

Ings. Santiago Arias, César Barros y
Rodrigo Flores.

Informe sobre anteproyecto del Estadio cubierto de Santiago

1. INTRODUCCION

a) Generalidades.

Se estudia actualmente por intermedio del Ministerio de Obras Públicas la construcción de un estadio cubierto para 20.000 personas en la ciudad de Santiago de Chile.

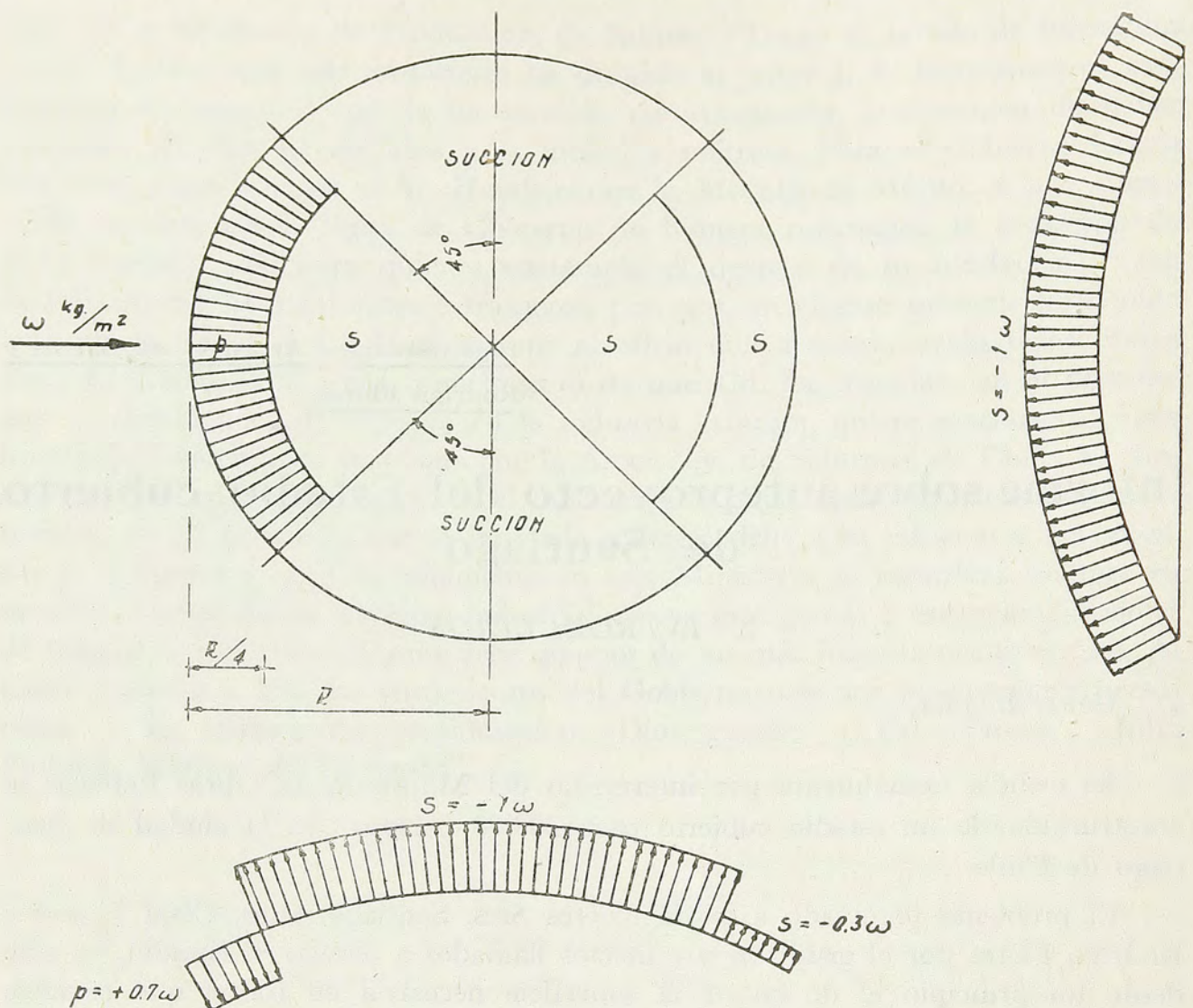
El problema planteado a los ingenieros Sres. Santiago Arias, César Barros y Rodrigo Flores por el grupo de arquitectos llamados a diseñar el Estadio, ha sido desde un principio el de cubrir la superficie necesaria en forma que resuelva una serie de problemas tales como cabida adecuada, máximo aprovechamiento de las tribunas laterales, reducción al máximo de zonas construídas no bien aprovechadas, formas convenientes desde el punto de vista de la ventilación y aireación, adecuada solución desde el punto de vista acústico y finalmente lo más importante, costo lo más reducido posible de la construcción, teniendo en cuenta que los fondos de que se dispondrá deberán invertirse en diferentes etapas y, por lo tanto, el proyecto deberá también adaptarse a estas circunstancias.

El ingeniero señor Santiago Arias fue enviado por la Dirección General de Deportes del Estado con los arquitectos señores Mario Recordón y Augusto Gómez, en comisión de estudio a Brasil y Argentina con el objeto de observar y estudiar de cerca los estadios cerrados de Maracaná en Río de Janeiro, Ibirapuera en Sao Paulo y Luna Park en Buenos Aires.

El señor Arias tuvo oportunidad de cambiar opiniones con los ingenieros y arquitectos proyectistas de los estadios cerrados en Brasil. De estas conversaciones, así como de la inspección ocular de las obras en construcción se recogieron los siguientes antecedentes:

1. La solución dada para la techumbre del estadio de Maracaná consiste en arcos radiales de 100 mts. de luz, 18 mts. de flecha en concreto armado concurrentes a un anillo central de 20 mts. de diámetro, que entregan sus empujes horizontales a una losa pasillo que constituye un anillo de gran rigidez.

2. Estos arcos han sido calculados para las solicitaciones de peso propio, ma-



terial de techumbre, temperatura, retracción de fraguado y acción del viento mediante la teoría corriente que resuelve las solicitaciones en estos elementos.

3. Es interesante anotar la hipótesis que se explica en el diagrama adjunto respecto a la distribución de presiones y succiones adoptada en el cálculo de las solicitaciones por viento.

4. En lo que se refiere al cálculo de la estructura de tribunas no aparecen dificultades especiales puesto que en Río de Janeiro no hay acciones sísmicas que tomar en cuenta y las presiones dinámicas del viento alcanzan valores bajos que oscilan entre 30-50 K/m².

5. Es digno de mencionar que los ingenieros brasileños cuentan para la solución de proyectos de hormigón armado con acero revirado o retorcido con un límite de fluencia de 4.200 Kg/m², permitiéndoles trabajar con fatigas admisibles de 2.000 a 2.200 Kg/cm². En lo que se refiere a la calidad del concreto la resistencia cúbica mínima a los 28 días es de 300 a 400 Kg/cm², pudiendo obtenerse dichos valores mediante bajas relaciones agua-cemento y utilizando vibradores en forma permanente durante el hormigonado.

6. El estadio cerrado de Ibirapuera, Sao Paulo, de 105 mts. de diámetro aproximadamente tiene una solución estructural similar al de Río de Janeiro, diferenciándose en el hecho de que los arcos radiales y anillo central son metálicos, resueltos con fierro redondo soldado, fijos en el anillo central y articulados en los arranques.

La directriz de los arcos está formada por dos radios de curvatura, con una tangente en los arranques que forma un ángulo de 60° con la horizontal, permitiendo de este modo disminuir los empujes correspondientes.

Tanto el anillo metálico central de 20 ton. de peso como los arcos de 12 ton., fueron prefabricados en sitio y colocados en posición mediante plumas y huinchas adecuados.

Los arcos metálicos han sido calculados para las solicitaciones máximas mediante la teoría corriente y verificada la estabilidad al pandeo de los elementos componentes por separado.

El peso por m^2 de estructura de techumbre que se ha logrado con la solución adoptada es de $35 \text{ Kg}/m^2$, siendo el peso total de la estructura de 350 tons.

La solución inicialmente propuesta para el estadio de Sao Paulo fue una bóveda cáscara de hormigón armado de 45 cms. de espesor en los arranques y 15 cms. en la clave, desechándose su realización por resultar antieconómica su construcción por elevado costo de los moldajes y alzaprimas que casi igualaban al de la cubierta.

7. El Luna Park de Buenos Aires desde el punto de vista estructural aparece resuelto mediante un sistema combinado de consolas y arcos metálicos, no presentando desde nuestro punto de vista, un interés especial, por corresponder a un planteamiento muy diferente al que nos ha tocado resolver.

En un viaje que realizaron a Uruguay los ingenieros Sres. César Barros y Rodrigo Flores con ocasión de las V Jornadas de Ingeniería Estructural tuvieron ocasión de conocer un anteproyecto que se estudiaba para un estadio municipal en Montevideo.

Entre las soluciones propuestas para este estadio cubierto se contempló también la posibilidad de una techumbre constituida por cables. Fue grato constatar que tal solución tenía un costo de solamente $1/5$ del correspondiente a una solución tradicional de arcos y techumbre de hormigón. Esto viene a comprobar lo acertado de nuestra determinación de elegir los cables como la solución más económica del problema planteado.

2. PLANTEAMIENTO DEL ANTEPROYECTO

a) *Discusión de algunas soluciones posibles.*

El problema de cubrir superficies del orden de los $10.000 m^2$ con luces de casi 100 mts. es bastante serio y las posibilidades y soluciones corresponden al empleo de materiales tales como el acero o el hormigón.

Como soluciones posibles básicas de la estructura de la techumbre podemos mencionar las siguientes:

1. Solución por arcos.
2. Solución por bóveda.
3. Solución por reticulados planos.
4. Solución por reticulados espaciales.
5. Solución por cables.

La solución para la infraestructura soportante está condicionada por las funciones propias del estadio y por la naturaleza de las acciones transmitidas por la

techumbre, existiendo, en general, bastante versatilidad de formas estructurales para adaptarse a estos esfuerzos. Las acciones sísmicas, sin embargo, plantean serias limitaciones que inciden en la distribución de las rigideces para poder controlar las acciones mutuas que se desarrollan entre los distintos elementos de la estructura debido a la acción de los temblores.

Si se analizan el comportamiento resistente de los elementos estructurales básicos de techumbre enumerados anteriormente podemos observar que en las soluciones 1 y 3 por arco y reticulado plano las solicitaciones son recogidas por elementos que trabajan en su plano, en tanto que en las 2, 3 y 5 de bóveda, de reticulado espacial y de malla de cables, los esfuerzos son recogidos por elementos estructurales espaciales, haciéndose aparente la ventaja de estos últimos frente a los primeros por razones de aprovechamiento más completo del material. Además los esfuerzos transmitidos a la infraestructura en el segundo caso están mejor distribuidos, evitándose las concentraciones de solicitaciones particularmente graves para la acción sísmica que dificultan la solución del problema en obras de gran envergadura y que crean además problemas de orden arquitectónico.

La bóveda constituye una magnífica solución estructural y estética, pero las dificultades que se derivan de su construcción exigiendo costosos moldajes y precisa obra de mano ha hecho que se la mire con reservas como por ejemplo en el caso ya citado en el Brasil. Además en países donde la acción sísmica adquiere importancia la bóveda crea una masa muy grande que solicita muy desfavorablemente la infraestructura.

Los asentamientos de apoyo en las bóvedas determinan además fuertes acciones secundarias que exigen para su control disponer de elementos rigidizantes en las fundaciones que encarecen considerablemente la obra.

El reticulado espacial, si bien trabaja fundamentalmente como bóveda y no tiene muchos de los inconvenientes de ésta, presenta como desventaja la difícil técnica de su ejecución y, por ende, el elevado costo de su montaje.

Buscando resolver estos problemas caemos necesariamente en las concepciones nuevas de los elementos inversos de la bóveda, esto es en los sistemas sometidos a tracción en todos sus sentidos. Tenemos como antecedentes la magnífica realización de Nowiki y Severud en la exposición de Raleigh y los anteproyectos de Lafaille en Zagreb y Bauduein y Lods el año 1937, las realizaciones de Osterwald para el pabellón suizo en Berlín y el proyecto de Fintervalder para la Sala de la Selva Negra en Karlsruhe.

El cálculo de este tipo de cubiertas ofrece interesantes aspectos que deben analizarse, en especial aquellas acciones tales como el viento y las temperaturas, cuya influencia puede ser decisiva en el éxito de un proyecto de esta naturaleza.

Ante todo se hizo un modelo bastante primitivo a fin de estudiar cualitativamente como actuaban estos elementos. En este modelo se pudo comprobar que el sistema de cables cruzados con cables soportantes y cable atiesador genera superficies de doble curvatura de una rigidez lo suficientemente grande como para que combinada con la rigidez propia de una lámina de hormigón, de madera o metal, permitan cubrir luces grandes sin mayores inconvenientes.

La posición de unos cables con respecto de otros podría ser ortogonal o en ángulo, siendo preferible, desde el punto de vista arquitectónico, el empleo de cables cruzados bajo un cierto ángulo, formando así en el cielo rombos o triángulos.

Sin embargo esta disposición, dada las condiciones de forma de la planta, lleva a tensiones demasiado fuertes que exigen flechas pequeñas inferiores a 0.15 ó 0.20 de la luz, valores que según Fritz serían los más aconsejables desde el punto de vista económico. Además las flechas pequeñas crean superficies de doble curvatura poco acentuadas y, por lo tanto, poco aptas para trabajar como bóvedas a los efectos de succión del viento, por lo menos con los materiales que no fueran el hormigón precomprimido.

De los estudios hechos se desprende que el sistema de cables portantes con cables atiesadores actúa como una estructura con tensión previa que le permite tomar variaciones de cargas sin perder su forma ya que, en el fondo, toda carga aplicada adicionalmente al cable soportante, descargará el cable atiesador recargando poco al primero, salvo que la carga sea tal, que su influencia sobrepase la del cable tensor.

En los primeros tanteos numéricos se ha visto que no es conveniente exigir a los cables atiesadores hasta el extremo de igualar su acción a la de las máximas cargas de viento y es aquí donde deberá recurrirse al efecto membranar del relleno.

Los esfuerzos de la techumbre serán recogidos por un anillo perimetral de hormigón armado de sección aproximada de 0.40×2.50 que traspasará dichos esfuerzos a la cabeza superior de un sistema reticular radial típico que constituye además el elemento básico de la tribuna. Las tensiones horizontales serán finalmente entregadas a un anillo de gran rigidez constituido por la losa pasillo ubicada a la cota $+ 10$, disminuyéndose así las deformaciones horizontales de los marcos típicos. Con el objeto de reducir los esfuerzos de flexión en el pilar de descarga se ha consultado reforzar el sistema mediante un sistema péndola-tirante —como se indica en los planos— llevando de este modo las tensiones a las fundaciones. Los elementos restantes, vigas, losas y voladizos no presentan dificultades especiales.

3. DETALLES DEL ANTEPROYECTO

a) *Techumbre.*

a-1. *Generalidades.* La techumbre, desde el punto de vista estructural, estará organizada por una malla ortogonal de cables constituida por cables soportantes de curvatura cóncava hacia arriba y cables atiesadores de curvatura cóncava hacia abajo. Con el objeto de conseguir una mayor rigidez de la cubierta particularmente necesaria para resistir solicitaciones disimétricas y acortar el período propio de vibración de la bóveda se consulta una bóveda apoyada en los cables constituida por losetas prefabricadas. Sobre estas losetas se colocará el material aislante y la cubierta impermeabilizante que se especifique. Los cables entregarán sus tensiones a un anillo perimetral de hormigón armado de sección aproximada de 0.40×2.50 .

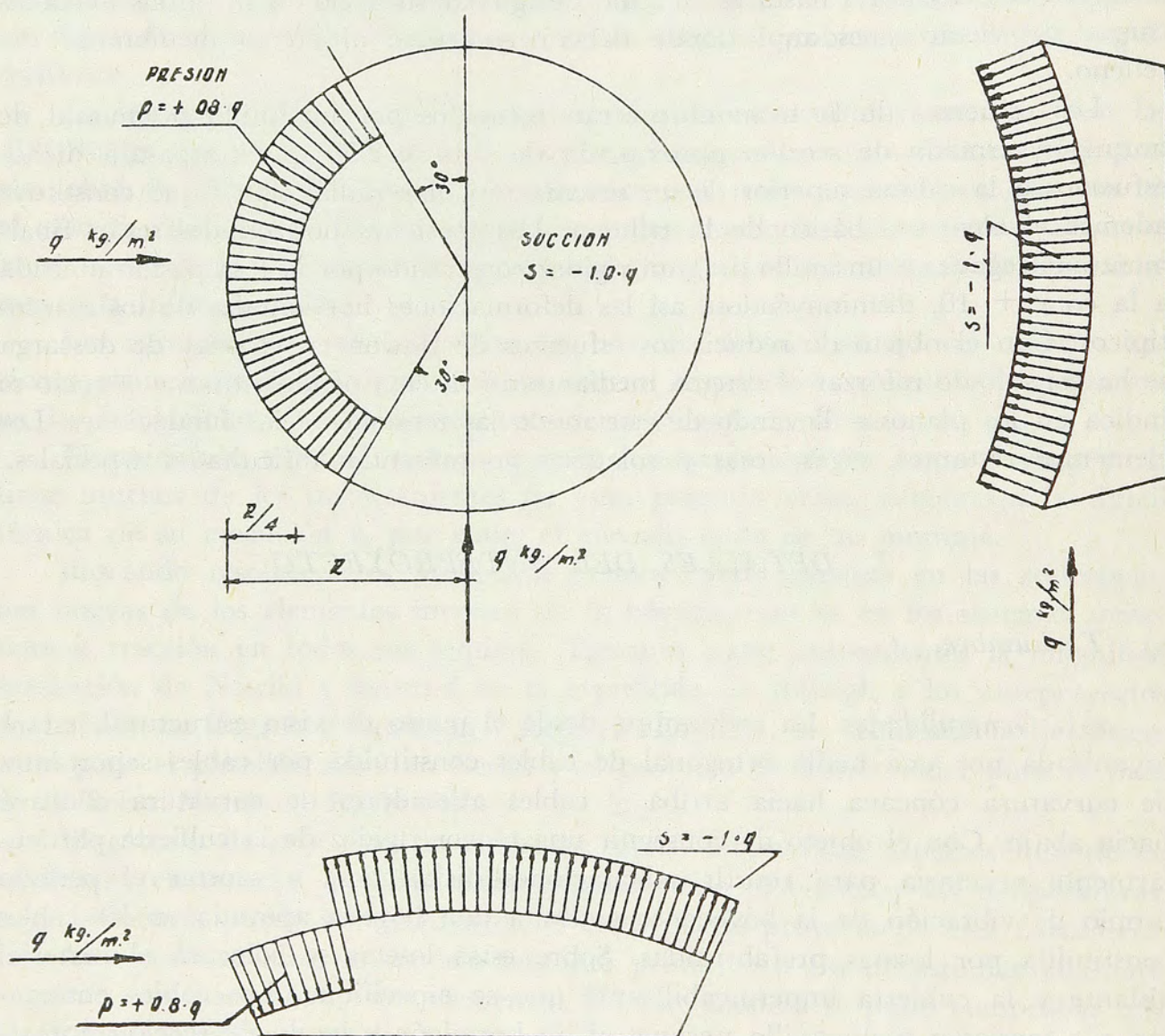
Las solicitaciones de la techumbre que deberán tomarse en cuenta en la determinación del estado de tensión serán: peso propio, viento, acción sísmica, temperatura y carga de nieve.

Las acciones provenientes del peso propio se analizarán de acuerdo con la teoría de malla de cables indicada en un Anexo de este informe.

Las acciones de viento sólo podrán apreciarse en base a los antecedentes que se tienen respecto a ensayos realizados en túneles aerodinámicos que, acusan para esta forma de volumen una depresión normal predominante sensiblemente repartida en forma uniforme de un valor aproximadamente $-1 \cdot q$, siendo q la presión dinámica máxima en Kg/m^2 de proyección vertical obtenido para la velocidad de viento considerada.

A falta de antecedentes más precisos y para tomar en cuenta el efecto de disimetría de cargas que es crítico para este tipo de techumbres proponemos el esquema de cargas que se indica y que corresponde a una extrapolación de los resultados obtenidos por Sosnoswki en Moscú.

ACCION DEL VIENTO SOBRE LA CUBIERTA



Sin duda que la manera más correcta de obtener la distribución de presiones y succiones en la techumbre sería a través de ensayos en un túnel aerodinámico.

Respecto a la presión dinámica q , por aplicarse a nuestro caso particular sería muy deseable un estudio basado en los datos estadísticos de la Oficina Me-

teorológica de Chile. A falta de estos antecedentes y recurriendo a los datos que han sido usuales en el cálculo de estructuras en Santiago se adoptará la cifra de

$$q = 60 \text{ Kg/m}^2.$$

Debe considerarse además que la acción periódica de las ráfagas unida a su constante cambio de dirección encuentran un fuerte amortiguamiento en el largo período de vibración de la lámina unida a su gran peso comparado con lo local de las acciones solicitantes y con el fuerte efecto amortiguante que en ambas direcciones ejercen los cables.

La acción sísmica no afectará mayormente la techumbre por las razones que se indican a continuación:

a) La acción sísmica traerá como consecuencia una oscilación horizontal de los extremos de la malla de cables, cuya amplitud dependerá de la rigidez de la infraestructura. Por ser muy pequeña esta amplitud frente a la luz de los cables, el cambio de tensiones en los cables debido a este efecto será de pequeña importancia; el efecto será solamente el de una vibración cuyo período dependerá de la tensión inicial del cable.

Las losetas prefabricadas que constituyen la bóveda estarán sujetas también a esta vibración y se estima que las uniones semirígidas entre ellas no sufrirán mayormente por este efecto. Por lo demás una grieta en esta unión no será de ninguna importancia porque las cargas verticales están resistidas por los cables y la impermeabilización está dada por una cubierta metálica especial.

Dada la rigidez transversal que se obtendrá con el sistema de cubierta propuesto, puede afirmarse que los esfuerzos sísmicos de la cubierta se entregarán con una aceleración horizontal de a g repartida en el anillo superior. Se ha estimado a en 0.12.

La acción térmica proveniente de la radiación solar no actuará directamente sobre la malla de cables al organizar la cubierta en la forma ya explicada que aleja el cable del exterior en más o menos 20 cm. de distancia.

Dada la magnitud de la tensión inicial de los cables atiesadores, los efectos provenientes de un desigual calentamiento del área cubierta no modificará substancialmente el estado de tensiones primitivo.

De lo anteriormente expuesto, se hace ver la necesidad de hacer un estudio detenido de la elección de los materiales aislantes por usar.

La carga de nieve no es crítica en el diseño, puesto que al no superponerse con las acciones sísmicas y de viento su valor estimado en 30 Kg/m^2 para la zona central no reviste mayor importancia.

a-2. *Cables.* Los cables deberán colocarse a distancias que oscilan entre los 3 y 5 metros según mejor aconsejen los diseños previos de los elementos de cubierta; en todo caso el aumentar su número y disminuir su diámetro dará aún mayor coeficiente de seguridad al conjunto, una mayor continuidad en las formas, mayor facilidad en el montaje y en la obtención del tipo de cable adecuado; además con un mayor número de cables se obtendrá un mayor amortiguamiento de acciones locales en ambas direcciones.

Las tensiones se calcularán de acuerdo a las fórmulas desarrolladas en el Anexo correspondiente, dando especial importancia a los cables transversales por

su fuerte efecto rigidizante. Se utilizarán cables helicoidales que deberán soportar una carga de 37 T. por metro corrido de perímetro.

Como fatiga admisible se recomienda mantener un valor σ_{ad} no superior a $0.5 \sigma_{ruptura}$; en todo caso deberán ensayarse los distintos tipos de cables disponibles aceptando aquellos cuyas características se acerquen más a las previstas en el cálculo.

Un factor de apoyo a la idea de usar cables delgados es el hecho comprobado de que las resistencias aumentan a medida que disminuyen los diámetros de los elementos componentes.

El montaje de los cables se harán, dándoles una tensión previa igual al 50% de la ruptura y controlando estrictamente las tensiones de montaje de acuerdo con las curvas de temple calculadas para este objeto.

Como sistema de anclaje el más recomendable sería el de conos rellenos con plomo convenientemente asentados en el hormigón y mediante adecuados refuerzos locales para evitar concentraciones de tensiones en el hormigón. En el extremo de tracción deberá usarse un sistema de cuñas cónicas que permitan ajustes parciales, dando tensión mediante gatas especialmente diseñadas y con dispositivo de medida de la tensión.

Después de dadas las tensiones definitivas deberían hormigonarse las cabezas previo desflocamiento de los extremos para asegurar un anclaje perfecto.

a-3. *Material de cubierta.* Con el fin de poder aprovechar al máximo las condiciones de rigidez resultante, lo más indicado es el uso de losetas prefabricadas de hormigón tipo sandwich aislante provistas de un reborde perimetral. Las losetas deberán ser triangulares para ser apoyadas en sólo 3 puntos y poder seguir así en buena forma todas las curvaturas de los cables, tanto en el período de montaje y ajuste como en el período de fraguado posterior.

Presentan además la ventaja de una vista inferior de favorable aspecto arquitectónico.

Es de observar que se puede conseguir un diseño muy ajustado, sometiendo a pruebas de ruptura a elementos dimensionados con una teoría anelástica.

Las placas una vez colocadas y ajustadas las tensiones de los cables deberán hormigonarse en las juntas generando así un sistema de gran rigidez transversal conveniente para la transmisión de esfuerzos de compresión. El empleo de pequeñas dosis de dilatadores en el hormigón permitiría evitar los efectos de retracción posterior.

Las placas de 5 cm. de espesor podrán contar con 2 capas de 1 cm. de hormigón resistente y 2 cm. de hormigón aislante poroso, con lo cual se reduciría su peso y se tendrían buenas condiciones aislantes.

Sobre este material y previo hormigonado de las juntas se podría usar la siguiente impermeabilización:

3 capas de fieltro y una capa intermedia de *cisal-craft* o cobre delgado sobre malla de yute.

En caso de quererse una mayor seguridad debería adoptarse una cubierta de cobre de 0.4 m/m con los convenientes ajustes de dilatación sobre fieltro impermeable pegado con bitumen.

La ejecución de la cubierta se haría llevando las planchas listas desde una planta hasta la obra y colocándolas mediante plumas livianas o mediante sistema

de cables de transporte superiores a la cubierta manejados por cabrestantes similares a los de carga de Bodegas en puertos.

b) *Infraestructura Soportante.*

b-1. *Generalidades.* La infraestructura estará sometida a acciones de peso propio, sobrecarga, temblor, temperaturas y retracción de fraguado, así como también a las solicitaciones derivadas de la techumbre.

Analizaremos una por una estas acciones.

Peso propio. El peso propio corresponderá al que resulta de la cubicación de obra gruesa incluyendo paramentos rellenos y estucos.

Sobrecarga. Para la sobrecarga de los pasillos y tribunas, se adoptarán 500 Kg/m² ubicados en la posición más desfavorable.

Efectos térmicos y de retracción. Se tomarán en cuenta tanto la acción de temperatura como la acción de retracción de fraguado evitando, mediante un conveniente fraccionamiento de las estructuras, la acción descontrolada de estos factores y manteniéndolos dentro de valores razonables.

Acción sísmica. La acción sísmica de la techumbre se traspasa a la infraestructura, como se dijo más arriba, como una aceleración uniforme que estimamos en 0.12 g.

La forma de actuar de la infraestructura, esto es, cómo ha sido concebida por nosotros para soportar y trasladar a las fundaciones todas las cargas actuantes es la siguiente:

Los cables que soportan la techumbre se anclan en un anillo superior que actúa como repartidor entre los diferentes machones superiores. Este anillo está dispuesto en forma de sectores con sus convenientes juntas para dejar actuar independientemente los grupos de pilares que forman los diversos sectores en que se divide la estructura. Las dimensiones de este anillo están dadas principalmente por razones estéticas ya que una sección de 2,5 mts. x 0,4 bastaría para los fines meramente estáticos.

Los sectores de anillo a su vez entregan las reacciones de la techumbre a los pilares inclinados (A) que se apoyan elásticamente por una parte en la viga inclinada que soporta la gradería y en un tensor (B) inclinado que toma la mayor parte del esfuerzo.

Ambos elementos tensor y viga puntal entregan sus esfuerzos horizontales al piso (C) que actúa como un gran arco placa horizontal que se apoya contra su sector o puesto simétrico. Esta gran placa arco de momento de inercia variable y que lleva además un sector reforzado interior que además sirve para tomar las consolas extremas de la tribuna se presta en forma ideal para resistir la componente horizontal generada por la techumbre. Dada su gran extensión permite fraccionarlo en grandes dovelas que aseguran el libre juego de los diversos sectores bajo la acción de temperaturas y retracciones de fraguado sin que por eso se dificulte la transmisión de esfuerzos de cizalle y de compresión. Además se encuentra convenientemente rigidizado por la acción de las vigas generales del tablero. Sirve también de elemento transmisor general de los esfuerzos sísmicos a los elementos aislantes de la estructura, comunicándole un desplazamiento horizontal sensiblemente igual a todos ellos y, por lo tanto, solicitándolos en proporción de sus rigideces.

La transferencia de esfuerzos de la techumbre al anillo y del anillo a los pilares determina concentraciones locales que deberán tomarse debidamente en cuenta y que van a exigir acartelamientos en las uniones del anillo con los pilares.

El tensor B entrega su componente vertical a otro tensor D que se ancla en las fundaciones las que, además de su peso, cuentan con la resistencia pasiva de la tierra para resistir, tanto la componente vertical como horizontal que se desarrolla en la base del anclaje.

Debe tenerse en cuenta que las tensiones de los tensores B y D son del orden de las 540 tons. y, por lo tanto, su deformación bajo tensión afectará la distribución de esfuerzos en la estructura.

Queda así explicada la acción general de las fuerzas y la deformación de los elementos resistentes. En el Anexo se acompaña un plano esquemático donde se muestran estas relaciones. Pasaremos ahora a analizar en detalle los diferentes elementos:

b-2. *Tensores.* Estos estarán formados por barras de acero empalmadas mediante manguitos formando un apretado haz que habrá de concretarse una vez puesta en carga la estructura a fin de evitar grieta en el hormigón, ya que el revestimiento sólo tendrá por finalidad proteger el metal de la corrosión y asegurar una uniforme repartición de temperaturas. En este último sentido se dedicará especial cuidado a analizar la acción concentrada de los rayos solares sobre los tensores, ya que su alargamiento generará cambios en el juego general de fuerzas de la infraestructura.

No se ha contemplado aquí el empleo de cables, por ser más costosos y llevar además a secciones muy delgadas no compatibles con el aspecto arquitectónico que se ha impreso a la estructura, acusando claramente su funcionamiento.

b-3. *Pilares.* Los pilares en general no ofrecen mayor dificultad en su análisis, salvo su dirección radial que obligará en cada caso a un dimensionado cuidadoso, tomando en cuenta las acciones resultantes que no siempre será posible hacer calzar con los ejes principales.

b-4. *Vigas.* En general no ofrecen mayores dificultades, salvo el tener en cuenta al dimensionarlas de que servirán además de soportar a las cargas verticales, como atiesadoras de los diafragmas formados por las losas.

La viga inclinada de la tribuna superior, por estar sometida además a un fuerte régimen de compresión derivado de la acción de la techumbre, podrá tratarse en cierta forma como elemento sometido a compresión previa con un aligamiento apreciable en las armaduras longitudinales.

b-5 *Arco.* Referente al arco formado por la placa a la cota + 10 poco es lo que debe agregarse a lo dicho en acápites anteriores; sólo debemos destacar que por estar a cubierto, sus solicitaciones por acción térmica serán reducidas y, en todo caso, libres de un régimen demasiado variable de temperaturas. En cuanto a las retracciones de fraguado y carga esperamos controlarlas convenientemente con las juntas indicadas en el plano general.

c) *Tribunas.*

Los elementos básicos de las tribunas serían los asientos formados por elementos prefabricados de hormigón armado con acero especial.

Para dar a las tribunas una rigidez conveniente habrá que hacer algunos sectores fraguados en sitio de elementos capaces de tomar los esfuerzos provenientes de temblor y componentes horizontales derivados de la inclinación de los elementos.

Los elementos prefabricados deberían hacerse con una conveniente terminación para la buena conservación exterior; su montaje se haría llevándolos de abajo hacia arriba mediante sistema de guías de madera y cabrestante superiores para arrastrarlos sobre ellas.

En la ejecución, tanto de las cubiertas como de las graderías, podrá consultarse un fraguado acelerado y tratamiento al vacío. Los elementos soportantes inferiores estarán formados por la estructura general de hormigón armado.

En las graderías se preveerá además del peso propio una sobrecarga reglamentaria de 500 Kg/m^2 de tribunas. En caso de desearse una mayor economía podrían diseñarse los elementos standard al igual que los del techo a la ruptura sometiendo las unidades a pruebas de control antes de su montaje.

d) *Fundaciones.*

El terreno en referencia está constituido por un conglomerado ripioso de menor densidad que el usualmente encontrado en el centro de Santiago. Tomando en cuenta la importancia de la obra y dado que la complejidad estática de la estructura determina esfuerzos en ella que dependen de posibles asentamientos en las fundaciones, se justifica sobradamente hacer una investigación cuidadosa de las condiciones del subsuelo.

Se estima en primera aproximación que bastaría ejecutar unos 4 pozos de 8 mts. de hondura, y medir densidades en sitios cada 2 ó 3 mts. de hondura.

Para estudiar la influencia del tamaño de la zapata se requeriría el ensayo de carga con placas de 30 cms. y 60 cms. de lado, en las vecindades de los cuatro pozos descritos.

El examen de los resultados permitiría apreciar si los 4 pozos son suficientes o si se necesitaría aumentar este número.

e) *Modelos.*

Para el análisis de la interacción estática de los cables en la techumbre es particularmente apropiado el uso de la teoría de modelos. En efecto, el llamado método de los desplazamientos proporciona una solución cómoda. Las fuerzas en cada cable serán proporcionales a $A\epsilon$ siendo A el área de la sección y ϵ el alargamiento, medido en la base s ; su valor absoluto se deduciría si no se conoce la magnitud de la carga o el módulo E , considerando el equilibrio estático de alguna parte de la estructura.

Al iniciarse el análisis del comportamiento de la malla de cables se hizo un modelo sencillo que mostraba la posibilidad de obtener rigidez transversal del conjunto de cables tensores, colocando cables atiesadores.

En la etapa actual de anteproyecto, se están preparando modelos de mayor envergadura. En uno de ellos se aplica carga a una goma de implatex y se determinan los esfuerzos por medición del alargamiento de una base marcada previamente en la goma. La analogía que pueda presentar este modelo con la techum-

bre del estadio, será tanto más perfecta cuanto más alta sea la tensión que se aplique a los cables atiesadores. En efecto, en estas condiciones, las tensiones de los cables ortogonales tienden a igualarse y el régimen se aproxima al de un estado membranar.

En otro modelo más perfeccionado se está haciendo uso de tirantes de goma para representar a los cables. Para su empleo debe determinarse primero la curva de carga-deformación del tirante, cargando en seguida sólo en el campo de proporcionalidad de la goma. Las cruces se aceitan y una vez que todo el sistema haya tomado sus condiciones de forma normales, se aseguran las uniones mediante una solución de pega. En este modelo, las tensiones se determinan también, como se dijo más arriba, por el método de los desplazamientos.

4. OBSERVACIONES GENERALES

Finalmente cabe hacer algunas consideraciones generales en orden a indicar desde ya, algunos de los puntos básicos que en el desarrollo definitivo del proyecto inciden en el aspecto arquitectónico.

1. La solución a base de consolas para soportar el tirante B no es la más conveniente, desde el punto de vista estático, tanto por la magnitud de los esfuerzos generados en la consola como porque la rigidez adicional que determina, resta eficiencia a la estructura superior soportante de la cubierta y tribunas.

2. Tratar en cuanto sea posible de obtener un claro encauzamiento de las compresiones sobre el puntal A de la tribuna, evitando la solución actual que, además de crear concentraciones inconvenientes de tensiones, obliga a refuerzos de cizalle innecesarios. Un cambio a base de ligeras modificaciones en la forma y trazado de esta viga, tal como indicamos en nuestro plano, redundará en apreciable economía de orden estructural.

3. La superficie que define la techumbre está fijada paramétricamente una vez definidas las dos curvas centrales ortogonales.

El trazado definitivo de la bóveda se hará por puntos de acuerdo con las ecuaciones de equilibrio de la malla.

4. La curva de intersecciones de la techumbre con el contorno está condicionada, como se dijo en el punto 3, por el equilibrio de la malla y resulta un poco distinta a la trazada por los arquitectos.

5. El encasetonado de la cubierta obligará a pequeños reajustes en la forma perimetral del anillo superior que recibe los cables junto con un estudio acucioso del trazado de los cables a fin de hacer coincidir los vértices de los casetones con la línea de contorno.

ANEXO

ECUACION DE EQUILIBRIO DE CABLES

En lo que sigue se expondrán los siguientes puntos:

- I. *Equilibrio de un cable.*
- II. *Equilibrio de una malla de cable.*

I. Equilibrio de un cable.

Sea un cable AB solicitado por cargas verticales P_1, P_2, P_3, P_4 .

Designemos por "tramo" la porción de cable comprendida entre 2 fuerzas.

Se observa que la proyección horizontal de las tensiones es constante en todos los tramos.

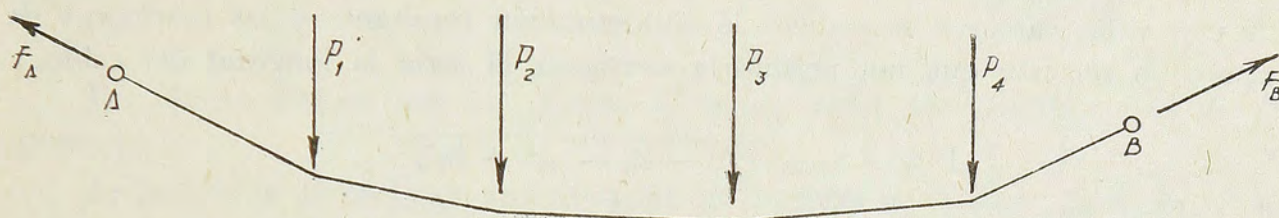


Fig. 1

Consideremos el equilibrio de un nudo cualquiera de orden i situado a la cota Z_i ubicado entre los puntos $i-1$ e $i+1$ respectivamente.

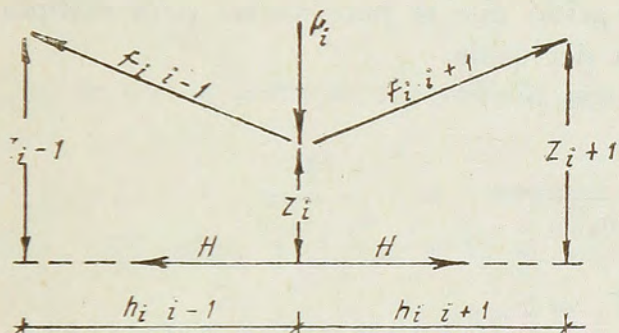


Fig. 2

Con las denominaciones de la figura, se tendrá:

1. Proyección horizontal.

$$| \text{Proyección horizontal } F_{i, i+1} | = | \text{Proy. horizontal } F_{i, i-1} | = H$$

2. Proyección vertical.

$$| \text{Proy. vert. } F_{i, i+1} | + | \text{Proy. vert. } F_{i, i-1} | = P_i$$

Si se supone que los tramos se mantienen rectos, es decir, se desprecia el peso propio del cable, tendremos:

$$| \text{Proy. Vert. } F_{i, i+1} | = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{h_{i, i+1}} \cdot H$$

$$| \text{Proy. vert. } F_{i, i-1} | = \frac{Z_{i-1} - Z_i}{h_{i, i-1}} \cdot H$$

Sumando tendremos:

$$(1) \quad \frac{Z_{i+1} - Z_i}{h_{i, i+1}} + \frac{Z_{i-1} - Z_i}{h_{i, i-1}} = \frac{P_i}{H}$$

donde i puede tomar los valores

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Tendremos así un sistema de n ecuaciones que nos permiten conocer la configuración del cable a través del parámetro H .

Si en el planteamiento del problema, fueran dados: el cable, los puntos A y B y las cargas y se pidiera la configuración resultante y las reacciones de apoyo, la relación que nos permitiría averiguar H sería la longitud del cable.

$$l = \sum_{i=1}^{n+1} \sqrt{(Z_i - Z_{i-1})^2 + h_i^2}, \quad i =$$

donde hay que observar que

$$Z_0 = Z_A$$

$$Z_{n+1} = Z_B$$

Pero más importante que la longitud del cable será la tensión, de manera que H será un parámetro determinado a priori que se hará variar para cumplir con las condiciones fijadas para la flecha del cable.

La tensión axial en un tramo está dada por:

$$\frac{F_{i, i+1}}{\sqrt{(Z_i - Z_{i+1})^2 + h_{i, i+1}^2}} = \frac{H}{h_{i, i+1}}$$

Donde $F_A = F_{0,1}$

$F_B = F_{n, n+1}$

Estudiemos el caso $h_{i, i+1} = h$. Para $i = 0, 1, 2, \dots, n$. La ecuación (1) se transforma en

$$(1a) \quad Z_{i+1} + Z_{i-1} - 2Z_i = \frac{P_i h}{H} = K_i$$

Llamemos al primer miembro con el nombre de "coeficiente de reacción". Es evidente que si se conoce la configuración, o sea los $n+1$ valores de Z_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) para un H conocido, la ecuación (1 a) permite conocer la fuerza aplicada en cada nudo

$$P_i = \frac{H}{h} K_i$$

Es fácil observar que K_i corresponde a las segundas diferencias de las cotas; en efecto se tiene:

$$K_i = Z_{i+1} + Z_{i-1} - 2Z_i = (Z_{i+1} - Z_i) - (Z_i - Z_{i-1})$$

$$K_i = \Delta_{i+1} - \Delta_i = \Delta_{i+1}^2$$

En esta forma K_i da una idea de "la curvatura" de la configuración. En la figura se indica el significado de K positivo o negativo.

Estudiemos el caso de cargas iguales

$$P_i = P$$

$$K_i = K$$

$$K > 0$$

$$K < 0$$



fig 3

De (2) se deduce que los valores Z_i están dados por una expresión de 2º grado en i .

Aplicando la fórmula de interpolación de Newton se tendrá: $Z_0 Z_1 Z_2 \dots Z_i$

$$\begin{matrix} \Delta_1 & \Delta_2 & \dots & \dots \\ & \Delta_2^2 & & \end{matrix}$$

$$Z_i = Z_0 + i\Delta_1 + \frac{i(i-1)}{2} \Delta_2^2$$

$$(3) \quad Z_i = Z_0 + i\Delta_1 + \frac{i(i-1)}{2} K$$

Δ_1 se puede eliminar observando que $Z_{n+1} = Z_B$
 $Z_0 = Z_A$

$$Z_B = Z_A + \Delta_1(n+1) + \frac{(n+1)n}{2} K$$

$$\frac{\Delta_1}{K} = \frac{Z_B - Z_A}{(n+1)K} - \frac{n}{2} \quad \Delta_1 = \frac{Z_B - Z_A}{(n+1)} - \frac{n}{2} K \quad (4)$$

$$Z_i = Z_A + \frac{i(i-1)}{2} K + i \left[\frac{Z_B - Z_A}{n+1} - \frac{n}{2} K \right]$$

$$= Z_A + i \frac{Z_B - Z_A}{n+1} + \frac{iK}{2} [(i-1) - n]$$

$$(3a) \quad Z_i = Z_A + i \frac{Z_B - Z_A}{n+1} - \frac{i}{2} [(n+1) - i] K$$

Es de observar a través de esta expresión que para cargas constantes, a mayor K corresponde mayor flecha y menor H .

Propongámonos ahora estudiar la flecha del cable. Estudiaremos la parábola de 2º grado de (3), reemplazando i por x .

$$(3b) \quad Z_x = Z_A + \Delta_1 x + \frac{x(x-1)}{2} K$$

Z_x pasa evidentemente por todos los valores de Z_i

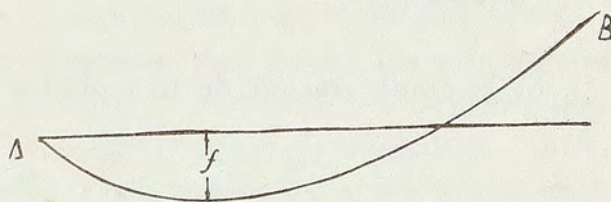


fig 4

Encontrando su valor extremo

$$\frac{d Z_x}{dx} = 0 = \Delta_1 + K \left(x - \frac{1}{2} \right)$$

$$x_o = \frac{1}{2} - \frac{\Delta_1}{K} \quad x_o = \frac{1}{2} + \frac{n}{2} - \frac{Z_B - Z_A}{(n+1)K} \quad (5)$$

Uno de los valores de i que encierra a x da la flecha buscada.

Con las expresiones encontradas podemos resolver el siguiente problema. Sean dados los puntos extremos y cargas iguales a distancias iguales, se pide la configuración compatible con un cierto valor de H .

Los pasos de la solución serían los siguientes:

1. Dado un H de (1 a) se obtiene K .
2. De (3 a) se obtienen las cotas de todos los puntos.
3. Para calcular la flecha se usa (5) y se calculan los valores de Z_i de los dos puntos que lo encierran; se sabe que uno de ellos define el máximo.

Observación 1.

De lo expuesto anteriormente se observa que dada una configuración del cable, existen infinitos sistemas de carga iguales entre sí, que mantienen esa configuración. En efecto, definir la configuración es determinar los K_i . Las cargas

$P_i = \frac{H}{h} K_i$ que mantienen esa configuración dependen del parámetro H .

Así si por ejemplo hacemos $\frac{H}{h} = 1$, obtenemos $P_i = K_i$ que es un sistema que mantiene la configuración. Dando a H otro valor, obtendremos otro sistema proporcional al primero.

Observación 2.

Sea la configuración de 4 puntos

tal que $K_2 = Z_1 + Z_3 - 2 Z_2$

$K_3 = Z_2 + Z_4 - 2 Z_3$

Si Z_2 se incrementa en $-\Delta Z$ se obtiene

$$\Delta K_2 = + 2 \Delta Z$$

$$\Delta K_3 = - \Delta Z$$

$$\Delta K_2 = - 2 \Delta K_3$$

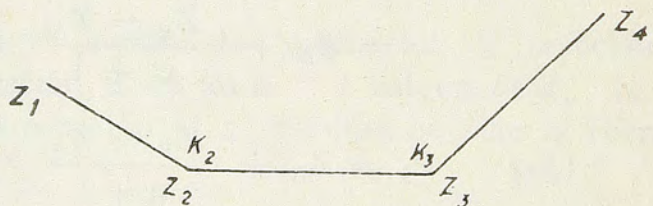


Fig. 5

Es decir, al aumentar el K_i de un nudo en un cierto valor hay que disminuir los vecinos en la mitad de K_i .

Observación 3.

Si la configuración de tres puntos 1, 2 y 3 es simétrica tendremos

$$K_2 = Z_1 + Z_3 - 2 Z_2 \quad Z_1 = Z_3$$

$$Z_1 - Z_2 = Z_3 - Z_2 = \Delta$$

$$(V.) \quad K_2 = 2 \Delta$$

II. Equilibrio de una malla de cables.

Consideremos un sistema de cables reticulado formando celdillas rectangulares. En cada nudo o intersección de dos cables hay aplicada una fuerza exterior P_i .

Todos los P_i son perpendiculares a un mismo plano.

Consideremos un nudo en un reticulado cuadrado.

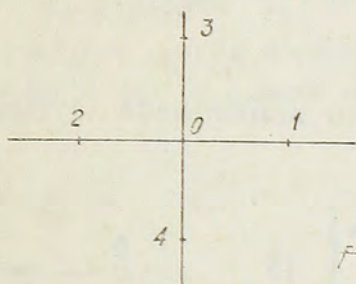
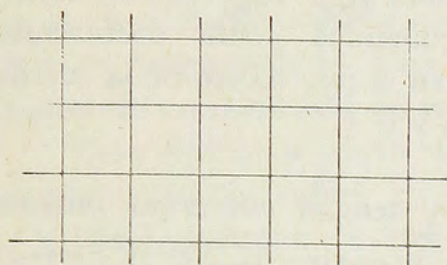
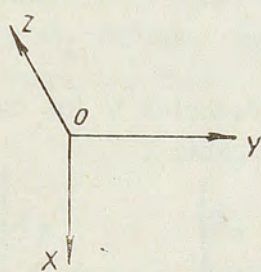


Fig. 6



O Z es perpendicular
al plano XY

Ecuaciones de proyección

$$|\text{Proy. horizontal } \overline{01}| = |\text{Proy. horizontal } \overline{02}| = H_y$$

$$|\text{Proy. horizontal } \overline{03}| = |\text{Proy. horizontal } \overline{04}| = H_x$$

$$\text{Proy. vertical } \overline{01} + \text{Proy. vert. } \overline{02} + \text{Proy. vert. } \overline{03} + \text{Proy. vert. } \overline{04} = P_0$$

$$\text{Proy. vert. } \overline{01} = \frac{Z_1 - Z_0}{h_{0,1}} H_y$$

$$(6) \quad \frac{Z_1 - Z_0}{h_{0,1}} H_y + \frac{Z_2 - Z_0}{h_{0,2}} H_y + \frac{Z_3 - Z_0}{h_{0,3}} H_x + \frac{Z_4 - Z_0}{h_{0,4}} H_x = P_0$$

El problema por resolver será el siguiente:

Se dan x cables en una dirección e y cables en la otra con cargas en todos los nudos. Supongamos u nudos libres donde $u \leq x \cdot y$ y puesto que puede suceder que no todos los cables tengan la misma longitud y , por lo tanto, no todos se cortan con todos. Teniendo u nudos tendríamos u ecuaciones, una por cada nudo. Las incógnitas serían las u cotas Z_i ; $i = 1, 2, \dots, u$, los x valores de H_x y los y valores de H_y , por lo tanto $u + x + y$ incógnitas en total. Los $x + y$ ecuaciones que faltan para determinar el problema se obtiene de las $x + y$ ecuaciones de longitud de los cables. Luego si en un caso propuesto son datos: las condiciones de contorno, la longitud de los cables y las cargas, el problema está determinado. Pero como se ha dicho, la longitud de los cables no tiene importancia, pues, interesa mucho más que las tensiones sean las convenientes de acuerdo con ciertas flechas generalmente fijadas por otras condiciones.

Nos referiremos al problema más simple de cargas equidistantes h_i , $i + 1 = h$.

$$(Z_1 + Z_2 - 2 Z_0) H_y + (Z_3 + Z_4 - 2 Z_0) H_x = P_0 h$$

Poniendo

$$Z_1 + Z_2 - 2 Z_0 = K_{0y}$$

$$Z_3 + Z_4 - 2 Z_0 = K_{0x}$$

la ecuación (6) se transforma en

$$(6a) K_{0y} \cdot H_y + K_{0x} \cdot H_x = P_0 h$$

A los términos K_{0y} , K_{0x} respectivamente los designaremos como coeficientes de reacción en el punto cero de la cuerda en dirección y o x.

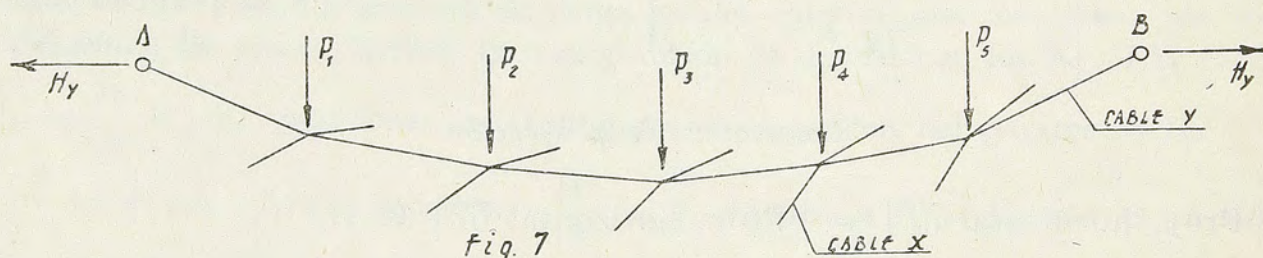
Se considerará un sistema en que los cables y tengan curvatura positiva $K_{iy} > 0$ (—) y los cables x tengan curvatura negativa $K_{ix} < 0$ (—)

$$\text{De (6a)} \quad K_{0y} H_y > 0$$

$$K_{0x} H_x < 0$$

Los cables y son los portantes y los cables x están aumentando la carga.

Consideremos un cierto cable y



$$K_{iy} H_y = P_i h - K_{ix} H_x$$

El papel de los cables x es el siguiente:

- Dar rigidez transversal al sistema;
- Hacer cambiar la configuración de las cuerdas y mediante la adición de cargas artificiales convenientes.

Observación 1.

Conviene que las cargas artificiales sean lo más bajas posibles para disminuir el H_y y en este sentido existe interés en reducirlas a todas al mínimo, haciendo todos los $H_x K_{ix}$ iguales entre sí e iguales al mínimo.

Es de observar que H_x se elige lo más pequeño compatible con la rigidez transversal y K_{ix} lo más chico compatible con el escurrimiento de las aguas lluvias.

Observación 2.

Se demostrará que es conveniente que la "curvatura" del cable y sea constante.

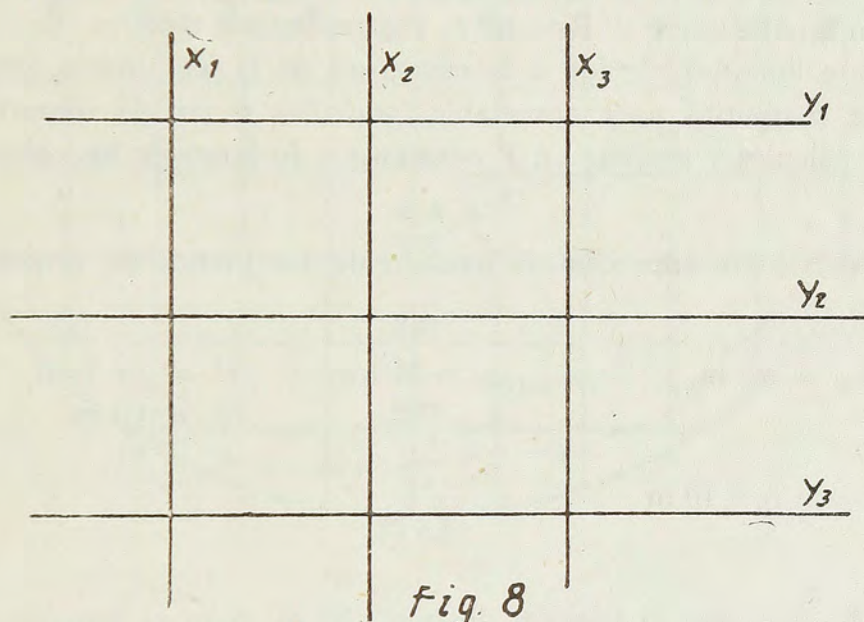
Supongamos inicialmente un cable donde K sea constante en todos los tramos.

Si aumentamos en un punto $\underline{K}$ en $\underline{\Delta K}$ en los puntos vecinos debe disminuir en la mitad $\frac{\underline{\Delta K}}{2}$ según se dijo anteriormente. En el punto donde se ha aumentado $\underline{K}$ debe haber más carga lo que se consigue aumentando la carga artificial; en los puntos vecinos debe disminuirse la carga, lo que se consigue disminuyendo la carga artificial. Por hipótesis, sin embargo, la carga artificial ya estaba en un límite inferior; para producir la compensación requerida habría que dejar la carga artificial mínima constante y aumentar las otras cargas artificiales lo que trae un aumento de H_y para restablecer el equilibrio. Se ve a través de este razonamiento la conveniencia de tener los cables $\underline{y}$ a curvatura constante.

Demostraremos ahora la conveniencia de que también se tenga curvatura constante en los cables $\underline{x}$

Consideraremos en efecto una malla de tres cables cruzados.

El producto $K_x H_x$ es constante a lo largo de $\underline{y}$. Como todos los cables $\underline{y}$ cumplen con la condición de tener H_y mínimo, entonces conviene que la carga artificial sea la misma mínima en todos los cables.



En un cable tendremos $K_x H_x$ igual al mínimo en todos los puntos a lo largo del cable, luego con H_x constante, se tendrá también K_x constante, es decir los cables $\underline{x}$ deben tener curvatura constante. Si todos los cables $\underline{y}$ son de igual sección y lo mismo ocurre para todos los cables $\underline{x}$, una generalización de este razonamiento demuestra la conveniencia de que todos los cables $\underline{y}$ tengan la misma curvatura K_y y que todos los $\underline{x}$ tengan un H_x constante.

De lo anterior se desprende que una manera práctica de obtener la configuración de la malla de cables consiste en fijar arbitrariamente el cable central $\underline{y}$ con un K_y fijado por consideraciones de flecha y tensión. Igualmente habría que suponer conocido el cable central $\underline{x}$ teniendo en vista el escurrimiento de las aguas y la rigidez transversal. Enseguida se obtienen los otros cables $\underline{y}$ por traslación paralela del primero apoyándose sobre el $\underline{x}$.

Si se tienen condiciones de borde complicadas se elige un rectángulo circuncrito, fijándose las cotas del contorno por la intersección de la malla con la planta de la figura.

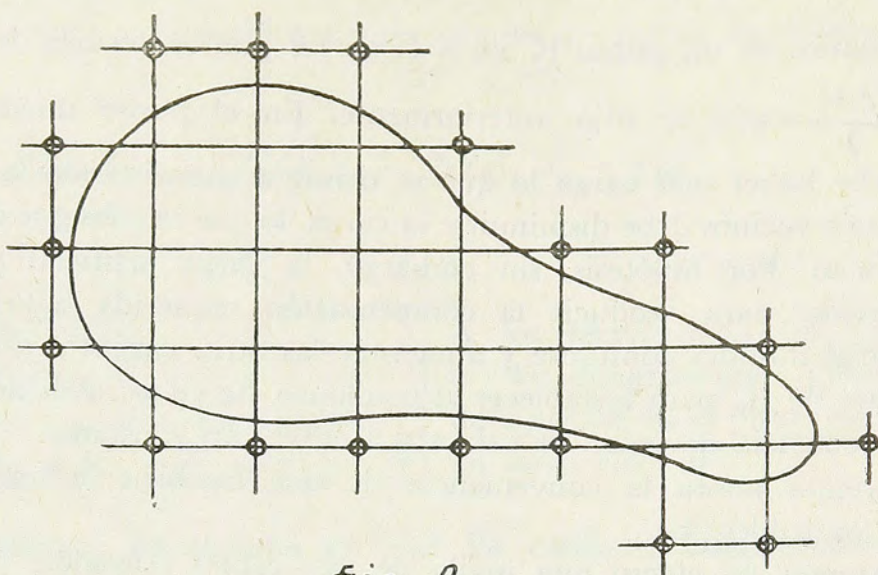


fig. 9

EJEMPLO DE APLICACION.

Nota previa. En este ejemplo, supondremos que las cargas que actúan en cada nudo son iguales entre sí. Esto no es rigurosamente efectivo, ya que las losetas son de diferente longitud, debido a la curvatura de la techumbre, pero como ésta no es de una magnitud muy apreciable, podemos dejar de tomarla en cuenta para nuestros cálculos y aceptar un P constante a lo largo de los cables.

* * *

Sea el cable soportante central tomado de los planos de arquitectura.
Se tiene:

$$Z_A = Z_B = 33 \text{ m}, \quad Z_{\text{central}} = 24 \text{ m}, \quad P = 13 \text{ Ton}$$

$$h = 10 \text{ m}$$

$$n = 11$$

$$P = 13 \text{ T} \quad h = 10 \text{ m}$$

$$n = 11$$

(Es de observar que la fijación de $h = 10 \text{ m}$. para el tamaño del recuadro de la malla, no implica que los cables deban ir necesariamente a esa distancia, sino que constituye un procedimiento para fijar la configuración general de la techumbre).

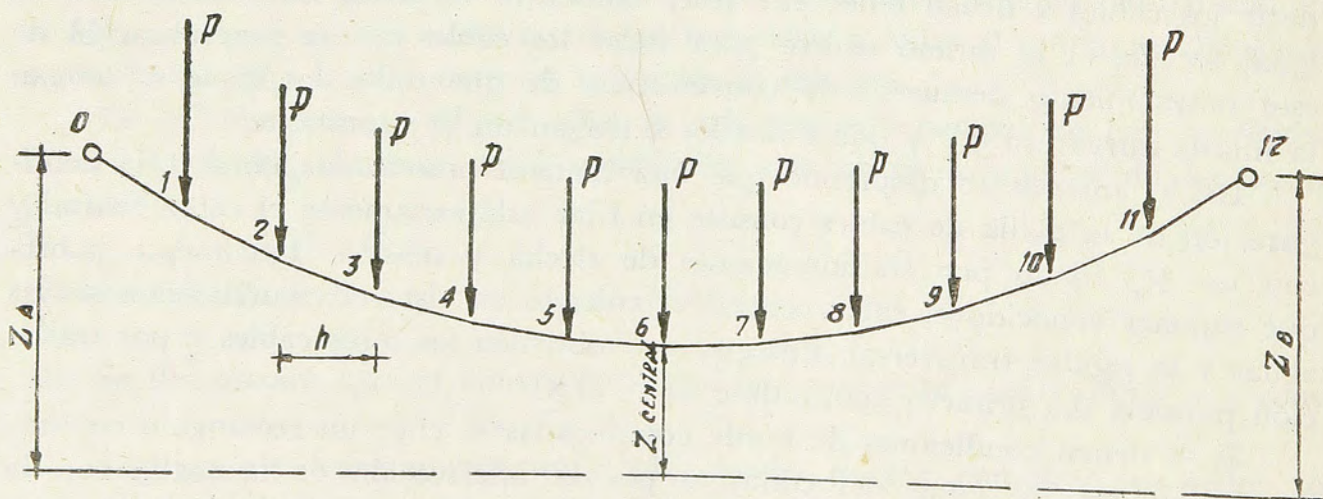
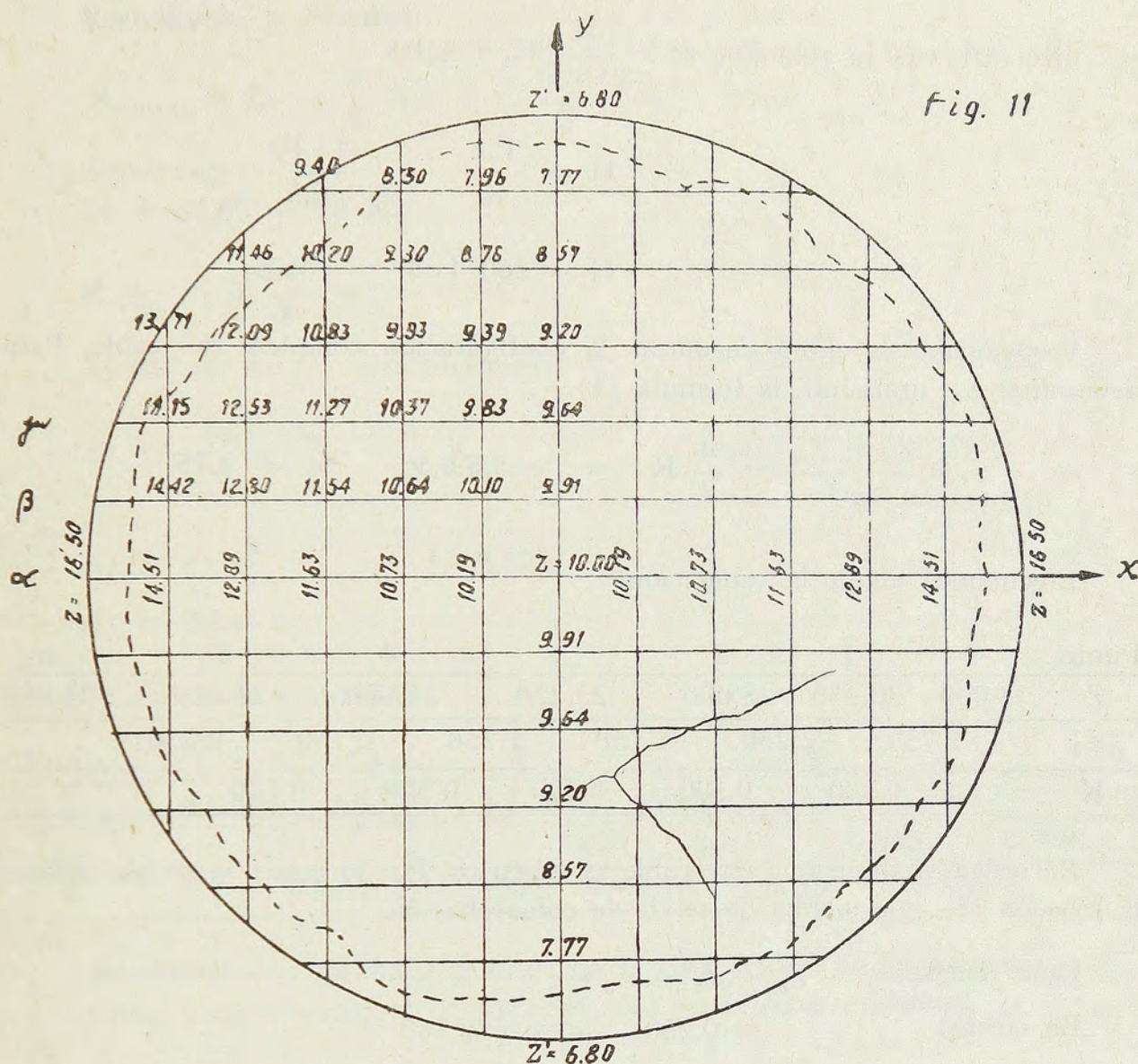


fig. 10

Como en el problema propuesto es conocida la flecha en el punto más bajo, transformaremos para su uso la fórmula (3 b) utilizando la (4).



$$(3b): \quad Z_x = Z_A + \Delta_1 \cdot x + \frac{x(x-1)}{2} K$$

$$Z_x = Z_A + \frac{Z_B - Z_A}{n+1} - \frac{n}{2} K \cdot x + \frac{x(x-1)}{2} K$$

Aplicada a los datos del problema, tendremos:

$$Z_{\min} = Z_A - \frac{n}{2} K \cdot x + \frac{x(x-1)}{2} K$$

ya que $Z_A = Z_B$

Recordando los valores numéricos:

$$24 = 33 - 5,5 \cdot 6 \cdot K + 15K = 33 - 18 K$$

$$K = \frac{9}{18} = 0,5$$

Recordando la relación: $P = \frac{H}{h} K$, resulta:

$$H = \frac{P \cdot h}{K} = \frac{13.10}{0,5}$$

$$H = 260 \text{ Ton}$$

Propongámonos ahora encontrar la configuración completa del cable. Para determinar Δ_1 , utilizamos la fórmula (4).

$$\Delta_1 = \frac{Z_B - Z_A}{n+1} - \frac{n}{2} K = -5,5 \cdot 0,5 = -2,75$$

Efectuamos ahora la tabulación.

Punto	0	1	2	3	4	5	6
Z	33,000	30,250	28,000	25.250	25.000	24.500	24.000
Δ_1	-2,750	-2,250	-1,750	-1,250	-0,750	-0,250	
K		0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	

Recordemos ahora que este cable es simétrico. Por lo tanto, se puede utilizar la relación (5) que nos ha de servir de comprobación.

$$\text{Debe tenerse: } Z_6 - Z_5 = \Delta_6 = -\frac{1}{2} K$$

$$\text{En efecto: } -0,250 = -\frac{1}{2} 0,500$$

La flecha en el centro resulta precisamente con el valor de 24 m.

Para calcular la fuerza axial máxima en el cable determinaremos la longitud del tramo 01.

$$\text{Long. 01} = \sqrt{2,750^2 + 10^2} = \sqrt{107,6} = 10,337 \text{ m}$$

Fuerza axial máxima.

$$T = \frac{H}{h} (\text{long. tramo 01}) = \frac{260}{10} \cdot 10,337 = 269 \text{ Ton.}$$

Tomando como base el cable soportante recién calculado, propongámonos definir una configuración espacial apoyándonos en un cable guía — cable atiesador— normal al primero, de condiciones fijadas también por el plano de arquitectura.

La configuración que señalamos está definida entonces por cables y de curvatura constante $K_y = 0,500$ y por cables x de una curvatura constante K_x por determinar.

Para el cable atiesador podemos poner

$$Z_{\text{central}} = 24 \text{ m} \quad Z_A' = Z_B' = 13,60 \text{ m}$$

Recordando la fórmula

$$Z_{\text{central}} = Z_A - \frac{n}{2} K \cdot x + \frac{x(x-1)}{2} K$$

Tendremos:

$$24 = 13,60 - 18 K$$

$$K = -\frac{10,40}{18} = -0,578$$

El cálculo de Δ_1 será entonces:

$$\Delta_1 = \frac{Z_B' - Z_A'}{n + 1} - \frac{n}{2} K, \quad \text{donde} \quad n = 11$$

$$K = -0,578$$

$$\Delta_1 = -\frac{n}{2} K = 5,5 \cdot 0,578$$

$$\Delta_1 = 3,18$$

Haciendo la tabulación:

Punto	0	1	2	3	4	5	6
Z	13,800	16,780	19,382	21,406	22,852	23,720	24,010
Δ_1	3,179	2,602	2,024	1,446	0,868	0,290	
K	-0,578	-0,578	-0,578	-0,578	-0,578	-0,578	

Se obtiene con mucha aproximación la cota central de 24 metros.

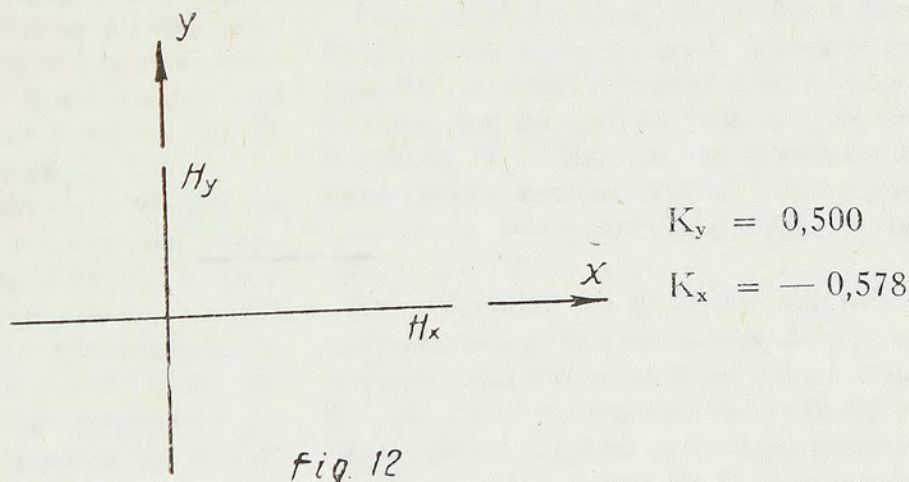
Como comprobación, deberá tenerse, por ser el cable simétrico,

$$Z_6 - Z_5 = \Delta_6 = -\frac{1}{2} K$$

$$0,290 \approx +\frac{1}{2} \cdot 0,578$$

Para obtener los sucesivos cables, por ej. (β), bajamos (α) en 0.290; (γ) se obtiene bajando (β) en 0.868 y así sucesivamente.

En esta forma, en cada nudo de la malla, tenemos dos coeficiente:



Estudiando el equilibrio de un nudo se obtiene el de los restantes.

Recordando la relación:

$$H_y \cdot K_y + H_x \cdot K_x = P \cdot h, \text{ se tiene:}$$

$$0,500H_y - 0,578H_x = 130$$

$$H_y = \frac{130 + 0,578 H_x}{0,500}$$

$$H_y = 260 + 1,156 H_x$$

Calculando de esta expresión diversos valores de H_y para valores correspondientes de H_x podemos hacer la siguiente tabulación:

H_x	1	10	20	30	40	50
H_y	262	272	283	295	306	318
% aumento en valor de H_y		3,8	8	12,6	17	21,5

De aquí se desprende que un aumento en 50 veces de H_x proporciona un aumento de 21,5% en el valor de H_y lo que se traduce en la posibilidad de incrementar apreciablemente la rigidez transversal, sin recargar en forma notable la tensión de los cables soportantes.

Si en fig. 11, el contorno de la planta fuera el marcado con línea de puntos, resulta fácil calcular las cotas correspondientes al contorno lineal, interpolando linealmente entre las cotas vecinas. Es de observar que la interpolación lineal es correcta, ya que hemos supuesto que el cable es recto en cada tramo.

Para un contorno cualquiera, el método es, pues, circunscribir un reticulado luego resolverlo y, finalmente, cortar los hilos. Las reacciones de apoyo son las tensiones de los cables cortados.

Por lo expresado anteriormente, se observa la gran sencillez del problema de resolución de la malla cuando existe libertad en la fijación de las condiciones de borde en todos los cables, excepto en los centrales. La superficie se genera, como se ha mostrado, por translación paralela de uno cualquiera de estos cables guías sobre los otros. Si el problema planteado incluyera como condición las cotas de todo el contorno, el cálculo de las tensiones que soportan los cables solamente podría lograrse por resolución de un sistema de ecuaciones simultáneas.