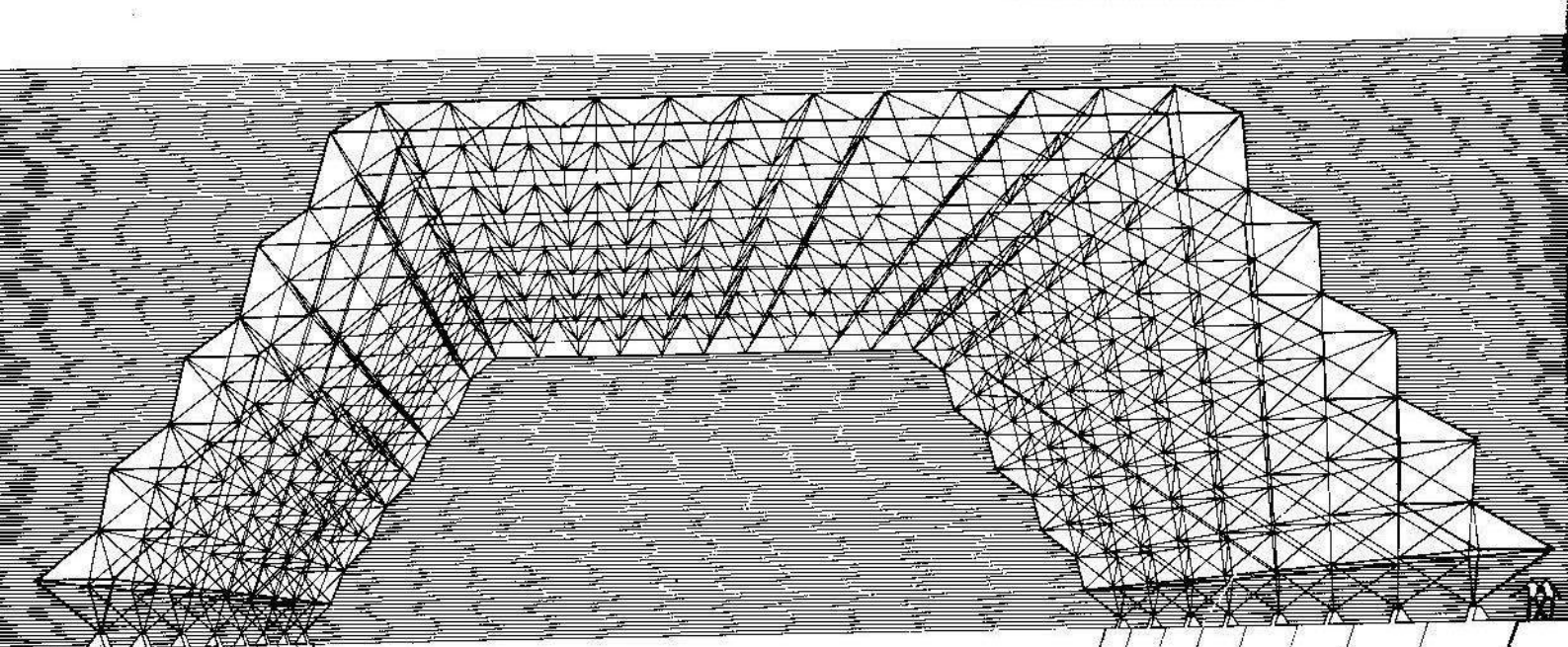
Aplicación de los reticulados espaciales para
estructuras de grandes luces



Estructura superficial de gran luz.



Estructura lineal triarticulada con voladizos.



Estructura superficial porticada.

Sistemas estructurales de masa activa

3

Los elementos lineales, rectos y fijos en su longitud, constituyen medios geométricos para definir planos y establecer relaciones tridimensionales mediante su posición en el espacio.

Los elementos lineales rectos pueden determinar ejes y dimensiones: longitud, altura y anchura. A causa de esta propiedad, los elementos lineales son requisito previo para la definición geométrica del espacio tridimensional.

Los elementos lineales rectos, cuando están dotados de resistencia material, pueden realizar funciones estructurales. Con resistencia a compresión pueden emplearse como barras comprimidas, y con resistencia a tracción, como barras extendidas. Si, además, están previstos de resistencia a flexión pueden emplearse como vigas.

Las vigas son elementos estructurales de directriz recta, resistentes a flexión y que no solamente son capaces de resistir las fuerzas que actúan en la dirección de su eje, sino que también mediante esfuerzos internos pueden recibir fuerzas perpendicularmente a su eje y transportarlas lateralmente a lo largo del mismo hasta sus extremos. Las vigas son elementos básicos de los sistemas estructurales de masa activa.

La viga recta apoyada en sus dos extremos es un prototipo de los sistemas estructurales de masa activa. Con su sección llena, la viga modifica 90° la dirección de las fuerzas y las hace desplazarse a lo largo de su eje hacia los apoyos extremos.

La viga recta sobre apoyos es un símbolo del conflicto básico de direcciones que es preciso resolver mediante el proyecto estructural: la dinámica vertical de las cargas contra la dinámica horizontal del espacio útil. La viga acomete de frente y con su masa esta pugna entre la ley natural y la voluntad humana.

A causa de su capacidad para transmitir las cargas lateralmente y establecer ade-

más limitaciones horizontales tan convenientes para el cerramiento tridimensional del espacio la viga es la estructura empleada más frecuentemente en la edificación.

Por medio de conexiones rígidas, las vigas y soportes aislados pueden combinarse para formar un sistema de múltiples componentes que actúan conjuntamente, en el cual cada miembro mediante la incurvación de su eje participa con su deformación en el mecanismo resistente: sistemas estructurales de masa activa.

La curvatura de la directriz, es decir, la flexión, es la característica de la acción resistente de los sistemas de masa activa. Su causa es la rotación parcial del elemento lineal debida a las fuerzas externas que no están en una misma línea de acción.

El mecanismo sustentante de los sistemas estructurales de masa activa consiste en la acción combinada de esfuerzos de compresión y tracción en el interior de la sección de la viga en unión con los esfuerzos cortantes: resistencia a la flexión. Debido a la deformación se origina un par interior que equilibra el par exterior.

La sección de la viga, es decir, la distribución de su masa en relación al eje neutro, es decisiva para el mecanismo resistente de los sistemas estructurales de masa activa. A medida que la masa se halle más alejada del eje neutro, mayor es la resistencia a la flexión.

A causa de la muy desigual distribución de las tensiones de flexión a lo largo de la viga y a causa también de la desigualdad de las exigencias resultantes de ello para dimensionar la sección transversal, los sistemas estructurales de masa activa pueden expresar la magnitud de las tensiones de flexión internas mediante el cambio de su canto.

Los sistemas estructurales de masa activa, por tanto, pueden constituir una

expresión viva de la lucha por el equilibrio entre los pares internos y externos.

Mediante conexión rígida con los soportes, no solamente se reduce la flecha vertical, sino que se crea también un mecanismo para resistir fuerzas horizontales. La rigidez continua en dos o aun en tres dimensiones es la segunda característica de los sistemas estructurales de masa activa.

Los sistemas de masa activa: vigas continuas, pórticos articulados, pórticos rígidos, pórticos múltiples y pisos múltiples, han llevado a su expresión total los mecanismos de la continuidad. Por medio de estos sistemas es posible salvar grandes luces y crear espacios libres sin soportes, sin prescindir de las ventajas de la geometría rectangular.

Los elementos lineales de masa activa dispuestos según retículas biaxiales y conectados rigidamente entre sí activan los mecanismos resistentes adicionales y permiten reducir el canto y la masa del material: son los emparrillados o retículas de vigas.

La condensación de la aplicación biaxial de vigas conduce a la losa. Esta es un elemento plano de masa activa que integra los diversos mecanismos flectores y es, por ello, más eficaz dentro de unos ciertos límites de la luz.

Los sistemas estructurales de masa activa poseen, predominantemente, forma rectangular en planta y sección. La simplicidad de la geometría rectangular para resolver los problemas estructurales y estéticos es una ventaja de los sistemas estructurales de masa activa y la razón de su aplicación universal a la edificación.

A causa de la superioridad de la geometría rectangular en la edificación, los mecanismos estructurales de masa activa pueden asimilarse a superestructuras que definen espacios con unidades tomadas de otros sistemas estructurales. Los sistemas estructurales de masa activa son,

por tanto, aquellas superestructuras dentro de las cuales cualquier otro mecanismo estructural puede ser puesto en acción.

El futuro desarrollo de los sistemas estructurales de masa activa obviará los inconvenientes de la relación peso redu-

cido-luz no solamente mediante el empleo, cada vez más amplio, de las técnicas de pretensado, sino también reemplazando la maciza sección de la viga por elementos de forma, vector o superficie activos.

El conocimiento de los mecanismos de

masa activa y de sus múltiples acciones y consecuencias, presentes en la flexión de elementos lineales, puede considerarse, por tanto, básico para el arquitecto no sólo para la planificación de palazones resistentes, sino también para el proyecto general de formas geométricas rectangulares.

Definición de los sistemas estructurales de masa activa

Esquema de transmisión de las fuerzas.

Las fuerzas exteriores son transmitidas mediante una masa material y una continuidad material.

Mecanismos de flexión y de resistencia a la flexión

Momento de giro externo (flexión)

La resultante de las fuerzas exteriores (cargas y reacciones) origina una rotación de los extremos libres (puntos de apoyo), que produce la curvatura del eje longitudinal: flexión.

Esfuerzo cortante vertical.

A causa de la diferencia entre las direcciones de la carga y de reacción, las fuerzas exteriores hacen que las fibras verticales intenten deslizarse, produciendo un esfuerzo cortante.

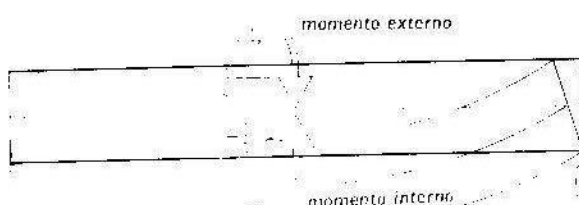
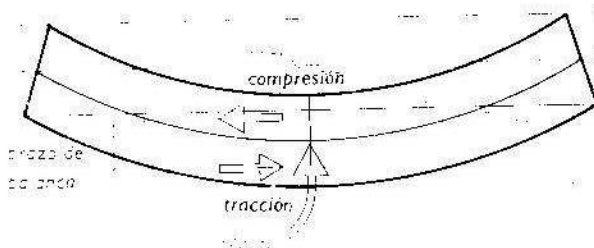
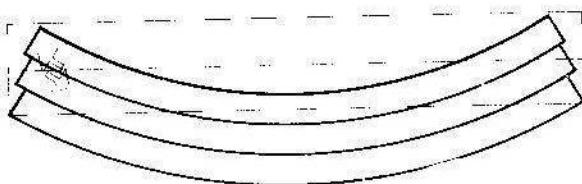
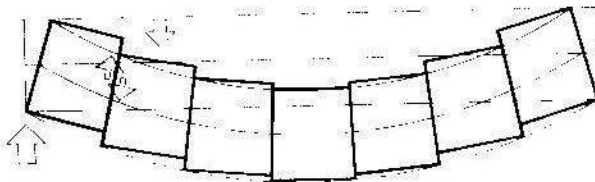
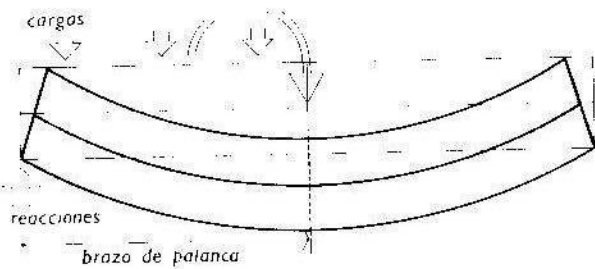
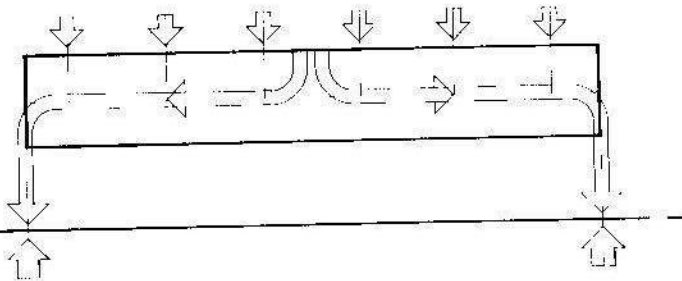
esfuerzo cortante horizontal.

La deformación por flexión origina una contracción de las fibras superiores y una dilatación de las inferiores. Las fibras horizontales intentan deslizarse, originándose un esfuerzo cortante.

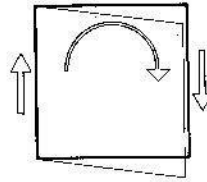
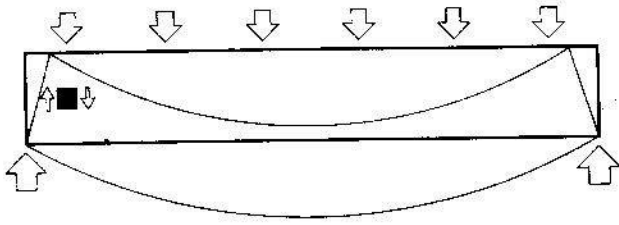
Momento de giro interno (reacción).

Debido a la deformación por flexión, se originan las tensiones de tracción y compresión en la sección transversal, que producen un momento de giro interno.

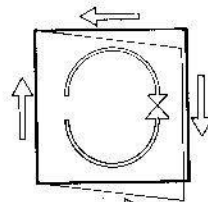
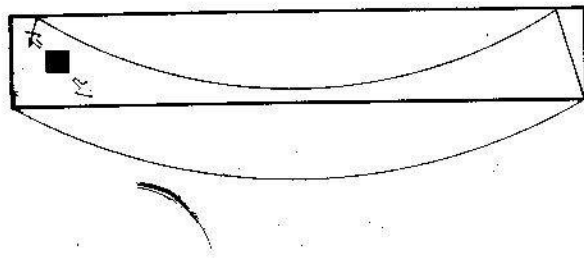
El momento de giro de las fuerzas exteriores produce una deformación por flexión hasta que se alcanza un punto en el cual un par interno opONENTE es de suficiente magnitud para compensar el momento externo.



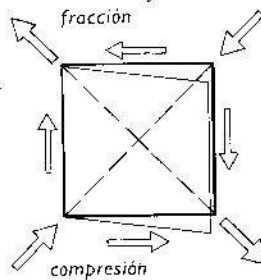
Relación entre cortante, tracción y compresión en la flexión



Debido a las fuerzas exteriores, se engendran tensiones cortantes verticales que tienden a hacer girar los elementos (rectángulo) de una viga y originan una flexión.

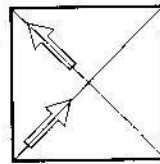
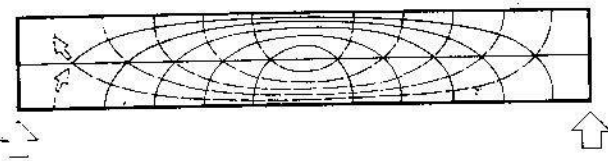


Debido a la deformación por flexión, se originan tensiones cortantes horizontales que tienden a hacer girar los elementos (rectángulo) en sentido inverso y establecen el equilibrio en el giro.



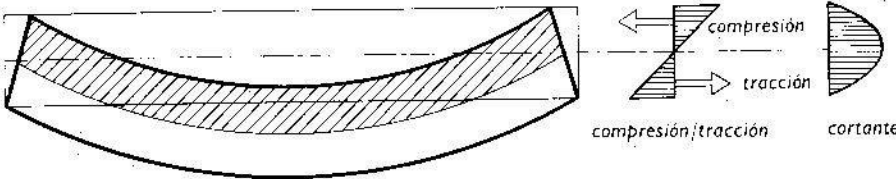
Las tensiones cortantes verticales y horizontales se combinan para formar tensiones de compresión y tracción, que dan a los elementos forma rómbica. Esta deformación es resistida por la resistencia del material.

Líneas de las direcciones principales de las tensiones: isostáticas



Las isostáticas en la viga indican dos grupos de direcciones que siempre se cortan según ángulos rectos: las de compresión tienen forma de arco, y las de tracción de catenaria.

Distribución de tensiones en la viga de sección rectangular



flexión



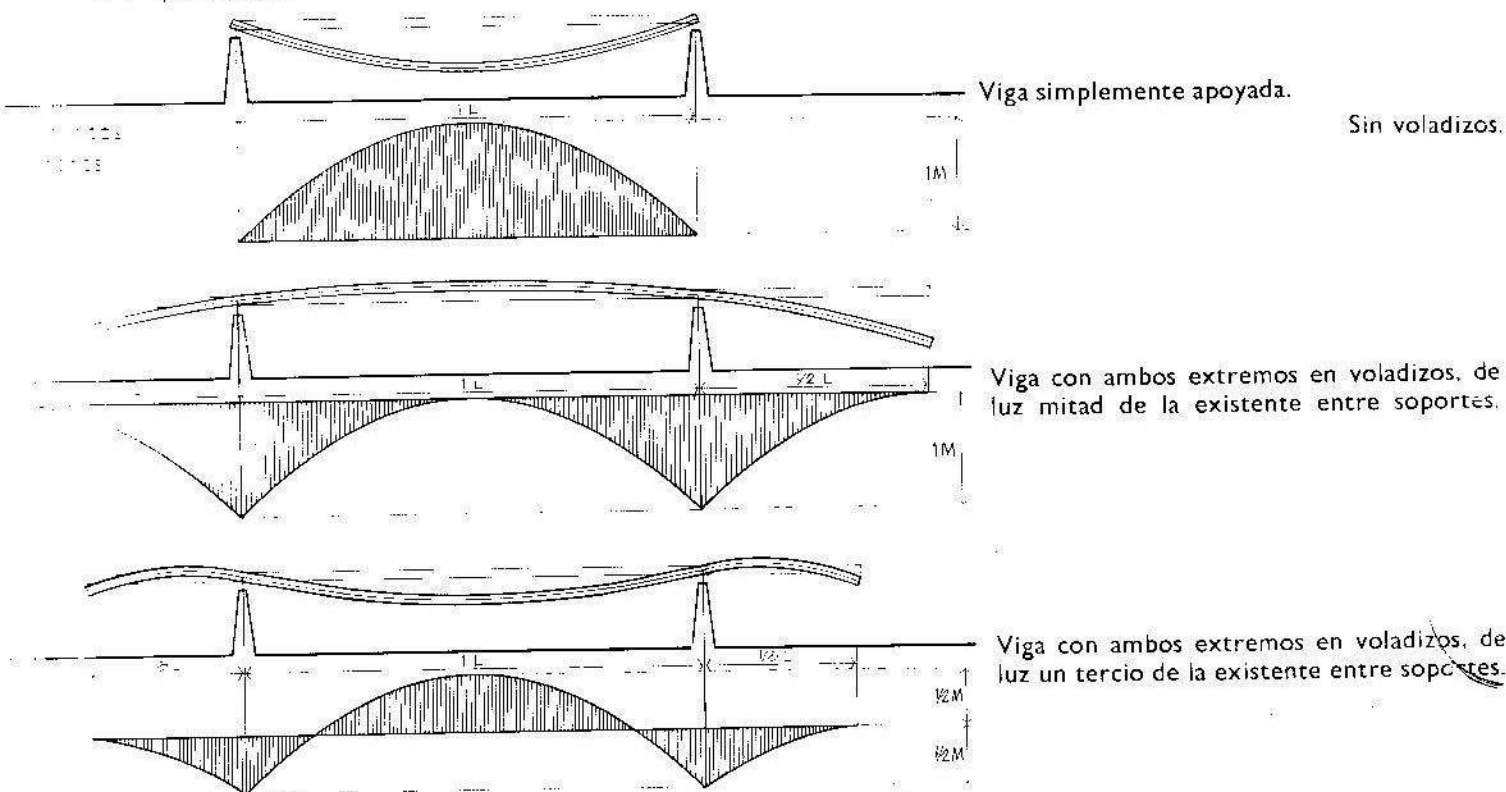
cortante vertical

Las tensiones de flexión para carga continua se hallan distribuidas parabólicamente a lo largo de la viga. Las tensiones máximas tienen lugar en la mitad del tramo.

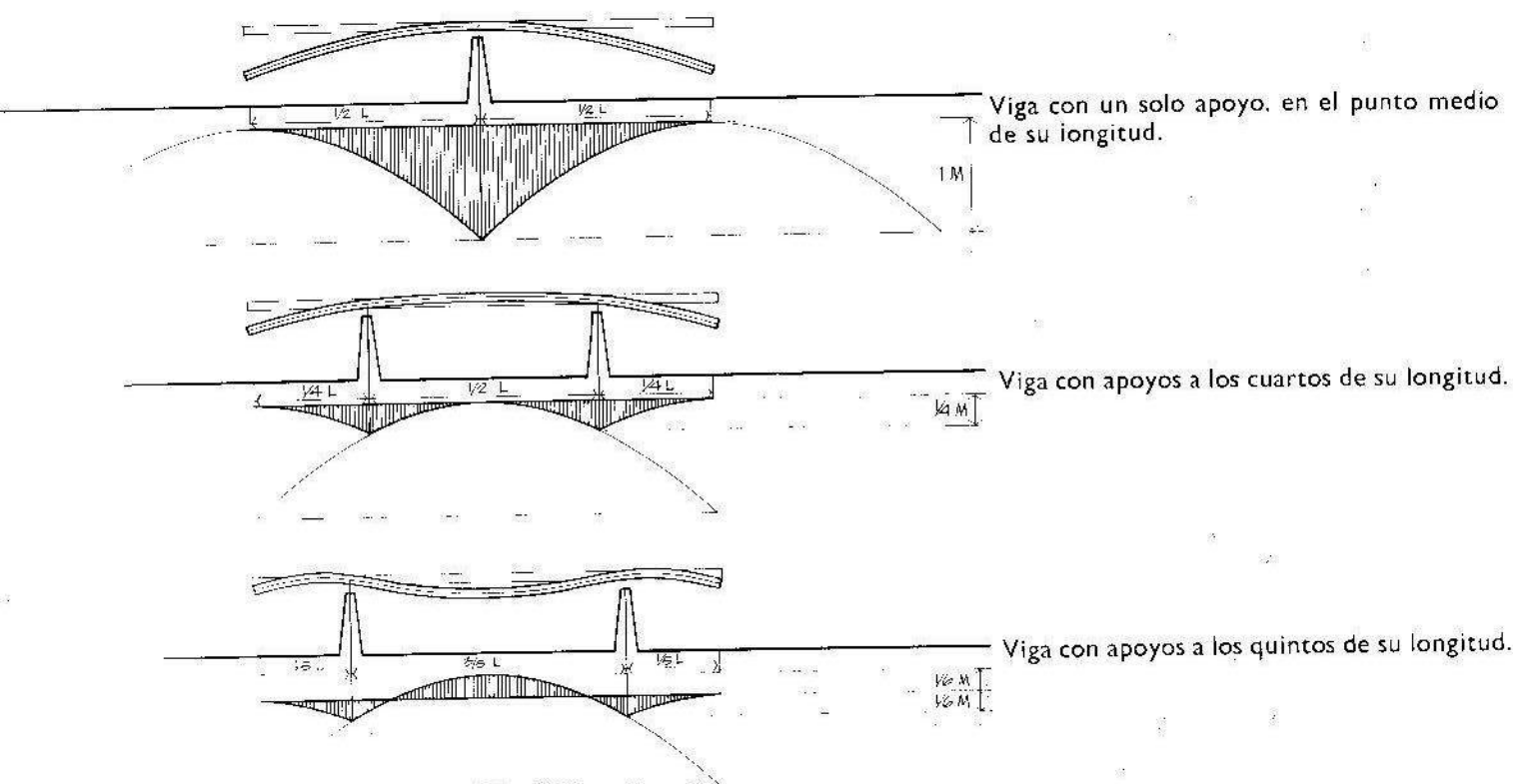
Las tensiones cortantes verticales son máximas sobre los apoyos y decrecen hacia el centro, son nulas en el centro del tramo.

Influencia de la acción de un voladizo sobre la eficacia resistente de una viga

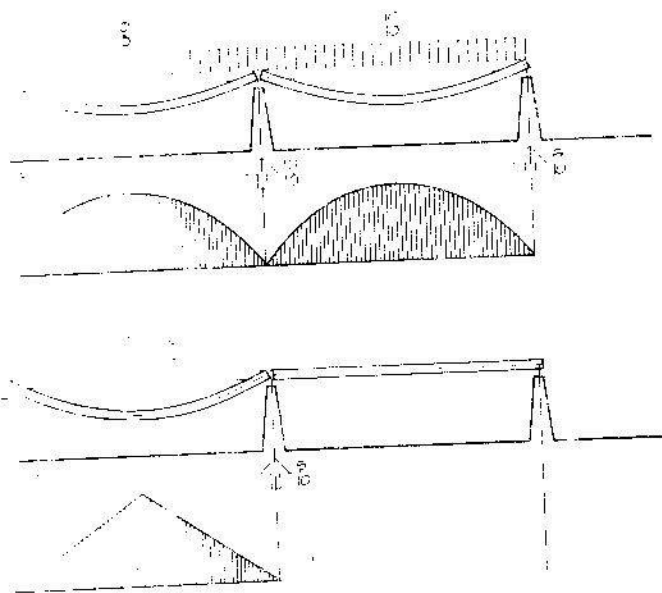
de por flexión.



Influencia de las condiciones de apoyo en la eficacia resistente de la viga

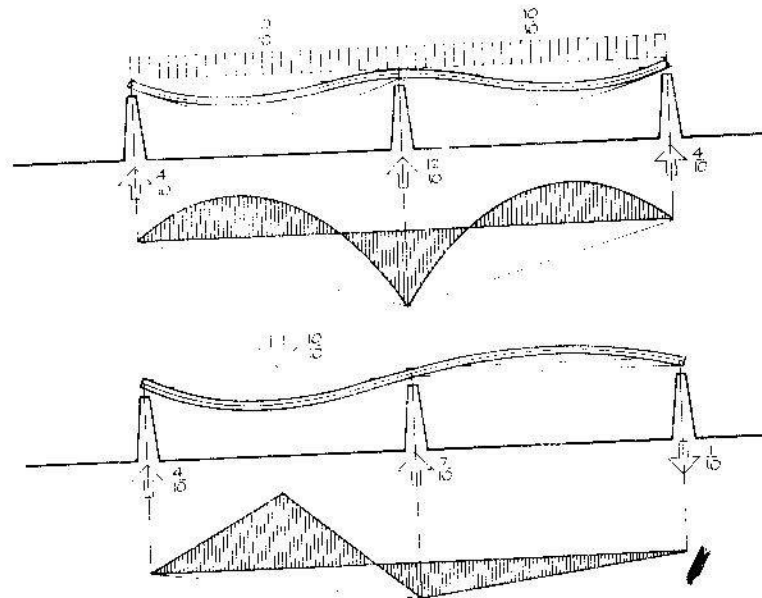


Comparación entre vigas continuas e isostáticas



Isostática:

La deformación por flexión en un tramo no se transmitirá al otro. Las cargas actuarán sobre cada tramo independientemente.

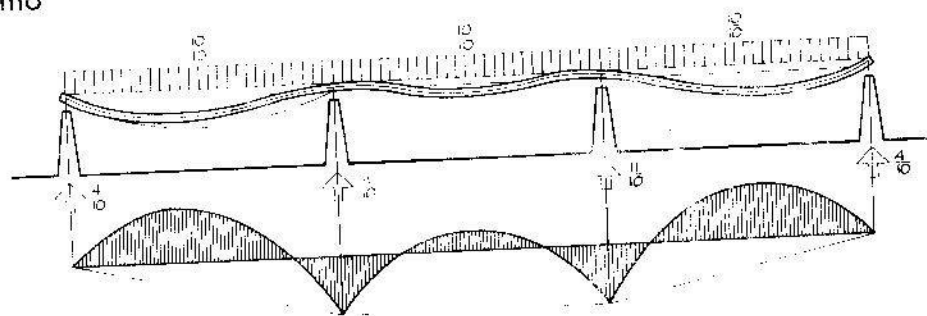


Viga continua:

La deformación por flexión en un tramo se transmitirá al otro. Las cargas sobre un tramo serán resistidas por la viga en toda su longitud.

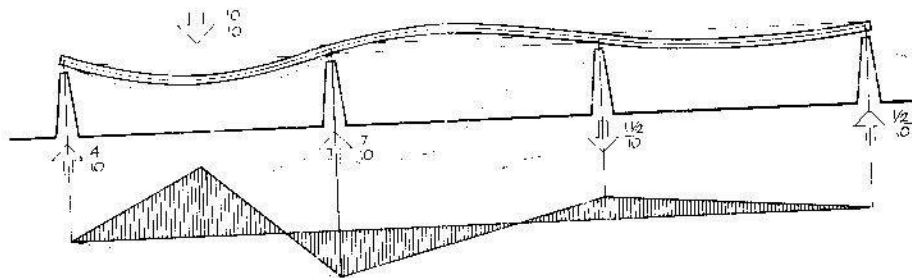
Influencia de la continuidad en el mecanismo

Carga continua sobre toda la longitud: debido a la continuidad, queda restringido el giro de la viga sobre los apoyos. El momento flector máximo tiene lugar en los tramos extremos, en los que el giro de la sección final no se halla obstaculizado.



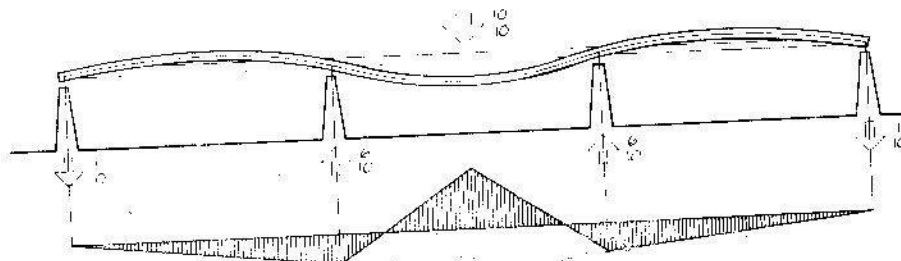
Carga puntual en un tramo extremo.

La deformación por flexión en un tramo cargado queda aminorada por la coacción unilateral del giro de la viga. También los tramos descargados participan en la resistencia.

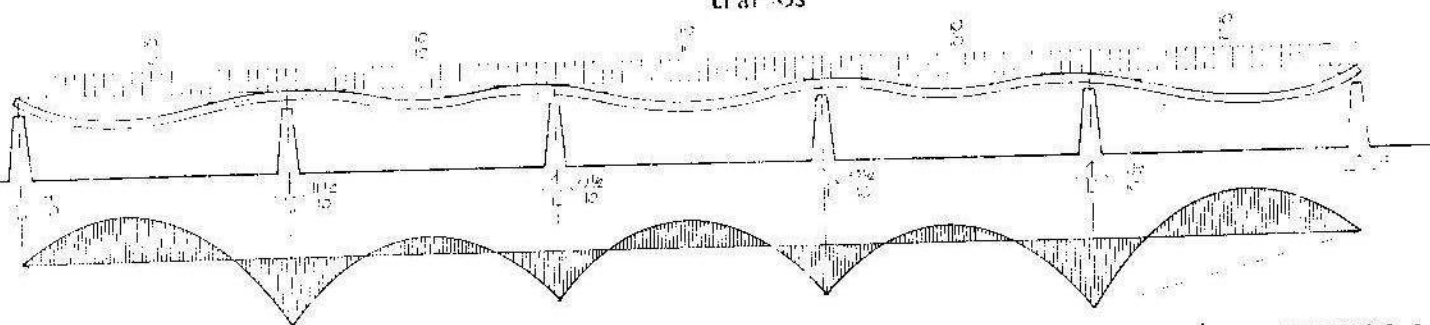


Carga puntual en el tramo central.

Debido a la continuidad, el giro de la viga sobre los apoyos del tramo cargado queda coaccionado. La viga entera está implicada en el mecanismo resistente.



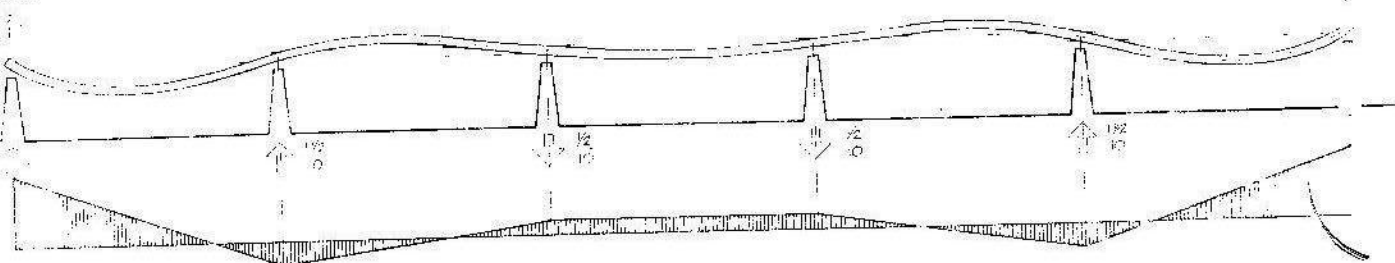
Mecanismo de flexión en la viga continua de cinco tramos



Magnitud de la flexión bajo carga continua.

La flexión máxima tiene lugar en el tramo extremo, en el que el giro sobre el apoyo exterior no está impedido.

La flexión mínima se presenta en los tramos contiguos a los tramos extremos.

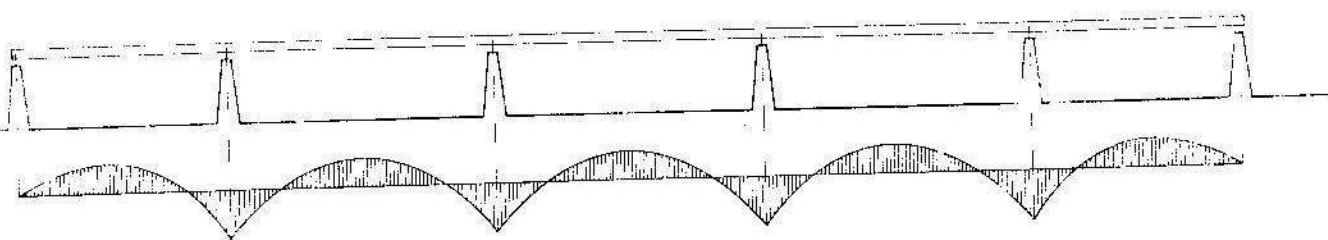


Influencia del momento máximo de los tramos extremos.

La falta de coacción en el giro de las secciones extre-

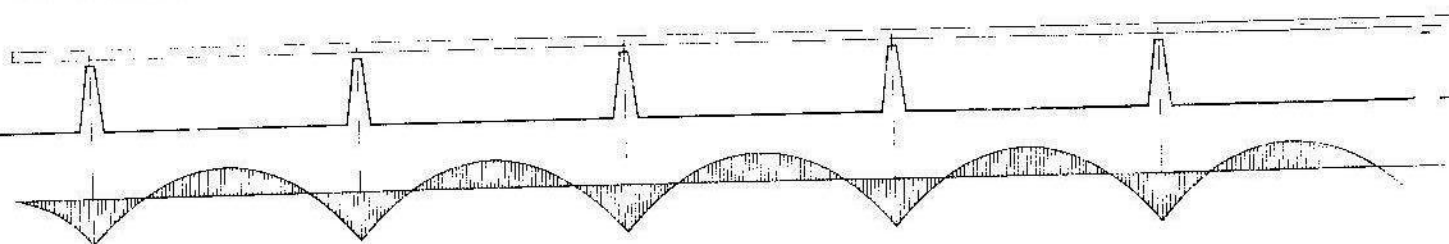
mas influye sobre las deformaciones de los otros tramos como si en aquellas secciones se aplica momento flector adicional.

Posibilidades de distribución uniforme de la flexión en la viga continua



Reducción del tramo extremo.

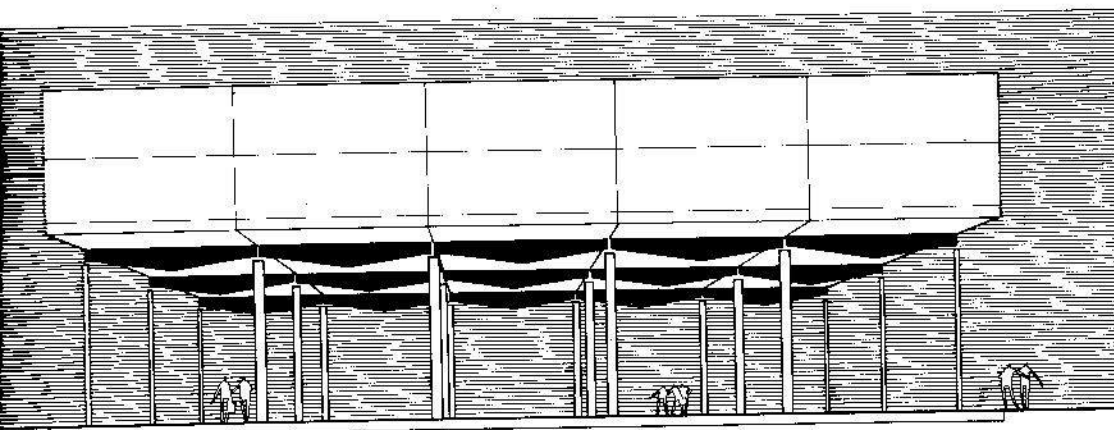
Mediante el acortamiento de la longitud del tramo extremo, la flexión en el tramo final puede igualarse a la de los otros tramos.



Voladizos en los extremos.

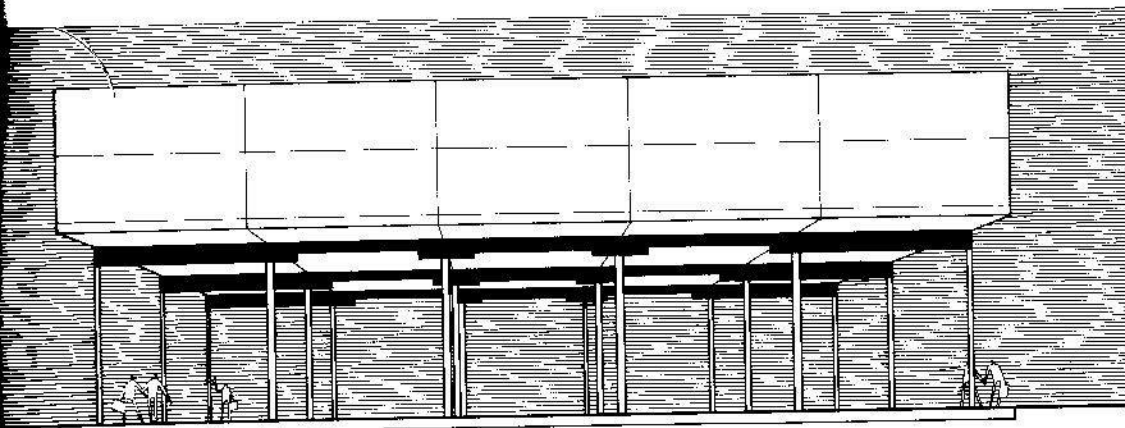
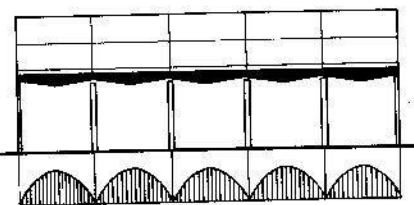
Debido al giro opuesto de los voladizos, la flexión en el tramo final puede igualarse a la de los otros tramos.

Sistemas de vigas y posibilidades de estructuración para cinco vanos



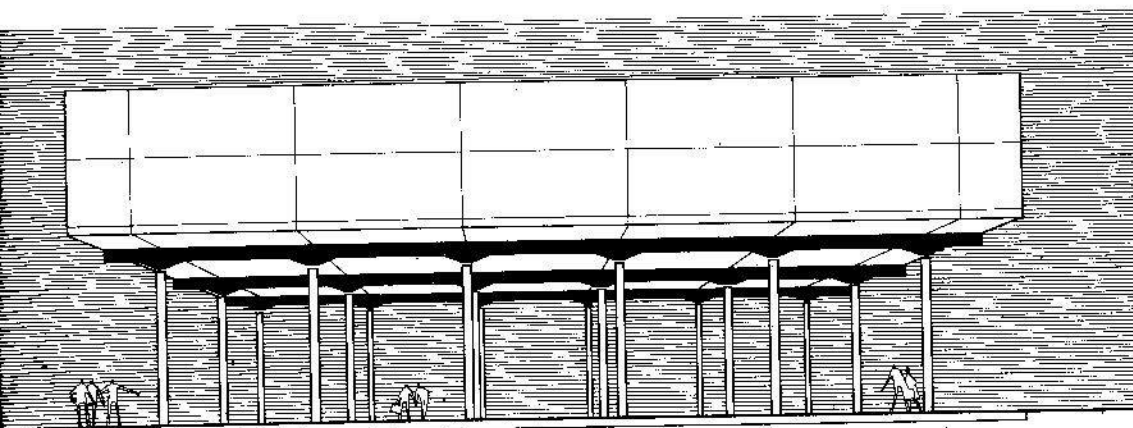
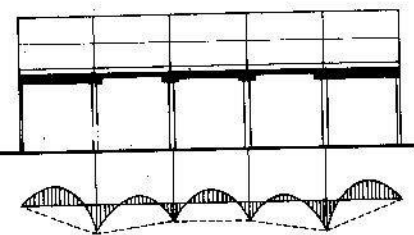
Incremento lineal del canto hacia los centros de los vanos.

Viga discontinua, una para cada tramo. Distribución de esfuerzos, igual para cada vano.



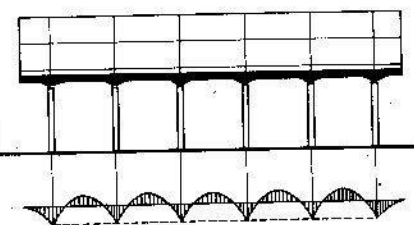
Ajuste discontinuo del canto a la ley de momentos.

Viga continua sobre cinco vanos iguales. Distribución de esfuerzos, diferente para cada vano.

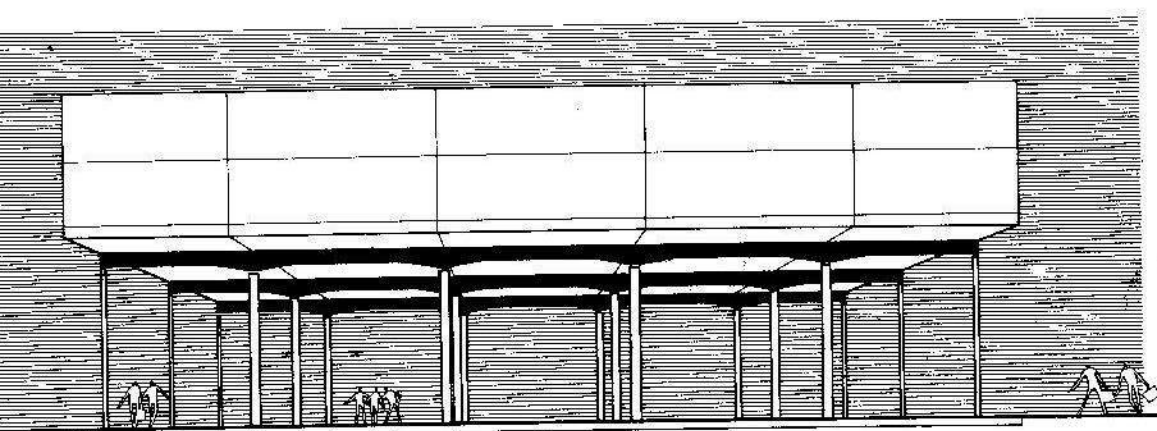


Acartelamiento sobre los soportes.

Viga continua con voladizos grandes. Distribución de esfuerzos, igual para cada vano.

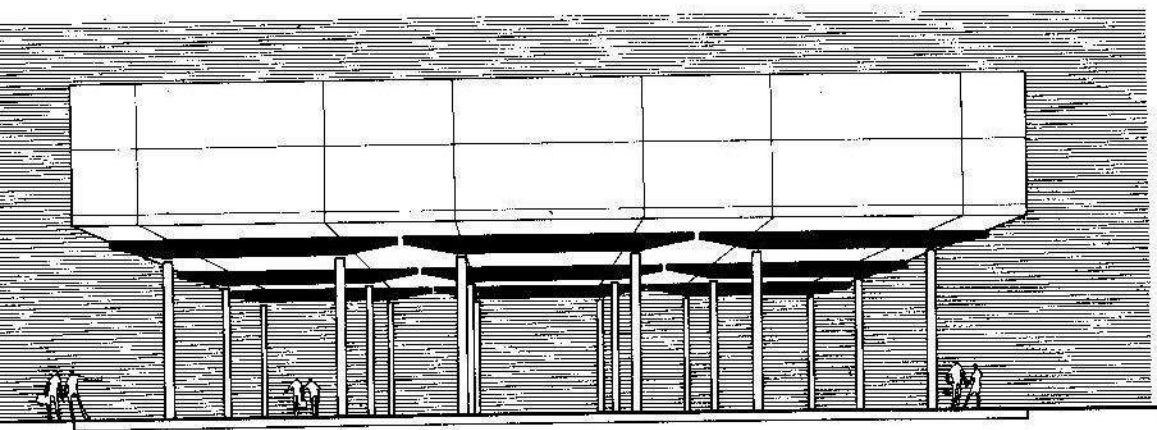
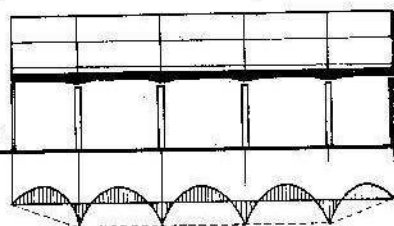


Sistemas estructurales y posibilidades de estructuración para cinco vanos



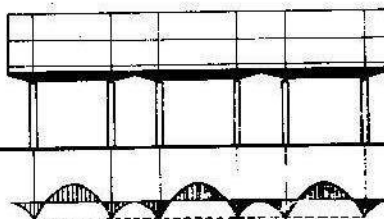
Acartelamiento sobre los soportes.

Viga continua con reducción de los vanos extremos: momentos máximos en todos los vanos igualados.

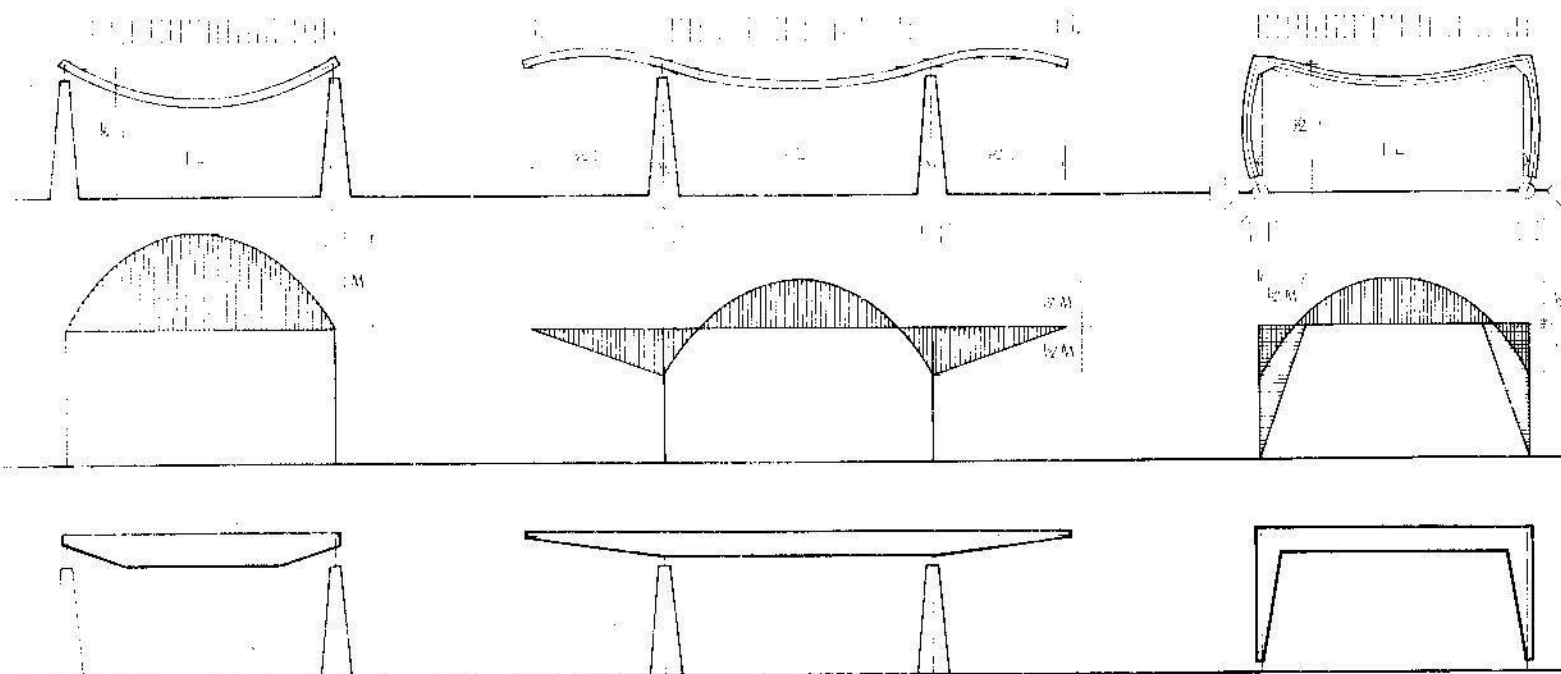


Reducción del canto hacia los extremos.

Tres vigas discontinuas con extremos en voladizo: igual distribución de momentos para cada tramo.



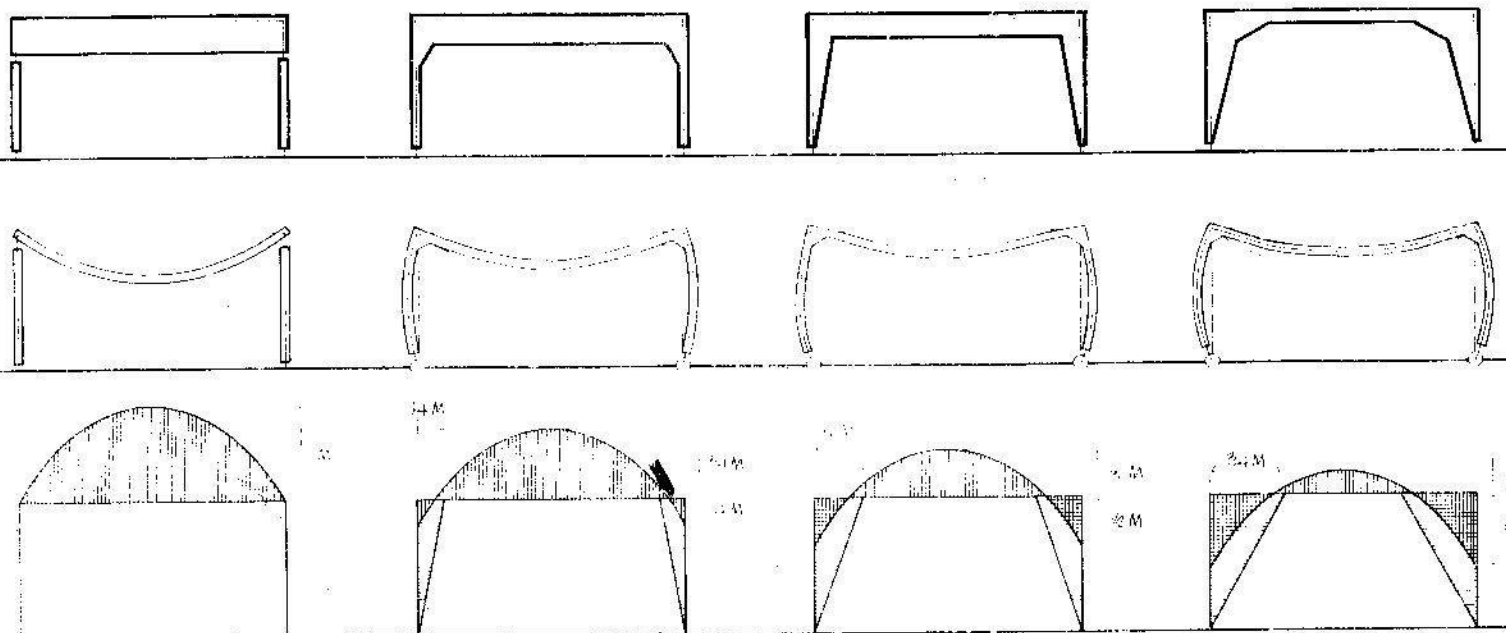
Mecanismos de pórtico y su relación con la viga con voladizos



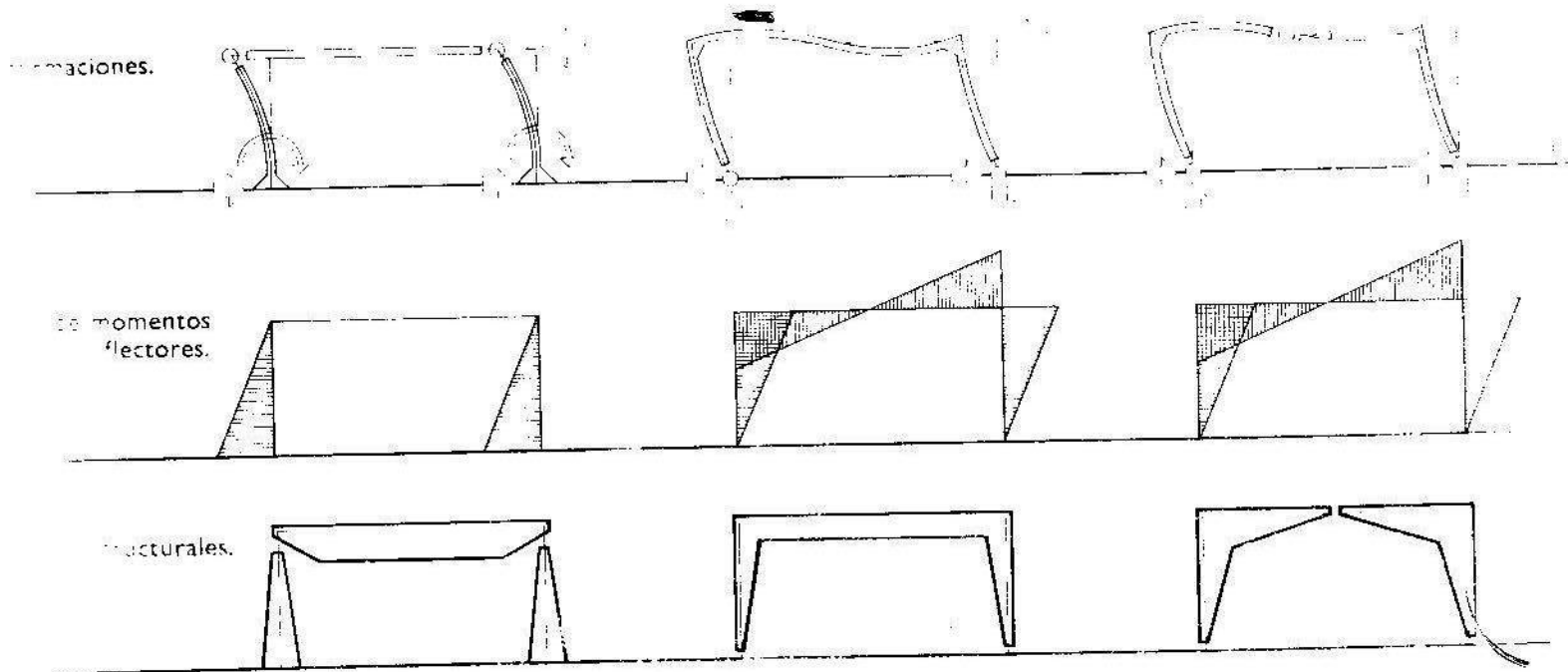
Los empujes en los apoyos del pórtico coaccionan el giro de los nudos de aquél y reducen la deformación del dintel, en igual forma que lo consiguen las cargas puntuales en los extremos de los voladizos de una viga.

Las reacciones horizontales en los apoyos del pórtico coaccionan el giro de los nudos de aquél y reducen la deformación del mismo modo que lo hacen las cargas puntuales en los extremos de una viga con voladizos.

Influencia de la rigidez del pórtico sobre el reparto de esfuerzos. Comparación entre viga y pórticos de dos articulaciones.



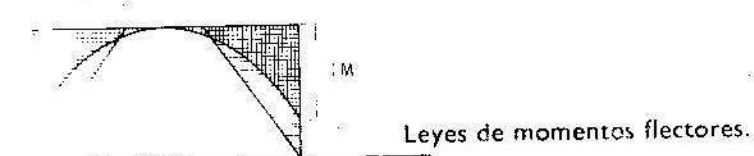
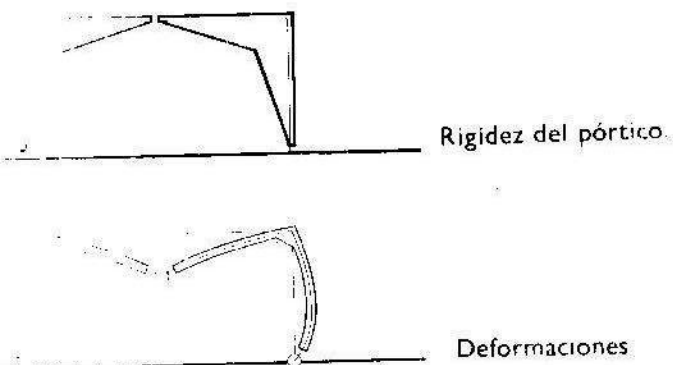
Mecanismo resistente contra fuerzas laterales



Comparando a la viga simplemente apoyada, que al aumentar la rigidez de los soportes disminuye el momento flector, en el pórtico rígido, debido a su propia deformación, se originan reacciones horizontales que producen un momento flector

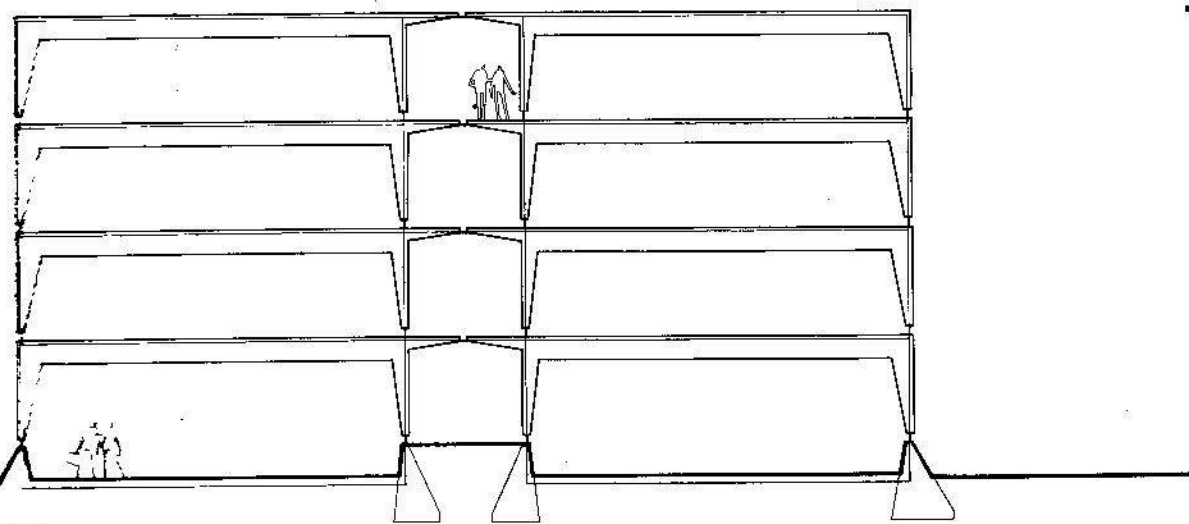
Influencia de la rigidización del pórtico en la distribución de esfuerzos y en la forma estructural.

Relación entre vigas, pórtico de dos y pórtico de tres articulaciones



Debido a la continuidad en los nudos del pórtico, la deformación de la viga puede reducirse de modo diferente según el grado de rigidez de los soportes. De aquí resulta un posible control sobre la magnitud de la flexión y la forma estructural.

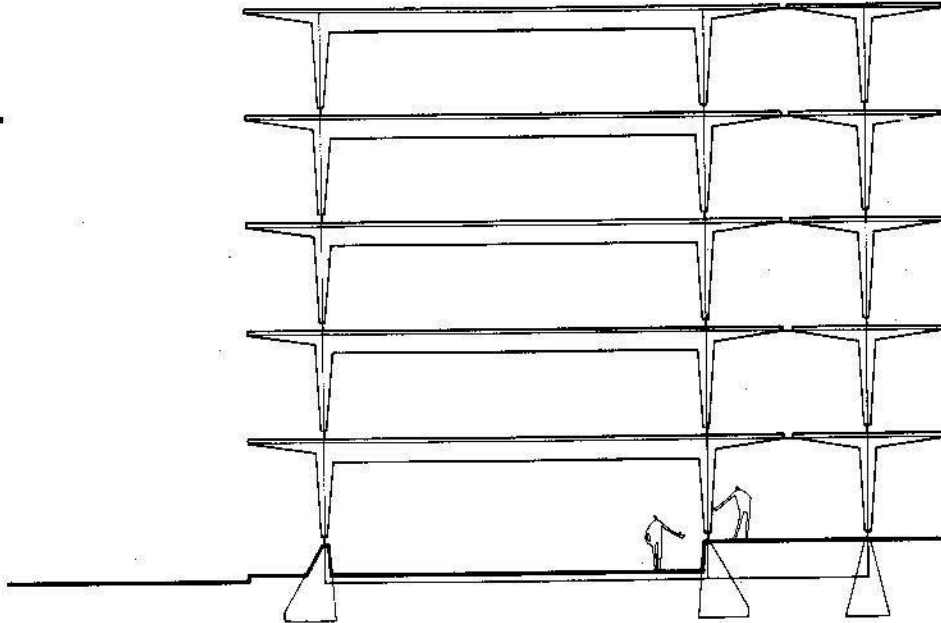
Sistemas estructurales horizontales y verticales compuestos de pórticos articulados



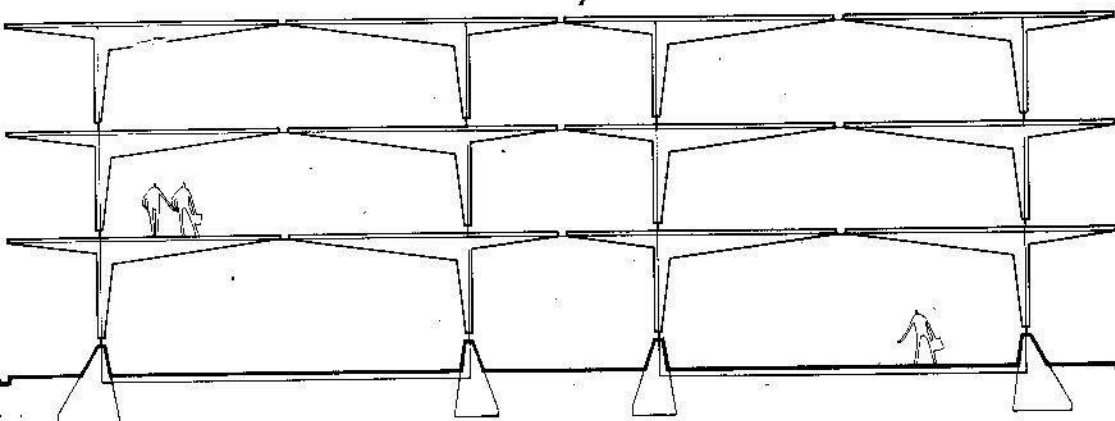
Sistema con pórticos de dos articulaciones.



Sistema con pórticos de dos articulaciones y pórticos en T.

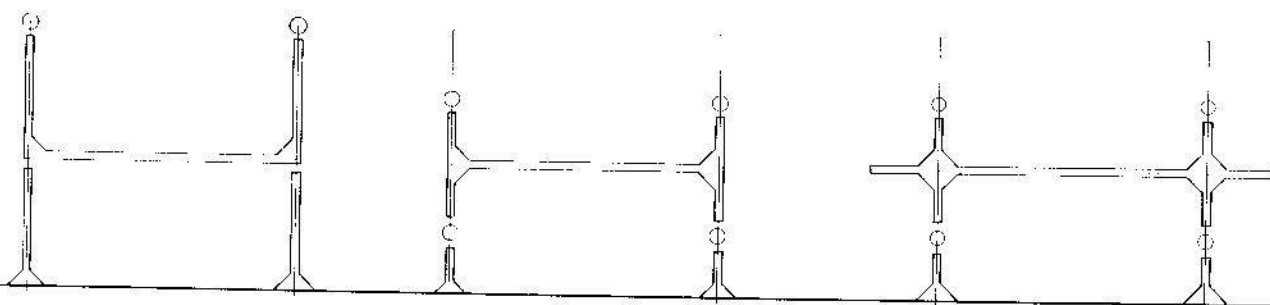


Sistema con pórticos de tres articulaciones.

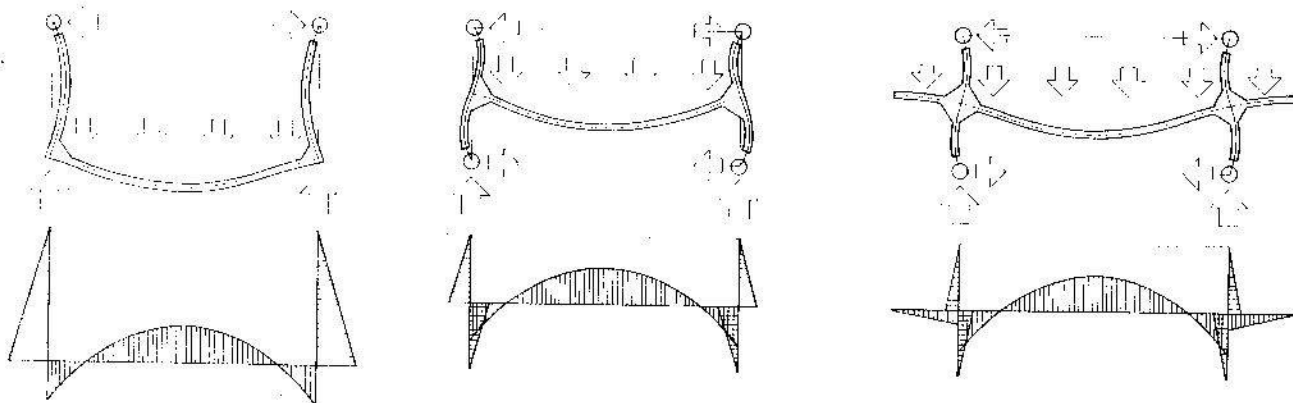


Mecanismo de la forma inversa y de la forma doble del pórtico de dos articulaciones

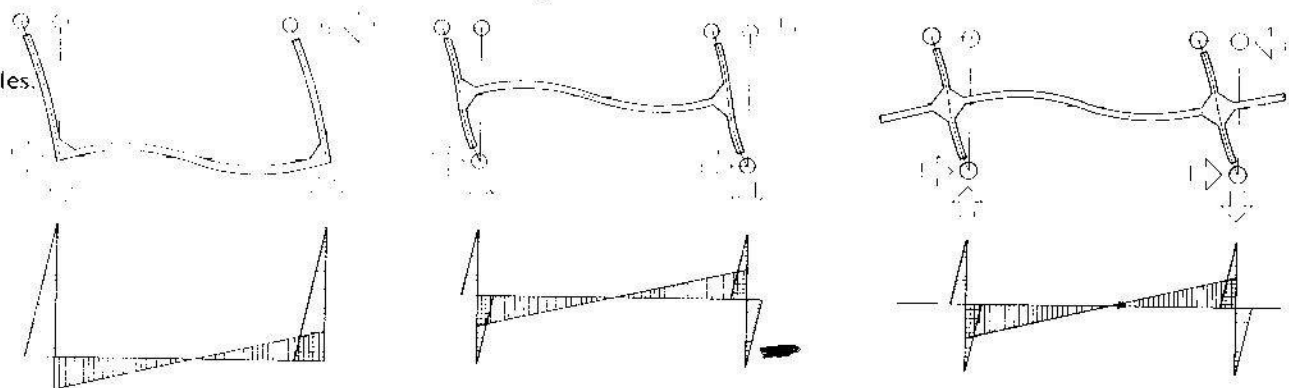
Sistemas estructurales.



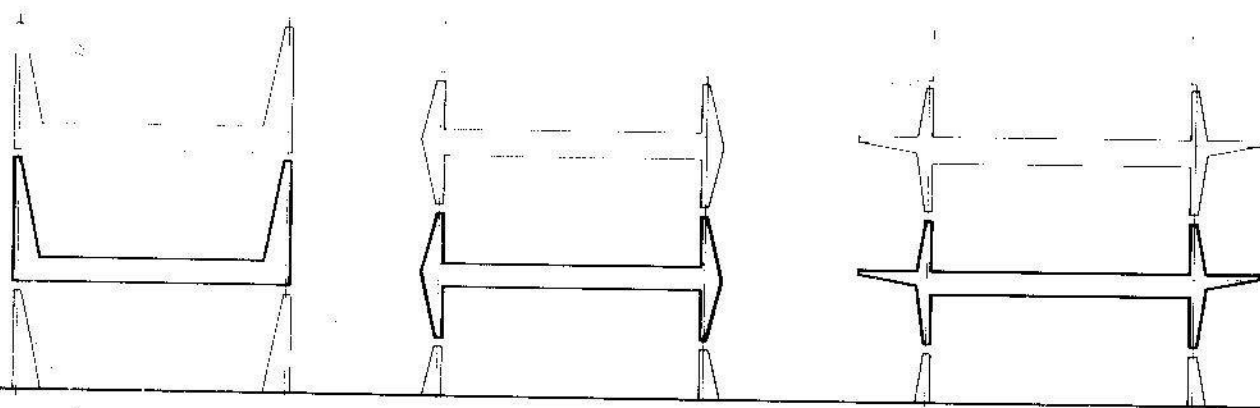
Acción de cargas verticales.



Acción de cargas horizontales.



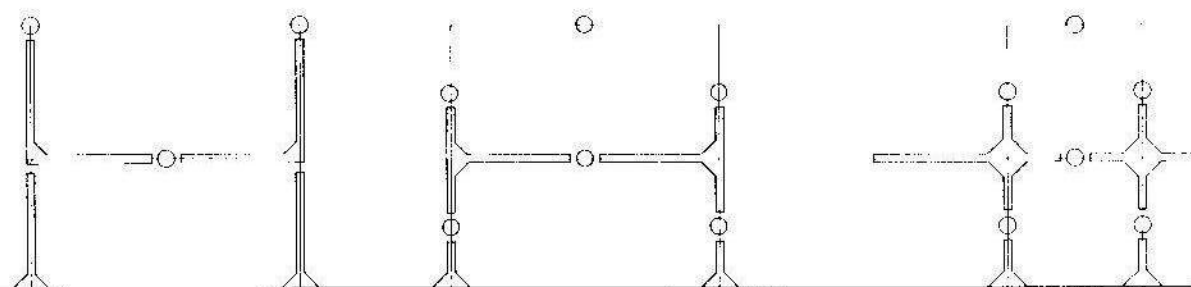
Formas típicas estructurales.



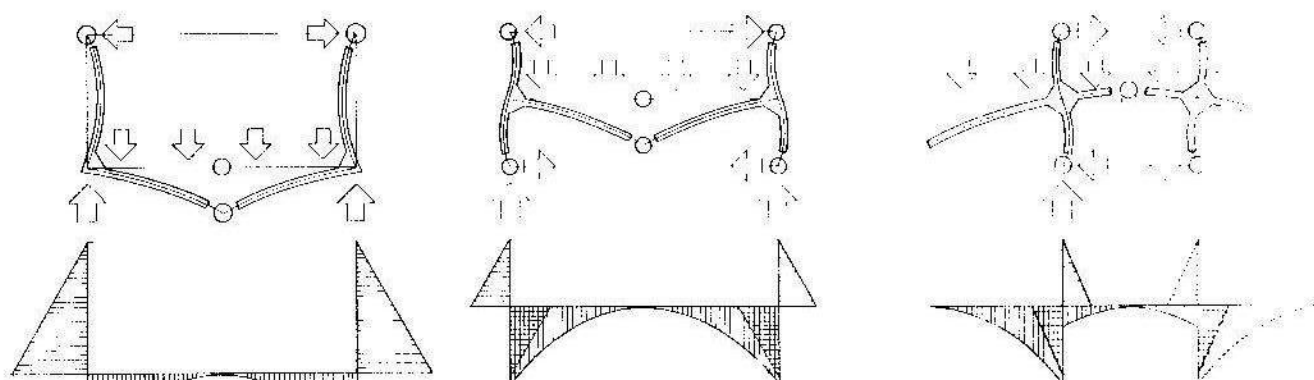
El mecanismo resistente típico del pórtico de dos articulaciones funcionará con eficacia no mermada, aun después de haber invertido o duplicado el pórtico simple.

Mecanismo de la forma inversa y de la forma doble del pórtico de tres articulaciones

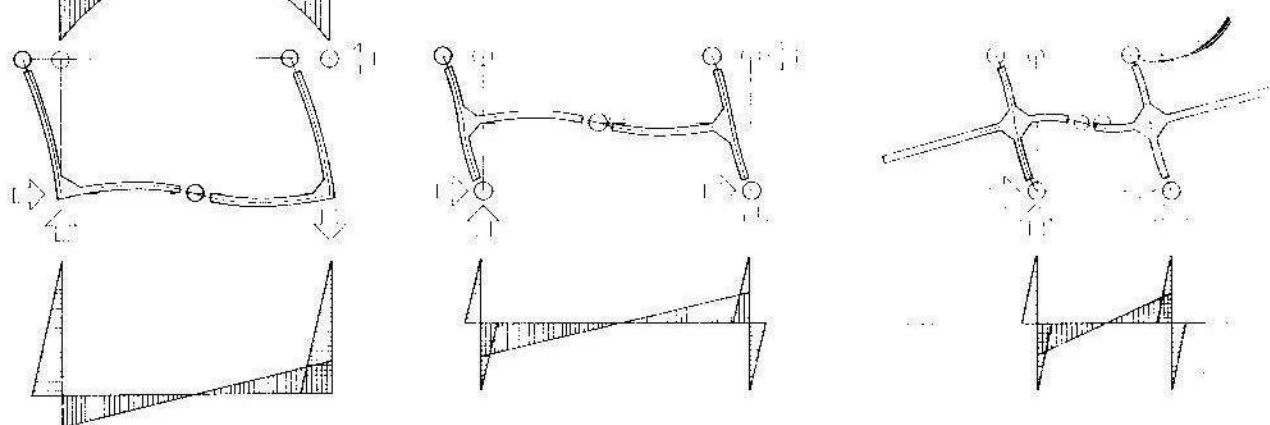
Sistemas estructurales.



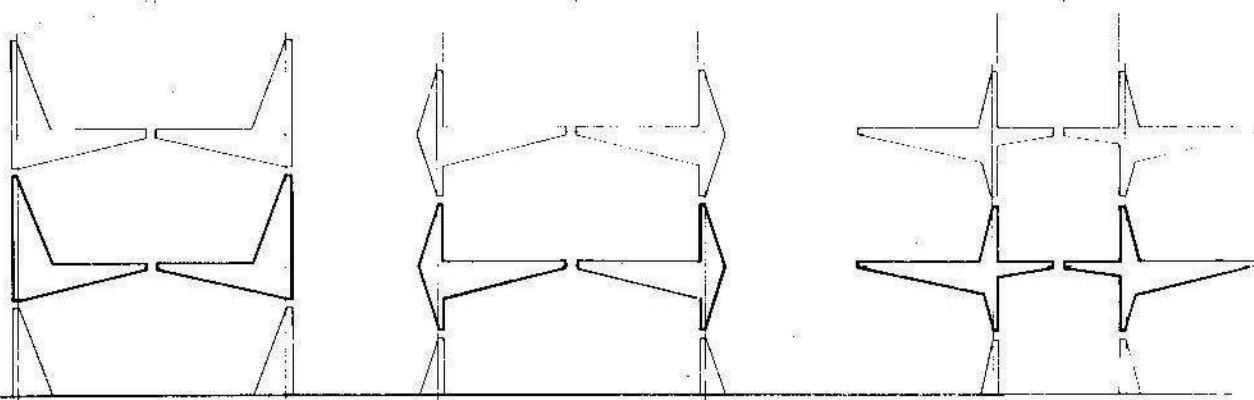
Acción de cargas verticales.



Acción de cargas horizontales.



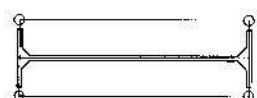
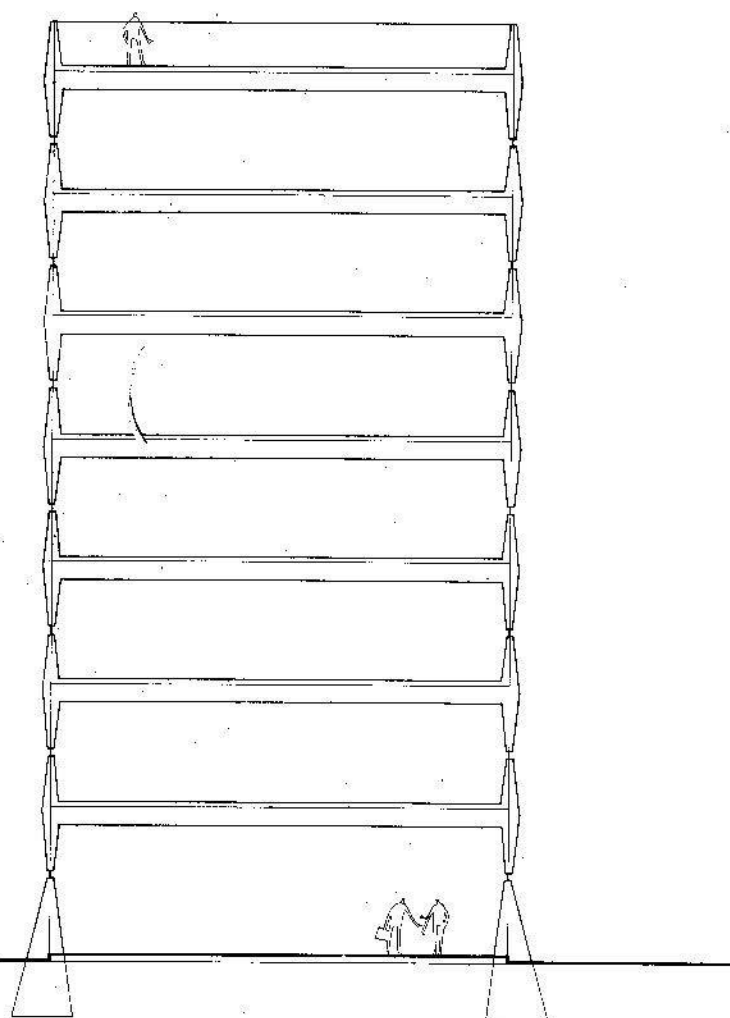
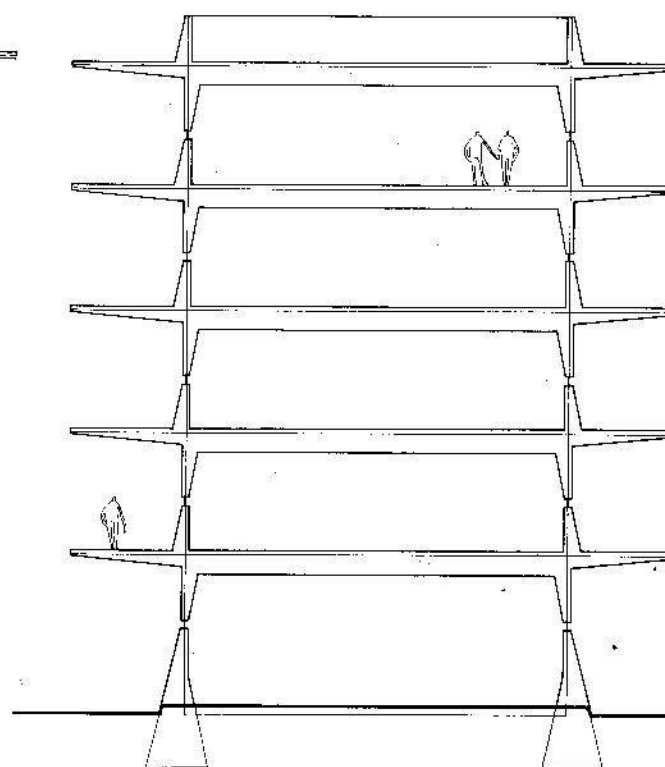
Formas típicas estructurales.



El mecanismo resistente típico del pórtico de tres articulaciones funcionará con eficacia no mermada, aún después de haber invertido o duplicado el pórtico simple.

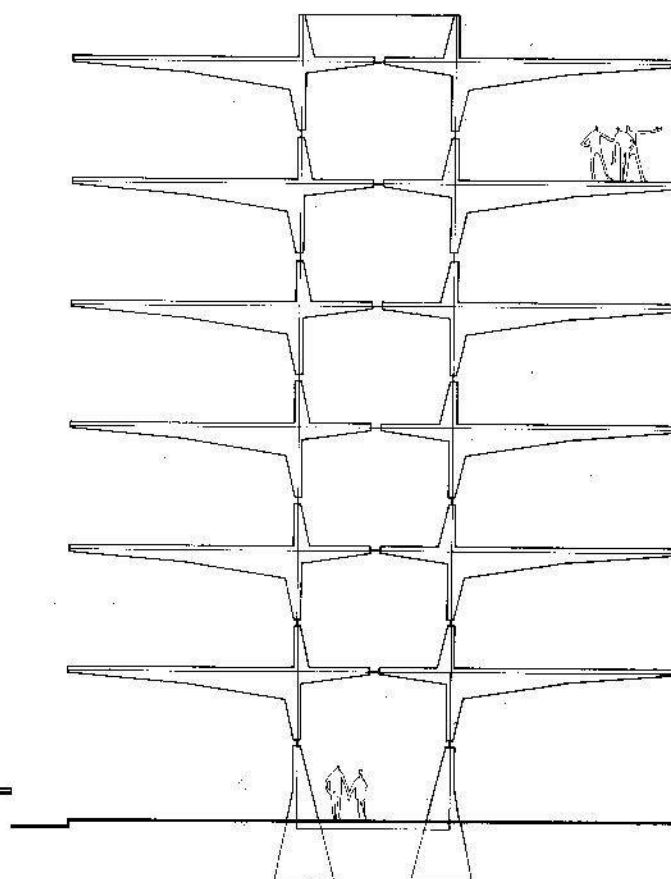
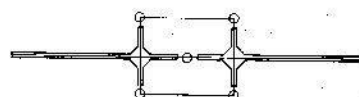
Sistemas estructurales verticales compuestos por pórticos con soportes articulados a mitad de altura

Sistema de pórticos de dos articulaciones con voladizos.

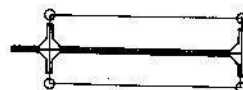
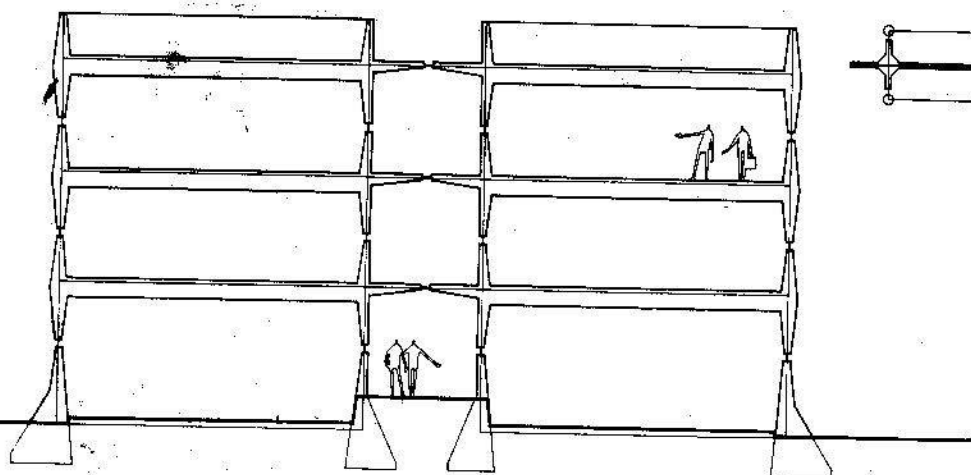


Sistema compuesto por pórticos de dos articulaciones.

Sistema compuesto por pórticos de tres articulaciones con voladizos.

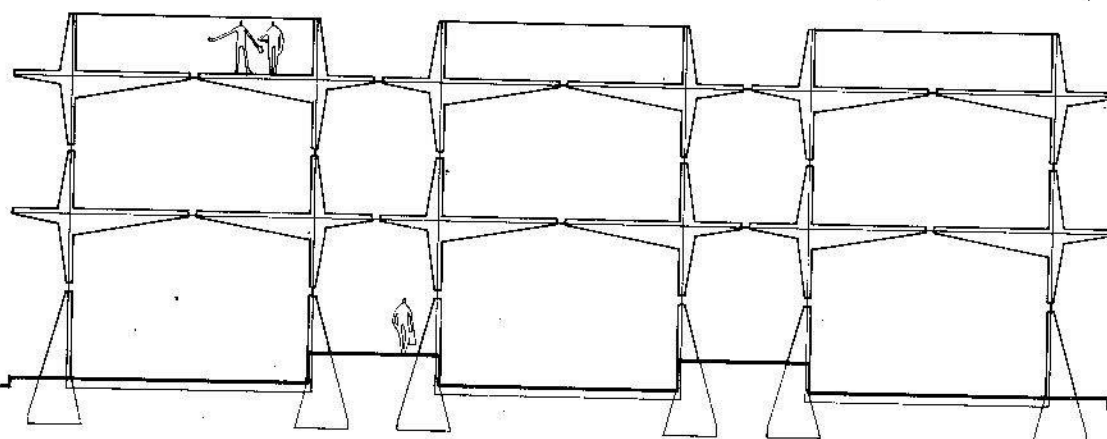
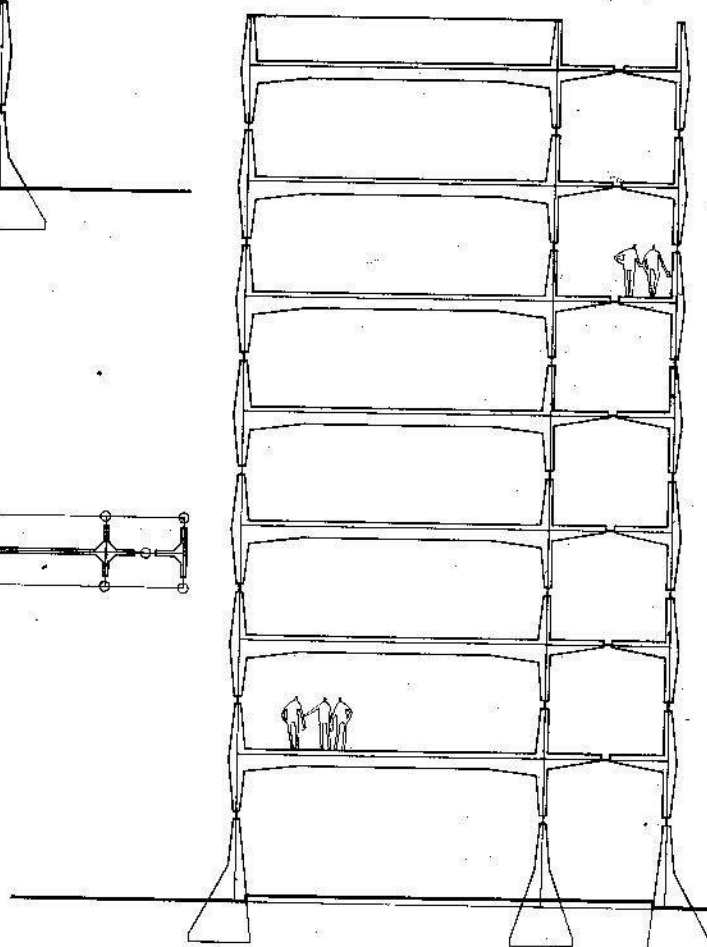


Sistemas estructurales compuestos por pórticos con soportes articulados a mitad de altura



Sistema de pórticos de dos articulaciones con un sólo voladizo

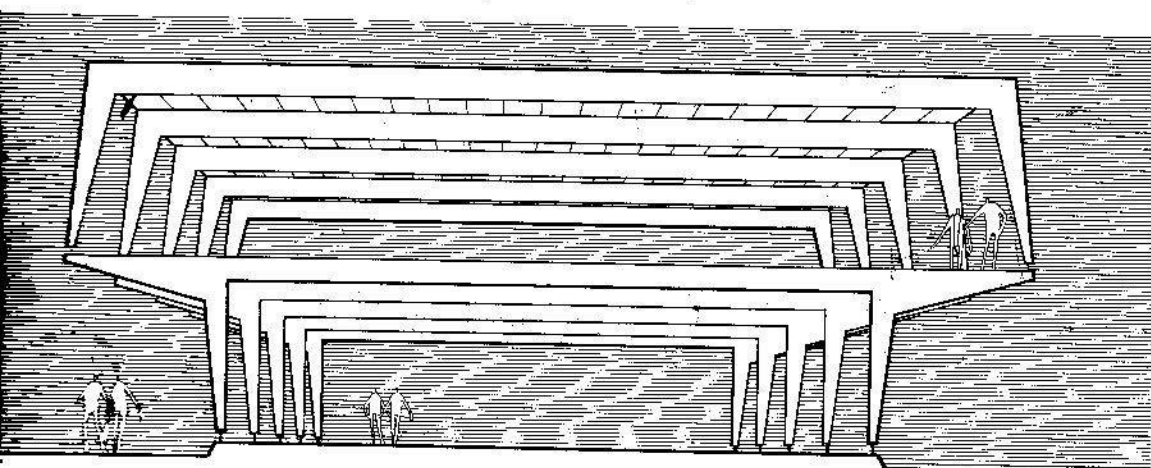
Sistema compuesto por pórticos de dos articulaciones y semi-pórticos.



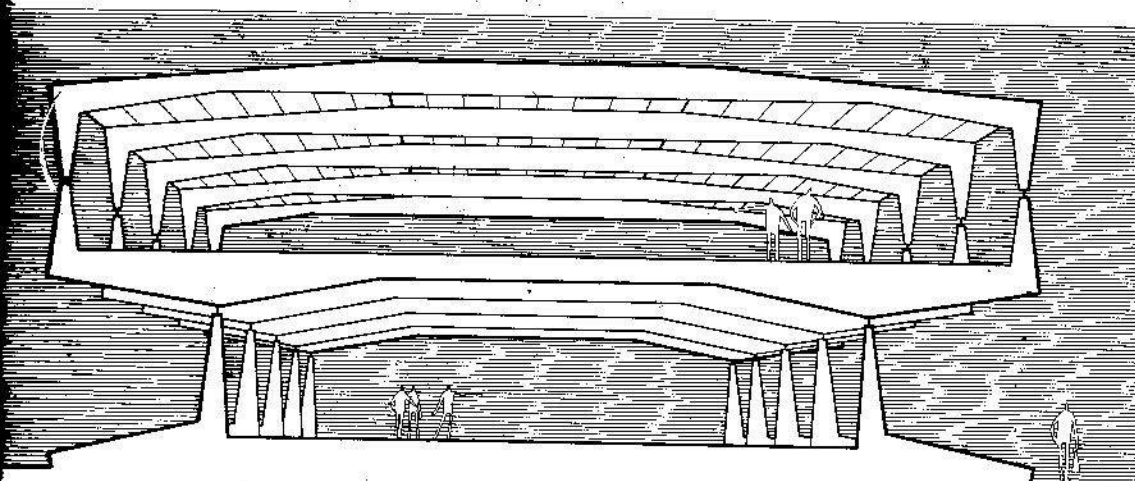
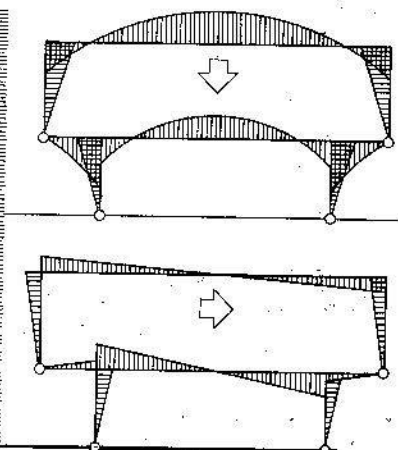
Sistema de pórticos de tres articulaciones con voladizos.



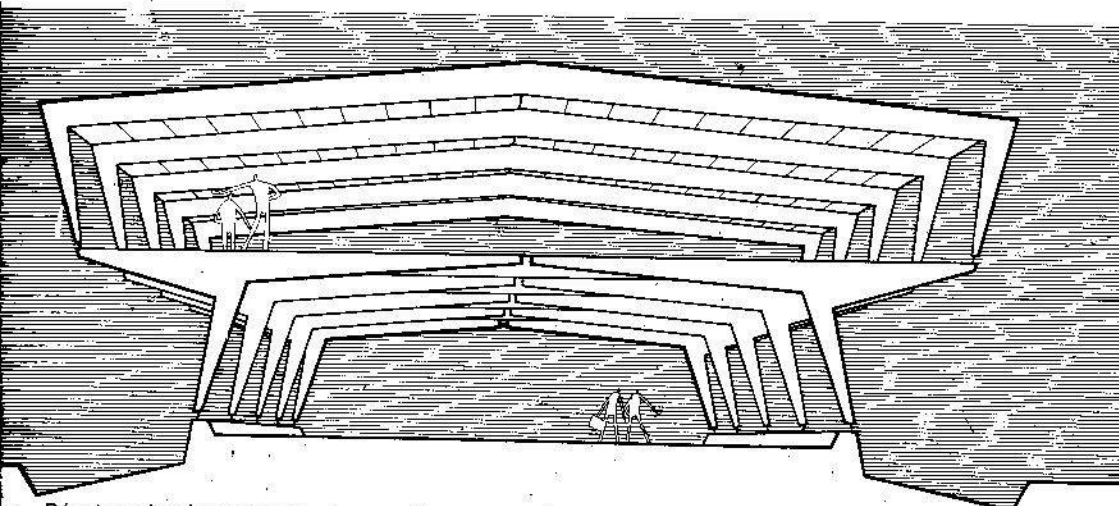
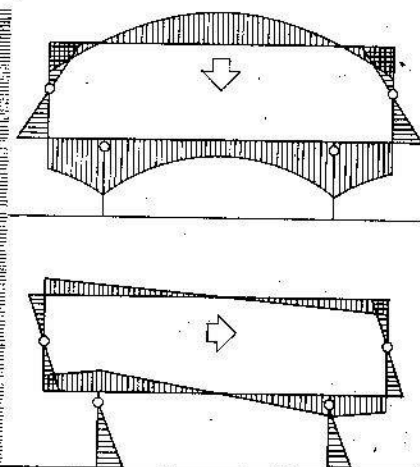
Posibilidades de proyecto con sistemas de pórticos articulados



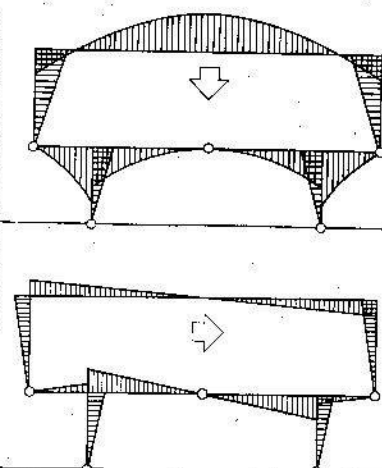
Pórtico de dos articulaciones dispuesto sobre voladizos de otro pórtico de dos articulaciones.



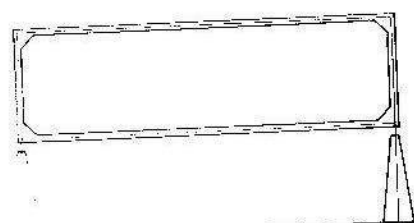
Pórtico de dos articulaciones dispuesto sobre otro pórtico de dos articulaciones invertido y articulado sobre los soportes.



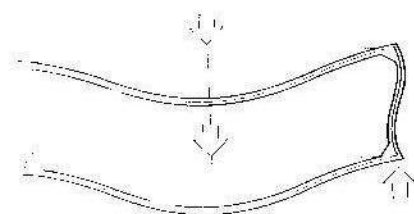
Pórtico de dos articulaciones dispuesto sobre voladizos de un pórtico de tres articulaciones.



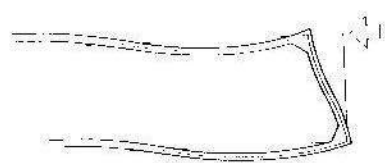
Mecanismos del marco simple y del múltiple



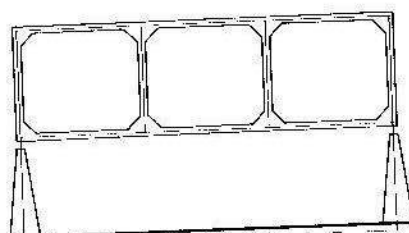
Marco simple.



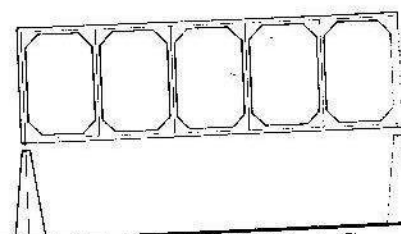
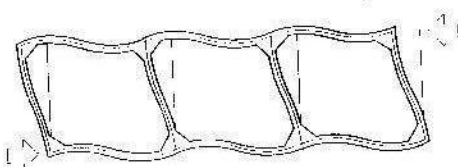
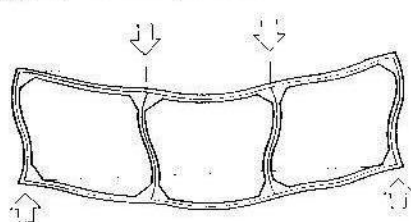
Deformación bajo carga vertical.



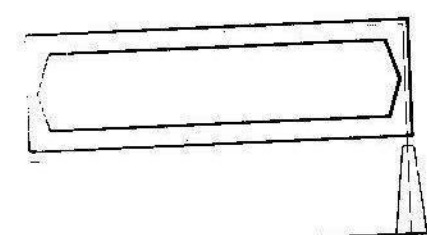
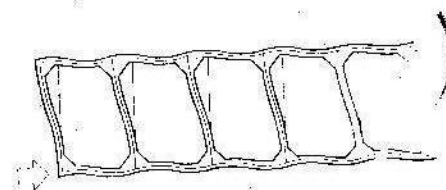
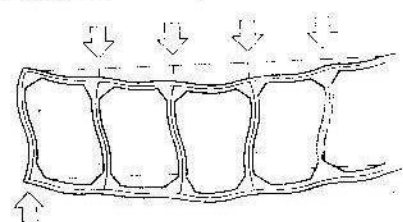
Deformación bajo carga horizontal.



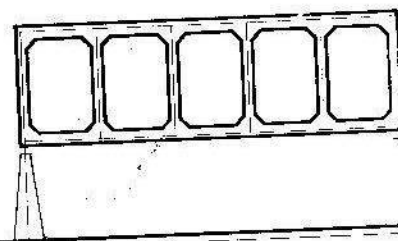
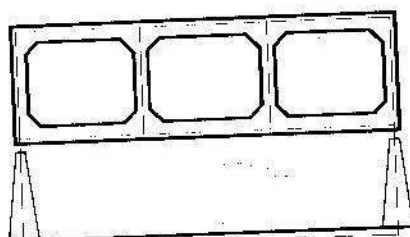
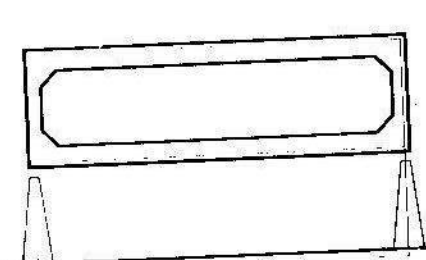
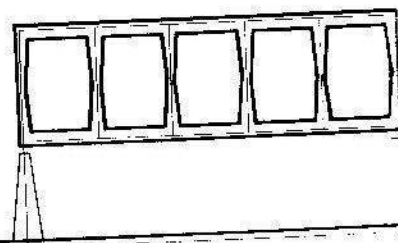
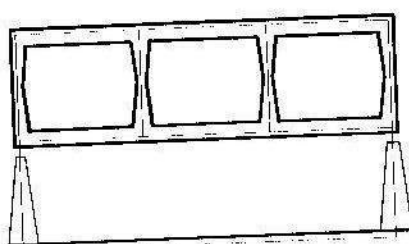
Marco de tres paneles.



Marco de cinco paneles.



Forma estructural destacando el lugar de actuación de momentos mínimos.



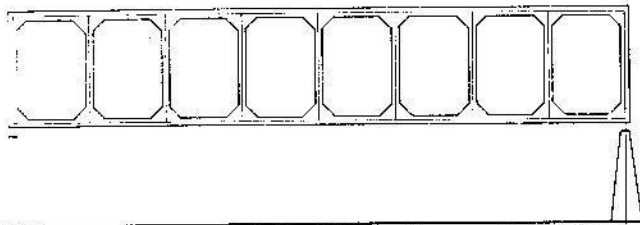
Forma estructural destacando el acartelamiento de los nudos.

A causa de la deformación por flexión de las vigas, los extremos de los montantes girarán el extremo superior en dirección opuesta al inferior. Así los giros son resistidos por los mon-

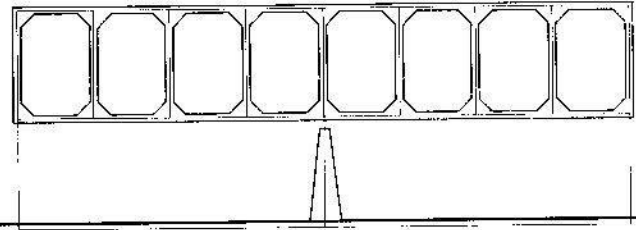
tantes, aminorándose la deformación. La eficacia aumenta con el número de montantes (paneles).

Relación entre la disposición y el mecanismo resistente de marcos múltiples

Sistemas estructurales.

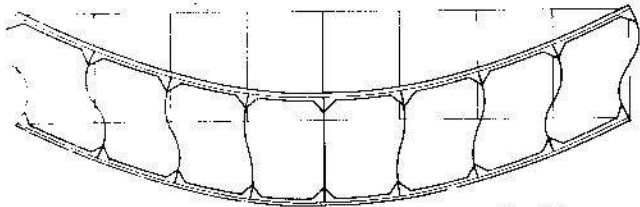


Marco múltiple apoyado en ambos extremos.

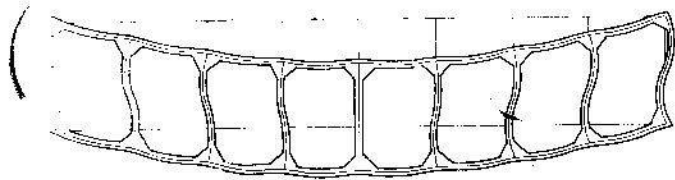
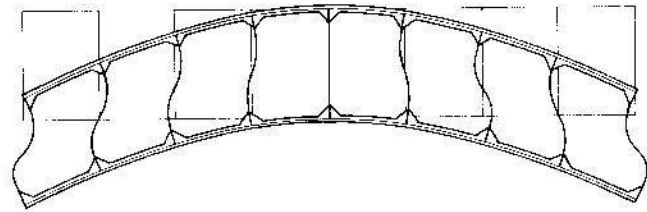


Marco múltiple sobre apoyo central.

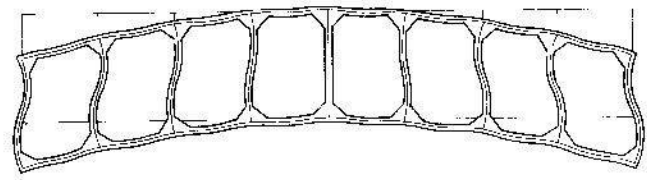
Deformación.



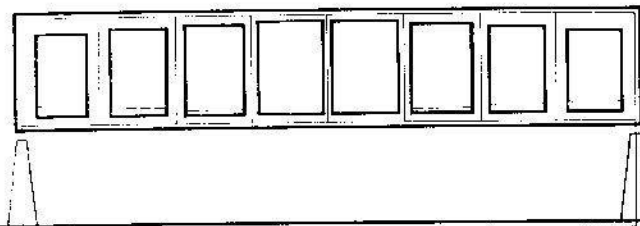
Sistema con montantes que no resisten a flexión.



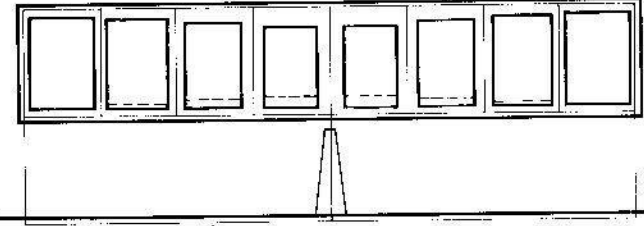
Sistema con montantes a flexión.



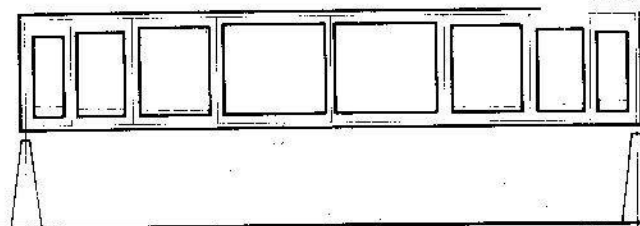
Formas estructurales típicas.



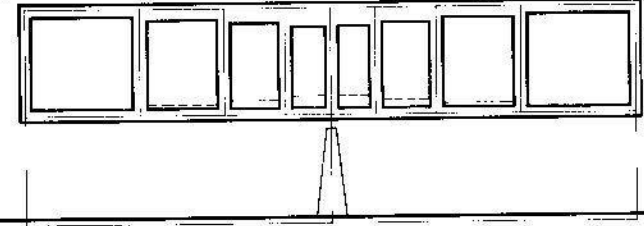
Incremento de la sección de montantes hacia los apoyos, con paneles iguales.



Formas estructurales típicas.



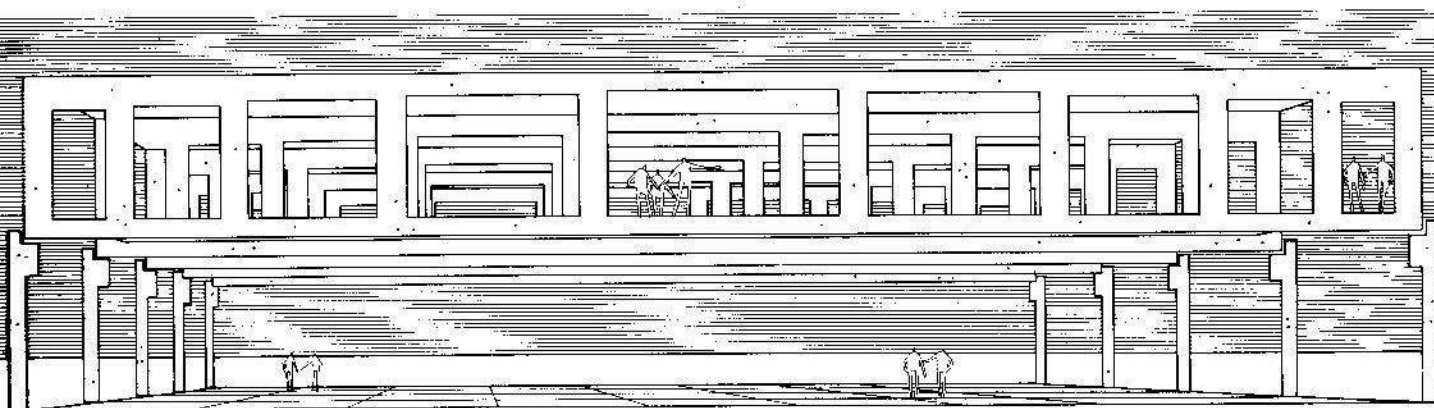
Reducción del panel hacia los apoyos, con montantes de la misma sección.



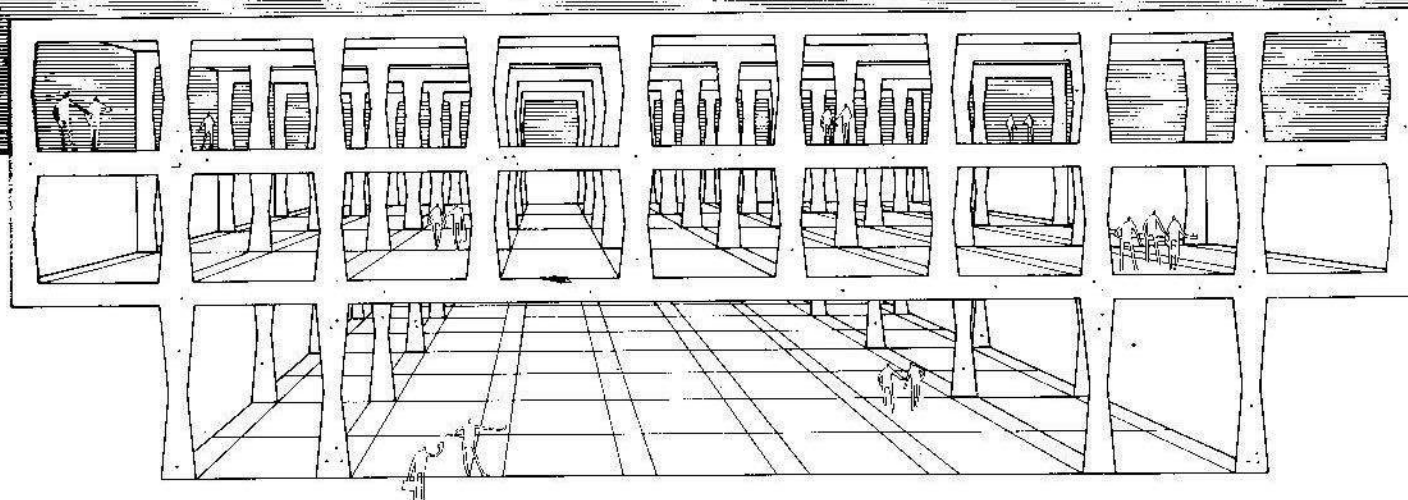
Al igual que la distribución de esfuerzos cortantes en una viga, los montantes se hallan sometidos a grados de flexión muy diferentes. Esta diferencia puede atacarse por reducción de

panel hacia los apoyos, o por incremento de la sección del montante.

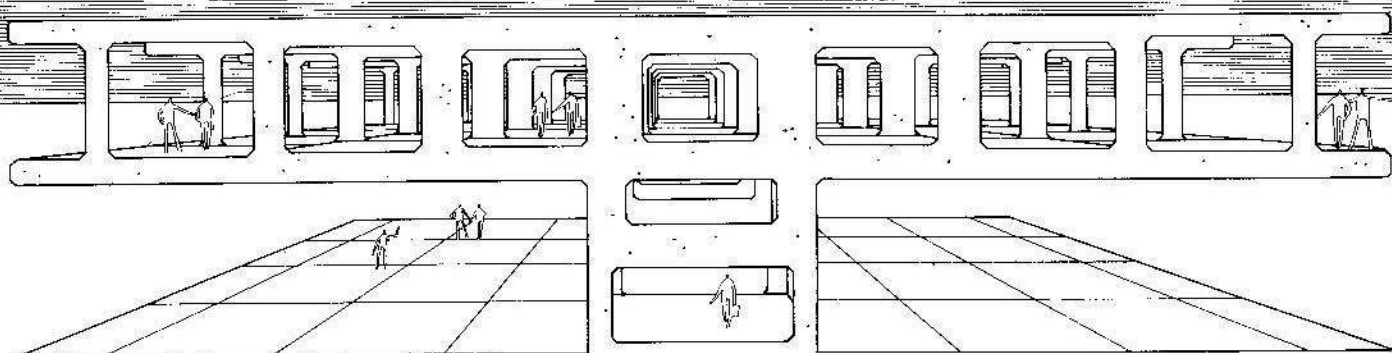
Sistemas estructurales de grandes luces compuestos por marcos múltiples



Marco múltiple de una sólo planta apoyado en ambos extremos.

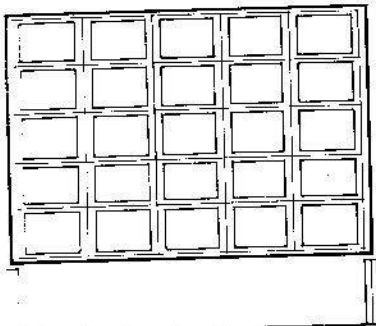


Marco múltiple de dos plantas con voladizos en ambos extremos.

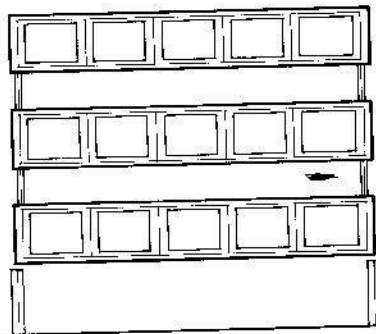


Marco múltiple de una sola planta sobre soportes centrales.

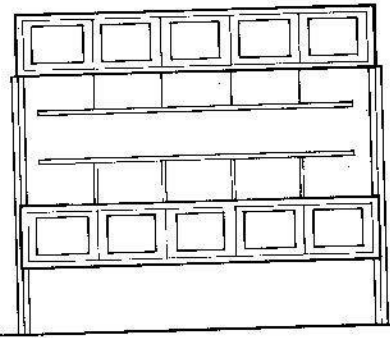
Sistemas estructurales de varias plantas compuestos por pórticos múltiples



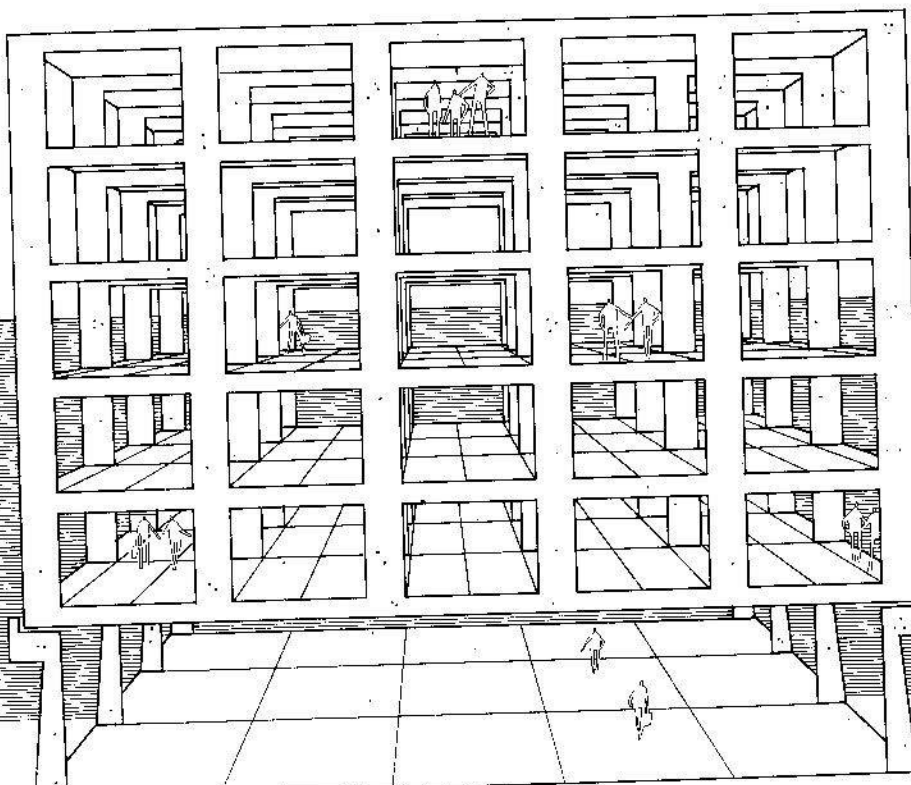
Pórtico múltiple en planta y en altura.



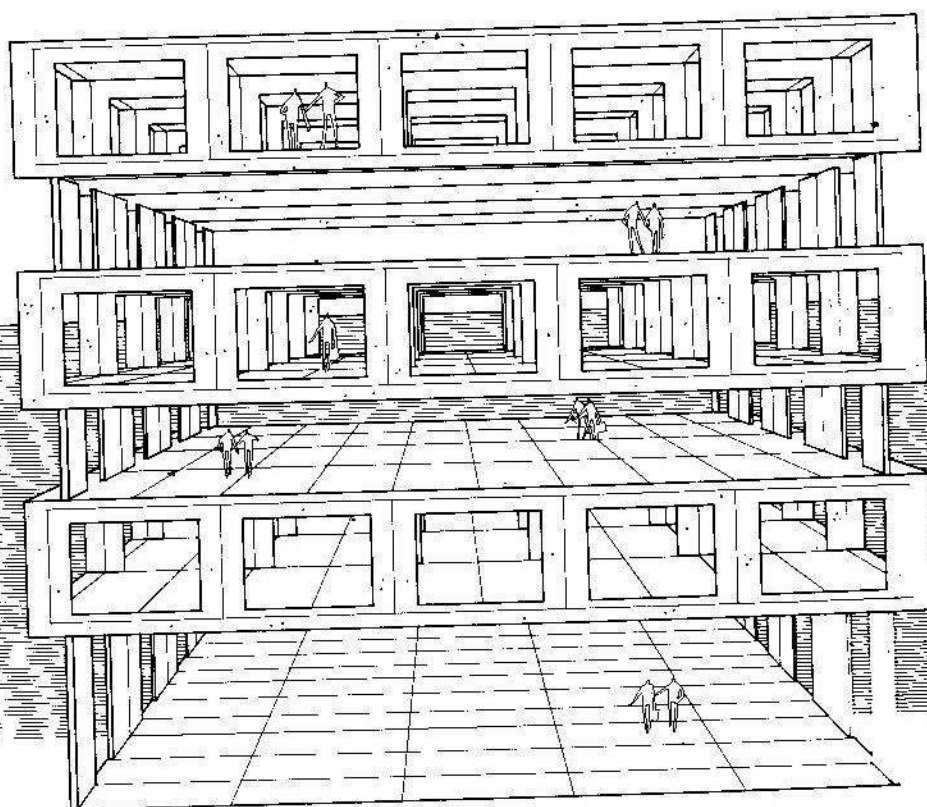
Pórticos múltiples cada dos pisos.



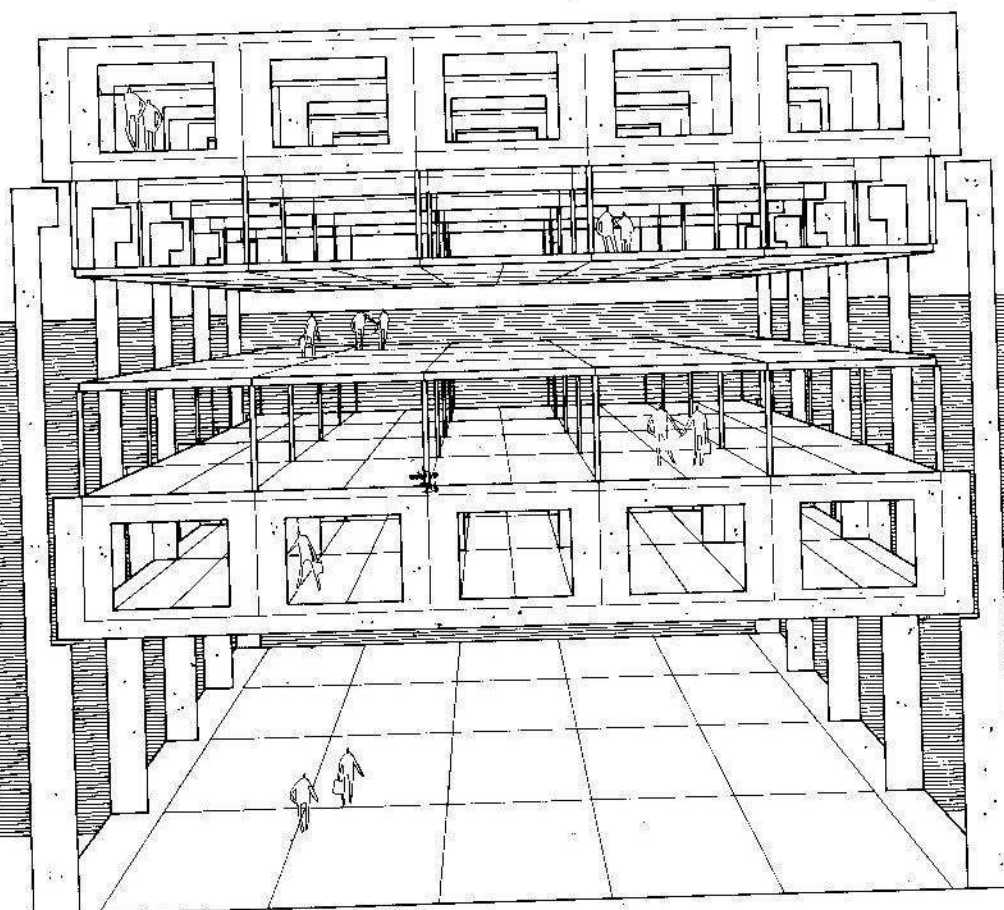
Pórticos múltiples de dos pisos soportando un tercero.



Pórticos múltiples en planta y altura.

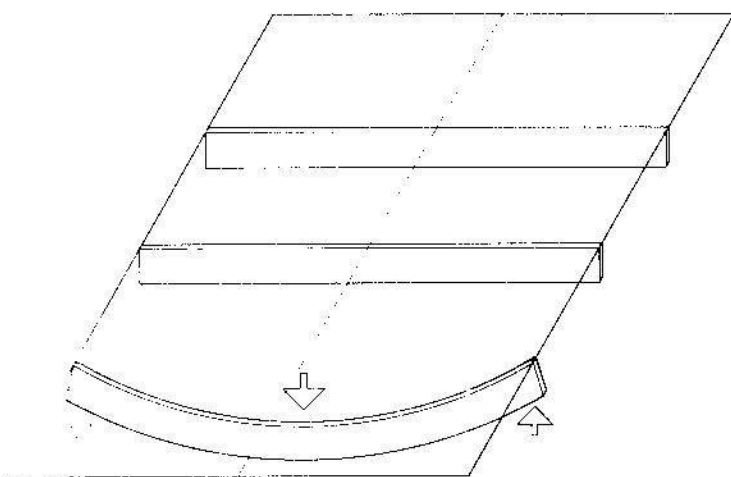


Pórticos múltiples cada dos pisos.

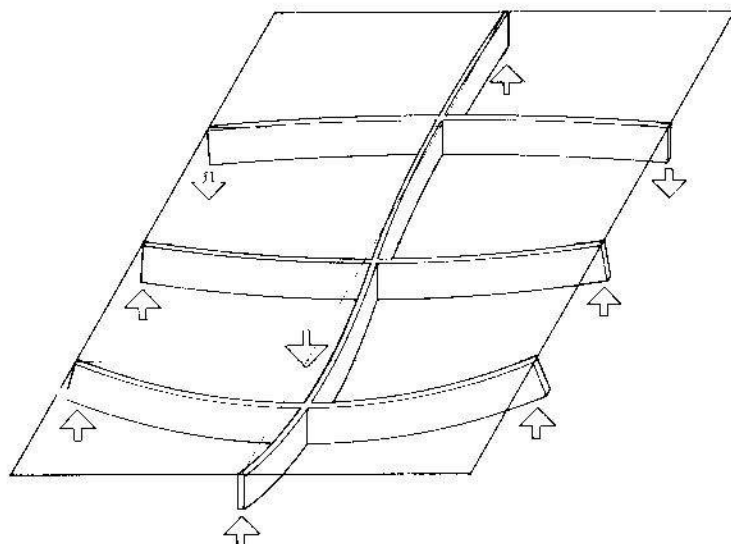


Pórticos múltiples de dos pisos sobre un tercero.

Relación entre vigas paralelas aisladas y retícula de vigas

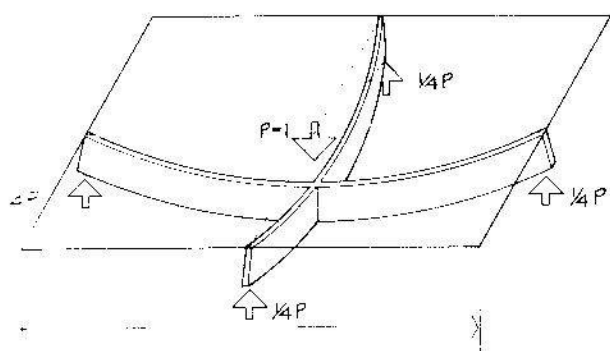


En el sistema de vigas paralelas, sólo la viga sometida a carga sufrirá deformación. Las restantes vigas no participan en el mecanismo resistente.

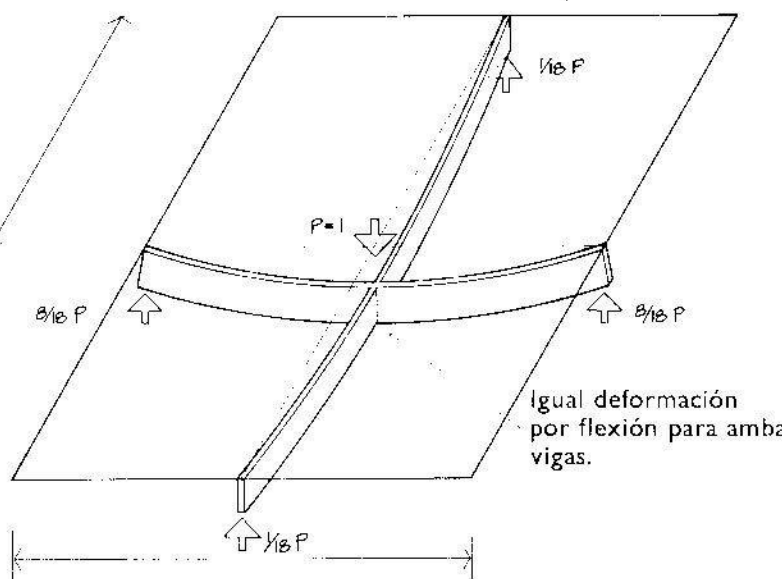


Mediante la inserción de una viga transversal, perpendicularmente a las vigas paralelas, una parte de la carga se transmite a las vigas no cargadas directamente. Así, la totalidad del sistema participa en el mecanismo resistente.

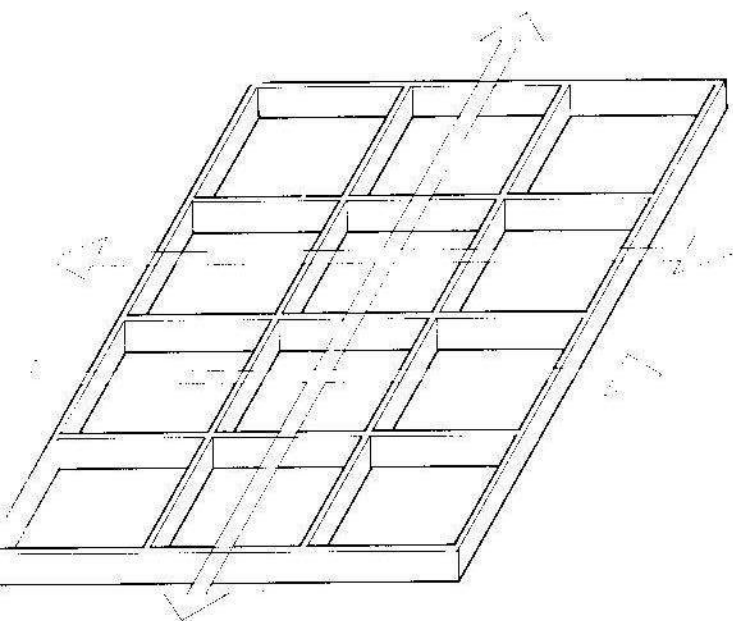
Influencia de las longitudes transversales sobre el reparto transversal de cargas



Dos vigas idénticas coincidiendo entre sí perpendicularmente, recibe cada una la mitad de la carga total. En consecuencia, la reacción de cada apoyo es $1/4$ de la carga total.

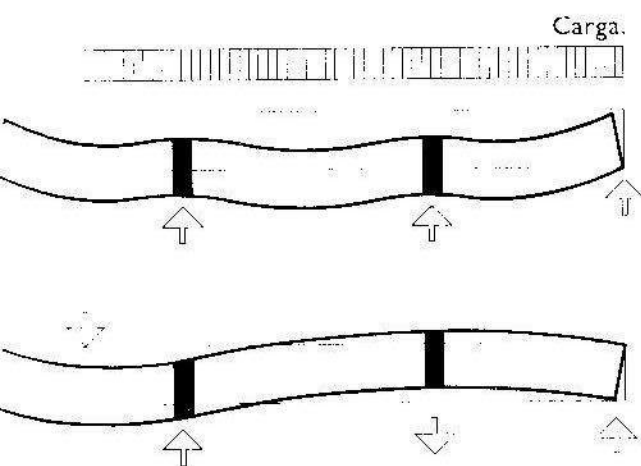


Si vigas de igual sección poseen diferente longitud, la más rígida (por ser la más corta) admite la mayor parte de la carga. Si la relación de los lados es 1 : 2, la rigidez de las vigas tendrá una relación de 1 : 8. De aquí que la viga más corta recibe los $9/8$, de la carga total.



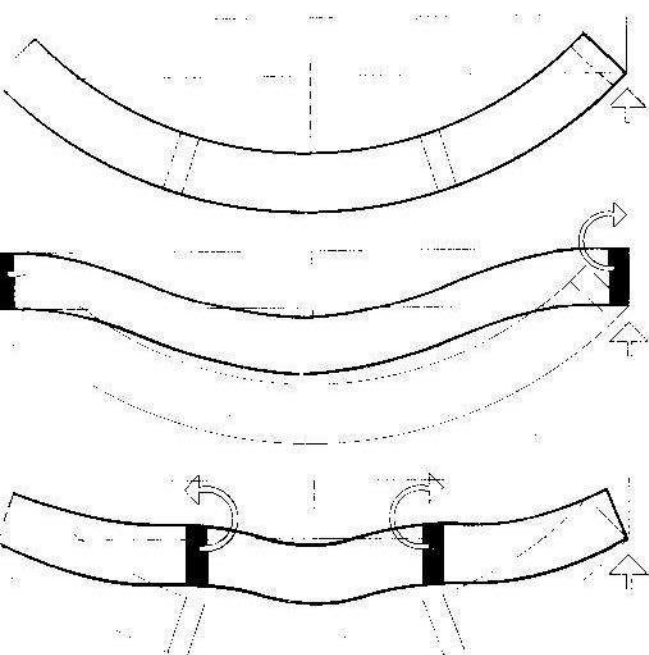
Transmisión biaxial de cargas en el emparrillado con nudos rígidos

Supuesto que ambas series de vigas tienen aproximadamente la misma rigidez, la carga se transmite según dos ejes, por medio del mecanismo de la flexión. En el caso de una carga puntual, debido a la mutua interpenetración, también las vigas no sometidas directamente a carga flexionan. En consecuencia, se incrementa la resistencia a flexión.



Comportamiento de un elemento como viga continua sobre soportes flexibles

La viga aislada en la retícula actúa como viga continua, cuyos soportes intermedios son elásticos. Bajo una carga aislada puede producirse una flexión en sentido inverso (flexión negativa).



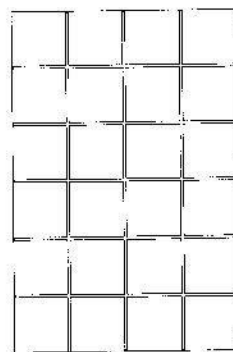
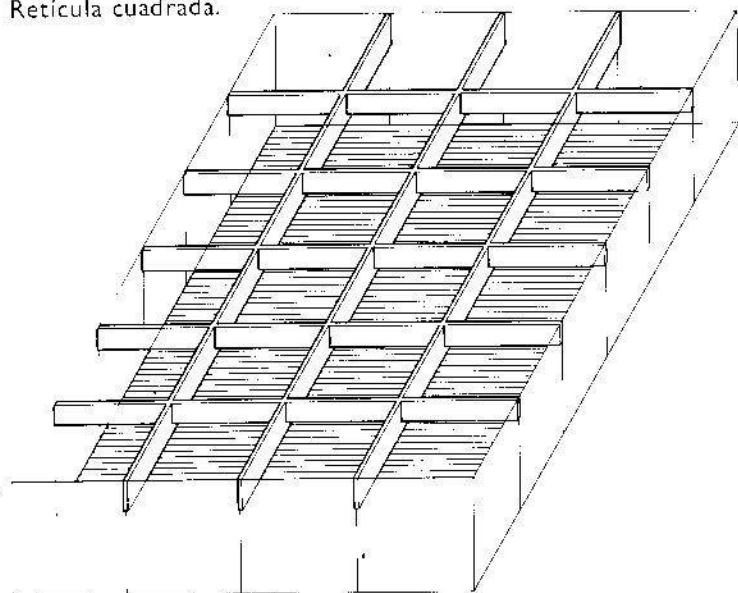
Acción sustentante adicional mediante la resistencia a la torsión.

Debido a los nudos rígidos, la viga de borde experimenta una torsión por la flexión de la viga transversal. La resistencia opuesta a la torsión por la viga de borde hace el efecto de un empotramiento y reduce la flexión de la viga transversal.

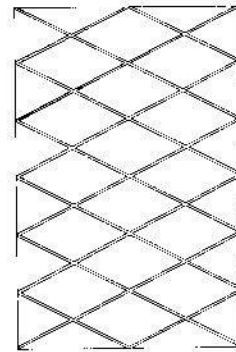
Debido a los nudos rígidos, la deformación debida a la flexión de una viga produce la torsión de la viga transversal. Con ello se activa otro mecanismo resistente contra la flexión.

Emparrillados de vigas para plantas con lados desiguales

Reticula cuadrada.



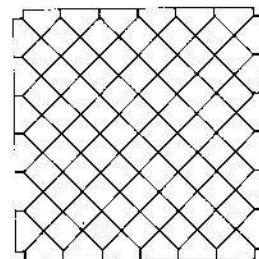
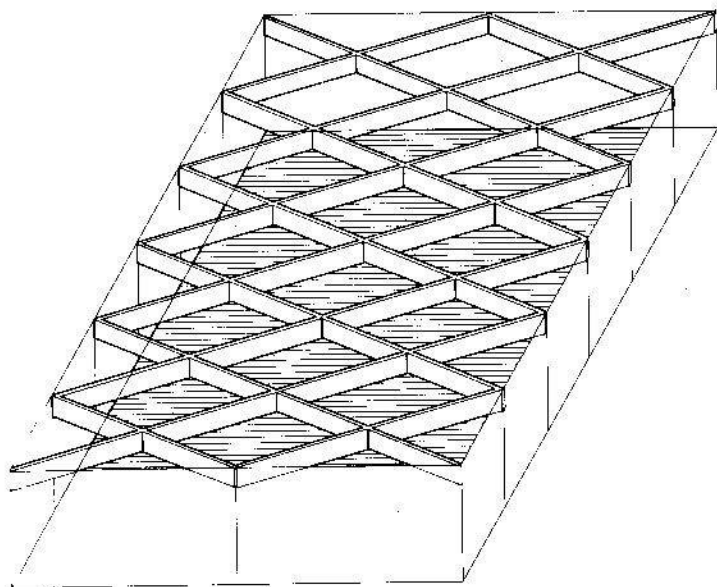
Reticula cuadrada (rectangular).



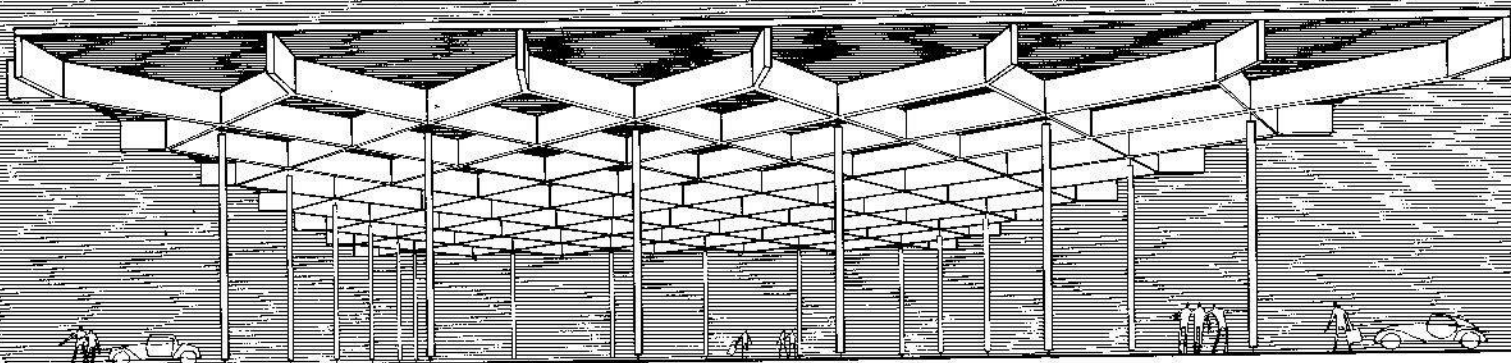
Reticula oblicua (diagonal).

En plantas rectangulares, uno de cuyos lados es marcadamente más largo que el otro, las vigas longitudinales, debido a la disminución de rigidez pierden eficacia; con el fin de permitir igual dispersión de carga en dos ejes, las vigas largas han de rigidizarse en consecuencia, es decir: si la planta tiene la relación 1 : 2, las vigas largas han de ser ocho veces más rígidas que las curvas.

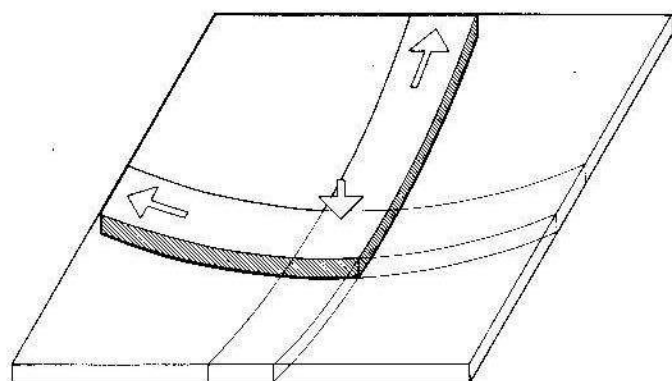
La reticula oblicua evita el inconveniente de las longitudes de vigas desiguales en plantas alargadas. Además, a causa de las luces de viga más reducidas en las esquinas se consigue una rigidez adicional muy parecida a la que se consigue con un empotramiento.



Reticula cuadrada en diagonal.

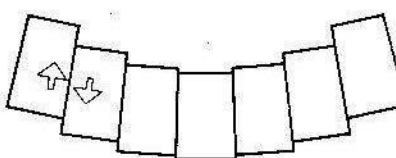
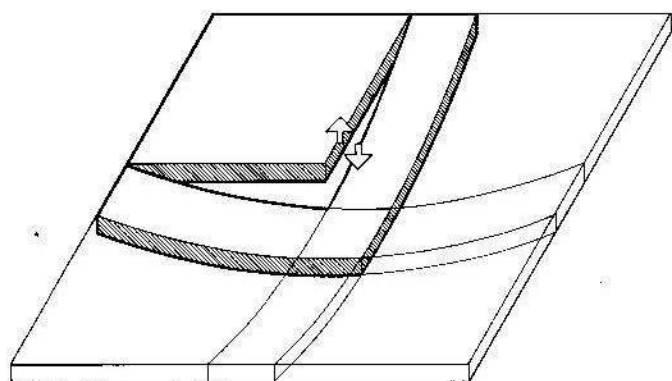


Mecanismo resistente de la losa simplemente apoyada



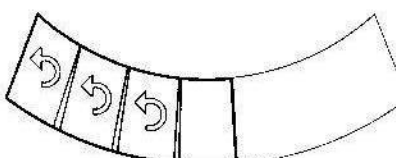
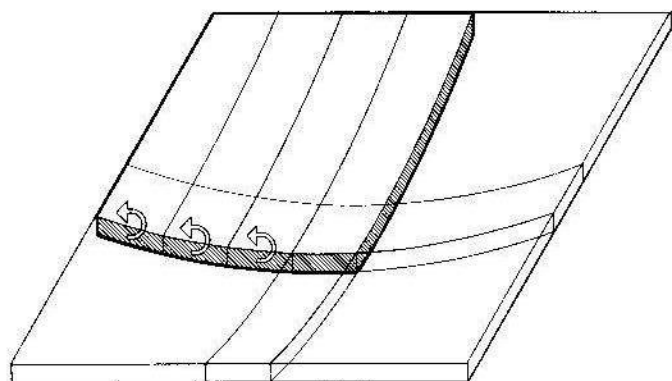
Resistencia a flexión.

Mediante mecanismo de flexión (acción combinada de tracción, compresión y cortante), la carga se transmite a los apoyos como en una viga.



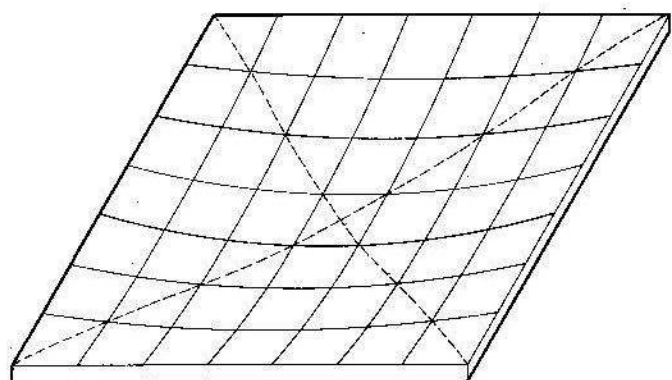
Resistencia a cortante.

Mediante el cortante vertical la carga se transmite desde una rebanada a la adyacente. Por medio de este mecanismo, la carga se transmite a toda la losa, incluso en el caso de carga puntual.



Resistencia a torsión.

La deformación por flexión de la rebanada en un eje origina la torsión de la rebanada en el otro eje. En la losa simplemente apoyada, el 50 % de la carga se transmitirá a los soportes por resistencia a la torsión.



Las esquinas de la placa acusan un aumento de rigidez, como consecuencia de encontrarse en ellas, en ángulo recto, dos elementos sustentantes de borde. Como consecuencia, las líneas diagonales no pueden girar libremente sobre los apoyos. Su condición es parecida a la de una viga empotrada y, por ello, aumentan la capacidad resistente de la losa.



Sistemas estructurales de superficie activa

4



Las superficies, limitadas y determinadas en su forma, constituyen un instrumento y un criterio en la definición del espacio. Las superficies en el espacio dividen a éste y, al dividirlo, lo limitan formando así nuevo espacio.

Las superficies son los medios geométricos más eficientes e inteligibles para definir el espacio del interior al exterior, de plano a plano, de espacio a espacio.

Las superficies, debido a su naturaleza para formar y determinar espacio, son la abstracción elemental a través de la cual la Arquitectura se afirma a sí misma, tanto como idea como realidad.

En la construcción, los elementos superficiales, si se dan ciertas cualidades, pueden desempeñar funciones resistentes: son las superficies estructurales. Sin otra ayuda adicional pueden alzarse libremente en el espacio y al mismo tiempo soportar cargas.

Las superficies estructurales pueden combinarse para formar mecanismos que transmitan fuerzas, sistemas estructurales de superficie activa. La continuidad estructural de los elementos en dos direcciones, es decir, la resistencia superficial frente a esfuerzos de compresión, tracción y cortantes son el requisito previo y la primera característica de las estructuras de superficie activa.

La posibilidad de la superficie estructural para hacer cambiar a las fuerzas de dirección, es decir, para transmitir cargas, depende de la posición de la superficie en relación con la dirección de la fuerza actuante.

El mecanismo sustentante de una estructura superficial es más eficaz cuando las superficies son paralelas a la dirección de las fuerzas actuantes (para las de gravedad vertical), y es más débil, cuando la superficie está en ángulo recto con la

dirección de las fuerzas actuantes (para las de gravedad horizontal).

En la estructura superficial horizontal, la capacidad resistente ante cargas gravitatorias decrece a medida que aumenta la superficie (mecanismo de placa); en las estructuras superficiales verticales, la capacidad resistente aumenta con la expansión superficial (mecanismo de laja).

Inclinando la superficie hacia la dirección de la fuerza actuante por medio de plegado o curvado es posible conciliar la oposición entre una eficacia horizontal para cubrir espacios y una eficacia vertical en la resistencia frente a fuerzas gravitatorias.

La forma de la superficie determina el mecanismo sustentante de los sistemas de superficie activa. La obtención de una forma correcta es, al lado de la continuidad superficial, el segundo requisito previo y la segunda característica de los sistemas estructurales de superficie activa.

En las estructuras de superficie activa es fundamental una forma adecuada que transmita las fuerzas actuantes y las reparta por toda la superficie en tensiones de pequeña magnitud. El conseguir una forma eficaz para la superficie desde los puntos de vista estructural, utilitario y estético es un acto creador: arte.

Al elaborar el proyecto de una forma adecuada para la superficie, el mecanismo de las estructuras de forma activa queda integrado en ella: la acción sustentante del arco, la acción colgante del cable.

También los mecanismos de los sistemas estructurales de masa activa, tales como la viga continua o los pórticos articulados, pueden expresarse con el vocabulario de superficies estructurales, al igual que los mecanismos de los sistemas estructurales de forma y vector activos. Es decir, todos los sistemas estructurales pueden inter-

pretarse con elementos de superficie activa y así pueden convertirse en superestructuras cuyos elementos son sistemas estructurales de superficie activa.

Conservar la forma estructural mediante rigidización del borde y del perfil superficial es condición esencial para el funcionamiento del mecanismo sustentante. La dificultad estriba aquí en proyectar los elementos rigidizadores de modo que se evite cualquier cambio brusco, tanto de la rigidez como de la tendencia a la separación entre superficie y rigidizador, lo que significaría una sollicitación peligrosa en la zona de unión.

Los sistemas estructurales de superficie activa son, simultáneamente, la envoltura del espacio interno y la corteza exterior de la construcción y, en consecuencia, determinan la forma interior del espacio y la exterior del edificio. Así, son sustancia real de la edificación y criterio de su calidad: con las mismas cualidades de una máquina racional y eficiente o de una forma con significado estético.

A causa de la identidad entre la estructura y la sustancia del edificio, las estructuras de superficie activa no permiten ni la tolerancia ni la distinción entre estructura y edificio. Y puesto que la forma estructural no es arbitraria, el espacio y la forma del edificio y, con ellas, la voluntad del arquitecto se hallan sometidos a las leyes mecánicas.

De esta forma, el proyecto de las superficies estructurales está sometido a una disciplina. Cualquier desviación de la forma correcta influye en la economía del mecanismo y puede comprometer su funcionamiento.

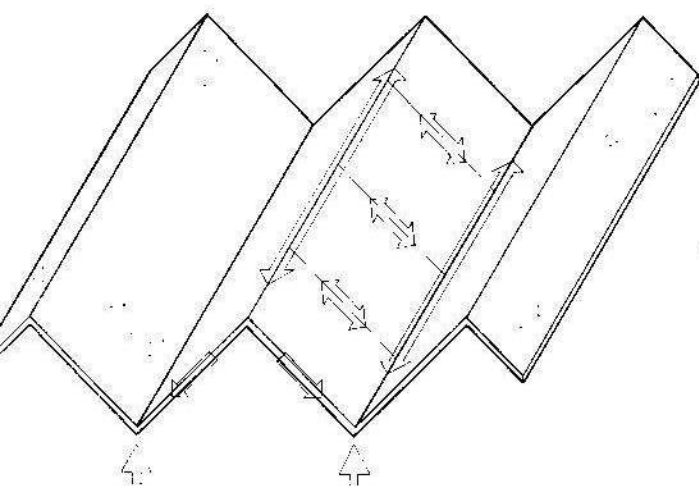
A pesar de las leyes comunes a las cuales se halla sometido cualquier sistema basado en estructuras superficiales, los mecanismos de los sistemas estructurales de superficie activa conocidos son numero-

sos. Sin embargo, aunque cada uno de esos mecanismos posee su típico modo de funcionar y su forma básica característica, existen, dentro de cada uno de ellos, innumerables posibilidades para proyectos ingeniosos y originales.

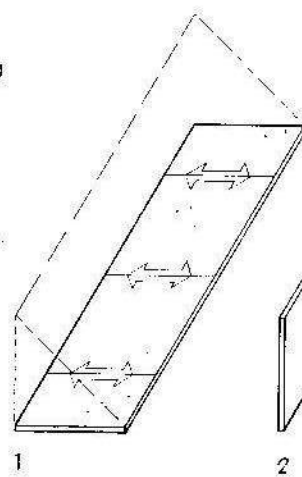
Construir mediante estructuras superficiales requiere el conocimiento de los mecanismos de los sistemas estructurales de superficie activa; su modo de funcionar, su geometría, su significado para la forma y el espacio arquitectónico.

El conocimiento de las posibilidades de cómo desarrollar un sistema auto-sustentante y sometido a cargas, formado por superficies que crean un espacio, es materia indispensable para la enseñanza del arquitecto proyectista.

Acción resistente triple de la placa plegada

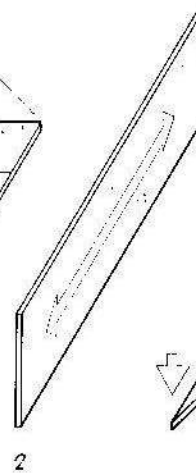


Flujo de esfuerzos simplificado en la placa plegada.



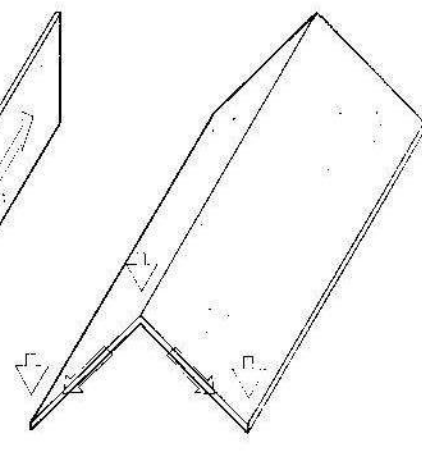
1

Acción de placa.



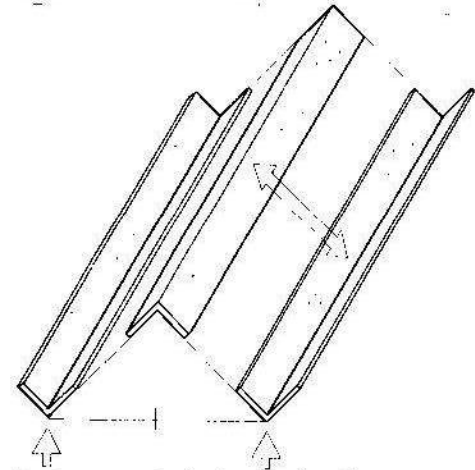
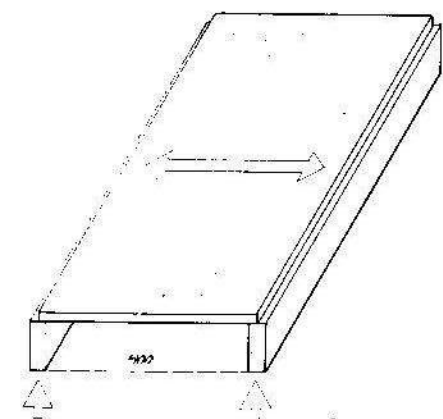
2

Acción de laja.

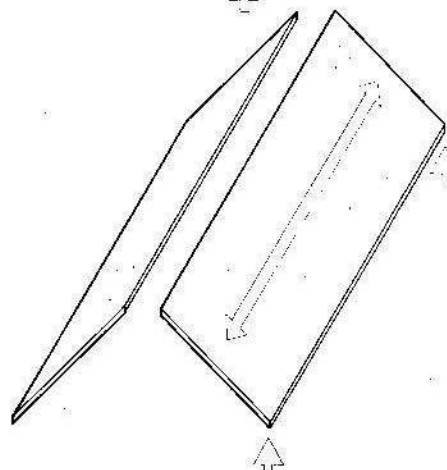
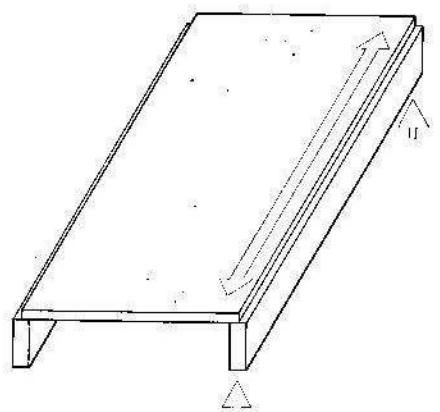


Acción de pórtico.

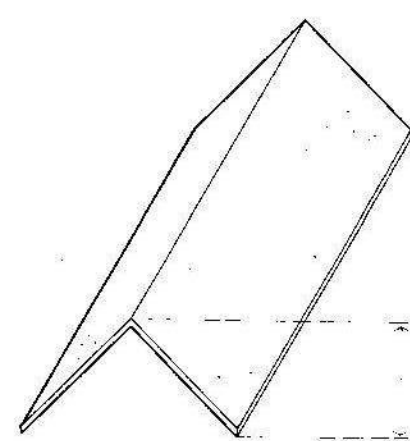
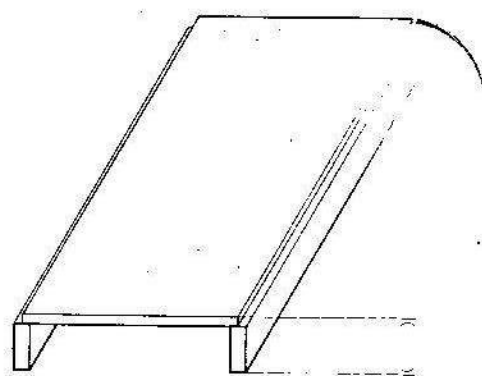
Ventajas de la lámina plegada sobre la placa nervada



Reducción de la luz de la placa, a su mitad aproximadamente, debido a que cada pliegue actúa como un borde rígido.

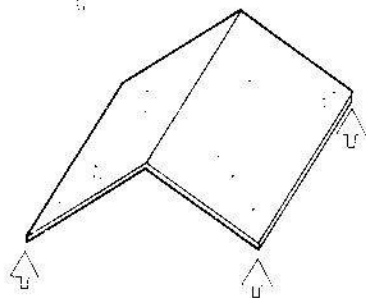


Eliminación de nervaduras, debido a que cada faldón actúa como una viga en dirección longitudinal

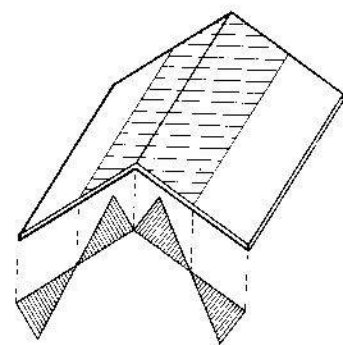
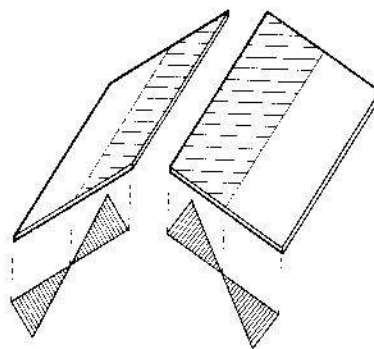


Incremento de la capacidad resistente mediante el aumento de canto.

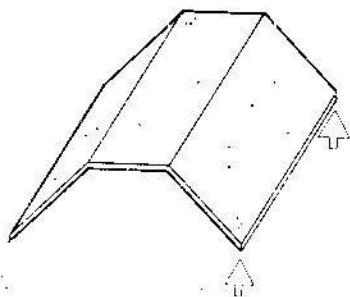
Influencia del plegado en la distribución de esfuerzos y en la capacidad resistente



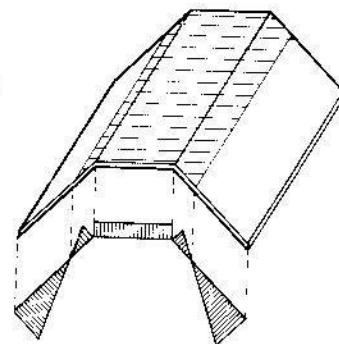
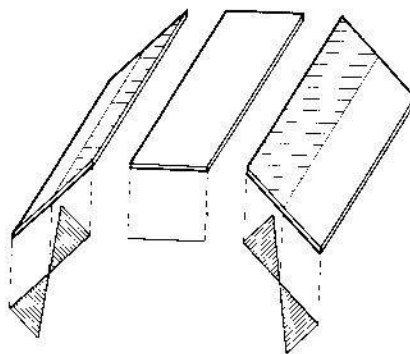
Sistema con un pliegue.



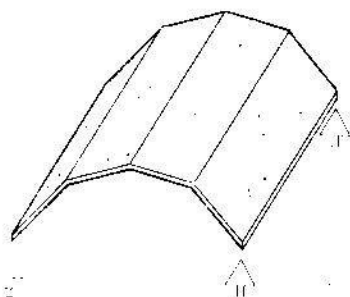
Los esfuerzos normales en el borde común tienen el mismo signo y magnitud; la distribución de tensiones permanece por ello inalterable.



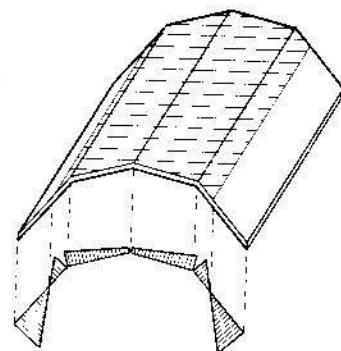
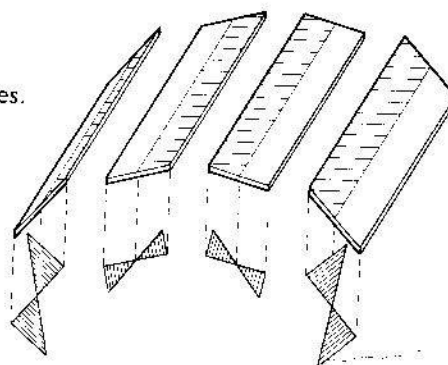
Sistema con dos pliegues.



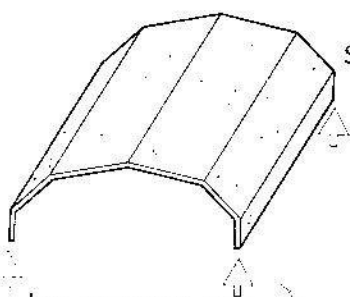
La placa horizontal sin esfuerzos propios se carga mediante esfuerzos cortantes. Por ello se reducen las tensiones de borde.



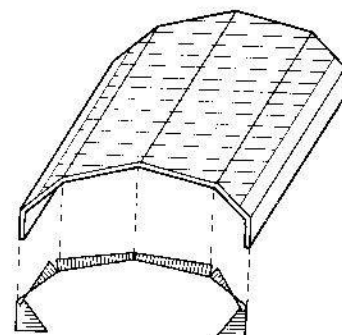
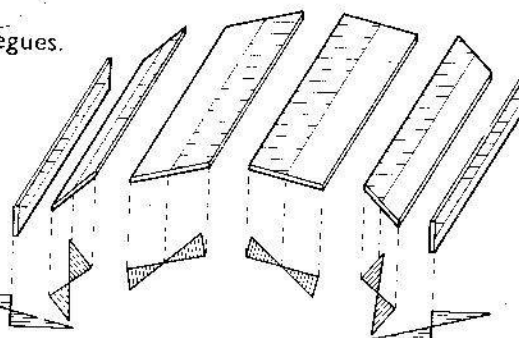
Sistema con tres pliegues.



Los esfuerzos se compensan aún más. La forma y el comportamiento se asemejan a los de una lámina cilíndrica.

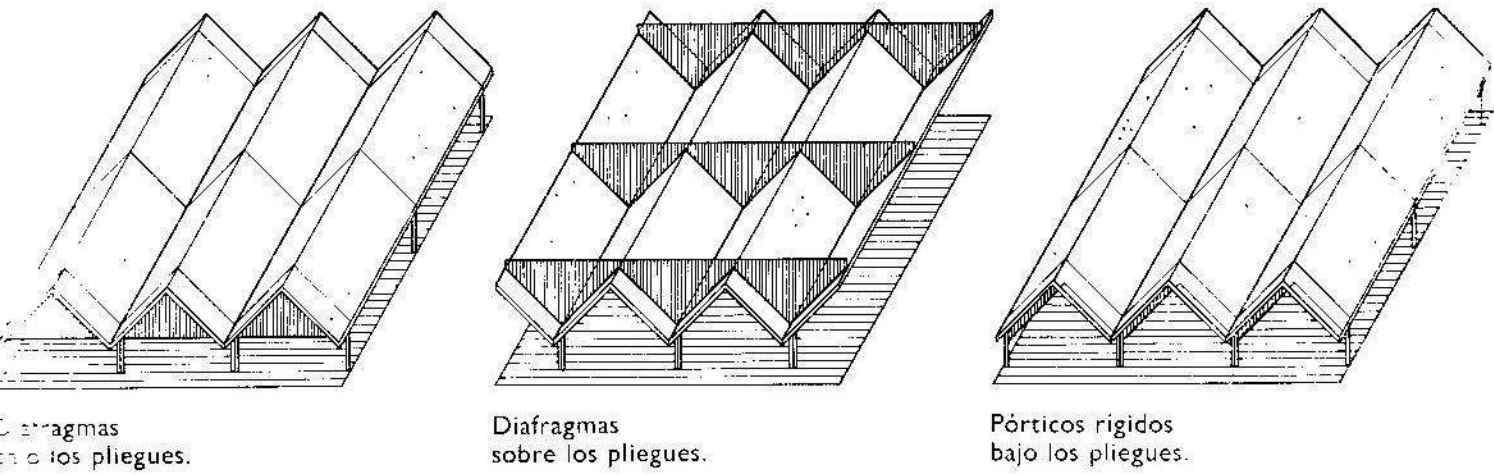


Sistema con varios pliegues.

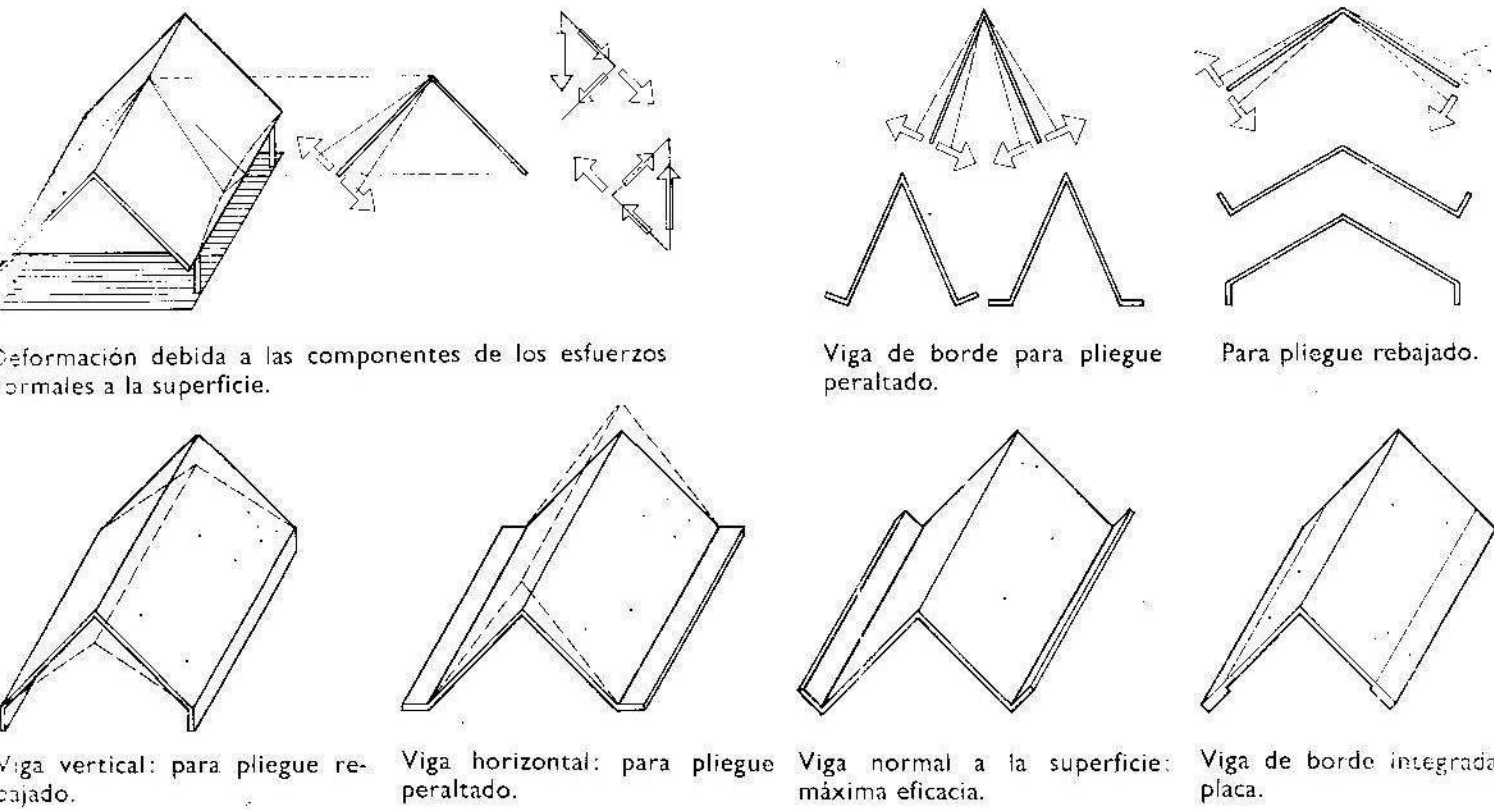


Los esfuerzos de borde en el pliegue lateral tienen signos opuestos, y se compensan ampliamente entre sí mediante la acción de los esfuerzos cortantes.

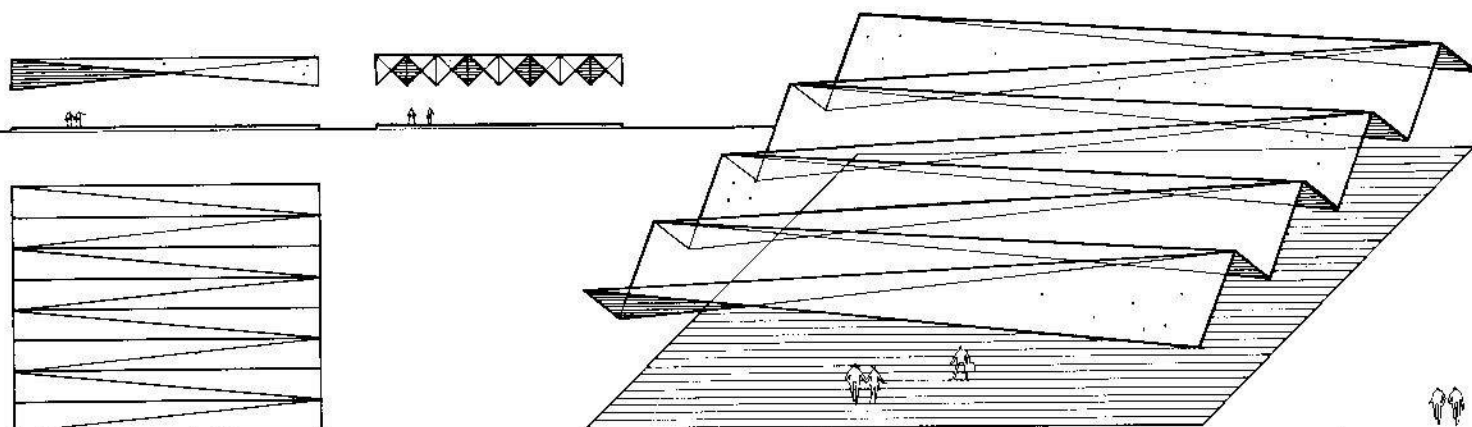
Rigidización contra las deformaciones críticas de las láminas plegadas
Formas típicas de rigidizadores



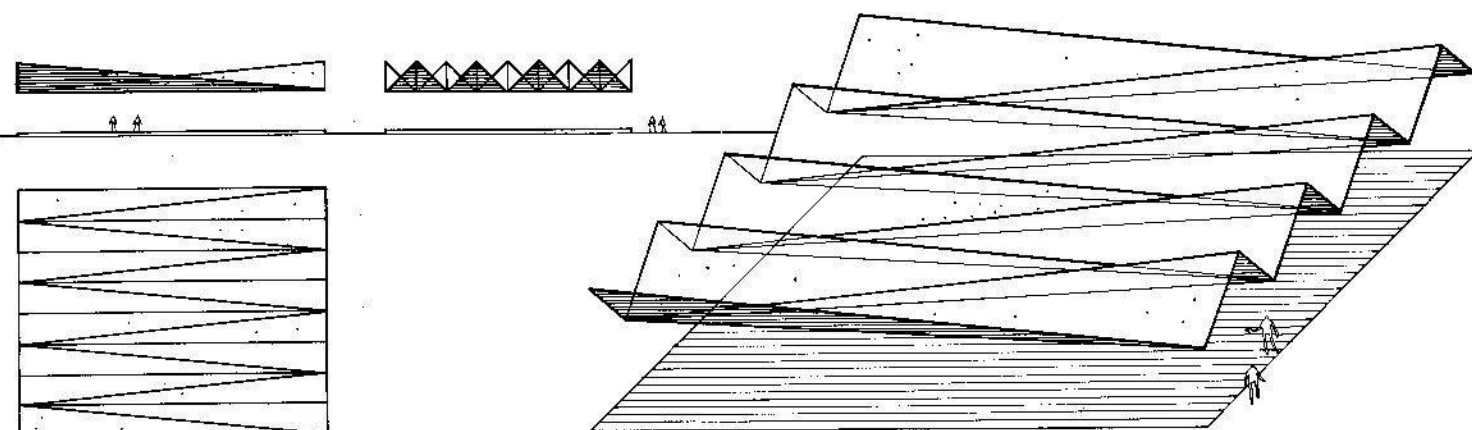
Rigidización contra las deformaciones críticas del borde libre
Formas típicas de viga de borde



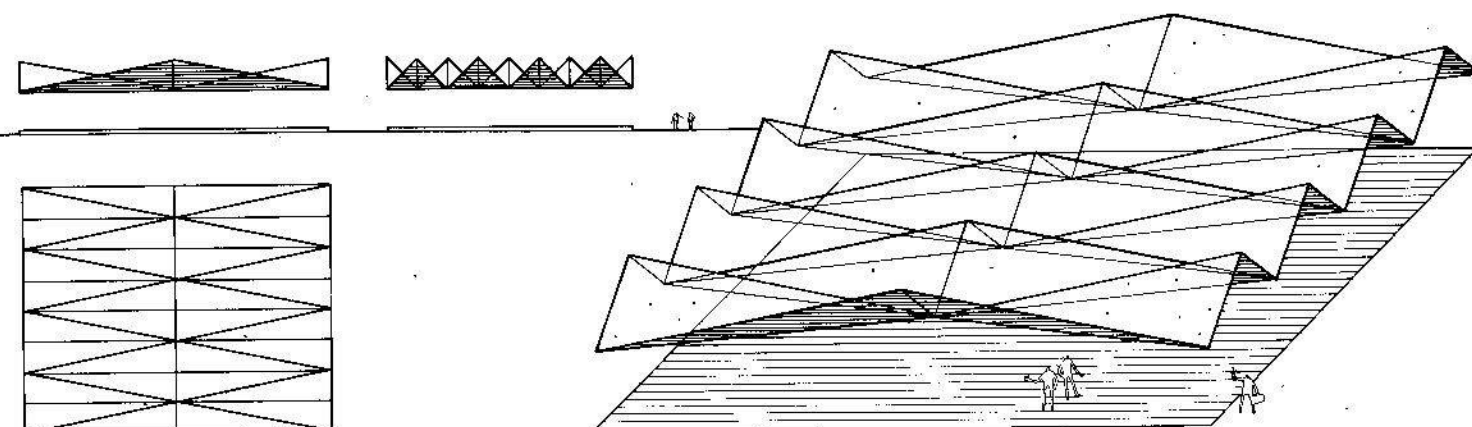
Superficies con pliegues contrapuestos



Pliegue de lima-tesa a lima-tesa.



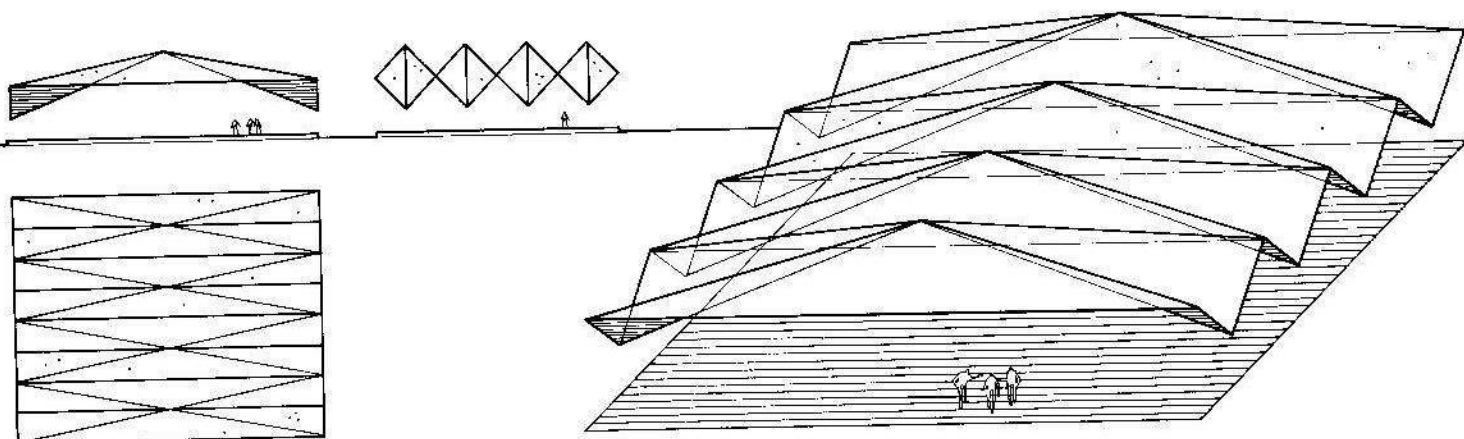
Pliegue de lima-tesa a lima-hoya.



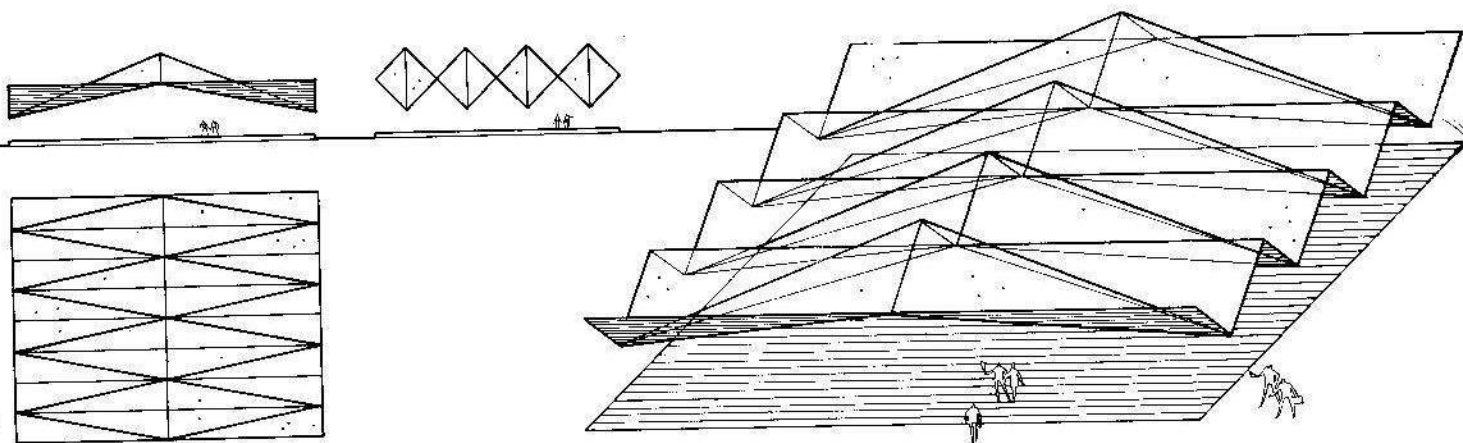
Contraposición de perfiles en el centro.

Superficies con pliegues contrapuestos

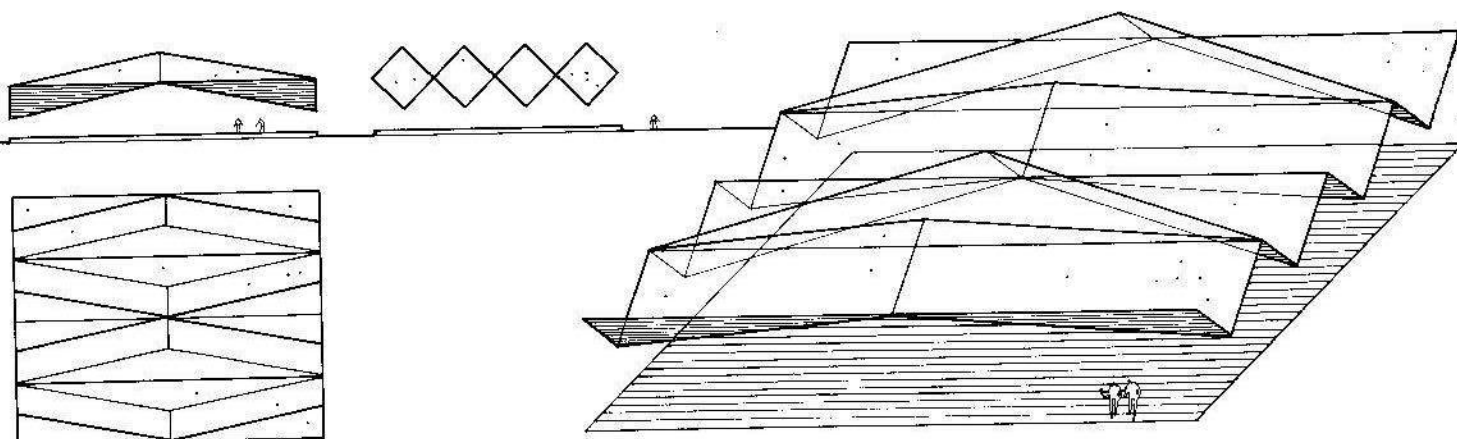
Pliegue central elevado sobre el pliegue de borde.
Idéntica profundidad de perfiles.



Pliegue de lima-tesa a lima-tesa.



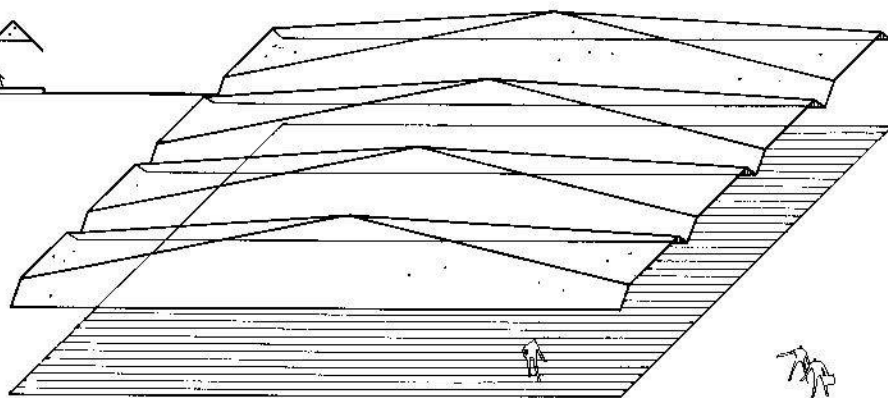
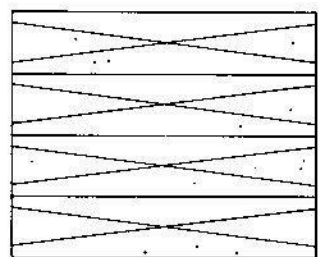
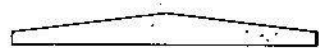
Pliegue de lima-tesa a lima-hoya.



Pliegues alternados.

Superficies con pliegues cónicos

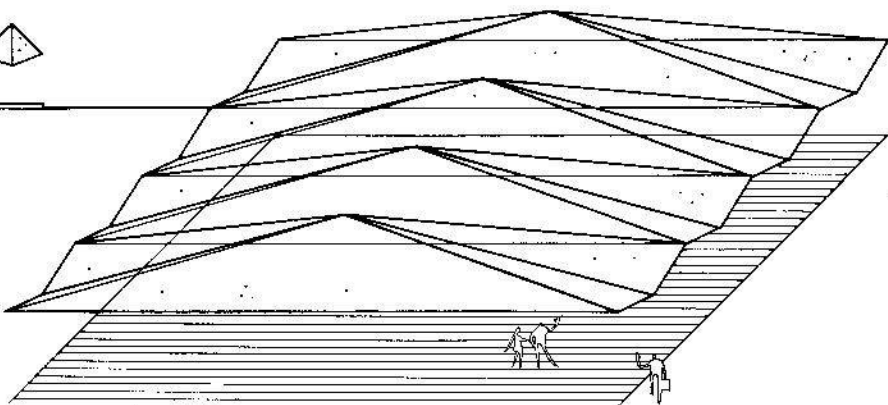
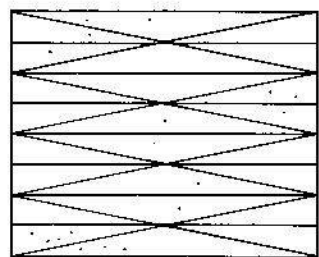
Perfil de pliegue continuo con el canto superior biselado.



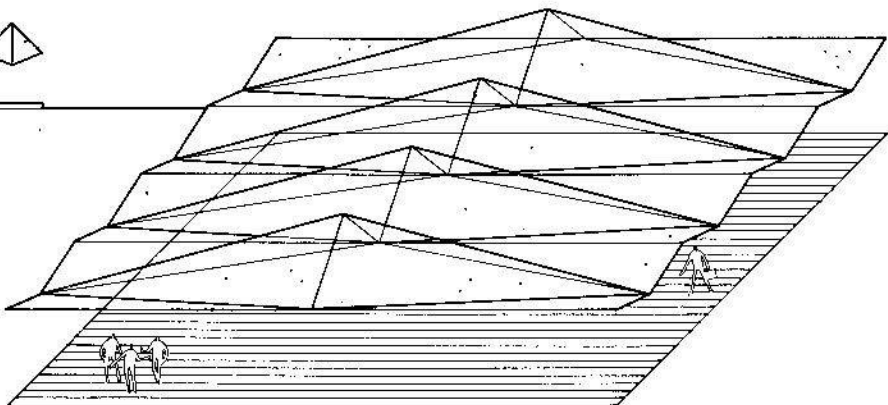
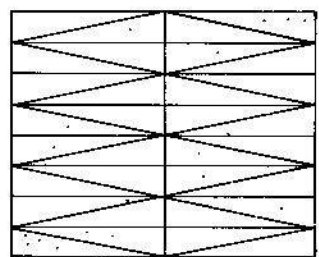
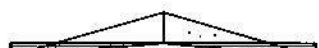
Pliegue peraltado.

Superficies con pliegues contrapuestos

Perfil central peraltado con profundidad de perfil mayor que la del perfil de borde.

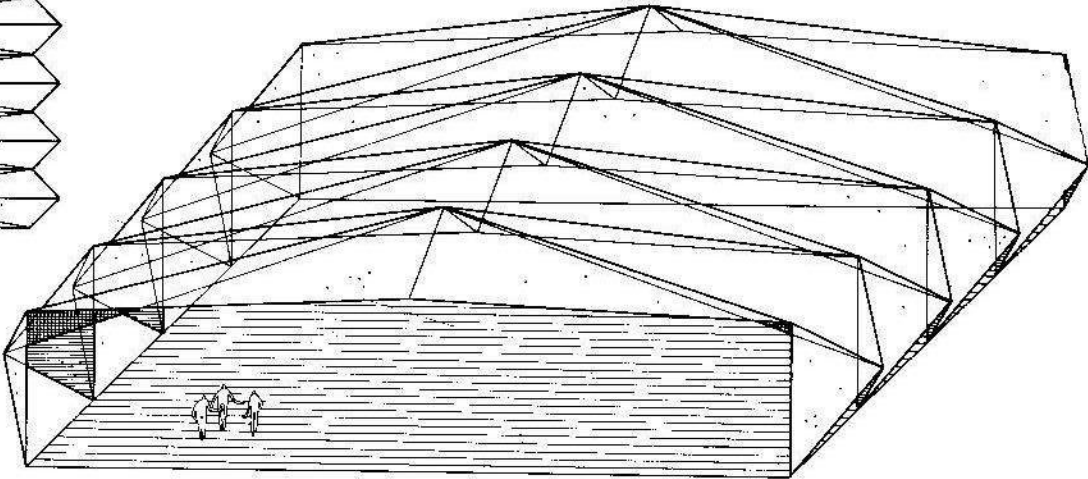
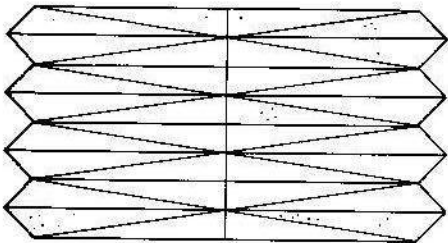
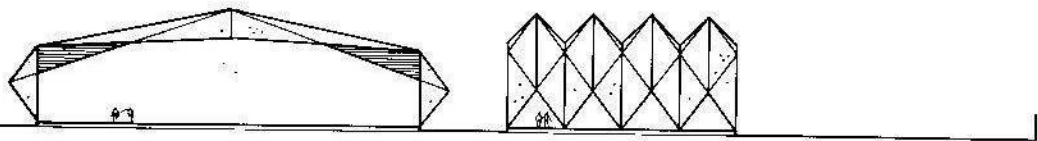


Pliegue de lima-tesa a lima-tesa.

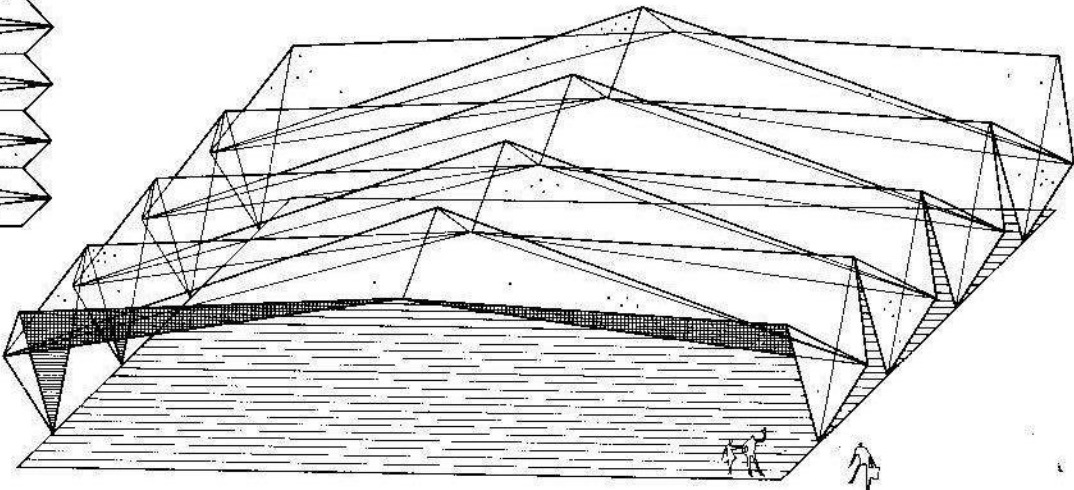
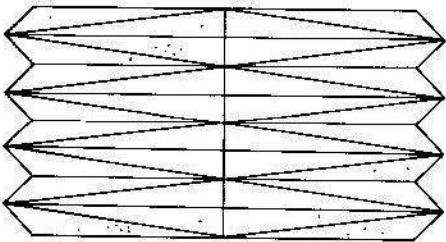
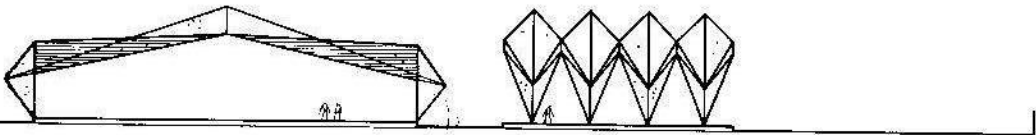


Pliegue de lima-tesa a lima-hoya.

Sistemas estructurales lineales compuestos por superficies plegadas

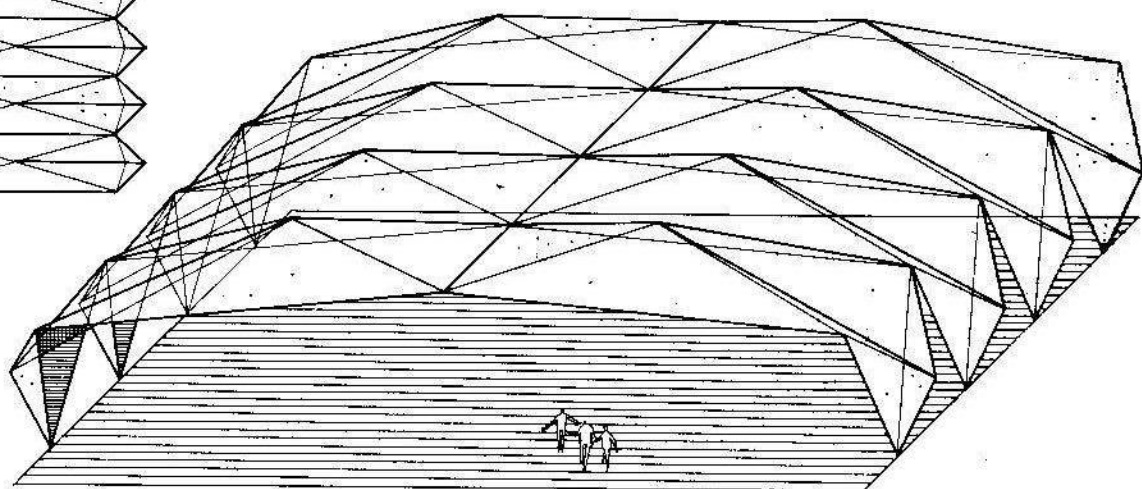
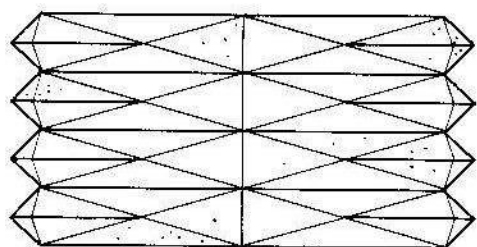
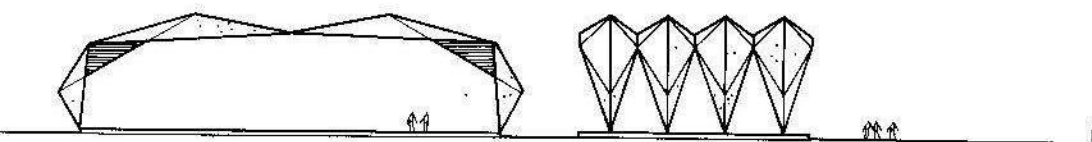


Pórtico de dos articulaciones:
pliegue de lima-tesa a lima-tesa.

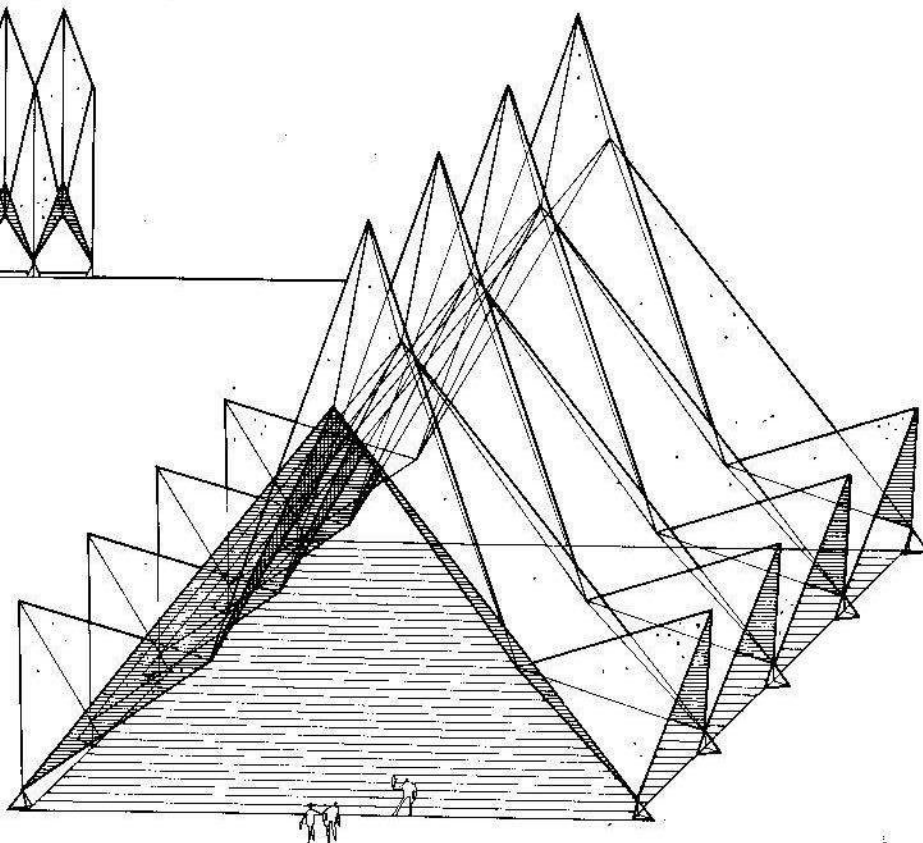
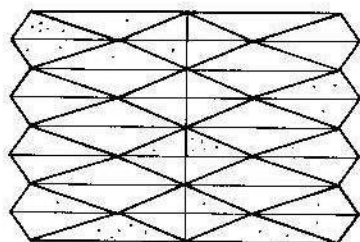
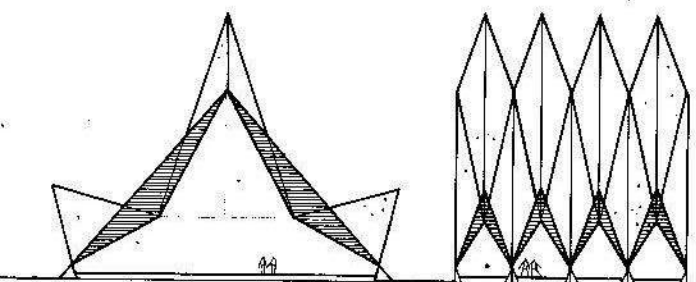


Pórtico de dos articulaciones:
pliegue de lima-tesa a lima-hoya.

Sistemas estructurales lineales compuestos por superficies plegadas

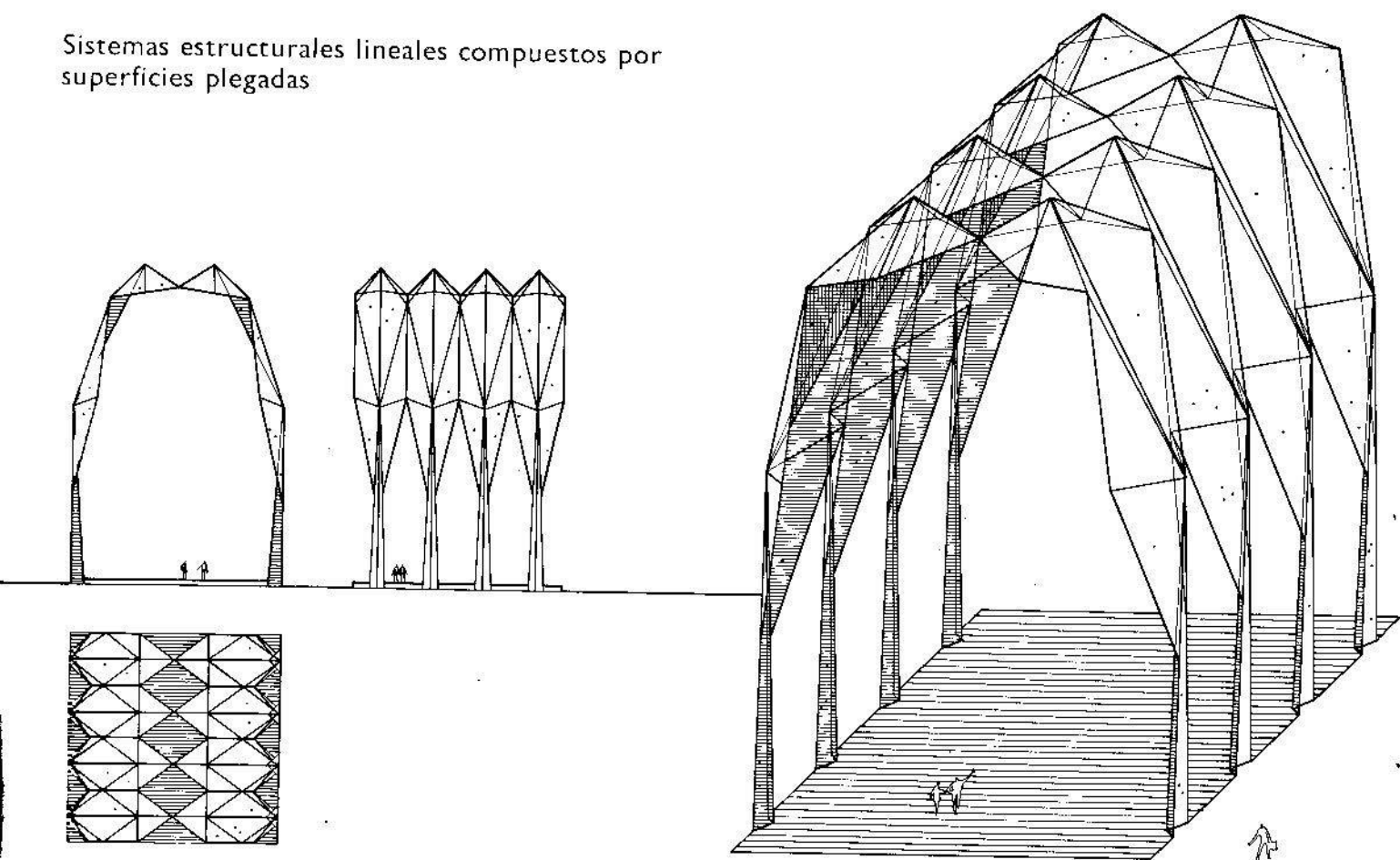


Pórtico de tres articulaciones: pliegue de cumbrera.

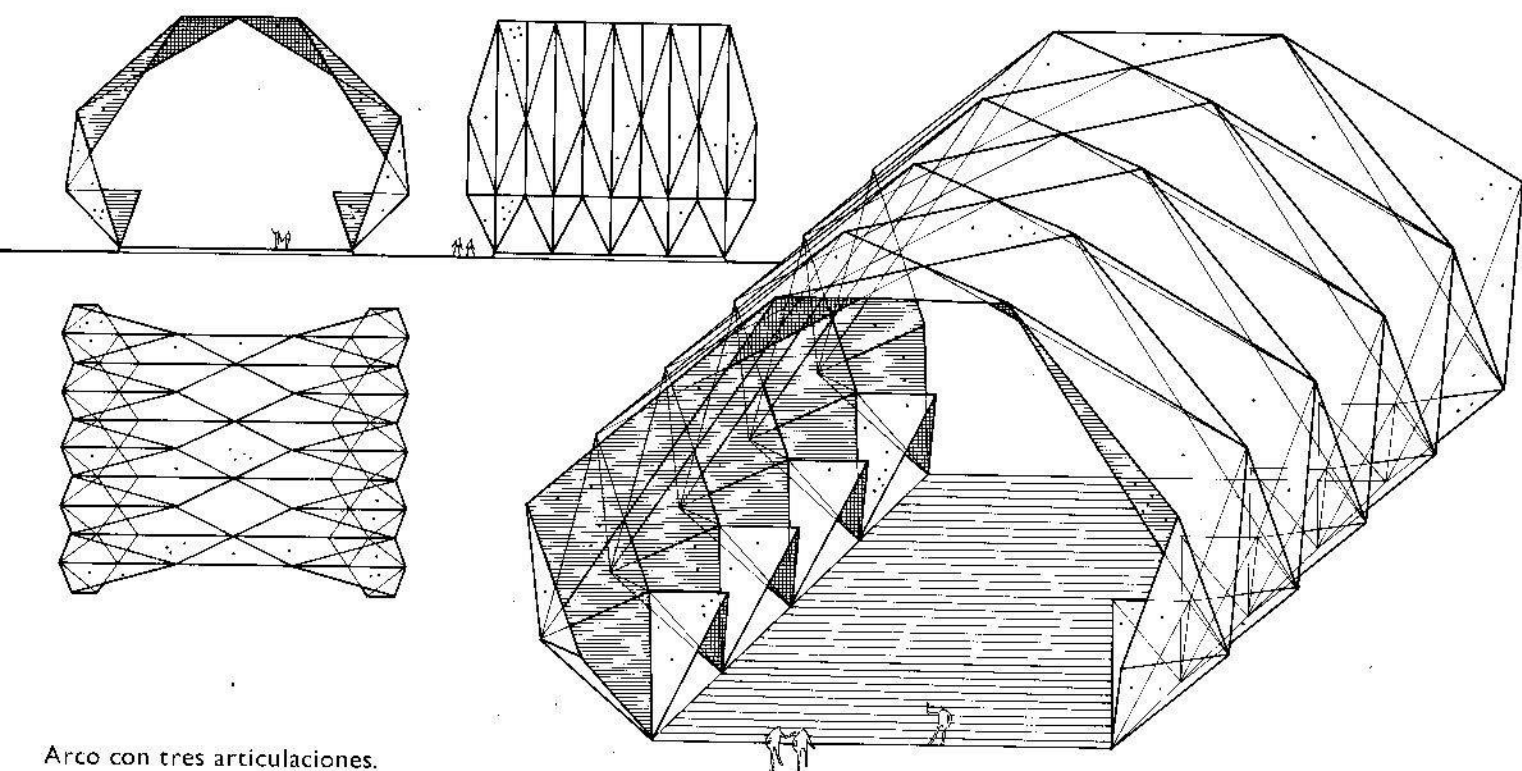


Pórtico en A de dos articulaciones: pliegue de lima-tesa a lima-hoya.

Sistemas estructurales lineales compuestos por superficies plegadas

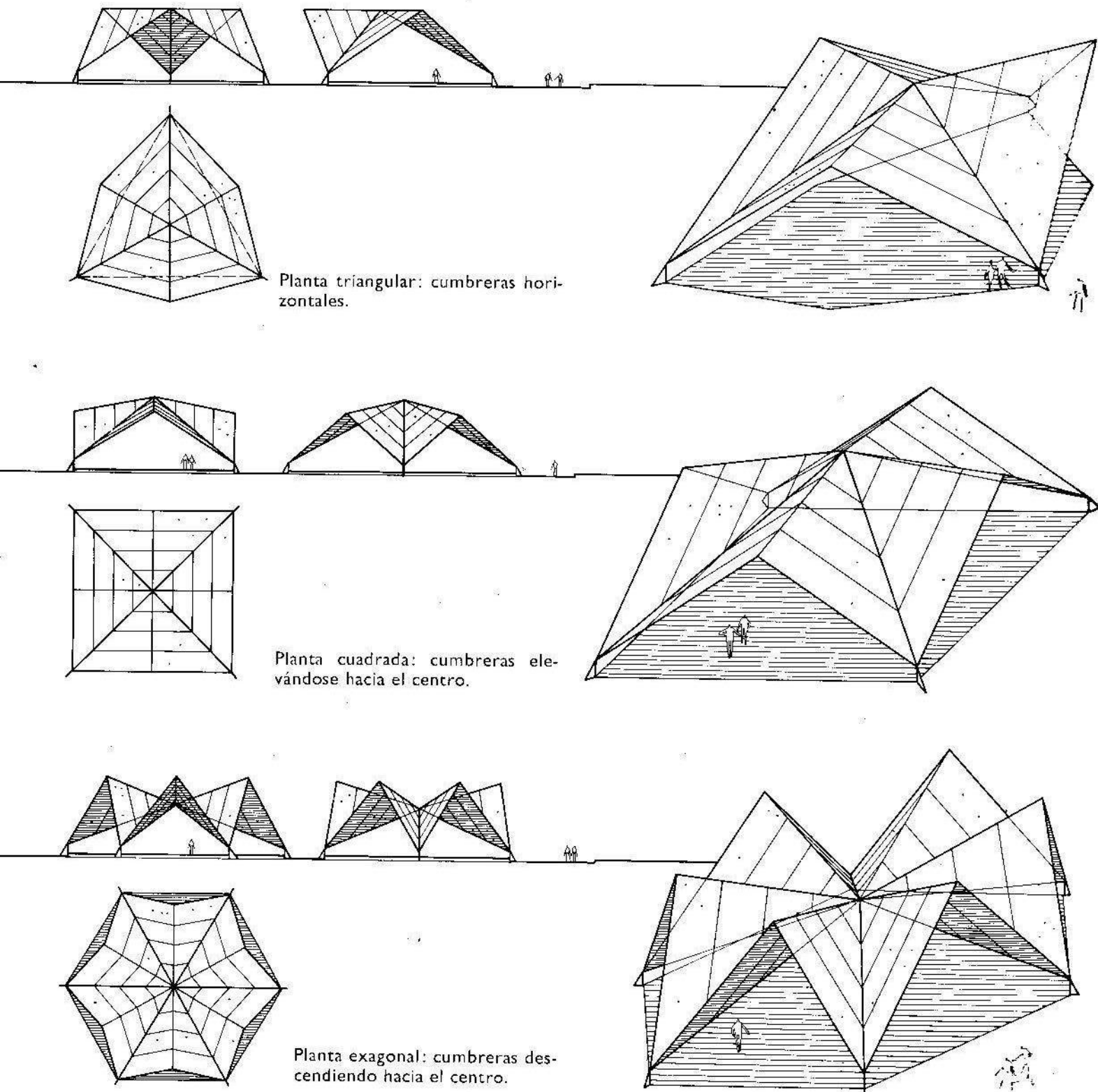


Arco con articulación en la clave.



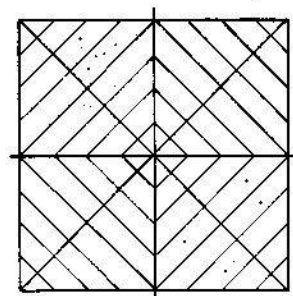
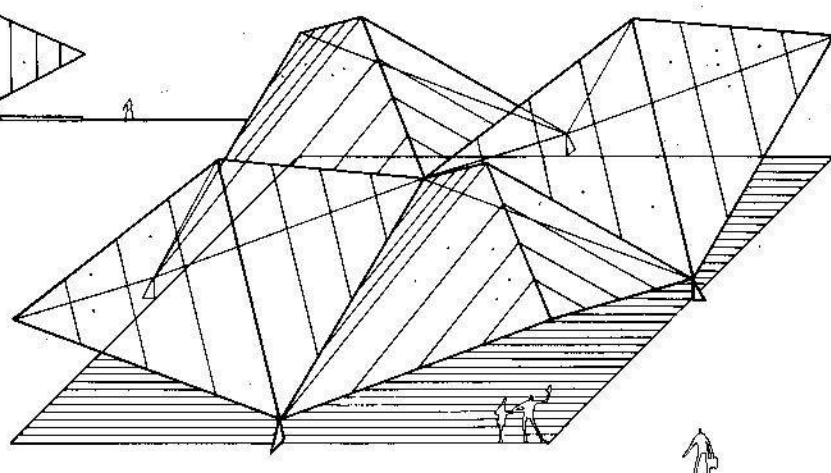
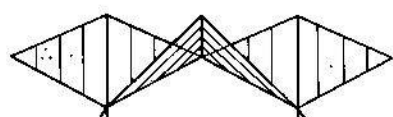
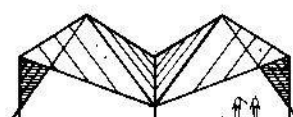
Arco con tres articulaciones.

Sistemas estructurales por interpenetración de superficies plegadas

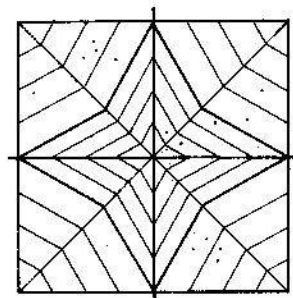
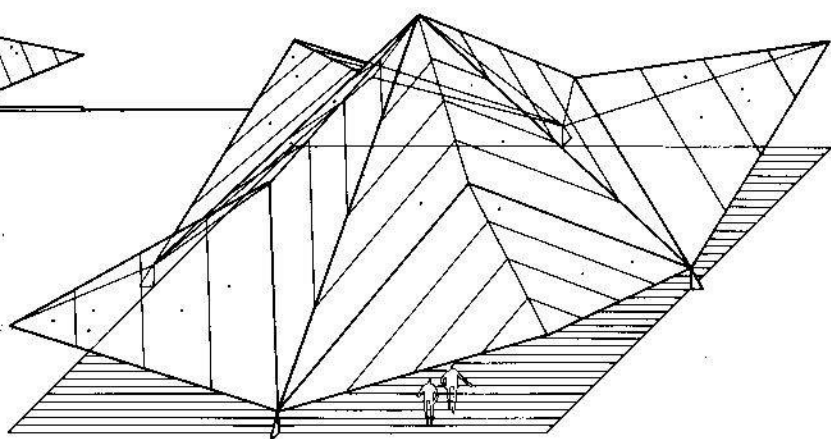
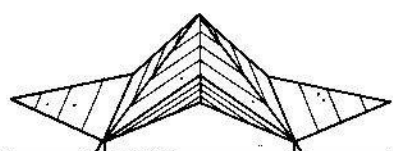
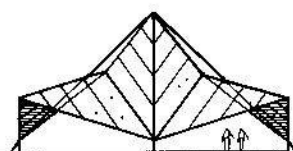


Sistemas estructurales por interpenetración de superficies plegadas

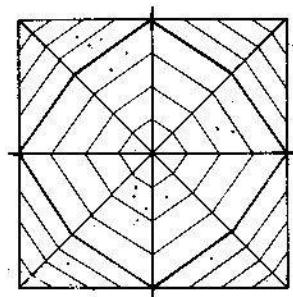
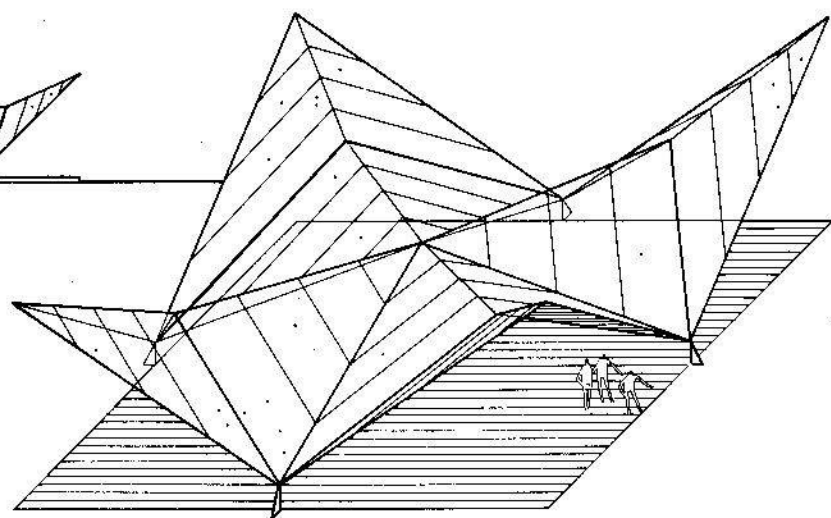
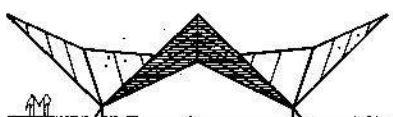
Superficies plegadas transversalmente, dispuestas diagonalmente sobre planta cuadrada.



Cumbreras plegadas hacia arriba.



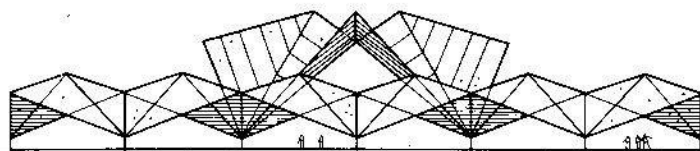
Cumbreras rampantes hacia el centro.



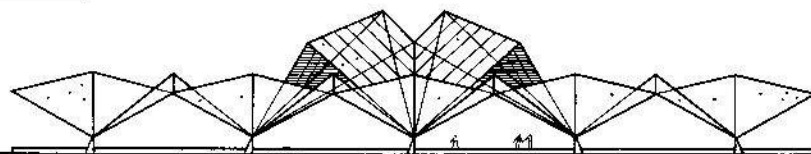
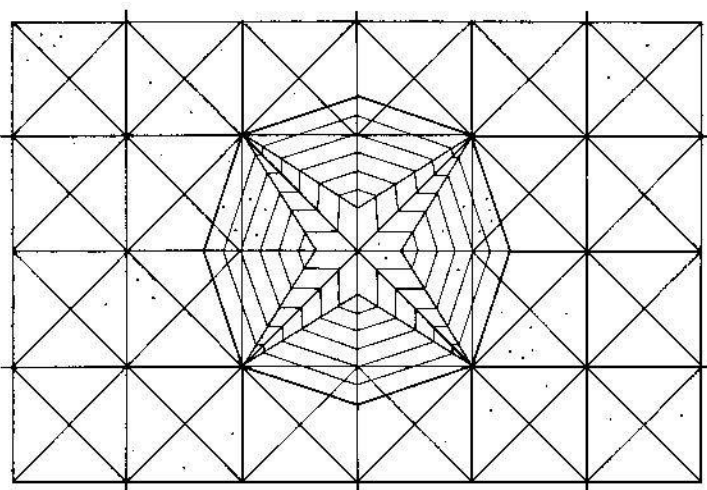
Cumbreras descendentes hacia el centro.

Sistemas estructurales mediante interpenetración de superficies plegadas

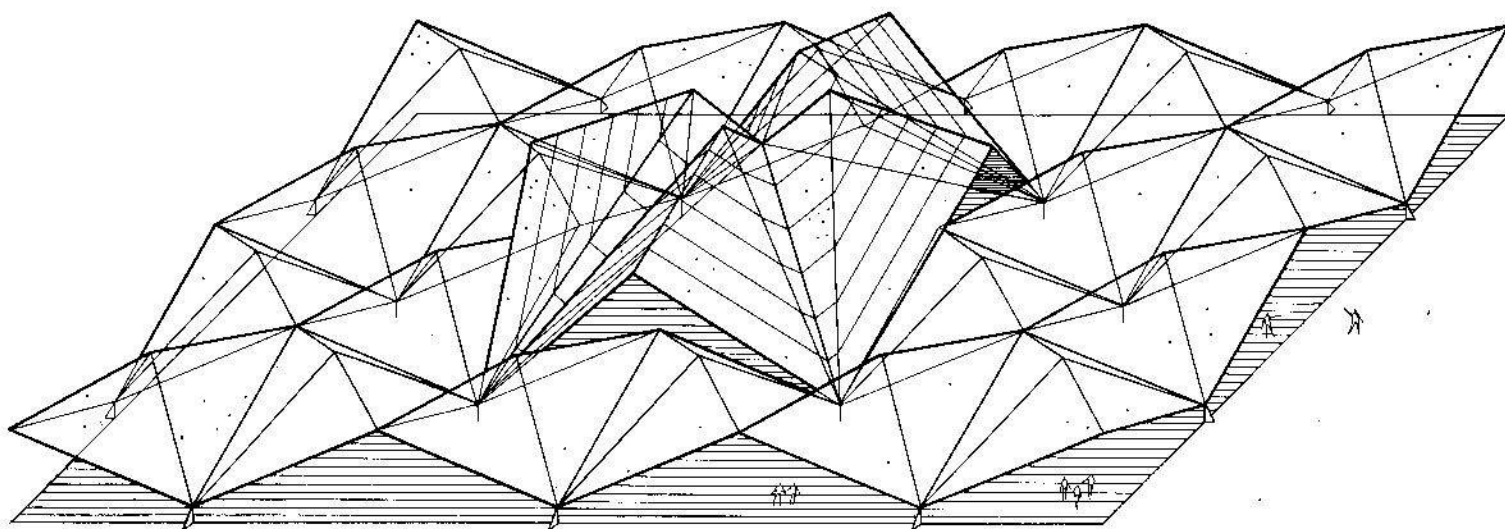
Composición de superficies plegadas en *forma de Cruz*, sobre planta cuadrada.



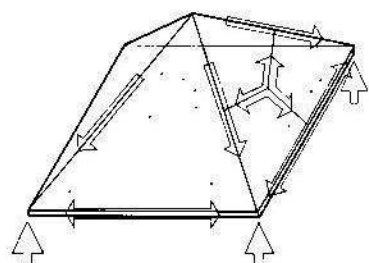
Alzado frontal.



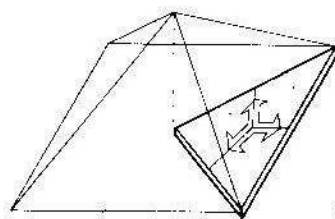
Alzado desde un ángulo de 45°.



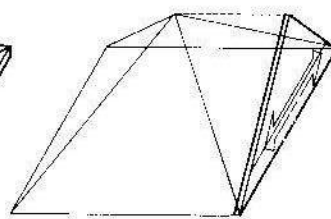
Acción triple de la placa plegada en forma pirámida:



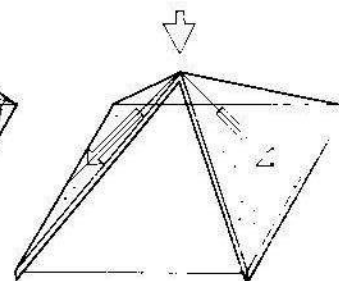
Flujo de esfuerzos simplificados.



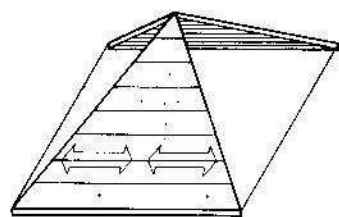
Acción de placa.



Acción de laja.

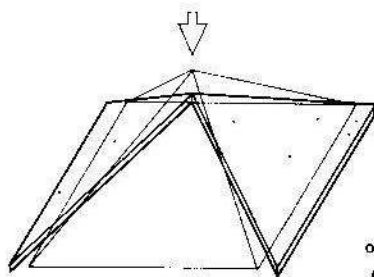


Acción de pórtico.

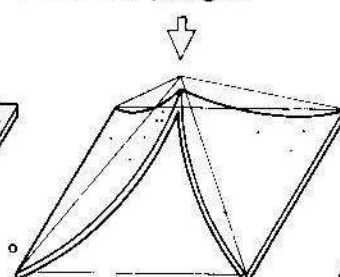


Cada par de superficies opuestas funciona como rigidizador para el otro par de superficies.

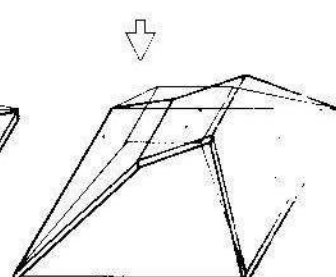
Rigidización integral contra deformaciones en perfil del pliegue



Corrimiento de los bordes inferiores.

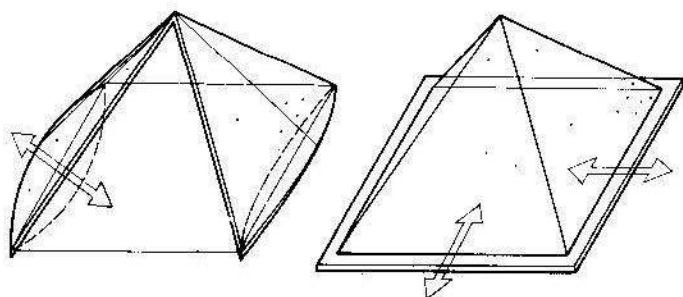


Abollamiento de faldones.



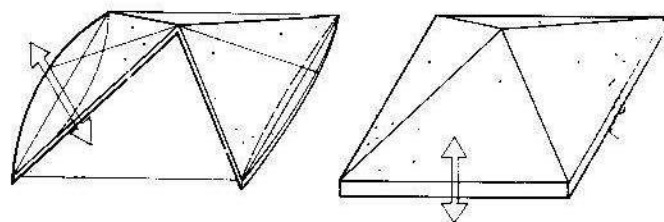
Variación del ángulo de pliegue.

Rigidización contra deformación crítica del borde libre



En superficies peraltadas, la mayor componente de la deformación es horizontal.

Rigidizador horizontal.

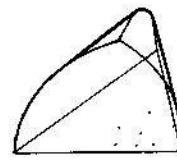
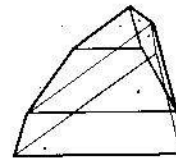
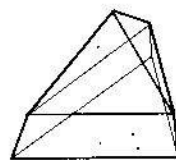
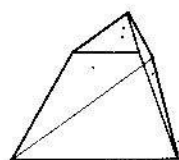
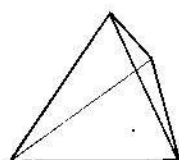
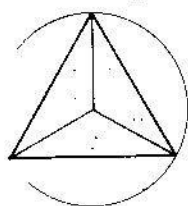


En superficies rebajadas, la mayor componente de la deformación es vertical.

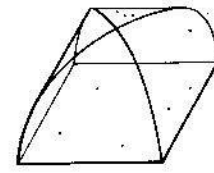
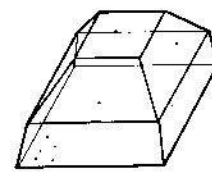
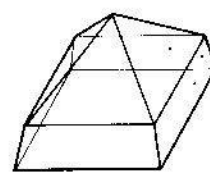
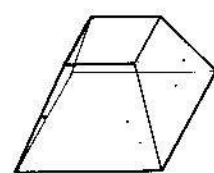
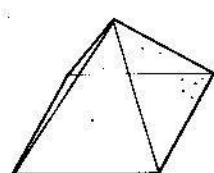
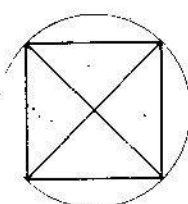
Rigidizador vertical

Superficies plegadas piramidales, sobre plantas geométricas especiales

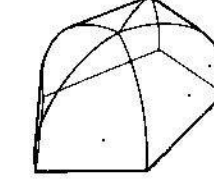
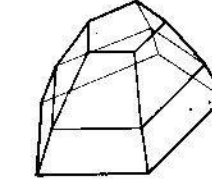
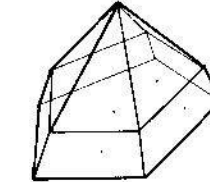
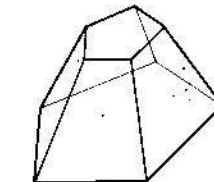
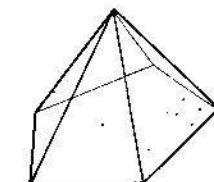
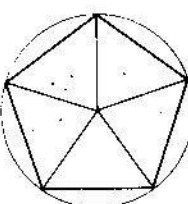
Planta triangular.



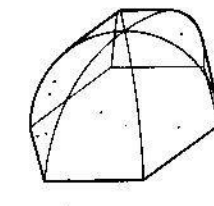
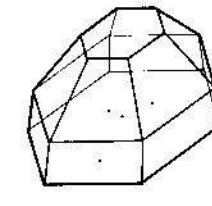
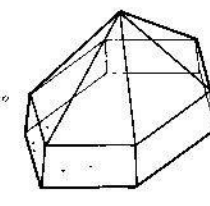
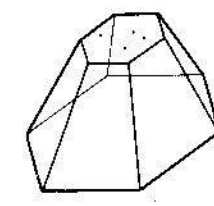
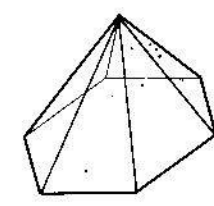
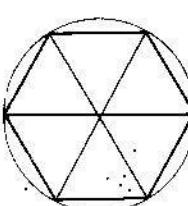
Planta cuadrada.



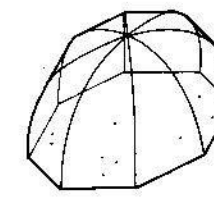
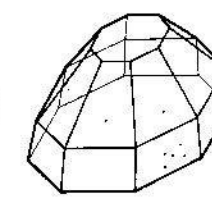
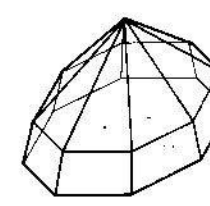
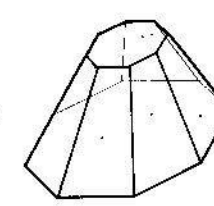
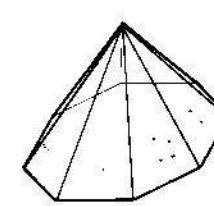
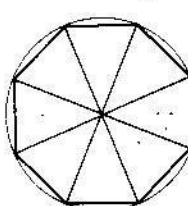
Planta pentagonal.



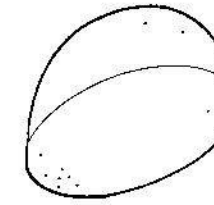
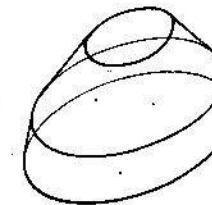
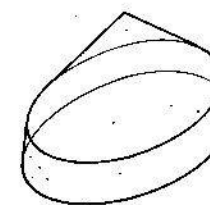
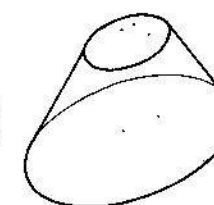
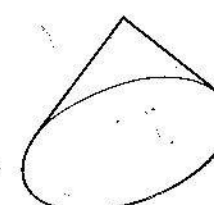
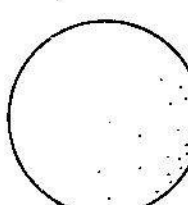
Planta hexagonal.



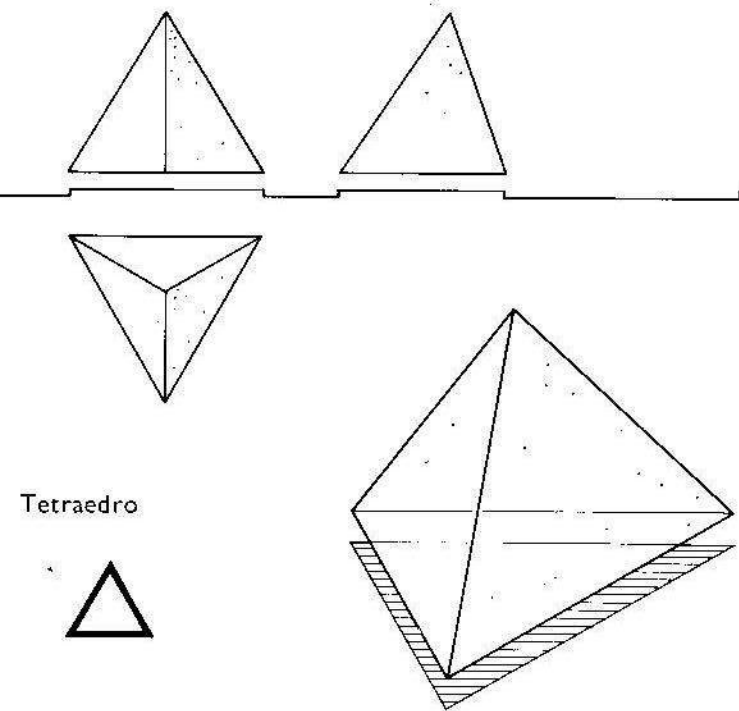
Planta octogonal.



Planta circular.

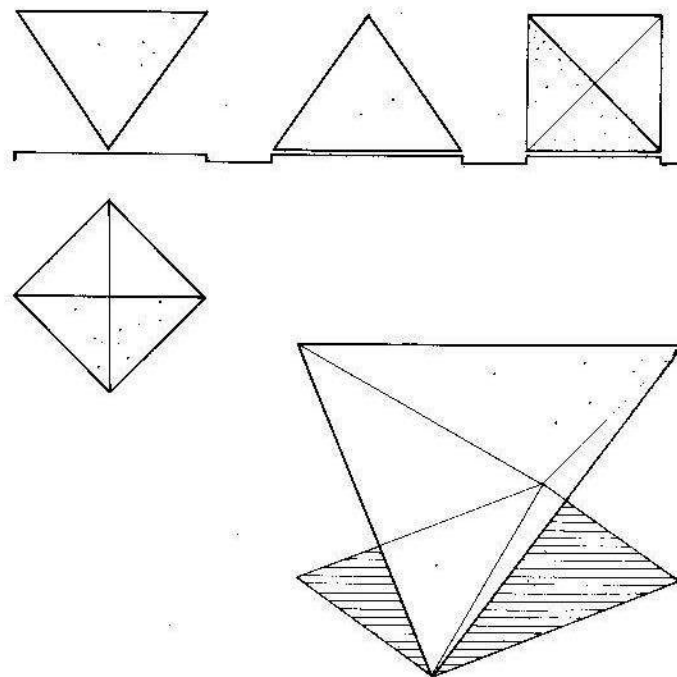


Sistemas plegados con unidades iguales: geometría de poliedros

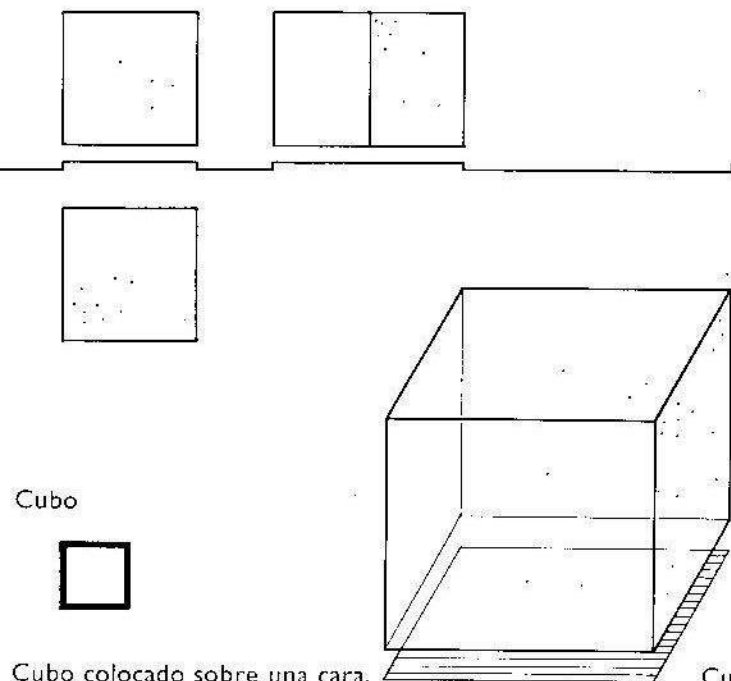


Tetraedro

Tetraedro colocado sobre una cara.

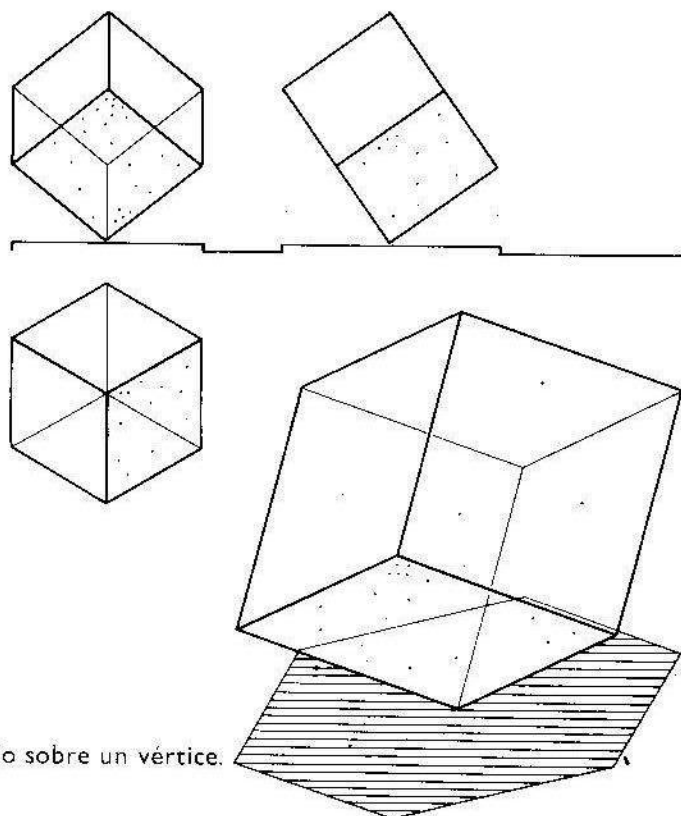


Tetraedro colocado sobre una arista.



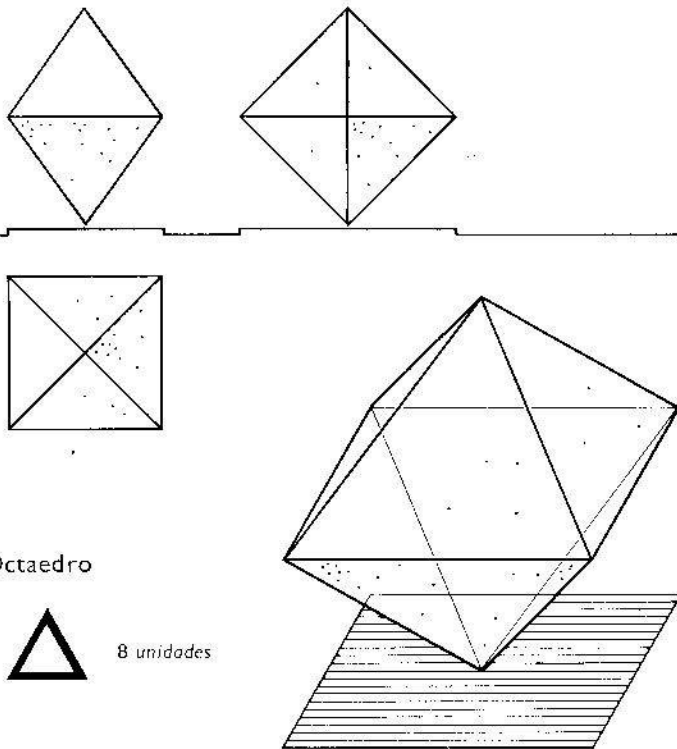
Cubo

Cubo colocado sobre una cara.

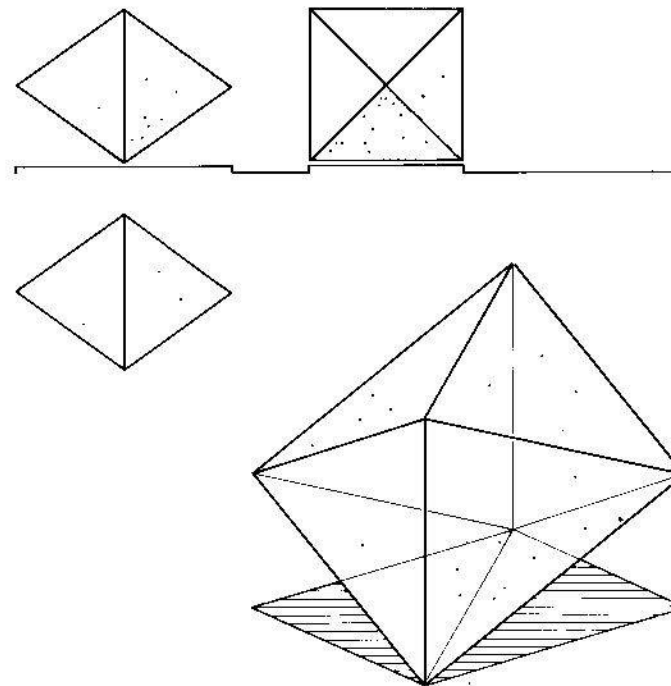


Cubo apoyado sobre un vértice.

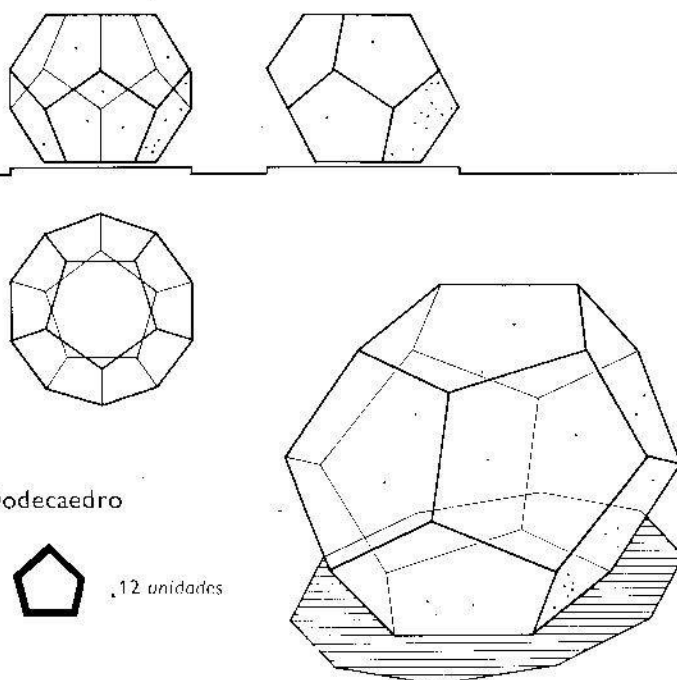
Sistemas plegados con unidades superficiales iguales:
geometría de poliedros



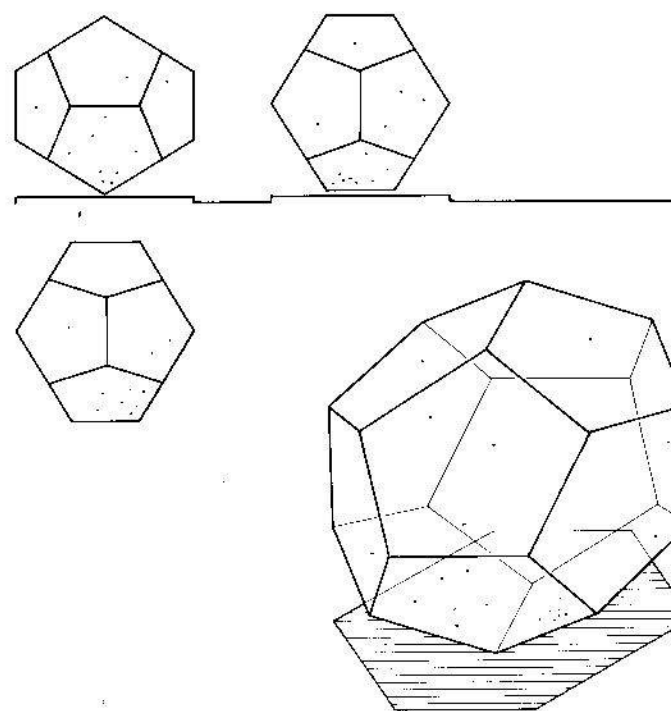
Octaedro colocado sobre un vértice.



Octaedro colocado sobre una arista.

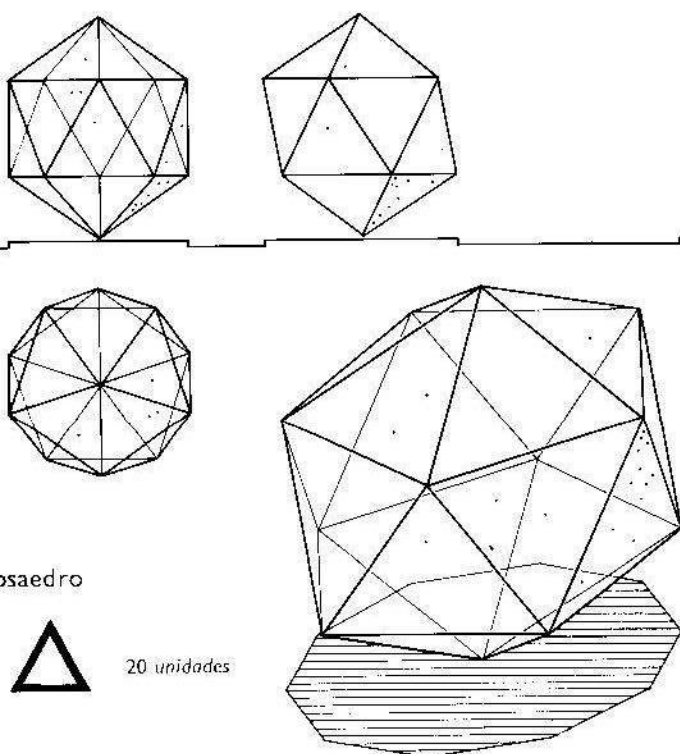


Dodecaedro colocado sobre una cara.



Dodecaedro colocado sobre una arista.

Sistemas plegados con unidades superficiales iguales:
geometría de poliedros

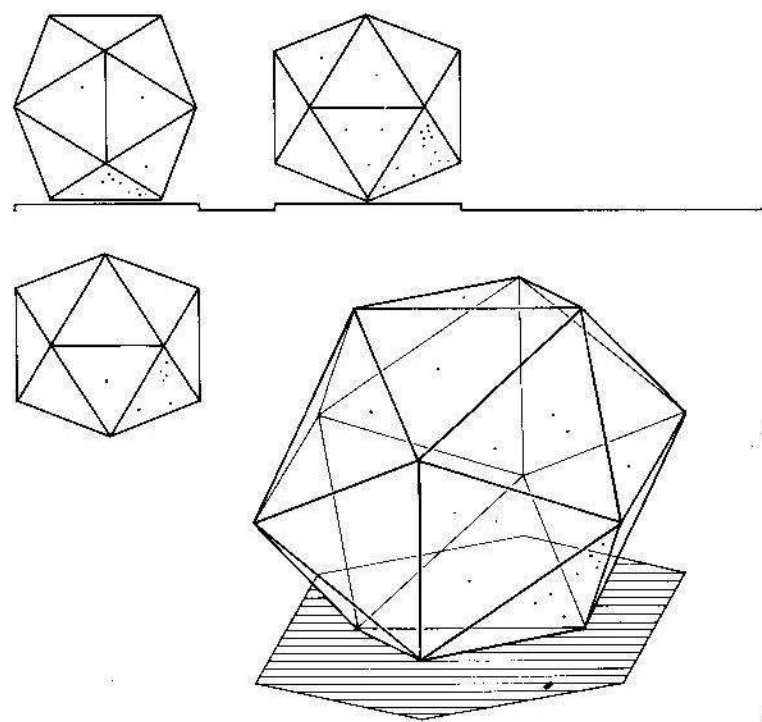


icosaedro



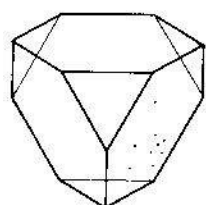
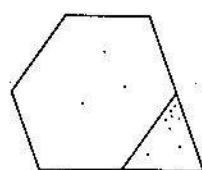
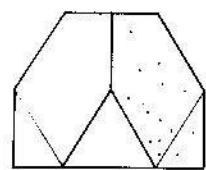
20 unidades

icosaedro apoyado en un vértice.



icosaedro colocado sobre una arista.

Sistemas plegados con unidades superficiales iguales:
geometría de poliedros



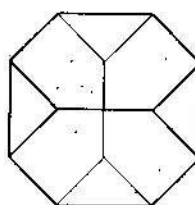
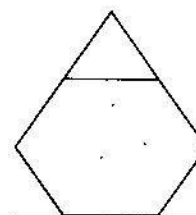
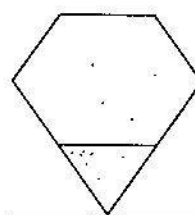
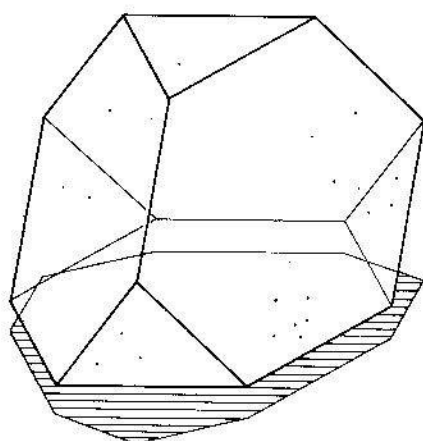
Colocado sobre
planta exagonal.



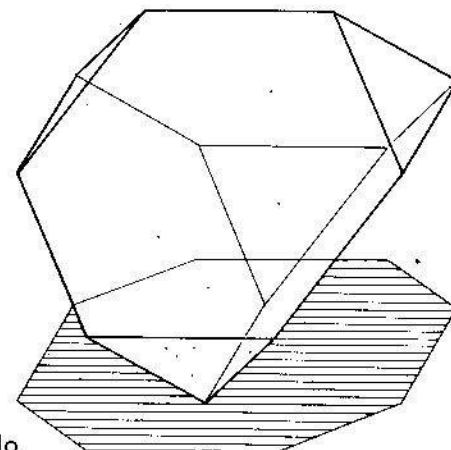
4 unidades



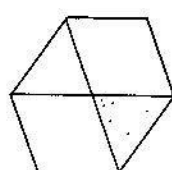
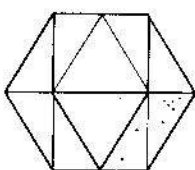
4 unidades



Colocado sobre
una arista.



Tetraedro truncado.



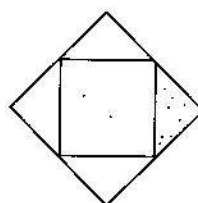
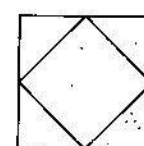
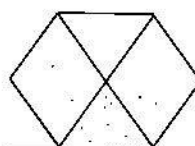
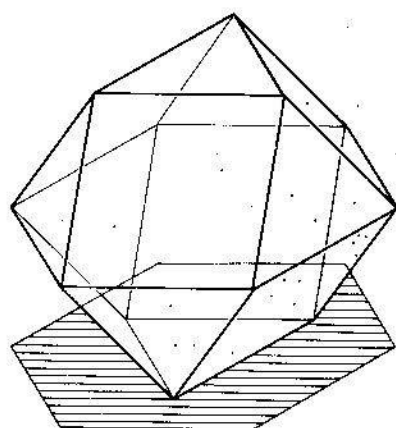
Colocado sobre
cara triangular.



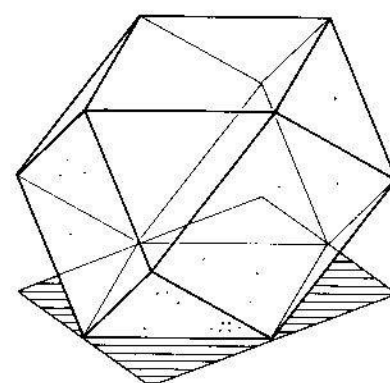
8 unidades



6 unidades

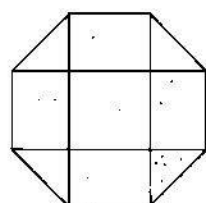
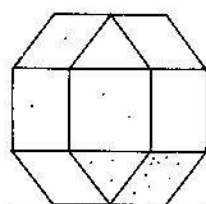
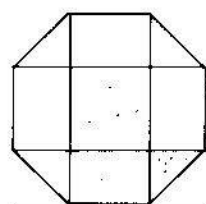


Colocado sobre
cara cuadrada.



Cubo-octaedro.

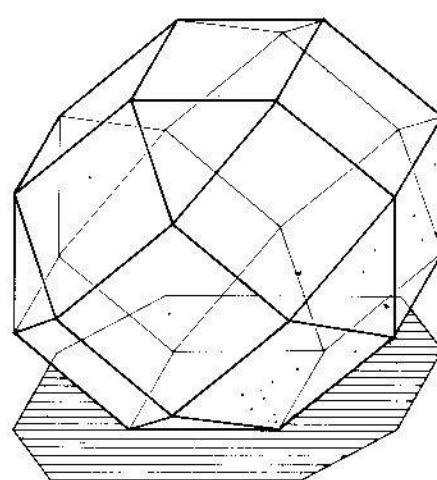
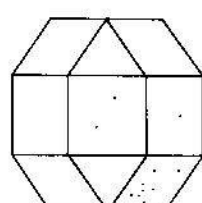
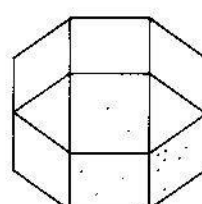
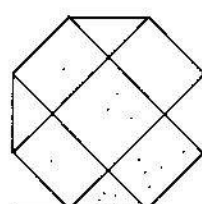
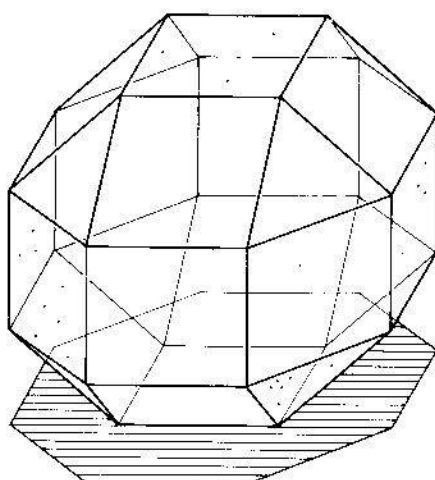
Sistemas plegados con unidades superficiales iguales:
geometría de poliedros



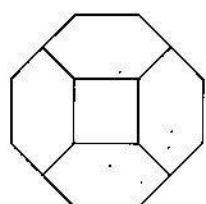
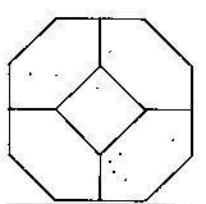
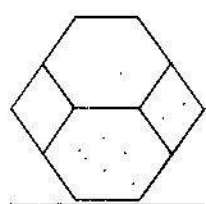
8 unidades



18 unidades



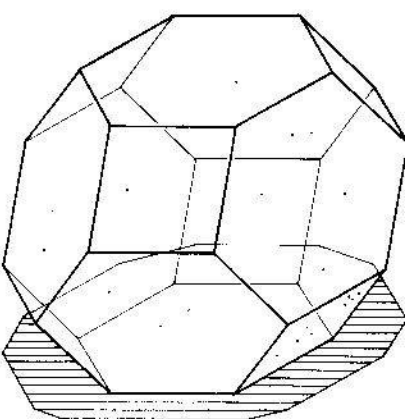
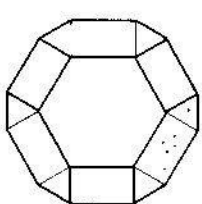
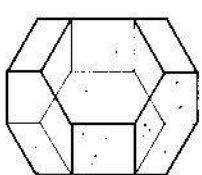
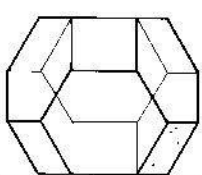
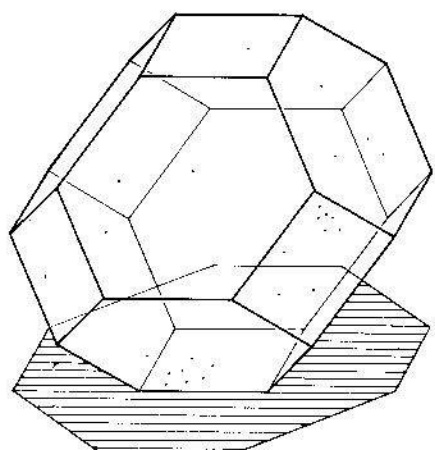
Rombicuboctaedro.



6 unidades

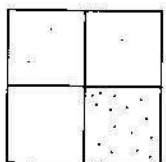
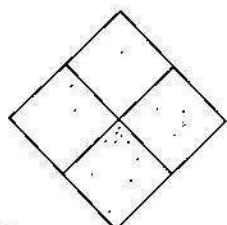
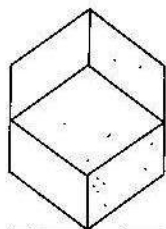


8 unidades



Troncooctaedro.

Sistemas plegados con unidades superficiales iguales: geometría de poliedros

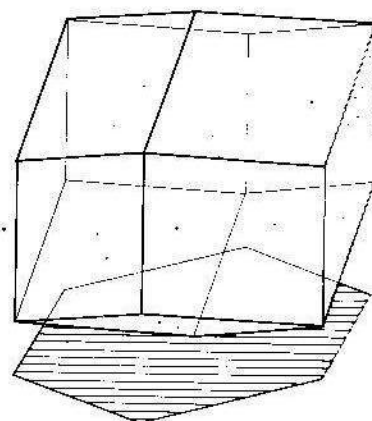
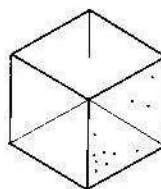
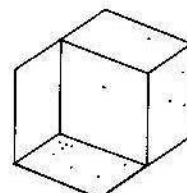
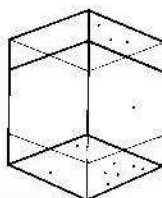
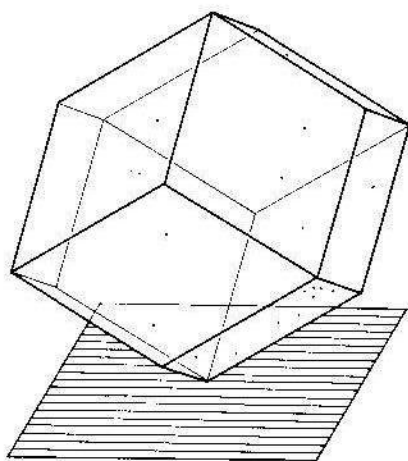


Rombododecaedro.

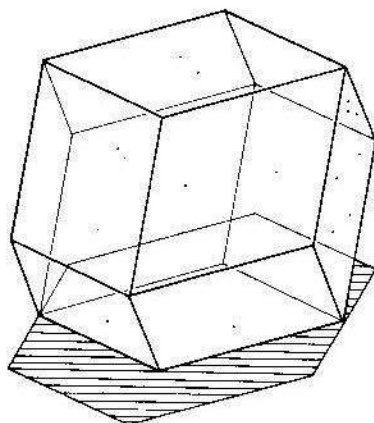
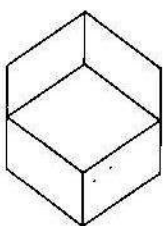
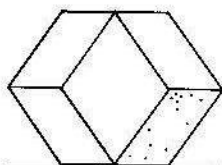
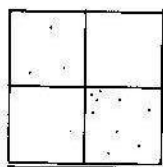


12 unidades

Sobre planta cuadrada.

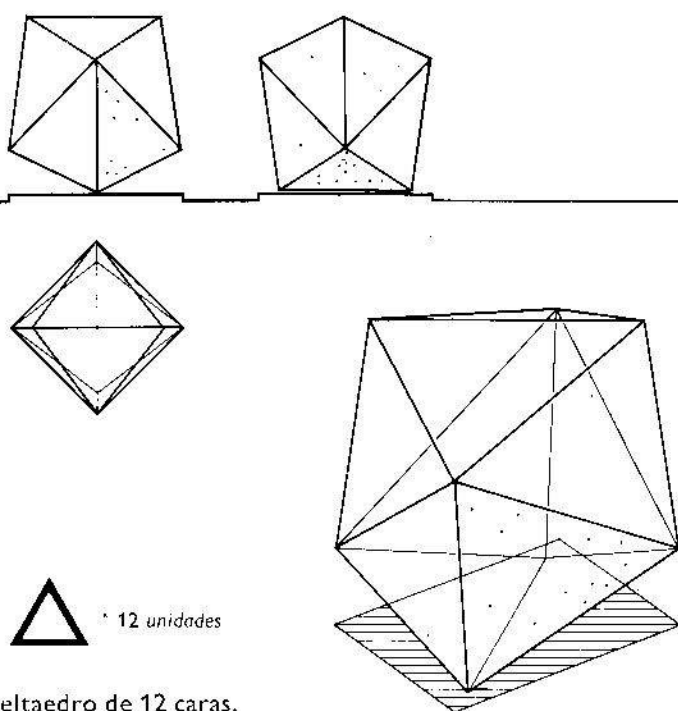
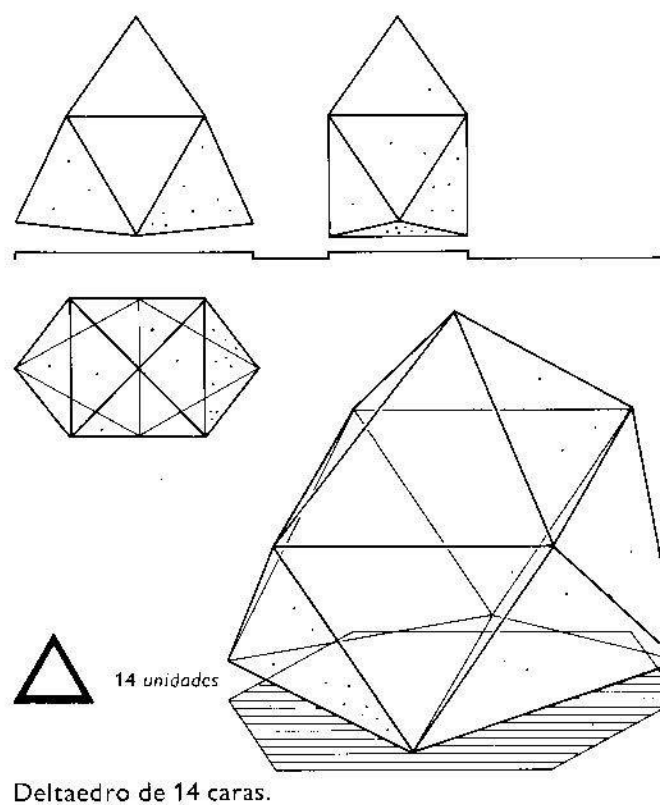
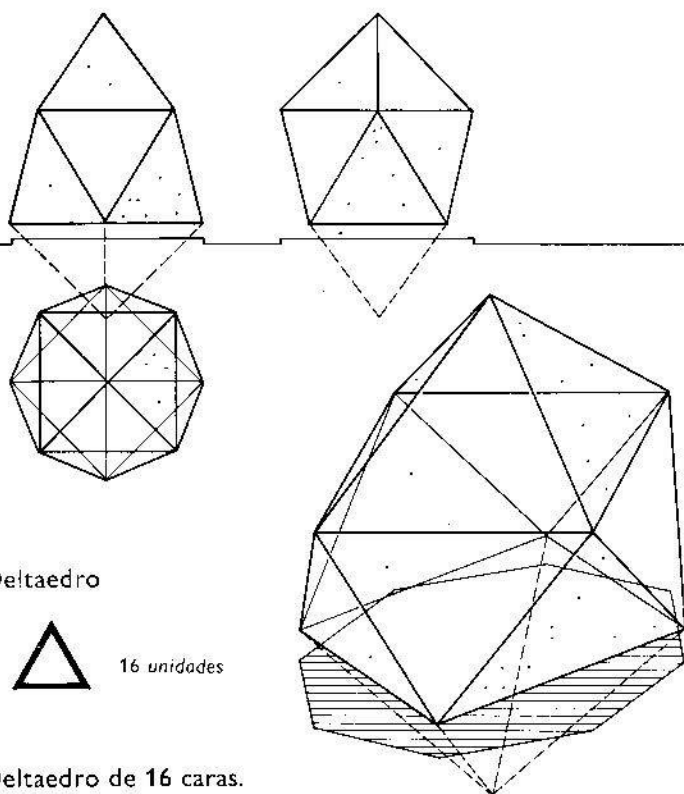


Sobre planta hexagonal.

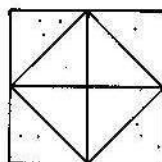
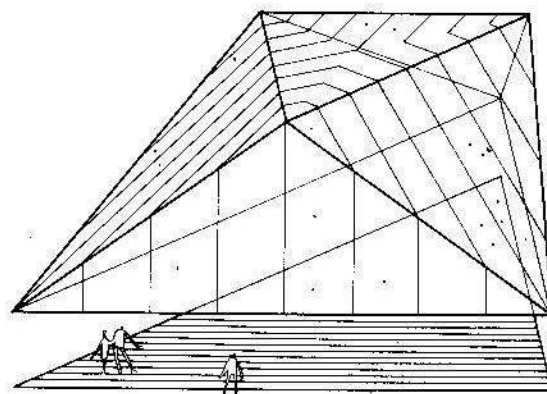
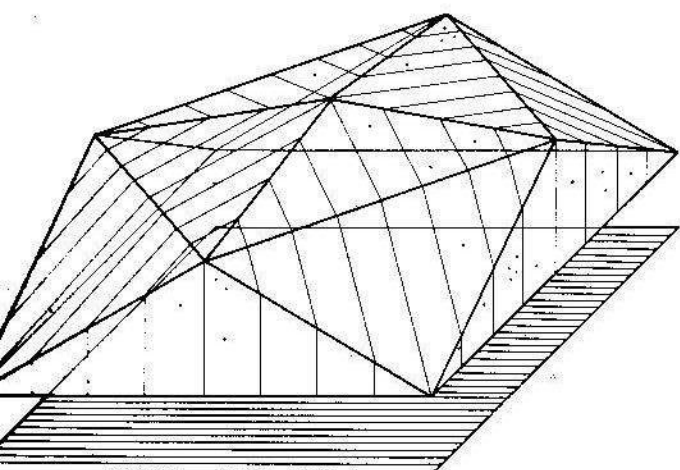


Apoyados sobre una cara.

Sistemas plegados con superficies planas iguales:
geometría de poliedros

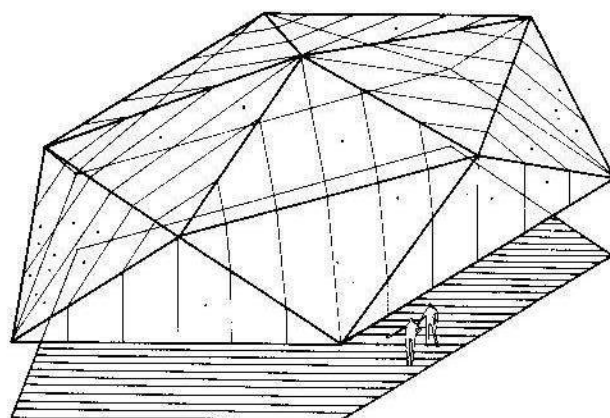
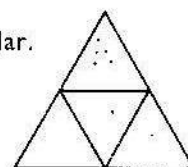


Sistemas estructurales de superficies plegadas triangulares

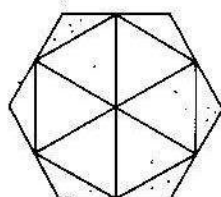


Planta cuadrada.

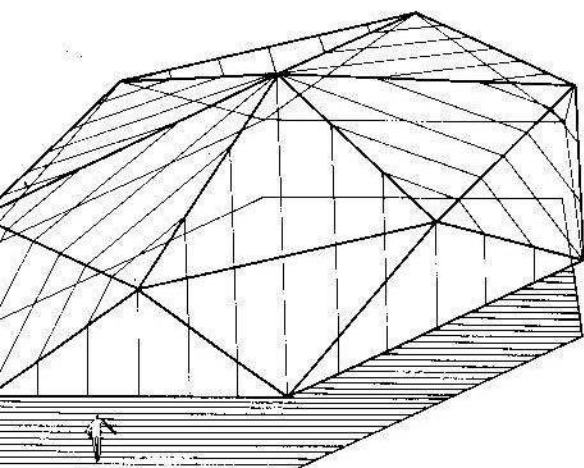
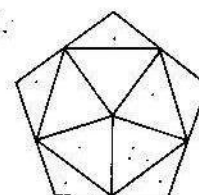
Planta triangular.



Planta pentagonal.



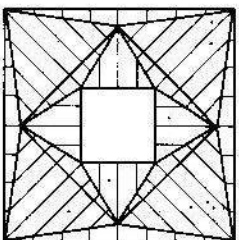
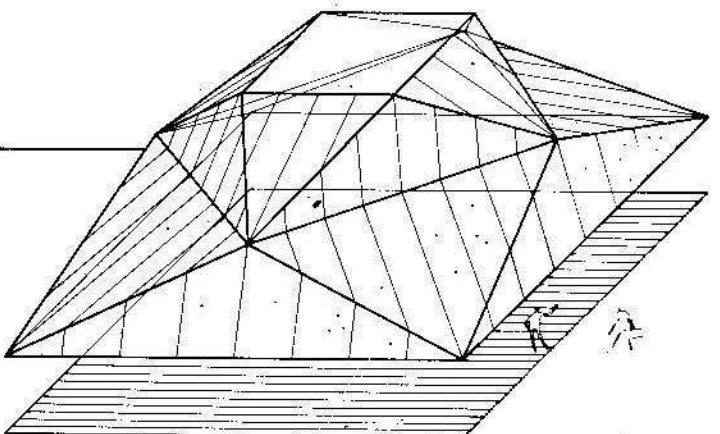
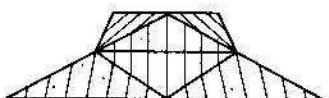
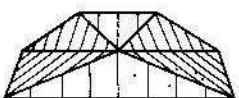
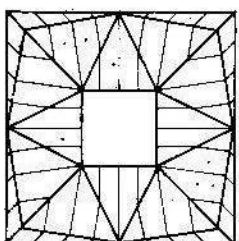
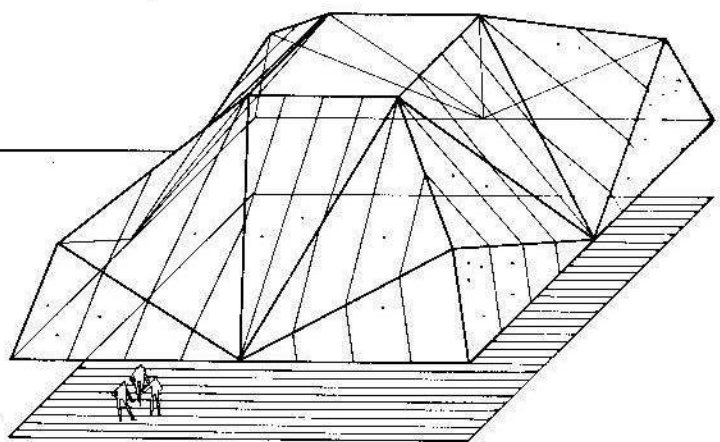
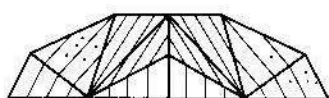
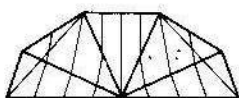
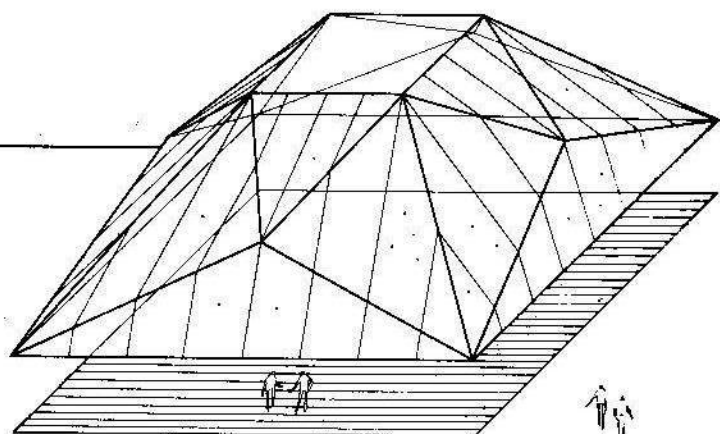
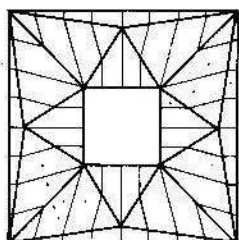
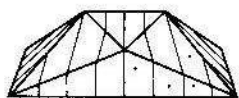
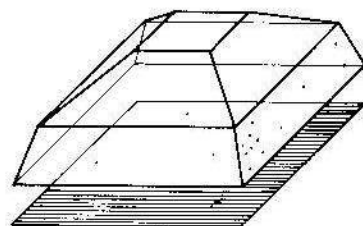
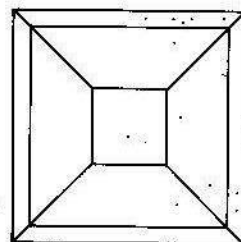
Planta hexagonal.



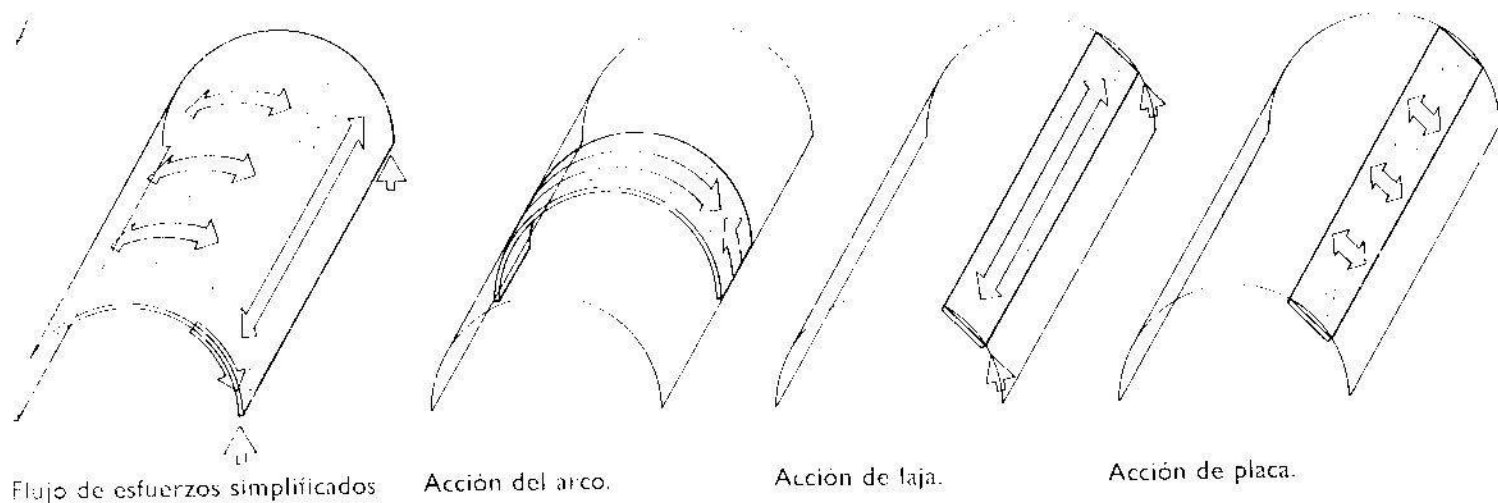
Variaciones para plegado de una forma estructural dada

Forma estructural básica.

Pirámide truncada doblemente plegada.

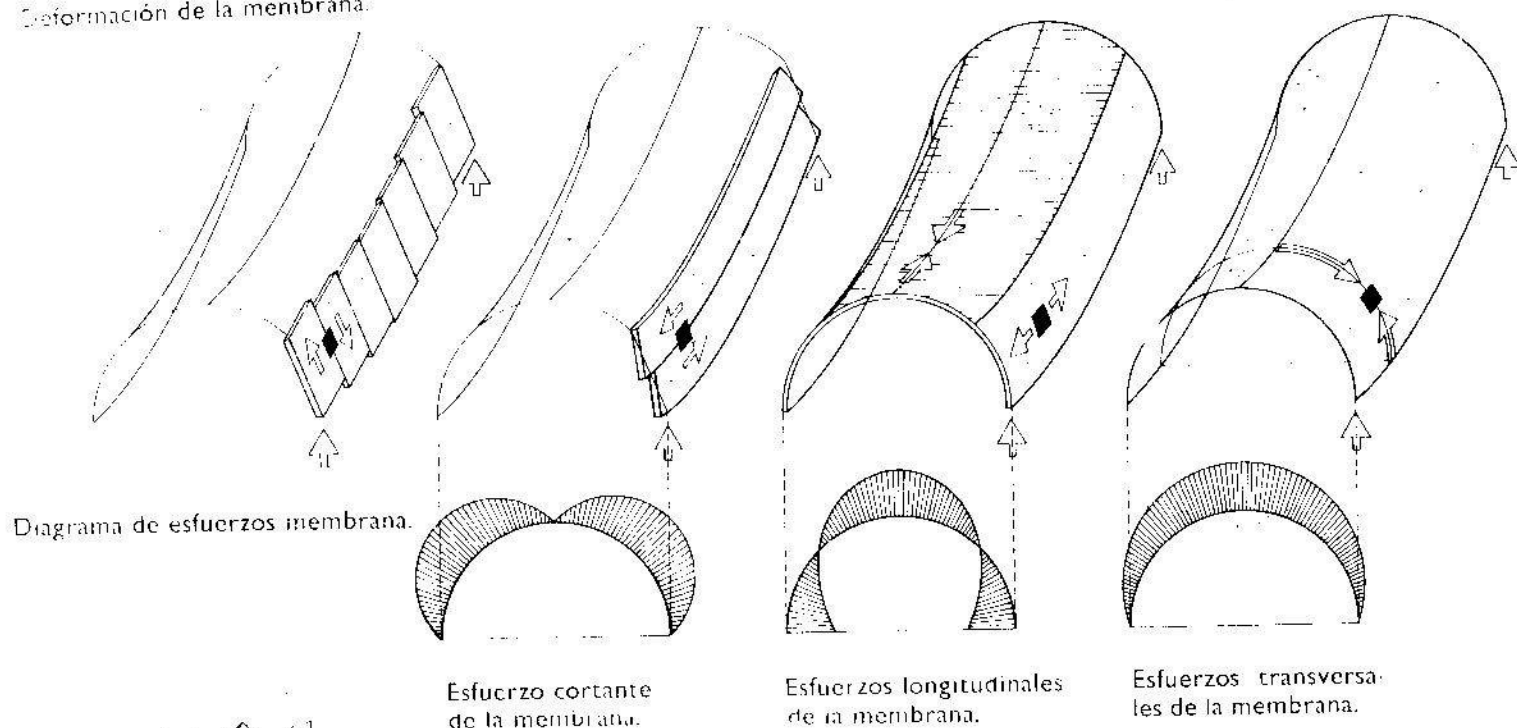


Triple acción resistente de la lámina de simple curvatura



Mecanismo resistente de la lámina de simple curvatura. Esfuerzos de membrana

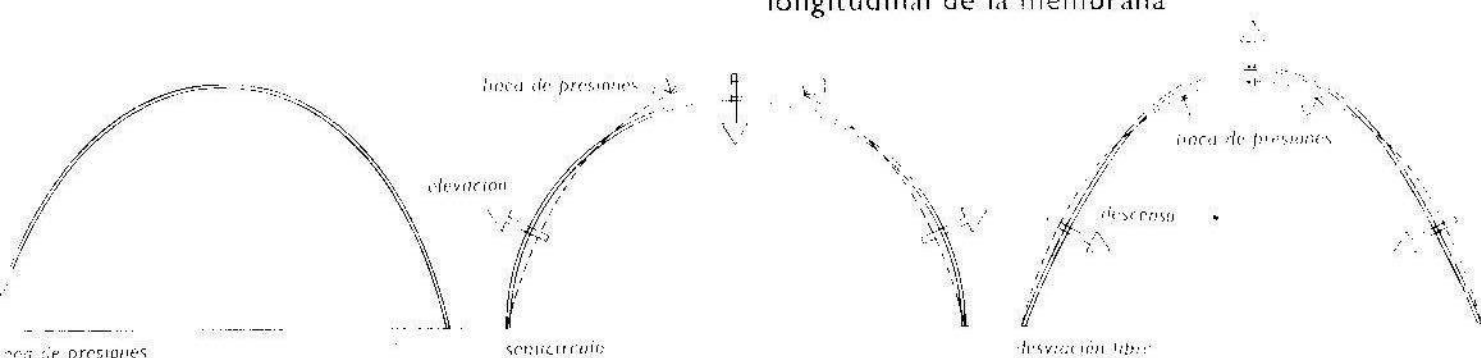
Deformación de la membrana.



Como si se tratase de elementos de forjado entre arcos rígidos, los elementos superficiales resisten las cargas hasta que se han

engendrado suficientes esfuerzos normales y cortantes para transmitirlos a los apoyos extremos.

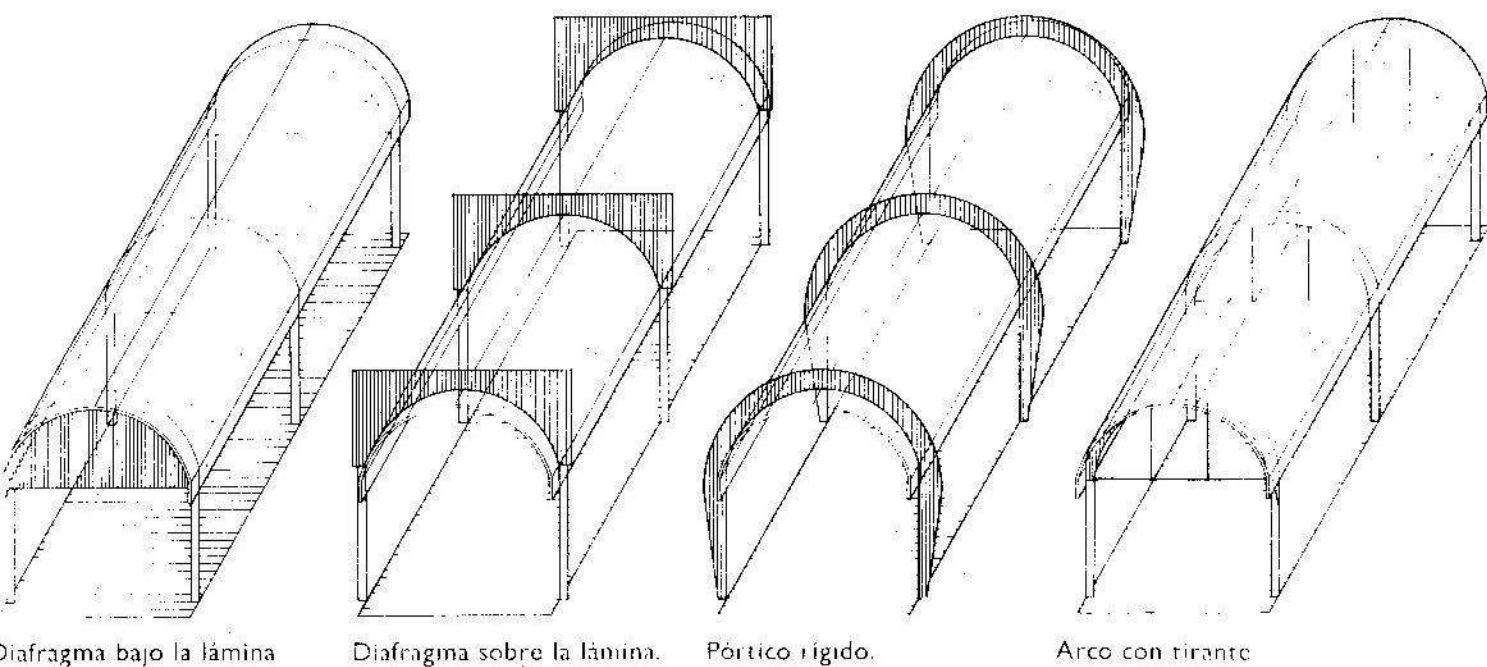
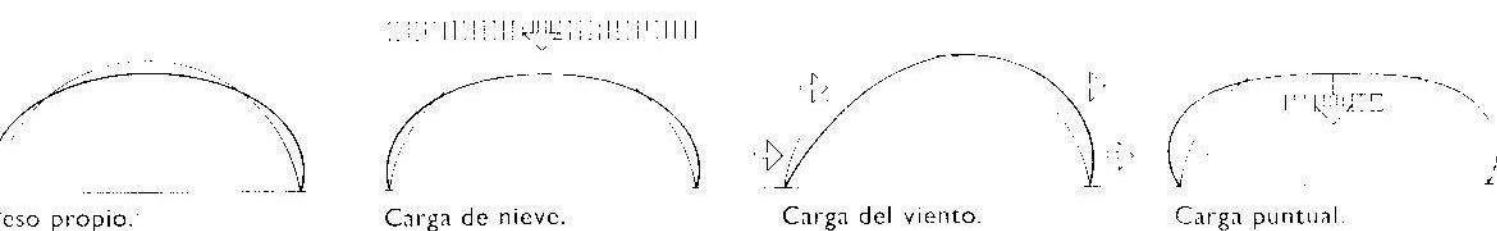
Influencia de la curvatura transversal sobre la acción longitudinal de la membrana

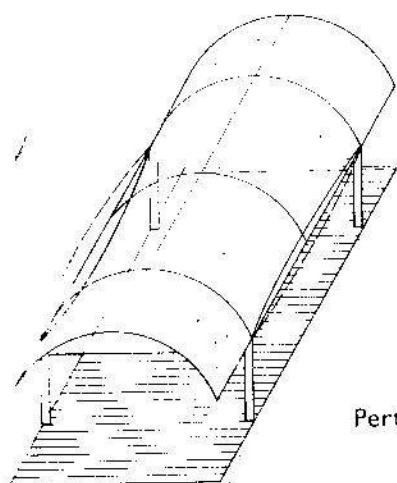


la curvatura transversal sigue la línea de presiones, todo el peso propio es conducido al borde de la lámina, y la capacidad resistente longitudinal de la membrana no entra en acción (esfuerzos cortantes y longitudinales = 0). Solamente el

giendo una curva que se desvía del antifunicular se cargará la membrana longitudinalmente. La magnitud dependerá del grado de desviación.

Rigidización contra deformaciones críticas del perfil. Formas típicas de rigidizadores



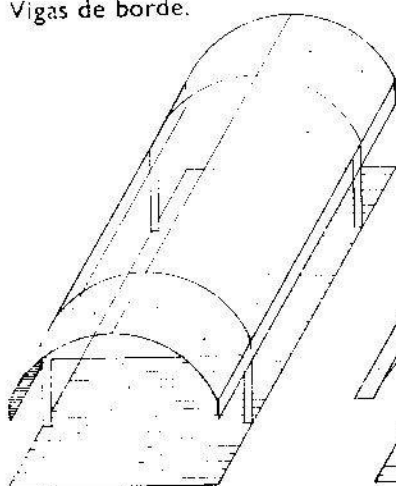


Perturbaciones de borde.

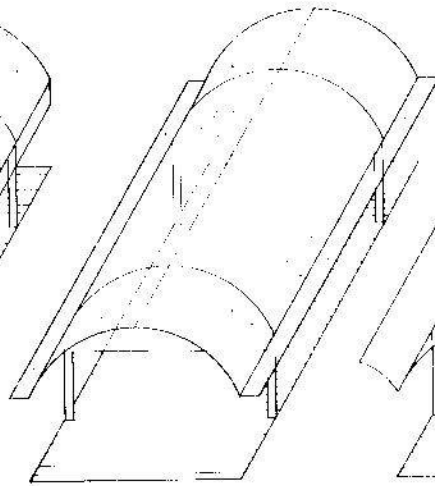
Rigidización longitudinal del borde libre de la lámina. Formas típicas de rigidizadores de borde

Si la tangente final no es vertical, existirá una componente de la reacción normal a la superficie que provocará una flexión del borde. Mediante una rigidización longitudinal del borde aquella componente puede ser resistida, pero debido a la diferencia de rigideces entre la lámina y la viga de borde, se presentarán perturbaciones de borde con momentos flectores.

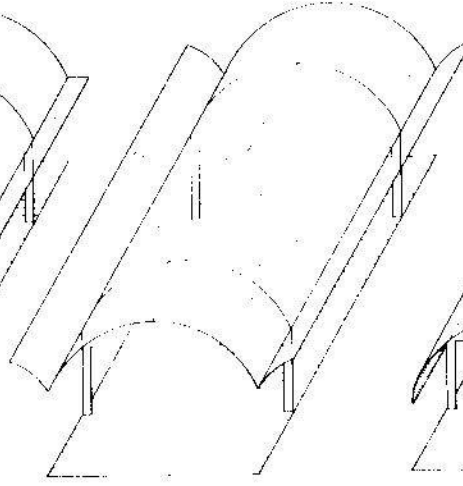
Vigas de borde.



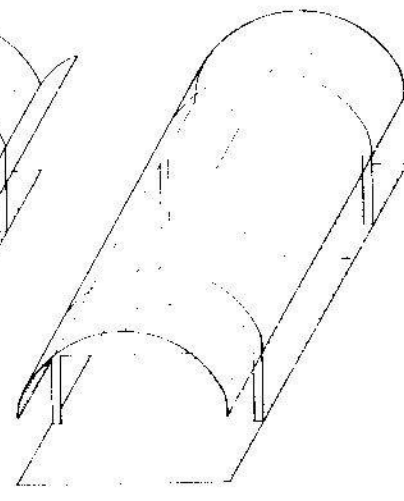
Viga de borde vertical.



Viga de borde horizontal.



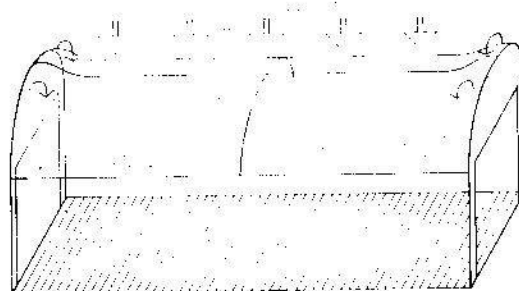
Láminas contiguas.



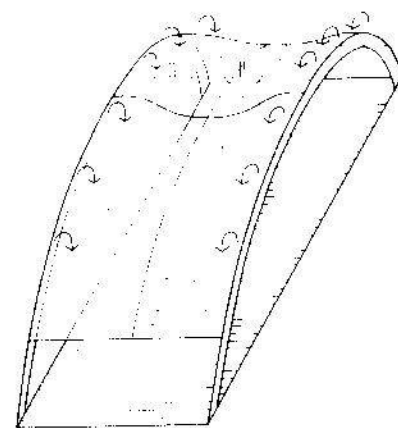
Curva de transición para rigidización de borde vertical.

Perturbaciones originadas por el rigidizador transversal, en láminas cilíndricas largas y cortas

Los esfuerzos tipo arco (compresiones) originan un acortamiento de las transversales y, como consecuencia, un descenso de la clave. En las proximidades de los rigidizadores no se puede producir aquel descenso y, por tanto, se origina una flexión longitudinal. En las láminas cilíndricas largas estas perturbaciones quedan limitadas a zonas de pequeña longitud próximas a los bordes extremos; en las láminas cortas, como consecuencia de su mayor radio y de la menor distancia entre rigidizadores, dichas perturbaciones se extienden sobre una mayor porción relativa a la superficie.



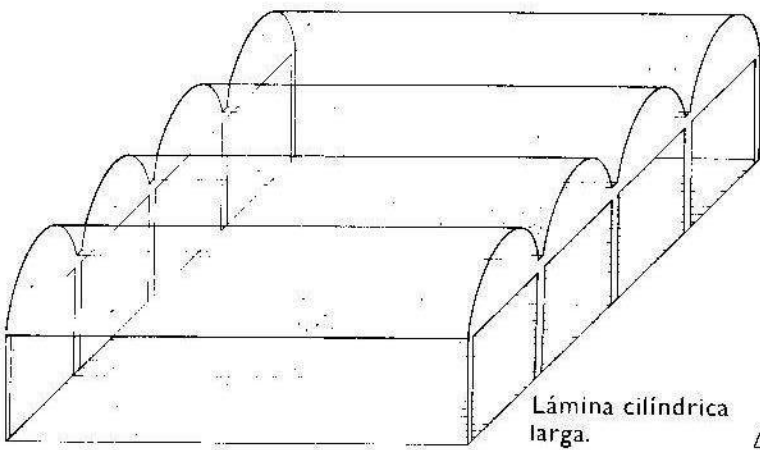
Lamina cilíndrica larga.



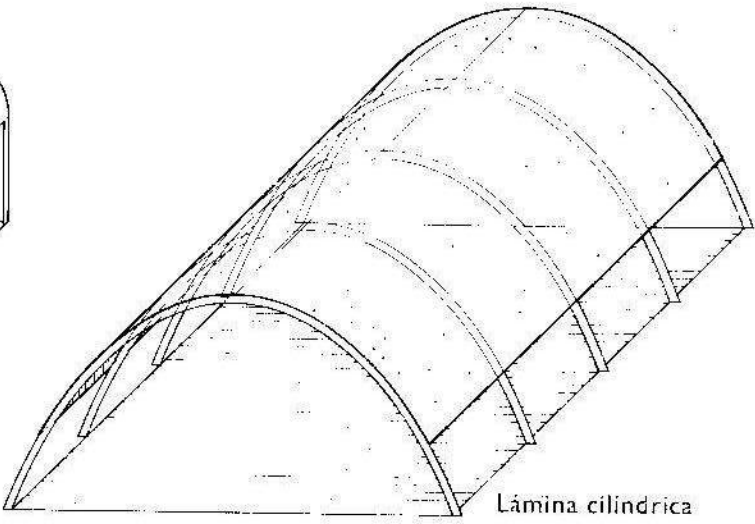
Lamina cilíndrica corta.

Diferencia entre las láminas cilíndrica, corta y larga

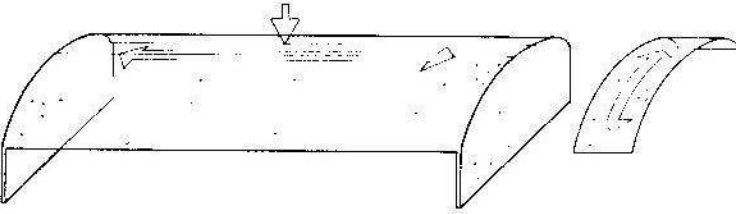
Dirección de la luz mayor y sistema de extensión.



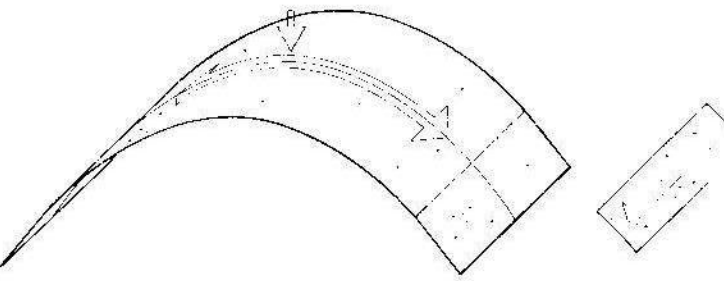
← Dirección de la luz mayor. →
Sistema de extensión; multiplicación de nuevas unidades



← Dirección de la luz mayor. →
Sistema de extensión: continuidad de la unidad existente.



El mecanismo resistente descansa principalmente en la acción de arco (de ahí la forma de catenaria). La acción de placa es menor y sirve para recibir cargas asimétricas.



El mecanismo resistente descansa principalmente en la acción de placa. La acción de arco es menor y sirve para recibir cargas asimétricas.

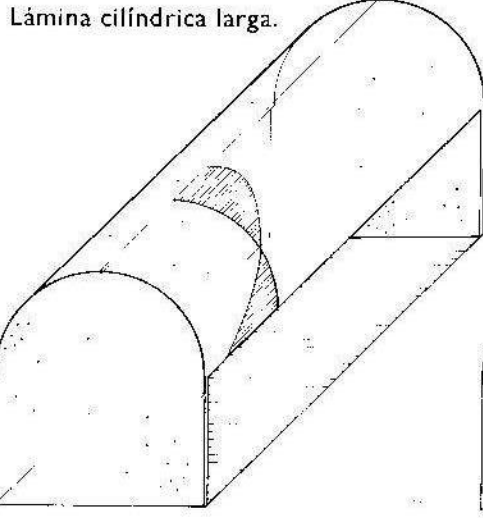


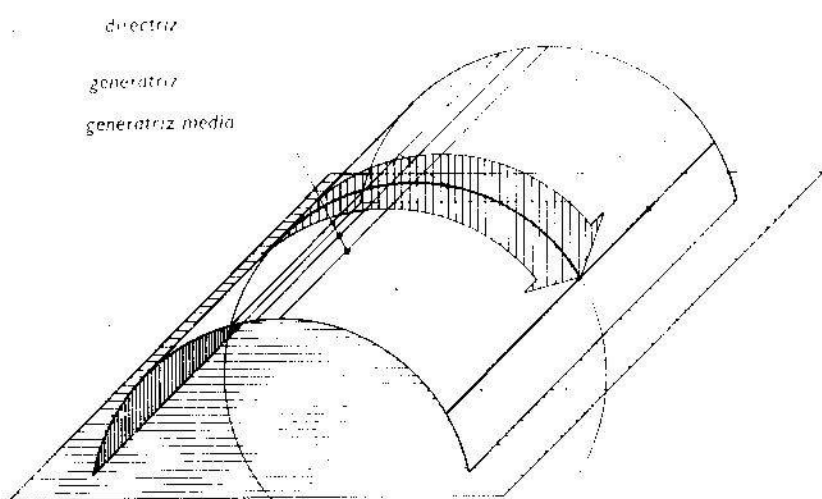
Lámina cilíndrica larga.



Lámina cilíndrica corta.

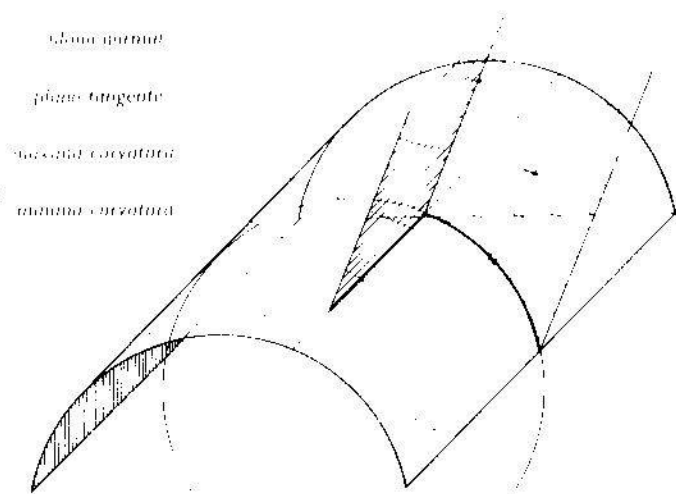
A medida que el cilindro se hace más corto, se acentúa la deformabilidad del perfil transversal; la proyección vertical de la ley de tensiones deja de ser una línea recta (como en una viga) y se curva pudiendo incluso aparecer tensiones de tracción en la parte superior de la lámina.

Geometría de las superficies cilíndricas



Generación.

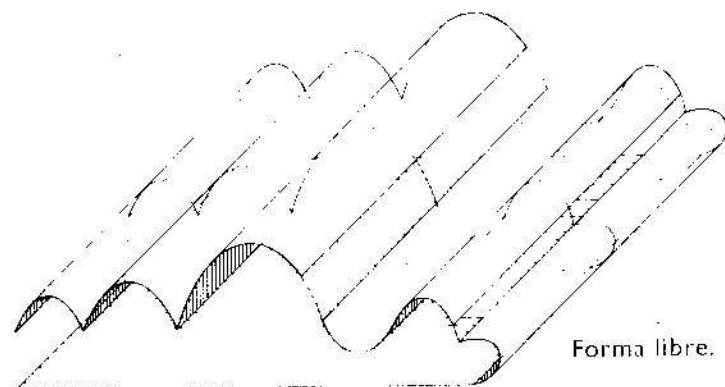
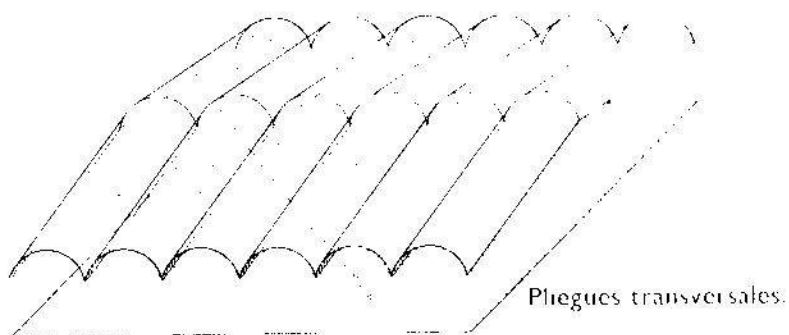
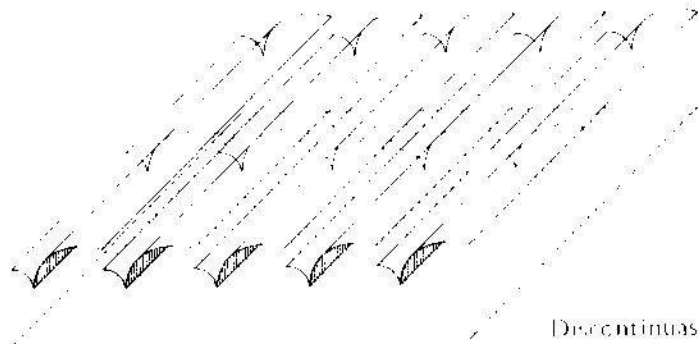
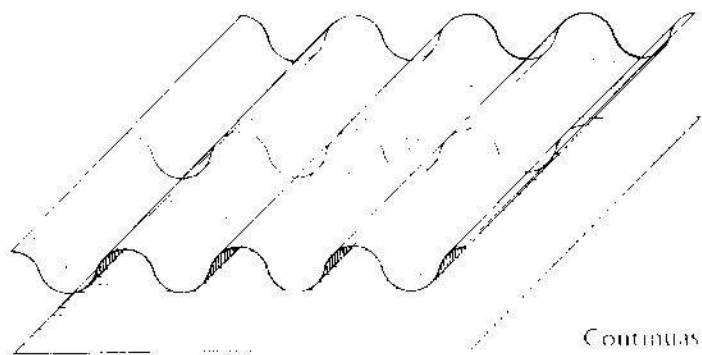
La superficie es engendrada por deslizamiento de una línea recta horizontal (generatriz) a lo largo de una curva (directriz) situada en un plano perpendicular a la generatriz.



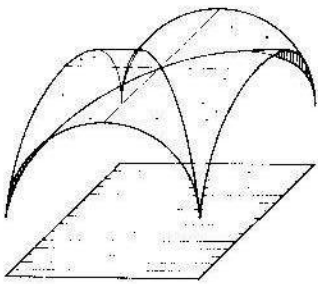
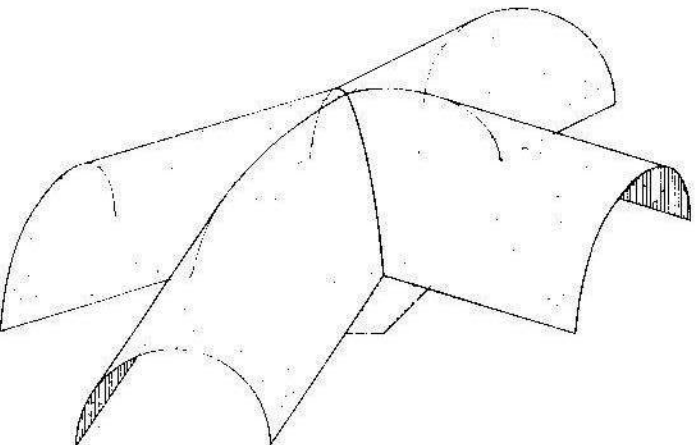
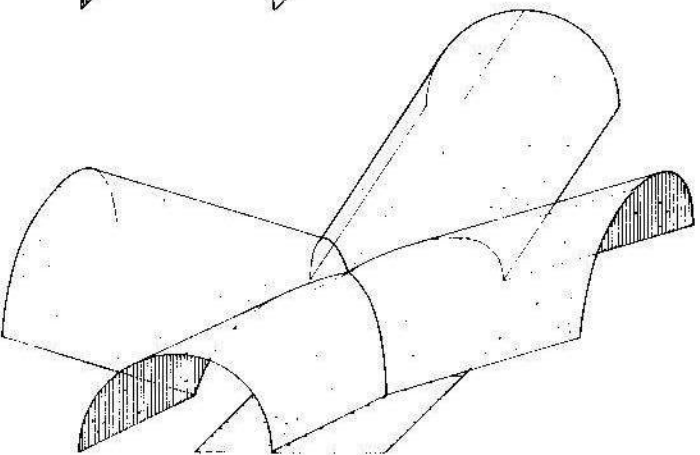
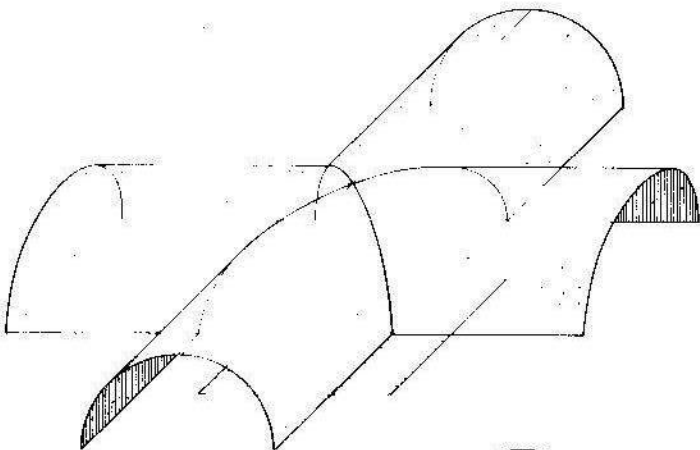
Curvaturas principales.

La curvatura máxima en cualquier punto viene dada por la directriz. La curvatura mínima se halla en dirección de la generatriz, es decir, es cero.

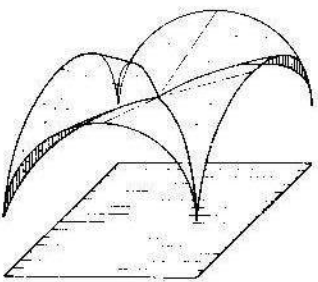
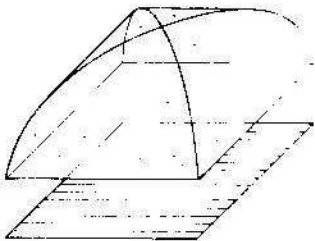
Yuxtaposición de superficies cilíndricas para cubrir áreas mayores



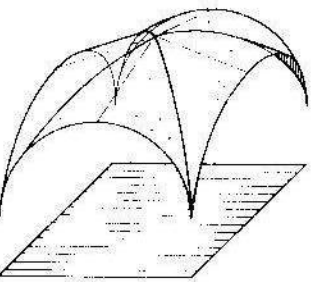
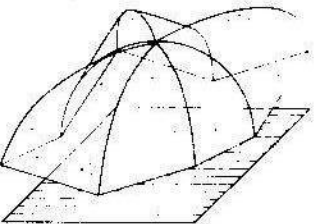
Sistemas estructurales conseguidos mediante interpenetración de superficies cilíndricas



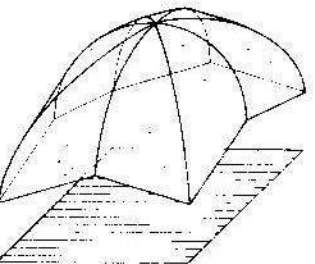
Generatriz en un plano.



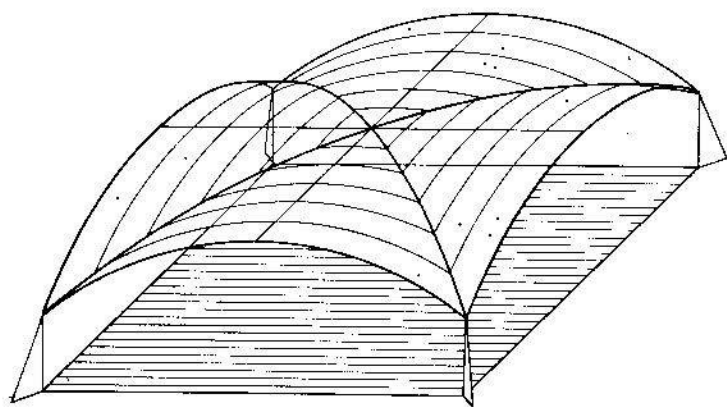
Generatriz descendiendo hacia el centro.



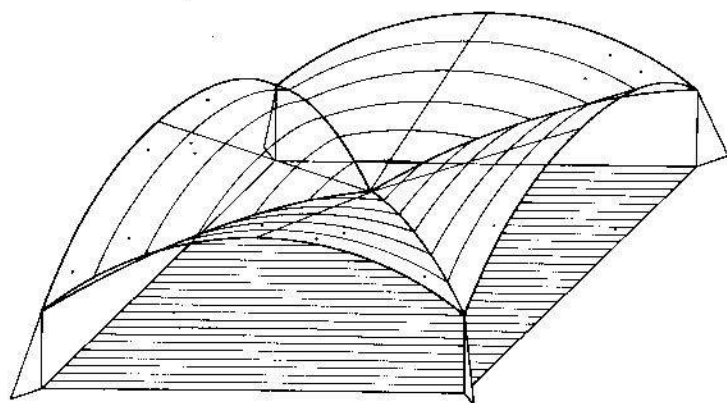
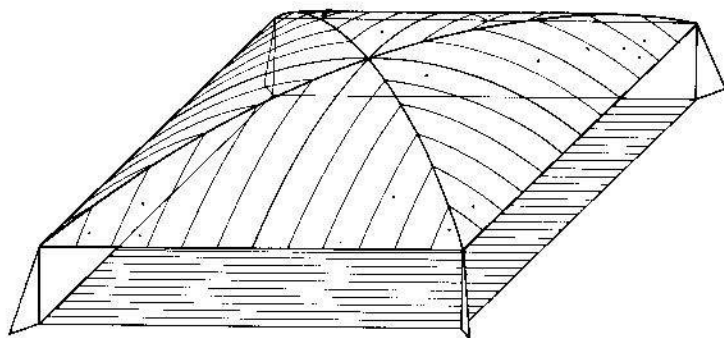
Generatriz subiendo hacia el centro.



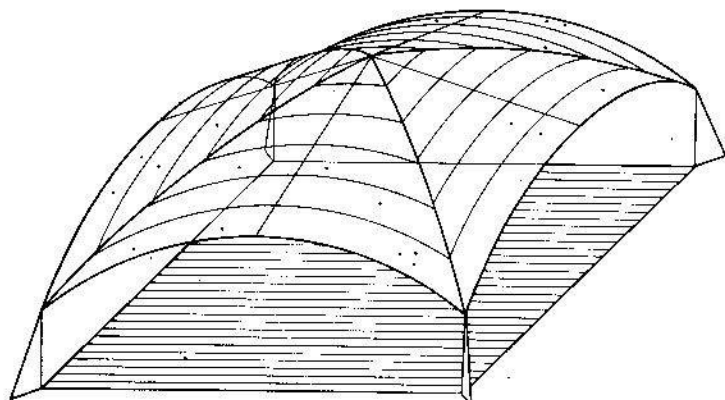
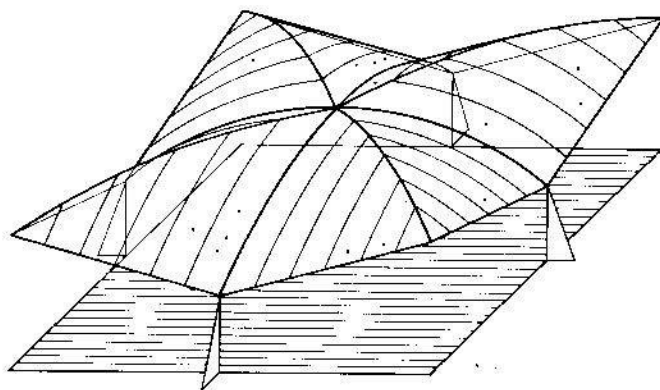
Sistemas estructurales mediante interpenetración
de superficies cilíndricas



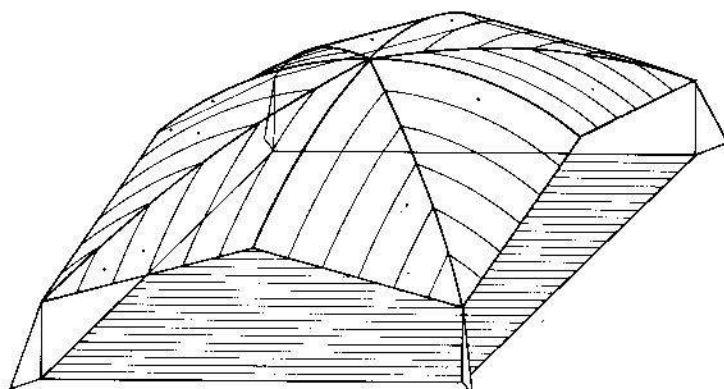
Generatrices paralelas al plano de planta.



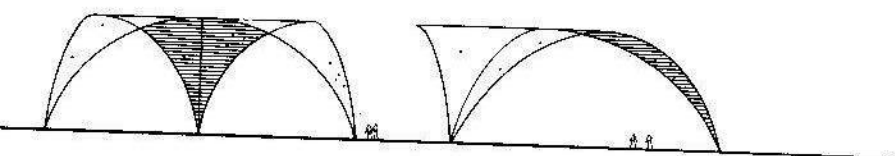
Generatrices inclinadas hacia el centro.



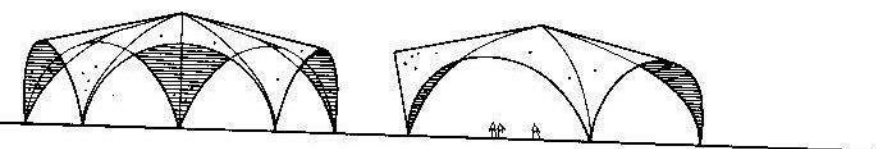
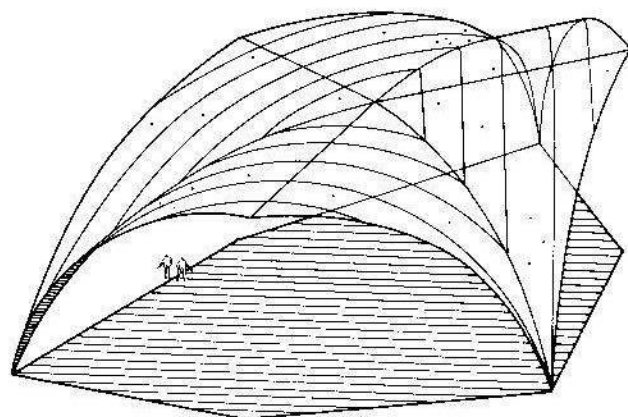
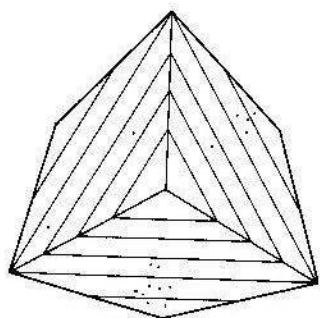
Generatrices inclinadas hacia los bordes.



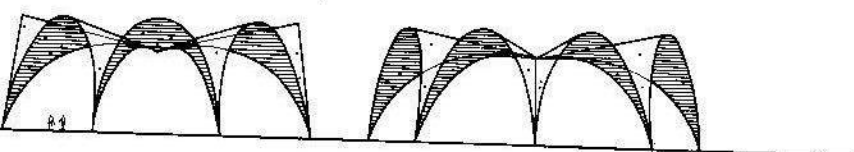
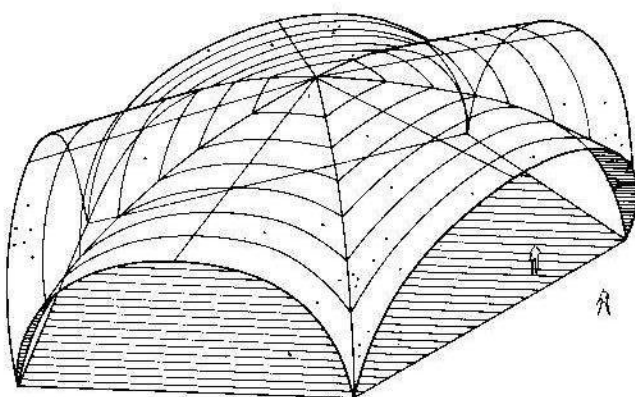
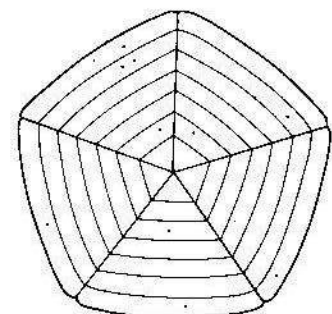
Sistemas estructurales mediante interpenetración de superficies cilíndricas



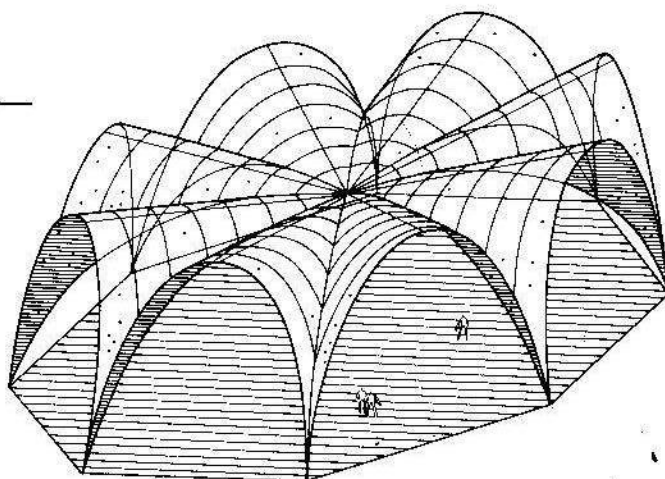
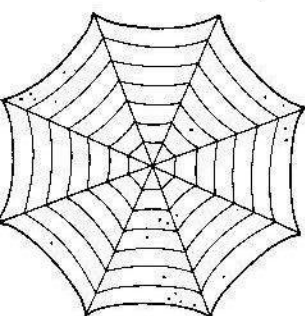
Planta exagonal con tres segmentos cilíndricos.



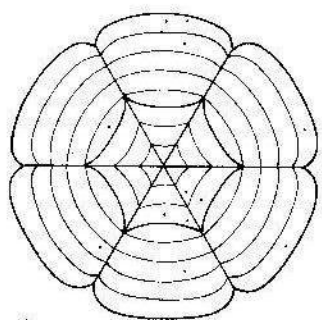
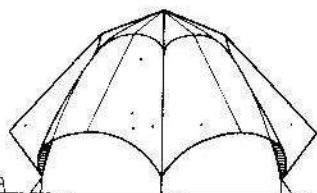
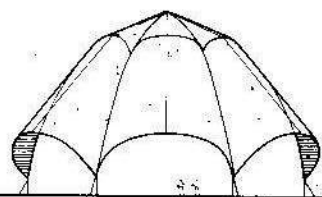
Planta pentagonal con segmentos peraltados hacia el centro.



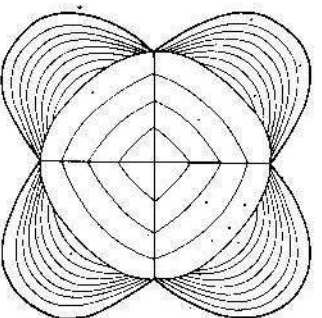
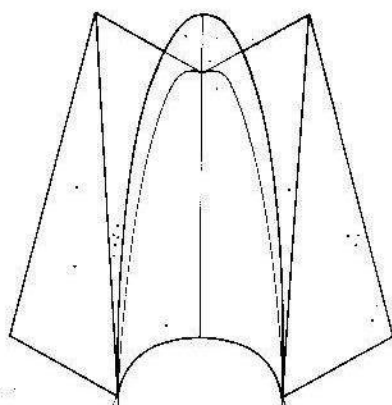
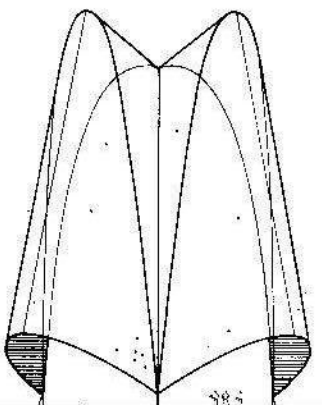
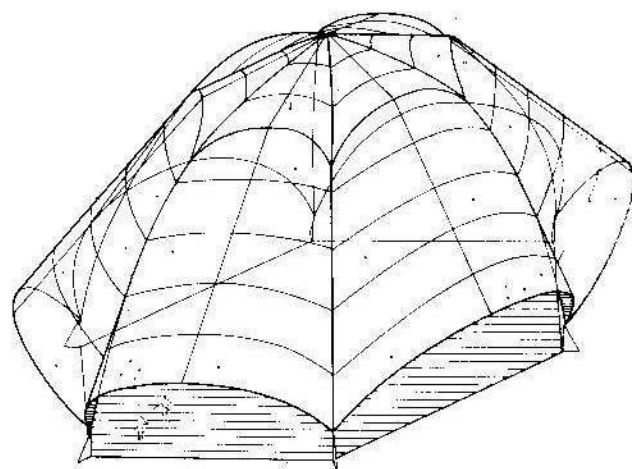
Planta octogonal con segmentos descendentes hacia el centro.



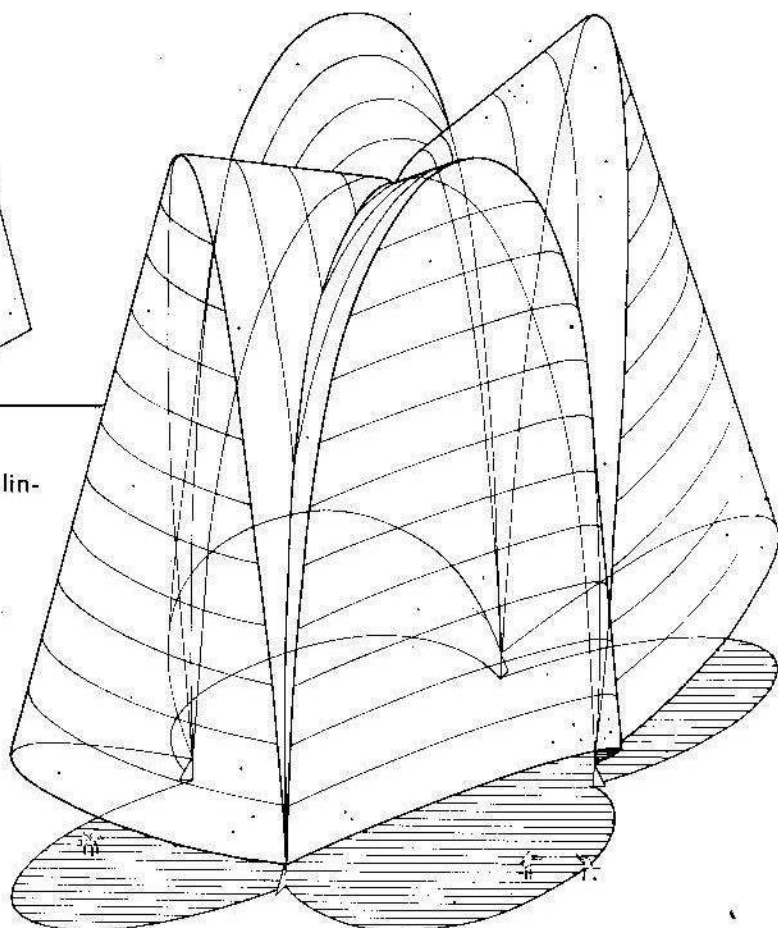
Sistemas estructurales mediante interpenetración de superficies cilíndricas



Planta hexagonal: segmentos cilíndricos ascendentes.

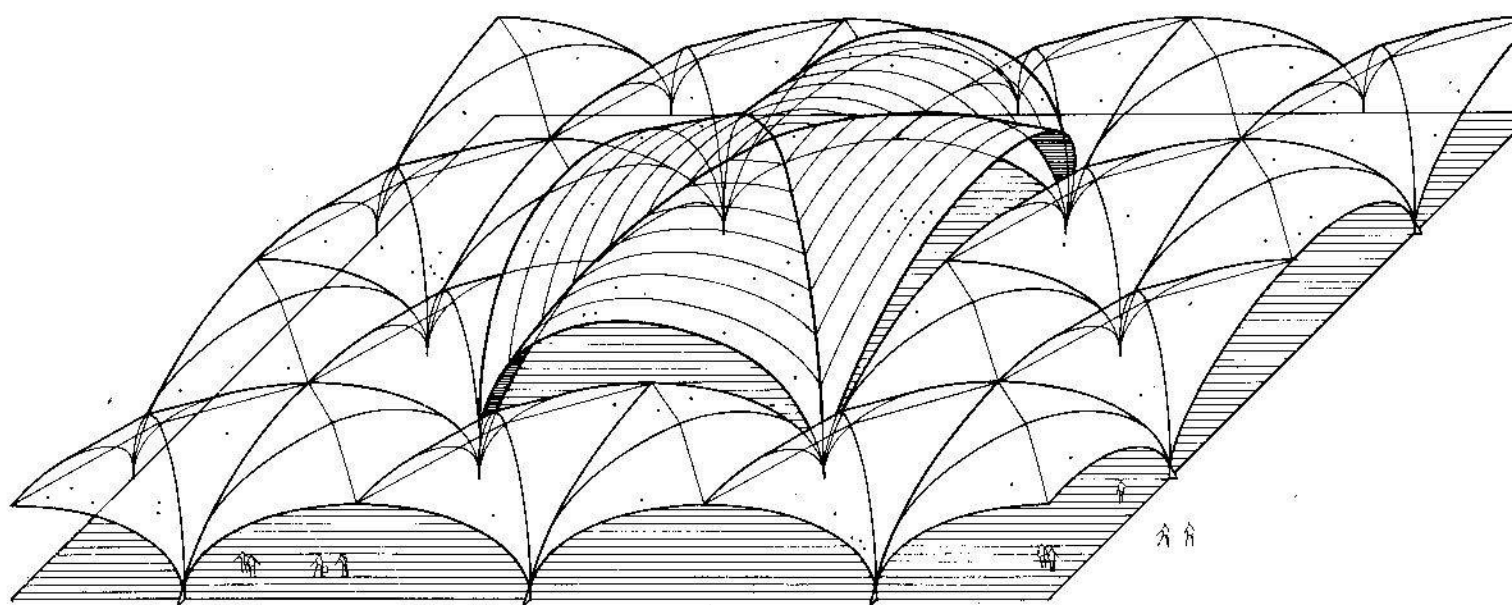
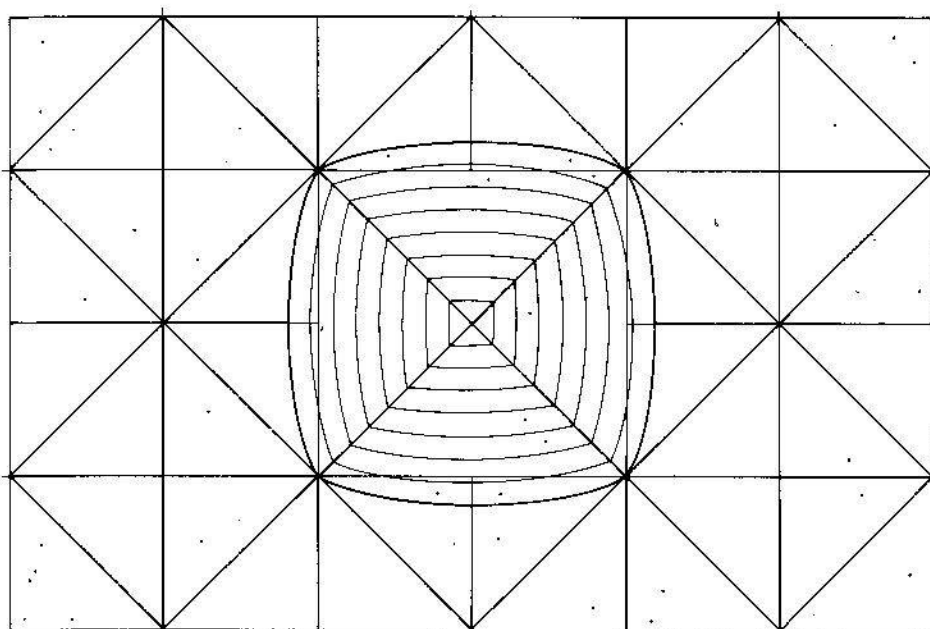
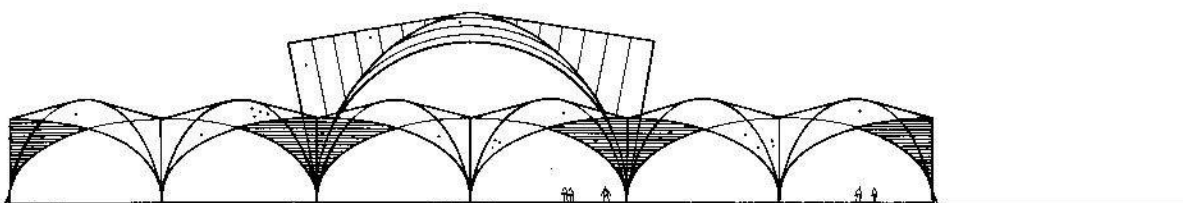


Planta cruciforme: segmentos cilíndricos descendentes.

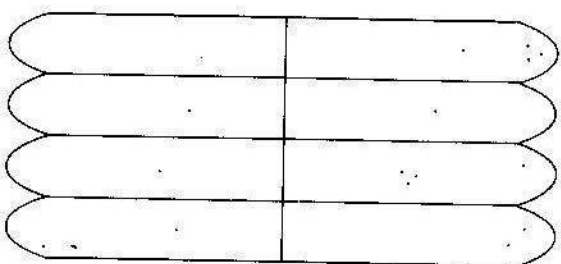
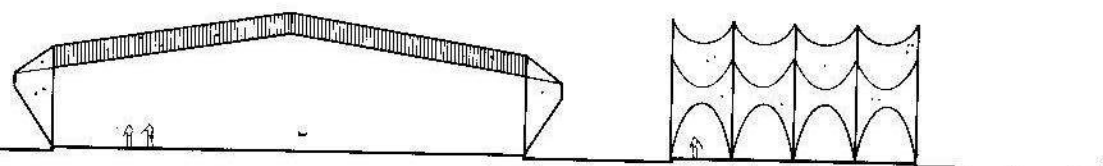


Sistemas estructurales mediante interpenetración de superficies cilíndricas

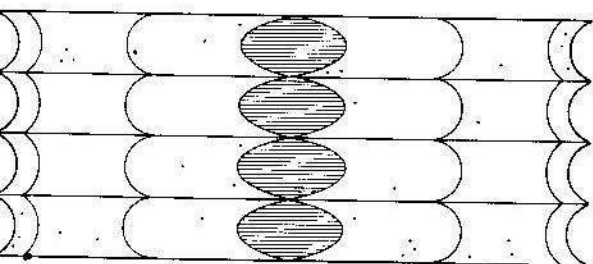
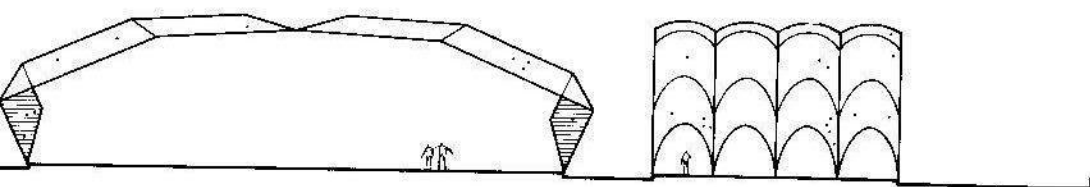
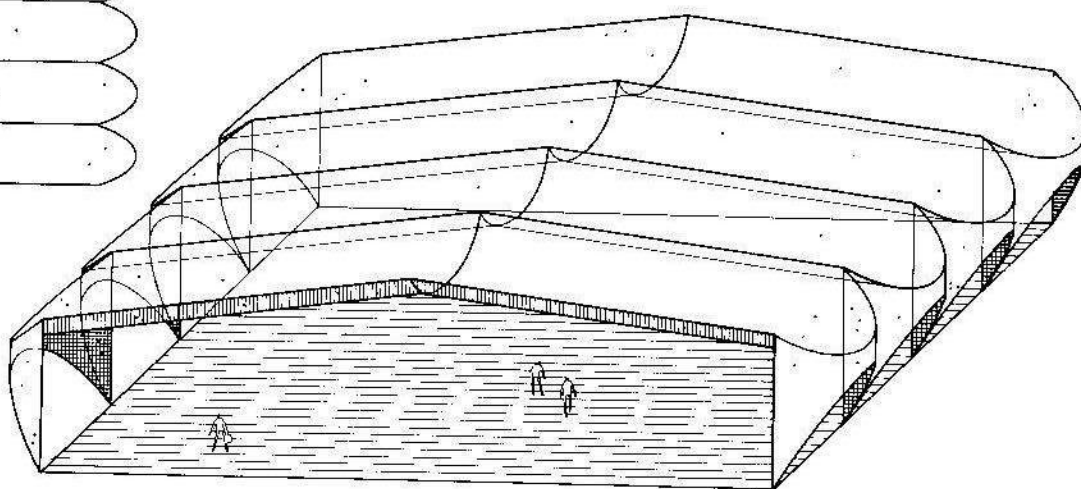
Composición de superficies cilíndricas que se cruzan diagonalmente sobre retícula cuadrada.



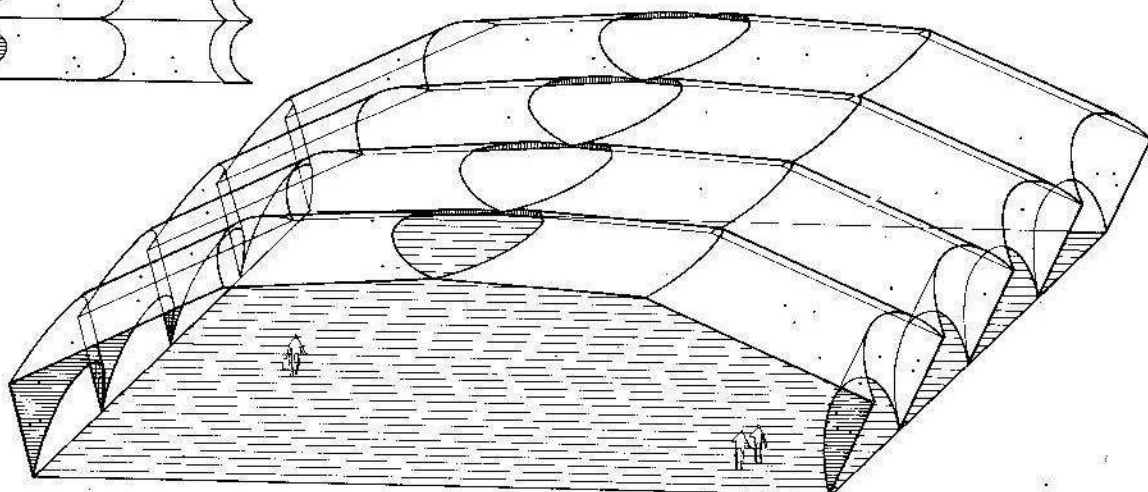
Sistemas estructurales lineales compuestos por superficies cilíndricas



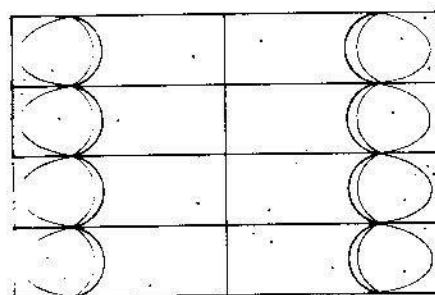
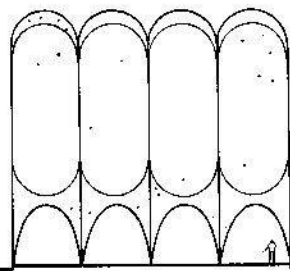
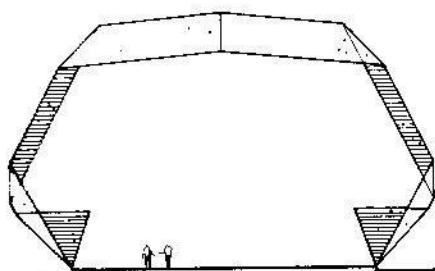
Portico de dos articulaciones.



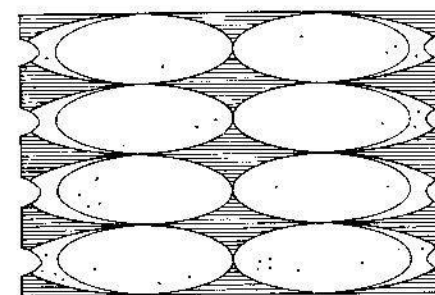
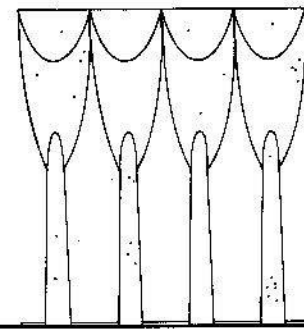
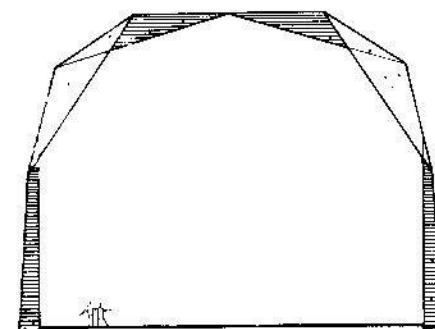
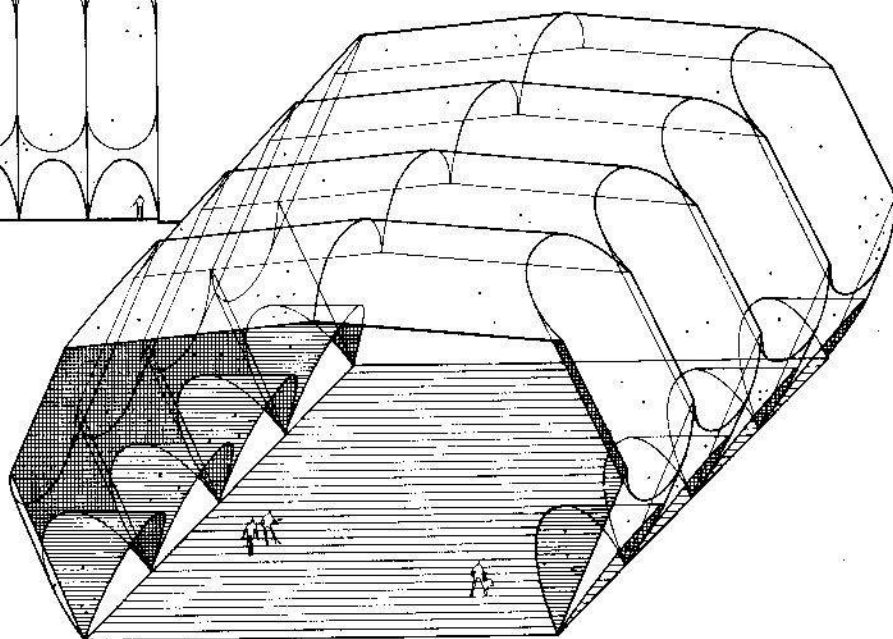
Portico de tres articulaciones.



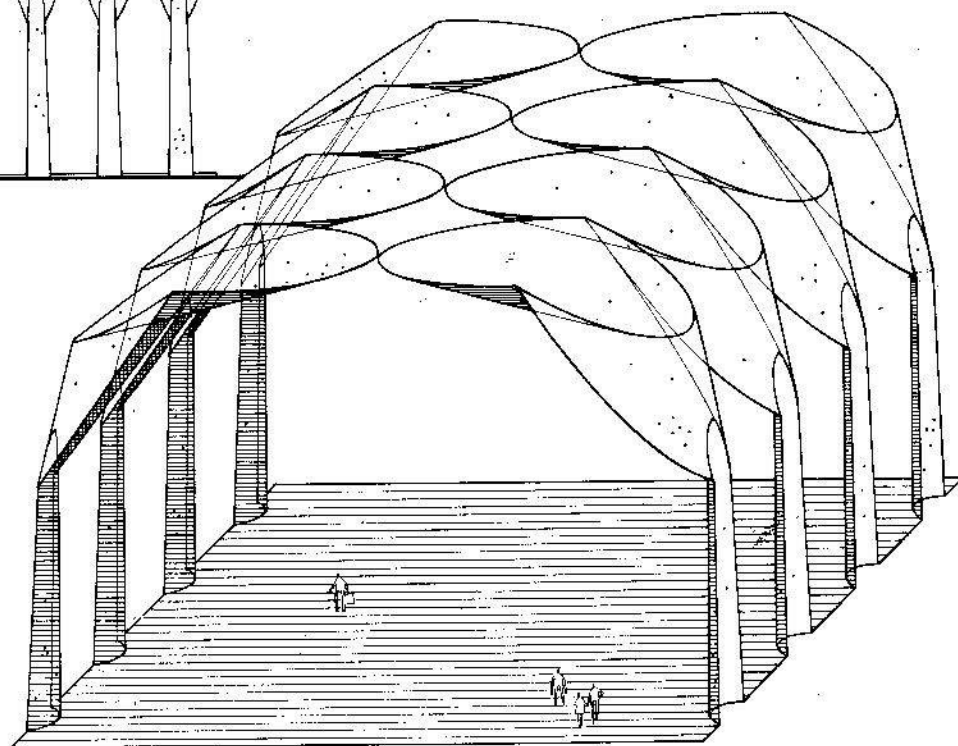
Sistemas estructurales compuestos por superficies cilíndricas



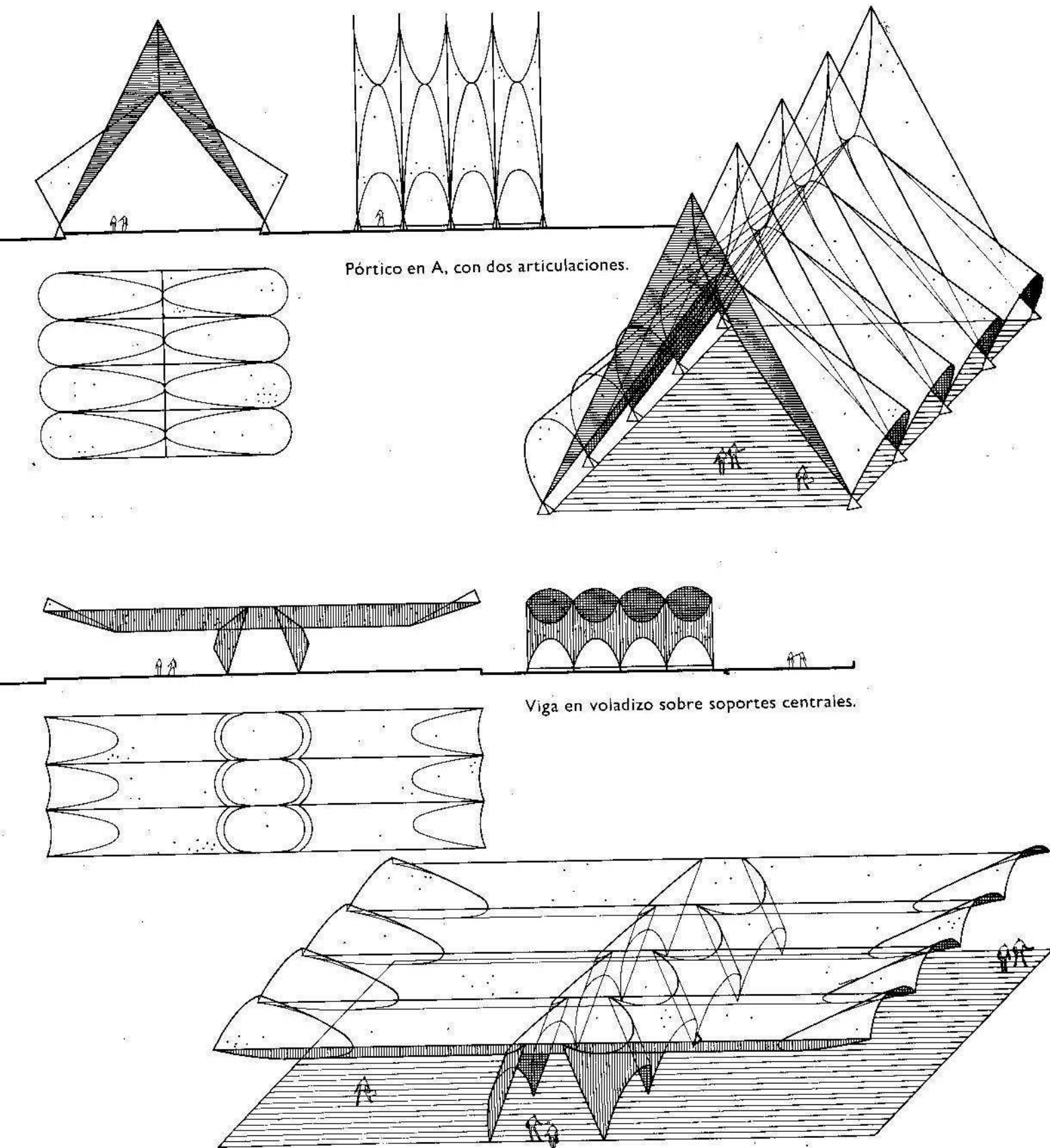
Arco de dos articulaciones.



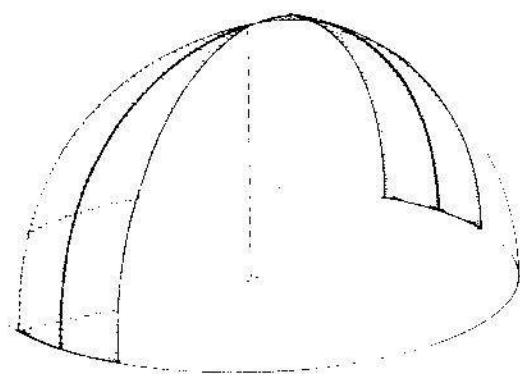
Arco con articulación en la clave.



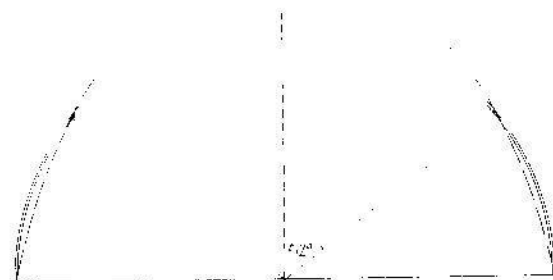
Sistemas estructurales lineales compuestos por superficies cilíndricas



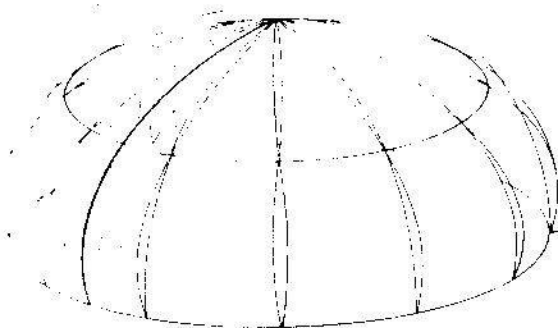
Mecanismo resistente de la lámina esférica (de revolución)



División en segmentos.



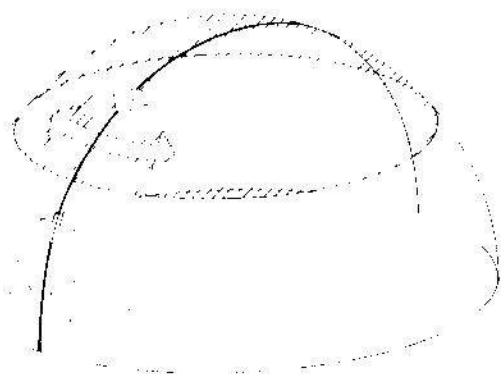
La curvatura del arco formado por dos segmentos opuestos difiere del antifunicular real. La diferencia cambia de signo a 52° contados desde la clave.



Deformación de los segmentos.



Las partes superiores de los segmentos coden y tienden a solaparse en los bordes reduciendo su curvatura. Las partes inferiores se elevan y tienden a incrementar su curvatura.



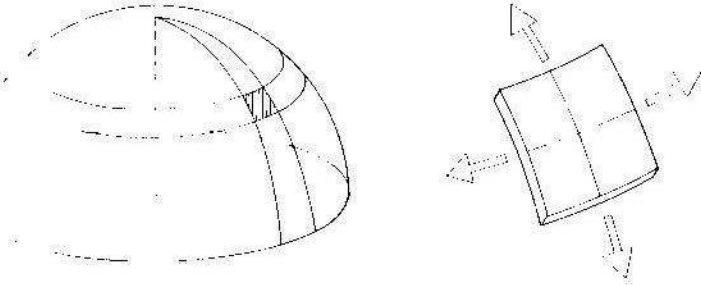
Efecto de anillo.

La continuidad horizontal (anillo) resiste la deformación; la parte superior actúa como una serie de anillos en compresión, y la parte inferior como otra serie de anillos en tracción.



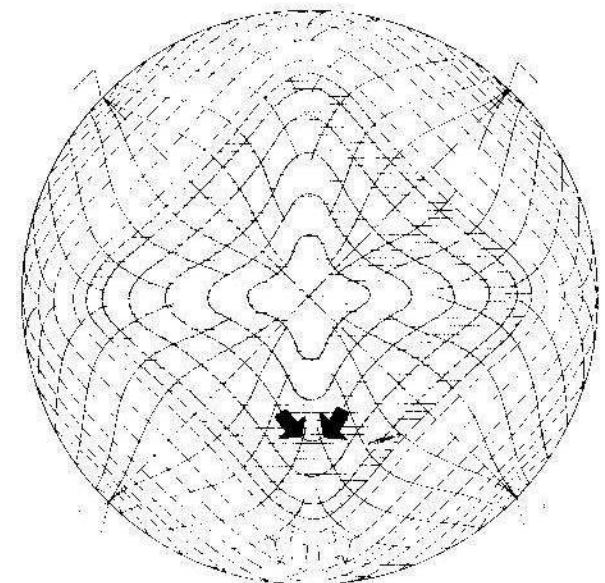
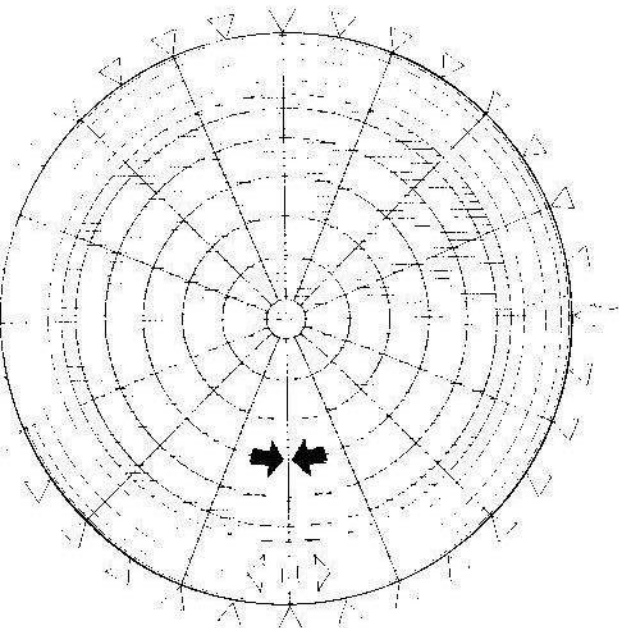
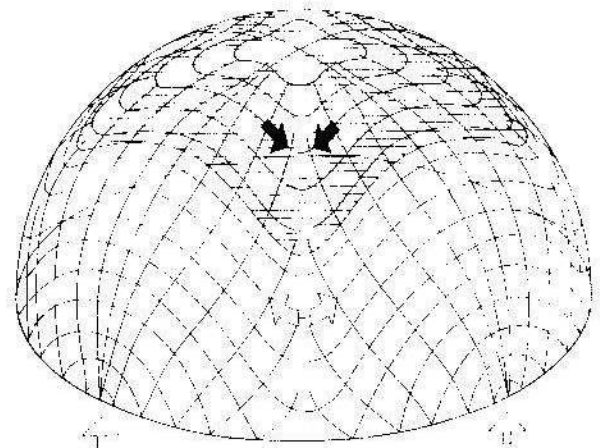
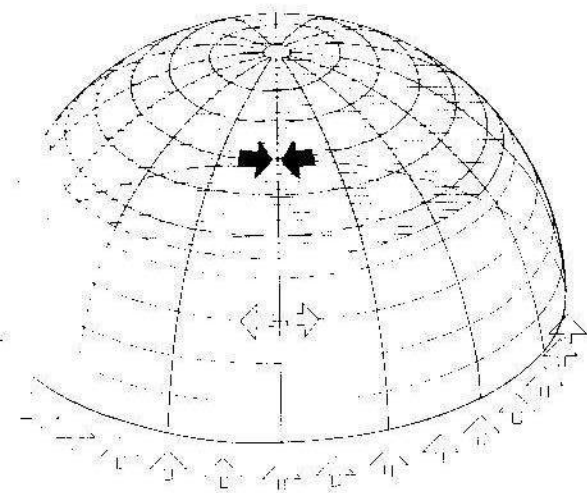
La capacidad de la lámina esférica para desarrollar esfuerzos anulares (según el paralelo) contrarresta las deformaciones de la membrana, tanto hacia el interior como hacia el exterior, originadas por la separación entre el meridiano y el antifunicular. Esta capacidad permite adoptar también perfiles de generatriz que no sean circulares.

Esfuerzos membrana en láminas de revolución bajo carga simétrica



El elemento de lámina se mantendrá en equilibrio tan sólo con los esfuerzos según el meridiano y según el paralelo. Por ser la carga simétrica de revolución no se originarán esfuerzos cortantes en ninguna sección de la lámina.

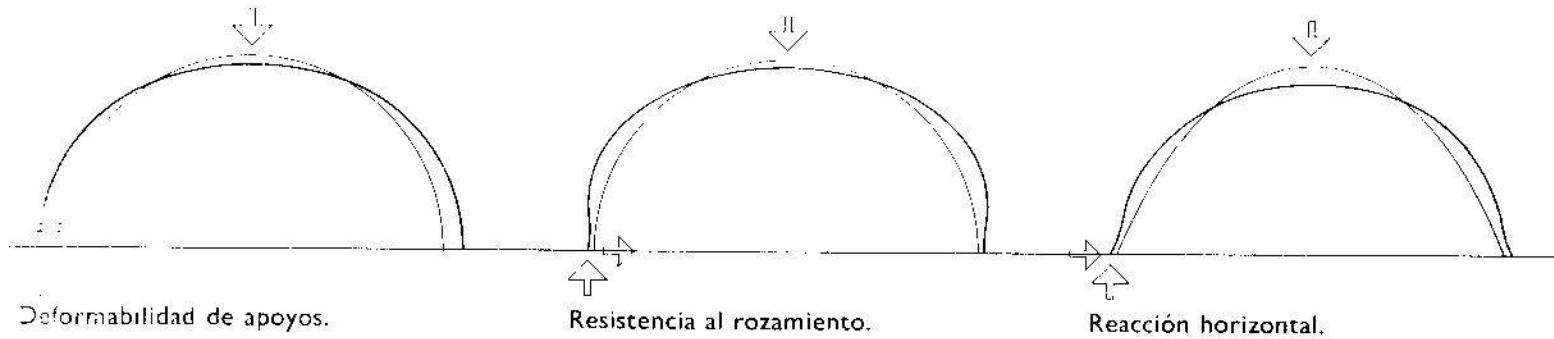
Líneas de tensiones principales en láminas esféricas, sometidas a cargas simétricas



Los esfuerzos siguen las direcciones de meridianos y paralelos.

Las direcciones de los esfuerzos según el meridiano y según el paralelo sufren modificaciones como si se tratase de un campo magnético.

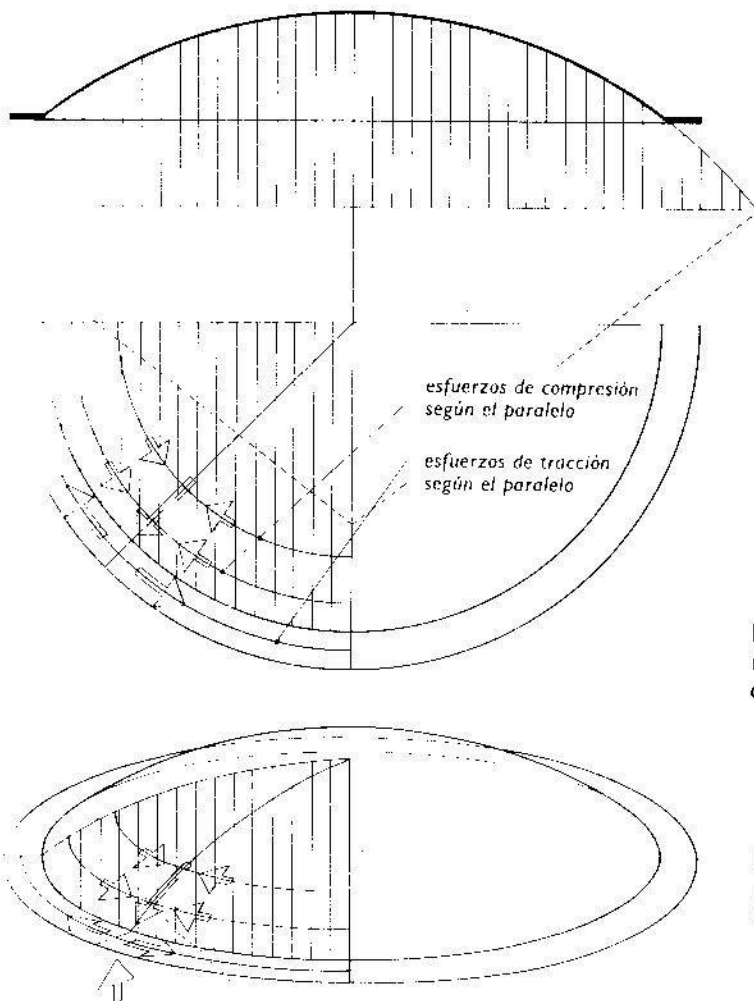
Flexión del borde inferior: perturbaciones de borde



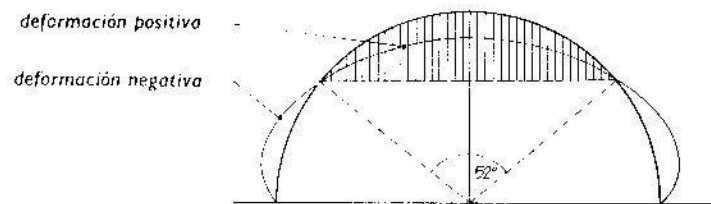
Con apoyos deformables, el borde inferior de la lámina puede dilatarse libremente: sólo esfuerzos de membrana. Sin embargo, si este movimiento es impedido por rozamiento de los apoyos, se crean unas perturbaciones de

flexión. El mismo efecto se producirá cuando se construya, en el caso de tangente final no vertical, una viga anular de borde cuya deformación difiere de la del borde inferior de la lámina.

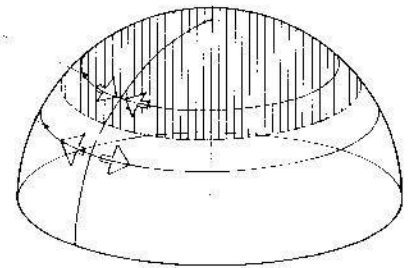
Reducción de las perturbaciones de borde mediante pretensado de la viga anular



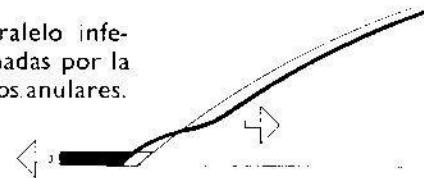
Esfuerzos en el anillo de borde de la lámina esférica rebajada.



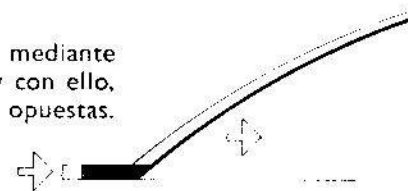
esfuerzos de compresión según el paralelo
esfuerzos de tracción según el paralelo



Deformaciones opuestas del paralelo inferior y del anillo de borde, originadas por la diferente dirección de los esfuerzos anulares.

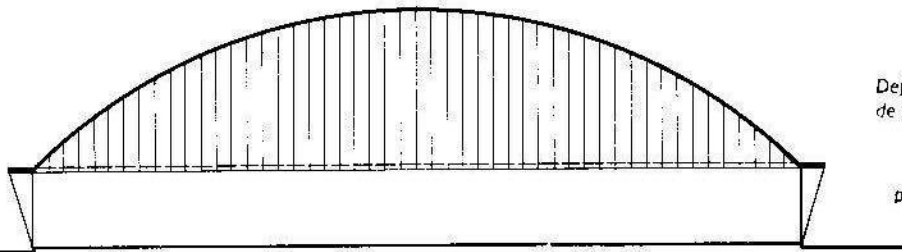


Equilibrio de las fuerzas anulares mediante pretensado del anillo de borde, y con ello, eliminación de las deformaciones opuestas.



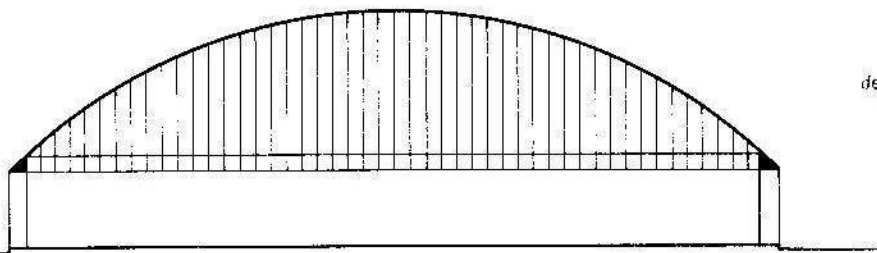
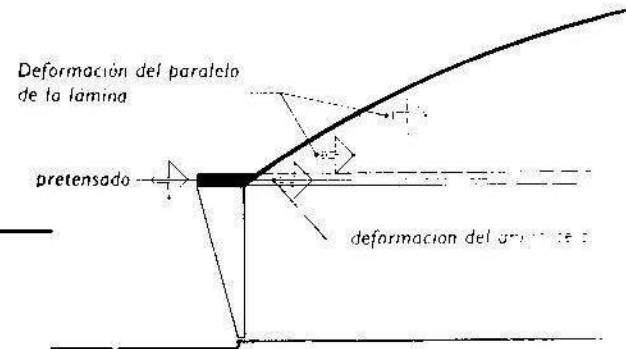
Reducción de la perturbación en el borde inferior de la lámina.

Disposiciones del borde inferior en láminas esféricas rebajadas



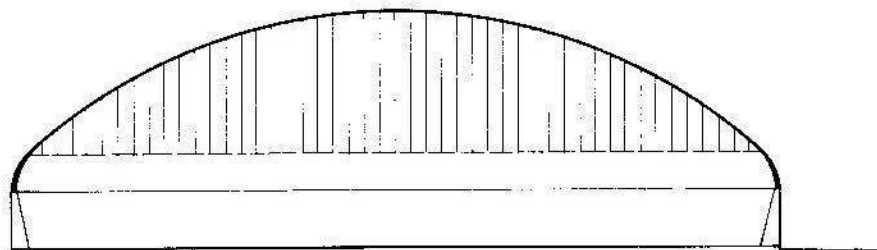
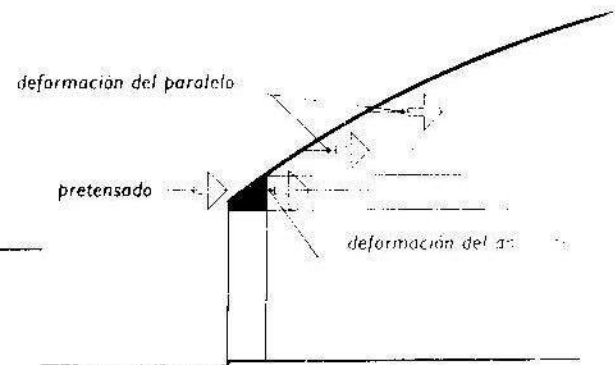
Pretensado del anillo de borde fuera de la lámina.

La deformación centrífuga del anillo de borde se invertirá para acomodarse a la deformación centrípeta del paralelo inferior de la lámina.



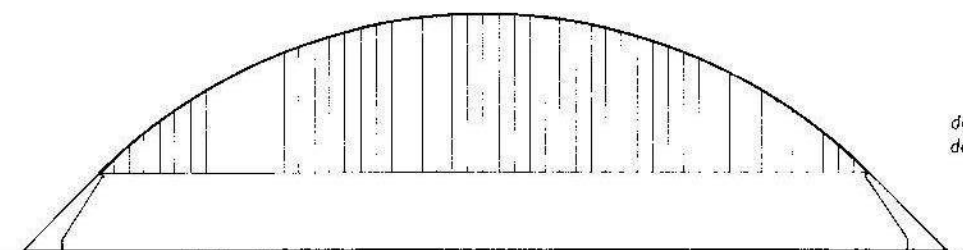
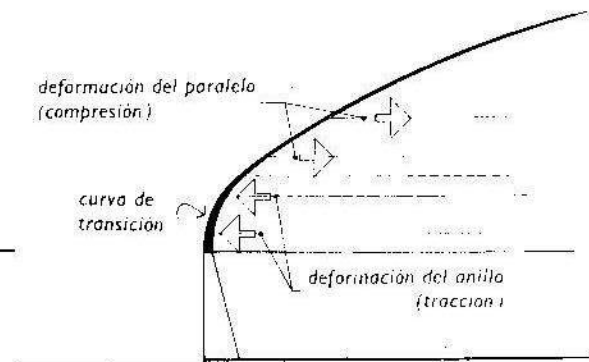
Pretensado del anillo de borde dentro de la lámina.

El mecanismo para eliminar perturbaciones de borde se basa, como anteriormente, en invertir la tendencia a la deformación.



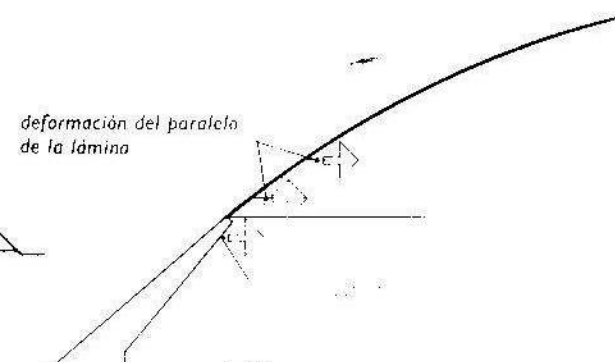
Terminación vertical mediante curva de transición.

El cambio de la deformación centrípeta a la centrífuga del anillo, se verifica gradualmente y dentro de la lámina.

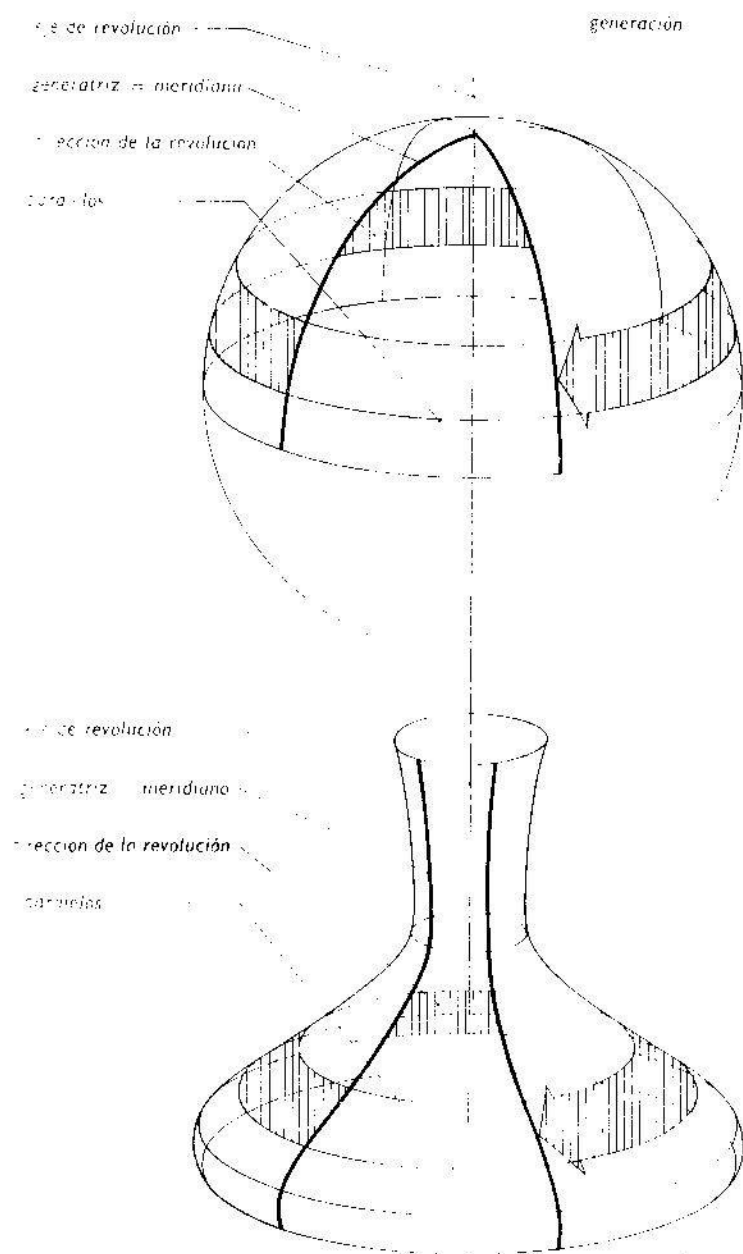


Inclinación tangencial de los apoyos.

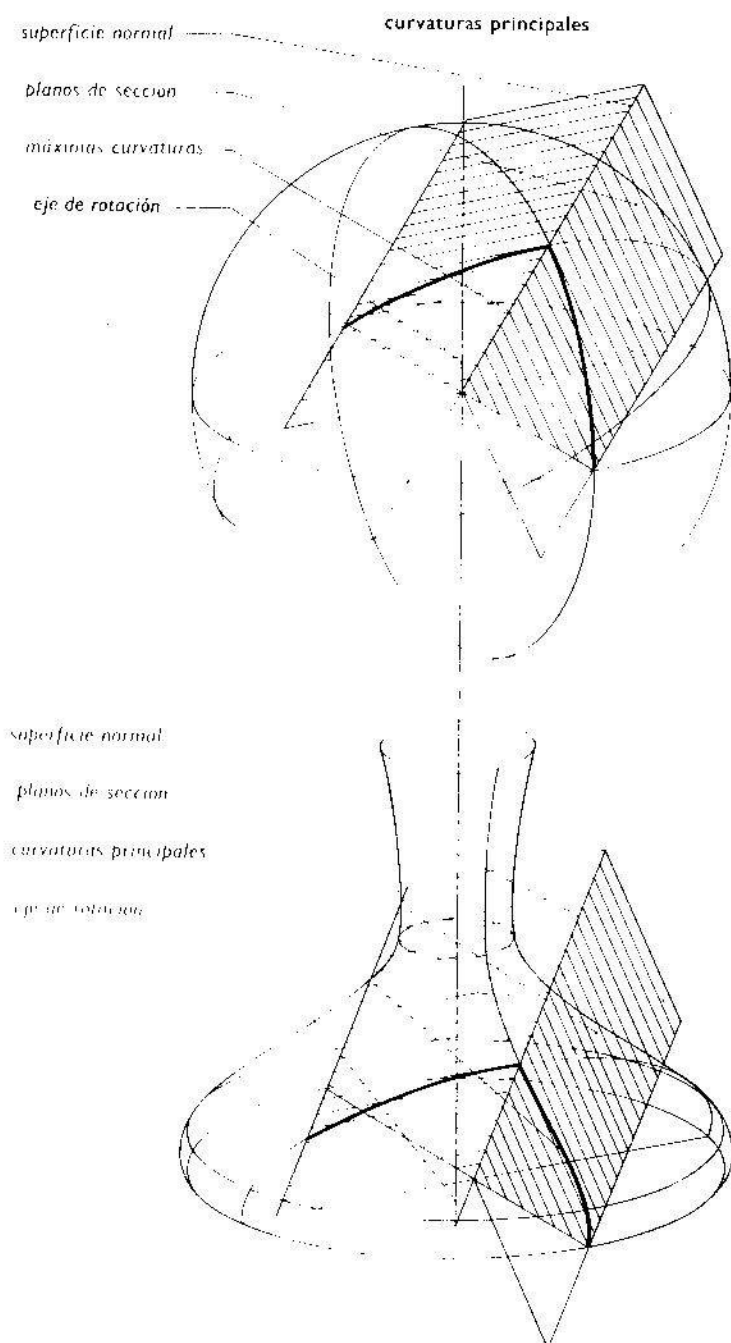
La deformación de los apoyos tiene tendencia centrípeta al igual que la deformación del anillo de borde inferior de la lámina.



Geometría de las superficies de revolución: sólidos de revolución



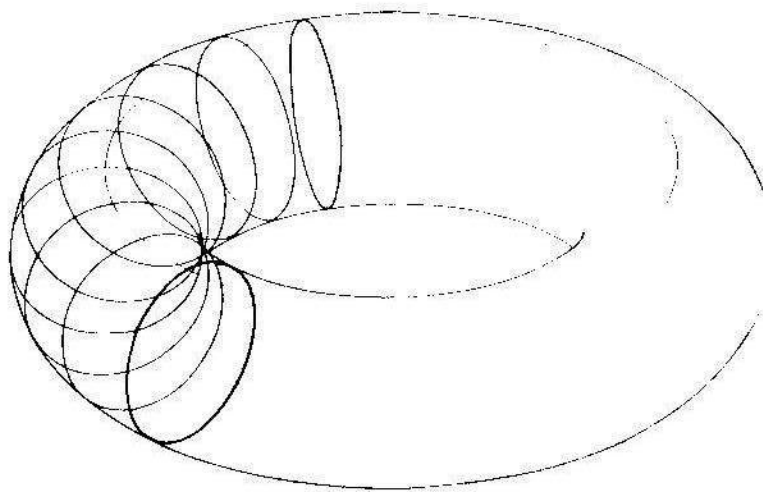
La superficie se engendra por rotación de una curva plana de forma geométrica o libre, la generatriz (meridiano), alrededor de un eje vertical. Todas las curvas secciones, son círculos.



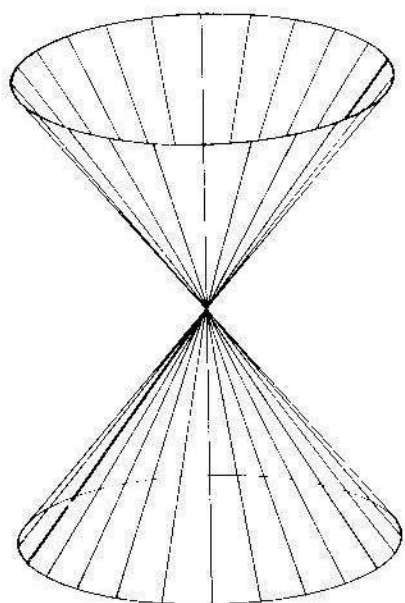
Una curvatura principal en cualquier punto viene dada por el meridiano; la otra por la sección par un plano que corta normalmente a una sección meridiana.

Formas especiales de superficies de revolución

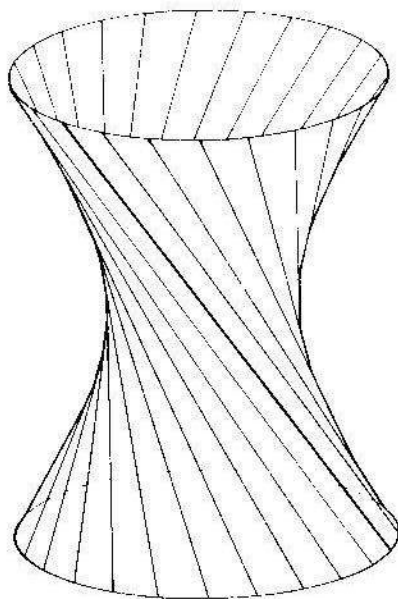
Cuando la generatriz es un círculo y cuando el eje de revolución se halla en el plano de este círculo, dentro o fuera de él, se engendra un toro.



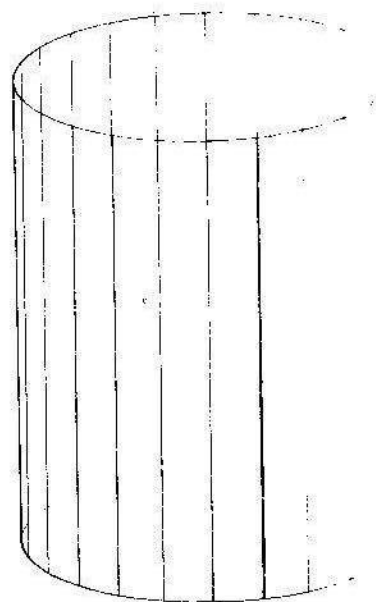
Toro.



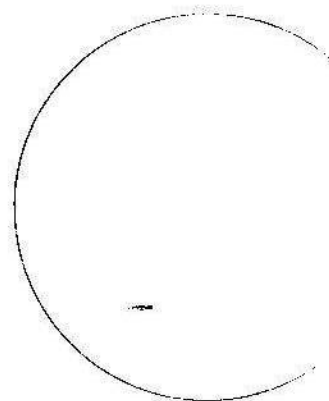
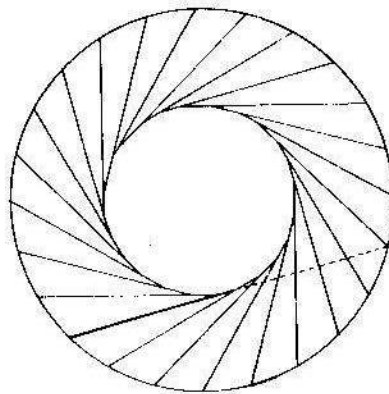
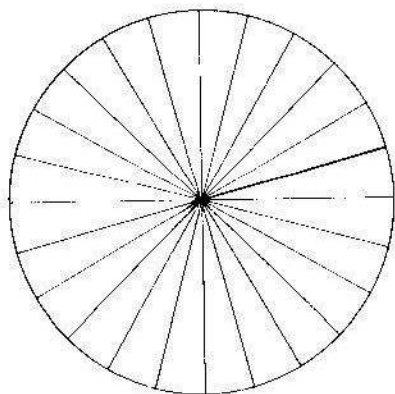
Cono invertido.



Hiperboloide.

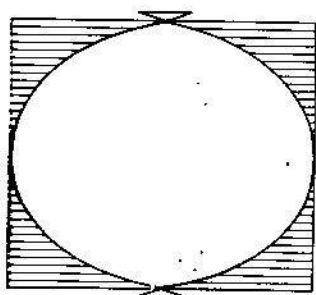
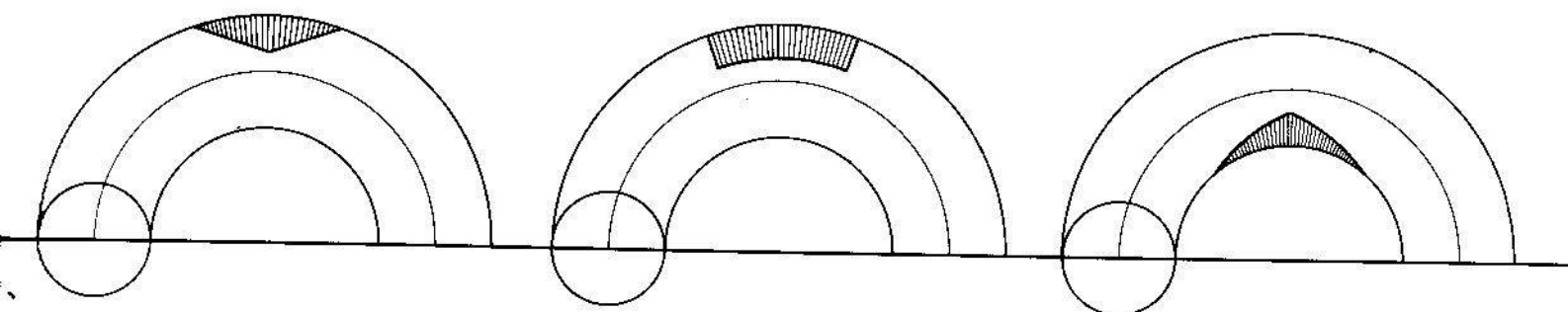


Cilindro circular

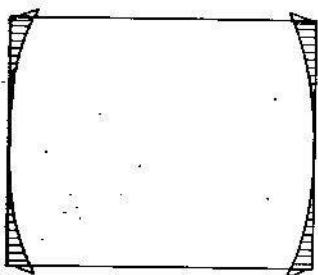
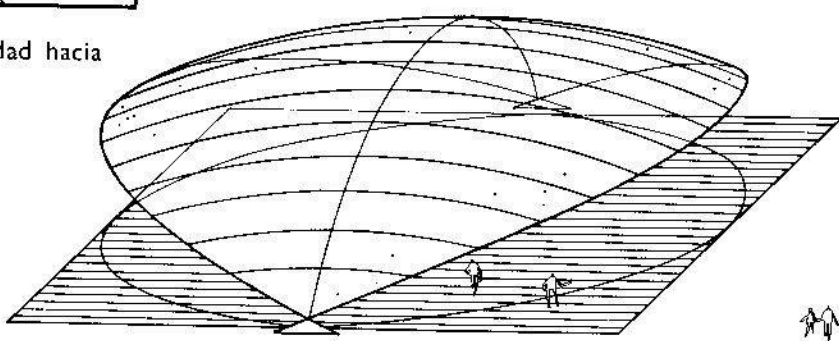


Cuando la generatriz es una línea recta, se engendran dependiendo de su posición en el espacio en relación al eje de giro, las superficies típicas del cono, del hiperboloide o del cilindro.

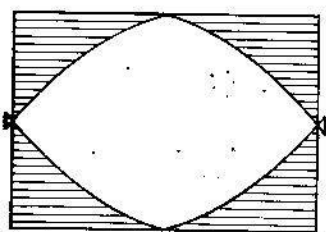
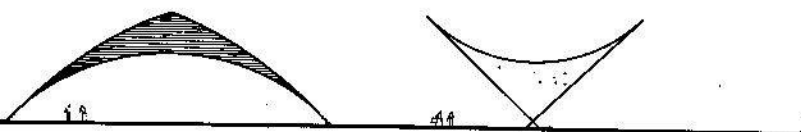
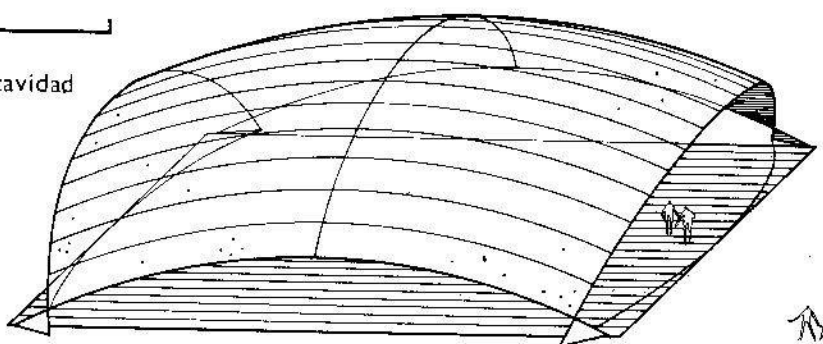
Secciones tóricas para plantas geométricas especiales



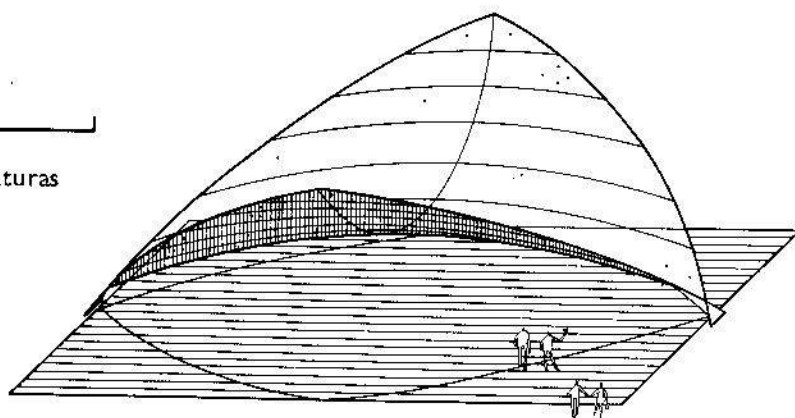
Sección oval con concavidad hacia abajo.



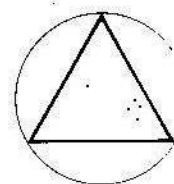
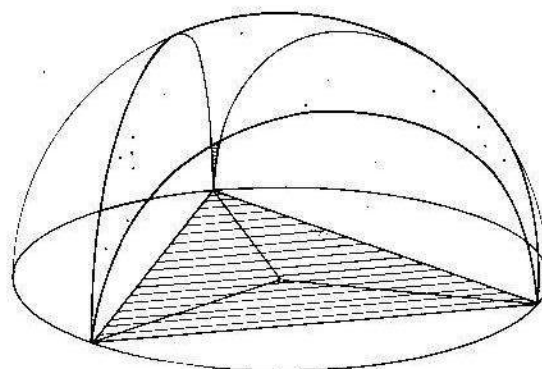
Sección cuadrada con concavidad hacia abajo.



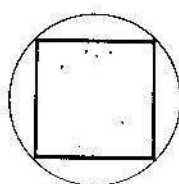
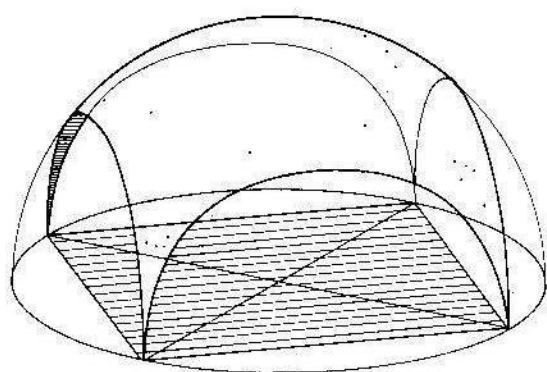
Sección rómbica con curvaturas opuestas.



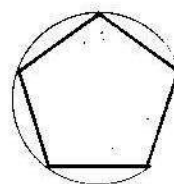
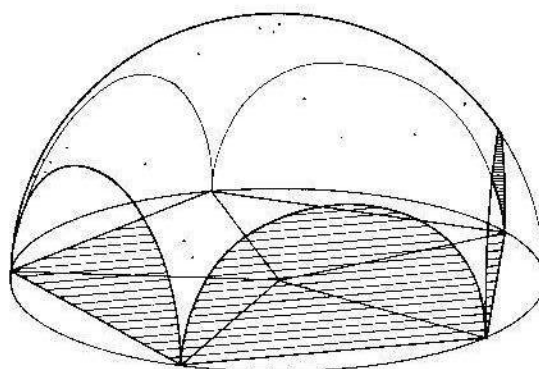
Superficies semiesféricas para plantas de geometría rectilínea



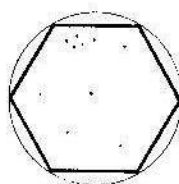
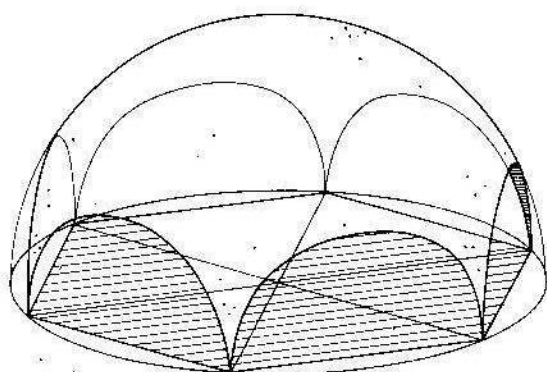
Planta triangular



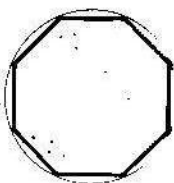
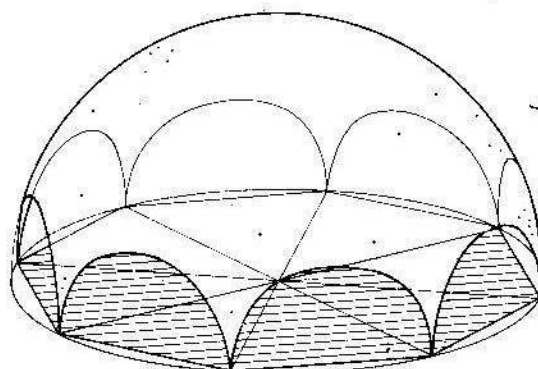
Planta cuadrada.



Planta pentagonal

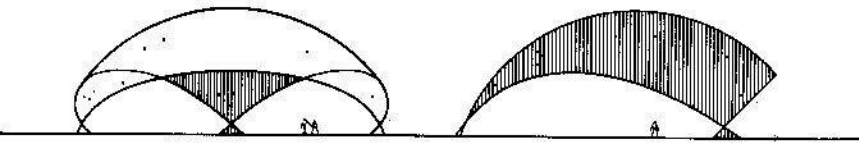


Planta hexagonal.

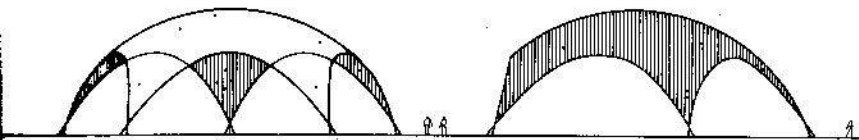
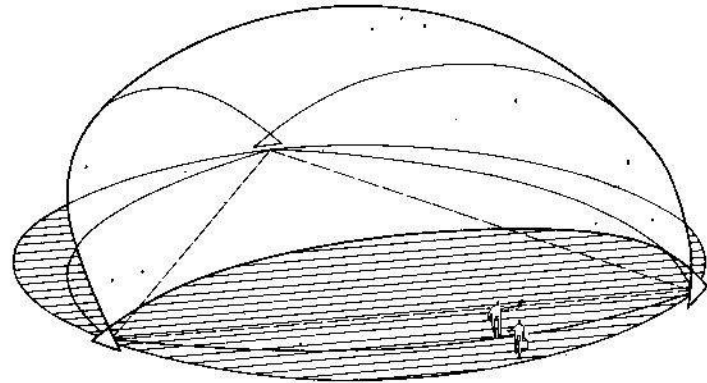
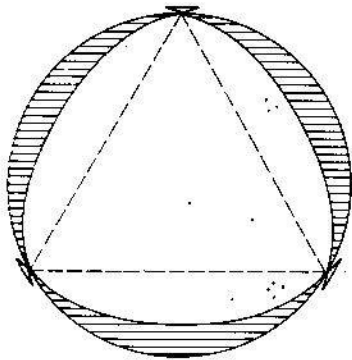


Planta octogonal

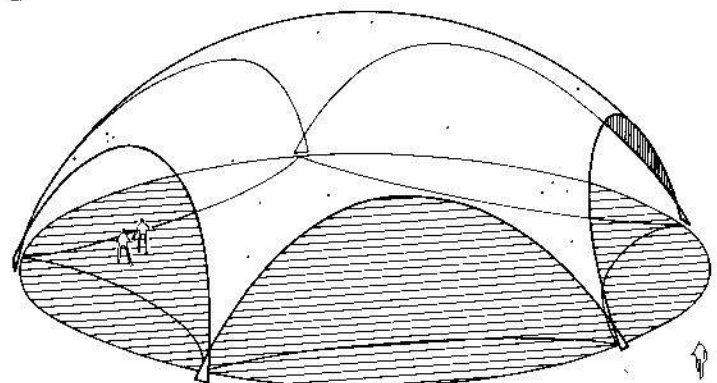
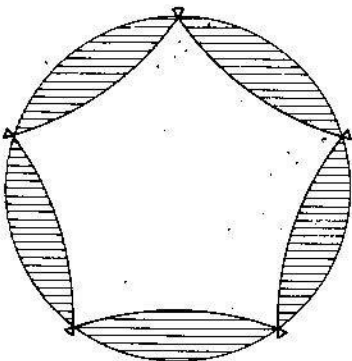
Sistemas que configuran el espacio con una superficie esférica



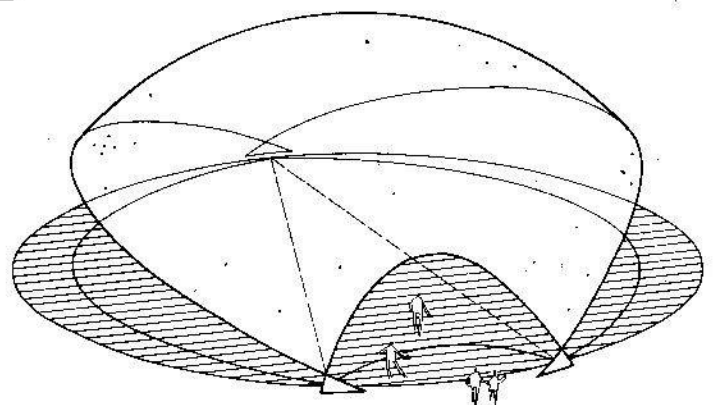
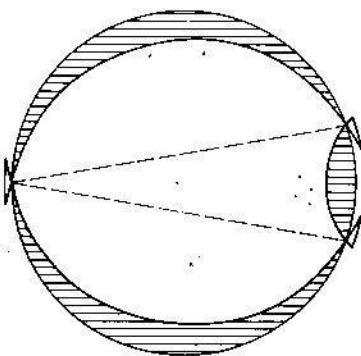
Tres arcos de borde inclinados hacia afuera.



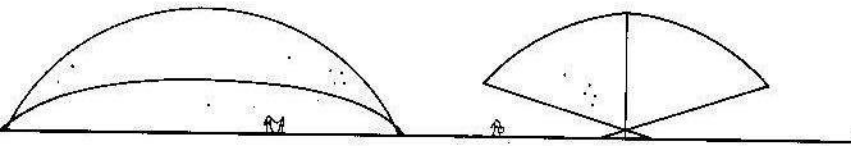
Cinco arcos de borde inclinados hacia adentro.



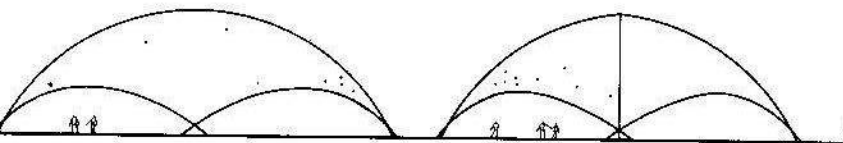
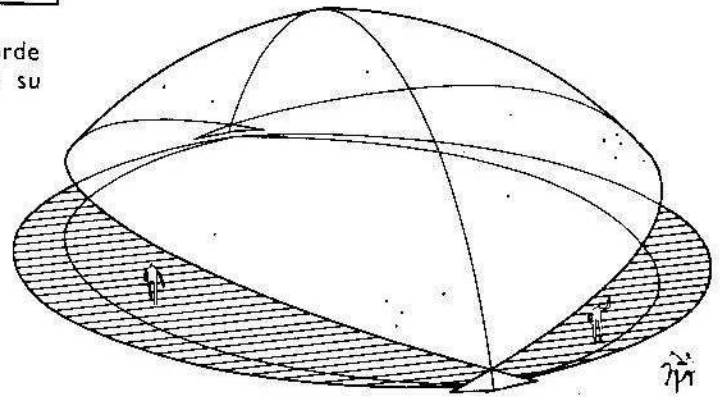
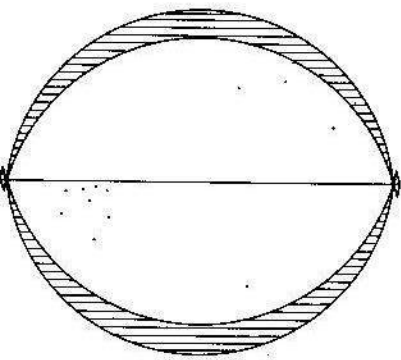
Segmento cuyos arcos de borde inclinados están limitados por un arco frontal.



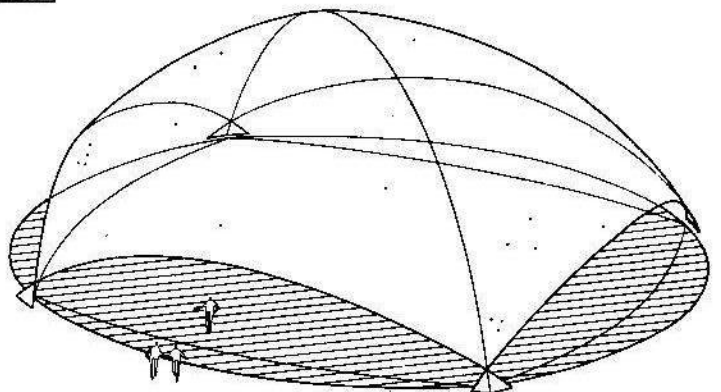
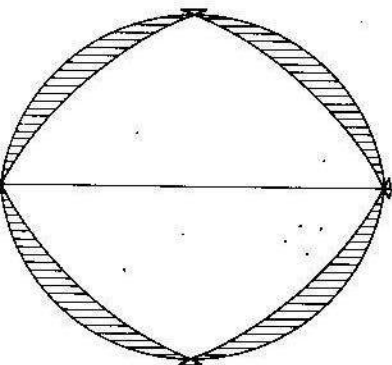
Sistemas que configuran el espacio con dos superficies esféricas unidas en cumbrera



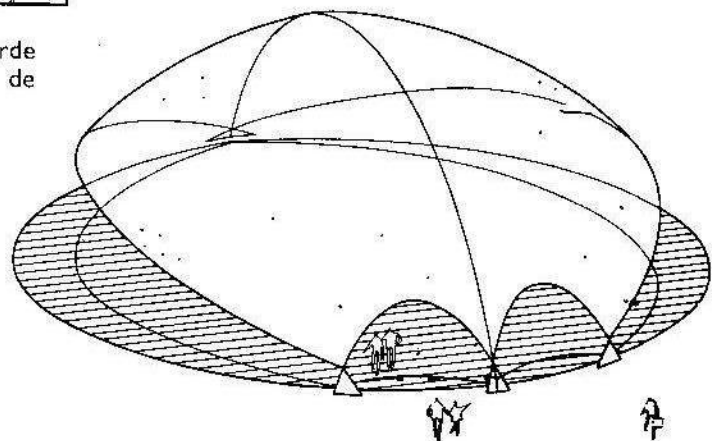
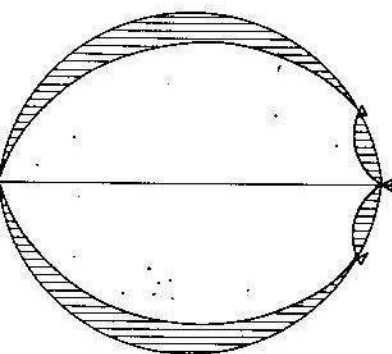
Dos segmentos esféricos con borde exterior inclinado unidos en su borde superior.



Cuatro arcos de borde inclinados hacia afuera.



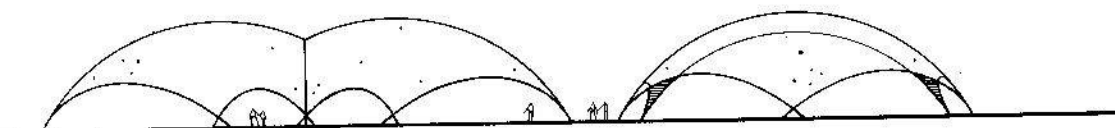
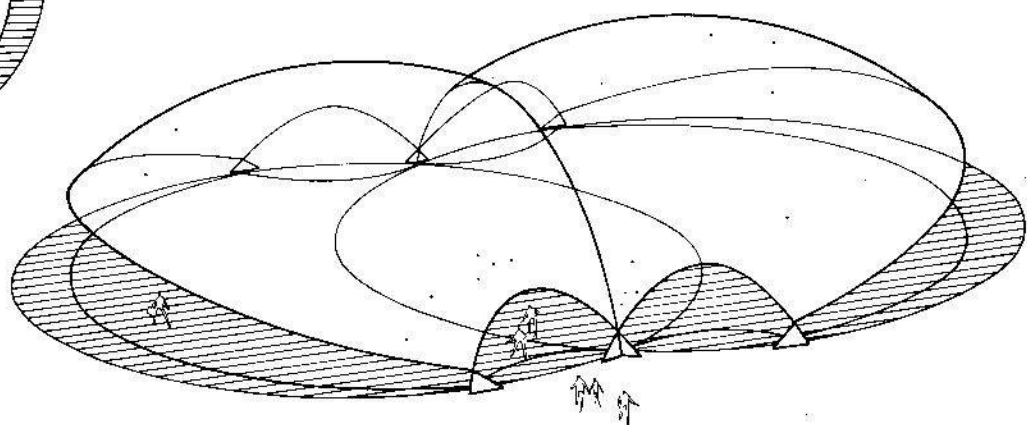
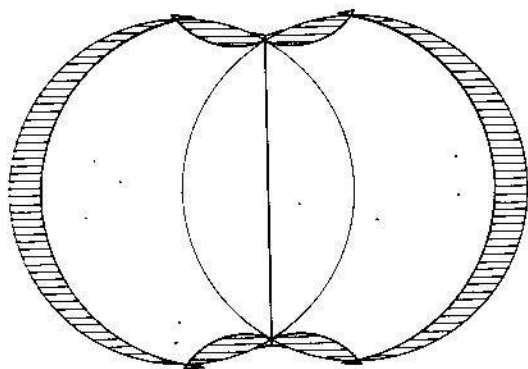
Segmentos con arcos de borde inclinados terminados en arcos de borde frontales.



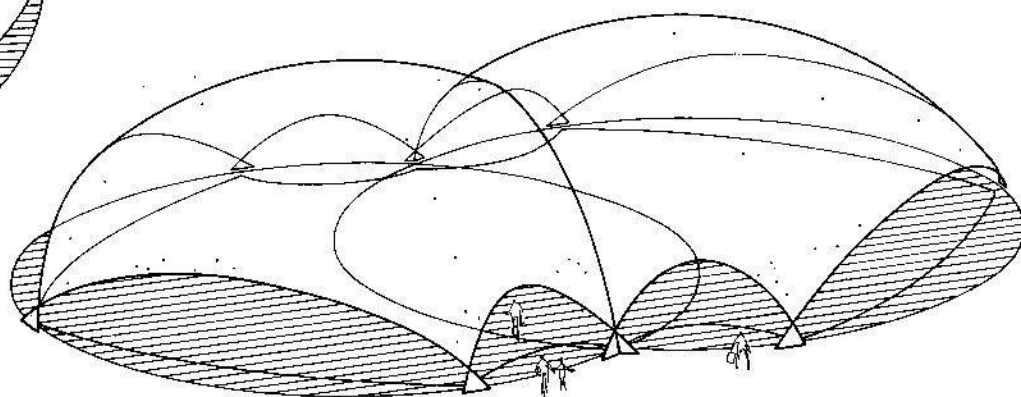
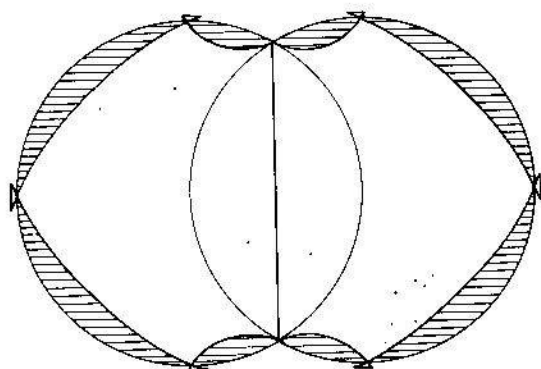
Sistemas de definición de espacio con dos superficies esféricas unidas en limahoyas



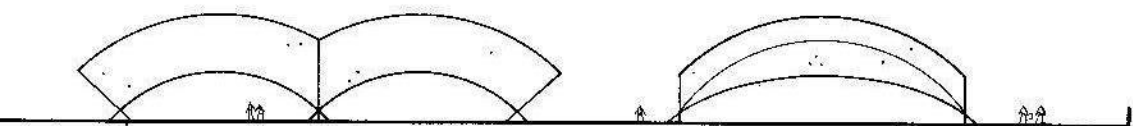
Segmentos con arcos de borde inclinados limitados frontalmente por arcos secundarios.



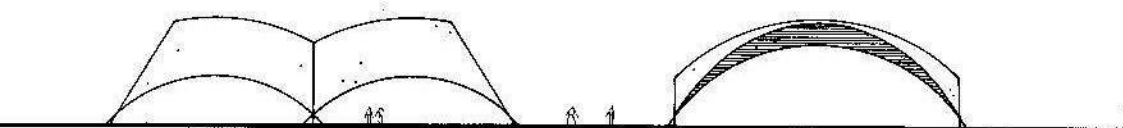
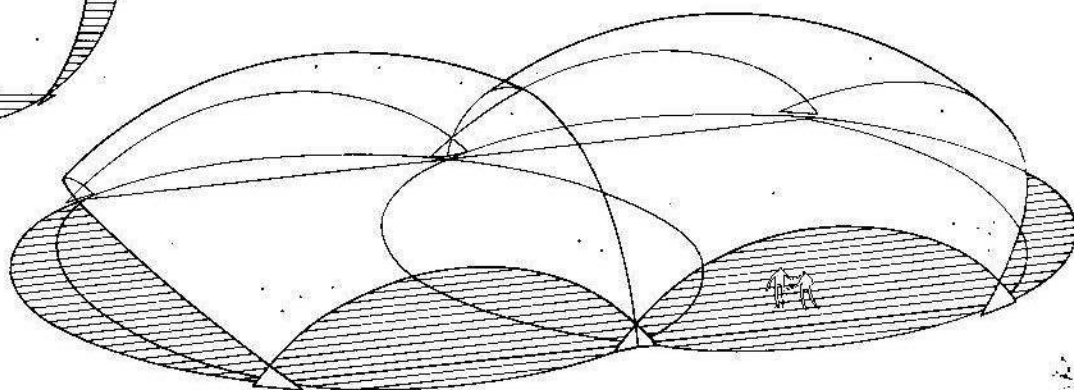
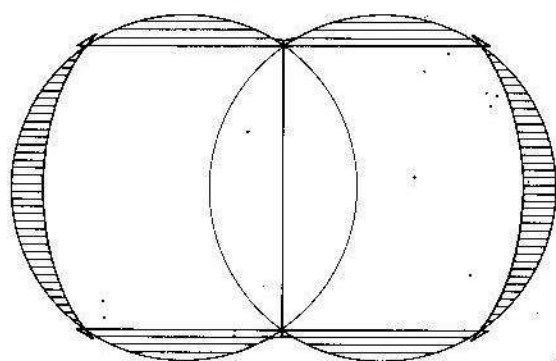
Arcos de borde de grandes dimensiones inclinados hacia afuera y terminados en arcos frontales de pequeña dimensión.



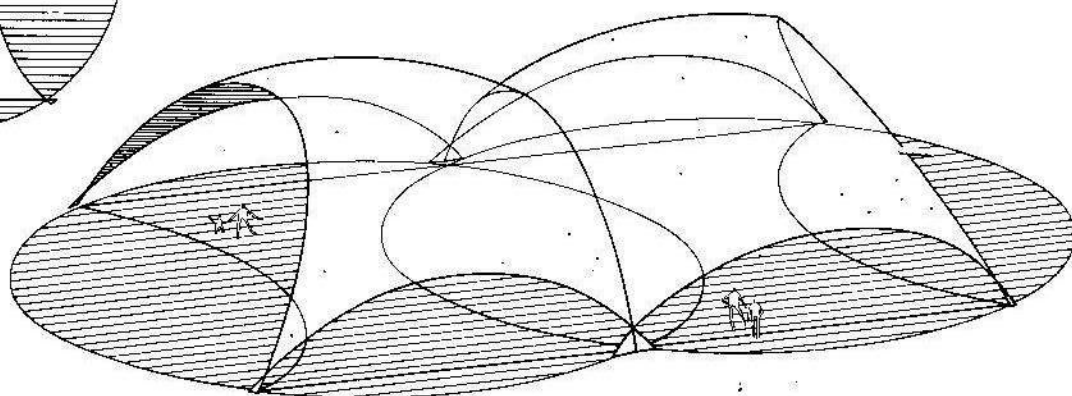
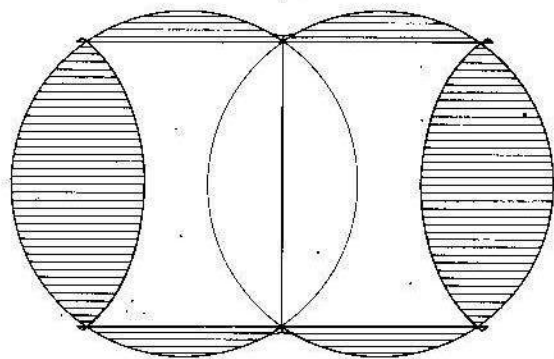
Sistemas de definición de espacio con dos superficies
esféricas unidas en limahoyas



Arcos de borde verticales combinados con
otros inclinados hacia afuera.



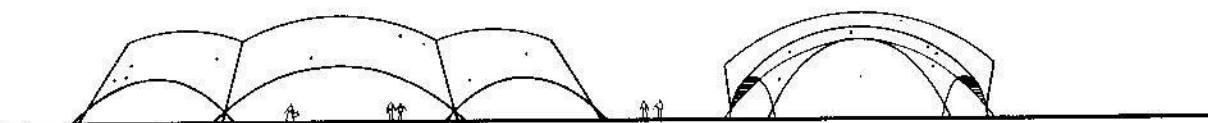
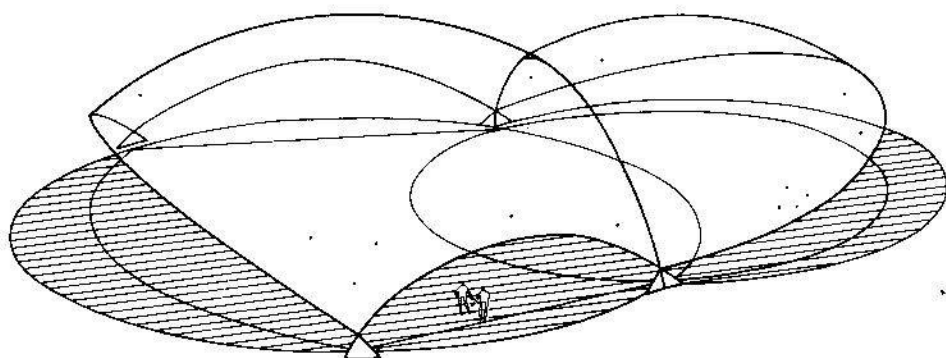
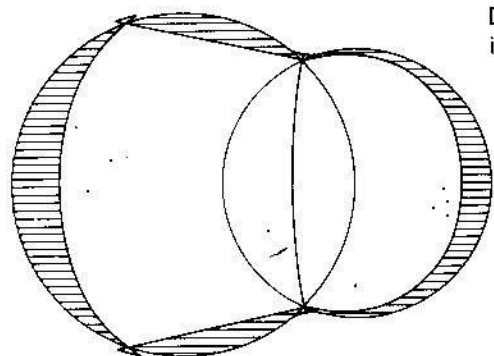
Arcos de borde verticales combinados con
otros inclinados hacia adentro.



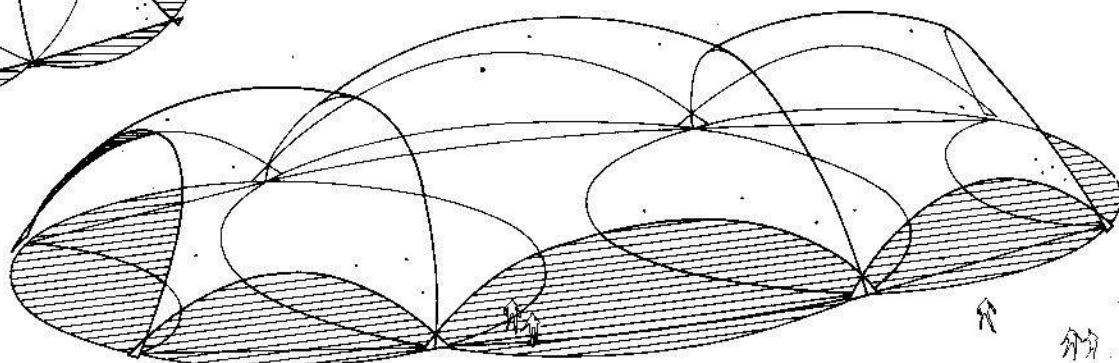
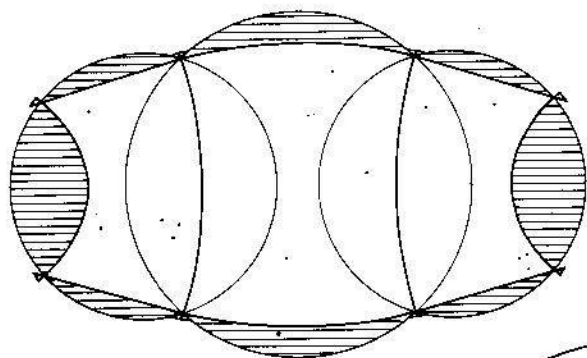
Sistemas de definición de espacio con dos superficies
esféricas de diferente curvatura.



Dos superficies esféricas con arcos verticales de borde y otros inclinados de limitación de los segmentos.



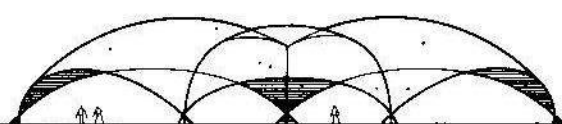
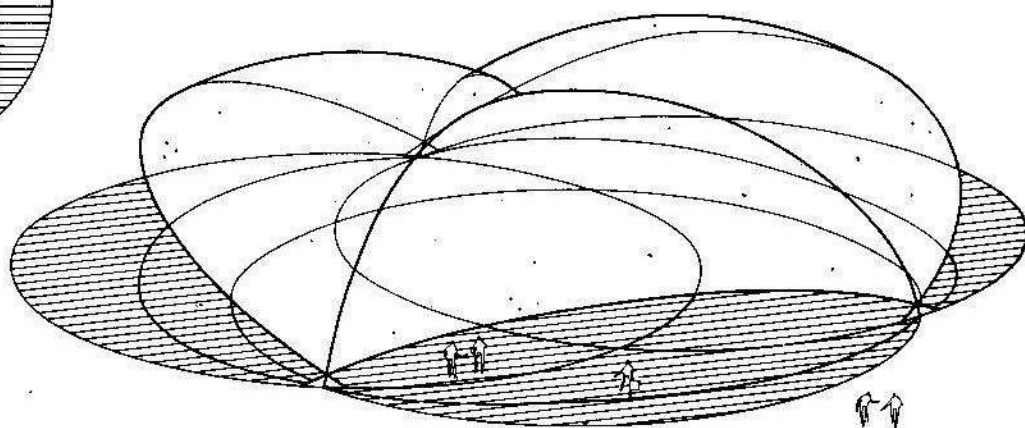
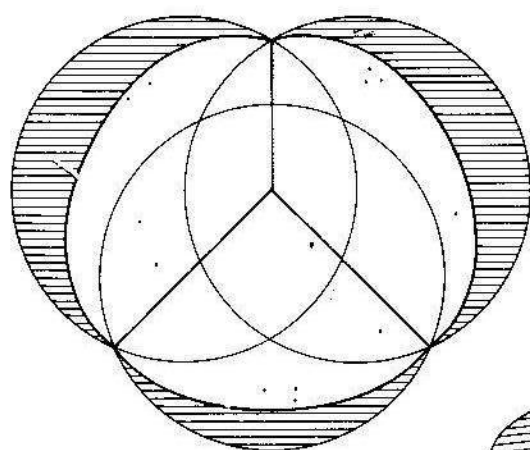
Tres superficies esféricas con arcos de borde verticales e inclinados.



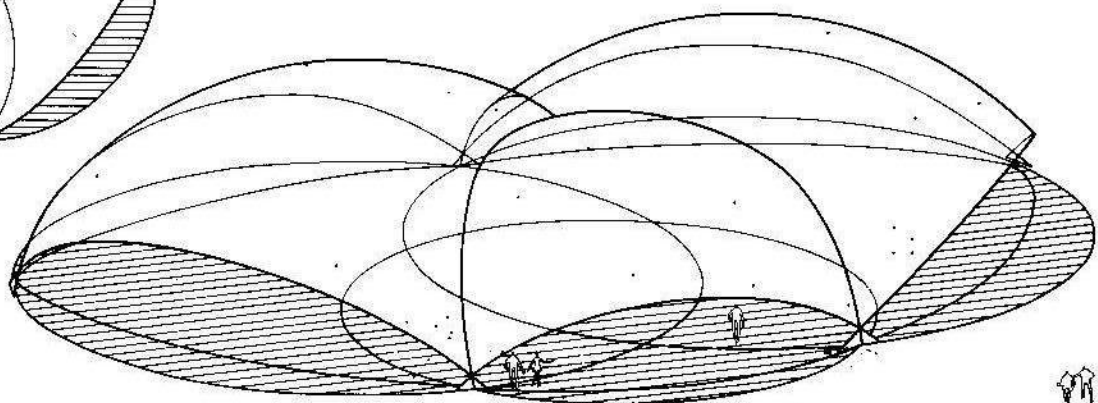
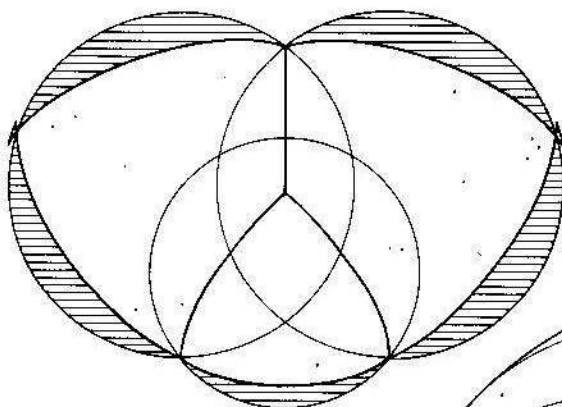
Sistemas de definición de espacio con tres superficies esféricas unidas en limahoyas



Igual curvatura de las superficies esféricas y arcos de borde inclinados.

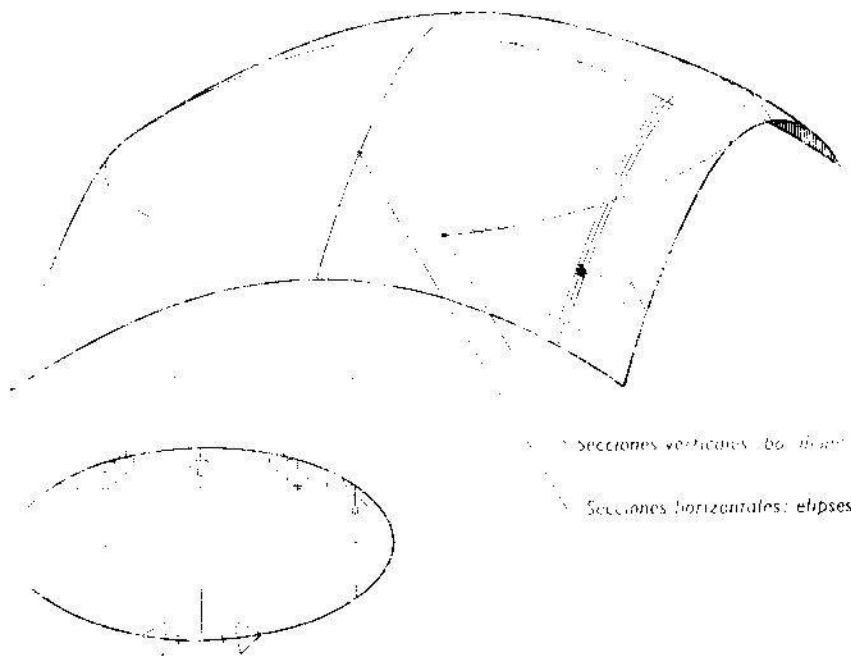


Curvatura desigual de las superficies esféricas y arcos de borde inclinados hacia afuera.



Geometría y mecanismo resistente de las láminas de traslación

Generación de la superficie: una superficie de traslación se genera por movimiento de una curva plana (generatriz) paralelamente a sí misma a lo largo de otra curva plana (directriz) que usualmente se halla en un plano perpendicular al plano de la generatriz.

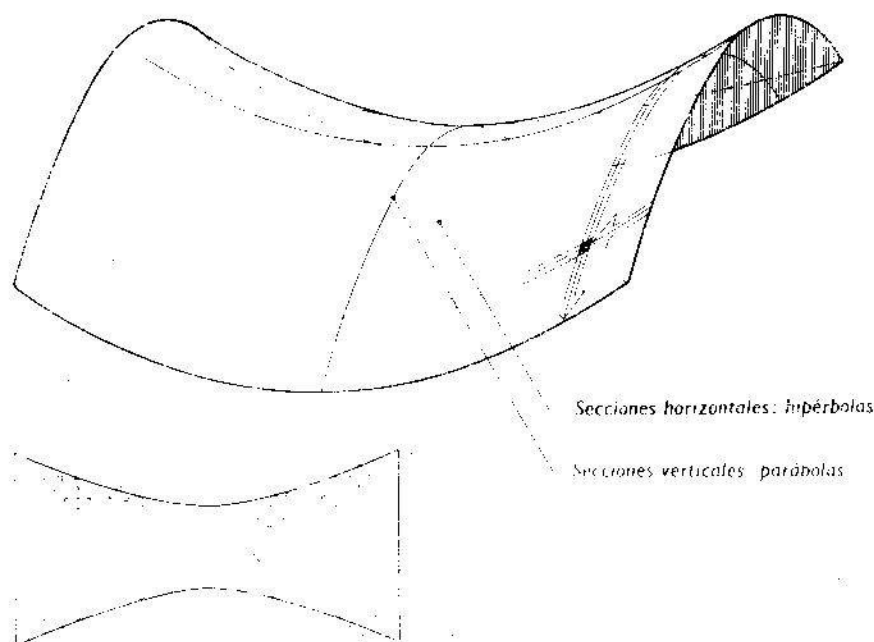


Secciones verticales: bóvedas

Secciones horizontales: elipses

Paraboloides elíptico de curvatura positiva.

Las cargas se transmiten mediante mecanismos de arcos, según dos ejes, a los bordes. Estos han de recibir el empuje de los arcos, y han de ser rigidizados en consecuencia. En el caso de una terminación horizontal del borde inferior, el borde ha de recibir las resultantes de los esfuerzos de los arcos de los dos ejes. A causa de que su forma (elipse) se aproxima a la curva funicular de las tracciones para las componentes horizontales resultantes del peso propio, la viga de borde es poco solicitada a flexiones.



Secciones horizontales: hipérbolas

Secciones verticales: parábolas

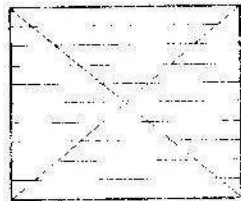
Paraboloides hiperbólico. Superficie de curvatura negativa.

Las cargas se transmiten a los bordes mediante un mecanismo de arcos según un eje y mediante un mecanismo de suspensión según el otro eje, los bordes han de recibir el empuje del arco según una dirección y la tracción de suspensión según la otra. En el caso de terminación horizontal del borde inferior, éste ha de recibir los resultantes del empuje y de la tracción. A causa de su forma curva, la viga de borde puede transmitir esas fuerzas horizontales a los ángulos sin grandes flexiones.

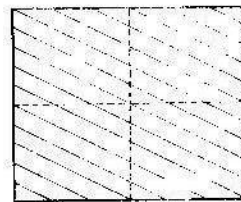
Generación de superficies en «línea de montón» con generatrices rectas (superficies regladas de curvatura negativa)



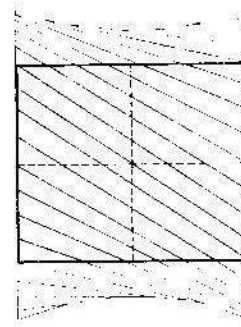
Conoide.



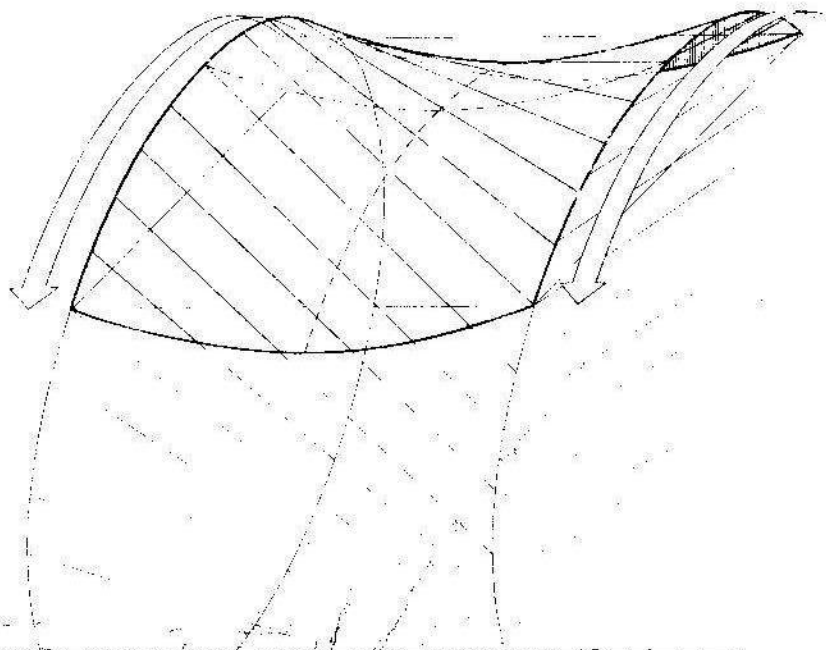
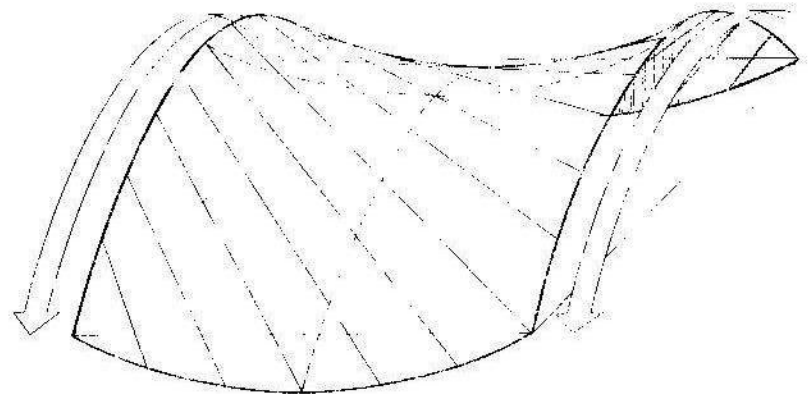
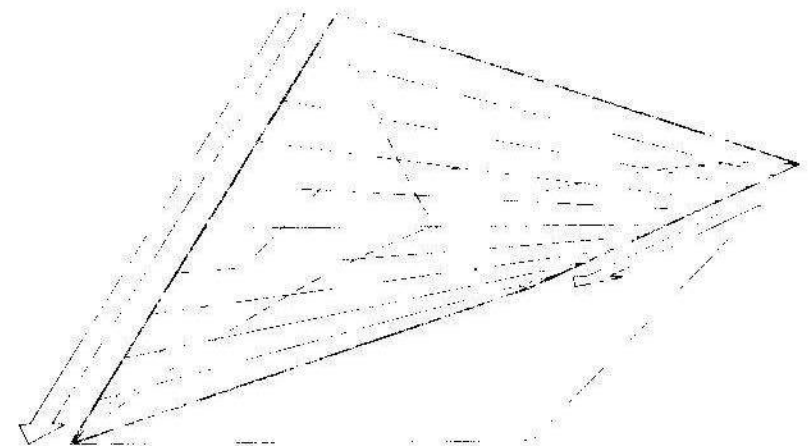
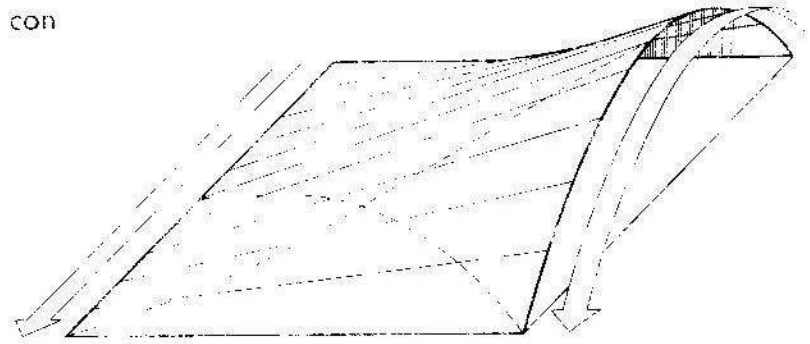
Paraboloide hiperbólico.



Paraboloide hiperbólico.

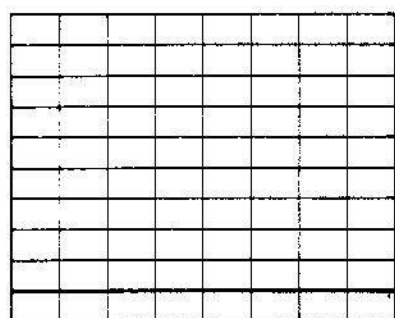
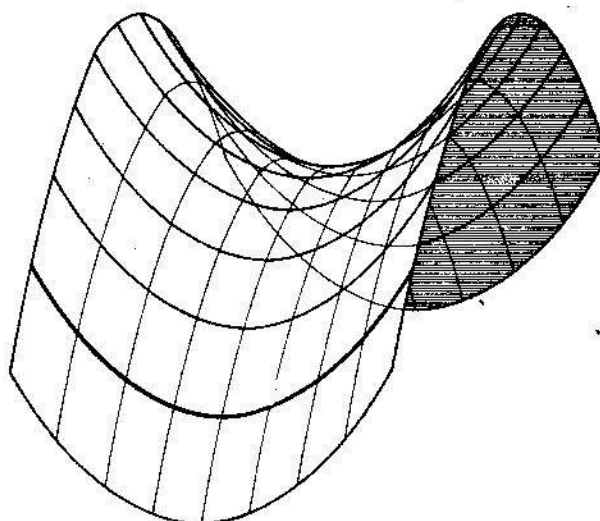
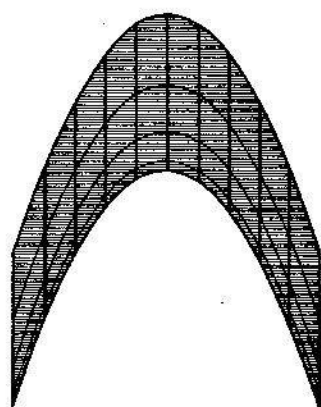
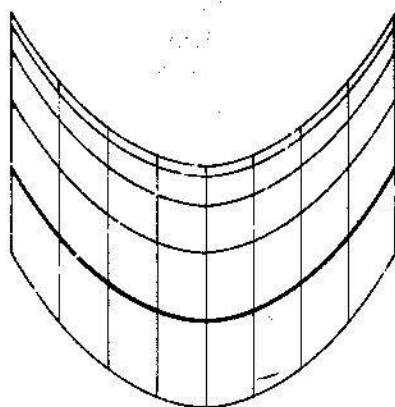


Hiperboloide.

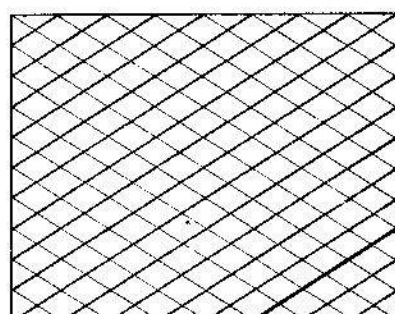
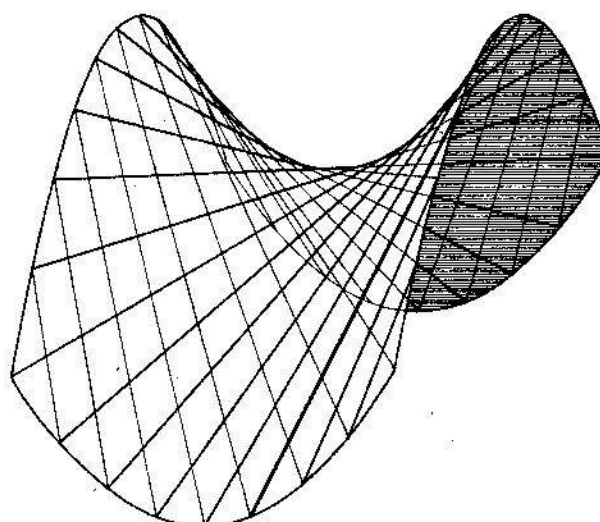
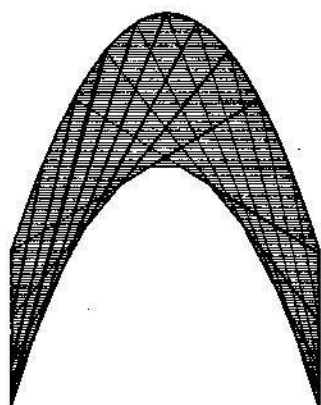
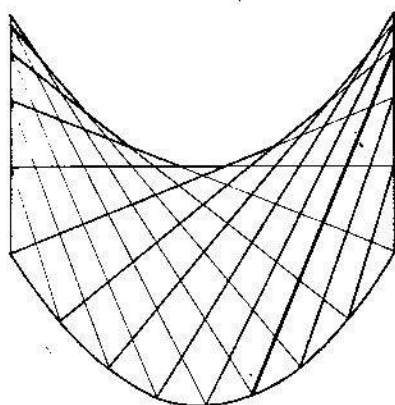


Una superficie reglada se engendra moviendo una recta (generatriz) apoyada sobre dos líneas fijas curvas o rectas (directrices).

Generación de superficies «hypar» (paraboloide hiperbólico)

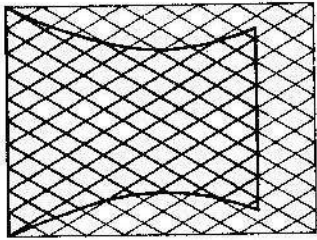
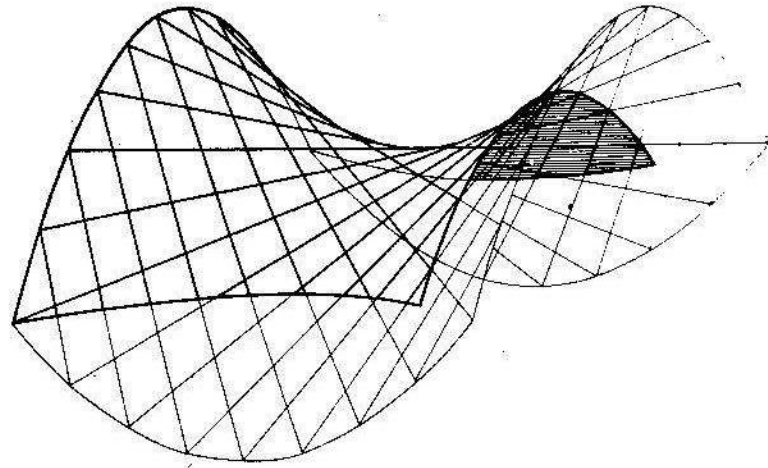
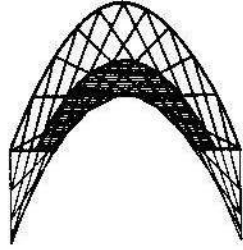
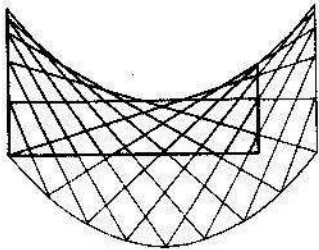


Generación como superficie de translación: la parábola con concavidad hacia arriba (generatriz) desliza sobre la parábola con concavidad hacia abajo (directriz); o inversamente.

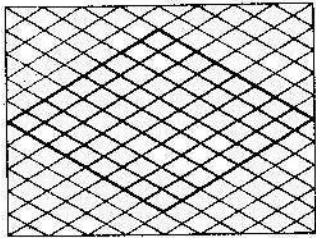
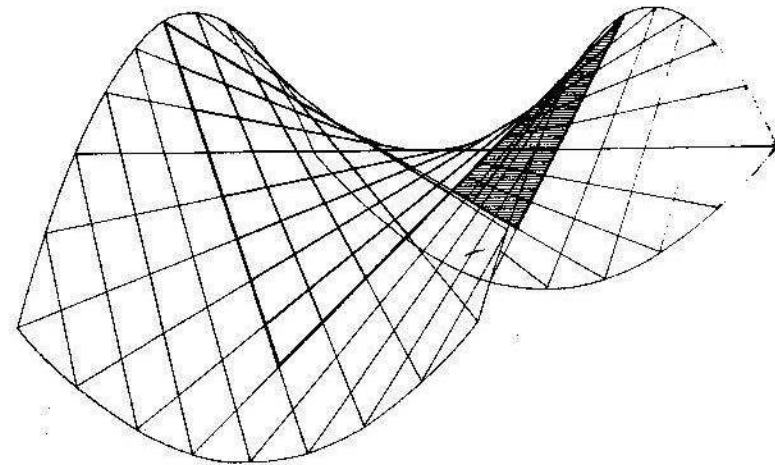
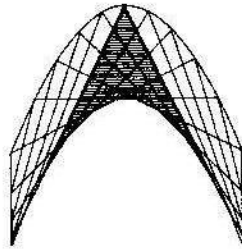
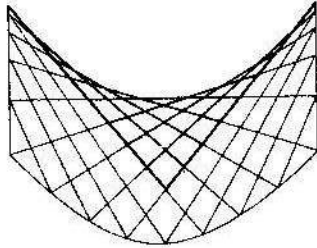


Generación como superficie reglada: la línea recta (generatriz) se desliza sobre dos parábolas o sobre dos líneas rectas (directrices) que no están en el mismo plano.

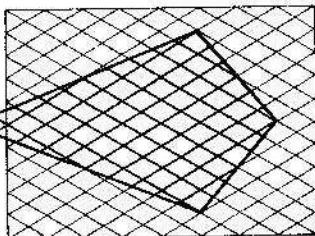
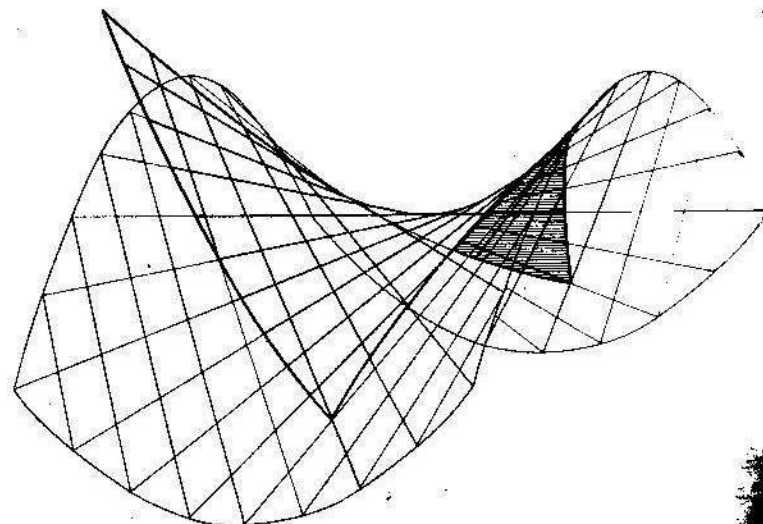
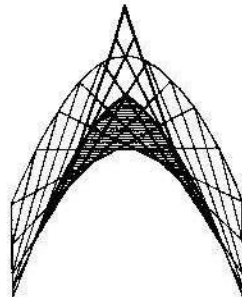
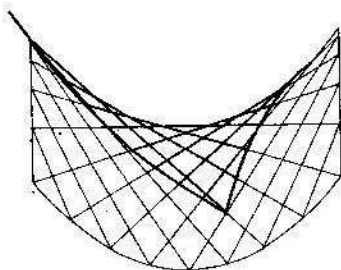
Secciones curvas de las superficies «hypar» (paraboloides hiperbólicos)



Las secciones verticales son parábolas y las horizontales hipérbolas.

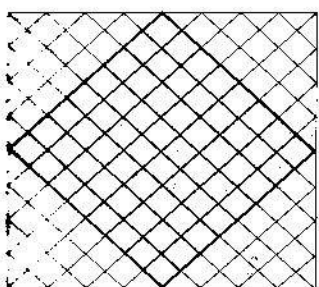
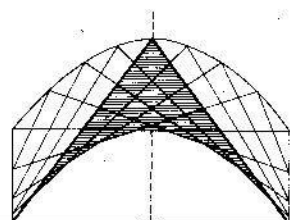
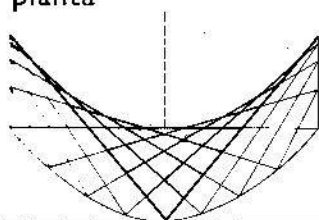


Las secciones verticales paralelas a una generatriz (interpretación como superficie reglada) originan líneas rectas.

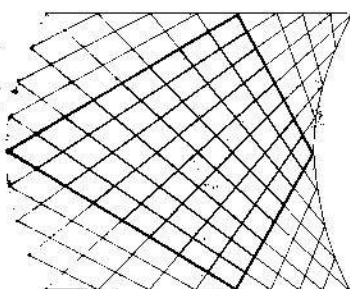
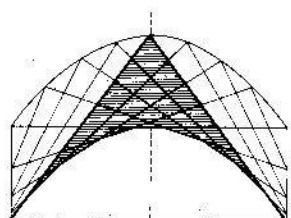
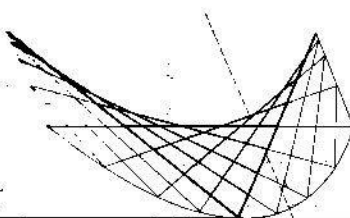
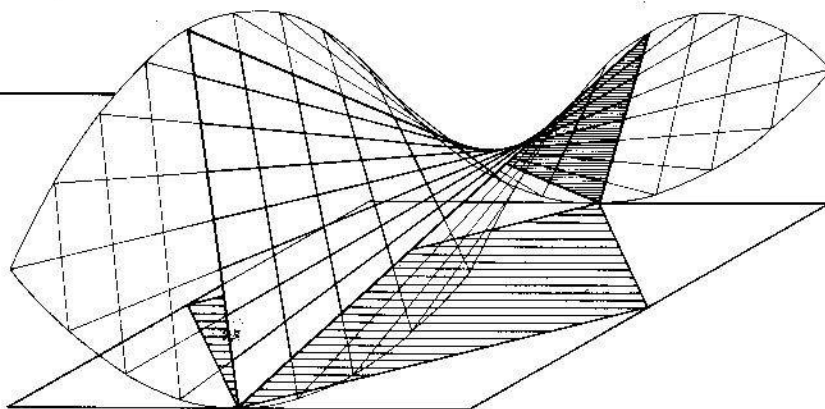


Las secciones verticales inclinadas respecto de la generatriz originan parábolas convexas y/o cóncavas.

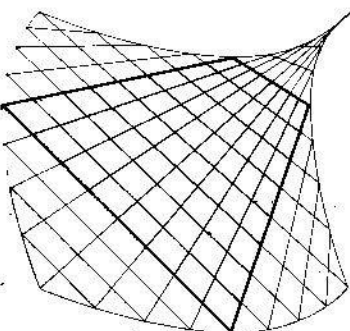
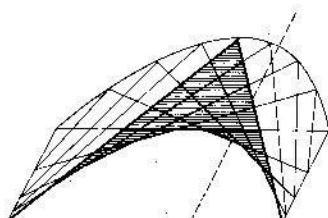
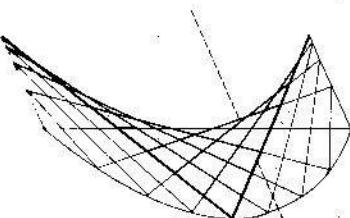
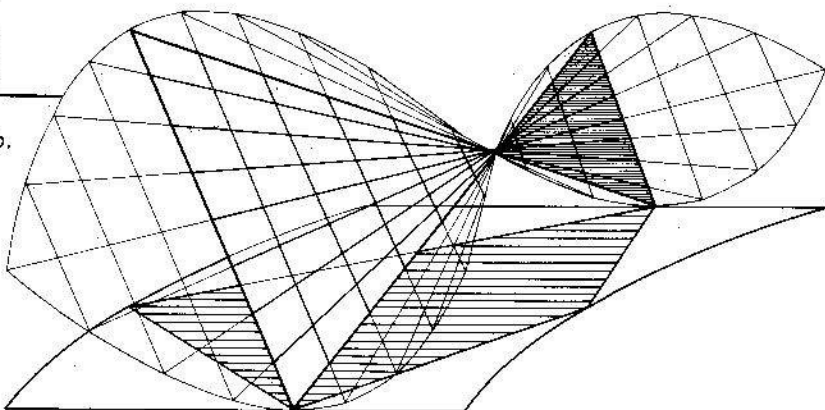
Influencia de la posición en el espacio del eje de la «hypar» sobre la forma de la superficie y sobre su planta



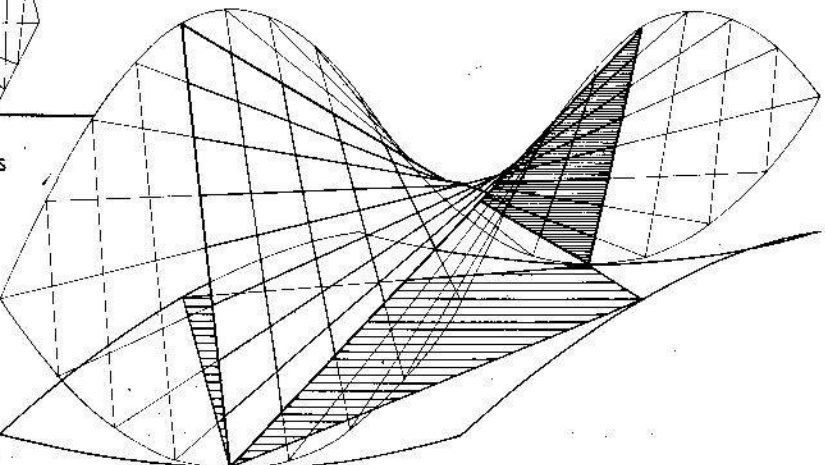
Eje vertical en los dos alzados.



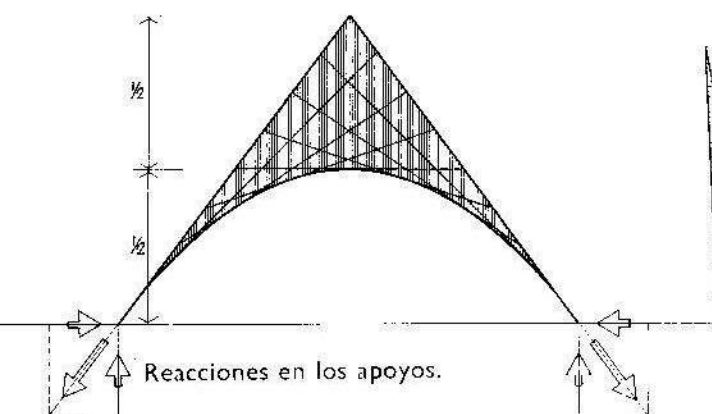
Eje inclinado en un alzado.



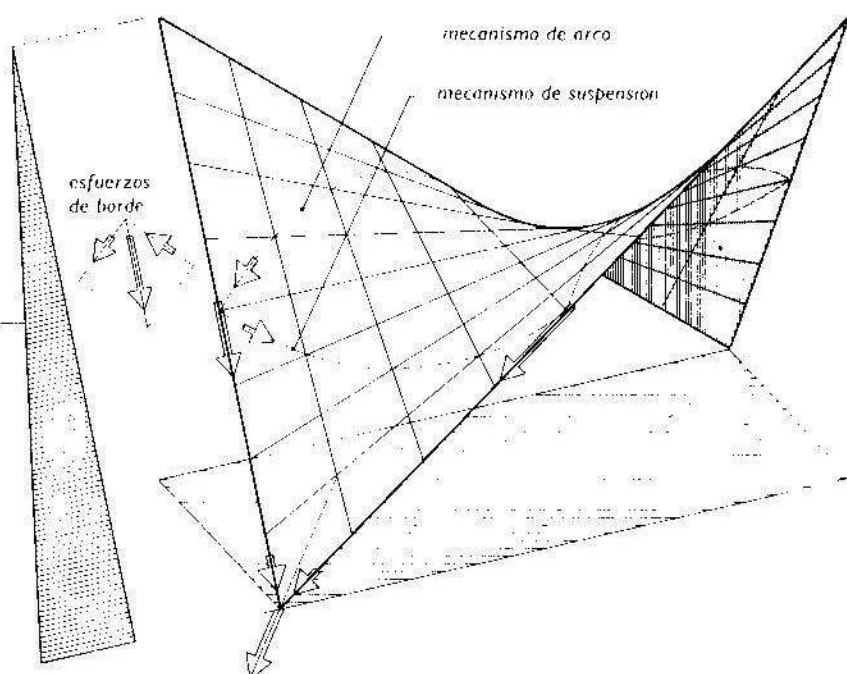
Eje inclinado en ambos alzados.



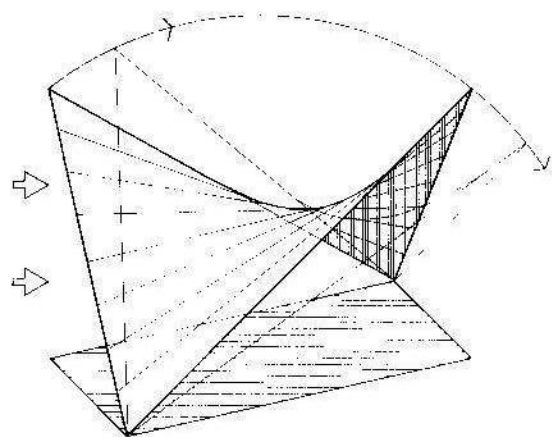
Mecanismo sustentante del paraleloide hiperbólico



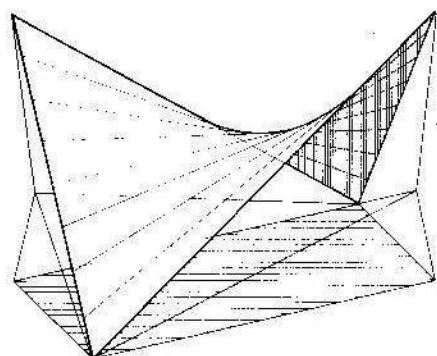
A causa de la inclinación de la resultante final, los apoyos han de recibir también un empuje horizontal.



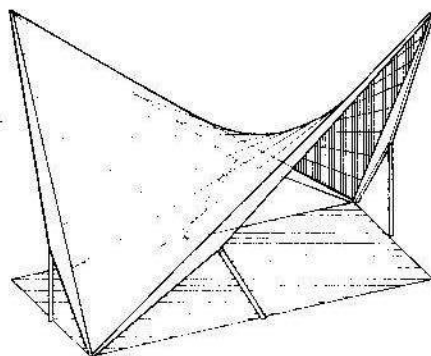
La lámina «hypar» funciona según un eje, como un mecanismo de arco, y según el otro, como un mecanismo colgante. Así, mientras en una dirección la lámina se deforma bajo tensiones de compresión, tiende a ceder, se lo impiden las tensiones de tracción en la otra dirección. La resultante de las tensiones superficiales actúa en dirección del borde. Por consiguiente, el borde permanece libre de flexiones.



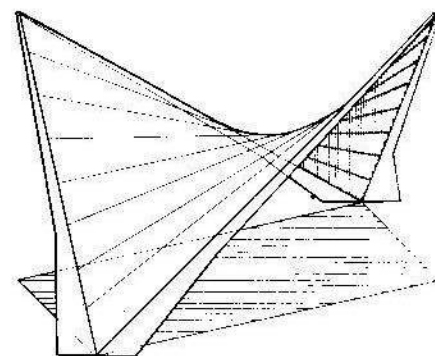
Estabilización contra el pandeo de la lámina.



Anclaje de los puntos altos, con cables.

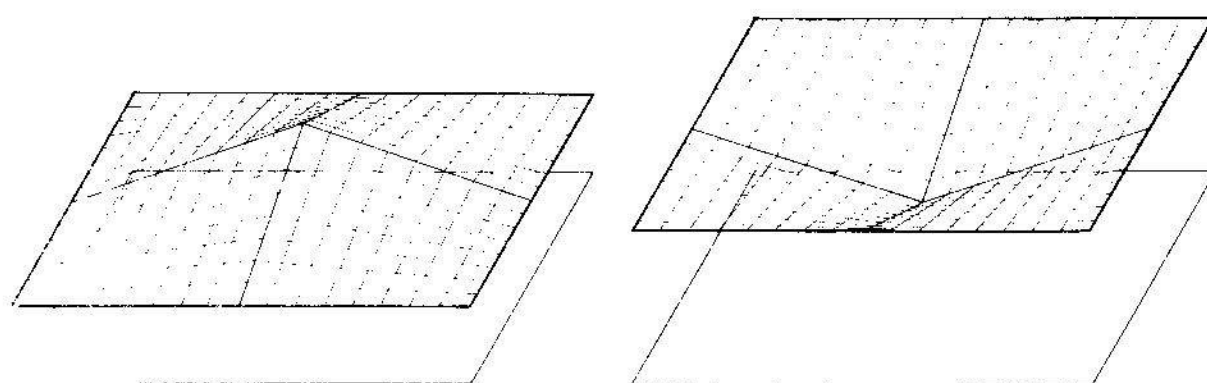


Apoyo a las vigas de borde con puntales.

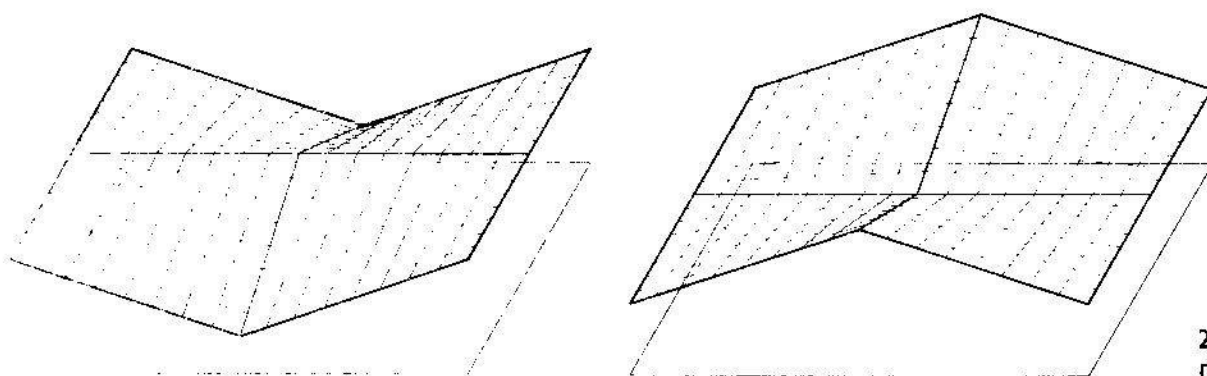


Conexión rígida de los puntos de apoyo con la cimentación.

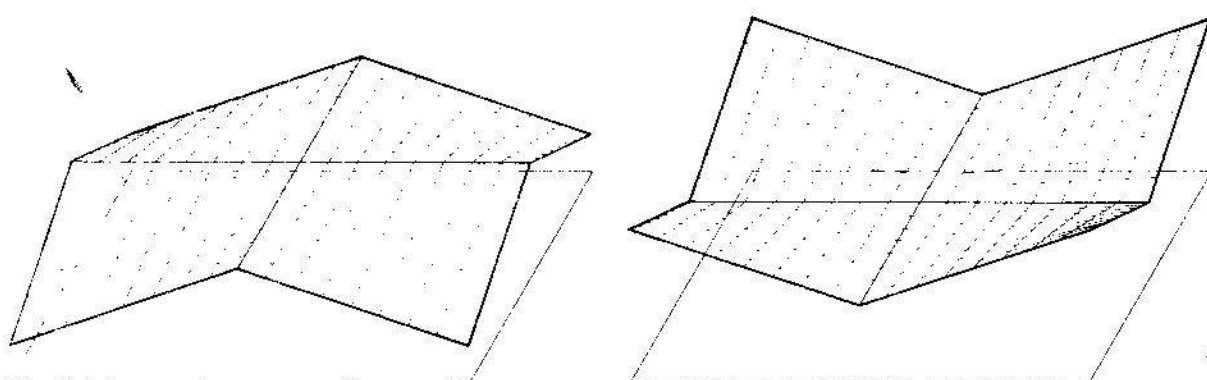
Composiciones de superficies «hypar» sobre planta cuadrada



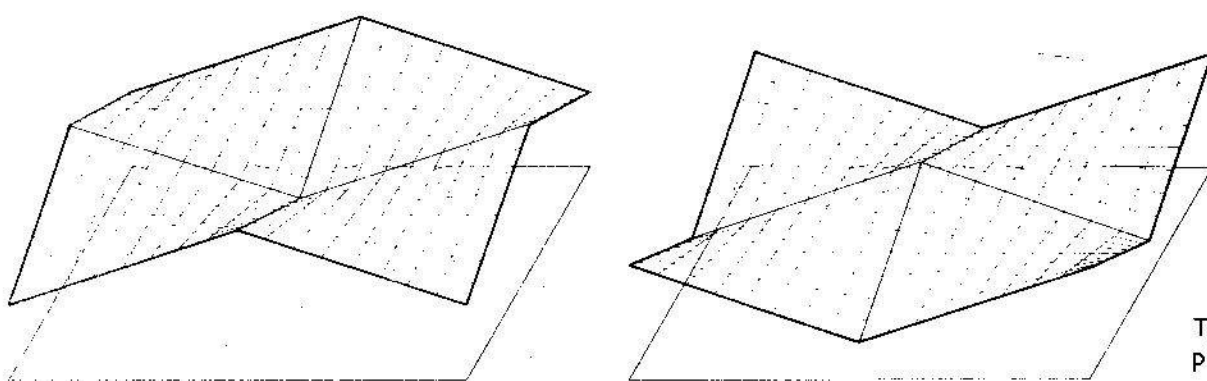
Los 4 bordes a un nivel.



2 bordes; 2 pliegues a un nivel.

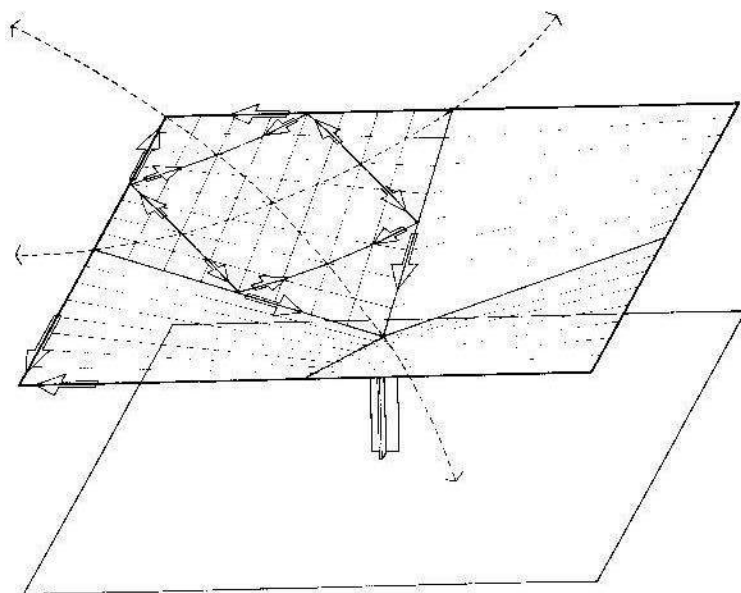


4 pliegues a un nivel.

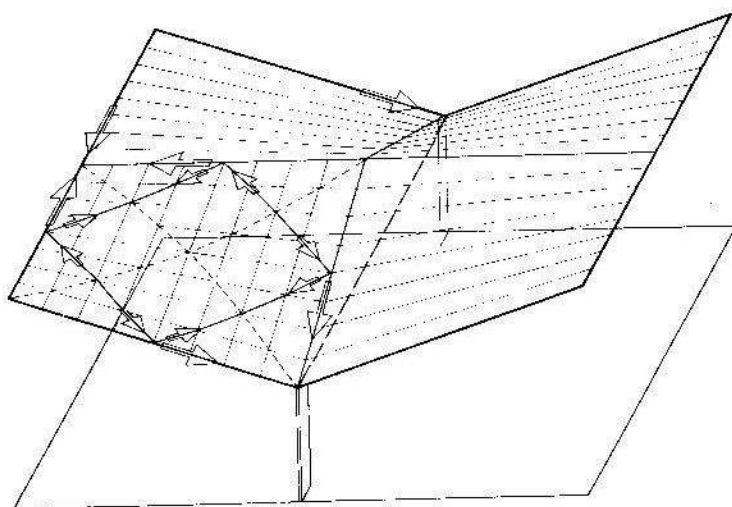


Todos los bordes y los
pliegues inclinados.

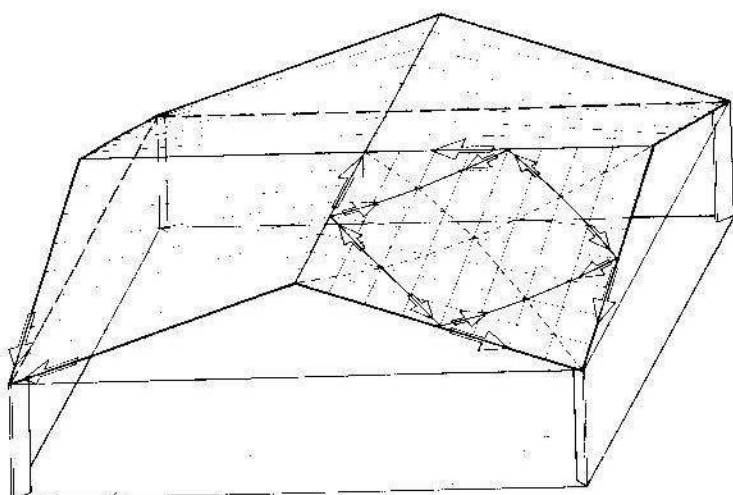
Mecanismo sustentante de sistemas compuestos por cuatro superficies «hypar»



Las resultantes del mecanismo de arco y del mecanismo colgante someten los bordes a tracción y los pliegues a compresión. En los apoyos, las componentes horizontales de las resultantes finales se compensan entre sí.

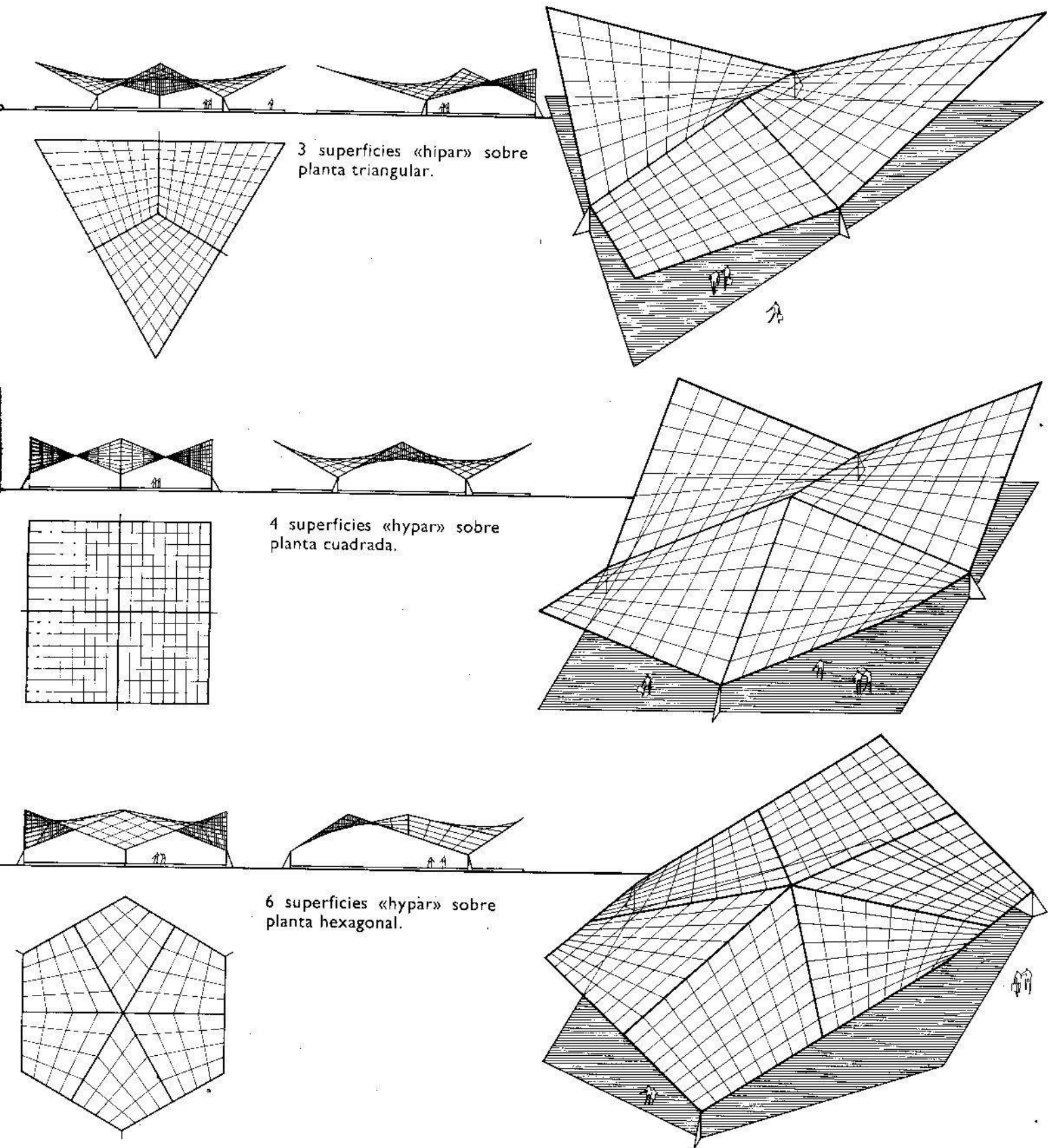


Las resultantes del mecanismo de arco y del mecanismo colgante someten los bordes y los pliegues bajos a compresión, y el caballete a tracción.

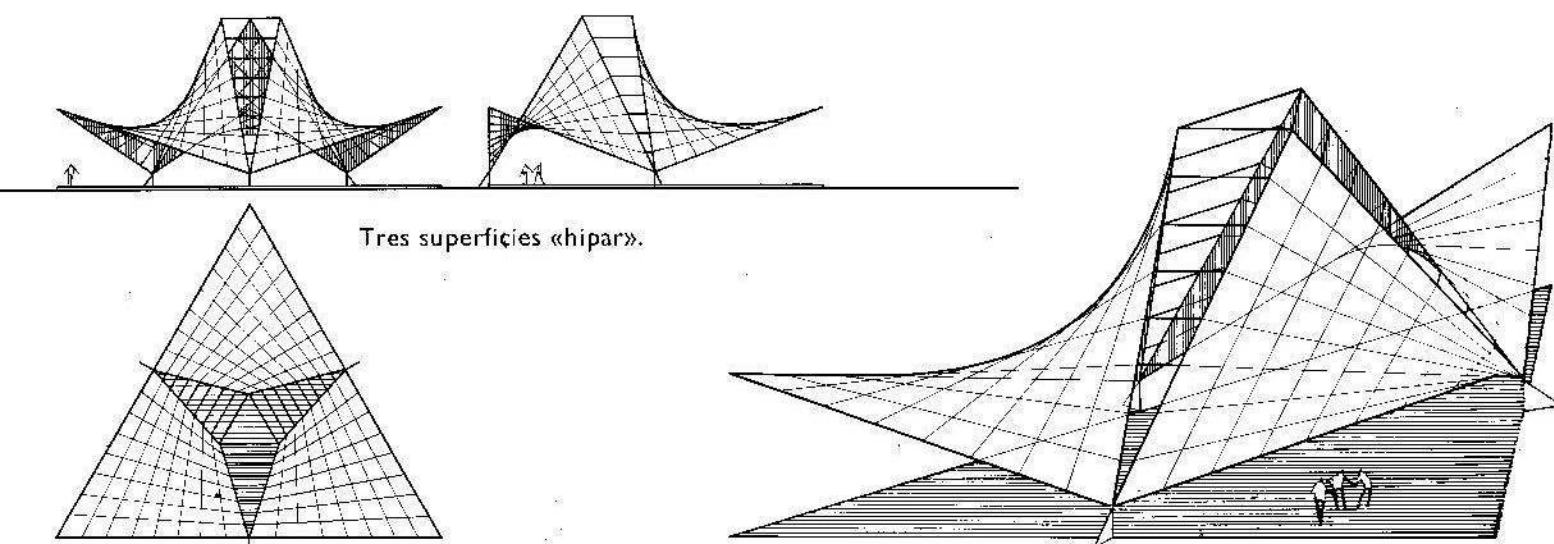
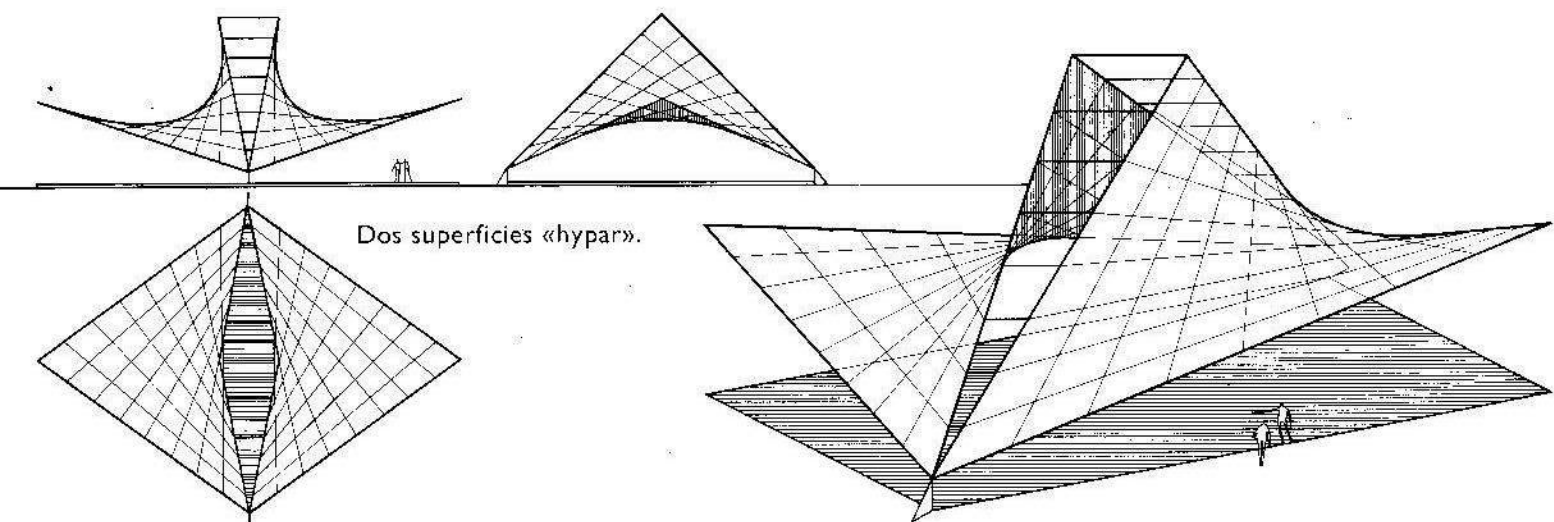
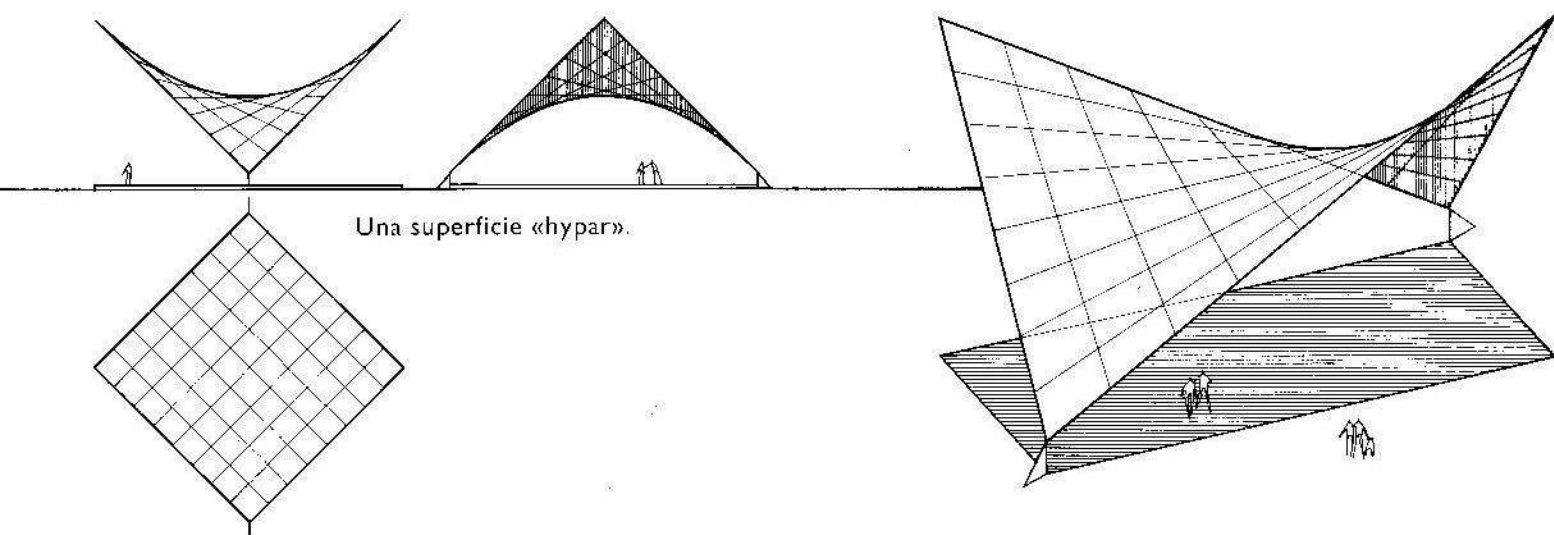


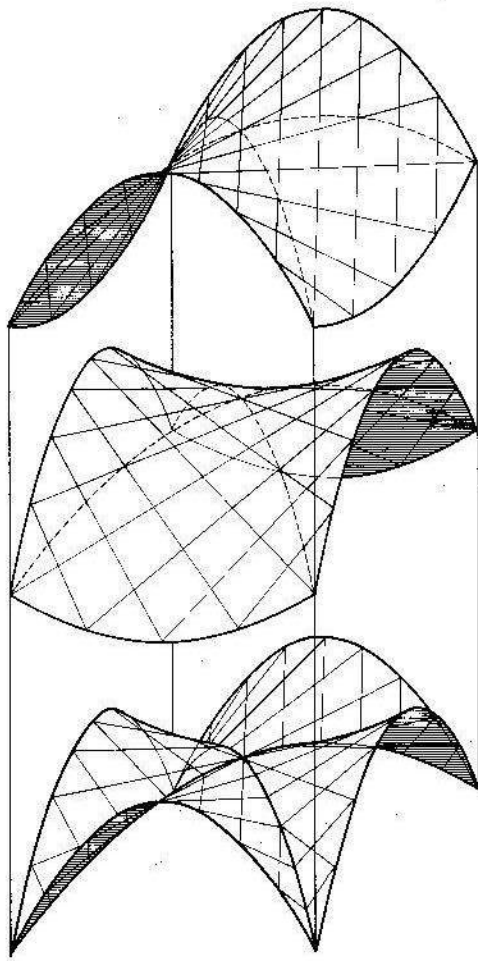
Las resultantes del mecanismo de arco y del mecanismo colgante someten los bordes y la cumbrera a compresión. En los apoyos, los tirantes reciben la componente horizontal de la resultante final.

Sistemas estructurales mediante composición de superficies «hypar» con bordes rectos

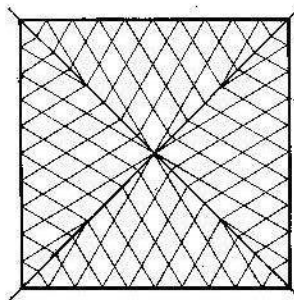


Sistemas estructurales compuestos por simples
paraboloides hiperbólicos de bordes rectos

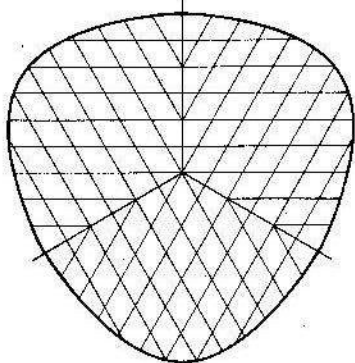
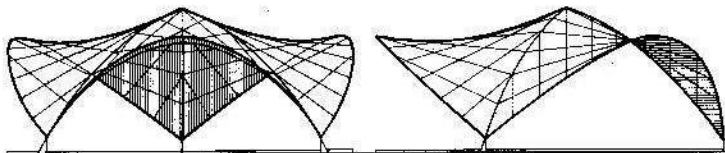
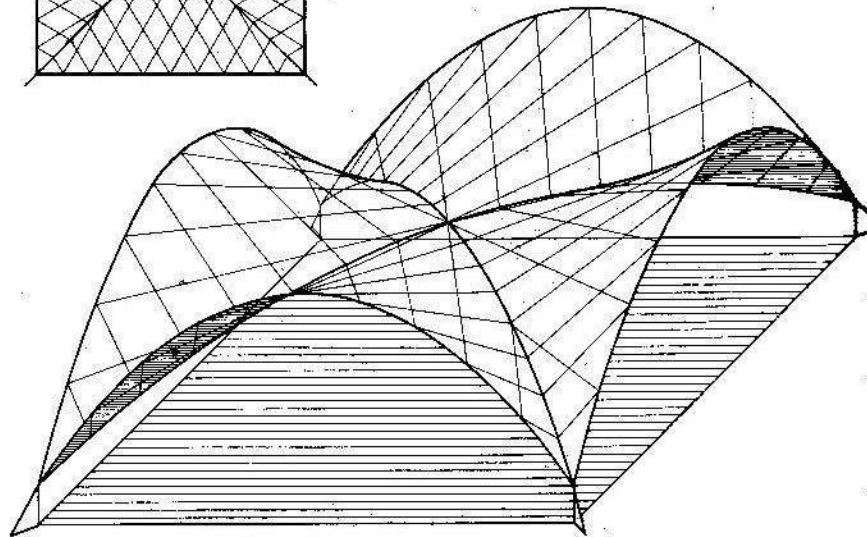




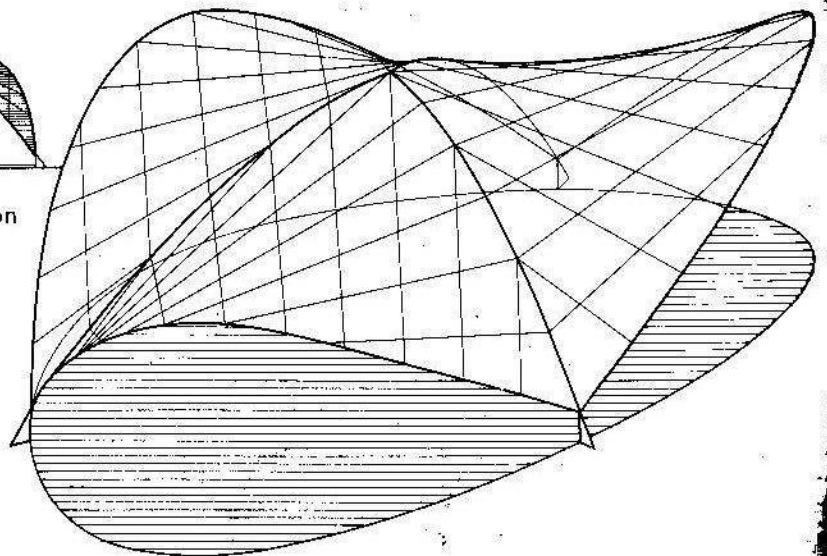
Sistemas estructurales compuestos por superficies «hypar» que se penetran entre sí, con bordes curvos



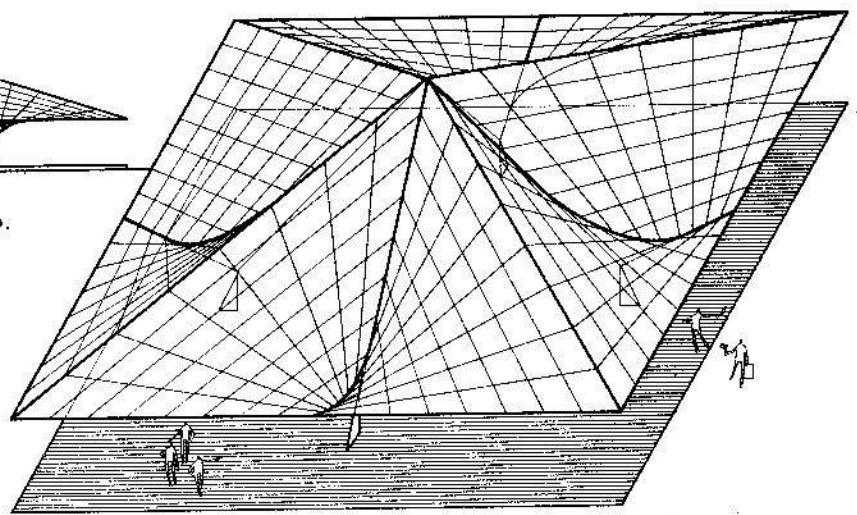
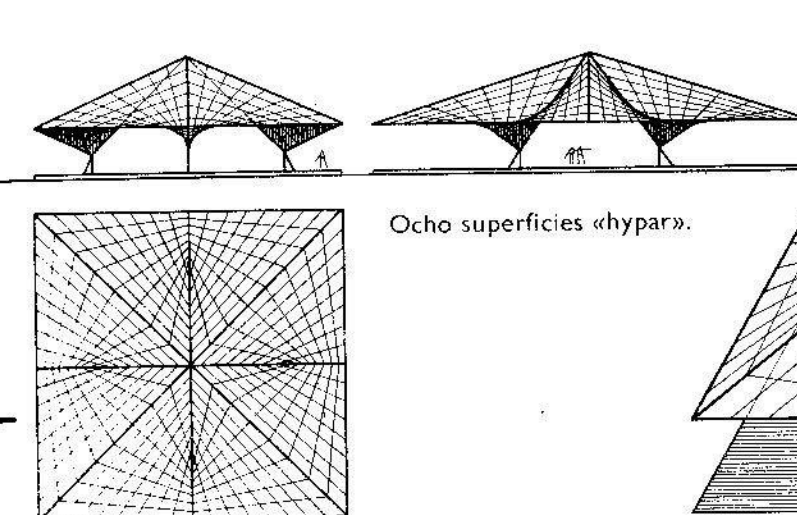
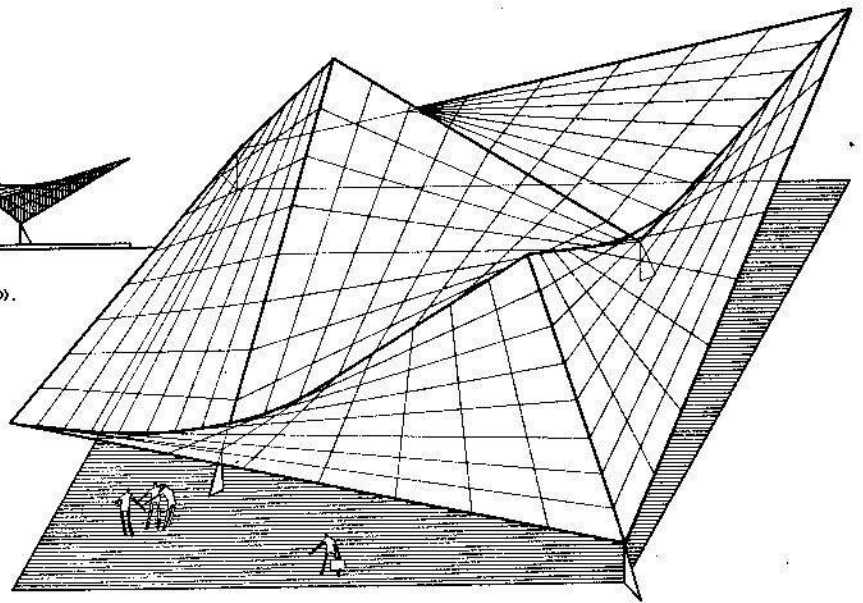
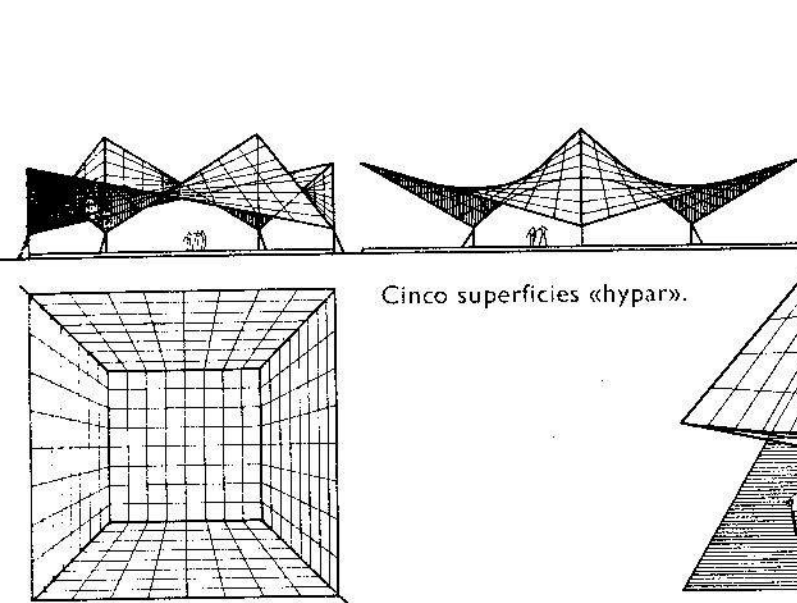
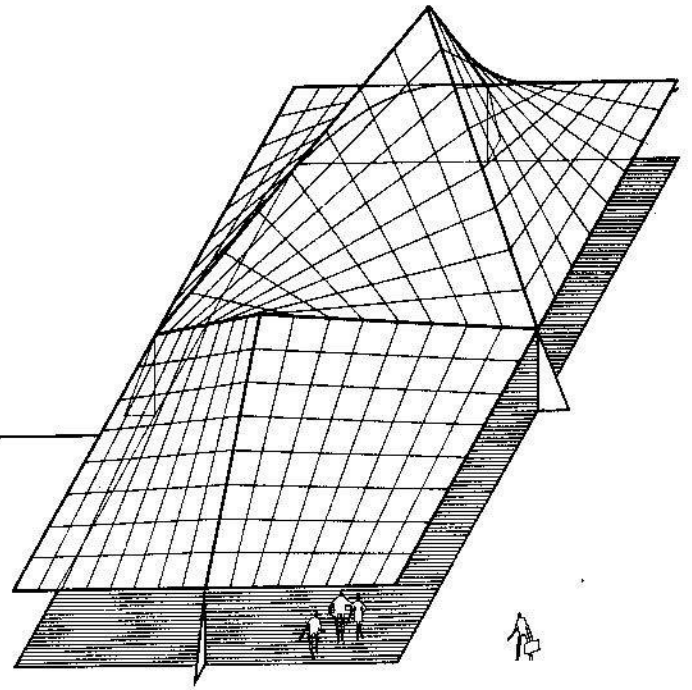
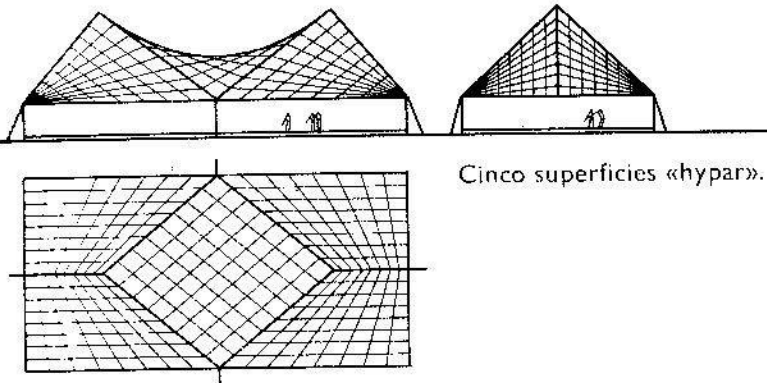
Cuatro superficies «hypar» con arcos de borde verticales.



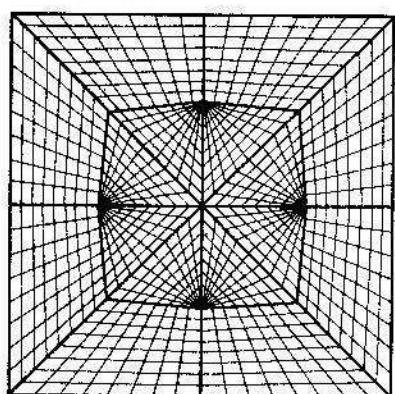
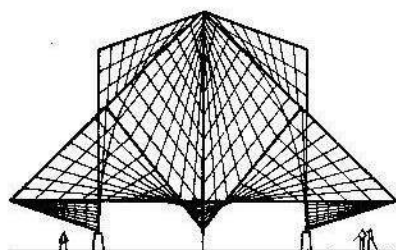
Tres superficies «hypar» con arcos de borde inclinados.



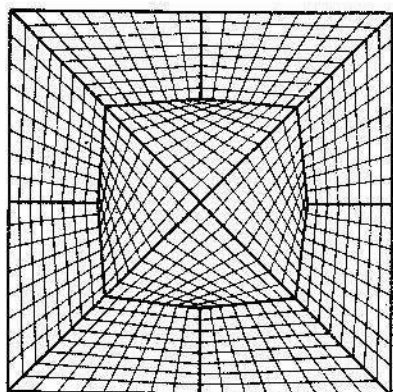
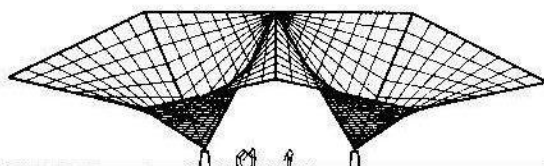
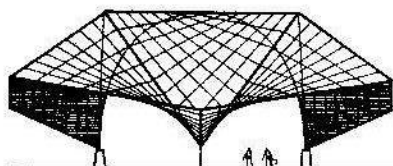
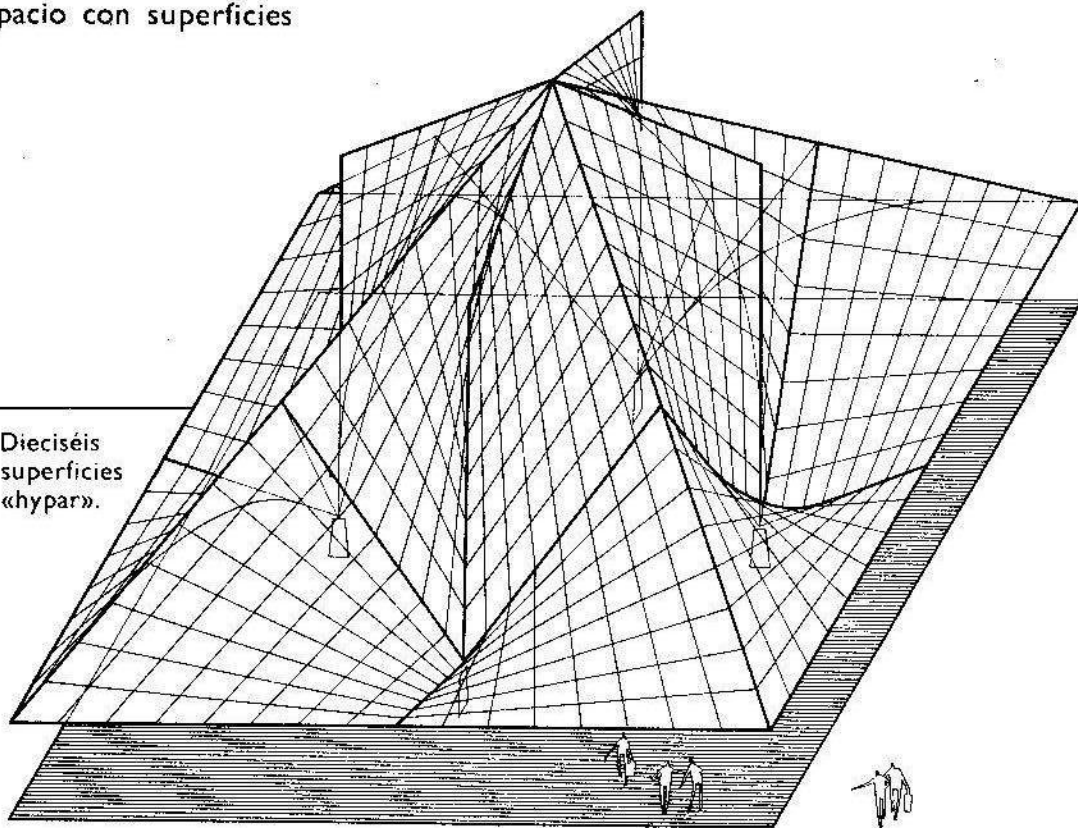
Sistemas que delimitan el espacio con superficies «hypar» de bordes rectos



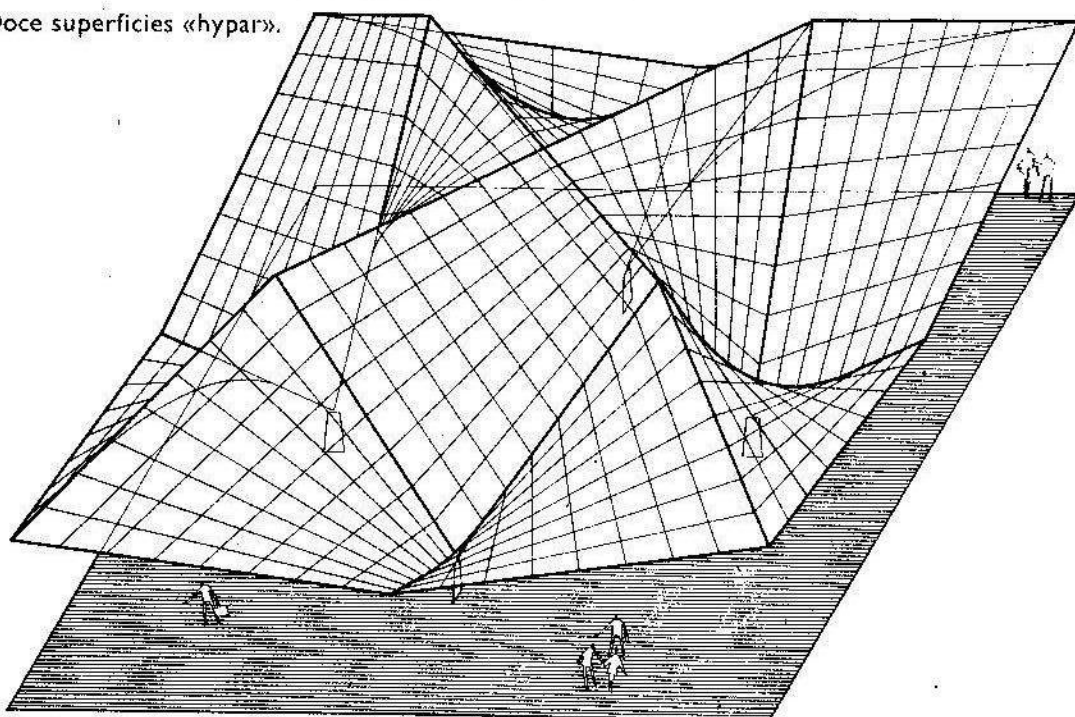
Sistemas que delimitan el espacio con superficies
«hypar» de bordes rectos



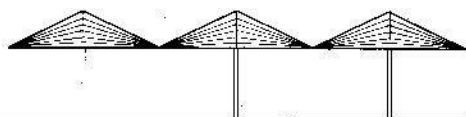
Dieciséis
superficies
«hypar».



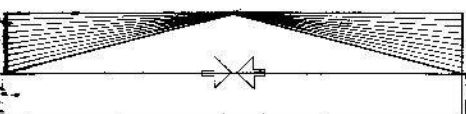
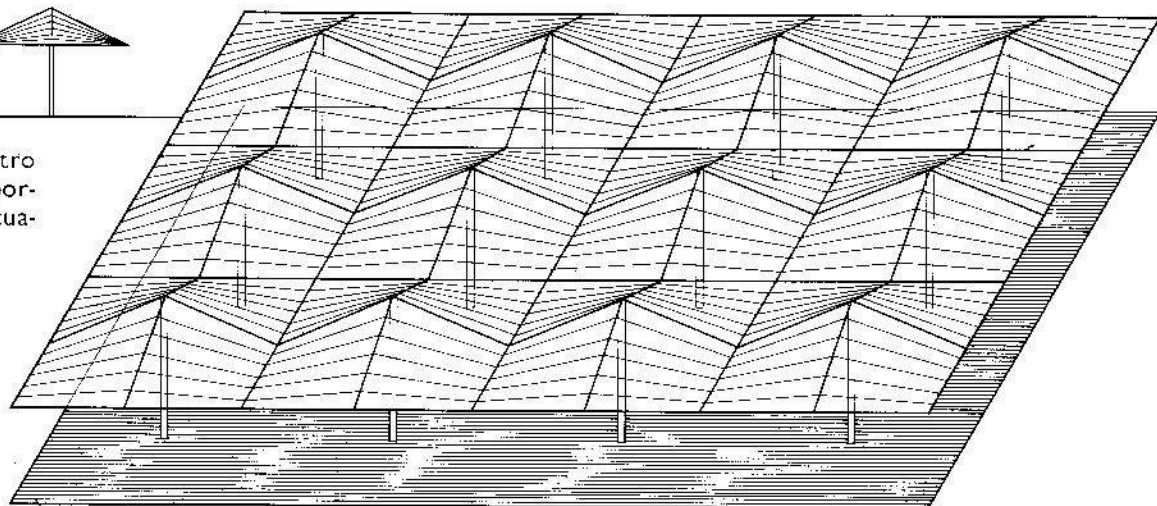
Doce superficies «hypar».



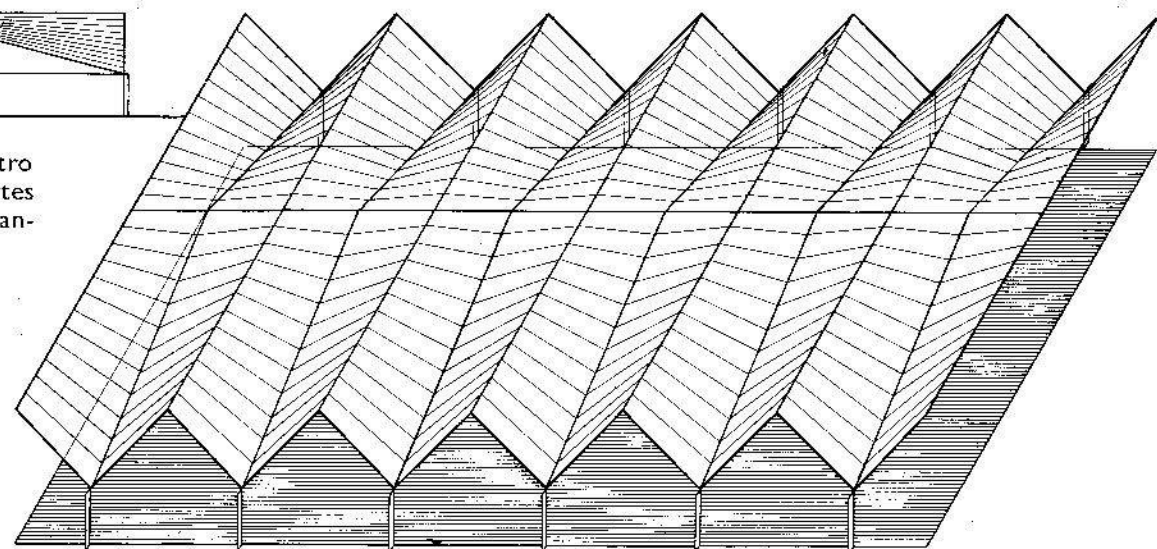
Sistemas de láminas «hypar» para cobertura de grandes espacios



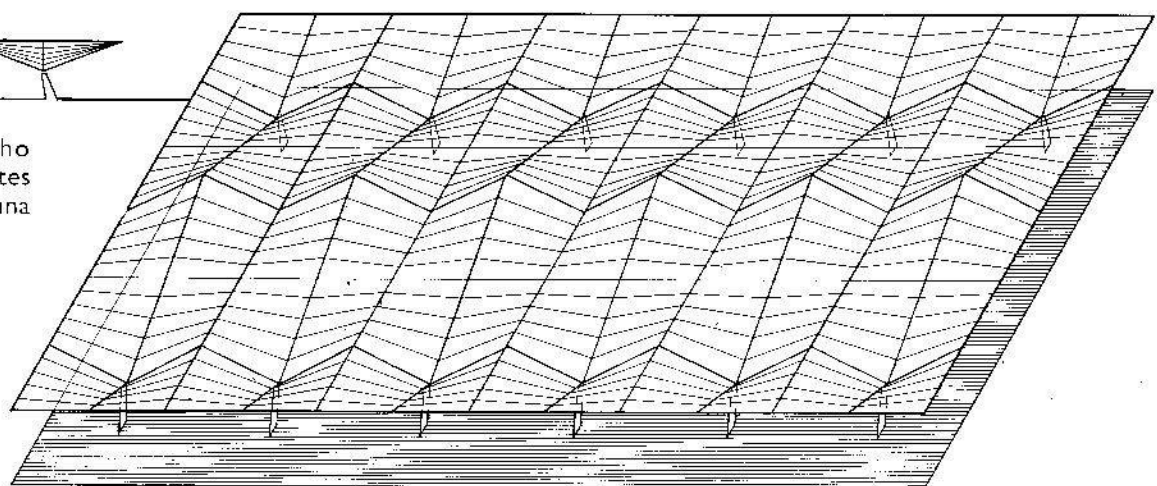
Unidad consistente en cuatro «hypar» sostenidas por un soporte central, en una retícula cuadrada.



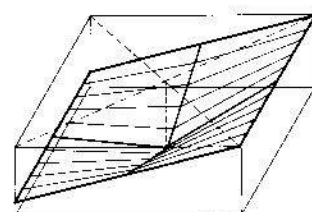
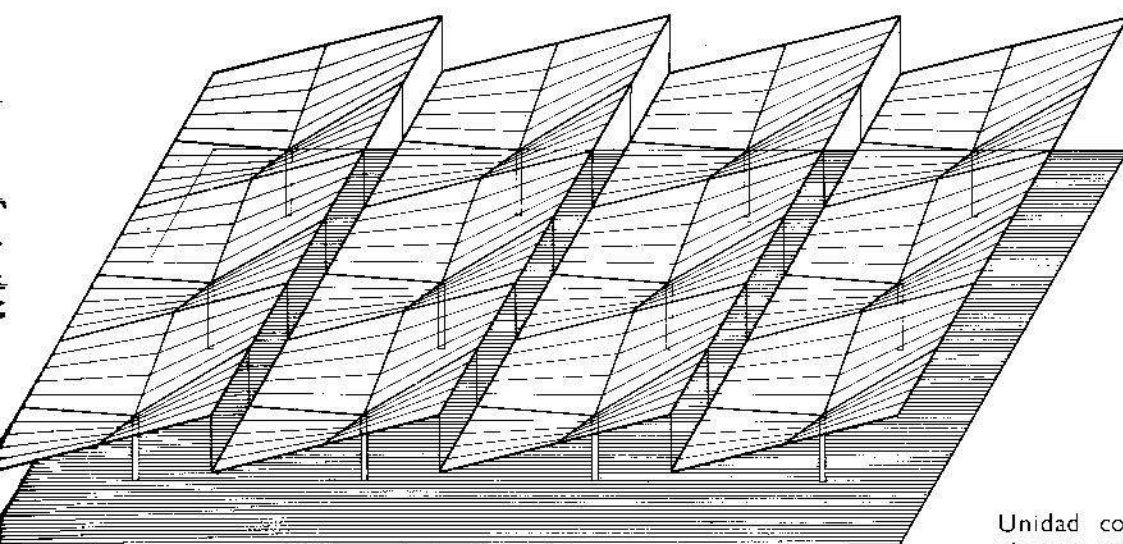
Unidad consistente en cuatro «hypar» sostenidos por soportes laterales, en una retícula rectangular.



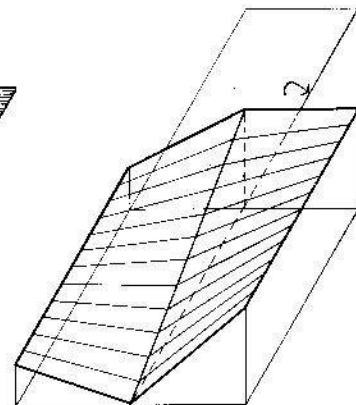
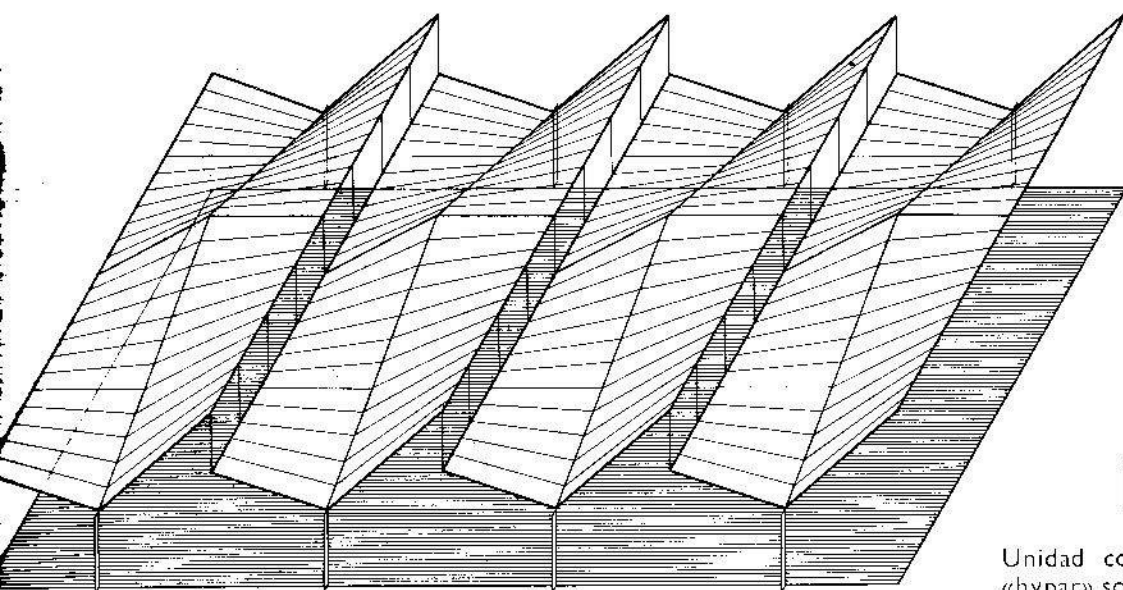
Unidad consistente en ocho «hypar» sostenidos por soportes laterales retranqueados, en una retícula rectangular.



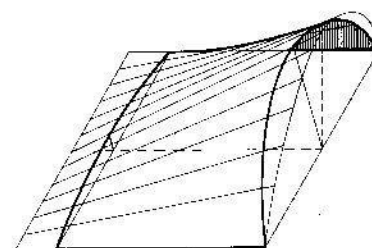
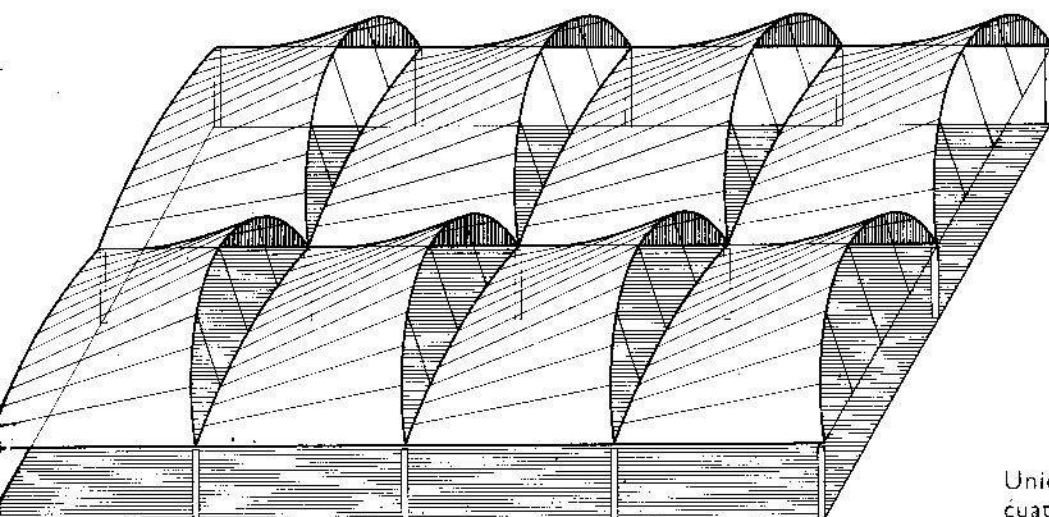
Sistemas estructurales para cubiertas de grandes luces, con lucernarios



Unidad consistente en cuatro superficies «hypar» sobre un soporte central.



Unidad consistente en cuatro superficies «hypar» sobre dos soportes laterales.



Unidad consistente en un conoide sobre cuatro soportes de esquina.

Sistemas estructurales verticales

5

Los elementos sólidos rígidos que se extienden predominantemente en sentido vertical, asegurados contra esfuerzos laterales y anclados firmemente al suelo, pueden recoger cargas desde planos horizontales a gran altura sobre aquél y transmitirlos a los cimientos: sistemas estructurales verticales.

Los sistemas estructurales cuya tarea principal consiste en recoger las cargas de los planos horizontales dispuestos unos sobre otros y transmitirlos a la base son sistemas estructurales verticales.

Los sistemas estructurales verticales se caracterizan por los sistemas particulares de reunión de las cargas, transmisión de éstas y estabilización lateral.

Los sistemas estructurales verticales emplean para la dirección y transmisión de los sistemas de fuerzas un mecanismo de forma, vector, masa o superficie activos. Carecen de un mecanismo de trabajo propio.

Los sistemas estructurales verticales no son una serie de sistemas de una planta dispuestos unos sobre otros, ni su comportamiento estructural puede explicarse del todo como el de una ménsula erecta. Son sistemas homogéneos con problemas específicos propios y soluciones únicas.

Debido a su extensión en altura, y de ahí su susceptibilidad multiplicada ante la acción de las cargas horizontales, la estabilización lateral es un componente esencial en el proyecto de los sistemas estructurales verticales. A partir de una cierta altura sobre el suelo, la desviación hacia abajo de las fuerzas horizontales puede llegar a ser el factor determinante de la forma del proyecto.

Los sistemas estructurales verticales son un instrumento y una ordenación para la construcción de edificios de gran altura. En este sentido, colaboran a la configuración de las modernas edificaciones y ciudades.

Los sistemas estructurales verticales son requisitos e instrumento para la utilización de la tercera dimensión, la altura, en la planificación de ciudades. Por tanto, en el futuro, el empleo de los sistemas estructurales verticales no se limitará a edificios aislados, sino que se extenderá hasta hacer accesible el espacio urbano no sólo en altura, sino también en anchura.

Los sistemas estructurales verticales requieren continuidad de los elementos que transportan la carga al suelo, y, por tanto, necesitan congruencia de los puntos de reunión de cargas para cada planta. La distribución de los puntos colectores de cargas, por tanto, ha de determinarse no sólo mediante consideraciones de eficacia estructural, sino también mediante aquellas otras basadas en la utilización superficial.

Los sistemas estructurales verticales pueden distinguirse por los diferentes sistemas de recolección de cargas en las diferentes plantas. En los sistemas reticulados los puntos de unión se distribuyen uniformemente sobre la totalidad de la planta; en los de luz libre se disponen de modo periférico y en los sistemas en voladizo la zona colectora de cargas se sitúa centralmente.

En edificios de altura, los sistemas de recolección de cargas están íntimamente relacionados con la configuración y la organización de la planta. La interdependencia es tal que los distintos sistemas de recolección de cargas dan origen a sus correspondientes sistemas de organización de plantas para edificios de altura.

Con el fin de conseguir condiciones adecuadas para una planta flexible y buenas posibilidades para la ulterior reorganización de las piezas individuales de cada planta, el proyecto de los sistemas estructurales verticales tiende a la mayor reducción posible de los elementos verticales de transmisión de cargas, tanto en sección como en número.

A causa de la continuidad necesaria para la transmisión vertical de las cargas, los sistemas estructurales se caracterizan generalmente por miembros verticales continuos, que por su parte han conducido a fachadas no articuladas en su extensión en altura. La articulación en altura es uno de los problemas sin resolver de los sistemas estructurales verticales.

Los sistemas estructurales verticales, a pesar de la lógica verticalidad de los elementos transmisores de las cargas, pueden ser proyectados también en forma económica con elementos no verticales. Ello significa que la monotonía de las líneas rectas verticales del alzado del contorno no es una cualidad intrínseca de los sistemas estructurales verticales.

La investigación de las posibilidades para la diferenciación y la articulación de la sección vertical de las estructuras de altura es una tarea inminente del presente. Aquí sigue sin cubrirse un amplio potencial sin emplear en el proyecto de los edificios de altura.

Los sistemas estructurales verticales requieren para la transmisión de las cargas verticales una considerable masa en la sección de los soportes, que reduce la superficie útil de planta. Colgando las plantas, en vez de apoyarlas sobre elementos inferiores, puede conseguirse una reducción en la sección de los elementos verticales transmisores de las cargas. Sin embargo, esta forma de transmisión de cargas necesita de un sistema estructural superpuesto para el transporte final de las cargas hasta el suelo.

Por la necesidad de limitar la sección de los elementos transmisores de cargas, para un empleo óptimo de la superficie de planta, todos los elementos que definen espacios necesarios para la función del edificio de altura son secciones estructurales potenciales: cajas de escalera, cabinas de ascensor, conductos de instalaciones, revestimiento exterior.

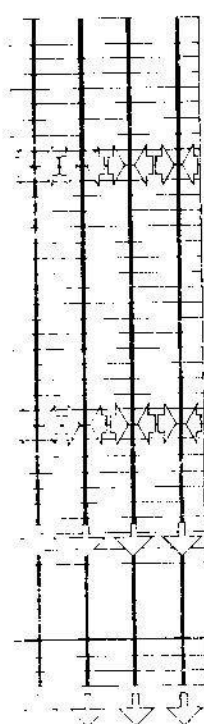
El proyecto óptimo de los sistemas estructurales verticales integra todas las secciones materiales de los recintos circulatorios verticales que son ingredientes básicos del organismo del edificio. Como consecuencia, los sistemas estructurales verticales se hallan ligados indisoluble-

mente a las venas vitales técnico-dinámicas de los edificios de altura.

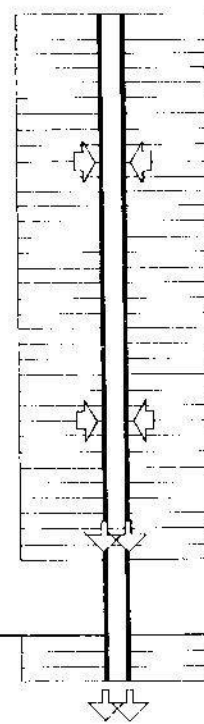
El proyecto de los sistemas estructurales verticales presupone, pues, un conocimiento comprensivo no sólo de los mecanismos de todos los sistemas estructura-

les, sino también de otro muy profundo de las correlaciones internas de todos los factores que determinan un edificio a causa de la interdependencia del sistema estructural con la organización de la planta y con la integración del equipo técnico del edificio.

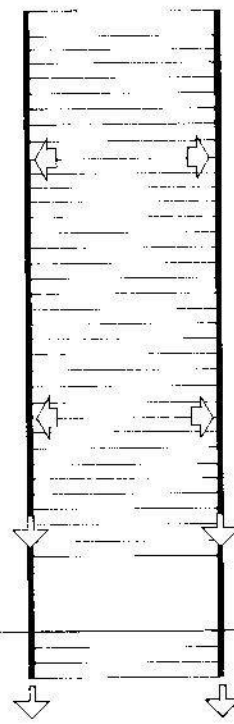
Sistemas principales de transmisión de cargas en estructuras verticales



Sistema en retícula.
Puntos de reunión de cargas distribuidos uniformemente.

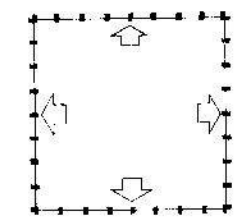
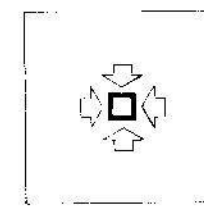
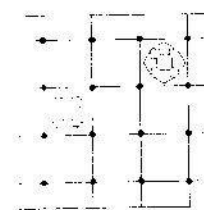


Sistema en voladizo.
Puntos de reunión de cargas en el centro.

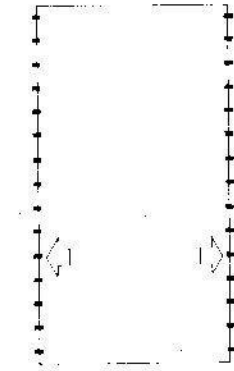
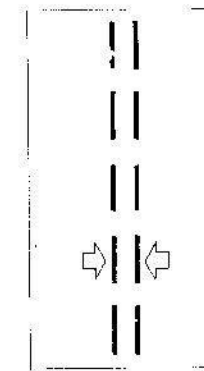
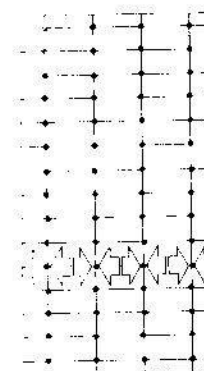


Sistema de tramos libres.
Puntos de reunión de cargas en el contorno del edificio.

Reunión horizontal de las cargas y transmisión vertical.



Forma de torre.
Cargas en direcciones cruzadas.



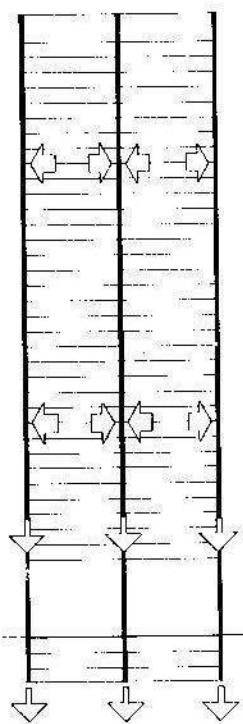
Forma de losa.
Cargas en un solo sentido.

Las cargas de cada planta se reúnen por unidad de área (retícula) y se transmiten individualmente al suelo.

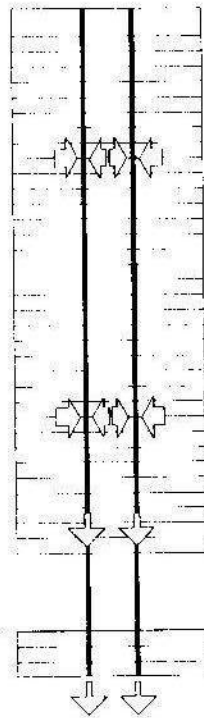
Las cargas se transmiten en cada planta a los soportes centrales y son conducidas centralmente al suelo.

Las cargas se transmiten en cada planta al contorno y son conducidas periféricamente al suelo.

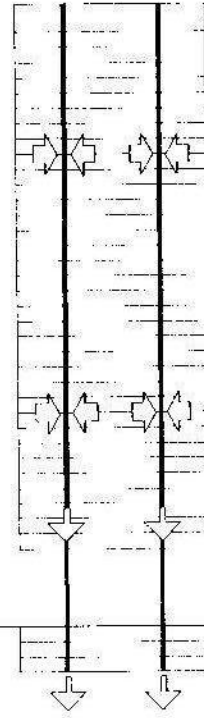
Sistemas compuestos de transmisión de cargas en estructuras verticales



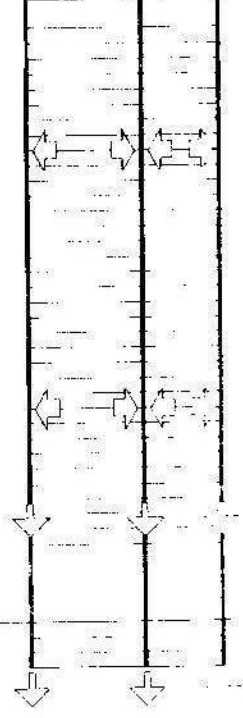
Sistema de tramo libre con soporte central.



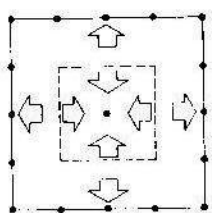
Sistema de retícula y voladizos.



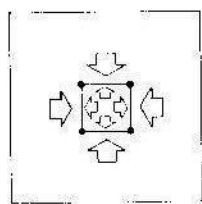
Sistema de voladizo de tramo libre.



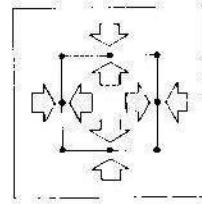
Sistema de tramos simétricos.



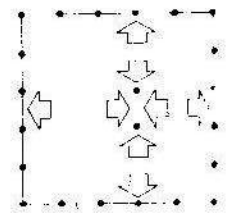
Las cargas de cada planta se dirigen parcialmente al centro y parcialmente a los muros exteriores.



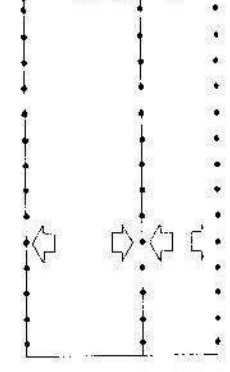
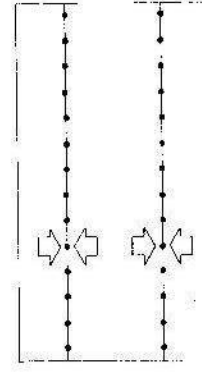
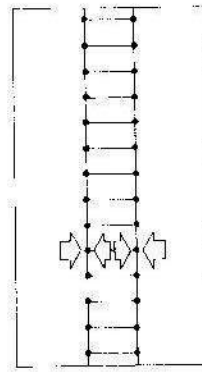
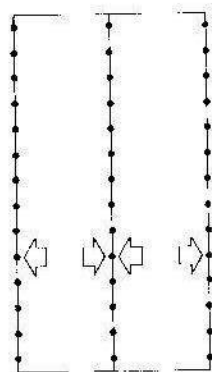
Las cargas se transmiten hacia el interior de los puntos de un sistema reticulado central de reunión de ellas.



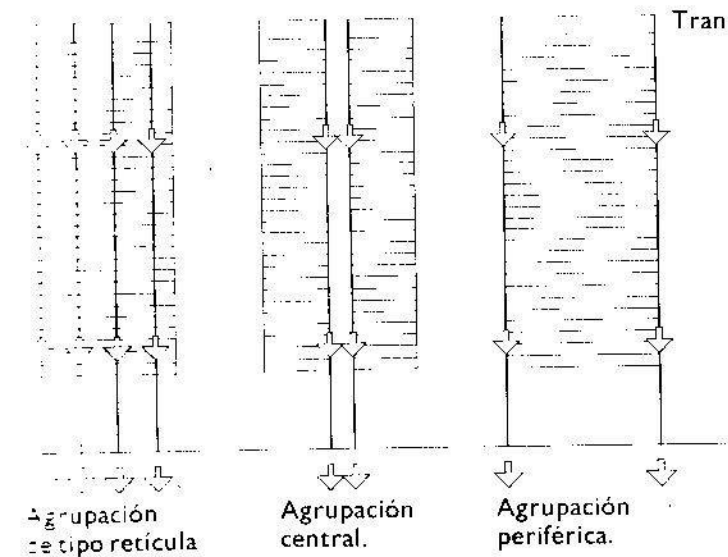
Las cargas se transmiten a los puntos intermedios de reunión, tanto desde el centro como desde los lados.



Las cargas se transmiten igualmente a los puntos de reunión.



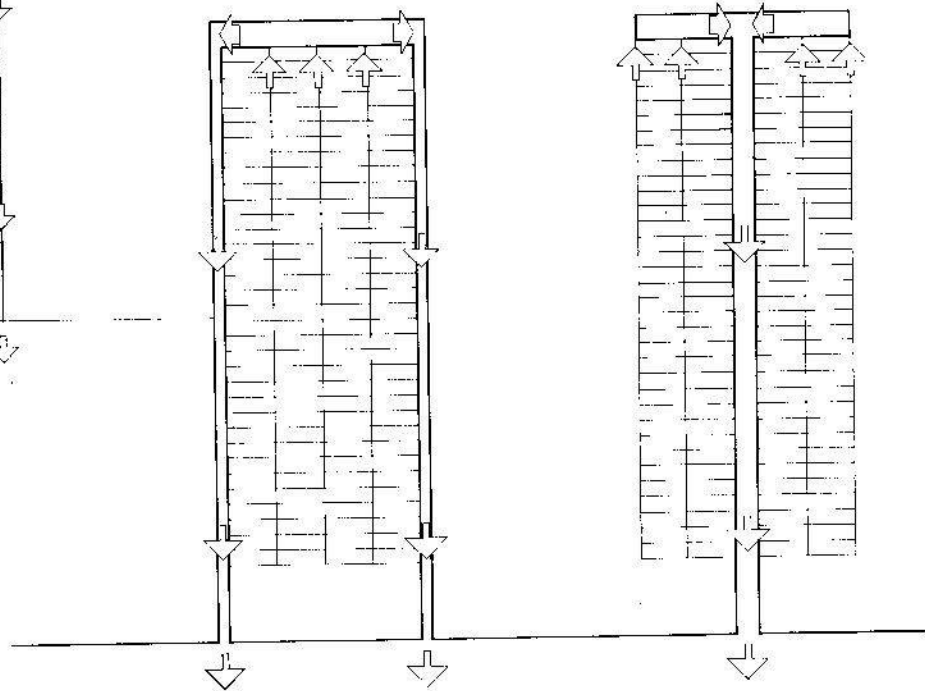
Sistemas de transmisión indirecta de las cargas verticales en la agrupación del tipo retícula



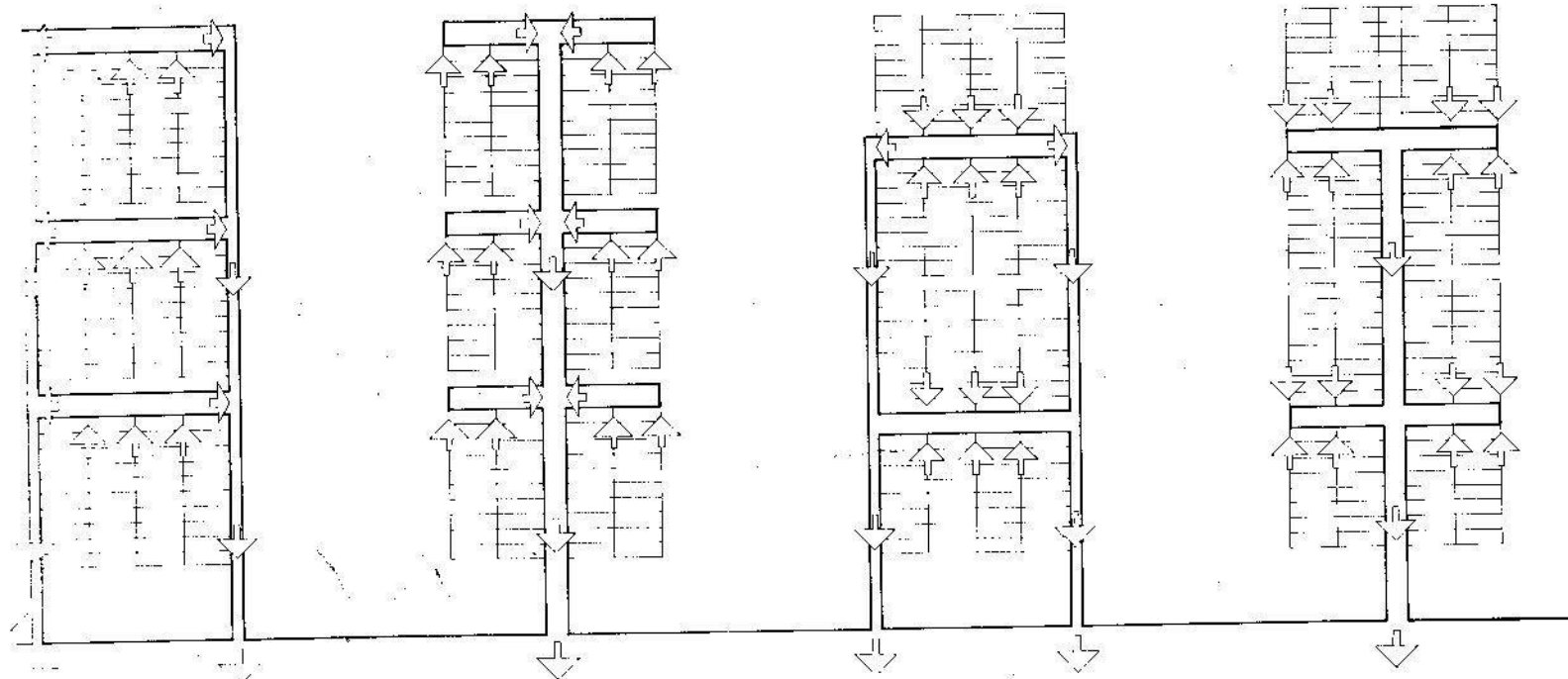
En vez de transmitir las cargas agrupadas en cada planta directamente a las cimentaciones por medio de las columnas, las cargas pueden ser transportadas mediante tirantes hacia la parte superior, donde nuevas columnas superpuestas las reciben y transmiten a los apoyos centrales o periféricos.

Transmisión directa de cargas.

Transmisión indirecta de cargas mediante tirantes.



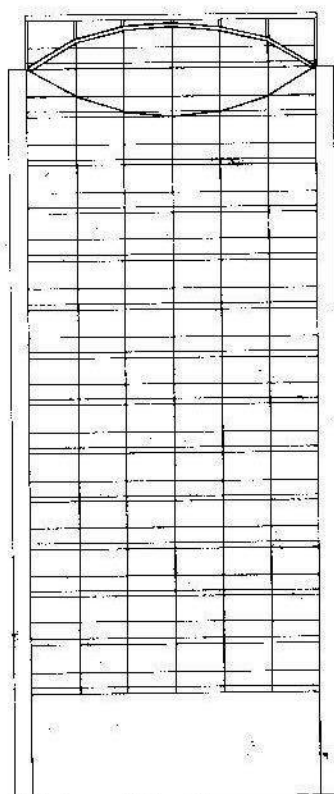
Sistemas sustentantes continuos.



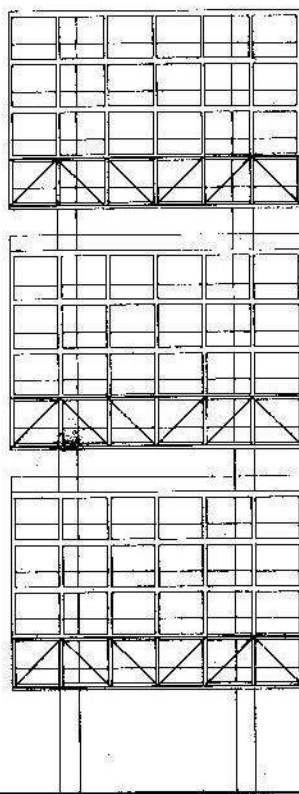
Sistemas para sustentación de pisos agrupados por intermedio de jácenas.

Sistemas para sustentación combinada y apoyo de agrupaciones de plantas separadas.

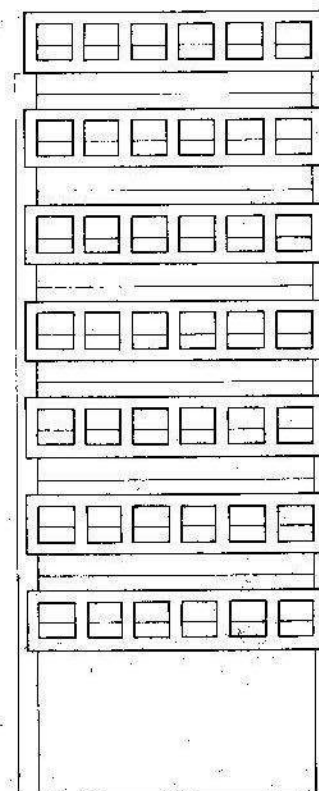
Sistemas reticulados de pisos completos para transmisión indirecta de cargas verticales



Elemento sustentador de forma activa.
Combinación de arco y cable colgante con pisos suspendidos.



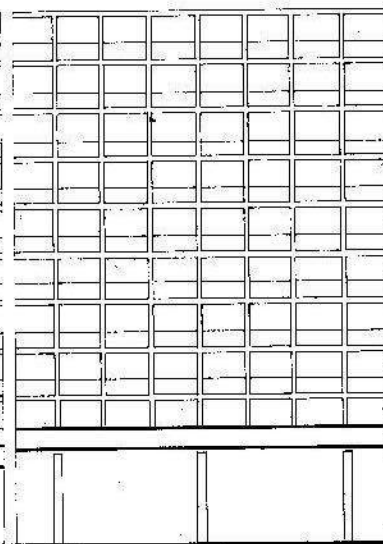
Elementos sustentadores de vector activo.
Vigas trianguladas soportando cada una varios pisos.



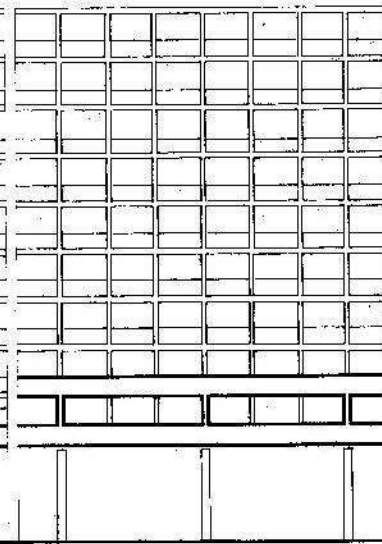
Elementos sustentadores de masa activa.
Marcos múltiples con pisos intermedios sin soportes.



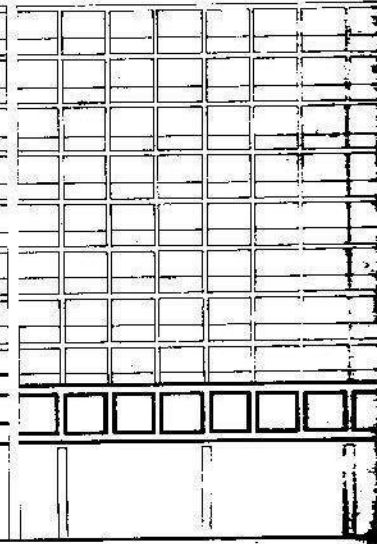
Viga bajo la losa de forjado.



Viga sobre la losa de forjado.

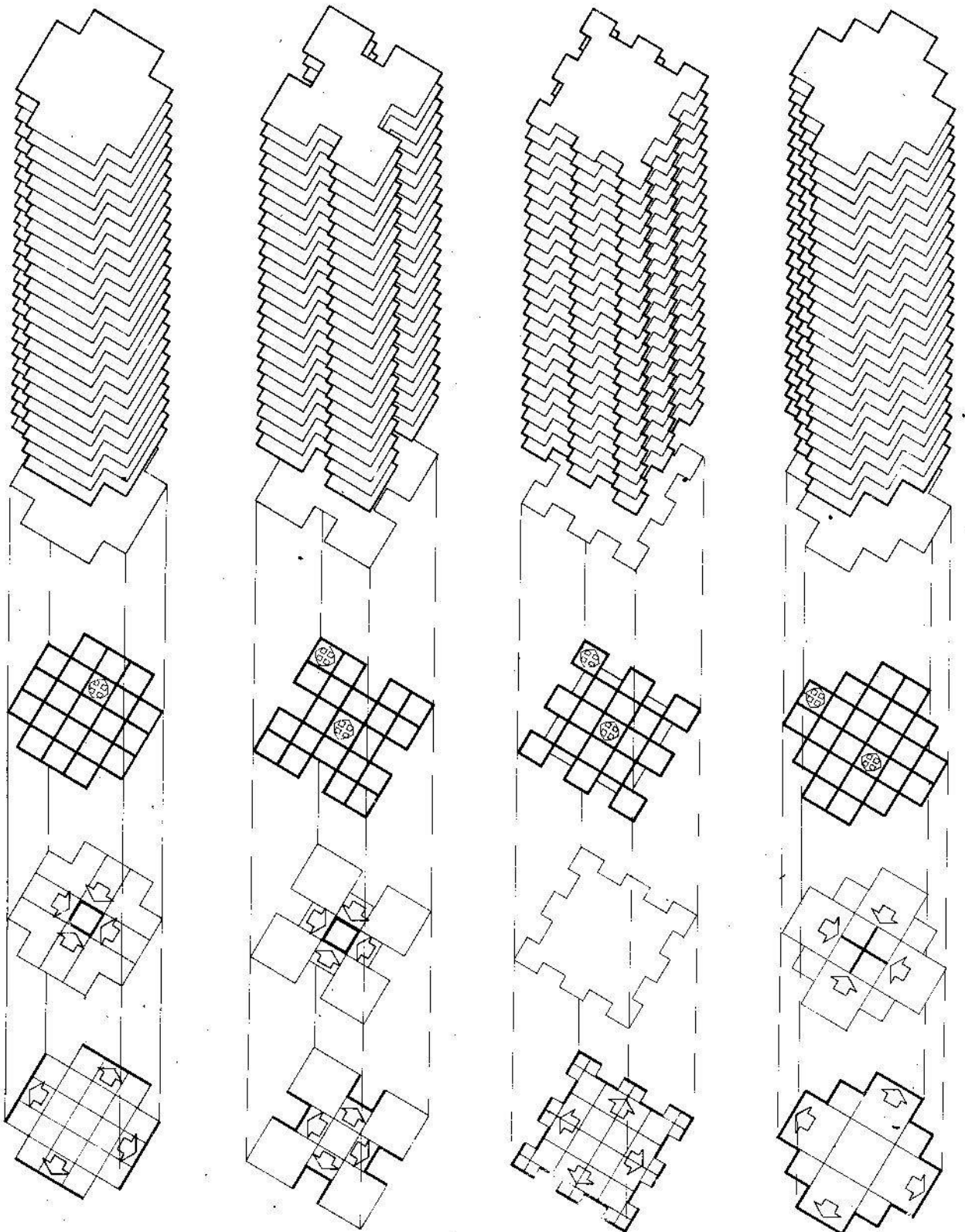


Dos vigas solidarizadas en dos pisos consecutivos.



Pórtico múltiple entre dos pisos.

Formas típicas de torre desarrolladas a partir de una planta cuadrada



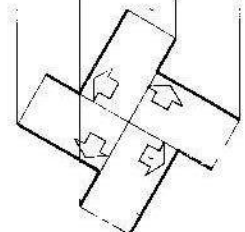
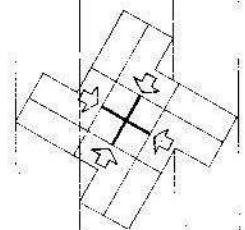
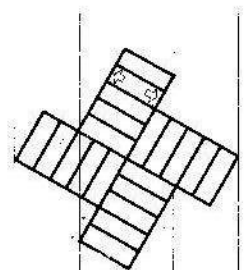
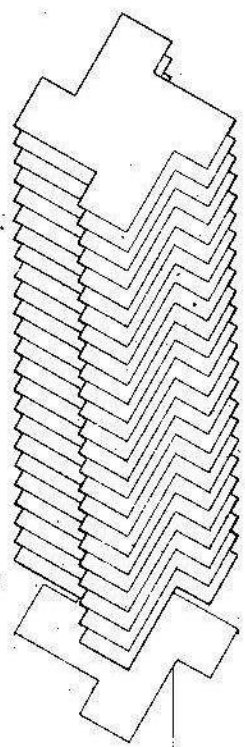
Agrupación de cargas.

Como sistema reticulado.

Como sistema en voladizo.

Como sistema de luces libres.

Formas de torre desarrolladas a partir de una planta circular

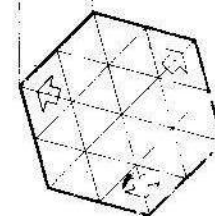
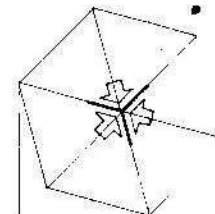
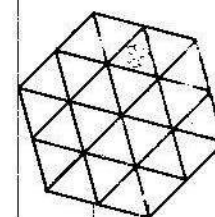
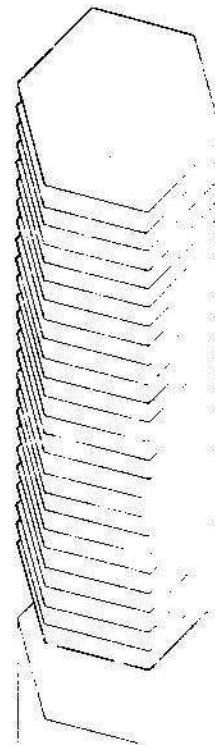
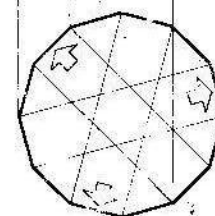
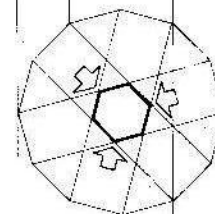
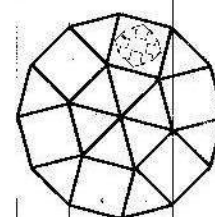
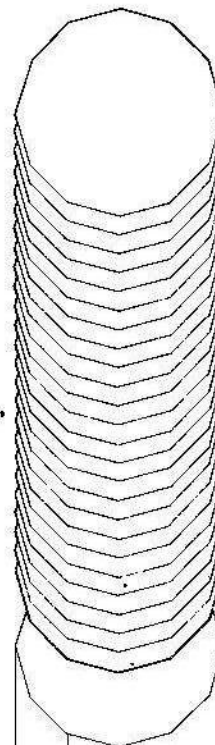
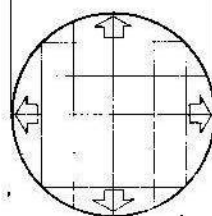
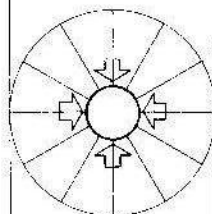
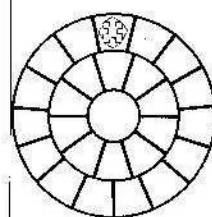
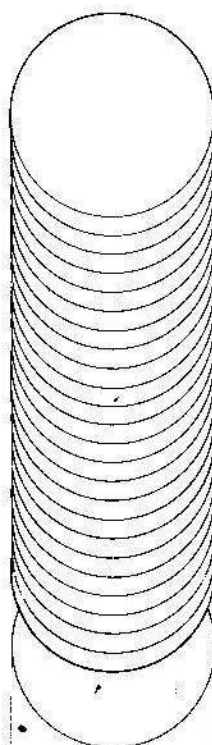


Agrupación de cargas.

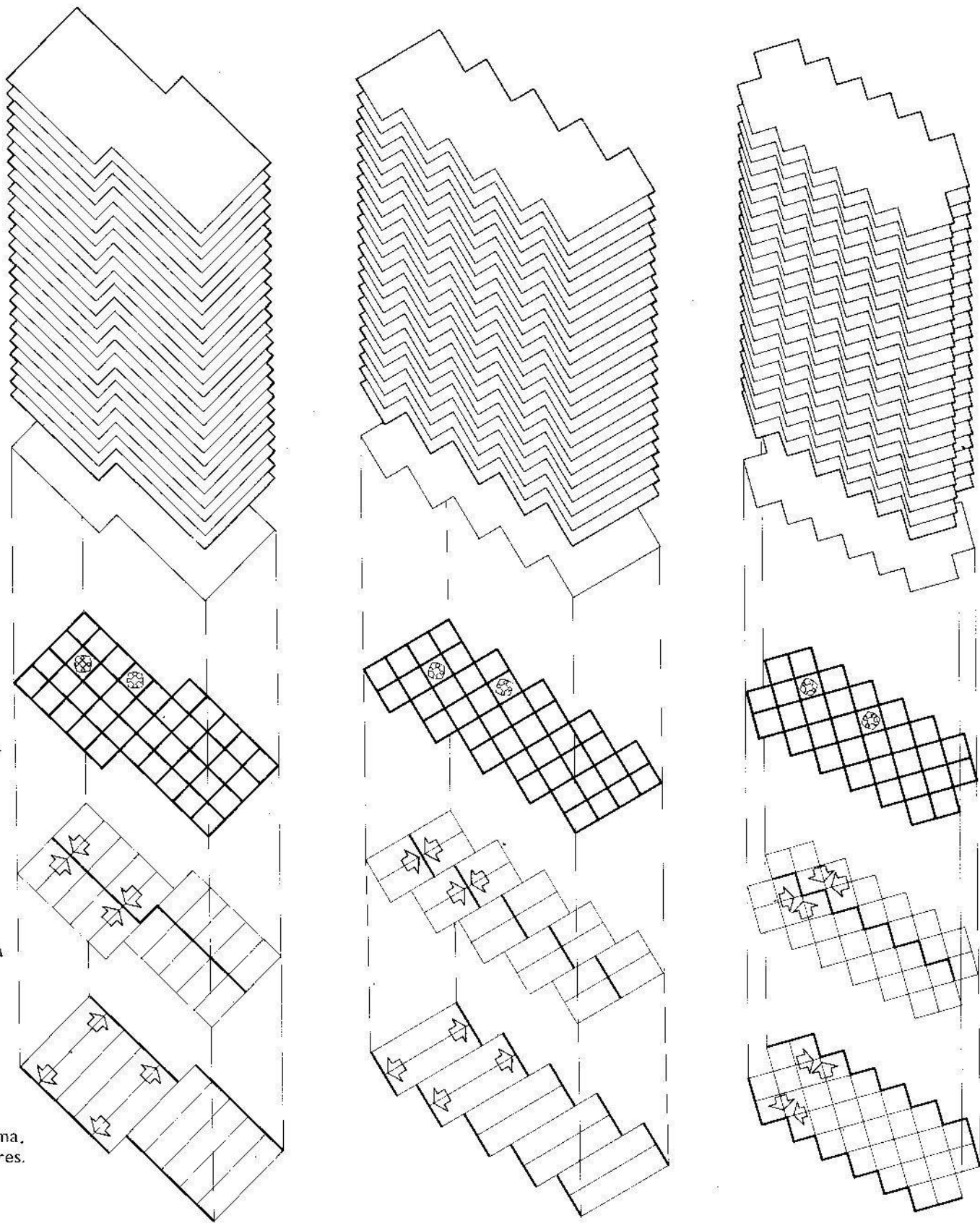
Como sistema reticulado.

Como sistema en voladizo.

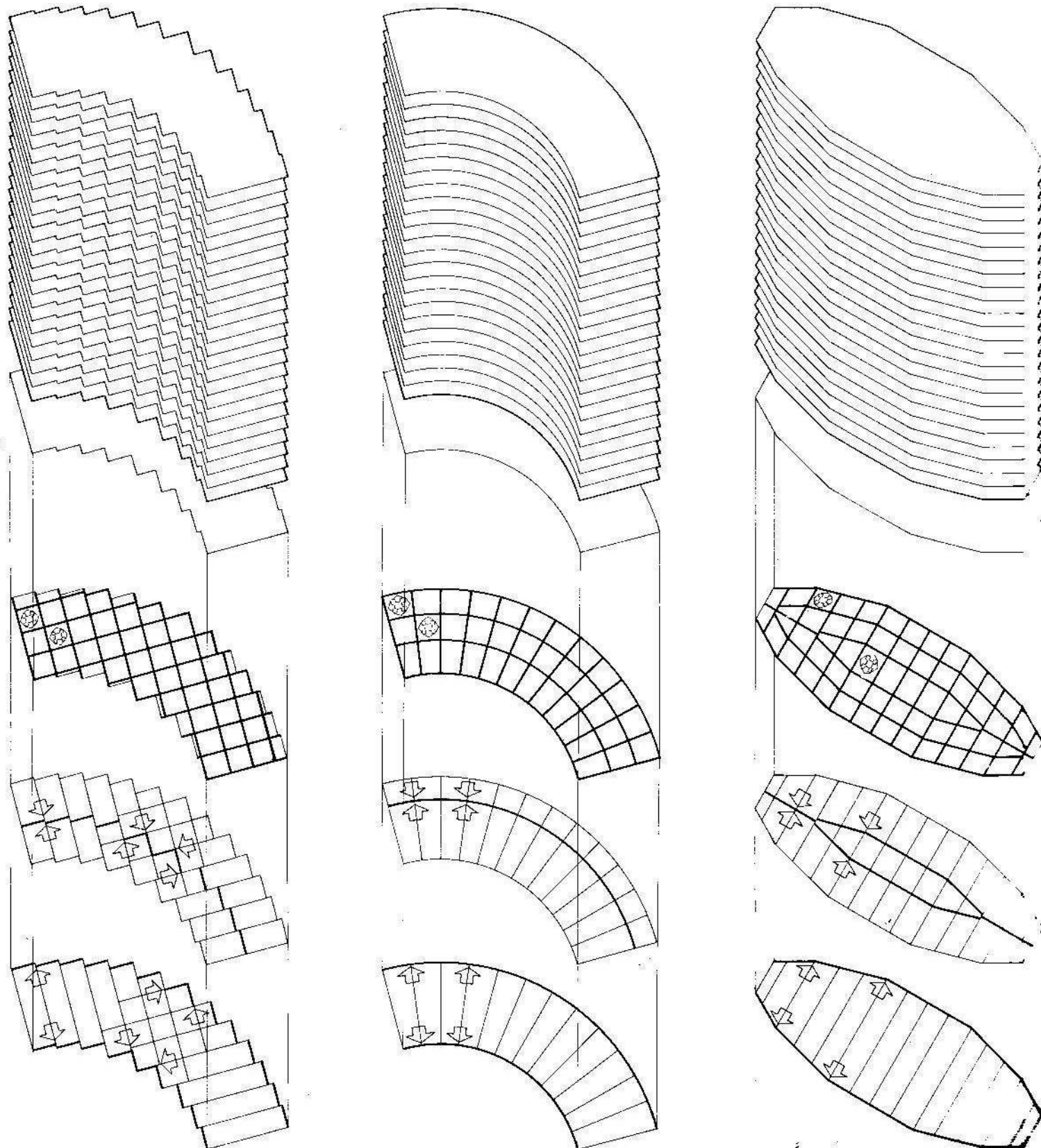
Como sistema de luces libres.



Formas típicas de laja desarrolladas a partir de una planta rectangular

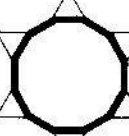
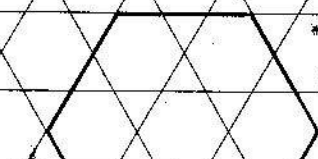
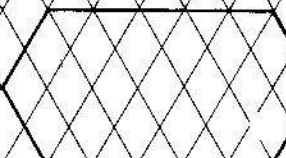
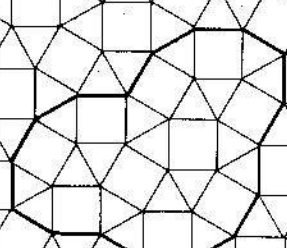
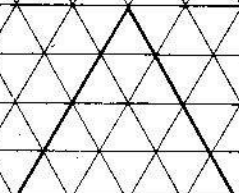
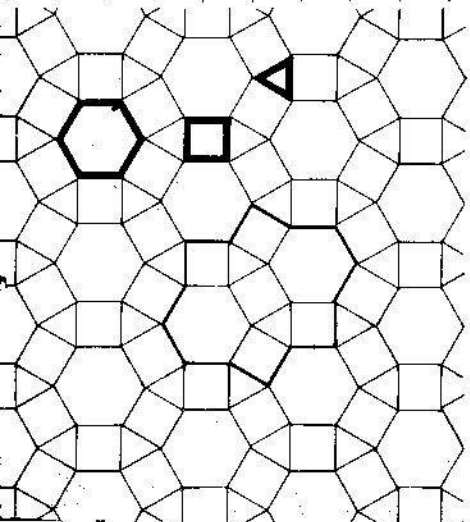
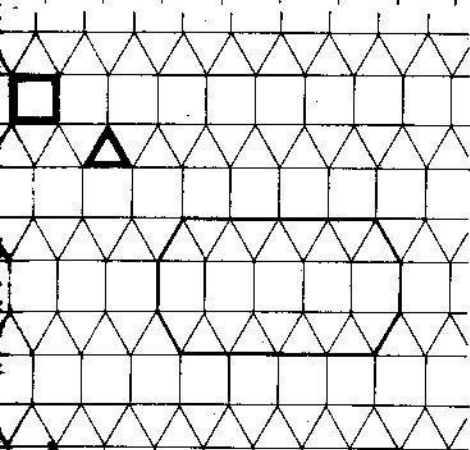
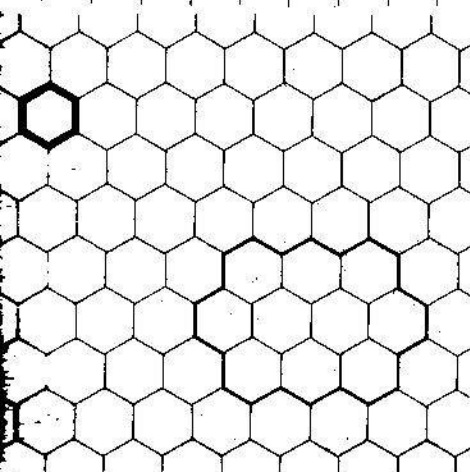


Formas de laja desarrolladas a partir de una planta de pisos curva

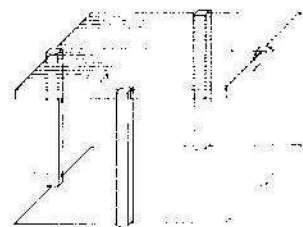
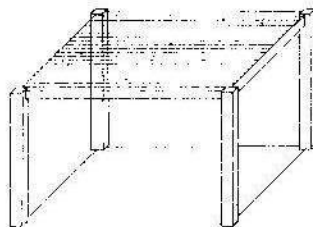
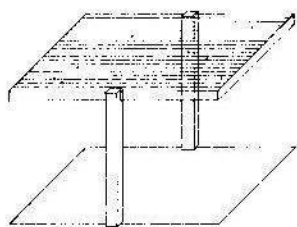
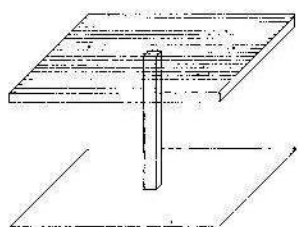


Sistemas reticulares geométricos para agrupación de cargas

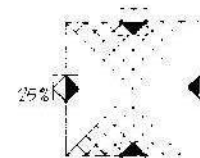
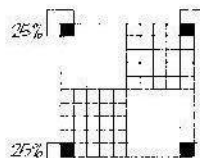
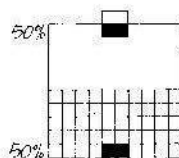
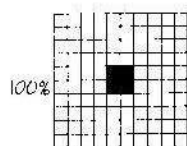
Distribución regular y semirregular de superficies.



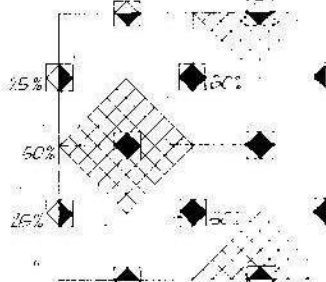
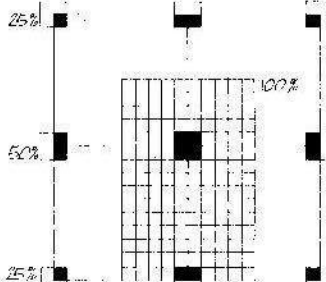
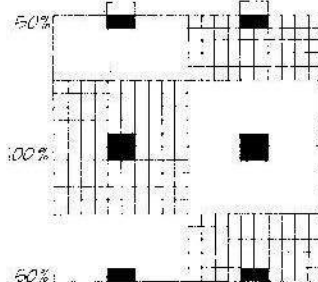
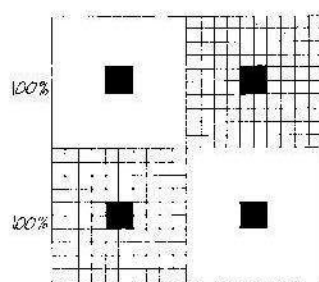
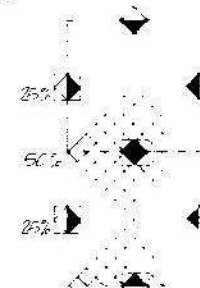
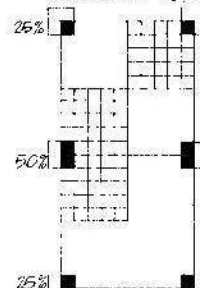
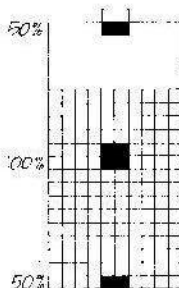
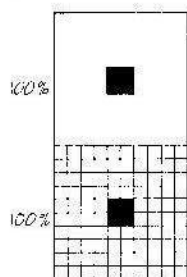
Transmisión de carga vertical en sistemas de retícula cuadrada



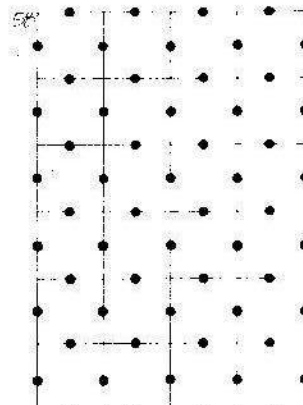
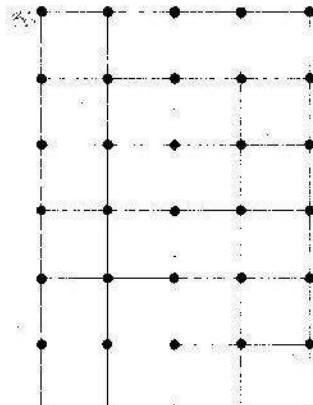
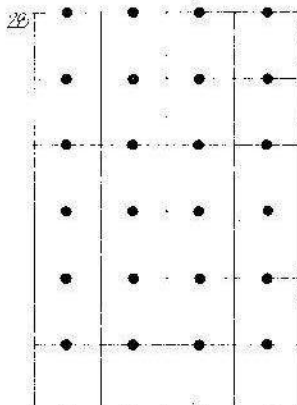
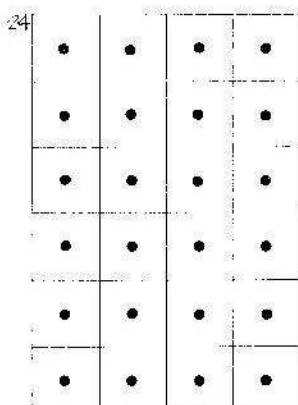
Posición de los puntos de agrupación de cargas en relación con la unidad de retícula.



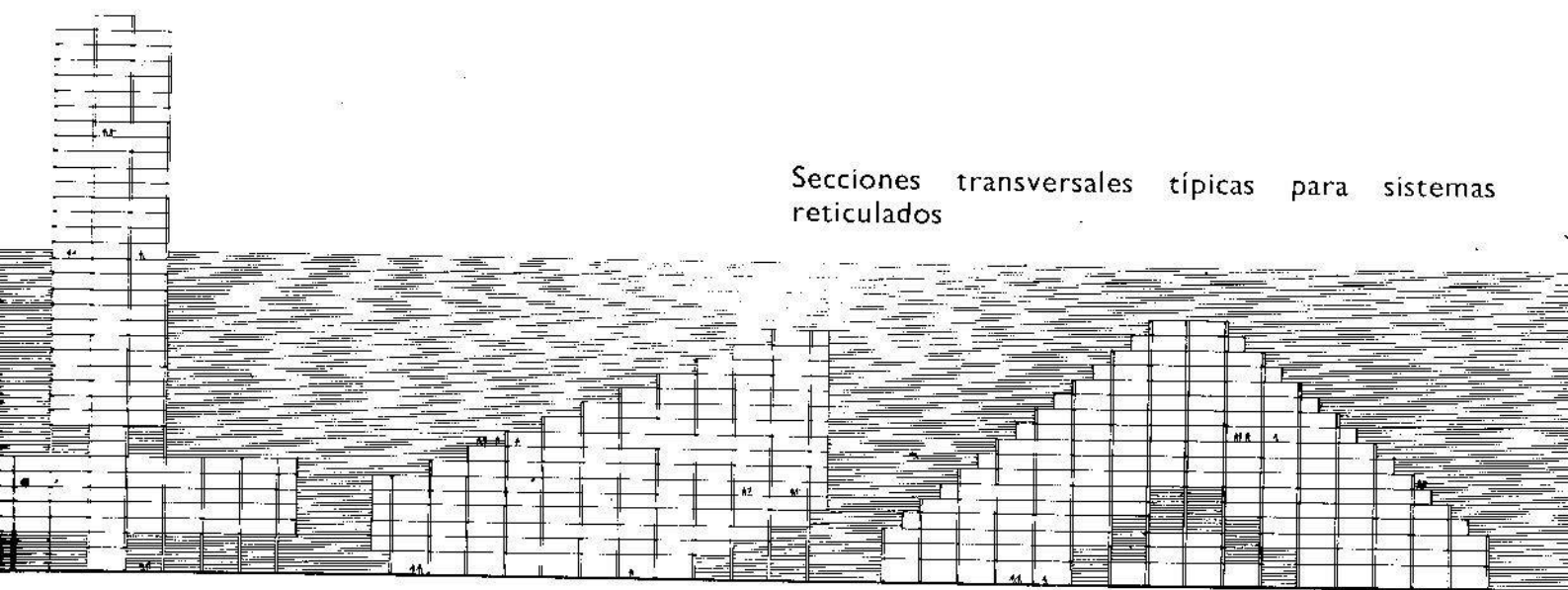
Fracción de carga de la unidad de retícula por punto de agrupación de cargas.



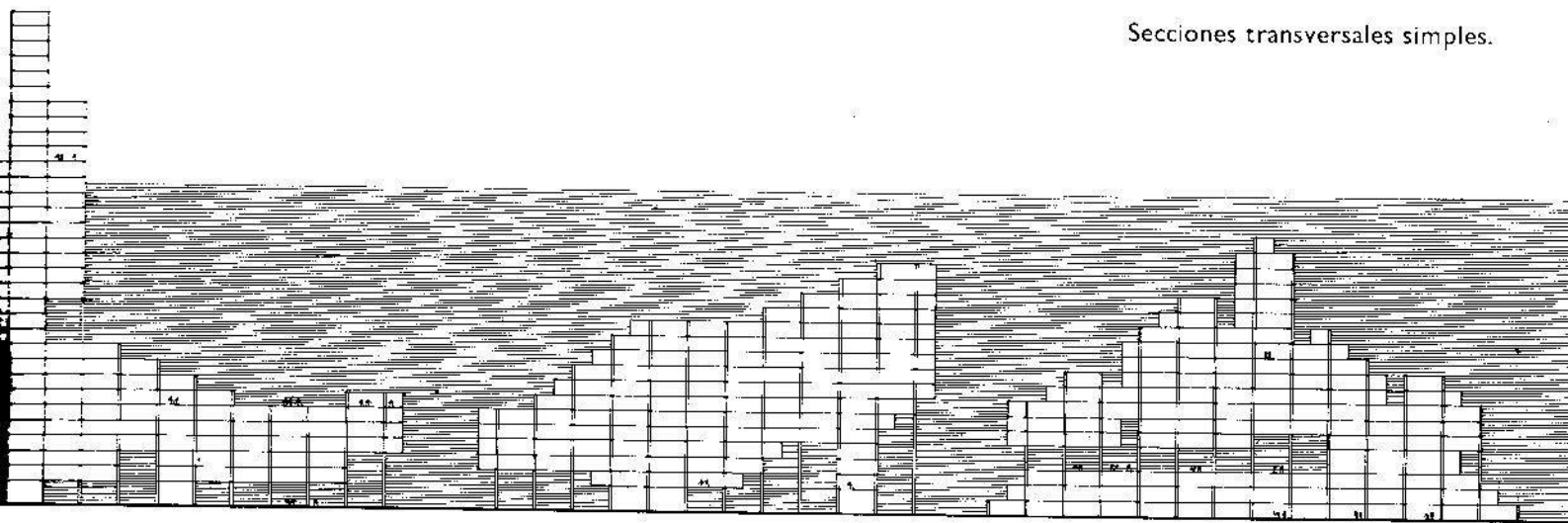
Frecuencia de los puntos de agrupación de cargas para veinticuatro unidades de retícula.



Secciones transversales típicas para sistemas reticulados

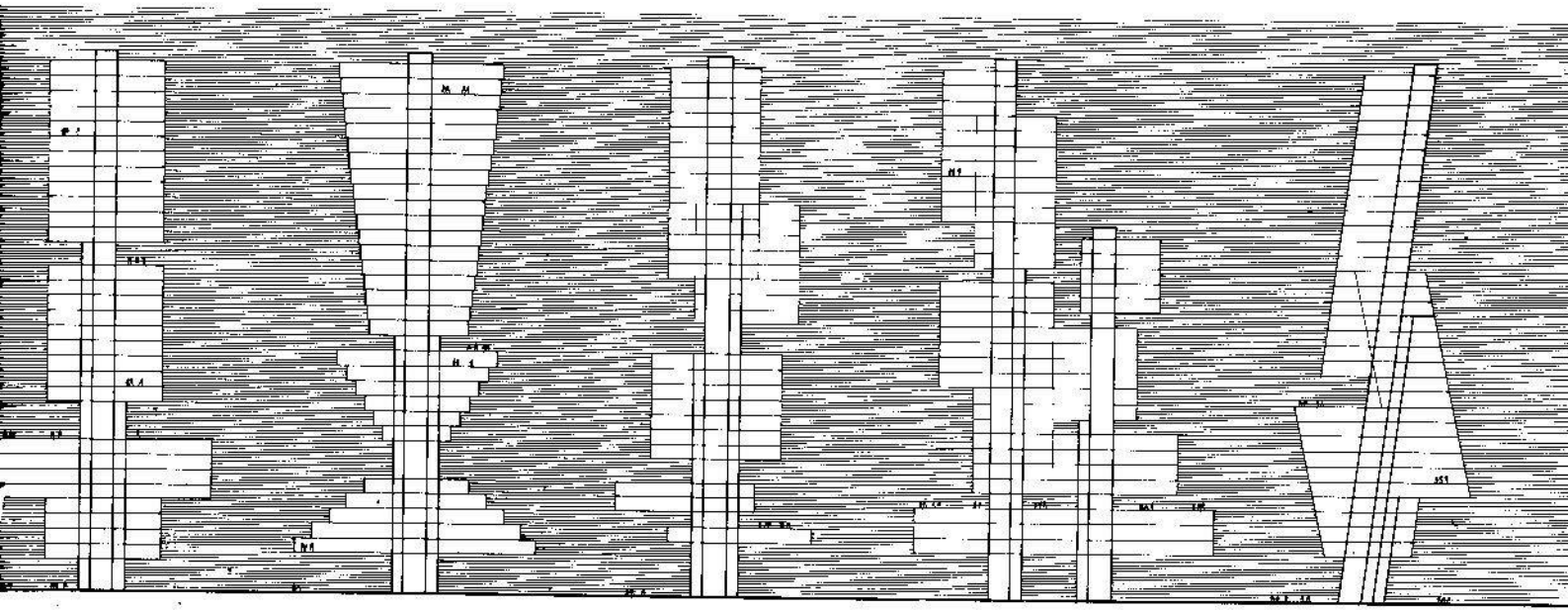


Secciones transversales simples.



Secciones transversales complejas.

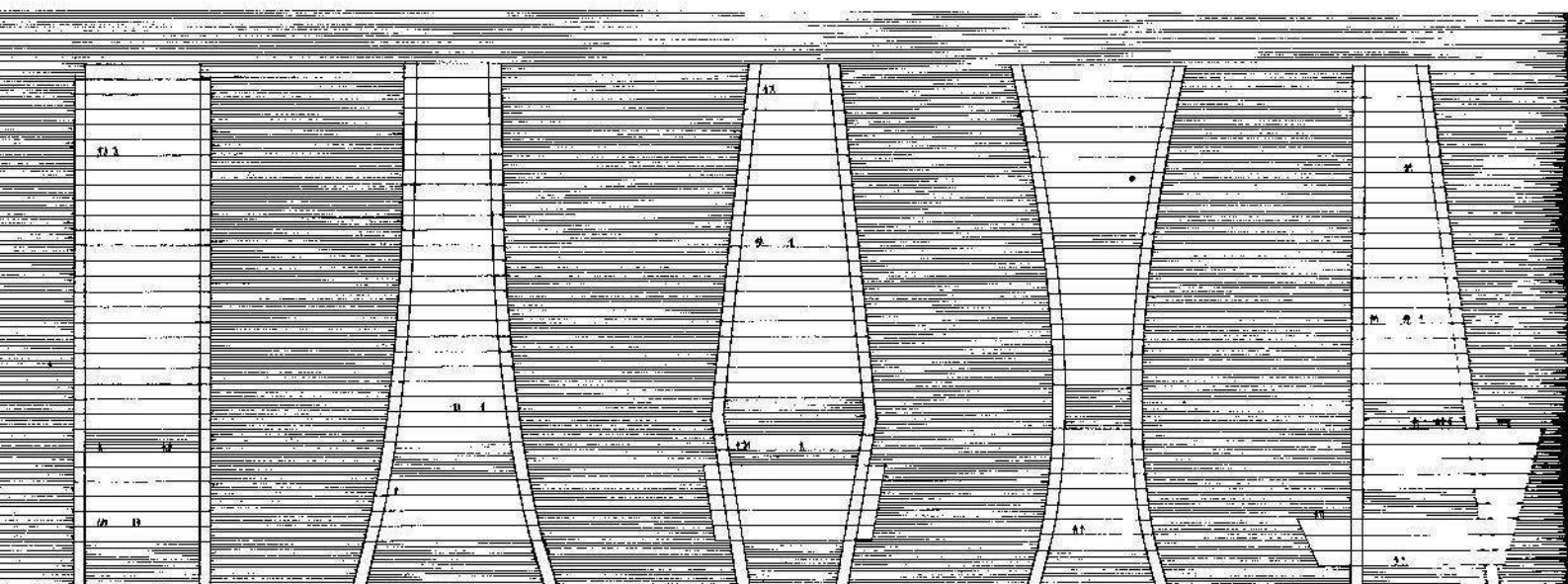
Secciones transversales típicas para sistemas en voladizo



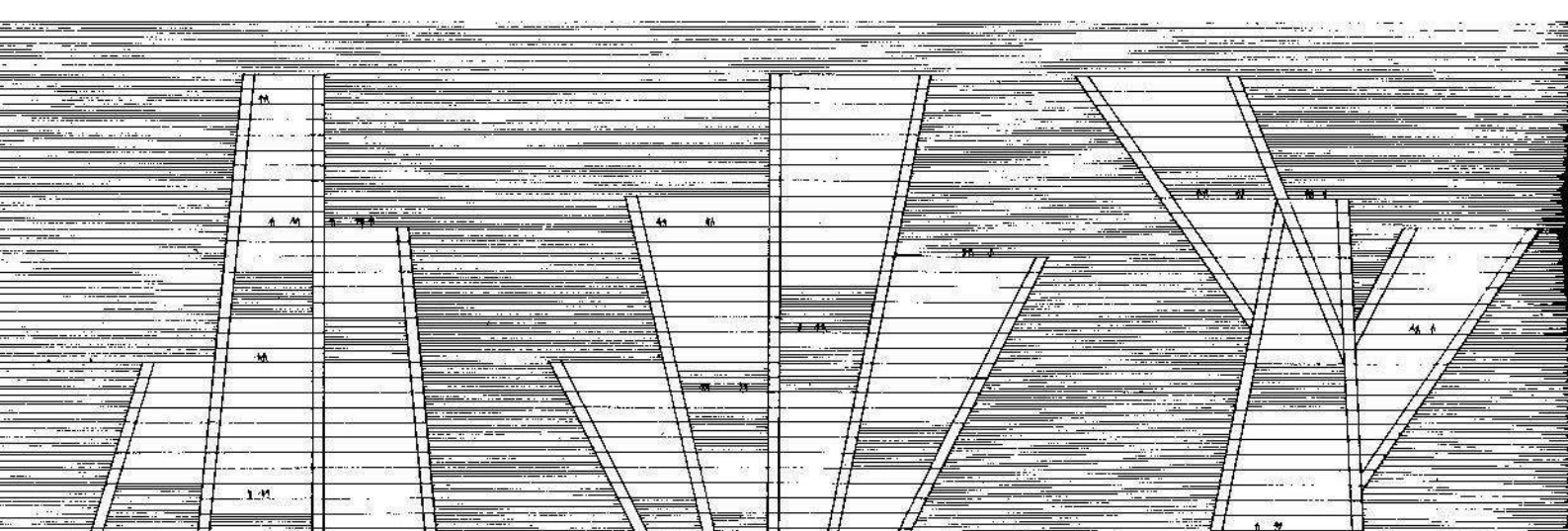
Formas simples.

Formas complejas.

Secciones transversales típicas para sistemas de luz libre

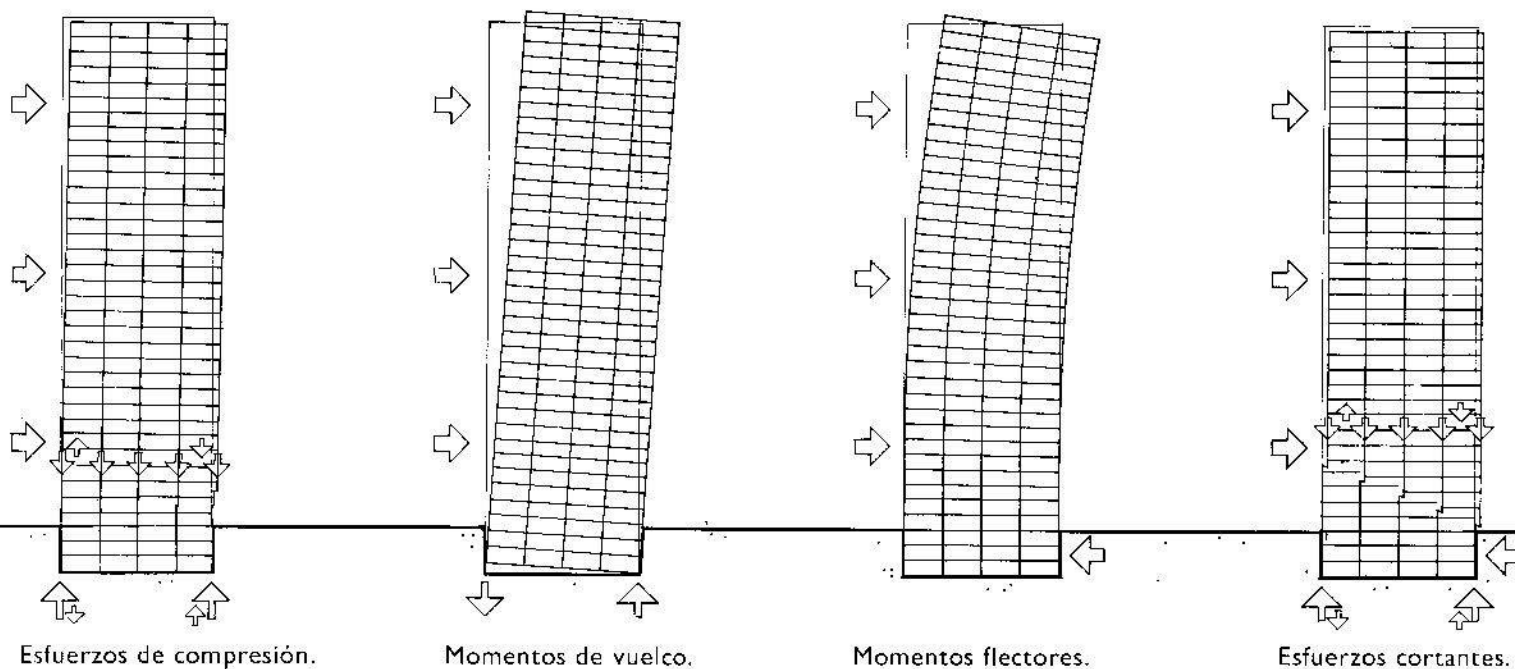


Secciones transversales simples para sistemas de luz libre.



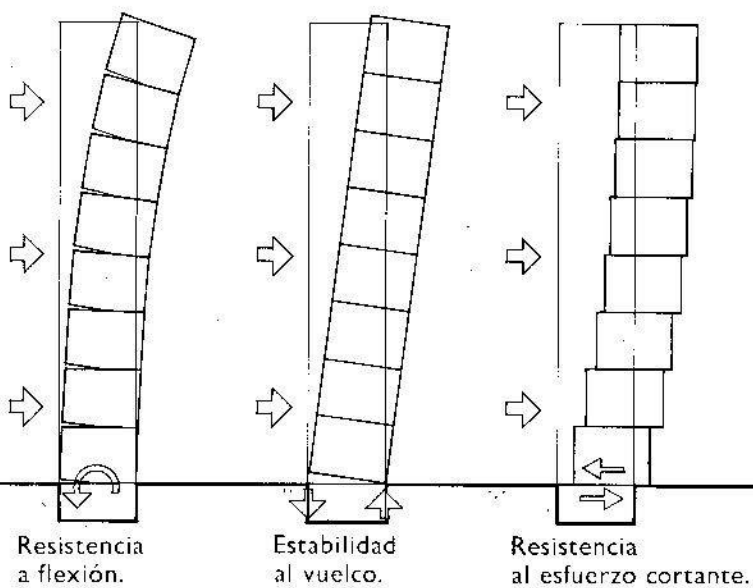
Secciones transversales complejas para sistemas de luz libre.

Cargas críticas y deformaciones en los sistemas estructurales verticales

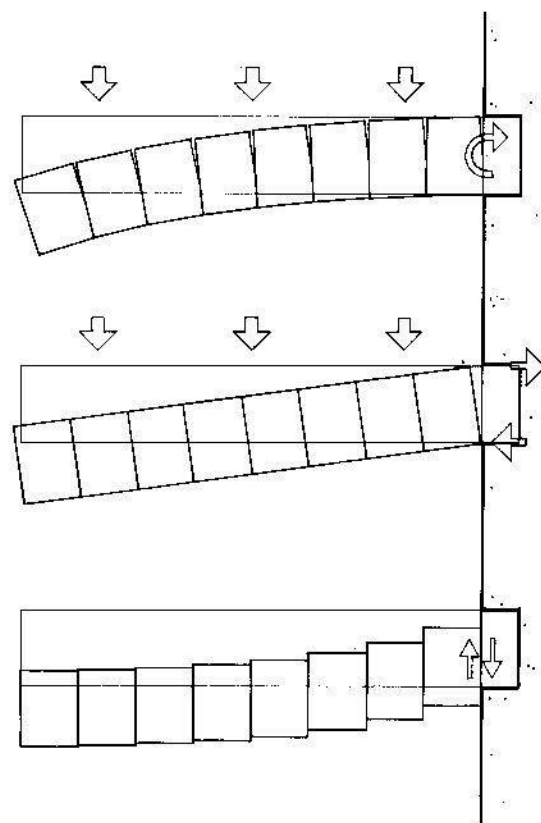


Las cargas decisivas para el proyecto de un sistema de estructura vertical resultan de la superposición del peso propio, cargas de uso y viento. Estas se componen en una resultante oblicua.

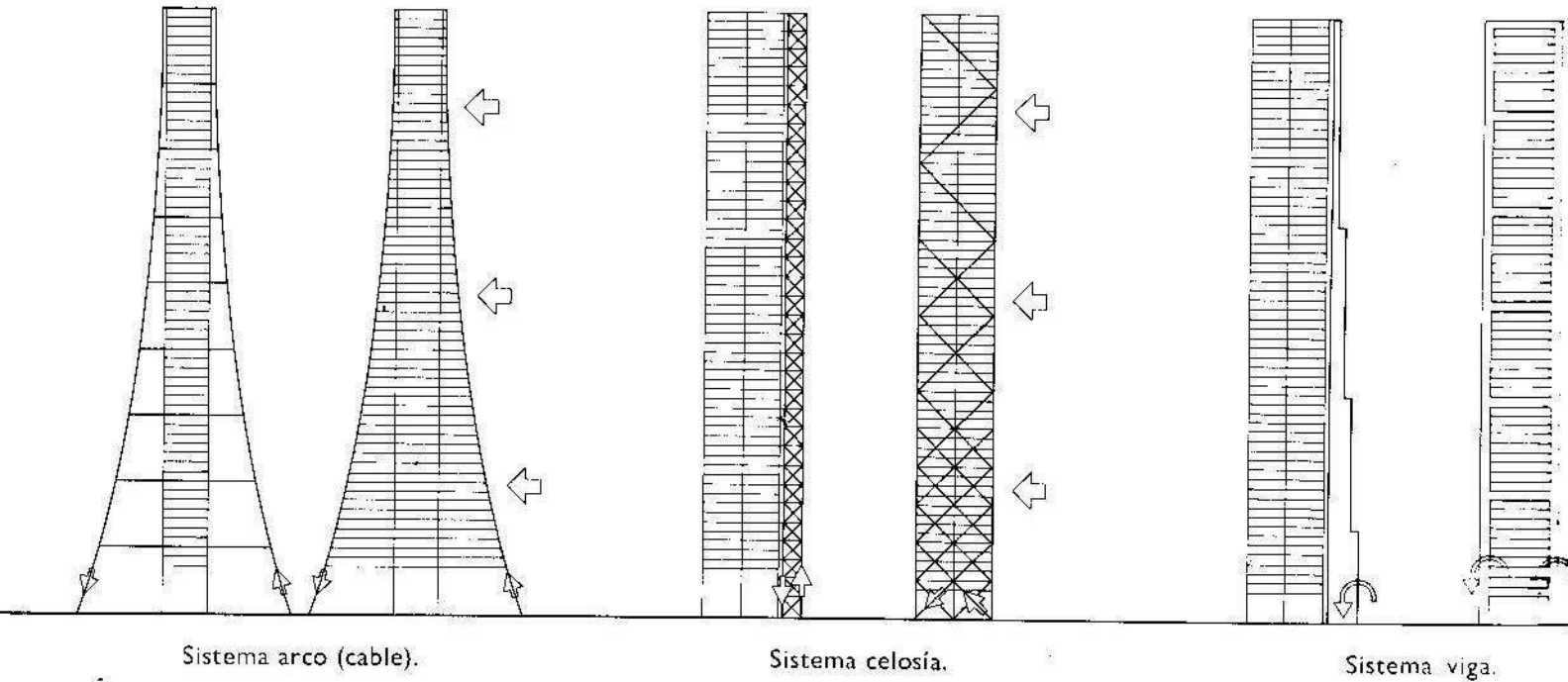
Cuanto menor es la inclinación de dicha resultante tanto mayor es la dificultad de transmitir las a la cimentación.



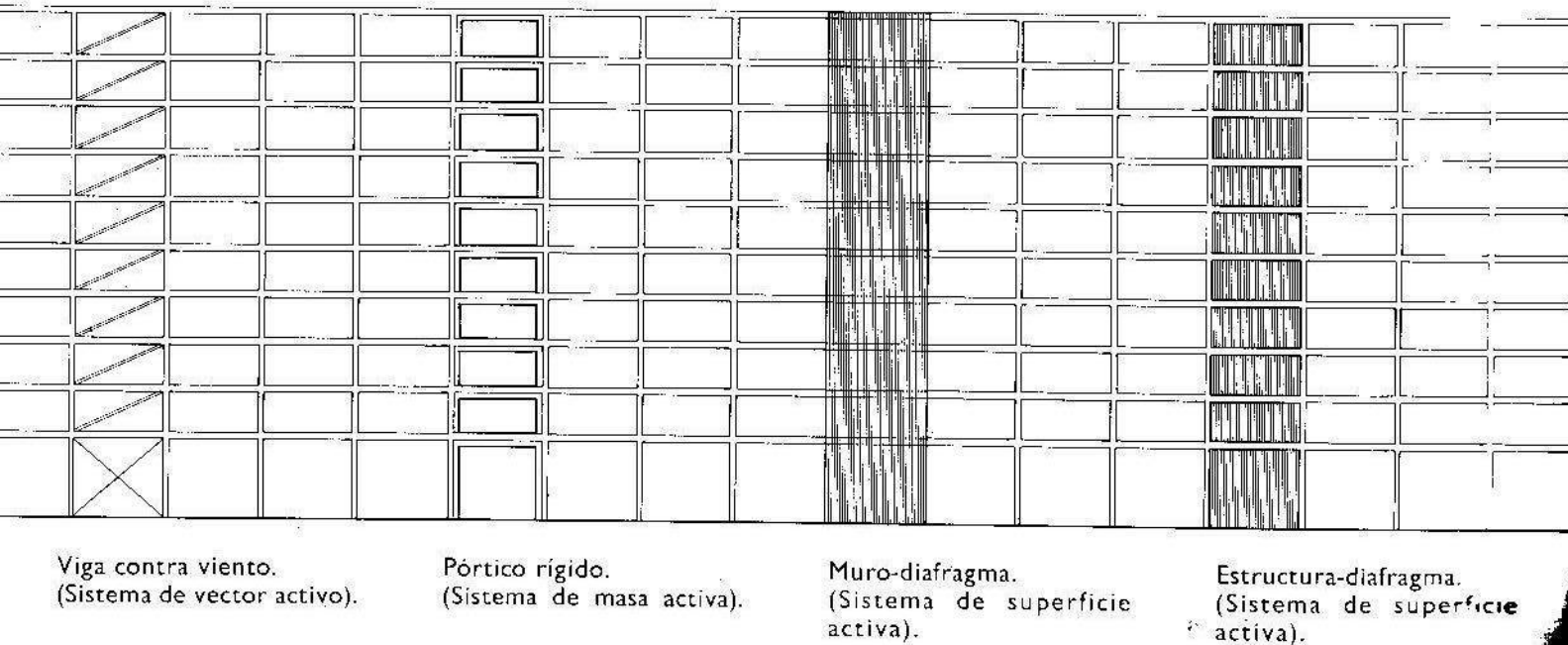
La presión del viento por unidad de área crece con la altura del edificio. Su influjo en la estructura resulta predominante en relación con el originado por las cargas verticales; la estructura vertical es solicitada por el viento como una viga en voladizo es solicitada por la carga vertical continua.



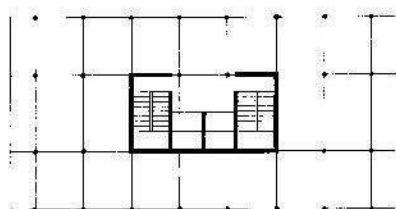
Sistemas aditivos e integrales para transmisión de cargas de viento



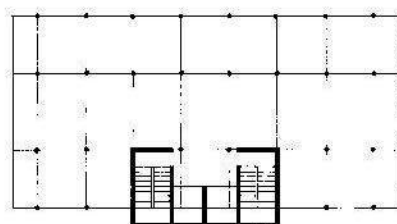
Sistemas de estabilización lateral (contra el viento) en estructuras reticuladas



Integración de la estructura contra viento en el proyecto de la planta



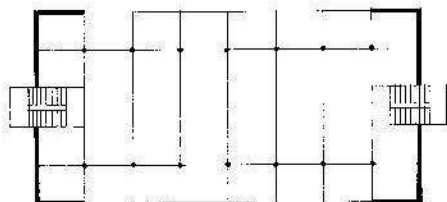
Núcleo central.



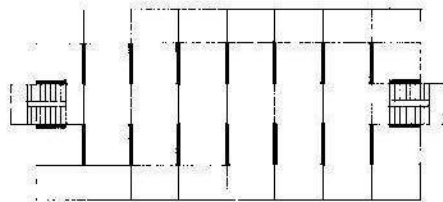
Núcleo lateral

Elementos estructurales para resistir el viento.

Muros del núcleo de servicios.

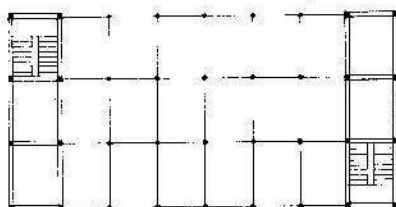


Muros exteriores.

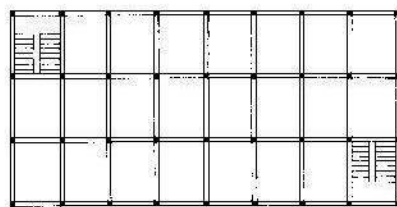


Muros divisorios.

Muros exteriores o muros divisorios.



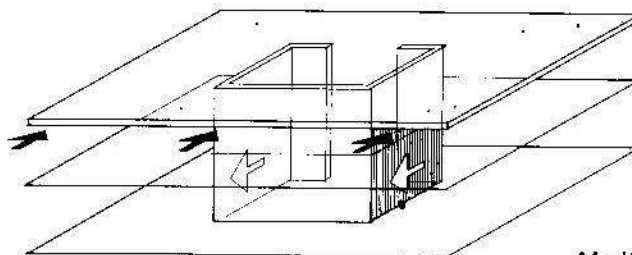
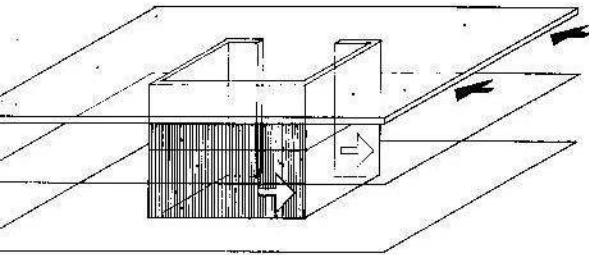
Entramados extremos.



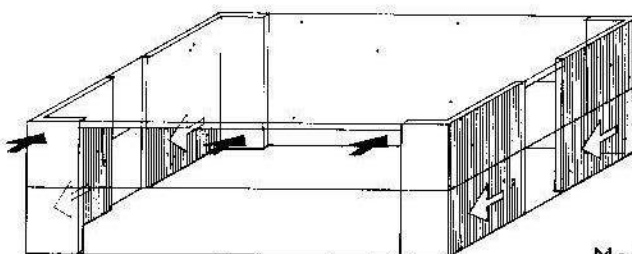
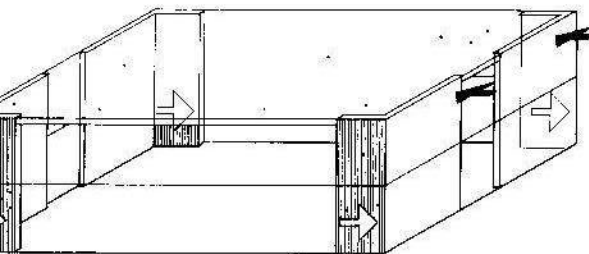
Esqueleto completo.

Soportes y vigas (entramados).

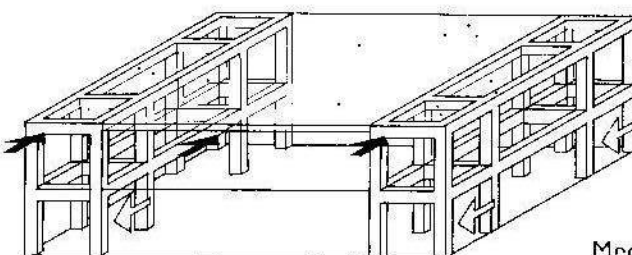
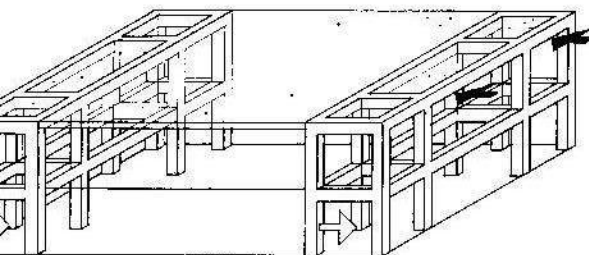
Resistencia al viento en dirección longitudinal y transversal (referida a los planos de forjado de la página anterior)



Mediante el núcleo de servicios.



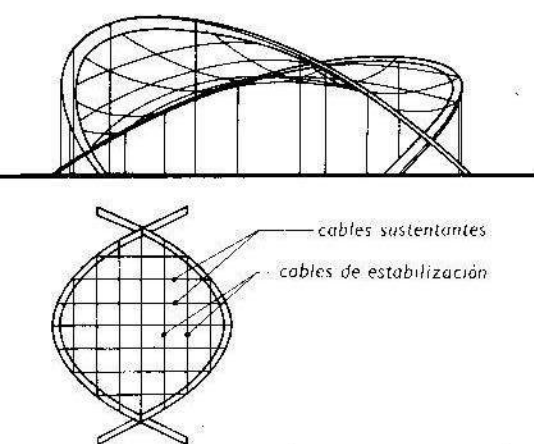
Mediante los muros exteriores.



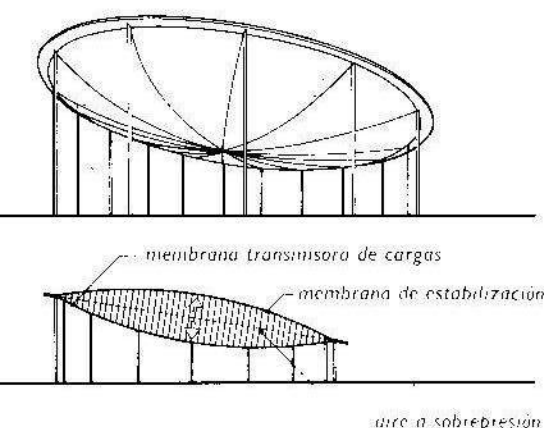
Mediante entramados.

Nuevos campos en el proyecto de las estructuras

Contribución de Hannskarl Bandel



1) Cubierta colgante con estabilización transversal.



2) Estructura de doble membrana.

En los últimos años han tenido lugar un progreso impresionante y cambios significativos en el proyecto de estructuras de edificios. Aparte el desarrollo de nuevos materiales, la aplicación de modernas técnicas constructivas, la ayuda de computadores y la adopción de principios avanzados de proyecto, el mayor estímulo para una nueva era en el diseño de estructuras radica en el interés y la voluntad de los arquitectos para expresar la forma lógica y la belleza de una estructura bien proporcionada.

Mejores materiales de construcción

Cualquier progreso en ingeniería está intimamente ligado al desarrollo de mejores materiales. La mejora de materiales se intenta especialmente incrementando la resistencia o reduciendo el peso o, de un modo ideal, consiguiendo combinar ambas cosas. Un ejemplo preeminente de esto es el aluminio. Con un peso de solamente un tercio en relación al del acero se ha alcanzado la resistencia del acero normal de construcción. La ligereza, combinada con la resistencia, y el excelente comportamiento a la corrosión son ventajas importantes y las razones para el uso difundido del aluminio. Pero el incremento en la resistencia de los aceros especiales en los últimos años es también notable, ya que éstos han duplicado con exceso sus resistencias en comparación con el acero común de construcción.

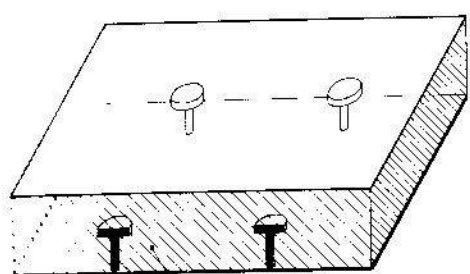
Mayores resistencias y pesos más ligeros han resultado también de las investigaciones intensivas llevadas a cabo en el hormigón, las fábricas de albañilería y las maderas laminadas. Pero, como hecho más importante, el desarrollo de los materiales plásticos reforzados con fibra de vidrio ha abierto un mundo completamente nuevo al proyecto estructural y arquitectónico, como consecuencia de su ligereza, moldeabilidad, resistencia a la corrosión y durabilidad.

Sistemas estructurales pretensados

Al lado del desarrollo de mejores materiales, el cambio mayor en el proyecto estructural procede de la nueva técnica del hormigón pretensado. Esta técnica fue desarrollada y hecha práctica y económica, principalmente, como consecuencia del incremento de la resistencia del acero. Los cables de acero de alta resistencia pretensan el hormigón y así capacitan a un material empleado normalmente a compresión para resistir elevadas tensiones de tracción que, de otro modo, lo hubieran llevado a su destrucción. Es sobradamente conocido que el procedimiento de pre o postensado, especialmente en los modernos proyectos de puentes, ha llevado a alcanzar luces que anteriormente se consideraban imposibles con el hormigón. También en el proyecto de edificios, al emplear sistemas pretensados, las distancias entre soportes se han duplicado con exceso. La demanda de vigas pretensadas de diversos tipos ha engendrado verdaderamente una nueva industria para elementos estructurales prefabricados, casi comparable con las laminadoras de la industria del acero.

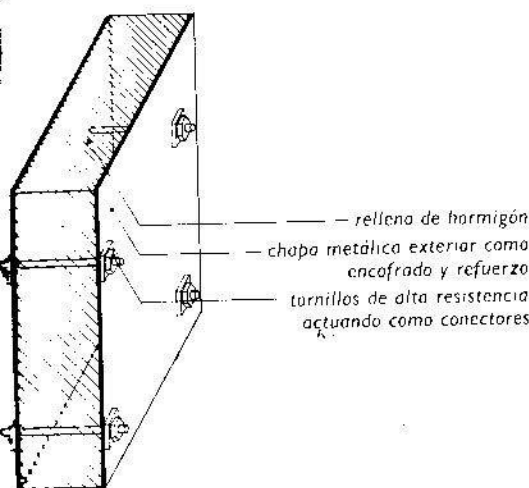
Un método especial y más reciente de pretensado es el tensado de cubiertas con cables o el inflado de bóvedas neumáticas (figuras 1 y 2). Ambos tipos de estructura vienen siendo usados con una frecuencia creciente para cubrir amplias superficies que deben quedar sin obstáculos de soportes intermedios. Al igual que en el caso del hormigón, el pretensado previene la rotura debida a las tensiones de tracción; el tensado de los cables o de la membrana neumática induce una tensión suficiente para evitar la deformación de los cables o de la membrana originada por las cargas de compresión.

Las estructuras con cables tensados y las membranas neumáticas son nuevos sistemas, pero ya han probado su eficacia y economía en los pocos casos en los que han sido empleados. Los futuros proyectos y la investigación, en especial la rela-

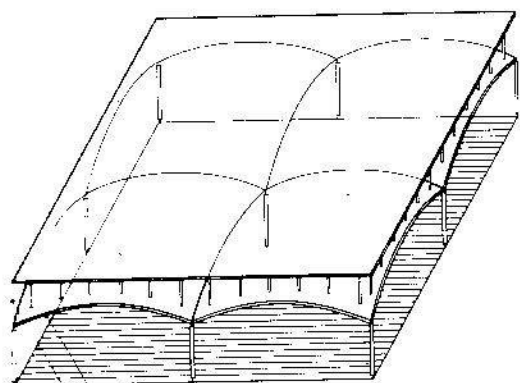


— losa de hormigón
— perno soldado conector
— chapa de acero actuando como encofrado y refuerzo exterior

3) Losa de forjado mixta.



4) Placa de muro mixta.



5) Sistema doble de forjado.

tiva a los materiales de las membranas, ampliarán, sin duda, su uso.

Estructuras mixtas

La práctica de combinar materiales de diferentes características en cuanto a la adopción de cargas se refiere, para formar un miembro estructural, fue desarrollada casi simultáneamente con el pretensado. La combinación más común es la de una losa de hormigón a compresión y una viga de acero a tracción formando juntas una viga mixta. El futuro aportará la combinación de otros varios materiales, aparte del acero y del hormigón, tales como la fibra de vidrio o los alambres de acero con plásticos.

Hasta ahora el acero y el hormigón han sido combinados casi exclusivamente para formar vigas; pero las secciones de losas, placas y láminas podrían ser construidas con eficacia similar. Una chapa de acero bajo una losa de hormigón podría actuar simultáneamente como encofrado permanente y como armadura externa (figura 3)*. En láminas y muros, o bien dos chapas exteriores metálicas con un relleno de hormigón o una chapa interior con un gunitado de hormigón como recubrimiento exterior forman una sección capaz de absorber ambas tensiones, la de compresión y la de tracción (figura 4). La tracción es resistida por el acero y la compresión por el hormigón, con lo cual se previene al mismo tiempo el abollamiento de la delgada hoja metálica.

El empleo de estructuras mixtas ha conducido generalmente a un ahorro de material, a una mayor rigidez y a una reducción de la flecha. El enlace eficaz entre el hormigón y la placa de acero se consigue recientemente en diversas estructuras mediante el empleo del rozamiento originado por tornillos sometidos a una gran tensión, que reemplazan las uniones convencionales transmisoras de esfuerzos cortantes.

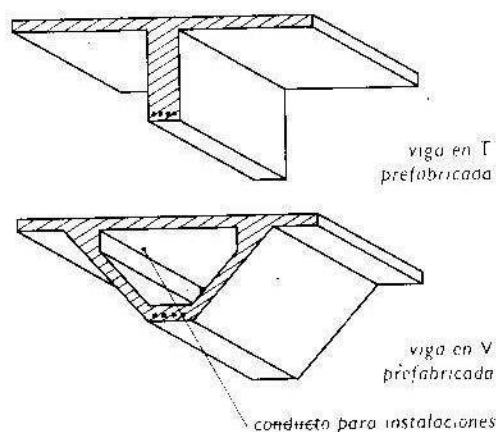
Láminas

Las láminas han llegado a ser tan populares que podrían casi considerarse como un símbolo de la construcción de este siglo.

Sin embargo, los futuros proyectos de láminas tienen que superar dos limitaciones que han afectado su utilización. Una de esas limitaciones consiste en que las láminas se han construido casi exclusivamente como techos que cubren espacios. El principio de encauzar las cargas conformando el elemento resistente, en forma que los esfuerzos resistentes estén contenidos en su plano tangente, puede emplearse no sólo para cargas verticales de cubiertas, sino también para cargas verticales de pisos o, incluso, cargas horizontales, como el viento o los empujes del terreno.

Los elementos de la construcción técnica demandan cada vez más espacio, e igualmente libre acceso a este espacio. Esto conduce al empleo de los sistemas de doble cubierta. Una de estas cubiertas podría construirse fácilmente como una simple y ligera lámina, de soporte a soporte (figura 5), o como una lámina plegada múltiple, dispuesta de viga a viga. Por ejemplo, una viga en T prefabricada podría ser también una lámina plegada en V prefabricada, lo que ahorraría probablemente material y, al mismo tiempo, permitiría un conducto ideal, completamente oculto, para las instalaciones (figura 6). Las láminas podrían formar también forjados contruados a mayor escala. Las bóvedas laminares cónicas o esféricas, por ejemplo, podrían formar el piso principal de los graderíos de los estadios, con sus características tribunas en declive (figura 7).

Predominantemente, las fuerzas verticales deben ser resistidas en los cimientos, y así algunas estructuras construidas recientemente emplean también láminas o placas plegadas como cimentaciones. Respecto de las cargas horizontales es sorprendente que los muros de contención



se proyecten todavía como vigas en voladizo, ya que es evidente que los muros curvos y laminares serían mucho más eficaces para resistir la presión del terreno (figura 8).

Al considerar también las láminas como miembros estructurales capaces de recibir cargas debidas a la acción del viento o seísmos, se abre un nuevo campo para el proyecto de edificación en altura. En vez de recibir esas fuerzas, al modo convencional, mediante pórticos o vigas de celosía, las láminas y las placas plegadas pueden formar bien los núcleos interiores o bien incluso los muros exteriores de los edificios (figura 9).

El empleo de las bóvedas laminares ha sido limitado sorprendentemente de otro modo. Excepto en algunas láminas de madera, el material exclusivamente empleado ha sido el hormigón. En cualquier sistema de lámina, con doble curvatura de signo variable, ciertas direcciones de la lámina están sometidas predominantemente a tensiones de tracción, y, por tanto, el empleo de materiales apropiados para la compresión, como el hormigón, no es del todo deseable. Los medios comúnmente empleados para encauzar las tensiones de tracción, según esas direcciones, consisten en armar o pretensar el hormigón. Sin embargo, el medio más ideal sería emplear solamente un material de tracción, como el acero, en aquellas direcciones, evitando así el peso del hormigón. Por otra parte, si se construye una lámina a base exclusivamente de chapas de acero se plantea inmediatamente el problema del abollamiento en la dirección de las tensiones de compresión.

El abollamiento puede prevenirse, desde luego, adoptando rigidizadores o, mejor aún, corrugando las láminas de metal. El corrugado es fácil de realizar y no es caro. Si los sistemas de láminas se emplean con compresión biaxial puede formarse una sección eficaz y muy ligera, uniendo dos hojas corrugadas de tal modo que sus dobleces sean perpendiculares

entre sí. Si el espacio entre las dos hojas corrugadas se rellena además con un aislamiento de espuma se crea entonces una sección de lámina equivalente, con tal vez solamente una décima parte del peso de la lámina de hormigón convencional (figura 10).

En un futuro próximo se emplearán paneles premoldeados con fibra de vidrio que, ahuecados y rigidizados como cartones de huevos, se ensamblarán configurando las láminas y comprometiendo el actual monopolio del hormigón.

Membranas

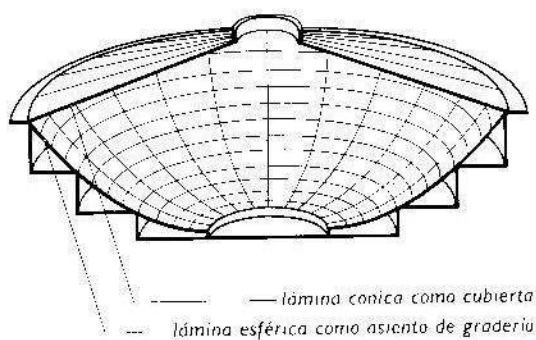
Las láminas en pura tensión constituyen las membranas. Si están construidas con un material adecuado resultará un sistema extremadamente económico que podrá utilizarse para varios tipos de estructuras. Suponiendo que un material pueda desarrollarse con suficiente resistencia, las membranas reemplazarán los techos colgantes tradicionales que consisten en una serie de cables y de elementos de cubierta.

Las membranas son aptas también para ser empleadas como recipientes, tales como tanques de agua, y, a mayor escala, podrían incluso reemplazar a los muros de contención o a los diques. Las membranas pueden ser reforzadas por casi cualquier material, pero especialmente por alambres de acero para adquirir la alta resistencia exigida. Es de especial interés la lógica forma estructural de las membranas, que depende solamente de las cargas y de la forma de los soportes, ya que no puede ser absorbido ningún momento flector, sino solamente tensiones axiales. Algunas formas tienen un aspecto muy futurista y su expresión arquitectónica puede ser original e inspirada (figura 11).

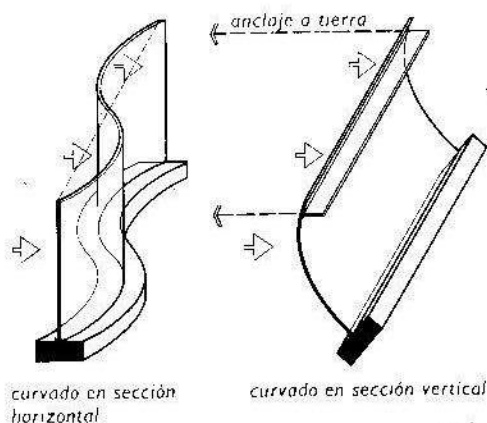
Continuo

Aparte de los diversos aspectos descritos hasta aquí, probablemente el desarrollo

6) Unidades de viga prefabricadas.



7) Láminas de cubierta y asiento de graderío, combinadas.



8) Estructuras laminares como muros de contención.

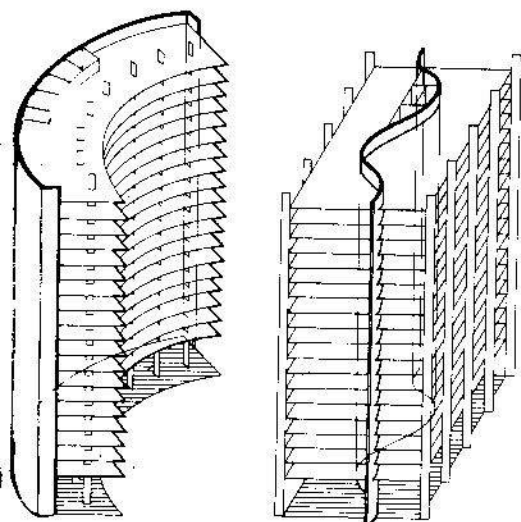
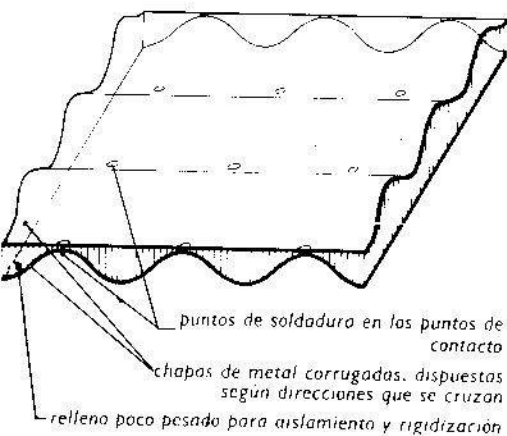
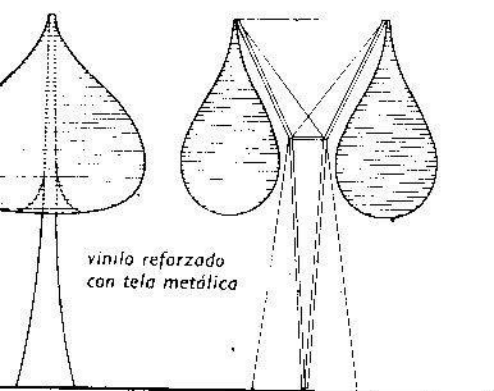


Lámina como espina dorsal para estructuras de altura.



Sección de láminas de metal corrugados.



Membrana - depósito de agua.

más notable e importante en la ingeniería moderna es la búsqueda de un camino que combine los diferentes elementos de una estructura en un conjunto resistente a las cargas, complejo, pero integrado: un continuo. Las razones de este desarrollo son:

1. Economía: resultará un empleo de material mínimo.
2. Mayor coeficiente de seguridad: los miembros integrados se ayudan entre sí; de este modo el estadio del aprovechamiento final de la capacidad resistente se alcanza con una carga mucho mayor.
3. Computadores electrónicos: los computadores han abierto una nueva dimensión para los cálculos numéricos, que lleva a un mejor entendimiento de la acción interna de tales estructuras integrales.
4. Ingenieros: el deseo de los ingenieros de crear nuevas y mejores estructuras después de haber experimentado una nueva libertad y haber llegado a un entendimiento con los arquitectos contemporáneos.

En vez de haber asignado una tarea específica a realizar a cada miembro estructural, tal como a una losa el transmitir la carga vertical a las vigas mediante flexión, o a una viga transmitir la reacción de la losa a la columna, o a una columna transmitir la carga de las vigas a la cimentación, el continuo intenta unir todos los miembros estructurales y, por medio de firmes conexiones, emplear un único miembro estructural como elemento que transmita la carga, según múltiples direcciones, en una estructura general.

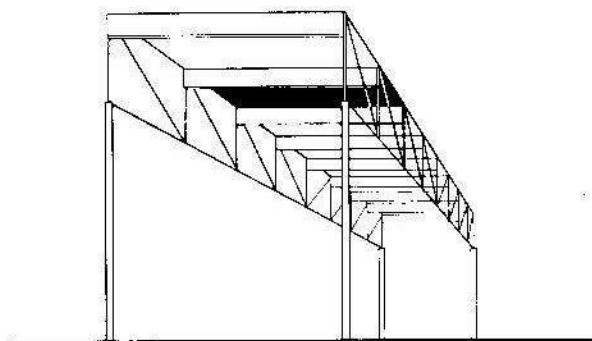
Este principio parece quedar muy bien ilustrado por el ejemplo de una placa de puente ortotropa (figura 12). La placa metálica del tablero está dividida en seis funciones diferentes. Cubriendo tramos de un nervio rigidizador al siguiente, la placa transmite las cargas locales a los

nervios por flexión y, en parte, por tracción axial. Como ala de una viga transversal horizontal, la placa es solicitada por tercera vez. Finalmente, como ala parcial de las vigas principales, la placa es solicitada por cuarta vez.

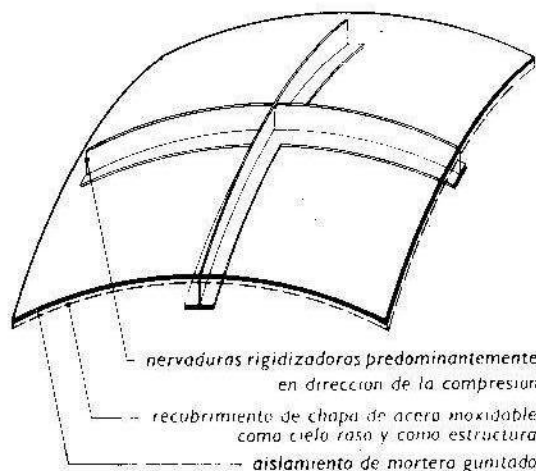
Además, los esfuerzos cortantes son absorbidos en una quinta y sexta función; por ejemplo, como rigidizador horizontal entre las vigas principales o como placa sometida a esfuerzo cortante que amortigua la diferencia de flechas de las vigas principales.

Transferir el principio de un continuo a una simple estructura de cubierta consistente en placas metálicas de cobertura, correas, cerchas de acero y arriostramientos contra viento significa la transformación del material del cordón superior de la cercha en una chapa metálica que, de hecho, debe cumplir igualmente las funciones de los otros elementos enumerados. Es evidente, que las consideraciones sobre el abollamiento requerirán el corrugado de una tal chapa. En el caso de cúpulas metálicas convencionales compuestas por nervios radiales, nervios circulares, diagonales, estructura secundaria, cabios y cubierta metálica, un moderno proyecto de continuo combinará los materiales de todos estos miembros en una única envoltura transmisora de cargas (figura 13). Esto puede realizarse bien empleando una cobertura metálica o adhiriendo una envoltura premoldeada de hormigón a un esqueleto mínimo metálico que poseería la doble función de refuerzo de panel exterior y hacer de andamiaje para la erección de la cúpula prefabricada (figura 14).

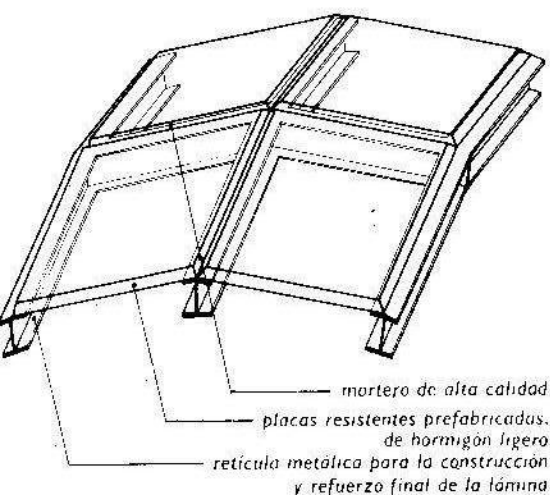
El principio del continuo hace que incluso nuevos sistemas estructurales, tales como cubiertas colgantes o estructuras espaciales, aparezcan como pasados de moda. Concentrando el área de la sección transversal en un cable y cubriendo el espacio entre los cables con un segundo elemento, una cubierta ha de ser inferior a la formada por un voladizo en tracción uniforme. Una lámina así combina la fun-



12) Tablero de puente ortotrópico.



13) Lámina de acero compleja.



14) Lámina compuesta de hormigón - acero.

ción de cables y cubierta, y, además, permite una transmisión de las cargas en múltiples direcciones, lo que es siempre superior. Consideraciones similares se aplican también a los entramados espaciales tridimensionales.

El continuo postula también una integración entre los planos de las estructuras de cubiertas, muros, pisos y cimentaciones. Al combinar estos planos se ponen en acción propiedades ocultas, despreciadas usualmente, pero de asombrosa capacidad resistente residual en lo general. La resistencia inherente a esos planos combinados hacen superfluos los sistemas de miembros aislados previstos para cargas especiales, tales como viento o acciones sísmicas. En vez de ser únicamente aislantes, los muros de los edificios

resultarán miembros estructurales, tales como son los entramados, las estructuras de paneles múltiples o las láminas curvas. En consecuencia, los muros y sus huecos de ventana requerirán nuevos conceptos arquitectónicos, los cuales a su vez inspirarán la ingeniería futura.

La búsqueda de la perfección del continuo necesitará un íntimo intercambio de ideas entre las dos profesiones de arquitecto e ingeniero. Después de todo, el sistema estructural más eficaz casi dictará la forma exterior y el espacio interior del edificio resultante. Por este motivo es probable que los nuevos conceptos del proyecto de estructuras influyan la creación arquitectónica en su conjunto y conduzcan también a otros nuevos conceptos en los proyectos de edificación.



Indice

Sistemas estructurales de forma activa

Sistemas estructurales en estado de tensión simple

Sistemas de cables

Mecanismo sustentante y forma estructural
Sistemas simples paralelos

Estabilización del cable portante

Sistemas pretensados con estabilización en una dirección (sistemas paralelos y de revolución)

Sistemas pretensados con estabilización transversa (redes de cables con curvatura adueta)

Sistemas con entramado de tipo anular

4

Sistemas en forma de tienda

Sistemas con apoyo exterior

Sistemas con arco interior

Sistemas con apoyo interior

Sistemas con apoyo y puntos de anclaje alternados

Sistemas para construcción de puntos altos

54

Sistemas neumáticos

Mecanismo sustentante y forma estructural
Sistemas de presión interior reforzados por cables

Sistemas de presión interior con puntos de anclaje interior

Sistemas de presión interior reforzados con nervios de membrana

Sistemas de doble membrana

60

Sistemas de arcos

Mecanismo sustentante y forma estructural
Sistemas para recepción del empuje horizontal

Deformación de articulaciones

Sistemas de dos articulaciones

Sistemas de tres articulaciones

Posibilidades de diseño

2

Sistemas estructurales de vector activo

Sistemas estructurales en estado de tracción y compresión actuando conjuntamente

73

Sistemas planos triangulados

Mecanismo de estructura triangulada

Acción de las barras

Formas básicas

Posibilidades de diseño

Aplicación para otros sistemas de estructuras

Sistemas de cerchas

84

Sistemas curvos triangulados

Mecanismo sustentante

Sistemas para superficies curvas simples

Sistemas para superficies curvas dobles

Sistemas para superficies esféricas

96

Sistemas reticulados espaciales

Mecanismo sustentante

Sistemas reticulados espaciales a base de prismas

Sistemas reticulados espaciales a base de pirámides

Posibilidades de diseño

3

Sistemas estructurales de m activa

Sistemas estructurales en estado de flexión
Sistemas de vigas

109

Mecanismo sustentante

Vigas sencillas, vigas en voladizo y vigas continuas

Influencia de las condiciones de apoyo

Influencia de la continuidad

Posibilidades de diseño

116

Sistemas de pórticos

Mecanismo sustentante y forma estructural
Sistemas de pórticos de dos y tres articulaciones

Sistemas de pórticos horizontales y verticales

Sistemas de forma inversa y doble de pórticos articulados

Sistemas de pórticos simples y múltiples

Sistemas de pórticos de varias plantas

138

Emparrillados de vigas y sistemas de losas

Mecanismo del emparrillado de vigas

Sistemas de retículas
Posibilidades de diseño
Mecanismo de la losa

4

Sistemas estructurales de superficie activa

Sistemas estructurales con superficies en estado membrana

145

Sistemas de estructuras laminares plegadas (prismas)
Mecanismo sustentante
Componentes
Sistemas plegados
Aplicación para sistemas estructurales lineales
Sistemas con intersección de superficies plegadas

165

Sistemas de estructuras laminares plegadas (pirámides)
Mecanismo sustentante
Geometría de poliedros
Sistemas plegados

180

Sistemas de lámina de simple curvatura
Mecanismo sustentante
Láminas cilíndricas cortas y largas
Geometría de superficies cilíndricas

Sistemas con intersección de superficies cilíndricas
Aplicación para sistemas estructurales lineales

194

Sistemas de láminas de revolución
Mecanismo sustentante
Sistemas de disposición del borde
Geometría de superficies de revolución
Formas especiales
Sistemas de configuración del espacio con superficies esféricas

208

Sistemas de lámina de curvatura negativa
Generación de superficies regladas y de translación
Mecanismo sustentante de superficies «hypar»
Geometría de superficies «hypar»
Posibilidades de aplicación con paraboloides hiperbólicos
Superficies «hypar» con bordes curvos
Sistemas de configuración del espacio con superficies «hypar»

5

Sistemas estructurales verticales

236

Sistemas de transmisión de cargas
Sistemas de retícula
Sistemas de voladizo
Sistemas de tramos libres

240

Sistemas para planta y alzado
Sistemas de torre
Sistemas de laja
Sistemas reticulares geométricos
Secciones transversales típicas

252

Sistemas para transmisión de cargas de viento
Sistemas aditivos e integrales
Influencia en el proyecto de plantas