

00164
2ej.
3

CUBIERTAS LIGERAS

Una Investigación.

**Tesis que presenta el Arq. Fernando López Carmona.
Para obtener el Grado de:
MAESTRO EN TECNOLOGIA.**

División de Estudios de Posgrado.
Facultad de Arquitectura, U.N.A.M.
1989



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

a).INTRODUCCION.	1
b). ANTECEDENTES.	5
c). GEOMETRIZACION.	16
d).SOLUCION GENERAL A LAS BOVEDAS DE LADRILLO.	21
e). CONCLUSION.	24
NOTA FINAL	25

a). INTRODUCCION.

La actividad profesional de los arquitectos esta condicionada por la práctica constructiva usual y ésta no solo es capacidad técnica, es ante todo adecuación al medio.

El medio impone materiales disponibles, trabajo y tambien la demanda de los satisfactores que necesita.

Nuestra actividad se percibe de muchas maneras pero el criterio dominante en la sociedad es el de eficacia; presupuesto, costos y calendario son los determinantes de la aceptación de nuestro trabajo.

Así se han hecho un espacio profesional los consorcios industriales de la construcción hasta el extremo de ubicar a los arquitectos como un complemento de la actividad, la cual definen como el ejercicio de la Ingeniería. Por contraste la actitud del gremio de los arquitectos la define el tratadista Inglés Doctor Patrick Nuttgens*, cuando postula que la arquitectura es una respuesta de ingeniería a las necesidades sociales de una época y un lugar dados.

Esas necesidades sociales conforman las posibilidades formales de la arquitectura a través de los métodos y los procedimientos de construcción usuales que agotan el campo de lo posible, mientras que el campo de lo probable, que permitiría ampliar el espacio de la actividad, permanece inexplorado.

The World's Great Architecture Excalibur Book, ISBN · 0 · 89673 · 076 · x

Aquellos que han transitado por el campo profesional, así organizado, han chocado repetidamente con la sensatez conservadora y cómoda de la práctica usual.

Incorporar en nuestra actividad experiencias del pasado, renovadas y actualizadas, significa hacer la totalidad del trabajo edilicio desde su concepción hasta su terminación, para romper con el molde de la práctica usual; agregar además algo de lo que ya disponemos para ampliar el campo de posibilidades formales incrementa la tarea con el temor a lo que no se conoce pero que amenaza la cómoda situación establecida. Es aquí donde los argumentos de costo y eficacia pueden operar a favor de los que desean ampliar su campo profesional, pero es aquí también donde son más agudas las exigencias que nos hacen percibir en lo social el cambio y como se refleja transformando lo posible en obsoleto o lo deseable en posible; abundan en las publicaciones especializadas ejemplos que ilustran lo anterior.

Los límites físicos se pueden controlar y mover conociendo la relación entre el flujo de los mismos. Conociendo las propiedades físicas de los materiales los podemos usar racionalmente, inducir fuerzas externas sobre ellos y modificar favorablemente la condición de esfuerzos y la estabilidad de los edificios, pero la economía de la propuesta la determinan la relación del costo entre materiales y trabajo, los gastos indirectos y la racionalización de los mismos elementos formales para adecuarlos a la realidad física y social en que debemos actuar.

Cada sociedad tiene su espacio y su tiempo simultáneos mas no siempre podemos hablar de contemporaneidad. Entre las distintas sociedades que constituyen nuestro mundo, la nuestra tiene características geográficas y condiciones cambiantes correlativas al proceso de transformación social acelerada que vivimos.

Basta para ilustrar lo anterior la aparición en 1950 de los cascarones de paraboloides hiperbólicos con concreto reforzado, edificados con un sólo forro interior y construidos por "embarro" del concreto sobre el refuerzo, método muy refinado pero característicamente artesanal que propició una expresión artística muy bien recibida por el público el cual percibió en ella la armonía y congruencia entre método constructivo, costo y resultado formal.

Los métodos y procedimientos adecuados en 1950 dejaron de serlo en 1965 con los cambios de la relación entre materiales y obra de mano cuando el mercado de la industria manufacturera necesitaba crecer y esta exigió el ajuste de los salarios; métodos fincados sobre el uso intensivo del trabajo humano no calificado fueron rebasados por el empleo del equipo y maquinaria incipientes, pero que hizo posible sustituir una solución de enorme refinamiento por métodos más toscos pero ya competitivos.

Equiparable en resultados con la experiencia mexicana, la obra de Nervi en Italia se inició bastantes años antes y permaneció vigente la oportunidad de trabajo para el Señor Nervi, hasta su muerte en la década de 1970, por que los procedimientos de construcción imaginados en 1930 seguían adecuados en 1970 a la sociedad italiana, cuya evolución, aunque muy viva y dinámica, tenía desde el principio establecidas las relaciones fundamentales entre trabajo, materiales y procedimientos.

Ambos ejemplos difieren en los métodos para adecuar el proceso constructivo a la realidad social en que se actúa pero ambos abren su oportunidad por costo, por rapidez y por calidad. Esta última se explota formalmente también como expresión muy adecuada de la sociedad que las propicia.

Hay otros ejemplos que vale mencionar, el desarrollo de estruc-

turas de tracción el Alemania y las bóvedas Geodésicas de Norteamérica; de éstas, las alemanas alcanzan quizá la máxima expresión poética en cuanto a forma, aparentemente son muy adecuadas a una sociedad industrializada por su alto grado de industrialización, pero no satisfacen permanencia, protección contra el clima y toda la prosa de la construcción. La propuesta de Fuller logra aún menos, se queda en un mero alarde de industrialización. Ninguna de las dos pasa del laboratorio al uso práctico.

De todo lo anterior parte el trabajo que hoy presento, es el esfuerzo para recuperar un espacio profesional que se perdió cuando nuestra ciudad ganó una situación mejor para sus habitantes.

b). ANTECEDENTES.

En la República Mexicana se encuentran regiones en cuya arquitectura se emplean bóvedas con ladrillo de barro cocido y construídas sin cimbra, siendo un ejemplo de estas regiones la ciudad de Lagos de Moreno, Jalisco. Existen además casos notables del uso de esas bóvedas en construcciones contemporáneas con mucho acierto. Otras ciudades desde Huichapan en el Estado de Hidalgo, pasando por Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Puebla y Tlaxcala, han conservado y cultivan con éxito éste método de construcción.

Este tema parece muy adecuado para el momento actual en el campo de la construcción de vivienda y en la autoconstrucción; ya que se trata de un procedimiento que genera cubiertas permanentes, incombustibles, capaces de actuar como elemento unificador de la respuesta estructural en las edificaciones durante una eventualidad sísmica, así como en función de la facilidad de producirlas, de la seguridad que pueden brindar y de su costo.

Presentamos aquí los resultados de los esfuerzos dispersos, anteriores a las posibilidades de trabajo que brinda nuestra Universidad a quienes nos agrupamos en el interés por estos temas y de dos cursos de Actualización en "Cubiertas Ligeras" durante los años 1985 y 1986 en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

A partir del conocimiento de la construcción de bóvedas en el centro de la República Mexicana, nos propusimos determinar la geometría de tales bóvedas, la manera de controlar la forma y determinar los procedimientos de construcción contemporánea para

por último, poder proponer un método simple para analizar la estabilidad de estos elementos.

Se transcribe aquí un fragmento de la presentación que de estas ideas se hizo y fue publicada un 1984 para el Encuentro de la Vivienda en Metepec Estado de México.

La derivación lógica de un elemento de cubierta, significa conocer la superficie de esfuerzos correspondiente a la ley de carga que debe resolverse con el elemento en cuestión.

En las cubiertas y/o entrepisos contemporáneos, la relación entre la carga viva y el peso propio hace necesaria una geometría de doble curvatura inversa (superficies no desarrollables), que al someterse a cargas variables en intensidad y distribución las resuelva siempre en un sistema de fuerzas tangenciales a la superficie.

Así en este capítulo, se presenta primero, la derivación analítica de la superficie de esfuerzos, en los siguientes capítulos se discutirá la manera de resolverlos por la forma.

En una estructura laminar, la carga significativa es la carga viva por que su peso propio es mínimo, la carga se toma usualmente como uniforme y su intensidad la determinan las normas y los reglamentos por métodos estadísticos que cubren por intensidad nominal la distribución desigual, permitiendo asumir la distribución uniforme.

Es un método razonable elegir un elemento diferencial de la superficie de forma circular, establecer el origen de coordenadas en el centro de la placa de dimensión infinita (ver figuras 1 y 2) y colocar allí el centro de este elemento, suponiendo una carga uniforme y una rigidez constante en la placa.

El cortante en el perímetro del elemento circular:

$$V = \frac{\pi x^2 w}{2\pi x} = \frac{w}{2} x \quad (\text{ver fig. 1}) \text{ y siguiendo a Navier}$$

$$M = \frac{DV}{DX} \quad M = \frac{wx^2}{4} + C; \quad C = 0 \text{ si } x = \frac{L}{2}$$

$$M = \frac{wx^2}{4} - \frac{wL^2}{16} \quad (\text{ver fig. 2})$$

$$\frac{DM}{DX} = 0 = \frac{wx^3}{12} - \frac{wL^2x}{16} + C; \quad C = 0 \text{ si } x = 0$$

$$Y = \frac{wx^4}{48} - \frac{wL^2x^2}{32} + \frac{5wL^4}{768}$$

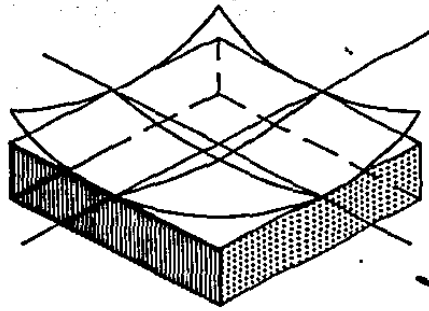
La expresión de la pendiente y la elástica se consideran divididas por $EI = 1$

Dichas expresiones bidimensionales rotando sobre el eje Z generan las superficies de esfuerzos y la deformación de la placa. En ésta última la deformación tiene una restricción adicional en los bordes rectos que significa empotramiento absoluto en las esquinas; así aparece una inversión de signos en los momentos y sus correspondientes puntos o líneas de inflexión para el cambio de signo de la curvatura.

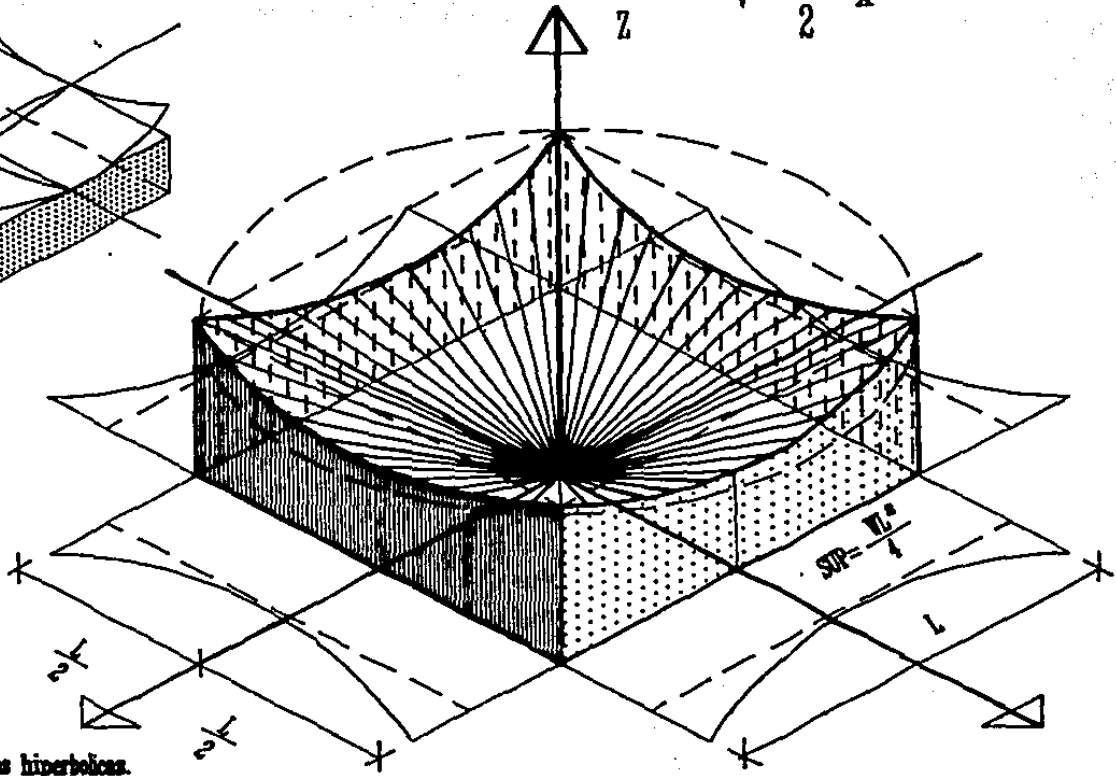
Es de sobra conocido el teorema de Mohr que establece, para un elemento de rigidez cero, la necesidad de ubicarse en la trayectoria de las resultantes del sistema de fuerzas que lo solicitan y así, resolver su condición de equilibrio por esfuerzos axiales ya que no es capaz de tomar flexión.

La superficie de momentos flexionantes en sus segmentos de

Fig. 1



$$V = \frac{W}{2} x$$



$V \neq 0$
carga VL

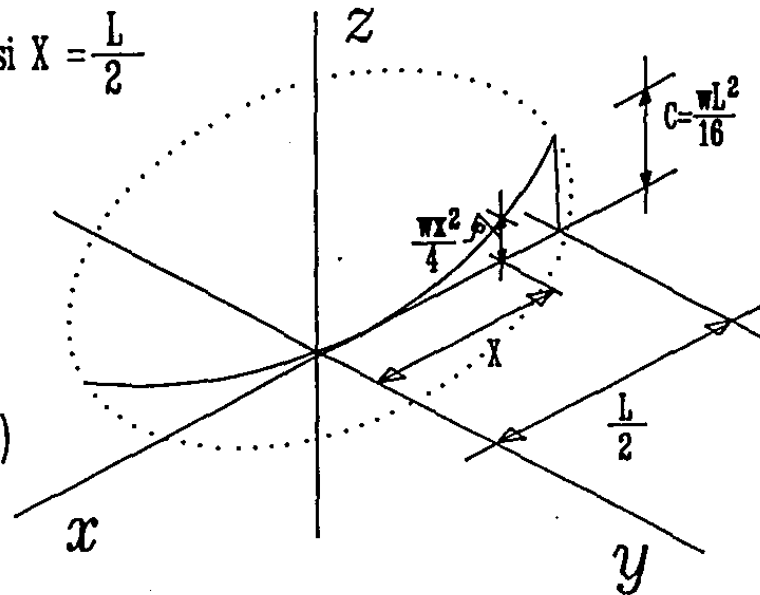
4 veces $\frac{wl^2}{4}$ + 2 enjulas hiperbolicas.

EL DIAGRAMA ESPACIAL DE MOMENTOS.

$$\int \frac{dv}{dx} = \frac{wx^2}{4} + C ; C = 0 \text{ si } X = \frac{L}{2}$$

$$M = \frac{wx^2}{4} - \frac{wL^2}{16}$$

SIMILAR $\odot Z = Px^2$ (parabola)



GENERA UN PARABOLOIDE DE REVOLUCION.

Fig. 2

LA PENDIENTE DE LA "ELASTICA".

$$\phi = \int \frac{dM}{dx} = \frac{wx^3}{12} - \frac{wL^2x}{16} + C ; C=0 , \text{ si } X=0$$

Siguiendo a Mohr digamos que $EI = 1$

LA ECUACION DE LA "ELASTICA"

Fig. 3

$$Z = \frac{d\phi}{dx} = \frac{wx^4}{48} - \frac{wL^2x^2}{32} + C ; C=0 , \text{ si } x = \frac{L}{2}$$

$$Z = \frac{wx^4}{48} - \frac{wL^2x^2}{32} + \frac{5wL^4}{768}$$

Estas expresiones son iguales a las de una viga isostática con carga uniforme divididas a la mitad.

Pero la placa actua así en todas direcciones.

signo negativo, puede resolverse con un paraboloides hiperbólico cuyas generatrices de corona sean los bordes rectos de la placa, su vértice, la esquina y el 3er. eje, la normal al plano de la placa por la esquina; esta superficie de traslación de una parábola de 2do. grado sobre otra parábola igual, con los planos directores a 45 grados con los bordes, puede hacerse tangente al primer paraboloides de revolución y aún concebir a éste como otra superficie de traslación, ahora sinclástica, generada por las mismas dos parábolas de las pechinas anticlásticas.

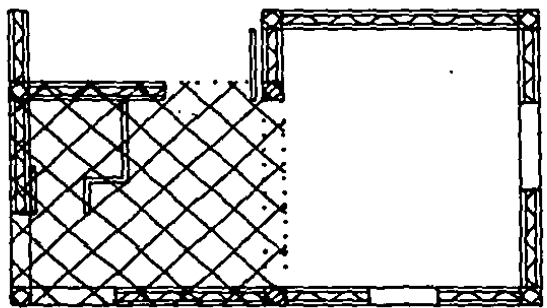
Se obtiene así una superficie generada por la traslación de una curvatura sobre una directriz idéntica y en dos direcciones, deslizándose según un ciclo periódico de aspecto sinusoidal (ver figura 6).

Cuando las curvas cónicas se acercan al vértice, la curvatura de todas ellas se confunde en una misma línea que hace relación entre las cuerdas y la flecha mínima y permite la producción industrial de ésta cáscaras, asimilando la parábola en una circunferencia.

La técnica del material determina así, tanto la estereotomía conveniente para el montaje, cuanto el tratamiento decorativo de la cubierta.

A continuación se presenta el trabajo realizado para el Encuentro de la Vivienda en Metepec, Estado de México.

ENCUENTRO DE LA VIVIENDA - METEPEC ESTADO DE MEXICO.



planta arquitectonica.

BOVEDA 2

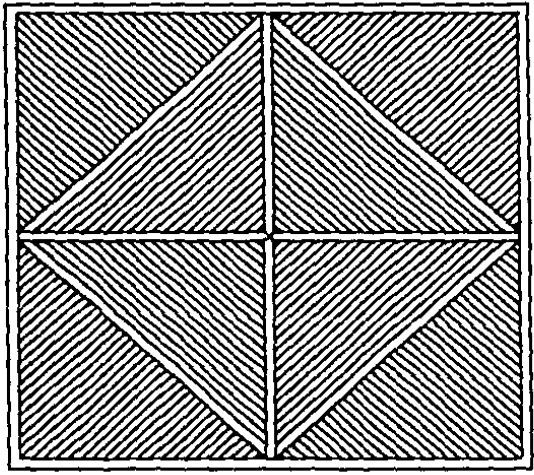
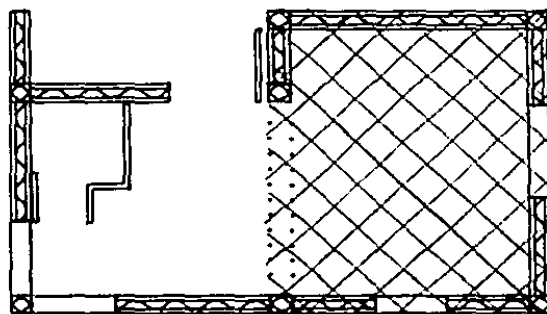


fig. 4

ENCUENTRO DE LA VIVIENDA - METEPEC ESTADO DE MEXICO.



planta arquitectonica.

BOVEDA 1

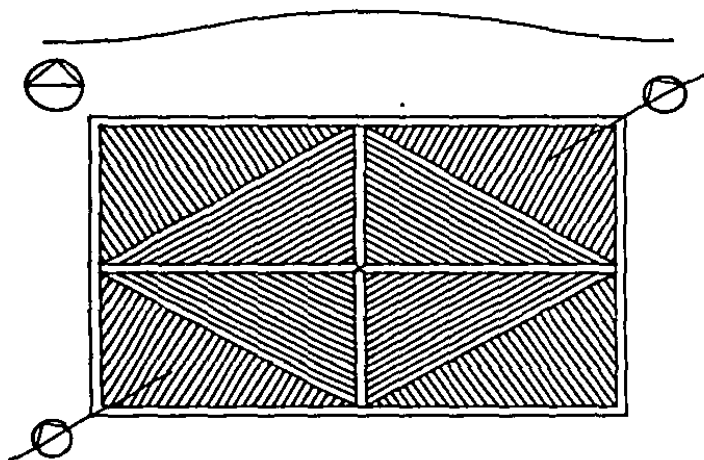
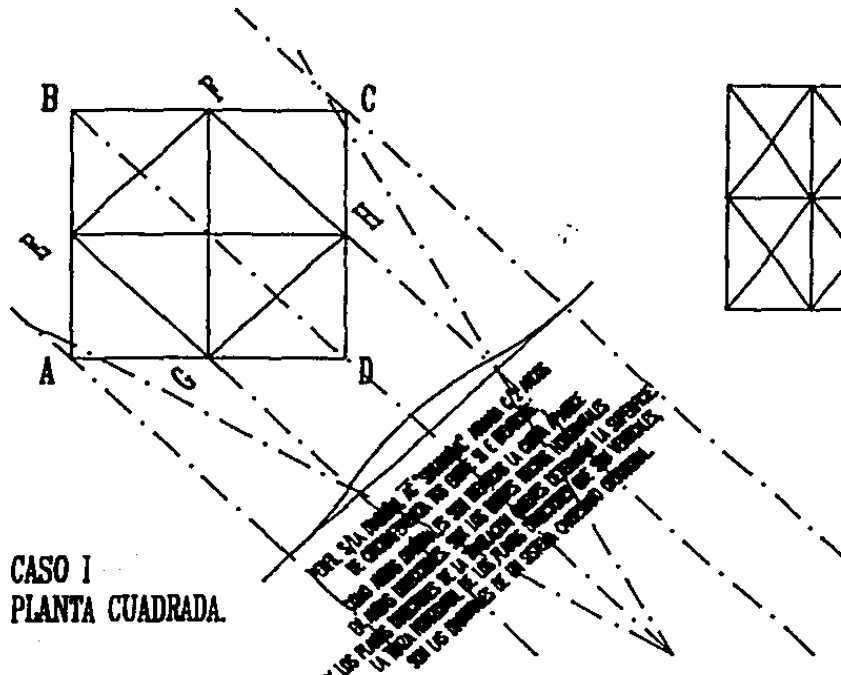


fig. 5

BOVEDAS GENERADAS CON ARCOS DE CURVATURA CONSTANTE .

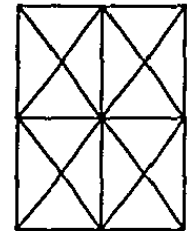
SOLUCION GENERAL DE BOVEDAS RECTANGULARES.

FIG. 6



CASO I
PLANTA CUADRADA.

PER SU FORMA DE "DOME" PARA QUE
SE CONSERVA EN SU FORMA Y QUE
SE PUEDA CONSTRUIR EN LOS PAISES
LA MAYORIA DE LOS PAISES DEL MUNDO
SON LOS PAISES DE LA ZONA TROPICAL.



CASO II PLANTA RECTANGULAR

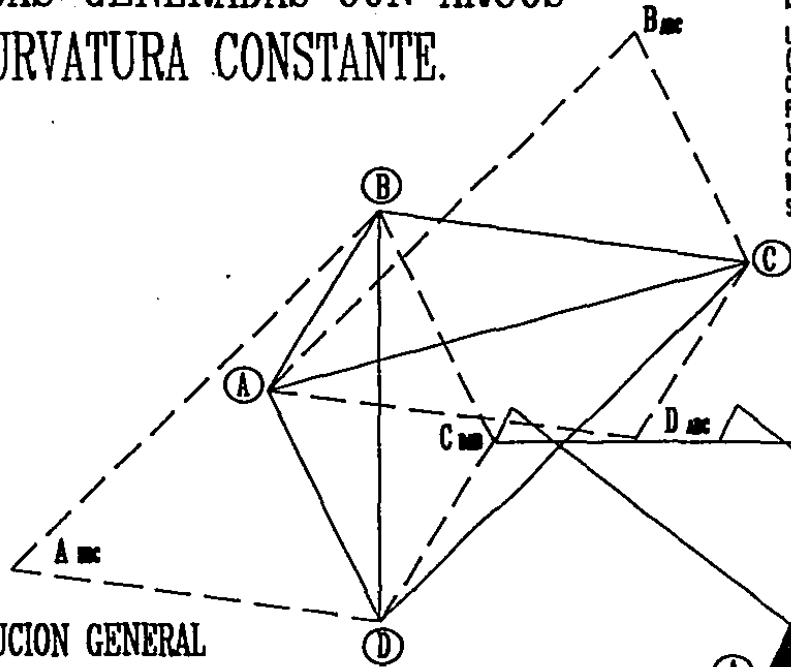
TAMBIEN AUNQUE LAS DIMENSIONES SON DIFERENTES
LA SUPERFICIE SE GENERA COMO EN EL CASO I
PERO EN UN SISTEMA COORDENADO QUE NO ES
ORDINARIO.

Ambos casos se ejemplifican
con las bovedas de madera
para el evento en Metepec
Estado de Mexico.

BOVEDAS GENERADAS CON ARCOS DE CURVATURA CONSTANTE.

Junio 21 de 1900

Fig. 7

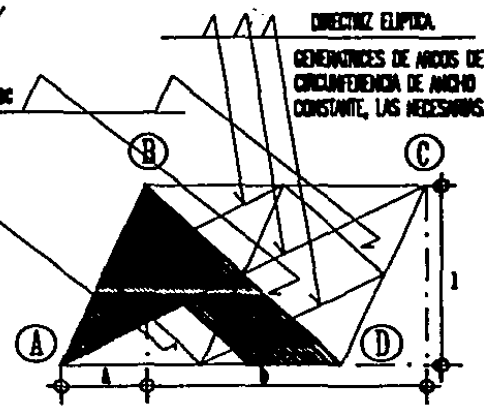


SOLUCION GENERAL PARALELOGRAMO.

DEPENDE DE LA RELACION DE LONGITUD DE LAS DIAGONALES.
 HAY QUE ELEJIR UNA DIAGONAL DE LAS DOS PARA GENERATRIZ Y PROYECTAR ESA CURVA SOBRE LA OTRA DIAGONAL QUE SERA LA CURVA DIRECTRIZ.
 PARECE RAZONABLE ELEJIR LA DIAGONAL MENOR PARA GENERATRIZ Y USAR ASI MATERIAL STANDARD.
 LA DIRECTRIZ ELIPTICA ESPECIAL PODRA SEGUIRSE ACOMODANDO MAS HILAS STANDARD.

SOLUCION GENERAL TRAPECIO

LAS DIAGONALES AC Y BD DEL TRAPEZOID PERMITEN CREAR (2) DOS PARALELOGRAMOS CON GENERATRICES DE ARCO DE CIRCUNFERENCIA Y CON DIRECTRICES ELIPTICAS DISTINTAS PARA CADA UNO DE LOS PARALELOGRAMOS PERO CON TANGENTE HORIZONTAL EN EL PLANO VERTICAL QUE CONTIENE A LA GENERATRIZ SINUSOIDAL COMUN, BASE INICIAL DE TRAZO PARA AMBOS. SON POSIBLES (4) PARALELOGRAMOS, (2) PARA CADA DIAGONAL.



$$\overline{AC} = \sqrt{1^2 + (b+a)^2}$$

$$\overline{BD} = \sqrt{1^2 + (b-a)^2}$$

c). GEOMETRIZACION

A partir del análisis anterior y del ensayo de Industrialización que se presentó en Metepec, se buscó una geometría similar que se pueda controlar de manera muy sencilla como se estableció antes.

Así decimos ahora que las trompas serán arcos de circunferencia definidos por dos bordes horizontales que concurren en un vértice o "rincón" del local que se desea cubrir, sobre ellos, gravita un sistema de arcos de circunferencia concéntricos entre sí y con una bóveda esférica se cubre la porción central del local, ambas superficies son tangentes entre sí. La trompa, así generada, es un segmento de hiperboloide de revolución de un manto, generado por rectas horizontales que no son paralelas a la bisectriz del ángulo del rincón y que son los bordes superiores de los muros.

La condición para controlar estas superficies es mantener los arcos de circunferencia paralelos entre sí, contenidos en un sistema de planos directores verticales y normales a la bisectriz del ángulo del rincón. Todos estos arcos son concéntricos y resultan de la intersección entre los planos directores y los conos que, generados por los radios, vienen del centro de la superficie a todos los puntos de los bordes horizontales (ver figura 8).

La zona central de la bóveda esférica, se genera manteniendo constante el radio del arco "boquilla de la trompa".

Ejemplos de aplicación :

Ahora y de manera muy sencilla, se presenta la forma de control-

lar la geometría de diferentes plantas poligonales o cuadrangulares regulares e irregulares, según el grado de variación de cada una de ellas.

Uno de estos casos es el resultado de una serie de intentos a fin de encontrar la geometría que resuelva la cubierta en forma de bóveda para una cisterna en Santa María Ahuacatitla, Estado de Morelos, dicha cubierta bien puede ser para otro género de edificio cuya idea sea cubrirlo mediante una bóveda sin cimbra.

El ejercicio establece una planta cuadrangular, en que ninguno de los ángulos que forma dicho cuadrángulo es perpendicular uno con respecto al otro, sin embargo, debido al espesor de los muros perimetrales se planteó como solución ajustar dicha geometría a fin de tener al menos dos ángulos rectos en planta.

Mediante el ajuste se optó por considerar dos medias bóvedas y en su zona central un tramo cilíndrico, bóvedas cuyo desarrollo es esférico y que en sus esquinas presentan trompas tangentes a las bóvedas esféricas (Ver SOLUCION GENERAL A LAS BOVEDAS DE LADRILLO).

El siguiente ejemplo es el resultado de la aplicación de este sistema constructivo utilizado para cubrir una iglesia en construcción ubicada en la colonia Benito Juárez en México, D.F.

El ejercicio establece una planta trapezoidal, en la que los muros perimetrales ya estaban contruidos, por lo que se planteó nuevamente ajustar su geometría para formar ángulos convenientes en la planta.

Una vez logrado este ajuste se optó por dividir en secciones triangulares la planta para ir formando las trompas tangentes

(ver figura 9) hasta obtener un exagono central donde se construirá una linternilla.

BOVEDAS DE LADRILLO III

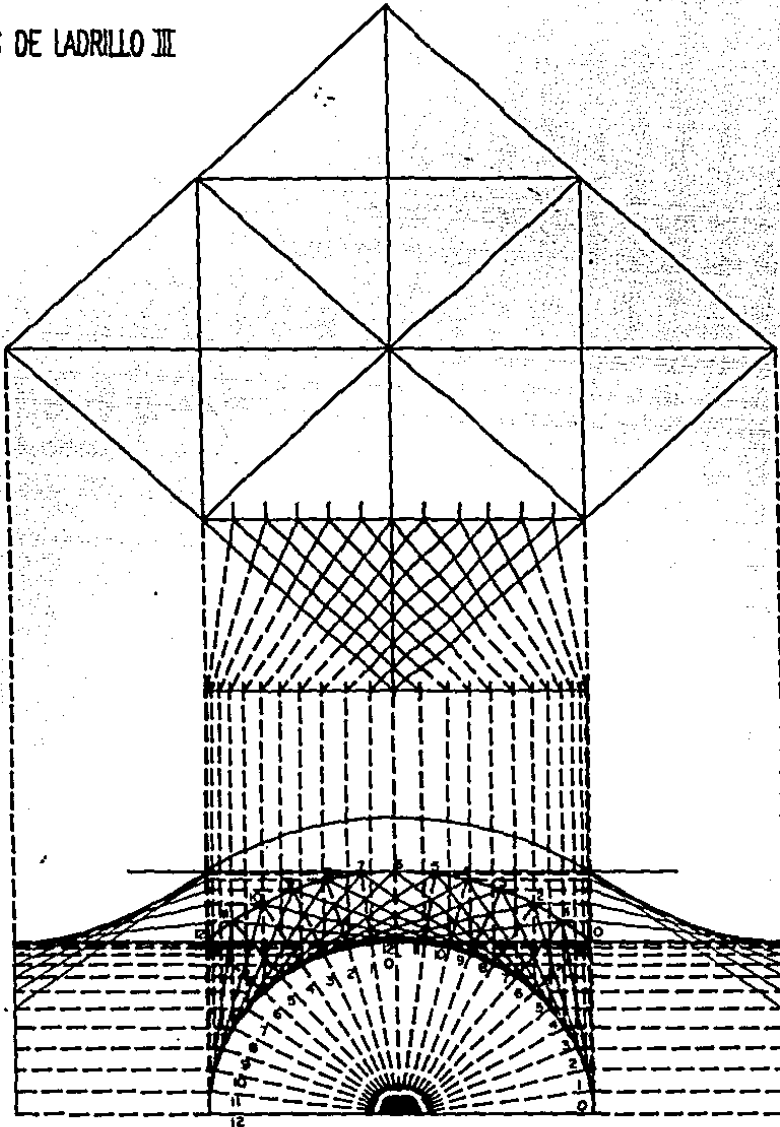
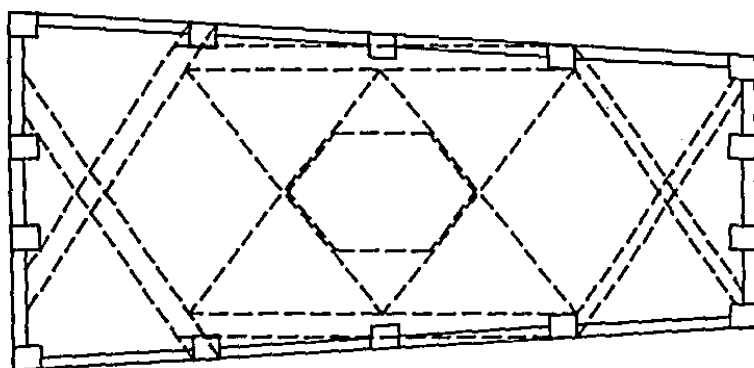


fig. 8

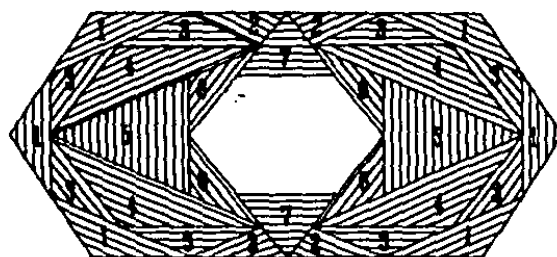
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

SOLUCION DE CUBIERTA SIN CIMBRA EN IGLESIA COLONIA PASTORA.



muros perimetrales
traves de concreto

planta arquitectónica



desarrollo de la cubierta

Los números indican la secuencia de construcción de la bóveda.

fig. 9

d). SOLUCION GENERAL A LAS BOVEDAS DE LADRILLO.

Determinación de la geometría de una planta cuadrangular cualquiera.

Sea un cuadrilátero irregular cualquiera.

Se trazan las bisectrices de cada uno de sus vértices, en el primer cruce de estas, (en uno y otro lado) obtendremos dos puntos, que para efectos de esta explicación llamaremos O y O' (ver figura 10).

Después se traza una normal a cada uno de los lados por el cruce de las bisectrices. Al punto de origen de estas normales lo llamaremos P y P' , respectivamente.

Se determinan los límites de las pechinas con una normal a la bisectriz de cada ángulo que pase por los puntos P y P' , según sea el caso, y que corte con el otro lado del cuadrilátero, a estos nuevos puntos los llamaremos A , B , A' y B' .

Si analizamos la figura, podemos afirmar que la distancia entre los puntos O y O' y los puntos A , B , P y A' , P' es la misma, (por triángulos semejantes) lo que quiere decir que podemos trazar un arco de circunferencia que pase por los puntos antes mencionados y con centro de O y O' , respectivamente.

Si trazamos una recta que pase por los puntos A , B y A' , B' encontraremos que siempre son paralelas, esto demuestra que las

esferas generadas por los arcos de circunferencia, antes mencionados, están contenidas en un cono y los segmentos que las unen son siempre tangentes a ambas, siempre y cuando los ejes de las mismas coincidan con el eje del cono.

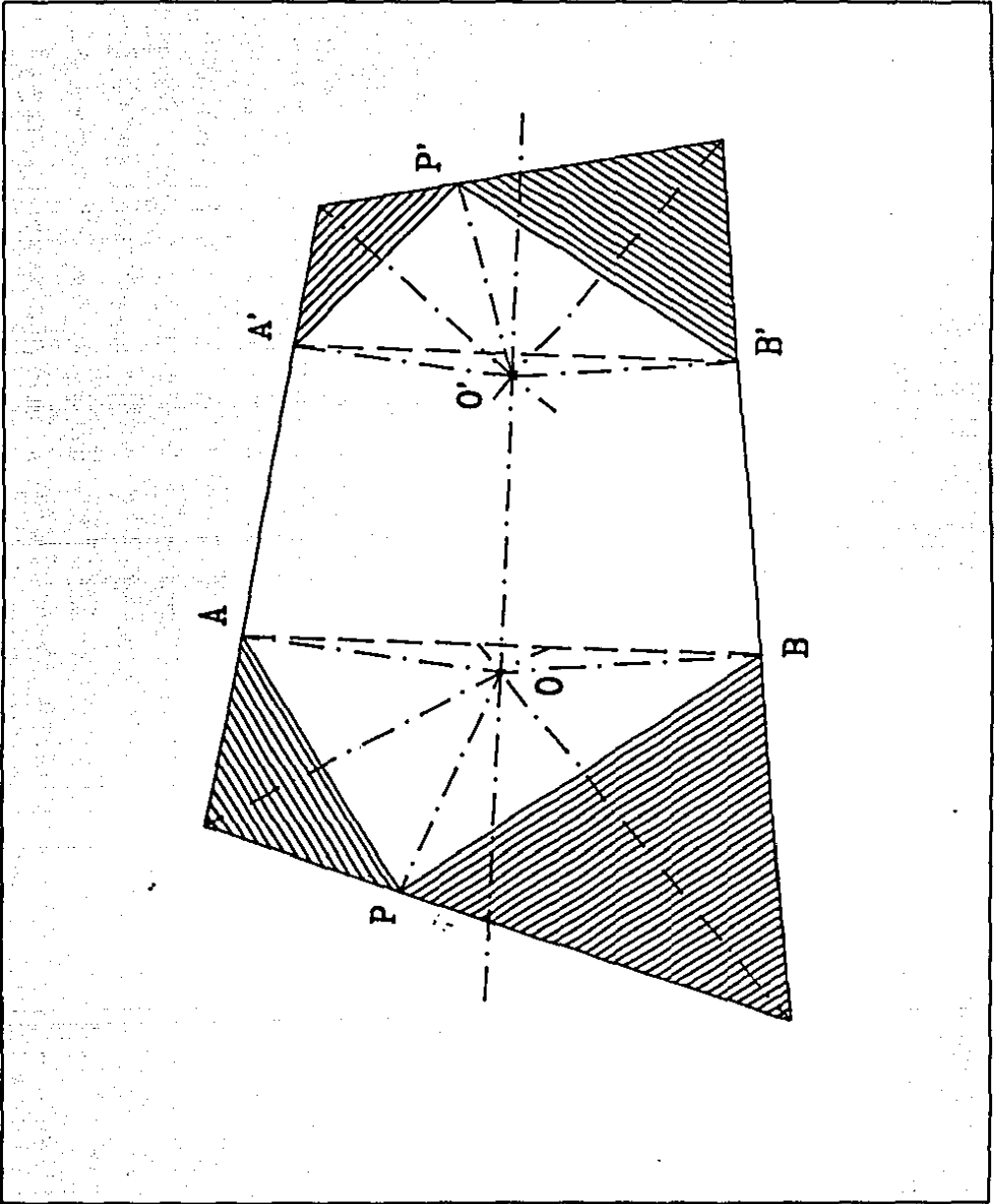


fig. 10

e). CONCLUSION.

Vivimos otra vez la situación de cambio, la relación costo, material, salario ha sido transformada, los gastos indirectos han crecido, la eficacia de métodos y procedimientos es cada vez más importante.

La "puesta a punto" del método hace tropezar con factores tan humanos como la ambición del obrero que sabe "voitear bóvedas" y empieza a incrementar su precio, por que los que son como él no abundan. Esto nos lleva al terreno de la industrialización en madera y en concreto de las bóvedas de traslación.

Precolar dovelas iguales o doblar arcos iguales para usarlos indistintamente como directrices o generatrices y así eliminar a los expertos.

El reto ahora es, con estos métodos, reencontrar la imagen de nuestro tiempo.

NOTA FINAL.

Los principios para el análisis de esfuerzos en estas bóvedas son el concepto de "Campos de Fuerza" como una extensión a tres dimensiones de las líneas de fuerza que expone F. Shanley en su libro.

El resto se funda en los conocimientos de Geometría y Resistencia de Materiales que posee cualquier arquitecto.